

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	異常診断の性能向上を図るための信号処理技術の高度化に関する研究
Title(English)	A Study on Advanced Signal Processing Technique for Improvement of Diagnosis Performance
著者(和文)	高山潤也
Author(English)	Jun-ya Takayama
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:乙第4021号, 授与年月日:2010年3月31日, 学位の種別:論文博士, 審査員:
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:乙第4021号, Conferred date:2010/3/31, Degree Type:Thesis doctor, Examiner:
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

平成 21 年度 学位論文

異常診断の性能向上を図るための
信号処理技術の高度化に関する研究

A Study on Advanced Signal Processing Technique
for Improvement of Diagnosis Performance

東京工業大学

大学院理工学研究科 機械制御システム専攻

高山 潤也

論文要旨

本論文では、安全・安心のための診断技術に関する信号処理技術につき、診断性能の向上を図ることを目的とした高度化の視点と具体的な方法論の構築、さらにそれらの体系整理を目指した成果について述べている。診断のための信号処理技術には高い信頼性・効率性が要求されるだけでなく、処理対象となる「診断波形」のもつ非定在性や特異な波形形状が理由となり、一般の時間平均的処理技術によって扱うことが非常に難しい。本研究は、波形形状モデルを導入して信号処理へ適応性を与えることを軸に、診断波形の性質に起因した課題を克服し、異常情報分析を効果的に実現する信号処理技術を提案するものである。

はじめに基本信号処理技術による解析を主要な診断波形へ適用し、信号処理対象として議論すべき診断波形と、その信号処理上の問題点、すなわち波形生起の時間局所性と時間平均処理との不整合性について確認した。そして、非定在性波形に適した信号処理技術の検討が必要であり、その実現に際しては、診断波形の「生起検出」と診断対象の「情報分析」の2つの処理機能を実装することの必要性を導き出した。さらに各処理機能を詳細に分析し、生起検出では診断波形の生起位相と、情報分析では診断対象の伝達特性既知度とそれぞれ関連する、診断対象の属性に応じて選択的に適用される処理機能レベルを設ける有効性を指摘した。次いで既に提案されている異常診断と関連深い信号処理技術を分析し、処理機能の具体的な実現に向けた基本指針を「波形形状モデルの利用」と「時間局所性の付与」へと定めた。

これら検討結果を踏まえ、診断波形の時間局所性と診断対象の伝達特性既知度が、1. 局在型・未知の「回転機器の軸受異常診断」、2. 確定型・伝達関数の「マイクロ波レーダによるコンクリート中の鉄筋径診断」、3. 遍在型・伝達素性の「光ファイバ触針走査による紙幣診断」を典型的な診断対象に採り挙げ、信号処理法の構築を試みた。「回転機器の軸受異常診断」では、生起位相が不確定な局在型波形の生起検出が実現し難い。そこで新たに波形テンプレートを利用した確率論的アプローチに基づく技術として、テンプレートと診断波形とのマッチングを条件付き確率値として評価し、この確率値を基に生起検出を実現する手法を構築した。この結果、診断波形の時間局所性や背景雑音の影響を抑制した、選択性に優れた生起検出が可能となった。また情報分析技術として、提案した生起検出法を応用する波形パラメータ抽出法も提案し、回転機器の軸受診断シミュレーション・実験を通してこれらの有効性を検証して、十分な処理性能を提供できることを確認した。また「マイクロ波レーダによるコンクリート中の鉄筋径診断」では、生起位相が確定的な波形に関し、診断対象の定量情報分析技術の実現を中心に検討した。生起検出のための相互相関包絡線法では、相関評価はもとよりSN比向上のための差分処理にまで波形形状モデルを利用し、選択性の向上を図った。主題の情報分析技術では、重ね合わせにより正確性を高める逆投影ヒストグラム法の導入と、先見的伝達特性を考慮したその重ね合わせ情報のインパルス化を組み合わせることで鉄筋像の鮮鋭化を図り、位置・

径・材質の定量評価を実現した．試験体・実構造物に対する実験では，定量評価精度の大幅な改善を確認した．さらに「光ファイバ触針走査による紙幣診断」では，生起位相情報を波形自身に畳み込んだ波形に関し，複数の波形特性の統合的な利用によって信号処理の選択性・正確性を高めることを目指した．生起検出技術として，非定在性波形の生起位相情報を検出が容易な定在性波形を基に抽出して検出処理へフィードバックする手法を，また情報分析技術として，定在性波形と非定在性波形それぞれから抽出できる金種と真贋情報を統合利用する紙幣評価法を提案し，選択性・正確性を同時に向上させた．実験を通してこれらの有効性を検証した結果，真贋・金種とも実用に十分耐えうる正解率を達成するに至った．

これら具体的な診断対象に対する検討結果を基に，提案してきた信号処理技術につき，信頼性を尺度として生起検出・情報分析における各処理機能の位置付けを整理した．さらに本研究を通して得たひとつの知見として，診断のための信号処理技術には診断対象との適応性を高めるための自由度が必要であり，波形形状モデルがその役割を負っていたことを指摘した．そして，本研究で提案した信号処理技術では「診断対象の属性に関する既知情報の相違」への適応を試みており，生起検出処理および情報分析処理は，それぞれ診断波形の生起位相あるいは診断対象の伝達特性既知度の相違に応じて処理機能レベルが選択されることに言及した．また必ずしも十分とは言えないものの，検出・分析の処理機能を分離してカスケードに組み合わせる階層型処理の有効性についても議論し，その着想に基づいて信号処理技術の体系整理を試みた．最後に信号処理技術としての新たな機能の創出という視点から，提案した特徴的な信号処理技術の意義を考察するとともに，研究の将来展望として他分野への応用可能性について触れた．

目 次

第 1 章	緒言	1
1.1	研究の背景	1
1.1.1	社会の安全・安心と診断技術	1
1.1.2	診断システムにおける信号処理技術の役割	3
1.1.3	診断のための信号処理技術の現状	7
1.2	本研究の目的	8
1.3	本論文の構成	9
第 2 章	診断のための信号処理技術構築に際する指針	13
2.1	診断波形の性質とその信号処理における課題	13
2.1.1	時間局所性に着目した診断波形の整理	13
2.1.2	基本信号処理技術の適用可能範囲	17
2.1.3	診断のための信号処理技術としての課題	25
2.2	診断のための信号処理技術の要件	27
2.2.1	信号処理におけるアプローチの相違	27
2.2.2	診断のための信号処理技術に求められる処理機能	28
2.2.3	生起検出と情報分析	30
2.3	診断のための信号処理技術としてみた先行技術	32
2.3.1	ウェーブレット変換による局在型波形成分の分析	33
2.3.2	逆フィルタを用いた背景雑音成分の低減	35
2.3.3	GA を利用した診断波形成分の検出	37
2.3.4	獲得された知見の整理	39
2.4	信号処理技術の構築に向けた基本指針	42
2.4.1	波形形状モデルの導入	42
2.4.2	時間局所性の付与	42
2.5	本章のまとめ	43
第 3 章	回転機器の軸受異常診断における局在型波形の信号処理	45
3.1	診断波形生起の時間局所性	45
3.1.1	波形生起の時間局所性に起因した生起検出の難しさ	45
3.1.2	回転機器の軸受異常診断	46
3.1.3	生起検出処理を実現するための信号処理の基本的アプローチ	48

3.2	局在型波形の生起検出のための確率論的アプローチ	49
3.2.1	生起検出のための基本的な考え方	49
3.2.2	波形テンプレートによる同時確率的生起検出	49
3.2.3	差分処理による選択性の向上	52
3.2.4	条件付き確率の導入による検出感度の向上	53
3.3	波形パラメータ抽出のための確率論的アプローチの拡張	55
3.3.1	生起率分布への拡張	55
3.3.2	対称生起率分布と非対称生起率分布	56
3.3.3	診断波形の波形パラメータ抽出の実現	57
3.4	信号処理性能のシミュレーション的検証	58
3.4.1	模擬計測波形の準備	58
3.4.2	波形テンプレートの準備	59
3.4.3	生起検出処理としての有効性	61
3.4.4	情報分析処理としての有効性	65
3.4.5	信号処理技術の優位性比較	67
3.5	診断実験: 回転機器の軸受異常に関する診断	69
3.5.1	実験装置の構成と診断波形の観測	69
3.5.2	生起率分布の算出	70
3.5.3	生起検出・情報分析性能の検証	72
3.6	本章のまとめ	74
第4章	紙幣の偽造診断における偏在型波形の信号処理	75
4.1	診断波形形状の特異性	75
4.1.1	波形形状の特異性に起因した生起検出・情報分析の難しさ	75
4.1.2	光ファイバ触針走査による紙幣診断	76
4.1.3	検出・分析処理の両立を図るための信号処理の基本的アプローチ	77
4.2	光ファイバ触針の走査波形を利用した紙幣診断	79
4.2.1	光ファイバ触針走査装置の構成	79
4.2.2	計測波形から分析できる表面性状情報	80
4.2.3	紙幣診断の実現可能性	82
4.2.4	診断波形として有効な波形成分	85
4.3	偏在型波形の生起検出のための波形特性の統合利用	87
4.3.1	定在性診断波形としての低周波数成分の生起検出	88
4.3.2	非定在性波形の波形形状モデル	88
4.3.3	生起規則情報を統合化した生起検出の実現	91
4.4	診断対象の定性評価のための波形特性の統合利用	93
4.4.1	波形特性の統合利用と情報分析の試み	93
4.4.2	真贋・金種の独立抽出	97

4.4.3	抽出量を統合利用した紙幣分析の実現	99
4.5	診断実験: 実紙幣の診断	101
4.5.1	金種・真贋の抽出結果	101
4.5.2	定性評価性能の検証	103
4.5.3	定量評価への拡張的応用可能性	103
4.6	本章のまとめ	104
第5章	コンクリート構造物の耐震診断における確定型波形の信号処理	105
5.1	診断波形形状への情報畳み込み	105
5.1.1	波形形状への情報の畳み込みに起因した情報分析の難しさ	105
5.1.2	マイクロ波レーダによるコンクリート中の鉄筋径診断	107
5.1.3	情報分析処理を実現するための信号処理の基本的アプローチ	108
5.2	マイクロ波レーダによる内部構造診断法	108
5.2.1	マイクロ波レーダによる埋設物探査原理	108
5.2.2	レーダ画像による内部構造情報の表示	109
5.2.3	埋設物の情報分析に関する現状	110
5.3	確定型波形のための生起検出処理	111
5.3.1	生起検出のための相互相関包絡線法	111
5.3.2	波形干渉による選択性の低下	112
5.3.3	波形形状モデルを利用した干渉抑制技術	113
5.4	診断対象の定量評価のための先見的伝達特性を利用するアプローチ	114
5.4.1	相互相関包絡線法による伝搬時間・反射位相の抽出	114
5.4.2	逆投影ヒストグラム法による境界面像再構成	116
5.4.3	先見的伝達特性を利用する境界面像の鮮鋭化	118
5.4.4	境界面像に基づいた埋設物の定量評価	122
5.5	診断実験: コンクリート構造物の内部診断	123
5.5.1	構造物内部診断のための信号処理	123
5.5.2	実験装置の構成と試験体の性状	125
5.5.3	鉄筋・配管に対する定量評価性能の検証	128
5.5.4	実コンクリート壁への応用	132
5.6	本章のまとめ	136
第6章	診断のための信号処理技術の高度化に関する議論	137
6.1	診断のための信号処理技術の体系整理	137
6.1.1	非定在性波形の生起検出処理	137
6.1.2	診断対象の情報分析処理	141
6.1.3	階層型処理に基づいた信号処理の体系化	144
6.2	信号処理技術の構築を通して得られた知見	149

6.2.1	適応性を高めるための自由度の必要性	149
6.2.2	診断対象の先見的属性の相違に着目した信号処理技術の構築 . . .	150
6.2.3	逆問題の性質が診断性能に及ぼす影響	152
6.3	本研究で提案してきた信号処理技術の意義	153
6.3.1	確率論的アプローチに基づいた生起検出技術	153
6.3.2	先見的伝達特性に基づいた情報分析技術	154
6.3.3	波形特性を統合利用した選択性・正確性向上技術	155
6.4	本章のまとめ	156
第 7 章	結言	157
7.1	本論文のまとめ	157
7.2	残された課題	160
7.3	今後の展望	161
参考文献		163
謝辞		179

图 目 次

1.1	Relations between diagnosis target, diagnosis system and users	3
1.2	Configuration of diagnosis system	4
1.3	Relation between sensing and signal processing on general inverse problem	5
1.4	Relations between sensing and signal processing on inverse problem of diagnosis	6
1.5	Structure of this thesis	10
2.1	Schematic view of test waves and definitive nonstationary diagnostic waves	14
2.2	Schematic view of biased nonstationary diagnostic waves	15
2.3	Schematic view of localized nonstationary diagnostic waves	16
2.4	Classification of diagnostic waves on diagnosis	17
2.5	Vibration waveforms on shaft bearing of rotating machine with disturbed rolling surface	19
2.6	Auto-correlation for vibration waveform on shaft bearing of rotating machine	20
2.7	Power spectrum for vibration waveform on shaft bearing of rotating machine	21
2.8	Acoustic vibration waveforms on hammering test for debonding concrete wall	22
2.9	Auto-correlation for acoustic vibration waveform on hammering test . . .	22
2.10	Power spectrum for acoustic vibration waveform on hammering test . . .	23
2.11	Vibration waveforms on shaft bearing of rotating machine with flaking damage for different damage levels	24
2.12	Auto-correlation for observed waveform on shaft bearing of rotating ma- chine with flaking damage	25
2.13	Power spectrum for observed waveform on shaft bearing of rotating ma- chine with flaking damage	26
2.14	Schematic view of detection and evaluation process in signal processing for diagnosis	29
2.15	Three process levels on arising detection of diagnostic waves	30
2.16	Three process levels on state evaluation of diagnostic target	31
2.17	Wavelets in time domain and frequency domain	34

2.18	Fourier spectrum and time-frequency distribution of wavelets for vibration signal of gearwheel	35
2.19	Diagnosis example by inverse filter method for shaft bearing vibration . .	37
2.20	Extraction process for abnormal signal waveforms by using GA	38
2.21	Relation between genetic locus and each frequency elements	38
2.22	Diagnosis example by using abnormal signal extraction method based on GA for shaft bearing vibration	40
3.1	Example of localized nonstationary diagnosis waveforms	46
3.2	Schematic view of experimental bearing test system	47
3.3	Photograph of experimental bearing test system	47
3.4	Experimental observed waveforms for bearing test specimen	48
3.5	Scheme of waveform template for localized nonstationary diagnostic waves	50
3.6	Schematic view of arising detection based on joint probability logic . . .	51
3.7	Schematic view of arising detection based on conditional probability logic	54
3.8	Scheme of enhanced waveform template	56
3.9	Waveform and power spectral density of simulated observed waveforms .	59
3.10	Concrete design of waveform template	60
3.11	Joint probability distributions of observed waveform F_3^{100}	62
3.12	Differential joint probability distributions of observed waveform F_3^{100} . . .	62
3.13	Arising-ratio distributions of observed waveform F_3^{100}	63
3.14	Asymmetrical arising-ratio distributions and evaluated characteristic parameters for observed waveforms $R2_3^{**}$ and $R4_3^{**}$	64
3.15	Asymmetrical arising-ratio distributions for observed waveforms $N2_3^{100}$ and $N10_3^{100}$ and evaluated characteristic parameters for $N2_3^{**}$, $N10_3^{**}$ and $N50_3^{**}$	66
3.16	Evaluated characteristic parameters from observed waveforms $F_1^{**} \sim F_5^{**}$ from Π_N	67
3.17	Symmetrical and asymmetrical arising-ratio distributions and evaluated characteristic parameters for observed waveforms I_3^{**}	68
3.18	Experimental observed waveforms and their power spectral densities for bearing test specimen	71
3.19	Cross section of arising-ratio distributions Π_D of experimental observed waveforms on damping factor $\zeta=0.3$	72
3.20	Relations between number of signals and amplitude on localmaximum of contamination-ratio distributions	73
3.21	Relations between extracted eigen frequency, damping factor and amplitude of experimental observed waveforms	74
4.1	Example of nonstationary diagnostic waves on cardiac electrogram	76

4.2	Configuration of optical fiber feeler scanning system	78
4.3	Photograph of optical fiber feeler scanning system	78
4.4	Side view of alignment for optical-fiber feeler and test specimen of notes .	80
4.5	Equivalent imaging point derived from direct and reflected beam	80
4.6	Dynamical model of stick-slip phenomenon	81
4.7	Schematic view of stick-slip phenomenon	82
4.8	Measured scanning waveform derived from rough and smooth surface . .	82
4.9	Measured scanning waveform derived from black and white print pattern	83
4.10	Scanning line for 2,000Yen note covering intaglio prints	84
4.11	Roughness on scanning line for 2,000Yen note including intaglio prints . .	84
4.12	Measured scanning waveforms for genuine note	85
4.13	Measured scanning waveforms for counterfeit note	86
4.14	Extracted low-frequency component from observed waveform of 2,000Yen note as stationary diagnostic waveform	88
4.15	Waveform template of stick-slip component	89
4.16	Relations between L_n and θ_n for detected stick-slip component	90
4.17	Relations between L_n and θ_n for stick-slip component on print and non- print part	92
4.18	Schematic view of SDP transform	94
4.19	Examples of SDP	95
4.20	Schematic view of SPDF	96
4.21	Examples of SPDF	97
4.22	Process flow of signal processing for circulated notes in market	99
4.23	Histogram of index ρ for intaglio print part of new and circulated notes in market	104
5.1	Acoustic vibration waveforms on hammering test for debonding concrete wall (Redisplay)	106
5.2	Appearance of hammering test for debonding concrete wall	106
5.3	Observed microwave for buried pipe in concrete wall	107
5.4	Appearance of microwave radar survey	107
5.5	Principle of internal construction estimation by using microwave radar .	109
5.6	Example of conventional radar image	110
5.7	Observed waveforms including diagnostic waveform and their model-fitness with buried objects near concrete surface	112
5.8	Observed waveforms including diagnostic waveform and its model fitness without buried objects	114

5.9	Observed waveforms including diagnostic waveform and their model-fitness after nominal surface wave model subtraction	115
5.10	Schematic view of back projection for observed wave	116
5.11	Schematic view of observed points selection on back projection histogram method	117
5.12	Reconstructed back projection histogram images of buried objects near concrete surface	118
5.13	Schematic view of boundary model fitness	120
5.14	An example of boundary model fitness	121
5.15	Reconstructed back projection histogram image by using boundary model fitness	121
5.16	Signal processing flow for evaluation of position, diameter and material information for buried objects	124
5.17	Configuration of experimental microwave radar system	125
5.18	Photograph of experimental microwave radar system	126
5.19	Cross-section and dimensions of concrete test specimen No.1~4.	126
5.20	Boundary back projection histogram images for concrete test specimen No.1~4	130
5.21	Material evaluation images for concrete test specimen No.1~4	131
5.22	Relation between actual and evaluated diameters for metallic buried objects	132
5.23	Photograph of actual concrete wall to be surveyed	133
5.24	Example of X-ray photograph of actual concrete wall	133
5.25	Internal construction of reinforcing bars reconstructed from X-ray photographs and scanning lines for actual concrete wall	134
5.26	Radar image and evaluated boundary image for scanning lines on concrete wall for scanning line No.1	134
5.27	Radar image and evaluated boundary image for scanning lines on concrete wall for scanning line No.2	135
5.28	Radar image and evaluated boundary image for scanning lines on concrete wall for scanning line No.3	135
6.1	Schematic view of three process levels on arising detection of diagnostic waves	138
6.2	Level of health check on medical field	138
6.3	Relations between alarm ratio and miss or false alarm ratio	140
6.4	Relations between selectivity and calculation amount on process level for arising detection	140

6.5	Schematic view of three process levels on state evaluation of diagnostic target	142
6.6	Level of consultation on medical field	142
6.7	Relations between strictness and calculation amount on process levels of state evaluation	143
6.8	Schematic view of hierarchic signal processing technique combined by waveform detection and state evaluation	145
6.9	Relation between signal processing class and evaluation accuracy	146
6.10	Schematic view of reliability on proposed hierarchic signal processing technique	147
6.11	Schematic view of 2D-compressed reliability on proposed hierarchic signal processing technique	148
6.12	Application of signal processing level for diagnostic waves	150
6.13	Relations between diagnostic types and diagnostic waves	151
6.14	Relations between sensing and signal processing on inverse problem of diagnosis (Redisplay)	152
6.15	Enhancement of state evaluation accuracy based on usage of using transfer function	155
6.16	Enhancement of state evaluation accuracy based on usage of characteristic parameters fusion method	156

表 目 次

2.1	Statistics values for vibration waveform on shaft bearing of rotating machine	20
2.2	Statistics values for acoustic vibration waveform on hammering test . . .	22
2.3	Statistics values for observed waveform on shaft bearing of rotating machine	24
4.1	Dominant specifications of CK-40 type optical fiber	79
4.2	Parameters of sample observed waveforms data	95
4.3	Propriety of a proposed method and transmitting light method for various type of notes	101
4.4	Index E_* for each denomination of notes	101
4.5	Indexes $\bar{\rho}$ and σ_ρ for print part	102
4.6	Indexes $\bar{\rho}$ and σ_ρ for non-print part	102
5.1	Parameters of buried objects in specimen No.1~4	126
5.2	Estimated distance and reflection phase	127
5.3	Estimated diameters of buried objects in specimen No.1~4	129

第1章 緒言

1.1 研究の背景

1.1.1 社会の安全・安心と診断技術

1.1.1.1 異常を診断するための技術

クルマは宙を自由に行き交い，家事はロボットによる全自動，作物は人工太陽の下で栽培されている．幼少期に筆者が文献で目にした，未来の想像図として描かれていた風景である．これは，高度経済成長をバックグラウンドに，産業革命を端緒とした先人達のたゆまない努力により成し遂げられてきた科学技術の進歩が，今後もそのペースを緩めることなく進んでいくことを仮定して描かれたものであった．

視点を現代に戻しても科学技術の進歩はむしろ加速度的であるといえ，我々人類を取り巻く環境も，科学技術と歩調を合わせるように絶えず進化を重ねている[1]．IT分野では，情報通信網の拡充やデータ転送速度の飛躍的な高速化に加え，ユビキタスコンピューティング[2]の概念が提唱され，情報が飛び交う仮想世界がまさに形成されようとしている[3]．また生物クローン技術などで注目を浴びる遺伝子解析・操作の分野では，もはや数十億という長い年月を経て辿り着いた生物進化の過程に手が入れられようかという時代にまでなった[4]．もちろん，筆者らが身を置く計測・信号処理分野も，それらの例外ではない．新たな計測原理・技術の開花をひとつの契機として，例えばマイクロマシニング技術と融合したセンサデバイスの微細化・多機能化[5]によって実現される局所高精度計測，あるいは通信機能を有したセンサ群のネットワーク化[6]がもたらす広域多次元同時計測など，従前には計測が困難であった物理量までもが電氣的な情報として獲得できるようになってきた．

ところが我々のごく身近な生活社会へと目を移すと，このような先端科学技術の加速度的進歩とは裏腹に，生活の基盤である安全・安心を脅かすような重大な事件・事故が後を絶たない．それどころか，近年はむしろ増加する傾向すら見受けられる．いわゆる姉齒事件[7]に代表される耐震偽装事件，シンドラー社によるエレベータ事故[8]など設備に関わる問題をはじめとし，罪の無い子供達が巻き込まれた無差別殺傷や誘拐事件[9]などの犯罪，あるいは冷凍餃子への毒物混入事件[10]やBSE問題といった食に関わる問題など，いまだ記憶に新しい．このような社会の安全・安心に関わる事件・事故を未然に防止できる技術は，科学技術の進歩が著しい今日においてさえ未だ実用化されることが無く，科学技術の進歩は社会に利便性はもたらした一方で，不安を取り除くには至っ

ていない。裏を返せば、それらは今まさに現代社会が必要としている技術であるとも言えよう [11, 12]。これは研究分野を問わず例外が無いようであるが、計測・信号処理に関する研究分野においても、前述のようにその進歩は著しいものの、社会の安全・安心へ寄与する技術については報告が少ない。さらに、このような状況に対して「計測・信号処理の研究分野から、社会の安全・安心へと貢献できることは無いのだろうか？」という問い掛けが、本研究のそもそもの発端である。

しかし、先の事件・事故の例が多方面に渡ったことから安全・安心に関わる研究分野は非常に広範であり、それらを包括的に保証する技術について考察することは、正直難しいと言わざるを得ないのもまた事実である。本研究では、計測・信号処理の研究分野との関連性の高い「異常を診断するための技術」に的を絞り、そのための信号処理技術に関する議論を展開していくこととしたい。この分野へは、先の耐震偽装事件やエレベータ事故はもちろんのこと、トンネルコンクリート壁内のクラック・空洞検出 [13] やエスカレータの異常診断 [14]、あるいは空調設備の異常診断 [15] などをはじめとして、多くの研究・開発者が注目し、診断技術開発に注力している。

1.1.1.2 診断システムの位置付け

異常のための診断技術が有効性を発揮するフィールドのひとつの例として生産設備を挙げれば、技術の進歩は、これまで人間が従事していたさまざまな作業を自動化すると同時に、設備の複雑化・高度化も強力に推し進めてきた。しかしひとたびそれらの「診断」へと目を向けたとき、オートメーション化された設備の発達状況とは対照的に、いまだ人間の判断に基づいた診断が行われているケースも圧倒的に多い。さらに設備の複雑化・高度化にともない、その安全性を人の情報処理能力のみに頼って保証することは困難になりつつあるのが現状であるが、これは何も生産設備に限った話では無い。

ところで診断技術とは「診断対象の状態を定量的に把握し、次の正しい行動を決定する技術 [16]」と表現されている。換言すれば、現在の診断対象の正確な状態を分析するとともに、その将来を推測して正しい対処行動を決定するための統合的な技術を意味し、さらに「単に検査や検出を行う技術と解釈してはならない点に注意が必要である [16]」とも述べられている。先述のように診断の自動化が遅れているひとつの要因には、診断技術を実装して診断行為を自動化するいわゆる「診断システム [17]」の設計指針が、体系的に整備されていなかったことが挙げられる。ここではその診断システムの位置付けについて俯瞰し、本研究での議論の焦点を明確化していくための足掛かりとする。

Fig.1.1 は、制御系のブロック線図に倣い、「診断対象」、「診断システム」と「使用者・管理者」の関係を模式的に表したものである。診断システムは診断対象と使用者との間に介在し、異常状況とその原因を把握するための装置に当たる。そしてシステムからの情報を基にして、使用者が診断対象へフィードバックを施すことで、はじめて安全・安心が保障できる。このように診断システムは、安全・安心を保障するフィードバックループに組み込まれるため、処理に「信頼性」の高さが不可欠であると同時に、オンサイト・

1.1. 研究の背景

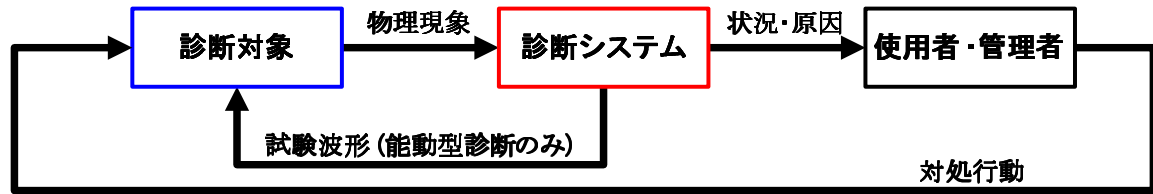


Fig. 1.1: Relations between diagnosis target, diagnosis system and users

ユビキタスな診断の実現には、同時に処理の「効率性」を高めることも望まれている。

またシステム応答的に捉えれば、診断システムがその能力を機能させるためには、(異常の発生にともなって) 診断対象の発する何らかの物理現象が入力として必要である。この物理現象を生じるためには、診断対象へ何らかの入力が与えられなければならないが、これには診断対象が自発的に内部で与えて物理現象を生じる形態、あるいは外部、すなわち診断システムからの働き掛けによって与えられる形態の2つを考えることができる。これは診断システム側から見れば、受動的あるいは能動的なシステム形態について考え得るということの意味する。受動型診断におけるこの入力文字通り受動的に与えられるもので診断システムからの制御は難しいが、能動型診断においてはその性質を比較的自由に制御することが可能となってくるために診断の自由度が広がり、より高度な診断を実現できる可能性を有している。能動型診断におけるこの働き掛けを「試験波形」と呼ぶことにするが、追って明らかにされていくように、受動型・能動型に応じた試験波形の制御性の相違に着目することは信号処理技術を考える上でのひとつの分岐点となる。ところで文献 [18] によれば、能動的センシングについて、単にエネルギーを供給するだけの「エネルギー能動性」と、センシングに関連する情報を外部から供給する「情報能動型」といった分類がなされているが、本研究においてもこのような分類を踏襲し、検討の際には考慮に入れていく。

一方で診断システムの構築に際しては、状況・原因の出力に際しても、使用者にとってより把握しやすい形式で提供されることが望まれている。文献 [19] あるいは文献 [20] などでは、マイクロ波レーダによる内部構造探査結果について、使用者にとってより視覚的に状態を分析しやすい形式へと変換を施し、提供するための技術に関する検討が試みられている。このように診断システムの構築に際しては、先にも述べたように、単に高精度な情報分析を実現するだけではなく、それらを理解して正確な意思決定をするための補助的な技術までを含め、広範な技術に関する包括的な検討が必要であるといえよう。

1.1.2 診断システムにおける信号処理技術の役割

1.1.2.1 診断システムの構造

一般的に診断システムは、Fig.1.2 に示すように、「計測系」、「信号処理系」および「推定系」の3つの要素から構成されてくる [16]。計測系は異常にともなって診断対象に発

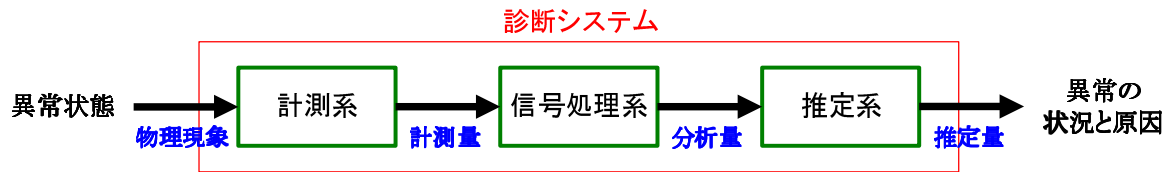


Fig. 1.2: Configuration of diagnosis system

生する何らかの物理現象を観測して電気的な計測量へと変換する．続く信号処理系は獲得された計測量から不要成分を除去することはもちろん，異常にともなう何らかの成分が生起している場合にはその生起を検出するとともに，当該成分に関するパラメータあるいはより高度な診断においては診断対象の状態を規定する情報値までを，分析量として獲得する．最後に推定系は，分析量から異常原因の候補を探索する役割を負っている．このように，診断システムを構成する3つの要素が受けもつ各機能は，それぞれ計測技術，信号処理技術，推定技術によって支えられている．

ところで，計測量を獲得するためには，計測系のセンシングデバイスによって異常にともなう物理現象が電気的な波形へと変換される必要がある．この波形は，診断のすべての基になる波形であることを考慮して本研究では新たに「診断波形」と定義することとするが，これは異常の発生にともない計測波形中に新たに生起する波形を指し，定常的に生起している背景雑音とは区別されるものであることに注意されたい．

続いて，各要素の設計指針について見ていく．はじめに計測系は，異常の発生と密接に関わって発生する物理現象の中から診断へ利用する項目を選択する．そして，センシングの構造 [21] に則り，計測対象の構造に応じた能動型・受動型といった計測形態，あるいは目的の物理現象を的確に捕えるためのセンサ自体の構造に関する検討を踏まえ，最適設計される．センサの種類は物理現象の数に等しいほど存在する [22] とも言われ，例えば温度計測ひとつを採ってもその形態には接触式と非接触式があるように，あるひとつの物理現象に対して最適な計測系を構成するにも数多くの方法論が検討されていることは，このような計測系設計の奥深さを映し出した事実とも受け取れる．

また推定系には，原因と情報量の対応関係と，それを利用して情報量から原因を探索するためのアルゴリズムが必要である．原因と情報量の対応関係には，「事例に基づくデータベース」，「熟練者の経験に基づく知識ベース」，「診断対象の物理的因果関係に基づくモデル」の3つが，また情報量から原因を推定するアルゴリズムには，「決定論的表現法」，「主観的表現法」，「確率論的表現法」の3つの方法が挙げられ，診断対象の性質と整合させながら，これらによる組合せ設計が成される．この推定技術は筆者の専門分野と無縁ではないものの，その本流からは少々外れるため，これ以上の議論に関しては文献 [23, 24] などの具体的な検討事例を参照されたい．

これらの一方で信号処理系に目を向ければ，雑音除去のためのいくつかの効果的な方法が確立されてはいるものの，診断システムのための信号処理系として，それ以上の明確な設計指針が構築されているとは言い難い．そもそも計測系によって獲得される計測

1.1. 研究の背景

波形の性質は、仮に異常にともなう影響を抜きにして考えても、診断対象の種類や詳細な構成に依存することはもちろん、適用されるセンシング形態・センサ構造といった計測系の設計にも関係しながら、大きく変化させることになる。そこへさらに異常の発生にともなった性質変化も畳み込まれてくることを考えれば、診断のための信号処理技術として体系化することが、現実的に見てかなり高いハードルとして存在してきたことは想像に難くない。そして診断システムを構成する要素技術の中で、既に計測系の設計に関する多くの方法論が整理されつつある [22] という背景的事実も踏まえれば、その次段に当たる信号処理技術の高度化について議論することの必要性が浮き彫りになってくる。

このような信号処理技術に関する議論では、単に特定の診断対象に関する診断を実現することに特化した信号処理技術について検討を重ねることはあまり意味をもたない。あくまで異常診断を実現するための一連の信号処理技術の体系として整備することに本質があり、その行為が、診断システムに実装される信号処理技術としての高度化について考察を深めていくことに他ならない。

1.1.2.2 信号処理技術の役割

筆者の知る範囲では、特定の診断対象あるいは特定の異常に起因した物理現象を念頭におく信号処理技術について議論されている事例は数多いものの、それら信号処理技術に対して一般性を付与するための検討を試みた議論が見受けられないのもまた事実である。ここでは、本研究での議論を効果的に進めていくために、診断のための信号処理技術が負う役割を明確化すると同時に、それを通して通常の信号処理技術との着目点の相違について探っていく。

診断システムにおける信号処理系は、何らかの計測機構を備えた計測系によって獲得された計測量である、計測波形を受け取ることによって機能する。すなわち計測量としての診断対象の異常状態に関連する情報が畳み込まれた時系列波形としての計測波形から、異常の有無と、その生起要因となった異常の状況と原因を推定するための情報を分析(抽出・評価)することにある。このような議論を経れば、診断における信号処理技術の役割を一言で表現すれば、「逆問題を解く」ということに集約されることがわかる。Fig.1.3は、いわゆる一般的な計測-信号処理における順問題・逆問題の構造を図示したものであるが、診断システムにおける計測系-信号処理系の関係と大きくは変わらないといえる。



Fig. 1.3: Relation between sensing and signal processing on general inverse problem

その構造をより詳細に分析し、診断における信号処理技術 (=逆問題) の特徴を見い出していきたい。Fig.1.4は、診断における順問題・逆問題の構造を詳細に図示したもので

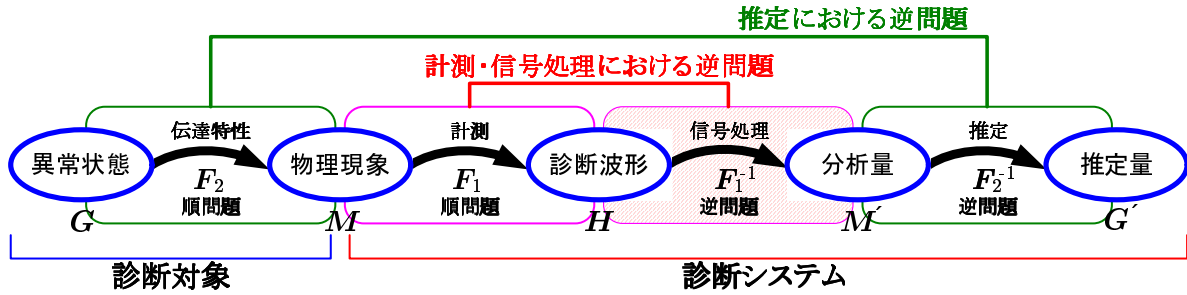


Fig. 1.4: Relations between sensing and signal processing on inverse problem of diagnosis

ある．診断においては異常現象の直接的計測が難しく，多くの場合はその現象に何らかの伝達特性 F_2 が介された物理現象を，さらに計測系の変換特性 F_1 を通して計測量としての診断波形を獲得することとなる．すなわち診断波形に対する信号処理だけでは直接的に異常現象の推定量へは至らず，「計測・信号処理における逆問題」と「推定における逆問題」が多重化している．信号処理の役割はあくまで逆問題を解くということに変わりはないが，その結果として獲得できる分析量は，診断という一連プロセス中でのあくまで中間情報であり，分析量に対して推定というもうひとつの逆問題を解く作業が施されることでプロセスが完了する．

さてここからは，診断における逆問題の特徴について考える．診断における逆問題は異常現象を起点にしており，これは物理量ひいては計測量の性質に影響を及ぼす．すなわち異常は常時発生する現象でなく，その結果，計測量としての診断波形も計測波形中に常時観測されるとは限らないため，診断波形には常時生起している定在性の波形と時間局所に生起する非定在性の波形とを考えなければならなくなる．さらに非定在性の診断波形の時間局所性は，診断対象あるいは先述の能動的・受動的な診断形態とも関連し，より微細に変化していくことになり，このような性質の相違・変化は逆問題の解法としての信号処理技術のアプローチへ大きな変化を要求する．あとで詳しく見ていくが，これまでの信号処理技術は，時間領域・周波数領域における信号処理法や時間周波数領域におけるウェーブレット変換法など，定在性波形・非定在性波形を一緒くたに扱おうとしている感を拒めない．換言すれば，診断波形の性質に応じた最適なアプローチ，すなわち逆問題を解くための必要条件として，診断波形の存在を確認することの必要性が浮かび上がってくる．

もうひとつの特徴は，逆問題構造の多重化に起因するものである．信号処理という逆問題解法を経て獲得される分析量は，診断プロセスにおける中間情報であるため，逆問題の伝達特性 F_1^{-1} あるいは F_2^{-1} の既知度に応じて獲得される分析量の質に幅が生じる．この既知度，言い換えれば診断対象に関する先見知識の相違が，信号処理結果である分析量の質を左右することになり，処理内容を一概に規定することが難しくなる．すなわち，診断性能は伝達特性 F_1 のみで定めることはできず， F_2 の選択もその性能を左右する重要なファクターとなる．診断設計に際しては，計測系の精度や構成の容易さのみならず，信号処理によって得られる分析量からいかに有益な異常に関する推定量を獲得で

1.1. 研究の背景

きるのか、要は伝達特性 F_2 にまでその視野を広げた検討が必要である。この点についても、本研究を通し、伝達特性 F_1 、 F_2 の選択方法に関する何らかの有効な知見を得ることができれば良いと考えている。

1.1.3 診断のための信号処理技術の現状

信号処理技術として信頼性の高さを備えることは、ことさら診断のための信号処理技術に限ったことでは無く、一般的にみて当然の事項といえる。しかしながら、「安全・安心」を標榜する診断のための信号処理技術においては、それは重要視されるべき事項である。前小節までの議論では、診断システムの構造を出発点に、信号処理技術が診断という行為の中で占める役割を明らかにするとともに、本研究のひとつの目標を異常診断のための信号処理技術の体系整理を試みる点に据えることを確認してきた。ここでは、いくつかの既存技術あるいは関連研究を採り挙げ、簡潔にレビューすることで、診断のための信号処理技術の現状・動向を確認することにしたい。

第2章において詳細に見ていくが、診断のための信号処理技術に求められる機能を要約すれば、計測系によって獲得された計測波形中から異常に関する何らかの兆候を「検出」することと、また情報抽出・評価の処理を通してその兆候から異常の程度を「分析」することにある。これら処理を実現する最も基本的な方法には、時間領域における平均・分散やモーメントといった基本統計量を利用した分析、あるいはフーリエ変換を基にした周波数領域におけるスペクトル分析など、従来からの基本信号処理技術が利用されている。しかし、診断波形の非定常性や急峻性などの理由に加え、診断対象が複雑化・高度化したことにともない、情報として分析しなければならないパラメータの絶対数は増加傾向にあり、時間領域あるいは周波数領域における解析だけでそれら全てを分析することが、現実には難しくなっている。このような背景のもと、時間領域解析と周波数領域解析の長所を融合した時間-周波数領域における信号処理技術として、短時間フーリエ変換法やウェーブレット変換法を利用した信号処理技術 [25, 26] などが研究されてきている。しかしながら、診断対象となる波形の周波数帯域が広い場合などには効果的な検出・分析ができなかったり、診断波形形状などといった先見知識は、必ずしも有効に活用されていない。

また近年では、ファジー理論やニューラルネットワークに基づいた信号処理技術 [27] が考案されているほか、当初から異常診断への適用を念頭に置いて考案された、新たな信号処理技術も出現しつつある。例えば豊田らが提案する遺伝的アルゴリズムに基づいた信号処理技術 [28] はそのひとつであり、文献 [29] では診断対象の異常にともなう計測波形中の変化分のみを抽出することを試みている。これは、背景雑音波形と異常にともなう診断波形の和によって計測波形が記述できることを仮定し、計測波形を予測背景雑音波形とそれ以外の成分とに分離することで、異常にともない生じた波形成分のみ抽出を実現する。しかしその議論の範囲は診断波形を抽出する処理だけであることに加え、その抽出精度は実背景雑音と予測背景雑音の相似度から間接的に分析されることになる。

ため、背景雑音の性質が変化するような状況には適用できていないといった課題もまた残している。

またこれとは別に、線形予測分析やカルマンフィルタ、あるいは近年広まりつつある粒子フィルタ [30] などの、情報フィルタを利用した技術も提案されてきている。たとえば、赤尾らが提案する逆フィルタ法を利用した音響診断技術 [31] では、自己回帰モデルを利用して正常時の背景雑音波形に対する逆フィルタを構成しておき、診断時の計測波形から背景雑音波形の影響のみを低減し、異常にともなう未知の診断波形に関する情報を際立たせるための技術を示している。しかしながら、先見的に獲得されている背景雑音波形を利用して逆フィルタを構成するため、背景雑音波形自体の性質が変化してしまうような場合への適用は難しく、また検出された診断波形から情報を分析することについてまではやはり言及されていない。一方、カルマンフィルタや粒子フィルタを状態空間モデルのパラメータ推定に利用し、異常にともなう生じた診断波形を推定するための技術も検討されているが、診断波形は生起する位相が未知であることから、適用する時間領域を定めることが容易でなく、またカルマンフィルタでは適用条件が白色雑音下へと限定されてしまうといった課題も抱えている。

以上のように、いずれの信号処理法についても、必ずしも決定的な技術として確立されていないのが現状といえる。このような技術的な側面からの現状確認を通して、診断への適用を念頭に置いて信号処理技術を改めて見直し、診断波形の性質と整合させてそれらを高度化するとともに、体系整理を図っていくことの必要性を伺うことができる。

1.2 本研究の目的

本研究では、計測装置によって異常状態に関する何らかの情報が畳み込まれている診断波形を計測量として獲得することが可能な診断対象を前提として、それら異常に関する情報分析を実現する、診断のための信号処理技術について検討を進める。ここまでの議論を踏まえながら本研究の主題を要約すれば、「診断波形の性質に整合した信号処理技術の構築と、その知見を基にした診断のための信号処理技術の体系化」にあると考えられる。そこで、本研究の目的を以下の3項目に大別し、その実現を目指す。

第1の目的は、診断のための信号処理技術を構築する際の着眼点を明らかにすることである。すなわち、診断のための信号処理技術では何を考えなければならないのかを、診断波形の性質を考慮に入れつつ、基本信号処理技術における問題点を指摘することとおして明確化する。さらにこの結果を受けながら、関連する先行研究における議論も踏まえながら、具体的な信号処理技術を構築する上で必須とされる機能を見出し、信号処理技術を高度化するための基本的な指針を獲得することにある。

第2の目的は、高度化が図られた具体的な信号処理技術の構築と、それらを基に信号処理の体系整理である。ここでは第1の目的によって定められた指針にしたがいながら、いくつかの診断対象事例に対する信号処理技術の構築を試みる。さらにそれらの事例に

1.3. 本論文の構成

おける検討を通して得られた知見を昇華することで，診断システムのコアを形成する信号処理技術として，その体系整理を図ることにある．

そして第3の目的は，信号処理技術として新たな機能を創出することである．後の議論を経て明確化されていくが，診断波形には従来の信号処理技術では扱いの難しい，特徴的な性質が確認できる．本研究における，それらの特徴的な性質に適応した診断のための信号処理技術の構築を通し，非定在性波形のための信号処理技術としてみた新たな機能について何らかの知見を抽出したいと考えている．

1.3 本論文の構成

本論文は，全7章から構成されている．Fig.1.5は本論文の構成について要点を整理して図示したものであるが，図中には論文構成と併せ，各章が関連する個別の研究項目とのつながりも示すようにした．以下，この論文構成図に基づきながら，各章ごとの概要について説明していく．

第2章「診断のための信号処理技術構築に際した指針」では，異常診断のための効果的・効率的な信号処理技術を構築するための指針を，基本信号処理技術への適用あるいは先行技術のレビューを通して見出す．はじめに診断波形の特徴的な性質としての時間局在性に基づきながら診断波形を整理し，あわせて基本信号処理技術が抱える問題点を浮き彫りにすることで，診断のための信号処理技術に必要とされる2つの処理機能，すなわち生起検出と情報分析の存在を明らかにしていく．また先行する異常診断と関連深い信号処理技術を採り挙げて分析し，それらの中から，信号処理技術の構築に有効な視点を抽出して，構築のための具体的な指針を導き出していく．

続く第3章から第5章では，それぞれ具体的な診断対象を挙げながら，診断波形の時間局所性に適応した信号処理技術の構築を試みていく．

第3章「回転機器の軸受異常診断における局在型波形の信号処理」では，診断波形としての局在型波形の信号処理を構築することを目指し，具体的な診断対象として回転機器の軸受診断を採り挙げる．ここでは生起検出の高度化を図ることを中心に，診断波形がもつ時間局在性の影響を受けない生起検出処理として，新たに確率論的アプローチと波形形状モデルを組み合わせた処理法を提案する．また提案する生起検出技術を応用した，情報分析のための診断波形の波形パラメータ抽出法を構築し，シミュレーションおよび実験を通して提案技術の有効性を検証する．

第4章「紙幣の偽造診断における偏在型波形の信号処理」では，偏在型波形に関する信号処理の構築を目指し，具体的な診断対象に光ファイバ触針走査による紙幣診断を採り挙げる．生起検出と情報分析という2つの処理機能を実現する信号処理技術として，診断波形の複数の波形特性を統合利用することを考える．そして，診断波形から抽出される波形パラメータを基に診断波形の時間局在性に適応した選択性を実現する生起検出処

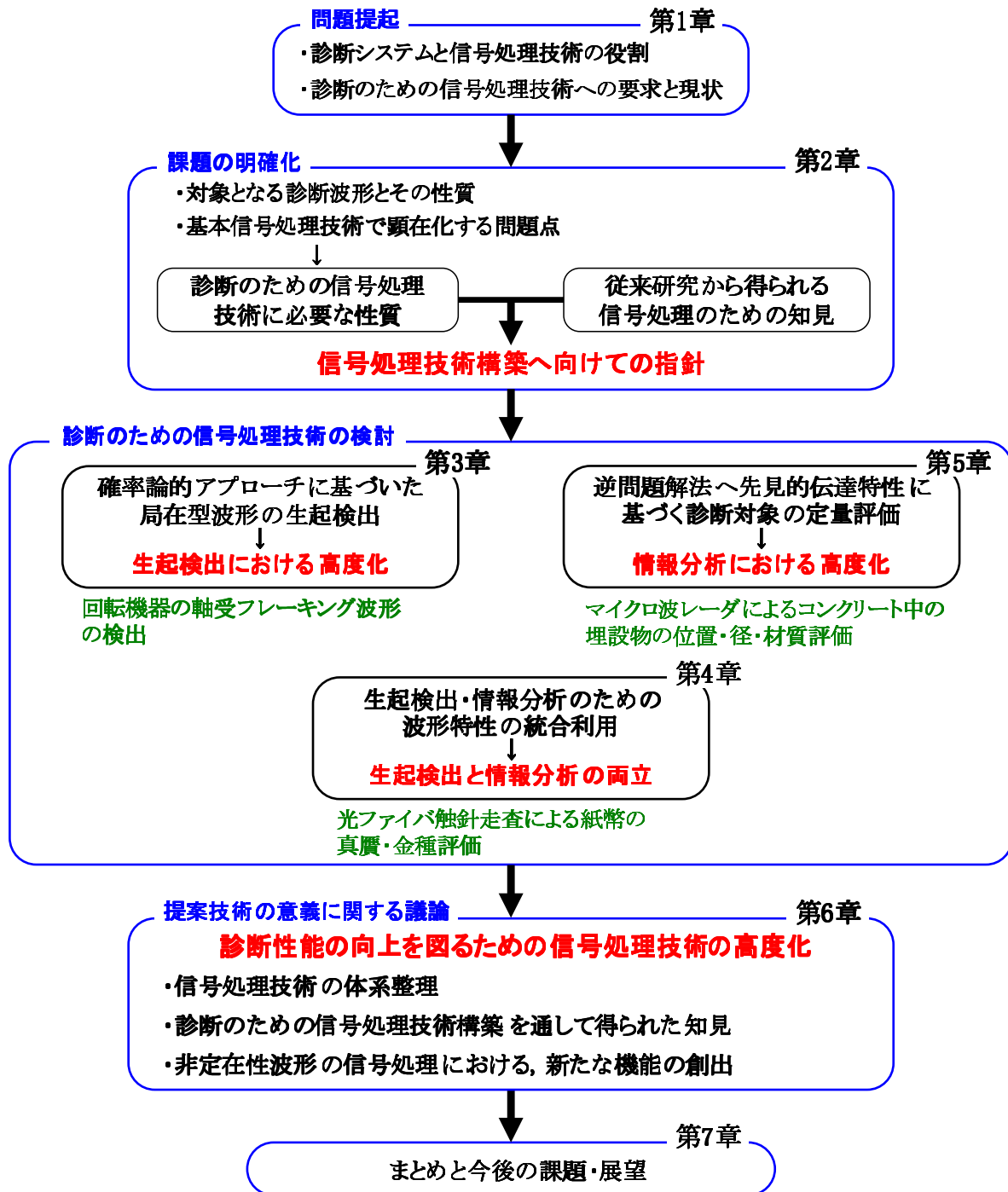


Fig. 1.5: Structure of this thesis

理，情報分析処理のために真贋・金種情報を統合的に利用する処理技術について検討する．さらに実験的な検証を加え，提案する信号処理技術の実用性を議論する．

第5章「コンクリート構造物の耐震診断における確定型波形の信号処理」では，確定型波形のための信号処理技術として，診断対象にマイクロ波レーダによるコンクリート中の鉄筋径診断を採り挙げ，先見的な伝達特性を有効利用することで，情報分析処理と

1.3. 本論文の構成

して逆問題を効果的・効率的に解く方法を中心に検討を進める．具体的には，生起検出のための相互相関包絡線法，あるいは情報分析のための逆投影ヒストグラム法を導入するとともに，情報分析処理においては鉄筋の位置・径・材質の定量評価を実現する信号処理技術をさらに検討する．最後に，コンクリート構造物の鉄筋径診断のための模擬実験を通し，提案する信号処理技術の有効性について検証する．

さらに第3章から第5章までの検討結果を踏まえ，

第6章「診断のための信号処理技術の高度化に関する議論」では，診断のための信号処理技術としての体系整理を試みる．ここでは，生起検出と情報分析の各処理機能の特徴を信頼性の側面から整理するとともに，本研究でのひとつの知見として，選択性・正確性を高めるための適応性として，診断のための信号処理技術には自由度が必要とされることを指摘する．また必ずしも十分では無いものの，2つの処理機能を分離してカスケードに組み合わせる階層化信号処理の有効性について議論し，その思想に基づいた信号処理技術の体系整理を試みる．また最後に「信号処理技術としての新たな機能の創出」という側面から，本研究で提案した信号処理技術の意義を考察する．

第7章「結言」では，研究成果を総括するとともに，今後の研究課題，将来展望について議論する．本論文での検討を通して得られた成果について，「信号処理技術による具体的な実現項目」，「信号処理技術の構築をとおして得られた知見」および「信号処理技術としての新たな機能の創出」という3つの観点にしたがって述べる．あわせて，本論文内では解決に至らなかった課題を明確化するとともに，本研究で検討された信号処理の考え方が他のさまざまな分野へも応用できる可能性にも触れ，論文をまとめる．

第2章 診断のための信号処理技術構築 に際する指針

本研究は、診断性能の向上を図るための信号処理技術として、診断波形に見られる特徴的な性質へと整合した信号処理技術について探求し、それらの結果に基づいて診断のための信号処理技術としての体系整理を試みることを目的である。その端緒として本章では、信号処理対象となる診断波形の性質を明らかにし、そのための信号処理技術構築に際して必要とされる処理機能を見い出していく。さらに診断への応用が試みられているいくつかの先行技術をレビューし、診断のための信号処理技術を構築する際に有効な指針を探っていく。

2.1 診断波形の性質とその信号処理における課題

診断のための信号処理技術に関する議論の準備として、ここでは診断方式や診断対象の異常形態と関連する診断波形の性質を明らかにし、それら性質を基にした診断波形の分類について議論する。また異常にともなって生起する診断波形は、時間領域あるいは周波数領域における基本信号処理技術では扱いが難しいという性質をもち併せており、そこに診断へ特化した信号処理技術が必要とされる理由を見い出すことができると考えられる。そこで、実際に旧来からの基本信号処理技術の枠組みに属す信号処理法を診断波形へと適用し、それら性質に起因する信号処理上の問題点を浮き彫りにしていく。

2.1.1 時間局所性に着目した診断波形の整理

一般的に信号波形の分類では、「規則性・不規則性」あるいは「定常性・非定常性」など、その波形自身の統計的性質に着眼しながら整理されることが多い。しかしながら診断波形の分類として、その分類項目に基づいて適用する信号処理の種類を規定していくことまでを想定すると、それらは必ずしも適した着眼点とは成り得ていない。

これは1.1.2節においても見てきたように、異常現象は常時発生しない、すなわち診断波形も常に生起する現象ではないため、波形の時間平均的な統計的性質に着目することがナンセンスと考えられるためである。言い換えれば、診断波形においては時間的にみた波形生起頻度の相違、すなわち時間的にみて常に生起している「定在性波形」と、時間局所へと生起する「非定在性波形」とを考えて行く必要があると思われる。そこで以下では、定在性と非定在性すなわち生起位相の相違に着目し、診断波形の整理を試みる。

2.1.1.1 定在性波形

「定在性」の診断波形は、情報能動型・エネルギー能動型あるいは受動型といった、その診断形態を問わず、広く計測される診断波形である。

情報能動型の診断においては、(対象の性質などにより制約は受けるものの) 試験波形を任意に選択できるので、既に信号処理法が十分に確立された正弦波などが試験波形として利用されることが多く、診断波形の信号処理法については既に数多くの議論が成されてきているのは周知のとおりである [32]。エネルギー能動型あるいは受動型の診断においても、連続的な正弦波やそれらが振幅変調された波形あるいは不規則性雑音に近い波形など、実診断対象では情報能動型とは大きな違いの無い定在性の診断波形が計測されることは多い。

定在性波形は文字通り時間的に見て常に生起しているため、診断対象の異常状態変化は、その波形形状に何らかの変形を与えることとなる。すなわち、異常状態の変化時には波形に変形を生じる変形型の診断波形であり、信号処理では、その変形を分析するための技術が必要とされてくる。

2.1.1.2 非定在性波形

● 確定型波形

情報能動型の診断では、センシングに際して任意の波形を試験波形として診断対象に投入し、その応答を診断波形として計測する。すなわち試験波形の波形形状は無論のこと、その生起位相や回数については自在に制御できる。すなわち非定在性の診断波形ではありながらも、試験波形の入力位相を基に診断波形の生起位相を確定させることができる、「確定型波形」として扱えることを意味する。その試験波形と診断波形の関係を模式的に表した図を、Fig.2.1 に示した。

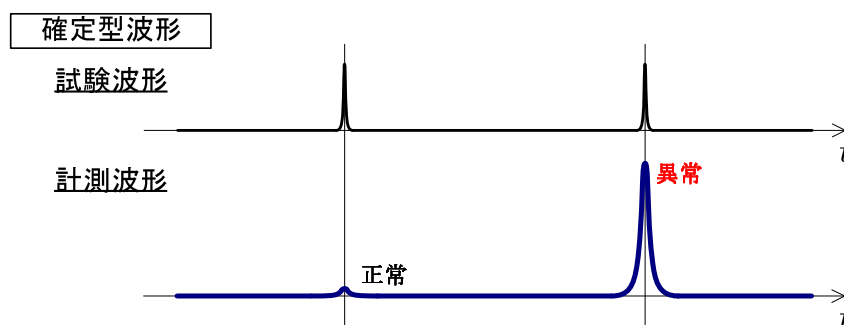


Fig. 2.1: Schematic view of test waves and definitive nonstationary diagnostic waves

診断波形の生起位相が確定的であることを理由に、波形の生起を発見することだけに限れば、比較的容易に実現できる可能性は高い。Fig.2.1 には、試験波形と診断波形の生起位相が完全に一致する例を図示したが、診断波形が試験波形に対して特定の位相遅れ

2.1. 診断波形の性質とその信号処理における課題

を以って生起する場合であっても，その位相遅れ量がおよそ既知であれば，確定型波形として扱うことが可能である．

なお診断波形の生起形式に着目すれば，異常の発生にともない波形が現れる出現型と，その逆に消滅する消滅型の2つの形式について考えることができるが，消滅型に関しては出現型の拡張的応用によって処理が可能であるので，本研究では出現型のみを議論の対象とする．

● 偏在型波形

同じ能動型診断とは言ってもエネルギー能動型の診断では，センシングに際して診断対象へ何らかの物理エネルギーは供給するものの，試験波形を入力することが無いため，診断波形についてみれば受動的に計測されると解釈するほうが適当である．また受動型の診断における診断波形は完全に受動的に計測されるため，すなわちこれらの診断形態においては，診断波形の波形形状はもちろんのこと，その生起位相を診断システム側で制御，あるいは確定することは難しい．

しかしながら生起位相には何らかの偏在規則があり，波形に畳み込まれている特性を基にして，その偏在規則情報が推定できる状況が考えうる．そこで，生起位相は未知でありながらも，計測波形に重畳された情報からそれに関する何らかの規則を抽出可能な診断波形を，第2の非定在性波形として「偏在型波形」と呼ぶこととする．偏在型波形の生起の偏在性に関して模式的に表した図を，Fig.2.2に示した．

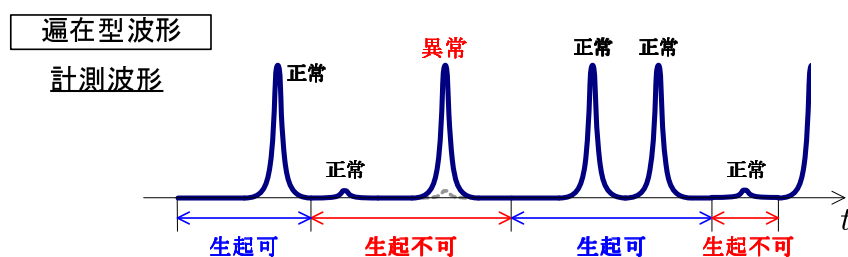


Fig. 2.2: Schematic view of biased nonstationary diagnostic waves

ここでは，別途抽出される診断波形生起に関する何らかの偏在規則として診断波形の生起可・不可領域が一意に定められた場合を，その一例として図示してある．Fig.2.2のようなケースでは，生起不可領域において診断波形の生起を検出することが，信号処理の起点となってくる．確定型波形には及ばないものの，生起位相をある程度限定することが可能であるため，後述する局在型波形に比較すれば生起の発見は容易で，信号処理としての実現性は高まる．なお確定型波形と同様，診断波形としての生起形式には出現型と消滅型の2通りを考え得るが，本研究では同様に出現型のみを議論の対象とし，消滅型についてはその応用による処理を実現する．

● 局在型波形

エネルギー能動型あるいは受動型の診断においては，診断波形は受動的に獲得される．

すなわち波形形状はもちろんのこと，その生起位相に関する偏在規則を波形情報から抽出することは全く期待できない状況，あるいはそもそも生起位相には偏在規則が存在しない状況も考え得る．このような診断波形を，本研究では第3の非定在性波形として「局在型波形」と呼ぶこととした．その診断波形の性質を模式的に表した図を，Fig.2.3 に示した．

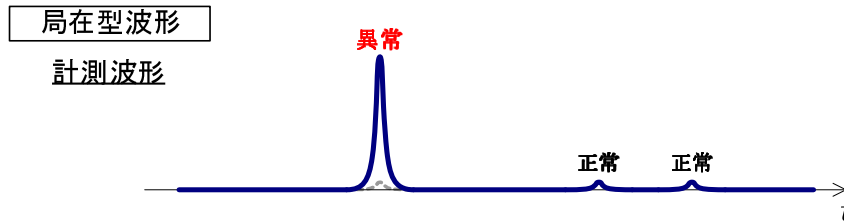


Fig. 2.3: Schematic view of localized nonstationary diagnostic waves

局在型波形は計測波形中にランダムに生起することになり，他の非定在性波形と同様に，出現型と消滅型の2種類の生起形式が考え得る．出現型の波形についてみれば，波形の生起が全く予測不可能であるため，信号処理は計測波形の獲得時間領域全域にわたる必要がある．一見すると，これは偏在型波形の生起不可領域を無限長に拡張しただけのようにも捉えがちだが，それは間違いである．長い監視時間中に予兆無くたった一度だけ生起する波形，すなわち確率的にみて生起可能性が非常に低い事象に対して見逃し無く生起を発見して処理を実現するためには，偏在型波形の処理とは比較にならない高い選択能力が必要と考えられる．一方で消滅型については，診断対象の正常状態で不規則に生起していた診断波形が消滅したことを分析することは，他の補助的情報に頼らなければ不可能であり，こちらは本研究での議論の対象外とし，今後の課題として位置付けたい．

2.1.1.3 診断波形の整理

2.1.1.1 節 および2.1.1.2 節において議論された診断波形について，時間局所性に関する性質の相違として，生起位相に着目しながら整理した結果を Fig.2.4 に示した．はじめに，

1. 常に生起する定在性波形と，時間局所に生起する非定在性波形

へと大分類され，さらに非定在性波形に関しては，生起位相の性質すなわち波形生起確率の時系列的性質の相違に着目する詳細な分類として，

- 2-2. 生起位相が確定的な確定型波形
- 2-3. 生起に何らかの偏り規則をともなった偏在型波形
- 2-4. 全く規則をもたない，あるいは規則が未知な局在型波形

に細分化される．さらに，異常発生時の診断波形の生起形式の違いに着目し，

2.1. 診断波形の性質とその信号処理における課題



Fig. 2.4: Classification of diagnostic waves on diagnosis

3. 波形が変形する変形型，波形が現れる出現型，あるいは波形が消えていく消滅型

の3つの型へ分類できるが，定在性波形については変形型のみ，非定在性波形については出現型と消滅型のみを考えれば十分である．なお消滅型に関しては本研究での議論対象から外したため，Fig.2.4においても表記を省略した．

このような診断波形の分類によって，実際に計測される診断波形のほとんどが網羅されていると考えられる．非定在性波形について見れば，能動的働き掛けによって診断波形を獲得する情報能動型診断においては確定型波形が，診断波形を受動的に獲得することとなるエネルギー能動型診断・受動型診断においては偏在型波形あるいは局在型波形といったように，その生起の時間局所性へ着目すると，診断形態によっても信号の性質が大きく変化することがわかる．

このように診断波形には時間局所性という観点からみて大きな性質の相違があるにもかかわらず，非定在性波形に対する信号処理技術の体系的な整備がほとんど成されていないという事実は，診断のための信号処理技術に関して検討の必要性を残していることを示すひとつの根拠と考えられる．一方の定在性波形については，診断形態によらず生起することに加え，診断形態によって診断波形の性質に大きな差異は見受けられなく，そしてその信号処理技術に関する議論も，これまでに数多く行われてきているのは先にも述べてきたとおりである．

2.1.2 基本信号処理技術の適用可能範囲

時間領域あるいは周波数領域における波形分析技術は最も基本的な信号処理技術としてとらえることができ，診断のための信号処理技術としても，それらが一定の有効性をもつことを改めてここで述べるまでもない．しかし，診断波形の時間局所性に着目した整理結果に改めて注目してみれば，特に診断のための信号処理は非定在性波形に対して有効に機能しなければならないといえる．すなわち，それら基本信号処理技術の有効範囲に関してはまだ議論の余地を多く残していると考えられ，実際に診断波形の分析が困難となっているケースも見受けられる．

そこでここでは，代表的な診断波形に対して時間領域・周波数領域における基本信号処理技術を適用し，それら処理技術によった波形分析が有効に機能する範囲を確認する．同時に，診断のための信号処理技術として捉えた場合に，それらが抱えている問題点について明らかにしていく．

2.1.2.1 時間領域・周波数領域における基本信号処理技術

時間領域・周波数領域における代表的な基本信号処理技術として，時間領域においては振幅値に関する「基本統計量」と「自己相関関数」に基づいた分析，また周波数領域においては「パワースペクトル」に基づいた分析を今回は採りあげる．いずれの技術も一般的によく知られているが，以下簡潔にその概要を示す．

A. 基本統計量

信号波形を $x(t)$ ，その離散形を $x_0, x_1, \dots, x_{N-1}$ とすれば，振幅値に関する基本統計量は (2.1)～(2.4) 式にしたがって算出される．

$$\text{平均値 } \bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n \quad (2.1)$$

$$\text{分散 (2次モーメント) } V = \frac{1}{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} (x_n - \bar{x})^2 \quad (2.2)$$

$$\text{標準偏差 } S = \sqrt{V} \quad (2.3)$$

$$k \text{ 次モーメント } \mu_k = \frac{1}{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} (x_n - \bar{x})^k \quad (2.4)$$

さらに波形形状の特徴分析を目的に導出される基本統計量として，それぞれ (2.5)，(2.6) 式に示した歪度 β_s (Skewness) および尖度 β_k (Kurtosis) が定義されている．

$$\text{歪度 } \beta_s = \frac{\mu_3}{S^3} \quad (2.5)$$

$$\text{尖度 } \beta_k = \frac{\mu_4}{S^4} \quad (2.6)$$

歪度は平均値中心の波形形状の歪み度合い，すなわち波形の非対称性を表し，尖度は波形の尖り度合い，すなわち急峻性を表す統計量として利用される．

B. 自己相関関数

信号波形を $x(t)$ ，その離散形を $x_0, x_1, \dots, x_{N-1}$ とするとき，離散時刻 i における自己相関関数 ϕ_{xxi} は (2.7) 式にしたがって算出される．

$$\phi_{xxi} = \frac{1}{N/2 + 1} \sum_{n=-N/4}^{N/4} x_n \cdot x_{n+i} \quad (2.7)$$

自己相関関数の値は，時刻 n の信号値 x_n とそれから i だけ後の信号値 x_{n+i} の間にどの程度の相関があるのかを与える．特に， $\rho_{xxi} = \phi_{xxi} / \phi_{xx0}$ で与えられる ρ_{xxi} を規格化自己相関関数と呼び，信号波形の相関係数が与えられる．

2.1. 診断波形の性質とその信号処理における課題

C. 振幅スペクトル・パワースペクトル

信号波形を $x(t)$, その離散形を $x_0, x_1, \dots, x_{N-1}$ として, その離散フーリエ変換 $X(k)$ は (2.8) 式にしたがって算出できる .

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-jkn \frac{2\pi}{N}} \quad (2.8)$$

このとき, $|X(k)|$ が振幅スペクトル, $|X(k)|^2$ がパワースペクトルであり, それぞれ波形中に含まれる各周波数成分がもつ振幅値およびパワーを与えることとなる .

2.1.2.2 定在性波形に対する分析

2.1.1 節における議論のとおり, 定在性波形に関しては, 診断形態の違いによる性質の差異は見受けられなく, 基本信号処理技術の機能を検証するためには, ひとつの適用例を挙げることで十分性を保証することが可能と考えられる . ここでは, 受動型診断における波形を例として挙げることにする .

適用例①: 回転軸受の転送面荒れ時の振動波形

Fig.2.4 における定在性診断波形の分類に属す典型的な例として, 回転軸受の転送面・転動面荒れにともなって生起する振動波形を選択した . Fig.2.5 は, 面荒れの程度が異なる 2 つの異常状態で獲得された診断波形としての振動波形であり, 統計的にみてこれら

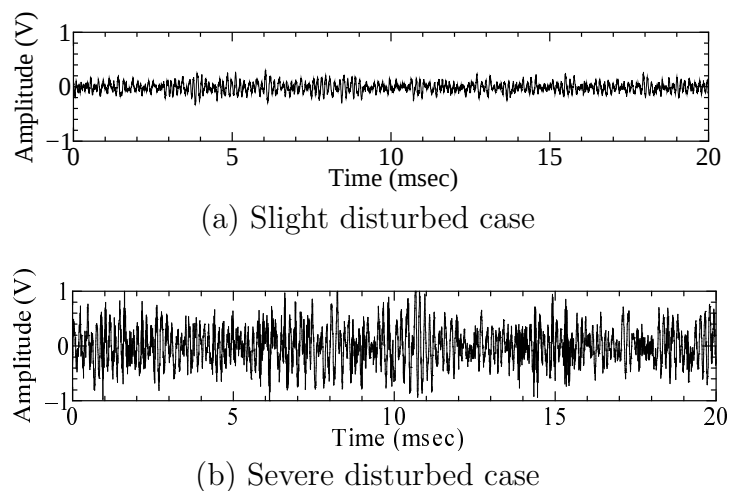


Fig. 2.5: Vibration waveforms on shaft bearing of rotating machine with disturbed rolling surface

波形の振幅値分布特性は正規性不規則信号に近い [33] . 異常に関する情報すなわち面荒れの程度を知るためには, その振幅値の大小を分析することに意味がある .

正規性不規則信号の波形自身はその性質もよく知られているが, 実診断対象の異常時に生起する診断波形の中でも生起頻度の高い波形 [33] として知られている . 例えば, 音

響的な診断波形の例としては空調機コンプレッサの稼働音 [15] , あるいは変位的な診断波形としては圧延金属板の表面粗さ波形 [34] などこの類に属し , 多くの診断現場において遭遇する .

①-A. 基本統計量による分析

時間領域における分析として , 基本統計量値を算出した結果を Table 2.1 にまとめた . 平均値・歪度・尖度についてはほとんど指標値に変化がみられない一方で ,

Table. 2.1: Statistics values for vibration waveform on shaft bearing of rotating machine

Case	平均値 $\bar{x}$ (V)	標準偏差 S (V)	歪度 β_s (-)	尖度 β_k (-)
Slight case	-0.0581	0.412	-0.0276	3.23
Severe case	0.155	2.29	0.0224	4.59

標準偏差については振幅値 (=面荒れ状態) に応じた明瞭な変化を確認できる . すなわち , 正規性不規則信号の波形形状的な特徴を分析するためには , 基本統計量を指標とした分析であっても , 指標値の変化によってその違いを分析することが可能だといえる .

①-B. 自己相関関数による分析

もうひとつの時間領域における分析として規格化自己相関関数を算出した結果が , Fig.2.6 である . 不規則波形ではその相関係数に特定のピークをもたないことが知

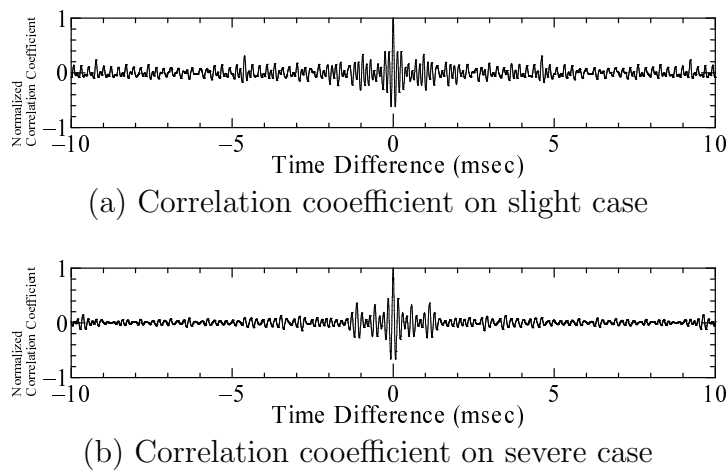


Fig. 2.6: Auto-correlation for vibration waveform on shaft bearing of rotating machine

られているが , 分析結果もやはりその通りであり , すなわち自己相関関数を基にして診断対象の状態変化に関する情報を獲得することは難しい .

①-C. パワースペクトルによる分析

周波数領域における分析として , パワースペクトルを算出した結果が Fig.2.7 である . よく知られたように , 不規則波形では特定のピーク周波数成分をもつことは

2.1. 診断波形の性質とその信号処理における課題

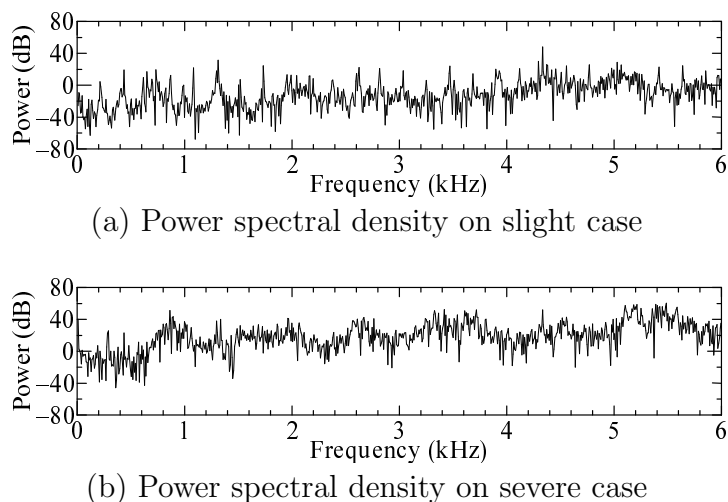


Fig. 2.7: Power spectrum for vibration waveform on shaft bearing of rotating machine

無く、その特性は広い帯域へと広がる。したがって、診断波形の振幅値変化による影響も広帯域に平均的变化として現れることになるので、スペクトル分布同士の平均パワーの比較に基づいて振幅値変化を分析することも、不可能ではない。

2.1.2.3 非定在性波形に対する分析

非定在性波形に関しては、確定型・偏在型・局在型の3つの波形へと分類できた。この中で偏在型の波形に関しては、生起の規則に応じて、その信号処理のアプローチは確定型寄りあるいは局在型寄りへ近づいていくものと考えられる。そこでここでは、確定型および局在型の非定在性波形のみを対象として採り挙げ、基本信号処理技術による分析を試みる。

適用例②: コンクリート壁面剥離診断における打撃音波形(確定型波形)

確定型波形は、情報能動型診断において試験波形が診断対象へと入力された応答波形として獲得される、生起位相に確定性をもった診断波形である。今回はその例として、コンクリート壁面剥離診断における打撃音波形を選択した。打撃自体は人間が実施することから、長い監視時間をマクロに見れば診断波形の生起周期は一定ではないが、打撃と同期して診断波形が生起するため、ミクロに見れば確定型の診断波形として扱える。

Fig.2.8 には、診断波形として、正常部位および剥離部位それぞれにおいて計測された打撃音波形を示した。このような確定型の診断波形に関しては、生起位相を見極める必要性は低い一方で、診断対象の状態を知るため、波形形状を規定している詳細なパラメータ値、あるいはそれらを基に推定される診断対象に関する情報を分析することに信号処理の目的がある。

②-A. 基本統計量による分析

打撃音波形に対して、基本統計量を算出した結果を Table 2.2 にまとめた。剥離

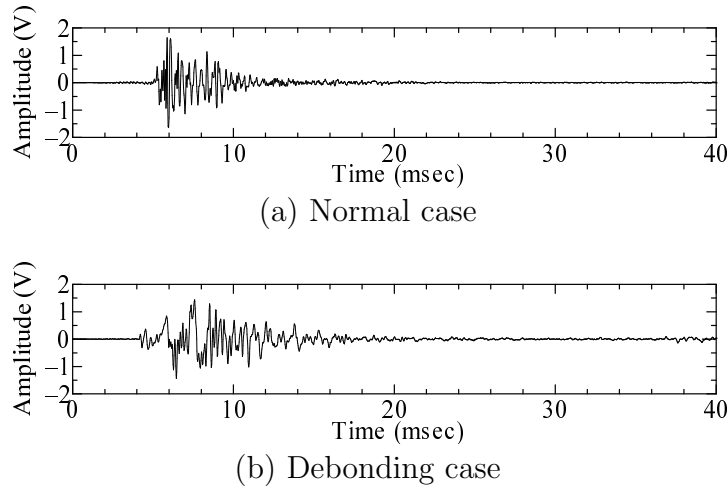


Fig. 2.8: Acoustic vibration waveforms on hammering test for debonding concrete wall

Table. 2.2: Statistics values for acoustic vibration waveform on hammering test

Case	平均値 $\bar{x}$ (V)	標準偏差 S (V)	歪度 β_s (-)	尖度 β_k (-)
Normal case	0.000121	0.0397	-0.868	703
Debonding case	0.000124	0.0473	2.12	262

の有無に応じて歪度・尖度値には大きな変化が生じているが，それらの値から，波形形状さらには剥離状況を定量的に推定する分析に至ることは難しいと考えられる．

②-B. 自己相関関数による分析

規格化自己相関関数を算出した結果が，Fig.2.9 である．そもそも周期性をもつ波

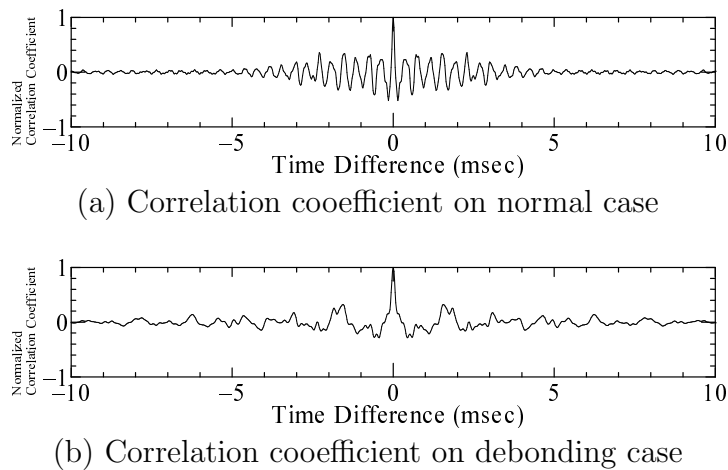


Fig. 2.9: Auto-correlation for acoustic vibration waveform on hammering test

形に対して相関処理は有効であり，，打撃音波形の支配的な周波数成分に関する周期性と，それが剥離前後で変化している様子までは分析できる．これらはフーリ

2.1. 診断波形の性質とその信号処理における課題

フーリエ変換，特に短時間フーリエ変換による分析でも得られる結果であるが，いずれにしてもこれらの分析方法では，波形形状に関するそれ以上の情報を獲得することは難しいといえる．

②-C. パワースペクトルによる分析

パワースペクトルの算出結果が，Fig.2.10 である．相関処理による結果でも示さ

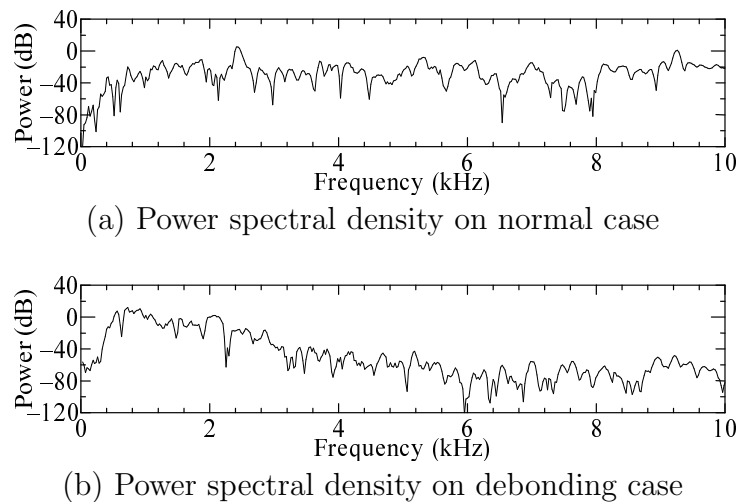


Fig. 2.10: Power spectrum for acoustic vibration waveform on hammering test

れていたように，異常時には高周波数成分が減少し，低周波数成分が増加してくる様子を確認できる．

このような時間平均的な基本信号処理技術によりながらも，非定在性の診断波形に対する指標値へある程度の変化が生じている．これは，試験波形の入力位相情報を基にして診断波形が生起する時間局所があらかじめ特定でき，さらに当該時間領域において診断波形成分が支配的となるように信号処理を行う時間領域を限定することで，等価的に非定在性波形を定在性波形と等価に扱うことが可能な確定型の診断波形に限って可能なことであり，他の非定在性波形での実現は難しいことには注意されたい．

適用例③: 回転軸受フレーキング波形 (局在型波形)

局在型波形は，受動型診断あるいはエネルギー能動型診断において，異常にともない生起する波形が受身で計測された，波形形状はもちろんのこと生起位相に関しても全く情報が抽出できない診断波形である．今回は，回転軸受のフレーキング波形 [33] を，ひとつの例として選択した．

診断波形として，損傷 (フレーキング) 状態が異なる 2 種類の状況における計測波形を，正常状態時の計測波形とともに Fig.2.11 に示した．これらはボール軸受の転走面に損傷を負ったケースで見られる計測波形 [33] であり，転動体が転送面損傷部へ接触する度に，フレーキング波形と呼ばれる鋭いスパイク状波形が診断波形として生起している．損傷

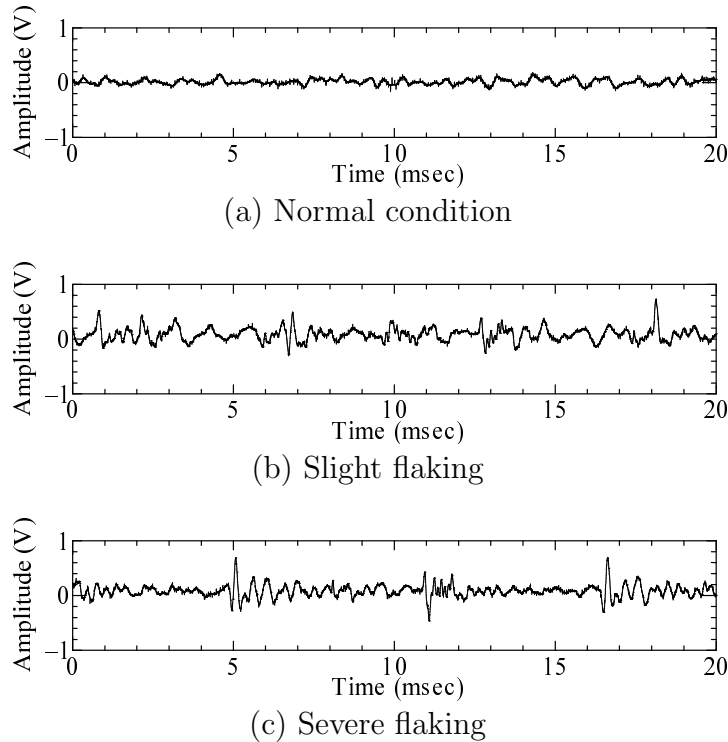


Fig. 2.11: Vibration waveforms on shaft bearing of rotating machine with flaking damage for different damage levels

状態が異なればフレーキング波形の振幅に変化を生じ，損傷部位が異なればその生起位相特性も変化するため，信号処理では振幅値と生起位相を分析することに目的がある．

③-A. 基本統計量による分析

フレーキング波形が混入した計測波形に対する基本統計量の算出結果を，Table 2.3 にまとめた．フレーキング波形が混入していること，そしてその振幅あるい

Table. 2.3: Statistics values for observed waveform on shaft bearing of rotating machine

Case	平均値 $\bar{x}$ (V)	標準偏差 S (V)	歪度 β_s (-)	尖度 β_k (-)
Normal case	0.0145	0.0792	-0.263	3.16
Slight case	0.0849	0.107	0.116	4.58
Severe case	0.0165	0.137	0.184	3.82

は生起周期が変化していることを，いずれの統計量値からも判断することは難しいとの判断を下さざるを得ない．

③-B. 自己相関関数による分析

規格化自己相関関数の算出結果を，Fig.2.12 示す．フレーキング波形の生起自体が周期的ではあるものの，相関関数値から目立った周期性を確認することは難しく，診断のための信号処理としての応用には限界がある．

2.1. 診断波形の性質とその信号処理における課題

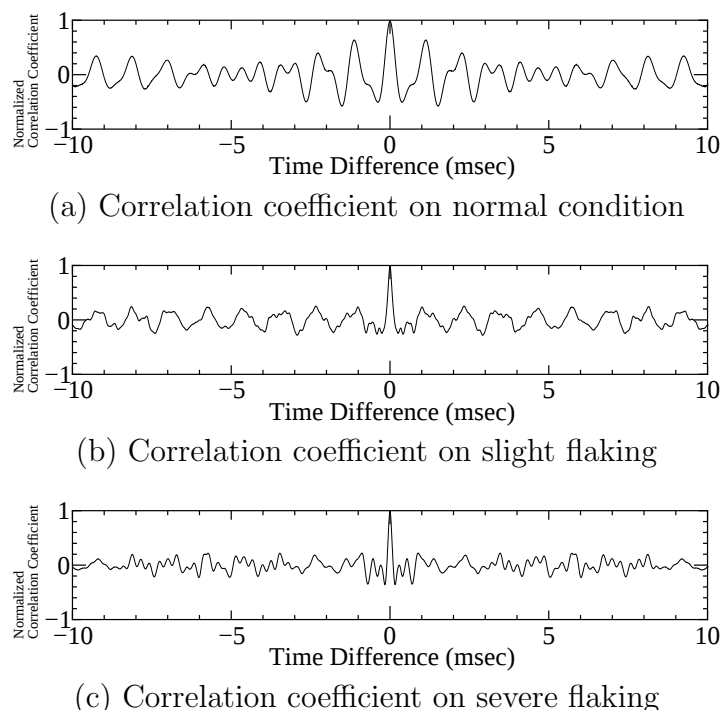


Fig. 2.12: Auto-correlation for observed waveform on shaft bearing of rotating machine with flaking damage

③-C. パワースペクトルによる分析

パワースペクトルの算出結果が、Fig.2.13 である。フレーキング波形が時間局所（換言すれば疎）に生起している影響が顕著に現れており、生起しているフレーキング波形の基本周波数（およそ 3.5kHz 程度）付近のスペクトル成分へ注目しても、その生起を確認することは難しい状況である。

これらの信号処理による結果に有効性が見い出せないことは、フレーキング波形が混入している時間が極短く、背景雑音成分の影響に当該成分が埋没してしまったことが原因と考えられる。残念ながら、非定在性波形としての生起率の低さ・生起位相の不規則さ故に、信号処理を適用する時間局所を限定することも容易ではない。同じ非定在性波形とはいっても、その時間局所を限定できないことで、先の確定型の診断波形とは対照的に、大域的とも表現できる基本信号処理技術では分析が難しい診断波形の存在を端的に示した例といえる。このような波形の信号処理に際して、基本信号処理技術とは異なる側面からのアプローチをとる必要性を垣間見ることができる。

2.1.3 診断のための信号処理技術としての課題

2.1.2 節における検討結果を踏まえながら、診断のための信号処理技術としてみた際の基本信号処理技術の問題点、すなわち基本信号処理技術を診断波形分析へ適用すること

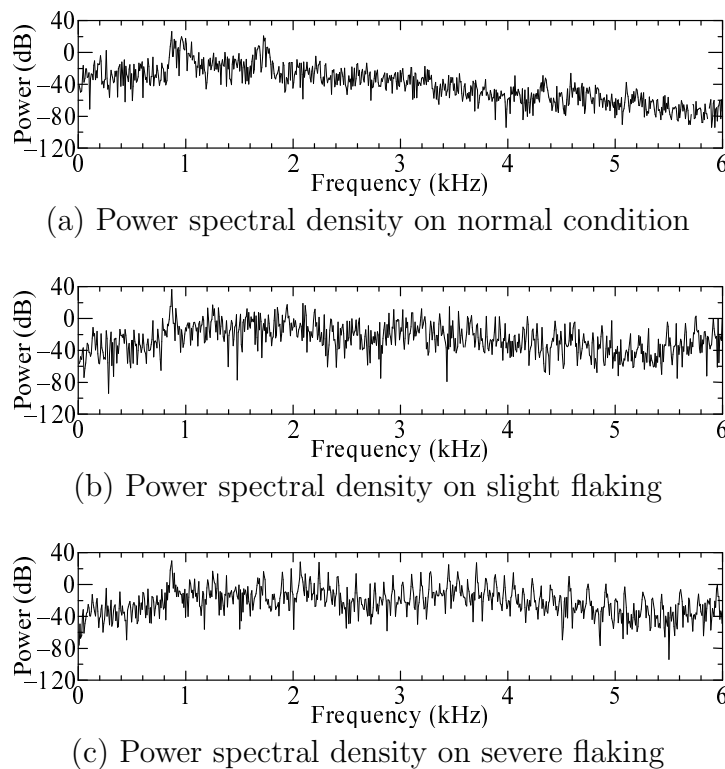


Fig. 2.13: Power spectrum for observed waveform on shaft bearing of rotating machine with flaking damage

を通して顕在化してきた問題点についてまとめると同時に、さらに掘り下げて、診断性能の向上を図るための信号処理技術構築への課題を明確化する。

1. 時間平均的な処理が、非定在性波形の時間局所性と整合していない

基本信号処理技術では、時間的にみた波形の遍在性(定在性)が前提とされており、計測時間全域にわたって同一の特性をもった波形が持続することを仮定し、時間平均的(大域的)な波形特性が分析される。したがって、時間領域・周波数領域を問うことなく定在性波形との相性は良好で、波形パラメータを分析するという目的も十分に達成されていた。

しかし非定在性波形に対しては、そもそもそのような仮定自身が整合していないため、逆に時間平均的な処理が分析に際してネックとなる。すなわち、非定在性波形の特性は時間的に大部分を占める背景雑音の特性によって覆い隠されてしまい、波形パラメータの分析はおろか、その生起を確認することすら難しくなっている。この影響は診断波形の生起頻度が低下するほど、ますます無視できなくなると考えられる。

2. 定形・定在的な波形の重ね合せによる、非定在性波形の分析が難しい

基本信号処理技術ではあらゆる波形に対して汎用的に対応することを考えており、特定の波形形状に関した何らかの情報が、信号処理へ組み込まれていくことは無い。

2.2. 診断のための信号処理技術の要件

例えば、周波数領域におけるスペクトル分析は、定形・定在正弦波の重ね合わせによって対象となる波形形状が表現できることを前提とした、ひとつの波形形状分析技術と捉えることができる。しかし、波形形状に急峻で特異なケースが多く、さらには計測波形中で時間局所にしか生起しない非定在性波形には、そのような仮定を適用すること自体に無理があり、(時間平均的な処理の影響も同時に受け) 十分な分析性能を提供することが不可能となっていた。

2.2 診断のための信号処理技術の要件

ここまでの検討を通して、基本信号処理技術による処理を適用することによって有益な処理結果が得られる診断波形の種類は大きく限定され、異常の状況・原因推定に必要とされる項目の分析という観点では、必ずしも十分な処理性能を提供しているとは言えない状況にあることが明らかとなった。本節では、そのような状況を打開して診断性能の向上を図る具体的な処理を実現するための視点について、議論していく。

2.2.1 信号処理におけるアプローチの相違

2.2.1.1 診断波形の絞り込み

基本信号処理技術によって分析が可能である診断波形は、その診断形態については問うこと無く、定在性波形のみであり、これは基本信号処理技術が時間平均的な処理に基づいていることに大きな原因がある。その処理は定在性波形とは整合しているが、非定在性波形では、異常に関する情報が畳み込まれている時間領域、すなわち診断波形が生起している局所時間領域のみを対象に信号処理を行うことが不可能なためである。

このような状況を鑑みれば、「診断性能の向上を図る」という目的を達成するために議論の対象として本研究で採り挙げていかなければならない診断波形は、非定在性波形へと絞り込まれてくる。実際、非定在性波形のための信号処理技術については、波形が時間局所性をもつ、インパルス状の急峻な波形形状であるなどの理由から、診断に適した信号処理技術の開発が求められている [35]。また診断波形の形状から診断対象に関する情報を分析するための技術についてみても、異なる現象が同一の診断波形を生起させることもあり、正常・異常状態あるいはその異常状態の程度を定量的に分析するための有用な信号処理技術の確立が切望されている状況である。

しかし注意して貰いたいことは、このように議論対象を非定在性波形に絞り込むというスタンスが、定在性の診断波形に対する信号処理性能の向上については議論をせず、それらは基本信号処理技術に任せるということとは少々異なる点である。この理由は、定在性の診断波形は非定在性波形の生起率を極限まで増加させた形と解釈することもでき、非定在性波形に対する信号処理の検討結果は、定在性波形への応用も十分に期待できるためである。

ところで、多数のセンサを設置することによって獲得できる多様な診断波形を統合的に扱いながら信号処理を実現することは、本研究が目指している「信号処理の高度化」という視点から見ると、その方向性が少々異なると考えられる。本研究の範囲ではオンライン・オンサイト診断の実現を踏まえたシンプルな診断設備の構築を前提とし、信号処理対象を単一センサによって計測される診断波形へ限定することとする。このような単一診断波形への処理対象の絞り込みによって、診断波形の性質に関しても、波形間で生じる相互関係には注意する必要は無くなり、単純に対象とする診断波形に備わる性質のみに着目した処理を構築していけばよいことになる。

2.2.1.2 基本信号処理技術と診断のための信号処理技術での相違点

時間領域・周波数領域における基本信号処理技術は、診断波形が常に生起していることを前提とした処理であった。1.1.2節で見てきたように、診断のための逆問題のひとつの特徴は異常が常時発生する保障が無いことである。したがって、その処理を非定在性の診断波形へそのまま適用することは、波形の生起を確認すること無く処理を施すことに相当するため、ここまでで見てきたように処理結果の信頼性、あるいは処理の効率性を高く維持することは困難であった。これを信号処理の側面から解釈すれば、僅かな頻度で生起する診断波形の混入を見落とし・間違いなく検出する必要があるということとなり、これは基本信号処理技術では見受けられなかった大きな相違点である。

そしてもうひとつ注意しなければならない点は、診断波形形状の特異性にある。2.1.2節で非定在性診断波形の例として挙げた打撃音波形あるいはフレーキング波形もそうであったように、診断波形の形状は往々にして特異であり、診断対象に依存してその形状も多種にわたる。この多種多様かつ特異的な波形形状に適応しながら、高精度・高効率に診断対象の情報を分析する必要があるということは、診断のための信号処理技術を構築する上で意識すべき重要なポイントになると考えられる。

2.2.2 診断のための信号処理技術に求められる処理機能

一般的な計測・信号処理においては、対象となる診断波形の生起・遍在は確約されている状況、あるいはその生起が別途何らかの方法で確認された状況を前提として処理が構築されている。これは能動的な計測・信号処理系の場合には仮定してよい事柄とも考えられるが、あるいは受動的な系を見渡してみても、例えば環境計測分野における日射量・風速計測のためのセンサ出力信号のように、信号処理を適用するための計測波形には対象の何らかの物理情報が畳み込まれた波形の生起が確約・確認されている事例は多数を占める。

ところが、異常診断における診断波形は、一般的な計測・信号処理に適用される波形とはその特性が大きく異なる。すなわち、先に見てきたように、

- 僅かな頻度で生起する診断波形の混入を、見落とし・間違い無く検出する必要性

2.2. 診断のための信号処理技術の要件

- 特異な波形形状から，診断対象の情報を高精度・高効率に分析する必要性

がある．さらに診断波形生起の時間局所的な性質にも相違があることを考慮に入れば，診断のための信号処理を高い信頼性を保ちながら実現することを考える際には，Fig.2.14 に模式的に示すような，診断波形の「生起検出」と診断対象の「情報分析」という，2つの処理機能を実装していくという診断特有の必要性が浮かび上がってくる．

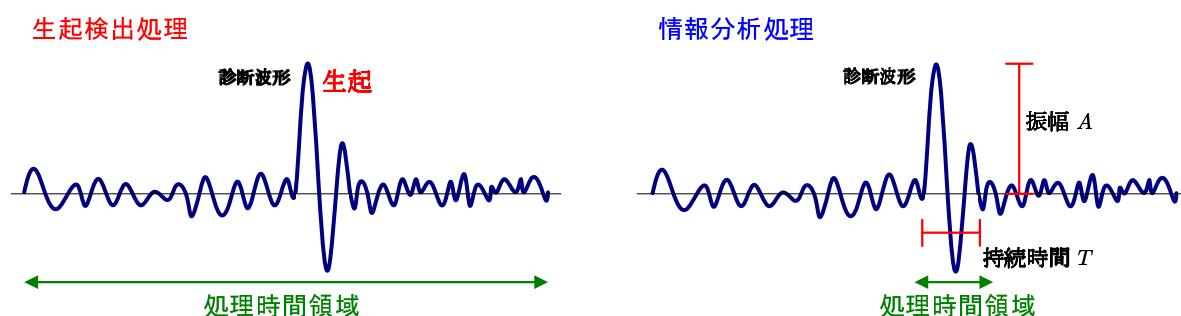


Fig. 2.14: Schematic view of detection and evaluation process in signal processing for diagnosis

生起検出とは，獲得された計測波形中に診断波形が混入しているか否かを判断するための処理機能であり，波形生起の時間局所を探索するための技術とも言い換えることができる．このように述べてしまうと，確定型の診断波形に対しては処理が不要と誤解されてしまう懸念がある．詳しくは第5章で議論することになるが，実際には試験波形の入力に対して必ずしも診断波形が生起しないケース，あるいは位相遅れを伴って生起するようなケースも存在し，ここではその必要性はあるということのみを念のため補足しておく．また情報分析とは，生起が検出された診断波形からその波形形状を規定するパラメータ等を抽出するため，さらには診断対象の異常状態を推定するための分析量を評価するための処理機能であり，すなわち逆問題のための高精度な解法技術ともとらえることができる．

さて，再度一般的な計測・信号処理へと議論を戻せば，そこでは生起検出の処理は達成済みであり，情報分析処理のみへ標的を定めた信号処理技術を構築すれば十分であったとも表現できる．ところが異常診断を想定した場合には，計測波形中に診断波形が生起しているという確約は全く無くなる．そればかりか，いくつかの例でも見てきたように，その生起頻度はごく僅かという状況にも往々にして遭遇する．このような相違こそが，診断のための信号処理技術において2種類の処理機能が実装されなければならない所以であると考えられる．

一方で，オンライン・オンサイト診断を念頭に置いた信号処理技術の実現をその背景とした信号処理技術としての効率性に着目するならば，膨大な計算量によって実現する信号処理技術については，本研究における議論の対象外としたい．すなわちオンライン・オンサイト診断を前提とし，効率性に優れるリアルタイム性（あるいはそれに近い）を備

えた信号処理技術の実現について検討していく必要がある。

2.2.3 生起検出と情報分析

2.2.3.1 診断波形の生起検出内の処理機能レベル

診断波形生起の時間局所性には3つの分類があることを明らかにしてきたが，信頼性・効率性の観点に立てば，先見的知識として保持されたそれらの相違に応じた処理対象時間領域の広さにより，生起検出処理において適用すべき処理機能レベルが変化すると考えられる。すなわち，診断波形の生起位相が確定的であれば生起探索時間領域は限定されるが，生起位相が不確定であるほど生起探索時間領域が広がるためである。それらの関係を模式的に示したものが Fig.2.15 である。

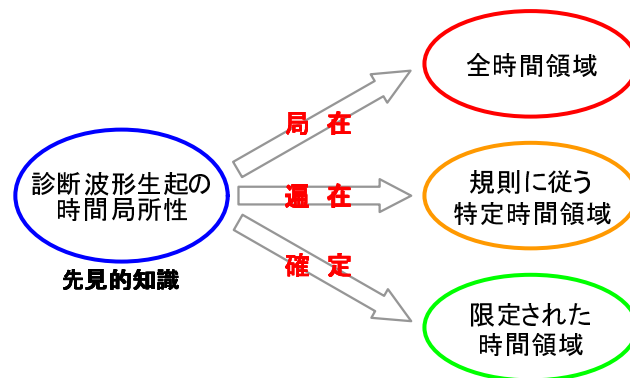


Fig. 2.15: Three process levels on arising detection of diagnostic waves

3種類の非定在性診断波形に対して適用すべき処理機能レベルについてもう少し詳細に見てみる。確定型の診断波形では，試験波形の入力位相に対応した時間局所のみとその生起位相が限定され，生起検出処理においては，その限定時間領域のみに着目すれば十分に可能である。また偏在型の診断波形は，何らかの生起規則にしたがって診断波形の時間的な生起領域＝生起位相は限定され，その領域内でのみ診断波形の生起を監視することとなる。すなわち生起検出処理は，生起規則にしたがう特定の時間領域のみに着目すれば十分である。ところが局在型の診断波形は，完全に不規則かつ未知の生起位相をもつことが理由で，その生起位相すなわち監視領域自体を計測波形の全時間領域へと拡張されなければならない。このような局在型の診断波形に対する生起検出は，診断装置のリソースを最も必要とする形態ともいえ，処理の効率性は順を追って低下してくることになる。

ところで生起検出処理では，計測波形中への診断波形生起を検出するための機能をもてば十分であるため，情報分析に関わる性質すなわち逆問題における伝達特性に関しては考慮に入れる必要性はない。すなわち，診断波形の時間局所性に関する性質のみを考慮に入れて機能を選択すれば，十分である。

2.2. 診断のための信号処理技術の要件

2.2.3.2 診断対象の情報分析内の処理機能レベル

情報分析処理内の処理機能レベルを考える時，信号処理の出力として得られる分析値の質によって分類することが可能と考えられ，さらにこの分析値の質を決定する要因には大別して2つの要因が関与してくると思われる．ひとつは情報分析の機能を逆問題の解法技術としてとらえた際の「伝達特性の既知度」，もうひとつは結果の利用目的に応じた「分析値への要求精度」であるが，それらはそれぞれ主要要因と副次的要因と捉えることもできる．

情報分析のための処理は，異常に起因する物理現象の発生にともなって診断波形が生起するという因果律の逆をたどる行為であり，計測分野におけるいわゆる逆問題を解くという行為に当たることは何度か述べてきた．一般に逆問題は，(2.9) 式によって記述することができる．ここで， x は原因 (あるいは入力)， y は結果 (あるいは出力) で， A は伝達特性 (あるいは変換) である．

$$x = A^{-1} \cdot y \quad (2.9)$$

逆問題を解くとは，変換 A (または原因 x) が既知な状態で，計測できる結果 y から原因 x (または変換 A) を推定することである．診断における情報分析と逆問題との対応関係を考えてみれば，それぞれ y が診断波形， x が異常にともなう物理現象， A は計測装置の伝達特性へと相当し，伝達特性 A が既知な状態で，診断波形 y から物理現象 x を推定するという問題へ帰着できる．

ここでは物理現象 x の質，もう少し詳しく述べれば異常の状態を評価する分析値の質をどのレベルまで追求できるかは，先見的知識として保持された伝達特性 A によって制限されることとなる．Fig.2.16 に示すように，診断対象あるいは計測装置の伝達特性が明確であれば， x として定量情報まで踏み込んだ分析が可能であるが，逆に伝達特性に関する情報がほとんど得られないのであれば， x は高々診断波形の波形形状を規定する波形パラメータ値の抽出程度に留まらざろう得ない．このように，診断対象あるいは計

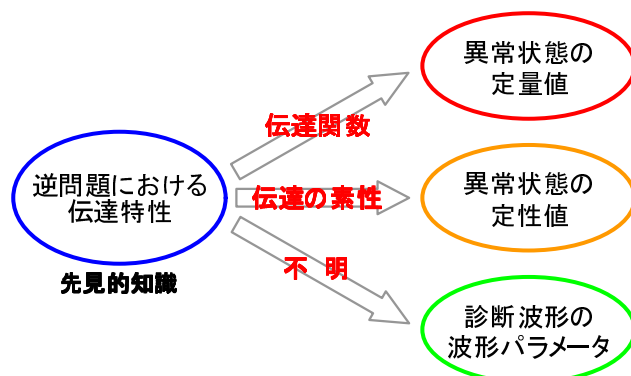


Fig. 2.16: Three process levels on state evaluation of diagnostic target

測技術と直接結びつけられた先見知識としての伝達特性の既知度は，信号処理系における分析値の質に関する上限を規定する主要な要因と考えられる．

また、電気回路の断線診断のような正常・異常の2段階のみの情報が獲得されれば十分な診断がある一方で、金属疲労診断のように異常の状態をより詳細な定量情報として獲得することが要求される診断もあり、これは分析値への要求精度が異なる診断があることのひとつの典型的な例と考えることができよう。見方を変えれば、この分析値への要求精度とはあくまで結果を利用する側からの視点で決定するものである。すなわち診断対象や診断技術とは分離しており、たとえ利用する側がより質の高い分析値を望んでも、診断対象の特性的あるいは信号処理技術の性能的な制限から達成されないこともあり得るため、副次的な要因と考えられるわけである。

ところで、情報分析処理は診断対象の異常状態に関する情報を分析するための機能に当たるため、今度は波形生起の時間局所性について考慮に入れる必要がなくなる。すなわち、ひとたび診断波形の生起が検出されていれば波形の生起位相は確定してしまうため、情報分析の処理機能のみを考えれば、確定・偏在・局在といった非定在性診断波形の生起位相に関する性質の違いを考慮する必要がなくなるわけである。

2.2.3.3 2つの処理機能が果たす役割

診断のための信号処理技術に求められる2つの処理機能による、具体的な達成目標を定めれば以下のとおりである。

- 生起検出

文字どおり、診断波形が生起しているか否かのみを確認し、診断波形の計測波形中への生起の検出あるいはその生起位相の特定までの処理を実現する。表現を変えれば、異常・正常のみを判断する、いわば2値のデジタル的分析の段階といえ、検出感度の向上、過検出の抑制、背景雑音の低減を図ることもその目的に含まれる。

- 情報分析

診断対象の情報まで立ち入った分析までの処理、すなわち診断波形の波形パラメータ値の抽出、さらにはそこから対象の異常状態に関する情報までの評価を実現する。生起検出をデジタル的分析と表現することと対比させれば、異常状態に関する情報を精密に分析するアナログ的分析とも表現でき、分析量の信憑性を高めることがその目的となる。

2.3 診断のための信号処理技術としてみた先行技術

異常診断への応用までを視野に入れた信号処理技術として、従来から数々の方法が提案・研究されており、その中には既に実用化されているものも数えられる。それら全てを網羅することは難しいが、その一部については文献 [35] あるいは文献 [37] などには分野ごと詳しく記述されている。本節ではその中のいくつかの技術についてレビューをすることで、異常診断のための信号処理技術を構築する上で鍵となる知見について探究し

2.3. 診断のための信号処理技術としてみた先行技術

てみたい．これによって，旧来の基本信号処理技術とは異なった着眼点が必要であることを鮮明化することが目的であるとともに，本研究の主題である「診断のための信号処理技術の高度化」へ向けた指針を立てるための手掛りを得ることで，研究の進むべき方向を定めていくことにする．

2.3.1 ウェーブレット変換による局在型波形成分の分析

旧来からの時間領域および周波数領域における分析のそれぞれの長所を融合した「時間-周波数領域」における分析技術が，回転機械の異常を検出・診断するための信号処理技術の分野を中心として盛んに研究されている [38]．このような分析技術では，対象となる診断波形の周波数帯域とその生起時刻を，同時に検出することが可能になる．

2.3.1.1 信号処理の原理

一般に最もよく知られた時間-周波数領域における分析技術には短時間フーリエ変換法があるが，この方法では窓関数の窓幅が一定なので，時間-周波数領域における分解能は常に固定である．しかし異常診断に際しては，あらかじめ最適な時間-周波数領域の分解能を決定できないケースが多く，結果的にさまざまな分解能での分析を試みる必要が生じてしまう．

これに対してウェーブレット変換は，一度の分析で幾通りもの分解能を実現することができるよう，可変窓幅関数を使用する．その詳細については文献 [39] に詳しいが，(2.10) 式にウェーブレット変換 $W(b, a)$ の定義式を示した．

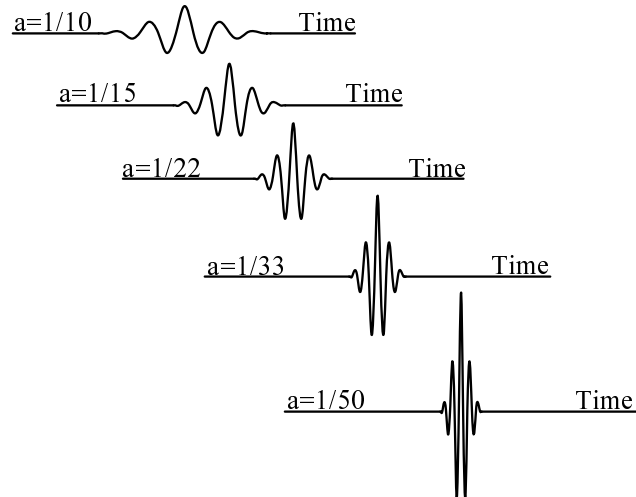
$$W(b, a) = \int_{-\infty}^{\infty} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) f(t) dt \quad (2.10)$$

(2.10) 式において，それぞれ $\psi(t)$ は基底関数， b は経過時間， a はスケールパラメータ， $f(t)$ は計測時系列データを表し，基底関数 $\psi(t)$ と時系列データ $f(t)$ の類似度を相互相関的に分析していると考えればよい．ウェーブレット変換の性質は，基底関数 $\psi(t)$ の形状によって決まるといってもよく，それには一般的な関数を用いることもできる．これは正弦波を基底関数に用いるフーリエ変換とは異なる点といえ，信号波形の特徴を表現するための幅を拡げることが可能である．

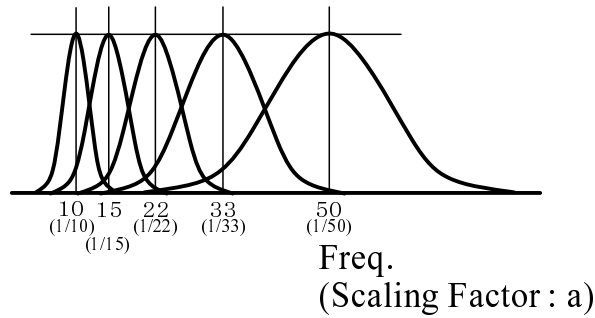
Fig.2.17 は，基底関数のひとつの例として (2.11) 式で表わされるガボール関数の波形とその振幅スペクトルの関係を示したものである．

$$\psi(t) = \frac{1}{a} \exp \left\{ - \left(\frac{t-b}{a\sigma} \right)^2 + j \frac{t-b}{a} \right\} \quad (2.11)$$

基底関数の時間長すなわち窓関数の窓幅が狭いほど，局在的に生起する信号波形に対する感度は高くなり，また振幅スペクトル幅が狭いほど局在スペクトルに対する検出感度が高くなることを表している．



(a) Wavelets in time domain



(b) Wavelets in frequency domain

Fig. 2.17: Wavelets in time domain and frequency domain[38]

本手法は，診断波形成分が生起する局所的時間とそのときの診断波形の波形パラメータを分析するまでの処理に相当することから，生起検出処理・情報分析処理を同時に実現している信号処理技術ともいえる．

2.3.1.2 適用例とその結果

Fig.2.18 は，歯車の噛み合い異常状態を模擬した診断波形 [40] に対し，通常のフーリエ変換によって得られた振幅スペクトルによる分析結果と，ウェーブレット変換を適用した分析結果を示したものである．時間平均的な分析となる振幅スペクトルからは時刻情報が欠落するため，時間の経過と共に変化していく診断波形の差異はほとんど捕らえることができていない．これに比較して，ウェーブレット変換を用いることで，時間の経過にともなった周波数-振幅分布の差異が明確化され，局所的な診断波形の生起時刻とその周波数帯域に関して分析することが可能になる．

2.3. 診断のための信号処理技術としてみた先行技術

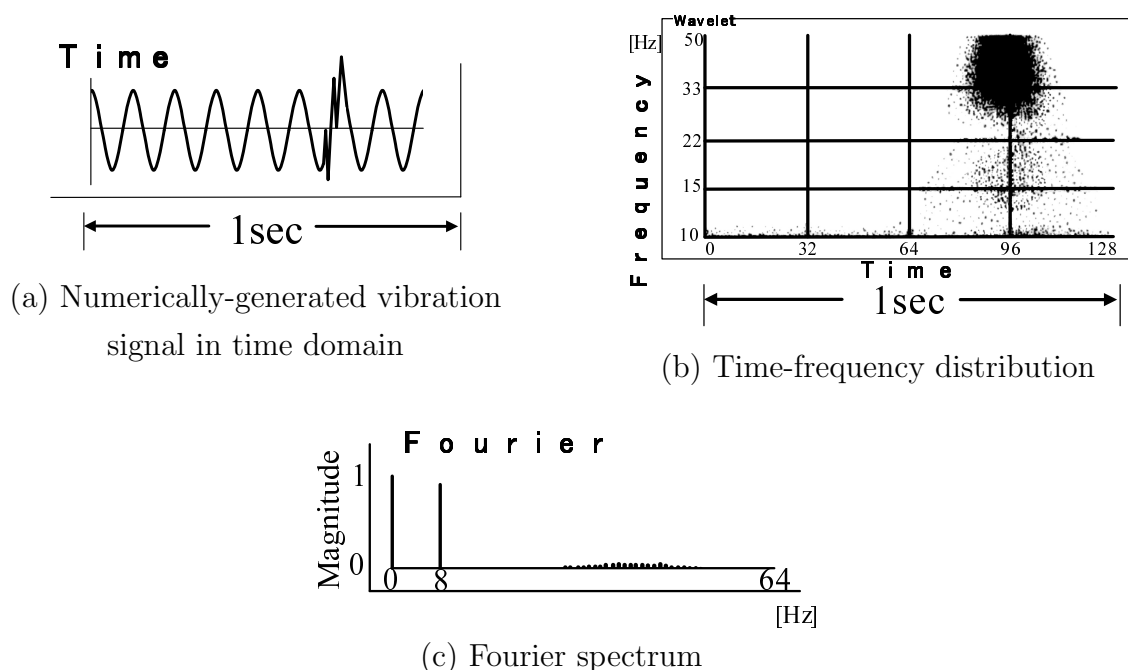


Fig. 2.18: Fourier spectrum and time-frequency distribution of wavelets for vibration signal of gearwheel[38]

2.3.1.3 診断のための信号処理技術としての知見

ウェーブレット変換がなぜ局在波形の生起検出に際して有用となってくるかという鍵について考えてみれば、それは「基底関数の任意性」と「時間窓幅の可変性」にあるといえるだろう。

基底関数として正弦波を利用するフーリエ変換とは異なり、対象となる診断波形の波形形状に合わせた任意の波形形状を利用できることが診断波形と基底関数の類似度を高める効果を生み、結果的に診断波形に対する検出感度の改善が図られている。またウェーブレット変換の定義式自体にしたがえば、それは時系列データ全体に渡る時間平均的な処理に違いないものの、基底関数の形状が時間窓として作用し、結果的に計算領域が基底関数の時間幅まで都度変化するいわゆる時間窓可変の相関処理を施している。言い換えれば、これは時間局所的な信号処理を施していることに他ならない。

2.3.2 逆フィルタを用いた背景雑音成分の低減

音響信号を利用した設備の異常診断技術には、対象設備のミクロな破壊にともなって発生する音響を捕えるアコースティックエミッション [41] 法や、音響波形をスペクトル解析して異常を検知・診断するもの [42] などが挙げられるが、いずれも設備周囲の操業音が相互に干渉し合い、異常音の発生源を特定することはなかなか難しいのが現状である。

ところが人間は、いわゆる「カクテルパーティ効果 [43]」として知られる能力を備え

ており、操業音に埋もれた微小な異常音を聞き分け、設備異常を診断することができる。すなわち、このカクテルパーティ効果を信号処理技術によって実現できれば、診断波形の生起検出・診断対象の情報分析を自動化できる可能性があり、逆フィルタを利用した実現方法が検討されている [44]。

2.3.2.1 信号処理の原理

任意の定常時系列波形が、適当な線形システムに対して白色雑音を入力した際の出力信号として表現できることは、よく知られている。いま、ある時系列波形 $y(t)$ を生成するために適切な線形システム $G(s)$ が仮に同定されているとすれば、それを基に構成される逆フィルタ $G^{-1}(s)$ を時系列波形 $y(t)$ へ作用させると、その出力としては白色雑音 $u(t)$ が得られることになる。一方で、もし逆フィルタを作用させる時系列波形の性質が、線形システム $G(s)$ の同定の際に使用された時系列波形のそれとは異なっていたとすれば、逆フィルタを作用させたとしても出力が白色化されることはない。この相違が、逆フィルタを用いた音響診断技術の根底を成す性質である。

すなわち、適当な時点で計測された診断対象の正常時操業音を利用してあらかじめ逆フィルタ $G^{-1}(s)$ を構成しておき、任意の診断時に得られる計測音にその逆フィルタを作用させる。このとき、逆フィルタによって正常時の背景雑音を白色化してその影響が低減され、診断波形のみが際立ってくるため、その出力を監視すればよい。この線形システムの同定には線形予測分析法、すなわち自己回帰 (AR) モデルやカルマンフィルタあるいはパーティクルフィルタなどの情報フィルタが利用される。

本手法は、背景雑音成分を低減して診断波形を顕在化させるまでの信号処理に相当することから、診断のための信号処理技術としてみた場合には、生起検出処理に相当した処理であるといえる。

2.3.2.2 適用例とその結果

Fig.2.19 は、軸受作動音に対し、事前に計測された正常時作動音の波形を基にして自己回帰モデルにより線形システムを同定しておき、ある正常時および異常時の計測波形にその逆フィルタを作用させた結果である。逆フィルタによって異常診断に不要な定常的な正常操業音や周囲雑音成分は取り除かれてしまい、正常時には波形が完全に白色化されている。これに対して異常時には波形は白色化されず、異常にともなった診断波形成分が顕在化していることを確認できる。

2.3.2.3 診断のための信号処理技術としての知見

さて、逆フィルタの利用が非定在性波形の生起検出へ有用となることの鍵は、「先見知識」を利用した波形発生メカニズムの「数式モデル化」にあるものとする。一般に異

2.3. 診断のための信号処理技術としてみた先行技術

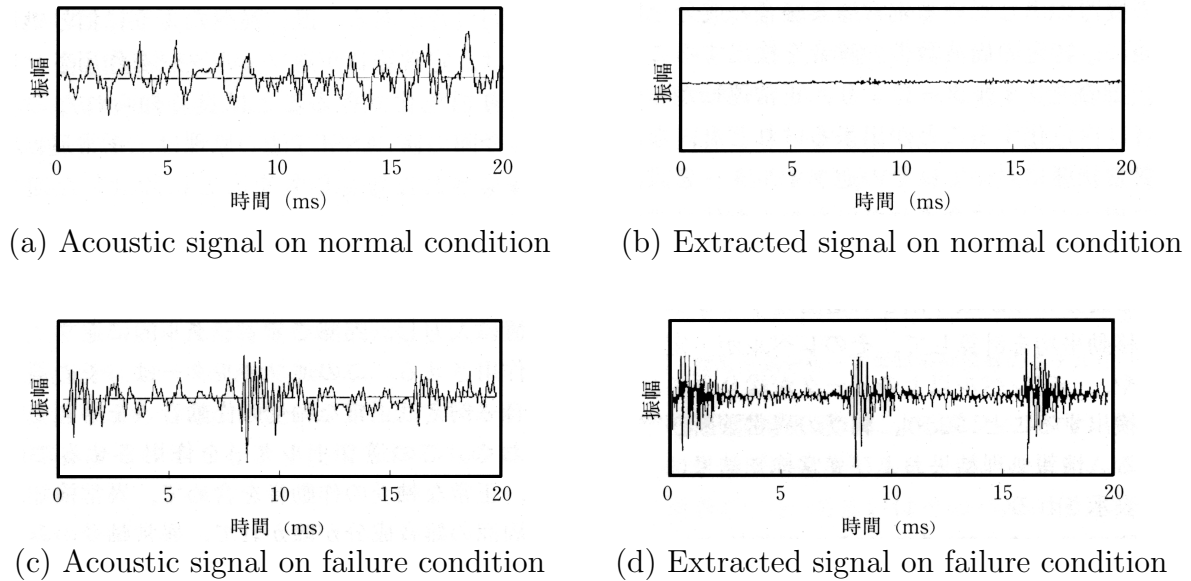


Fig. 2.19: Diagnosis example by inverse filter method for shaft bearing vibration[44]

常状態の発生要因は多種・多様であり，それら異常を基に発せられる診断波形を規範化された定形的な波形形状によって表現することは難しい．すなわち効果的な診断のためには，診断対象に個有の異常発生過程に関する物理現象あるいはその性質に根拠を置いた何らかの数式モデルを先見知識として利用し，診断波形の生起検出や情報分析へ積極的に活用していくことが必要である．

本節で挙げた例は，診断対象の性質として背景雑音成分の発生過程を数式モデル化したケースであったが，診断対象の音響発生特性に整合させた数式モデルを導入することによって，効果的かつ効率的な背景雑音成分の除去に成功している．

2.3.3 GA を利用した診断波形成分の検出

GA(Genetic Algorithm:遺伝的アルゴリズム)は，生物の進化過程にヒントを得た，最適化問題における最適解探索への応用が可能なアルゴリズムである．その詳細については文献[45]に詳しく記述されているが，大枠を簡潔に述べれば，あらかじめ定められた環境に対してより高い適応度をもつ個体は子孫が残せる確率をより高くなるようにしながら淘汰・交差・突然変異を繰り返して個体を進化させ，最終的に最も環境への適応度が高い個体を探索しようとするものである．このアルゴリズムを信号処理へと応用し，診断波形の抽出を試みた研究が行われている[46]．

2.3.3.1 信号処理の原理

いま，診断対象の正常時および異常時に獲得された振動あるいは音響などの時系列計測波形をそれぞれ $n(t)$ ， $y(t)=s(t)+n(t)$ とおく．ここで $s(t)$ は異常にともなって生起す

る診断波形を表し，異常時の計測波形 $y(t)$ では，背景雑音 $n(t)$ へそれが重畳された形で獲得される．抽出の目標は，診断波形 $y(t)$ から背景雑音 $n(t)$ の影響を取り除き，診断波形 $s(t)$ のみを顕在化させることである．

しかし，診断波形の真値 $s(t)$ は一般的に未知であり，仮に何らかの方法でその予測値 $s'(t)$ が得られたとしても，それが真値 $s(t)$ に一致するか否かを分析することが難しい．それに対して，背景雑音 $n(t)$ は前もって獲得できるため，それを真値として利用することができる．すなわち，Fig.2.20 に示すように背景雑音の予測値 $n'(t)$ を計測波形から抽出し，背景雑音の真値 $n(t)$ との相似度を分析することによって， $n'(t)$ 抽出後の計測波形

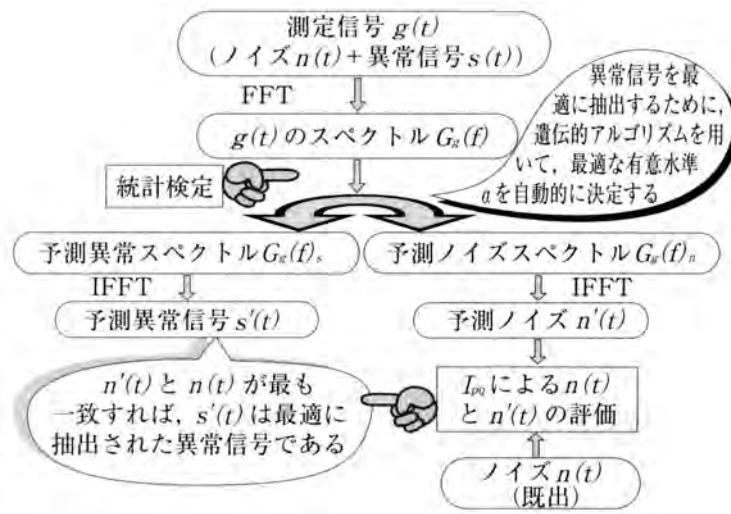


Fig. 2.20: Extraction process for abnormal signal waveforms by using GA[46]

の残成分すなわち診断波形の推定精度を間接的な分析を試みるものである．

はじめに計測波形のスペクトルを $Y(\omega)$ とおき，Fig.2.21 に示すように，その各周波数成分に対して初期遺伝子座を対応させる．そして，そこから遺伝子座が1に対応する周

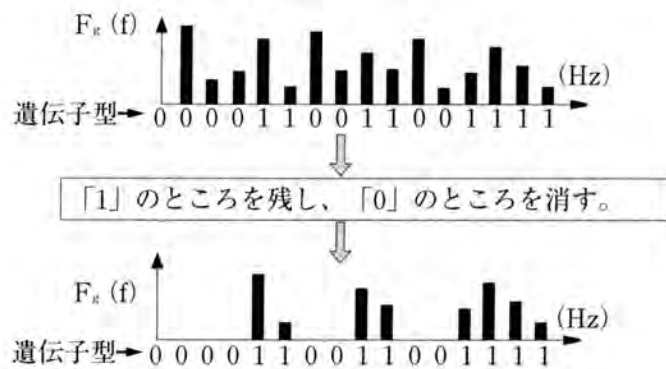


Fig. 2.21: Relation between genetic locus and each frequency elements[46]

波数成分のみを取り出して新たなスペクトルを構成し，それを逆フーリエ変換することで，背景雑音の予測値 $n'(t)$ を獲得する．このとき (2.12) 式の総合検定情報量 I_{pq} [46] を

2.3. 診断のための信号処理技術としてみた先行技術

利用して，背景雑音 $n(t)$ と背景雑音の予測値 $n'(t)$ の一致度を評価する．

$$I_{pq} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \log \left\{ \left(\frac{p_{n'k}}{p_{nk}} \right) \cdot \left(\frac{q_{n'k}}{q_{nk}} \right) \right\} \quad (2.12)$$

ここで p は信号波形の確率密度分布， q は波形の頻度密度分布である．すなわちこの場合には，GA の枠組みにおける「あらかじめ定められた環境」が背景雑音の真値 $n(t)$ そのものであり，指標 I_{pq} の小ささがその環境への「適応度」に対応する．あとは遺伝子の淘汰・交差・突然変異等を繰り返し， I_{pq} の値を指標値として最適な遺伝子型を決定し，背景雑音の予測値 $n'(t)$ を定めていく．最後に，診断波形から予測値 $n'(t)$ の抽出後の残成分が，診断波形の予測値 $s'(t)$ である．

本手法もまた，診断波形成分を抽出する信号処理に相当することから，診断のための信号処理技術としてみた場合には，生起検出処理に相当した処理であるといえる．

2.3.3.2 適用例とその結果

Fig.2.22 は，軸受損傷状態における回転機器の音響的な計測波形から，GA を利用したスペクトル推定法により抽出された，微小な診断波形の例である．抽出前後では背景雑音の影響が大幅に低減され，背景雑音に比較して振幅的に微小な診断波形のみが，的確に抽出されている様子をうかがうことができる．

2.3.3.3 診断のための信号処理技術としての知見

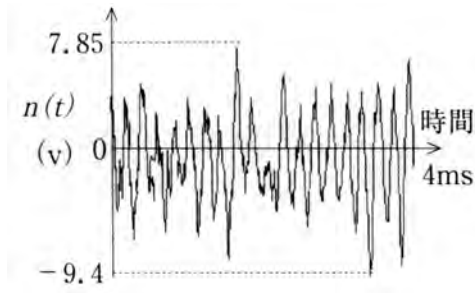
GA を利用した診断波形の生起検出が有用となることの鍵は，最適化アルゴリズムに GA を利用することももちろん大きいですが，その根底は「先見知識」に基づいた「最適化」という操作にあるものと考えられる．

多くの異常診断対象において異常現象の解析は十分であるとは言い難く，必ずしも異常状態に関する詳細な情報が獲得できない状況は起こりうるといえる．そのような状況下では，目的とする情報を直接的に獲得することだけではなく，獲得できる先見情報を最大限に利用して未知の目的情報の最適化を図るという考え方も必要となってくる．このような「最適化」に基づく推定は，診断という限られた先見知識から最良の診断精度を得るための，ひとつの効果的なアプローチ方法と考えられる．

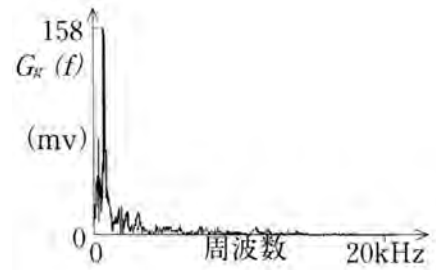
一方で，時間平均的な周波数スペクトルを基にして最適化を図る本手法は，診断波形の時間局所性に対する適応性は低いと考えられ，改良の余地を残した方法であるともいえる．

2.3.4 獲得された知見の整理

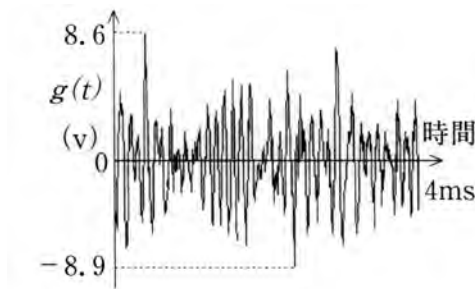
2.3.1～2.3.3 節におけるレビュー結果を基に，異常診断のための信号処理技術の構築に際して鍵になるであろう知見について，基本信号処理技術の適用において顕在化した課



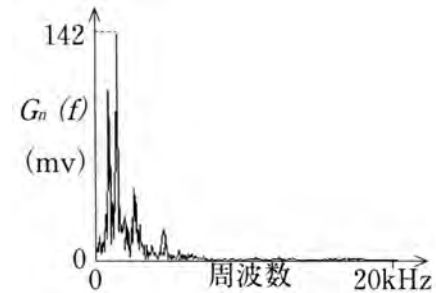
(a) Acoustic signal on normal condition



(b) Power spectrum on normal condition



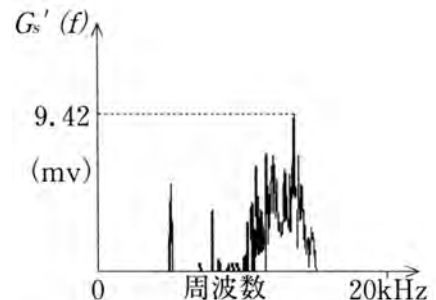
(c) Acoustic signal on abnormal condition



(d) Power spectrum on abnormal condition



(e) Extracted abnormal signal



(f) Power spectrum of abnormal signal

Fig. 2.22: Diagnosis example by using abnormal signal extraction method based on GA for shaft bearing vibration[46]

題点を踏まえながら，改めて拡大的に解釈しながら整理してみたい．

1. 時間窓の適用

時間-周波数領域における解析の利点のひとつは，基底関数の窓幅に可変性をもたせることで周波数解析を時間局所的に実現し，生起頻度が低く時間局所性を有した診断波形の検出までも可能とした点にあった．これまでで明らかになってきたように，診断波形の中には時間局所性をもったものが多数見受けられ，時間窓を利用して時間局所性をもつ信号処理を考えること，そして信号処理の時間分解能を向上させることは必要不可欠である．

2.3. 診断のための信号処理技術としてみた先行技術

2. 基底関数形状の任意性

いくつかの例で見てきたように，異常状態で獲得される診断波形の波形形状には特異的な形状をもつものが多い．正弦波に代表されるような一般定形的な波形だけではなく任意の形状をもつ波形を基底関数として利用できることは，そのような診断波形と基底関数波形との一致度を高めることにつながり，診断波形に対する適応性を高め，処理性能を向上させることが可能になるはずである．

3. 先見知識の利用

異常診断に際しては，異常状態自体が未知であるケースも多く，異常に関する情報を事前に獲得した状況における診断は期待できない．このような状況でこそ，少ない先見情報を最大限に利用して信号処理を実現することが必要である．すなわち診断対象となる診断波形に関する情報のみならず，診断対象とは異なる現象に起因した波形から獲得可能な多くの先見知識をも積極的に利用することで，処理性能の向上を図っている．

3-a 波形情報・物理現象のモデル化

診断対象となる波形形状あるいは異常発生過程を何らかの物理現象として表現することができれば，それらを数式的にモデル化し，さらにその数式モデルを信号処理法構築の根底に据え，診断波形の生起検出あるいは情報分析を実現することは，効率の良い処理を生む．

3-b 最適化手法への波形情報の応用

未知の診断波形を推定するに際して，先見知識を利用して最適化を図ることも有効である．ここでは分析対象となる波形に関する情報のみならず，分析対象外の波形に関して獲得された多くの先見知識を積極的に利用することで，良好な処理精度を得ることが可能となる．

2.1.2 節でも議論をしてきたように，基本信号処理技術はいずれも大域的すなわち時間平均的な分析方法であるとともに，基本統計量あるいは正弦波を基底とするスペクトル分析などでは，定形的波形モデルへ診断波形が合致するケースを仮定した分析であったと指摘することができる．

これに対して本節において得られた知見は，いずれも旧来の基本信号処理技術で顕在化してきた問題点を克服するための方策となっており，すなわち基本信号処理技術の範囲では見受けられなかった考え方である点に共通性を見い出せる．これは，異常診断のための信号処理技術には，従来の画一的な時間平均的・統一的処理の適用は難しく，対象となる診断波形の性質と整合した新たな信号処理のための視点が必要であるということの意味する．言い換えれば，異常診断を効果的に実現する信号処理技術を構築するためには，基本信号処理技術単独あるいはそれらの組み合わせによって検出・分析法を再構築することについて検討するのでは無く，これまでとは異なる視点に基づいた新たなアプローチが必要であることを示唆している．

2.4 信号処理技術の構築に向けた基本指針

信号処理の対象となる診断波形の分類・特徴とその信号処理における課題点，さらには診断のための信号処理技術に求められる処理機能を明確化するとともに，信号処理技術を実現するための具体的な着目点に関する知見の獲得と，順を追って明らかにしてきた．本節では，ここまでの議論を踏まえ，具体的な診断対象に対する信号処理技術の構築を検討する際の基本的な指針について議論しておく．そして第3章以降では，本節での基本的指針を軸に，具体的に信号処理技術の構築を試みていくこととしたい．

2.4.1 波形形状モデルの導入

いくつかの例を通して見てきたように，非定在性の診断波形では，その異常情報が畳み込まれたその波形形状に特異性をもつことが共通している．基本的な信号処理技術のひとつの問題点は，そのような特異性をもった波形形状を，正弦波や正規性雑音など連続的かつ数学的に単純に表現できる定形的な関数波形を基に，それら単独あるいはその重ね合わせによって表現しようと試みたことに無理があったと考えられる．すなわち特異な波形形状をもつ診断波形は，それらによっては表現ができないという事実が顕在化していた．

一方で，ウェーブレット変換による診断波形の生起検出では，特殊な診断波形形状と一致する任意の関数波形をマザーウェーブレットとして利用することによって，対象の診断波形に対してのみ感度を与えた生起検出処理を実現していた．すなわちこれは，検出対象となる診断波形を決定し，その波形形状に整合した関数波形を利用すれば，診断波形のみを選択的かつ効率的に抽出できることを示唆していたといえる．

また，人間は聞き取った音響的な診断波形形状の違いから，例えば異常の部位や状態をある程度推測することができ，これは，診断波形の形状にその発生要因となった物理現象に関する何かしらの情報が畳み込まれていることを意味する．したがって逆に，診断波形の発生要因となる物理現象を定めれば，先見知識としての診断波形形状，すなわち波形形状モデルはある範囲で定められるといえる．

そこで本研究ではこれらの背景を踏まえ，特異かつ多種・多様な診断波形形状に対する信号処理の適応性を保障するために，診断波形の波形形状モデルを利用することで柔軟に対応することとし，具体的な信号処理においてはその波形形状モデルをどのように利用していくのかについて議論していくこととする．

2.4.2 時間局所性の付与

本研究では，非定在性の診断波形をその信号処理の対象として採り挙げることにした．すなわち，特に混入頻度の小さな診断半径については，処理の選択性あるいは正確性を高めるために，信号処理アルゴリズムへ時間局所性を与えることは必須と考えられる．ま

2.5. 本章のまとめ

た診断のための信号処理技術が備えるべき重要な要件のひとつは、信号処理アルゴリズムの効率性がある。信号処理に時間局所性を与えること無く処理を構築することは、効率性の面からも好ましくない。

そこで本研究では診断のための全ての信号処理技術へ備えるべきもうひとつの指針として時間局所性を挙げ、具体的な信号処理においては、診断波形の生起位相に応じた信号処理技術への局所性の与え方について議論していくこととする。

2.5 本章のまとめ

本章では、診断のための信号処理技術の構築に向けた基本指針を定めることを念頭に、信号処理の対象となる非定在性波形の性質と整合させた信号処理技術を構築するために必要とされる処理機能を見い出すとともに、それらの機能を実現するための知見を先行技術に求めた。具体的には、基本信号処理技術を種々の診断波形へ適用することを通し、診断対象となる診断波形が非定在性波形であること、そしてそれらの処理を行う上での課題点を分析した。その上で、診断のための信号処理には生起検出と情報分析という異なる2種類の処理機能が必要であることを示し、その各処理機能レベルを決定する事項について整理を行った。またこれらの検討の一方で、これまで異常診断への応用を踏まえて研究されてきた先行するいくつかの信号処理技術を採り挙げてレビューし、診断のための信号処理技術の構築に際して着目すべき知見を抽出した。

第3章 回転機器の軸受異常診断における 局在型波形の信号処理

本章では具体的な診断対象に回転軸受の異常診断を採り挙げ、局在型の診断波形を対象として、生起検出を実現する信号処理技術に関する議論を中心に展開する。その指針として診断波形の波形形状モデルを利用することを基本に据えながら、確率論的なアプローチを基にした生起検出処理のための新たな原理を提案することによって、生起検出技術として選択性に優れ、かつ効率性の高い信号処理技術の構築を試みる。情報分析処理においては、伝達特性が未知である診断対象に対する波形パラメータ抽出を実現するために、提案する生起検出原理を拡張的に応用する方法を検討していく。

3.1 診断波形生起の時間局所性

はじめに本節では、診断波形としての局在型波形がもついくつかの特徴的な性質の中から、生起検出を難しくしている性質について採り挙げ、具体的な診断波形例を示しながら確認していく。この議論を経ることで、波形生起の時間局所性、中でも時間的局所の不定性が生起検出の難しさを招いていることが明らかになってくるわけであり、さらにその生起検出を実現するための確率論的アプローチの基本的な考え方についてもここで述べておく。なお診断波形に不定性の時間局所性を有する診断対象のひとつの例として、本研究においては回転機器の異常診断を採り挙げることとし、その概要についてもここで説明する。

3.1.1 波形生起の時間局所性に起因した生起検出の難しさ

局在型波形では、その生起位相の時間局所性、すなわち時間軸方向へ見たときの生起頻度の低さが顕著であることは、その特徴的な性質をもっとも端的に表現している。このことが端的に示されている実際の診断波形としては、回転軸受の振動波形中に生起するフレーキング波形を、既に Fig.2.11 に示してきている。

診断波形としてみた局在型波形の生起位相は、その診断対象に応じて変化することは想像に難くないことであるが、ここでは同じ回転軸受の振動波形ではあるものの、Fig.3.1 に転動体表面に傷を負った状態で生起したフレーキング波形の計測波形とそのパワースペクトルを図示した。これらの診断波形例からは、時間局所性という表現が指し示して

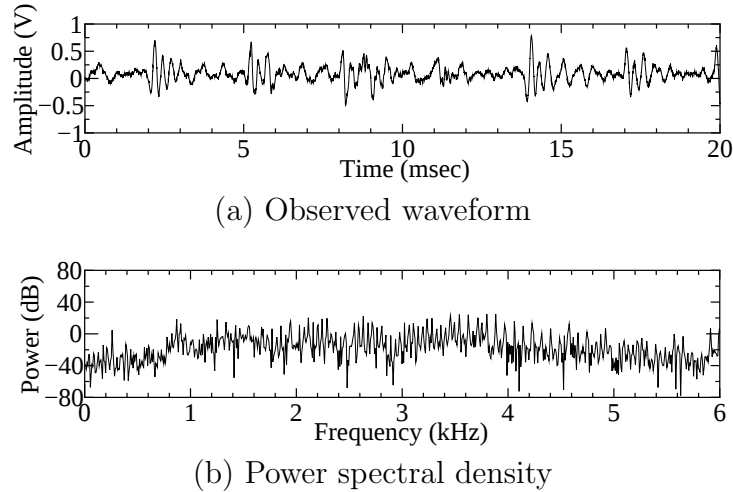


Fig. 3.1: Example of localized nonstationary diagnosis waveforms

いる「診断波形の離散的な生起」が繰り返され、同時に時間軸方向へみた時の診断波形が占める割合、すなわち生起頻度の低さも容易に判読することが可能である。実際にその生起頻度の低さに起因して、Fig.3.1-(b)からは局在型の診断波形の生起を確認することは難しいと言わざるを得ない。

さらに、Fig.3.1-(a)中でフレーキング波形は2.0, 5.0, 14.0, 17.0sec 付近を起点として不規則に生起しているが、これは同じフレーキング波形であっても規則的に生起を繰り返す診断波形、あるいは類似する例として、例えば医学分野における心電図信号 [47, 48]・心音図信号 [49, 50] など偏在型の診断波形と比較すれば、生起検出における難易度は、はるかに増加してくる。このような時間局所性を有することが、基本的信号処理技術における時間平均的处理との相性を著しく悪化させ、診断波形の生起検出と、その波形形状すなわち波形パラメータ値の抽出、ひいては診断対象の情報分析を難しくさせている最大の理由である。

ところで非定在性の診断波形は、波形自身の生成過程が多様なことも要因となり、同時に波形形状に特異性をもつことも多い。この性質については第4章でより深く触れることにするが、正弦波などの定形的波形の重ね合わせとして非定在性波形の形状を表現するには限界があることを示唆しており、このような要因によって、基本的な信号処理技術は必ずしも適当な生起検出法となっていなかった。すなわち、局在型波形の生起検出を目的とする信号処理技術においても、その時間局所性のみならず波形形状の特異性について十分に考慮しておかなければ、適切な生起検出技術の構築は難しいと考えられる。

3.1.2 回転機器の軸受異常診断

局在型の診断波形が生起する具体的な診断対象として、本研究では回転機器の軸受異常を採り挙げ、その信号処理技術について構築することを試みていく。Fig.3.2には、回転機器の軸受を模擬した実験装置の構成模式図を、Fig.3.3にはその写真を示した。詳細

3.1. 診断波形生起の時間局所性

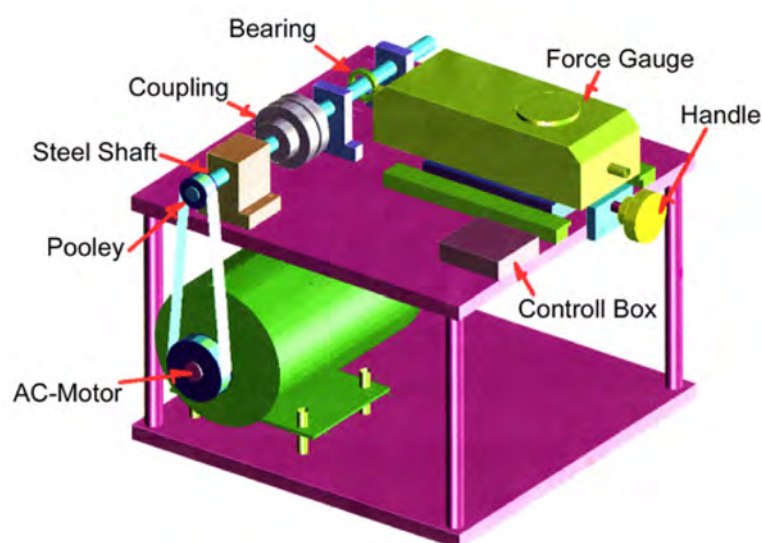


Fig. 3.2: Schematic view of experimental bearing test system

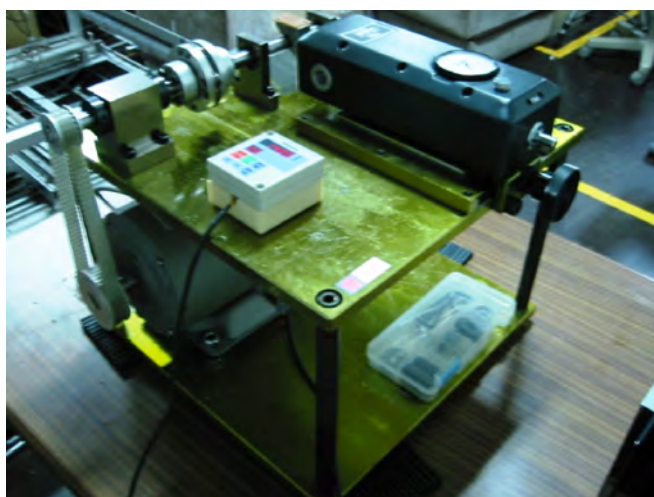


Fig. 3.3: Photograph of experimental bearing test system

については 3.5 節での実験的検証において説明するが，軸受を模擬しているベアリングに荷重を掛けながら，その外輪の振動を加速度計によって観測することができる構成となっている．

Fig.3.4 には，正常状態と異常状態における計測波形の一例を示した．異常時には，正常時には見られなかったフレーキング波形が，診断波形として生起している．このフレーキング波形は局在型波形であるため，その生起検出の実現には，計測波形の獲得時間領域全域に渡った診断波形の生起検出処理が必要であり，その難易度は高い．

一方で，フレーキング波形の生起がフレーキング現象の発生と因果関係をもつことは自明であるものの，その波形形状とフレーキング現象の状態との間にある伝達特性につ

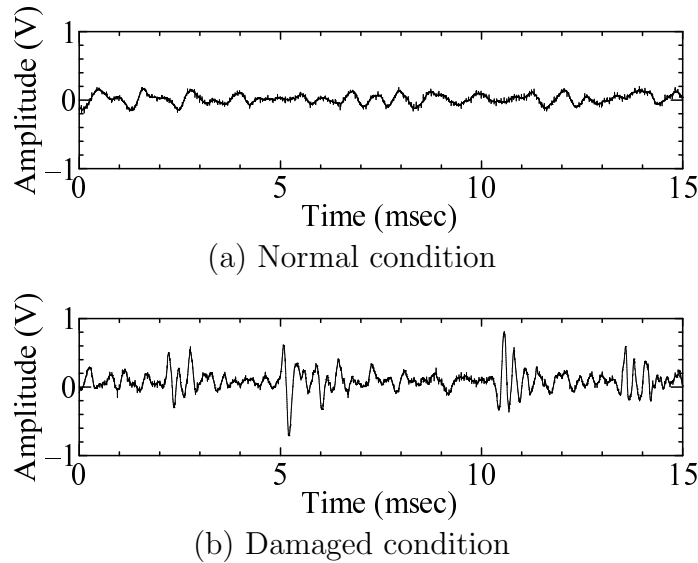


Fig. 3.4: Experimental observed waveforms for bearing test specimen

いては明確になっているとはいえない．すなわち情報分析処理という観点からは波形パラメータの抽出を実現すべき対象といえる．

3.1.3 生起検出処理を実現するための信号処理の基本的アプローチ

異常診断において未検出状態に陥ることは，診断対象の致命的故障へと直接つながる可能性から，絶対に回避しなければならない状況といえる．ここで検出対象となる局在型の診断波形は，その名称の由来どおり，不規則かつ時間的局所に生起する性質をもち，その生起検出が非常に難しい診断波形であることは，これまでに述べてきたとおりである．これに比較して波形パラメータ抽出は相対的にみれば平易であり，ひとたび診断波形の生起検出が実現してしまえば，情報分析処理については実現の可能性は一気に高まる．このような議論に基づけば，本診断対象における信号処理法の構成においては，生起検出のための処理機能に重点を置かなければならないことが浮かび上がってくる．すなわち局在型波形の生起頻度の極端な低さに対してどのような生起検出のためのアプローチで臨むのが，効果的な信号処理法を構築するための鍵となってくるであろうことを，容易に推察できる．

本研究では，診断波形の定在性を背景に据えたこれまでの確定論的なアプローチに代えて，非定在性すなわち生起頻度の低さ・生起位相の不規則さの双方に対処可能な生起検出のための信号処理技術として，確率論的なアプローチに基づく信号処理技術によって時間局所性との整合を図っていく．生起検出処理においては，対象となる診断波形のみを選択的に検出するための機能が求められるため，そこへ診断波形形状の特異性に適応させる波形形状モデルを組み合わせることで，選択性への解を求めていく．

3.2 局在型波形の生起検出のための確率論的アプローチ

生起検出を実現する信号処理技術においては、その処理機能レベルを問うことなく、診断波形に対する選択性を確保することが必要である。ここでは生起検出の処理機能レベルの中で最も高い選択性が要求される、局在型波形の生起検出を実現するための信号処理技術として、診断波形の不規則な生起の影響を抑制することが可能な、確率論的なアプローチに基づく生起検出技術の実現について検討する。

3.2.1 生起検出のための基本的な考え方

局在型波形の生起にともなって、計測波形には特殊な分布形状の変化が生じる。そこで、2.4節で述べた、診断波形形状の特異性との整合性を高めるための指針に則りながら診断波形の波形形状を的確にモデル化して、計測波形のデータ値系列の時間的近傍点にのみ生じるその特殊な分布形状を確率論的に検出する方法を検討する。

具体的には、波形形状を少ない代表点により表現する波形テンプレートを設計し、そこから規定される「ある事象」へ計測波形の信号値系列が属す確率値に着目する。そして確率値の変化から特別な相関の有無を評価し、局在型波形の生起を検出することを考える。すなわち、計測波形に局在型波形が含まれる場合は、波形の生起タイミングにおいて計測波形のデータ値系列は「ある事象」に属し、事象の発生確率が上昇する。この結果、局在型波形が含まれない場合とは異なった確率値が得られ、その確率値の変化として波形の生起が検出できる。次小節以降で順を追って明らかにしていくように、このような確率値の変化に着目した生起検出方法を検討することによって、生起検出における選択性の向上を図ることが達成される。また同時に、少ない代表点に基づいて信号処理を実現することは、処理の効率性に貢献してくることに注意されたい。

ところで、局在型波形の生起を監視する状況について考えてみれば、それらは「調査」と「診断」へ大別することができる。いずれも検出対象となる局在型波形の波形形状の特徴は既知としながら、診断波形を規定する波形パラメータ値が全く未知な状況における監視が「調査」であり、波形パラメータ値の変動範囲が(調査結果を基に)制限可能な状況における監視が「診断」を意味する。本研究では特にオンサイトかつリアルタイムな「診断」への応用を念頭に置き、難易度の高い生起検出処理でありながらも、計算量も削減した効率的な生起検出の実現を念頭に検討を進めていく。

3.2.2 波形テンプレートによる同時確率的生起検出

3.2.2.1 波形テンプレートの採用

診断波形としてみた局在型波形は、形状的な特徴が既知であるケースも多い。ところが、短時間フーリエ解析やウェーブレット解析を応用した方法などにおいても、局在型

波形の波形形状などといった先見的知識は、必ずしも有効に活用されていないのが現状である。本研究の範囲では、検出対象となる局在型波形の典型的な波形形状(ここでは詳細は分からないものの、その概要は掴めるもの)について、既にサンプル点系列として保存されたデータが利用できる場合を仮定し、その先見的知識を有効活用することについて考えていく。

いま、検出対象となる既知の局在型波形の典型的な信号波形 $\phi(t)$ に対し、サンプルされた離散振幅値系列を $\phi_l(l, \Delta_l^{\phi})$ ($l=0, 1, 2, \dots, n'$, l : 離散時刻, Δ_l^{ϕ} : 離散時刻 l における信号値)が獲得されている場合を想定する。このとき Fig.3.5 に模式的に示したように、離散振幅値系列 ϕ_l に比較して、例えば極大・極小点あるいは変曲点のような、少数でありながらも局在型波形の特異な形状的特徴を的確に代表し、表現することが可能な波形上の点を選び出し、それらの信号値系列 $g_j(k_j, \Delta_{k_j}^{\phi})$ ($j=0, 1, 2, \dots, n$) について、 ϕ_l を代表

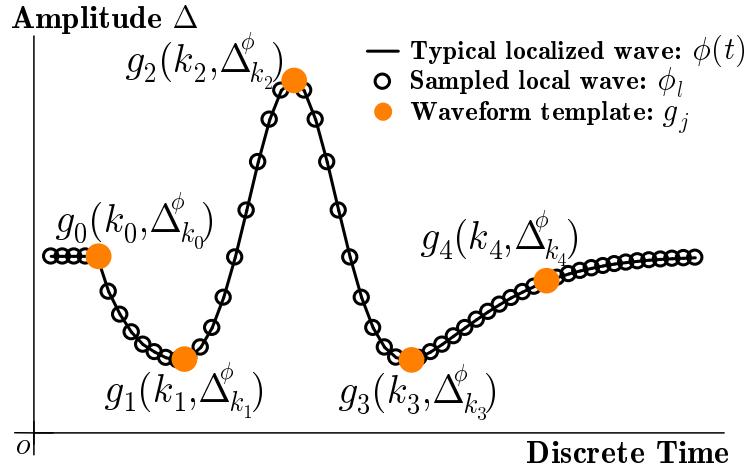


Fig. 3.5: Scheme of waveform template for localized nonstationary diagnostic waves

的に表現する「波形テンプレート」として採用する。ここで同様に k_j は離散時刻, $\Delta_{k_j}^{\phi}$ は離散時刻 k_j における信号値を表している。

このような波形テンプレートの意味は、効果的かつ効率的に表現が可能ないくつかの代表点によって診断波形の波形形状を代表するものであり、これらの近似点周りに対する演算処理に基づき、計測波形中での診断波形の生起を検出するための基礎となる波形形状モデルといえる。検出対象の診断波形自身に基づいて波形形状モデルを構築することで、診断波形のみに対する検出感度を十分に高めることが可能となり、結果的に選択性の向上へと寄与することになる。また特徴的な波形形状を代表点のみによって近似的に表現することは、結果的に検出のための演算量を低減することにもつながり、リアルタイム診断を実現するための要件である、処理の効率性にも貢献してくることになる。

なお、実際の診断波形に対する具体的な波形テンプレートの設計例に関しては、3.4.2 節で後述することになる。しかしながら、診断波形の形状を Fig.3.5 の場合のように少数の代表点によって表現できる場合には、波形テンプレートを利用した生起検出の考え方を同様に適用することが可能であるといえる。

3.2. 局在型波形の生起検出のための確率論的アプローチ

3.2.2.2 同時確率的な生起検出の考え方

診断波形の波形テンプレート g_j に一致するあるいは類似する局在型波形が計測波形中に混入している可能性を，計測波形の離散振幅値系列が，波形テンプレートによって規定される「ある事象」に属している確率値の変化に基づいて検出することを検討する．特にその生起が不規則な局在型波形の生起時間間隔は決定できない場合もあるため，処理の前提として，対象となる局在型波形 $\phi(t)$ に関して事前に予測されるその最長の生起時間間隔に比較して，十分な時間長の計測波形が獲得できるものと考えておく必要がある．

計測波形の離散振幅値系列 $y_i(i, \Delta_i^y)$ ($i = 0, 1, 2, \dots, N$, i : 離散時刻, Δ_i^y : 離散時刻 i での振幅値) の振幅値変動分 $\Delta_{i+k_j}^y - \Delta_{i+k_j-1}^y$ が，波形テンプレート g_j の振幅値の変動分 $\Delta_{k_j}^\phi - \Delta_{k_j-1}^\phi$ と一致する事象を S_j ($j=1, 2, \dots, n$) とおくこととする．いま，理想状態として背景雑音すなわち正常波形成分が零であると仮定した場合，計測波形の離散振幅値系列中のある時刻 i を起点とする振幅値系列により (3.1) 式の写像 $f_{\mathcal{J}}(i)=1$ が満たされることは，計測波形の離散振幅値系列と波形テンプレート g_j が一致することを意味する．

$$f_{\mathcal{J}}(i) = \prod_{r=1}^n z(S_r) \quad (3.1)$$

ただし， $z(\mathcal{X})$ は以下の 2 値関数である．

$$z(\mathcal{X}) = \begin{cases} 1 & (\mathcal{X} = \text{True}) \\ 0 & (\mathcal{X} = \text{False}) \end{cases} \quad (3.2)$$

このとき時刻 i において診断波形 $\phi(t)$ が生起したと判断することが可能である．したがって，事象 $\mathcal{J} = \{i : f_{\mathcal{J}}(i)=1\}$ と定義し，計算の起点時刻 i を計測波形の離散振幅値系列全域に渡って走査させながら事象 $\mathcal{J}$ が生起する確率 $R_{\mathcal{J}}$ を求めれば，その値を指標とした局在型波形の生起検出を実現することができる．Fig.3.6 には，この同時確率的な生起検出の考え方における $R_{\mathcal{J}}$ の模式図を示した．診断波形の生起にともなって確率 $R_{\mathcal{J}}$ の値

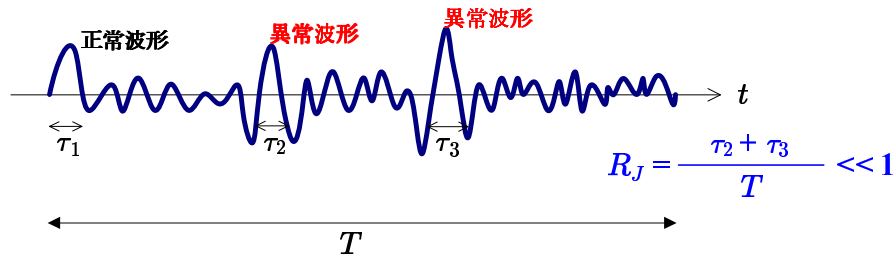


Fig. 3.6: Schematic view of arising detection based on joint probability logic

が増加するものの，ただしその値は診断波形の生起頻度に依存する点には注意が必要である．

ところで (3.1) 式において，ある S_j に関する計算は， S_{j-1} 以下が全て True の場合に限って実行すれば十分であり，逆にいえばある S_j が False となれば，それ以降の計算は

必要ない。これは、既知の局在型波形と計測波形の離散振幅値系列との完全な一致を評価するわけではなく、その代表点が一致するか否かで生起を判別するという検出原理とも併せ、計算負荷の軽減に貢献する。

なおここで述べた生起検出に関する基本的な原理自体は、計算負荷の問題さえ克服することが可能であれば、先に述べた「調査」・「診断」状況に係わらず適用することが可能であることには改めて注意を促しておく。

3.2.3 差分処理による選択性の向上

3.2.3.1 確率値の差分処理

一般的な計測波形では、(3.3) 式に示したように、診断波形に比較して定在的に生起している正常波形、周囲雑音あるいは観測時に混入する回路雑音といった背景雑音成分が、局在型波形成分に対して加法的に重畳して計測されるものと考えられる。

$$y(t) = \phi(t) + \psi(t) \quad (3.3)$$

ここで $y(t)$ 、 $\phi(t)$ 、 $\psi(t)$ は、それぞれ計測波形、診断波形、および定在する背景雑音の各成分を表している。

波形テンプレートが適切に設計されてはいても、それによって規定される事象は、局在型波形が生起している位相での離散振幅値系列以外、例えばその性質によっては背景雑音のみの位相での離散振幅値系列によって偶然生起し、結果として過検出を生じてしまう可能性も否定できない。診断波形と背景雑音の波形振幅比 (SN 比) が十分に大きな場合は問題ないと考えられるが、双方の振幅が近い条件においては、背景雑音の影響をできるだけ抑制させた状態で診断波形の生起検出処理が実現できるよう、工夫が必要である。

そこで、診断波形が生起したと考えられる計測波形から得られた確率値と背景雑音のみの計測波形から得られた確率値同士で差分を取り、診断波形の生起によって生じた影響分のみを顕在化させることで、検出性能すなわち選択性の向上を試みる。いま、差分により得られる確率率を R_{JD} とおき、(3.4) 式で定義する。

$$R_{JD} = R_{JF} - R_{JB} \quad (3.4)$$

ここで R_{JF} と R_{JB} はそれぞれ、診断波形が生起したと考えられる状態での計測波形による確率値と、背景雑音のみの計測波形から算出された確率値である。

ところで背景雑音のみの計測波形は、例えば回転機械プラントの正常稼働時の振動などの定常的雑音や観測雑音等の定常不規則信号が支配的で、統計的性質に時間経過に伴う変動は少ない。確率値は、計測波形の離散振幅値系列の分布形状に対して時刻情報を考慮せず算出するため、統計的性質が変化しない十分な時間長の計測波形があれば、不規則信号であってもほぼ同一の値が得られる。これらを考え併せれば、別の機会に予め

3.2. 局在型波形の生起検出のための確率論的アプローチ

得た背景雑音のみの計測波形から，監視時の R_{JB} は近似的に獲得できるものと考えて差し支えない．

3.2.3.2 差分処理の導入効果

提案した差分処理によって得られる確率値は，当該の波形パラメータをもつ波形形状に関する単位時間当たりの生起頻度を規定していることは，信号処理内容を踏まえれば明らかである．すなわち差分処理は，背景雑音成分による生起頻度増加分を取り除くための処理と位置付けることができる．一般的に，不規則信号の影響除去に，基準波形と計測波形の時系列波形同士の差分処理は効果をもたない．しかし生起時刻情報が考慮されることなく，確率論的に処理された確率値へ焼き直しを図れば，それらは同一の統計的性質に基づいた値として扱うことが可能となるため，すなわち差分処理を施す R_{JD} では背景雑音による影響分を抑制できることになる．

差分処理は低負荷な処理でありながら，診断波形成分に関する情報のみを浮き彫りにし，このように SN 比を向上させる効果を期待できる．同時に，背景雑音によって生じてしまう過検出に対してもその影響を低減する効果を併せもつ処理でもあり，特に小振幅の診断波形の生起検出において効果を発揮すると考えられる．

3.2.4 条件付き確率の導入による検出感度の向上

3.2.4.1 同時確率に代えた条件付き確率の導入

確率値 R_J を指標とする局在型波形の生起検出は，生起検出の考え方として自然である．しかし同時確率の考え方に基づいているが故に，その値の大小は局在型波形の生起頻度に依存し，すなわち生起頻度が低い場面では値が小さくなるために，生起頻度が変化する場面での検出に必ずしも適しているとも言えない．そこで検出に関する思想は変えることなく，生起頻度に依存せずに生起の有無を一元的に判別することが可能な，低生起頻度の診断波形に対する選択性を高めたいわば高感度な指標値を，条件付き確率の考え方に着目して構築することを試みる．

いま波形テンプレートの振幅値変動分 $\mathcal{S}_r$ に基づく新たな写像として，(3.5) 式で表わされる f_C を定義する．

$$f_C(i) = \prod_{r=1}^m z(\mathcal{S}_{\alpha_r}) \quad (3.5)$$

ここで， $m < n$ である．そして条件付き確率の考え方を応用し，事象 $\mathcal{C} = \{i : f_C(i) = 1\}$ 生起の下で事象 $\mathcal{J}$ が生起する確率 R_C を (3.6) 式で定義し， R_J に代わる指標値として用いる．

$$R_C = \frac{\text{Card}(\mathcal{J})}{\text{Card}(\mathcal{C})} = \frac{\sum_{i=0}^{N-k_n} f_J(i)}{\sum_{i=0}^{N-k_n} f_C(i)} \quad (3.6)$$

ただし, $\text{Card}(\mathcal{X})$ は事象 $\mathcal{X}$ 中の元の個数を表す．なお f_c を規定している m 個の S_{α_*} は, 診断波形あるいは背景雑音の性質などを考慮して効果的な検出が実現するように, 予め S_j 中より定める．

Fig.3.7 には, 条件付き確率の考え方に着目した生起検出における確率値 R_C の模式図を示した．同時確率に基づく確率値 R_J に比較して, R_C の値は診断波形の生起頻度に依

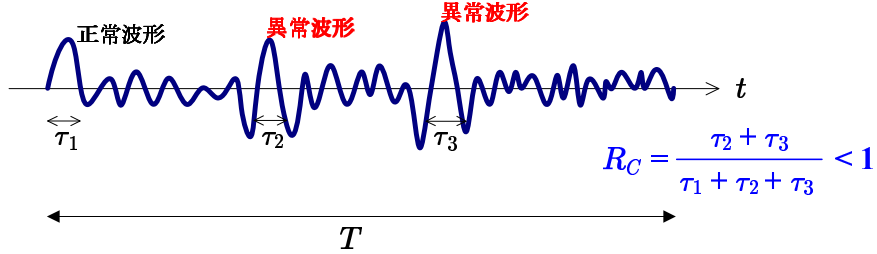


Fig. 3.7: Schematic view of arising detection based on conditional probability logic

らず, 比較的大きな値へと保たれることになる．

3.2.4.2 条件付き確率の導入効果

同時確率に基づいた確率値 R_J では, 単位時間当たりの正確な局在型波形の生起頻度が検知できるなどといった, いくつかの利点もある．しかし, それゆえに局在型波形の生起頻度が低いほど確率値は小さくなるため, 実際の計測波形への適用では, 生起頻度が低い場合に生起の判断が難しくなる可能性がある．言い換えればこれは, 生起頻度が低いほど生起を見過ごす可能性が高いことを意味しており, 診断システムへの応用を考えた際には致命的な欠点となってしまう．

これに対して, $\text{Card}(\mathcal{C})$ による $\text{Card}(\mathcal{J})$ の規格化が施されることになる条件付き確率に基づいた確率値 R_C では局在型波形の生起頻度に関する情報が得られなくなるという欠点はあるものの, 時間軸方向において雑音波形が占めている時間領域の影響を抑制することが可能となり, 広義に解釈すれば SN 比 (ここでいう SN 比は時間軸方向にみた信号波形と背景雑音が支配的な時間長の比) の改善にも貢献することになる．すなわち, その生起頻度によること無く, 指標値が比較的大きく保たれることで生起を見過ごす可能性は低くなり, 未検出を抑制するという観点からの選択性の向上を果たすことが可能である．加えて, 生起頻度が低くともそれに依存せず, 確率値の大小のみで診断波形の生起の有無を一元的に扱うことが可能な指標値となる点にも意義がある．

もし生起頻度情報を放棄するというのであれば, 事象 $\mathcal{C}$ の生起を局在型波形生起の必要十分条件, すなわち事象 $\mathcal{J}$ へと設定し, 局在型波形の生起頻度によらず常に R_C を最大 (=1) 化してしまう方法も考え得る．しかしその場合, 逆に背景雑音を誤検出した影響であっても R_C が最大化されてしまい, 局在型波形の影響との区別が難しくなる．実際の応用を考えた場合には組み込まざるを得ない背景雑音の影響除去も困難となり, またもし仮に背景雑音の影響除去法が適用できたとしても, その影響を完全に除去することは

3.3. 波形パラメータ抽出のための確率論的アプローチの拡張

難しく、必ずしも得策とは言えない．すなわち、背景雑音による影響分と区別できる範囲で、局在型波形による影響分を可能な限り大きな確率値の変化として獲得しておくことは、未検出を抑制するという観点からの選択性の向上にもつながる．

なお局在型波形の生起可能性を表しているという意味で、以降では確率 R_C を生起率と呼ぶことにする．ところで $\text{Card}(C)$ による規格化のため、生起率値 R_C では、局在型波形の生起が無くともその値が増加して過検出を生じる可能性も考え得るが、その対策については背景信号の影響抑制法としての差分処理の節で述べたとおりである．

3.3 波形パラメータ抽出のための確率論的アプローチの拡張

本研究で対象としている軸受のフレーキング波形振幅と傷の深さ [33]、あるいは心電波形の形状と疾患の程度 [50] などのように、診断波形の波形形状には、それらの波形の生起要因となった異常現象の状態と何らかの相関をもった変形が生じる．これは、診断信号波形の生起要因となった異常状態の推定を実現するひとつの手掛りが、波形形状情報にあることを示している．

すなわち異常状態推定を行うためには、たとえ逆問題としての伝達特性が明らかとはなっても、局在型波形の生起検出のみに留まらず、波形形状を規定する波形パラメータ値までを自動的に推定する技術の必要性は高いことを意味する．本節では3.2節で新たに提案した確率論的アプローチに基づいた局在型波形の生起検出技術を基礎に、局在型波形の波形パラメータ抽出のための機能について検討する．

3.3.1 生起率分布への拡張

一般的に局在型波形の波形形状は、正確な逆伝達特性は分からなくとも、少なくともその生起要因となった異常現象の状態と相関をもっている．そのため、単一形状の波形テンプレートによって規定できる局在信号波形の生起を検出するだけでは、波形パラメータ抽出機能への応用はもちろん、実用的な生起検出法としても成立し得ない．

そこで、診断波形形状を規定している波形パラメータによる関数として波形テンプレート形状を拘束しながら、幾通りにもその形状を変化させて生起率を計算することを考える．このとき、生起率の大小から局在型波形の生起を検出できると同時に、生起率値が大きな波形テンプレート形状に対応する波形パラメータ値を判読すれば、生起が検出された診断波形の形状推定まで可能となってくる．

診断波形の波形形状を規定する波形パラメータによる関数として、波形テンプレートの拡張を試みる．いま、検出対象となる局在型波形の波形形状を規定する波形パラメータとして、 $u_1, u_2, \dots$ を選択する．このとき拡張された波形テンプレート $\tilde{g}_j (j=0, 1, 2, \dots, n)$ の各要素 $\tilde{k}_j(u_1, u_2, \dots)$ 、 $\tilde{\Delta}_{k_j}^\phi(u_1, u_2, \dots)$ は、 g_j の各要素 k_j 、 $\Delta_{k_j}^\phi$ からの変化分が (3.7) 式に示されるように波形パラメータ $u_1, u_2, \dots$ の関数である、それぞれ $G_{k_j}(u_1, u_2, \dots)$ 、 $G_{\Delta_{k_j}^\phi}(u_1, u_2, \dots)$

として考慮されている g_j 近傍の値として再設計する．

$$\begin{cases} \tilde{k}_j(u_1, u_2, \dots) &= k_j + G_{k_j}(u_1, u_2, \dots) \\ \tilde{\Delta}_{k_j}^\phi(u_1, u_2, \dots) &= \Delta_{k_j}^\phi + G_{\Delta_{k_j}^\phi}(u_1, u_2, \dots) \end{cases} \quad (3.7)$$

$$(j = 0, 1, 2, \dots, n)$$

拡張により再設計された波形テンプレート $\tilde{g}_j$ を模式的に表すと，Fig.3.8 となる．ここでは G_{k_j} と $G_{\Delta_{k_j}^\phi}$ として，それぞれ振幅軸方向および時間軸方向への伸縮を考慮に入れた例を図示したが，このように波形テンプレートを拡張することによって，形状の変化する

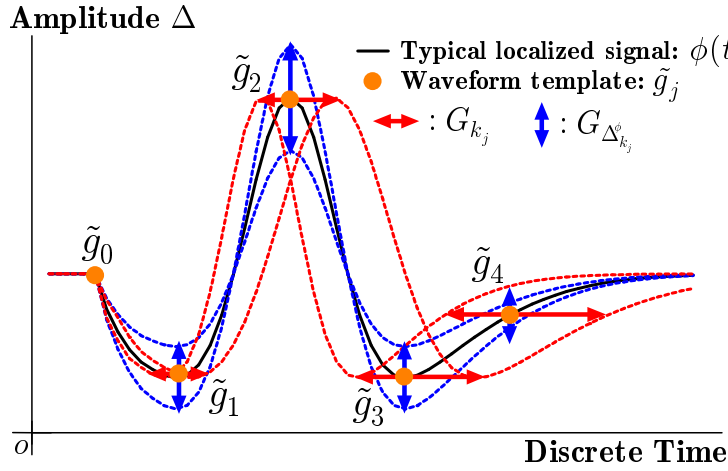


Fig. 3.8: Scheme of enhanced waveform template

診断波形に対しても検出感度を持たせることが可能となる．

拡張された波形テンプレート $\tilde{g}_j$ によって規定される事象に計測波形の離散振幅値系列が属することを意味する生起率値 R_C は，この操作によって点から領域へと拡張されることになり， $u_1, u_2, \dots$ 軸から構成される多次元空間内に分布することになる．以降ではこの分布を生起率分布と呼ぶことにし， $\Pi(u_1, u_2, \dots)$ で表す．

ところで，このような波形パラメータ探索における探索範囲の違いが，「調査」と「診断」における最大の相違でもある．調査段階では可能な限り広範囲を探索するのに対し，診断段階ではあらかじめ予想される限られた範囲のみの探索を実施することで，計算負荷を軽減していくことが可能となる．

3.3.2 対称生起率分布と非対称生起率分布

3.3.2.1 生起率分布の分離

検出対象である診断波形が，その波形形状を規定しているある波形パラメータの符号変化に対し波形形状的な反転性をもっている場合には，生起率分布 Π_D から当該成分に関する情報のみを分離し，検出することが可能である．以下では，そのような反転性を

3.3. 波形パラメータ抽出のための確率論的アプローチの拡張

端的に代表する典型的な例として局在型波形の位相反転性を取り上げながら，その方法について説明していく．

いま信号波形形状を規定する波形パラメータ u_1 として振幅 A を与えるとき，対称生起率分布 $\Pi_S(A, u_2, \dots)$ と非対称生起率分布 $\Pi_N(A, u_2, \dots)$ を， Π_D を差分生起率分布として，それぞれ (3.8) 式および (3.9) 式によって定義する．

$$\Pi_S(A, u_2, \dots) = \sqrt{|\Pi_D(A, u_2, \dots) \cdot \Pi_D(-A, u_2, \dots)|} \quad (3.8)$$

$$\Pi_N(A, u_2, \dots) = \Pi_D(A, u_2, \dots) - \Pi_D(-A, u_2, \dots) \quad (3.9)$$

ここで $A \geq 0$ の範囲のみを考えれば， Π_S, Π_N はそれぞれ差分生起率分布 Π_D の振幅 A に関する対称成分(偶関数成分)および非対称成分(奇関数成分)が抽出された分布として得られる．

3.3.2.2 分離された生起率分布の性質

最初に，振幅値 $\pm A_S$ すなわち正相・逆相成分が混在する波形形状をもつ診断波形が，計測波形で生起した場合を例に考えてみる．このとき A 軸方向に関して Π_D の分布は対称であり，かつ $\pm A_S$ 付近に高生起率値の分布を生じることが予測できる．すなわち， Π_S は $A=A_S$ においてのみ零以外の値を取ることができるが， Π_N は全て零となる．

一方，同様に振幅値 A_N すなわち正相・逆相成分いずれかのみ波形形状をもつ診断波形が生起した場合を考えてみる．今度は A 軸方向に関して Π_D は非対称であり， $A=A_N$ 付近にのみ高生起率値の分布を生じることが予測できる．すなわち逆に Π_S は全て零であり， Π_N は $A=|A_N|$ において零以外の値を取ると同時に，生起成分が正相・逆相のいずれであるのかが，その Π_N における生起率値の符号によって規定されることになる．

すなわち Π_S には正相・逆相混在成分のみが， Π_N には正相成分あるいは逆相成分のみが，区別されて抽出される．したがって，反転性をもつ局在型波形が混在する状況に左右されず，これら 3 種類の診断波形成分に関する生起率分布を分離して，個別に評価することが可能になるといえる．

3.3.3 診断波形の波形パラメータ抽出の実現

診断波形が生起することにともない，背景雑音のみの場合に比較して，計測波形に関する生起率分布中には大きな生起率値をとる領域が出現する．これまで述べてきたように，これは背景雑音とは異なる波形成分が生起したことを意味することになるが，同時にその生起率分布の増加領域に対応する波形パラメータが，生起した診断波形の波形パラメータ値そのものを表すことになると考えられる．

すなわち，生起率分布値の増加から診断波形の生起が検出できることはもちろんであるが，分布値が増加した領域に対応する波形テンプレートの波形パラメータ値を判読することで，情報分析処理における波形パラメータ抽出が達成されることになる．

具体的な処理には，対称生起率分布 Π_S と非対称生起率分布 Π_N を利用することとなる．はじめに， Π_S に関しては分布領域中の極大値， Π_N に関しては極大値あるいは極小値を探索する．それらの絶対値があらかじめ設定された閾値を越えた場合には診断波形の生起が検出されたとみなし，さらにその極値が分布する領域に対応する波形パラメータの判読処理を行えばよい．なお，正相・逆相成分が混在して差分生起率分布 Π_D に対称性を生じる場合， Π_D を利用して波形パラメータ抽出を行ってしまえば，2種類の診断波形成分の生起として誤評価される可能性がある．しかし対称生起率分布 Π_S を利用すれば同一成分と評価でき，診断における選択性の向上も併せて期待できる．

3.4 信号処理性能のシミュレーション的検証

3.4.1 模擬計測波形の準備

3.4.1.1 基準計測波形の生成

シミュレーションに使用する計測波形は，サンプリング周期 $\Delta t = 2.0 \times 10^{-6} \text{sec}$ で時間長 0.4sec (データ総点数 $N = 200,000$) の離散データ値系列として生成させた．

はじめに局在型波形 ϕ_l は，その典型的な波形として，(3.10) 式によって表されるフレーキング波形 [33] を利用した．

$$\phi_l = \begin{cases} 0 & (l < 0) \\ A_0 e^{-\zeta 2\pi f_0 l \Delta t} \sin(2\pi f_0 l \Delta t) & (l = 0, 1, 2, \dots) \end{cases} \quad (3.10)$$

振幅 $A_0 = 1.0 \text{V}$ ，固有周波数 $f_0 = 3.0 \text{kHz}$ ，減衰係数 $\zeta = 0.10$ とし，1 データ値系列中に不規則間隔でランダムに 50 個混入させて ϕ'_i とした．

続いて背景雑音波形 ψ_i は，実際の波形に近い特性が得られるよう，測定雑音と操業雑音の組み合わせを考える．具体的には，平均 0V ・標準偏差 $5.0 \times 10^{-3} \text{V}$ の正規性不規則信号波形の時系列データに対し標準偏差 $\sigma = 2\Delta t$ の正規分布型重み付き移動平均を施した波形を広帯域小振幅信号(観測雑音)波形として，また平均 0V ・標準偏差 0.25V の正規性不規則信号波形の時系列データに対し同じく $\sigma = 25\Delta t$ の正規分布型重み付き移動平均を施した波形を狭帯域中振幅信号(操業雑音)波形として，それぞれ採用した．さらに周期性定常雑音として振幅 0.07V ，周波数 900Hz の正弦波を用意し，これら 3 波形の和を背景雑音 ψ_i とした．

最後にこれら ϕ'_i と ψ_i の加算結果を，基準計測波形 F_3^{100} (下添字 3 は局在信号の固有周波数 (kHz)，上添字 100 は同じく振幅 (V) $\times 100$ を表す) とした．

3.4.1.2 処理性能検証のための計測波形の拡張

基準計測波形に対し，さらに局在型波形の生起頻度あるいは背景雑音のパワーを変化させた信号，および局在型波形の波形形状を変化させた計測波形を生成した．

3.4. 信号処理性能のシミュレーション的検証

まず前者として, F_3^{**} に対して局在型波形 ϕ_l の生起頻度を $1/2, 1/4$ とした $R2_3^{**}, R4_3^{**}$, また F_3^{**} に対して背景雑音 ψ_i のパワーを 2, 10, 50 倍とした $N2_3^{**}, N10_3^{**}, N50_3^{**}$ を用意する. 続いて後者として, ϕ_l の振幅 A_0 を $0 \sim 1.0V$ 間で $0.05V$ 刻み, 固有周波数 f_0 を $1.0 \sim 5.0kHz$ 間で $1.0kHz$ 刻みの変化を組み合わせた F_*^{**} , また F_3^{**} に対して ϕ_l の振幅値をその生起毎にランダムに反転させた I_3^{**} を用意する.

これら R_*^{**}, N_*^{**} および F_*^{**}, I_3^{**} の全波形を, 各々15系列ずつ生成した. 代表的な模擬計測波形と, そのパワースペクトルを Fig.3.9 に示す. パワースペクトルからは, 局在型

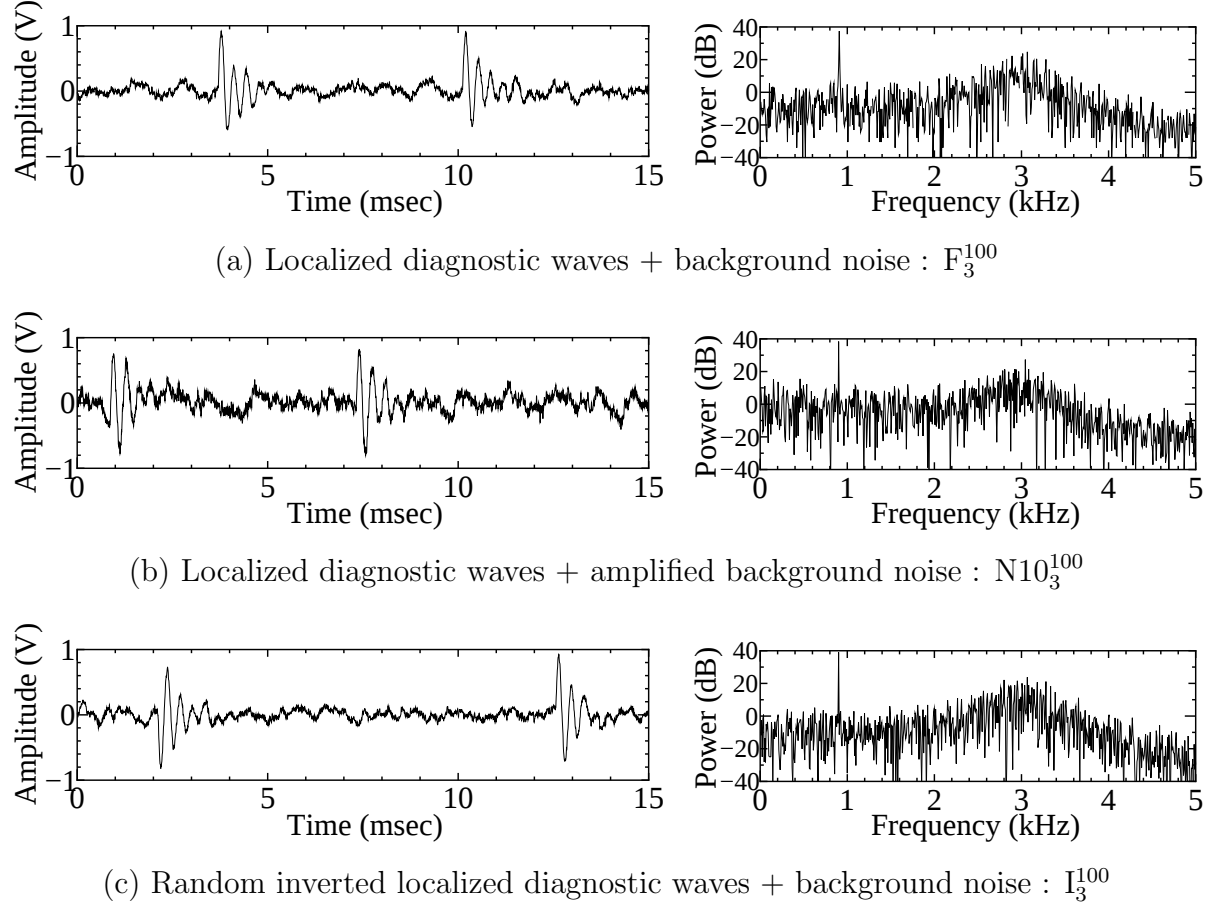


Fig. 3.9: Waveform and power spectral density of simulated observed waveforms

波形の固有周波数付近において波形成分のもつパワーが僅かに増加していることを読み取れるが, 一方で的確な生起検出の難しさを改めて確認できるとともに, 波形パラメータ抽出に至っては到底困難である.

3.4.2 波形テンプレートの準備

3.4.2.1 テンプレート設計

局在型波形としてのフレーキング波形の波形形状を規定する主要なパラメータとして, (3.10) 式に基づいて今回は最大振幅 A および固有周波数 f_0 を採り上げ, 波形テンプレ

ト設計へ考慮することとした．

信号処理の原理へと立ち戻れば，対象となる局在型波形の離散振幅値系列 ϕ_l から時間窓によって波形を切り出した際に，その切り出した波形と ϕ_l の位相が完全に一致するときのみ相互相関が極大値を取るようなできるだけ短時間の区間を少なくともはじめに見い出すことが必要である．その上で，その切り出した波形上のできるだけ少ない特異な代表点へ絞り込むことによって，テンプレートとして設計することが望ましい．

今回は，後で述べる背景雑音の振幅による影響も考慮し，Fig.3.10 に示すように，波形の開始点（微分値の不連続点）および最大振幅 A の半値以上の絶対値をもつ極大・極小点の，計4つの特異な点で特徴的波形形状を表現する．(3.7) 式の波形テンプレートにお

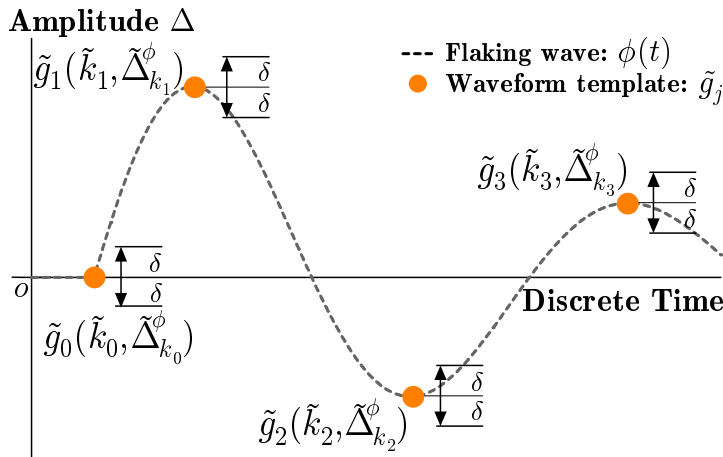


Fig. 3.10: Concrete design of waveform template

けるパラメータ u_1 をフレーキング波形の最大振幅 A ， u_2 を同じく固有周波数 f_0 とおいた．このとき，波形テンプレートの各要素は (3.11) および (3.12) 式で表される．

$$\begin{bmatrix} \tilde{k}_0 \\ \tilde{k}_1 \\ \tilde{k}_2 \\ \tilde{k}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{\Delta t} \left\{ \frac{1}{2\pi f_0} \tan^{-1} \left(\frac{1}{\zeta} \right) \right\} \\ \frac{1}{\Delta t} \left\{ \frac{1}{2\pi f_0} \tan^{-1} \left(\frac{1}{\zeta} \right) + \frac{\pi}{2\pi f_0} \right\} \\ \frac{1}{\Delta t} \left\{ \frac{1}{2\pi f_0} \tan^{-1} \left(\frac{1}{\zeta} \right) + \frac{2\pi}{2\pi f_0} \right\} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$\begin{bmatrix} \tilde{\Delta}_{k_0}^{\phi} \\ \tilde{\Delta}_{k_1}^{\phi} \\ \tilde{\Delta}_{k_2}^{\phi} \\ \tilde{\Delta}_{k_3}^{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ A \\ -Ae^{-\pi\zeta} \\ Ae^{-2\pi\zeta} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

なお減衰係数は， $\zeta=0.10$ とする．

また条件付き確率事象を利用するための，写像 f_c を規定する事象には，今回ひとつの設計例としてフレーキング波形の立ち上がり部分，すなわち S_1 を採用することにした．波形テンプレートの時間的長さ・点数 n あるいは写像 f_c の選択が，対象となる診断波形の波形形状や背景雑音の性質などとも密接に関係し，診断性能を左右する大きな要因と

3.4. 信号処理性能のシミュレーション的検証

なる．より選択性が高く効果的な生起検出 (および情報分析) を実現するためには，それらの具体的な設計指針に関して多くの議論の余地があると考えられるが，今後の検討課題としたい．

3.4.2.2 背景雑音波形の影響の組み込み

背景雑音波形成分が計測波形へ重畳されることにより，診断波形は変形を受けることになる．そこで Fig.3.10 にも示したように，波形テンプレートの振幅方向に背景雑音波形成分による振幅値変動の許容幅 $\pm\delta$ を与える．

すなわち生起率の算出に際して，波形テンプレートの振幅値 $\tilde{\Delta}_{k*}^{\phi}$ の存在可能範囲を $\tilde{\Delta}_{k*}^{\phi} - \delta \sim \tilde{\Delta}_{k*}^{\phi} + \delta$ まで拡張しながら処理することによって，背景雑音成分による診断波形の変形分を事前に波形テンプレートへ考慮した信号処理を実現できる．今回は，重畳させた背景雑音成分の振幅値を基に， $\delta=0.03\text{V}$ と設定した．

3.4.3 生起検出処理としての有効性

3.4.3.1 生起率に基づいた生起検出の選択性確認

設計した波形テンプレートに基づきながら模擬計測波形の振幅値データ系列に対する生起検出のための信号処理を施していく．

はじめに，基準計測波形 F_3^{100} に対する同時確率値 R_J の分布，およびその正常時計測波形に相当する F_3^0 に対する同時確率値 R_{JN} 分布との差分処理結果 R_{JD} の分布を，それぞれ Fig.3.11 および 3.12 に示した．各分布とも横軸は最大振幅 $A(\text{V})$ ，縦軸は固有周波数 $f_0(\text{kHz})$ を表す．各軸方向に関するメッシュの刻みは，それぞれ 0.01V ， 50.0Hz であり，また分布の色が生起率値 $R_C(\%)$ に対応している．なおフレーキング信号波形の (3.10) 式中における振幅 A_0 と，波形テンプレートの (3.12) 式中における最大振幅 A の間には， $A \simeq 0.86A_0$ の関係があることに注意されたい．

同時確率値 R_J の分布ではその値が生起頻度に依存しているため，背景雑音による確率値の大きさに比較して，局在型波形による確率値の大きさは十分なレベルに達しておらず，その生起を検出することは難しい．これに対して，正常時計測波形との差分処理結果 R_{JD} の分布では，波形パラメータ値である最大振幅 $A=0.86\text{V}$ ・固有周波数 $f_0=3.0\text{kHz}$ に対応した領域に確率値の大きな部分が出現してくる．すなわち背景雑音の影響を抑制する差分処理を施していることで正常時計測波形 (背景雑音) の影響は大幅に抑制されており，診断波形以外に対する過検出を抑制するという選択性の向上に，差分処理が有効であることを確認できる．同時に，確率値の大きな領域が確認できたことは，確率論的アプローチに基づいた診断波形生起検出の考え方の有効性が，端的に示された結果といえる．しかしながら，その確率値の値は小さく，生起検出に際して十分な選択性を保証できるレベルとは必ずしも言い難い．

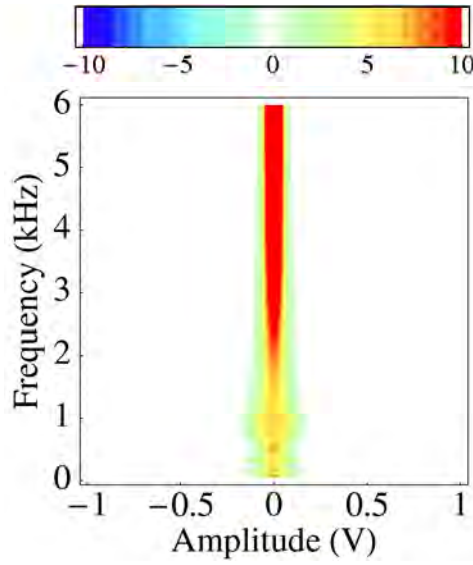


Fig. 3.11: Joint probability distributions of observed waveform F_3^{100}

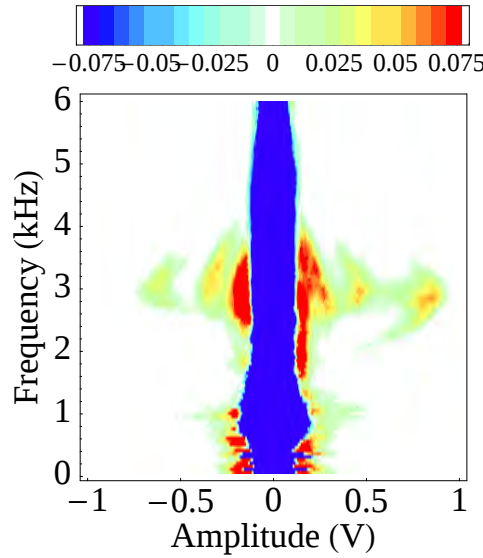


Fig. 3.12: Differential joint probability distributions of observed waveform F_3^{100}

続いて、基準計測波形 F_3^{100} に対する差分生起率分布 Π_D 、対称生起率分布 Π_S および非対称生起率分布 Π_N を算出した結果を Fig.3.13 に示す．はじめに Π_D に着目すれば、生起させている診断波形の生起頻度が小さく、かつ時間的に局在しているにもかかわらず、波形パラメータに対応する領域の高生起率値がより強調されてくる．生起検出には十分な選択性を確保していると考えられ、条件付き確率の考え方を導入することの意義が明らかとなった．さらに Π_S および Π_N に注目すれば、 F_3^{100} に生起させた診断波形波形が逆相成分をもたないために Π_S には高生起率値の領域は現れないのに対し、 Π_N には的確に診断波形の波形パラメータ値と一致する明確な高生起率値の領域が出現している．すな

3.4. 信号処理性能のシミュレーション的検証

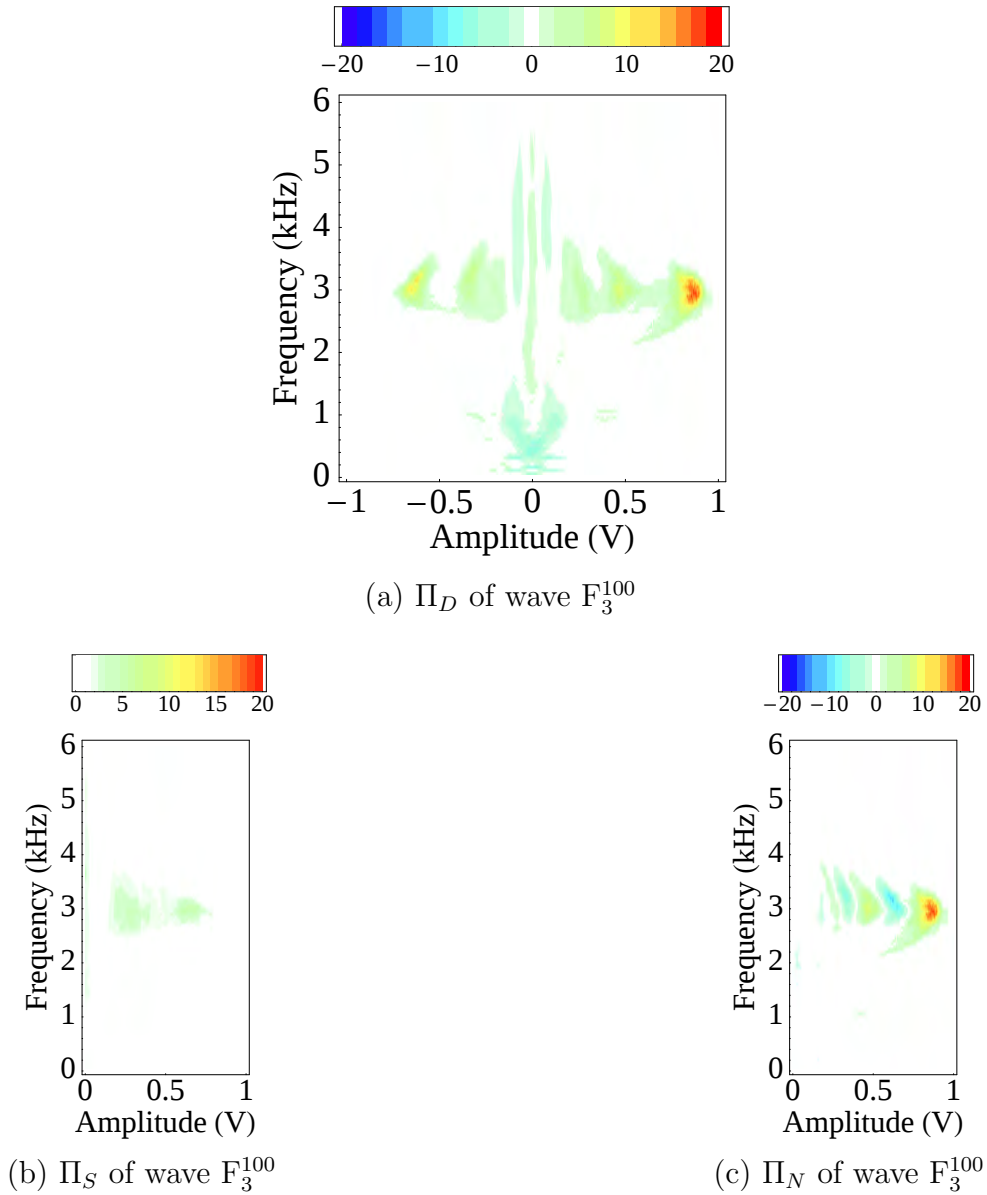


Fig. 3.13: Arising-ratio distributions of observed waveform F_3^{100}

わちこれは、診断対称の情報分析としての波形パラメータ抽出を行う際にも、信号波形の対称性に関する観点から予め分類を行いながら処理が可能であることを示唆した結果である。

以上のように、提案した生起率を指標として利用する確率論的なアプローチに基づく生起検出技術は、局在型波形の生起検出（さらには波形パラメータ抽出）に有効な手法であることが確認された。

3.4.3.2 選択性の向上による未検出の抑制

提案する確率論的アプローチに基づいた生起率 R_c に着目する信号処理技術は、生起頻度に依存しづらい選択性に優れた局在型波形の生起検出を実現する。この点に関する性能を検証するために、診断波形としてのフレーキング波形の生起頻度を变化させた模擬計測波形 $R2_3^{**}$, $R4_3^{**}$ の各 15 系列から非対称生起率分布 Π_N を算出し、さらにその極値を検出することで診断波形の生起検出を試みた。

代表的な計測波形から算出された非対称生起率分布と、全計測波形の非対称生起率分布から検出した極値領域に対応する最大振幅・固有周波数を波形パラメータ平面上にプロットした結果を Fig.3.14 に示す。先の例と同様に横軸は最大振幅 $A(V)$ 、縦軸は固有周

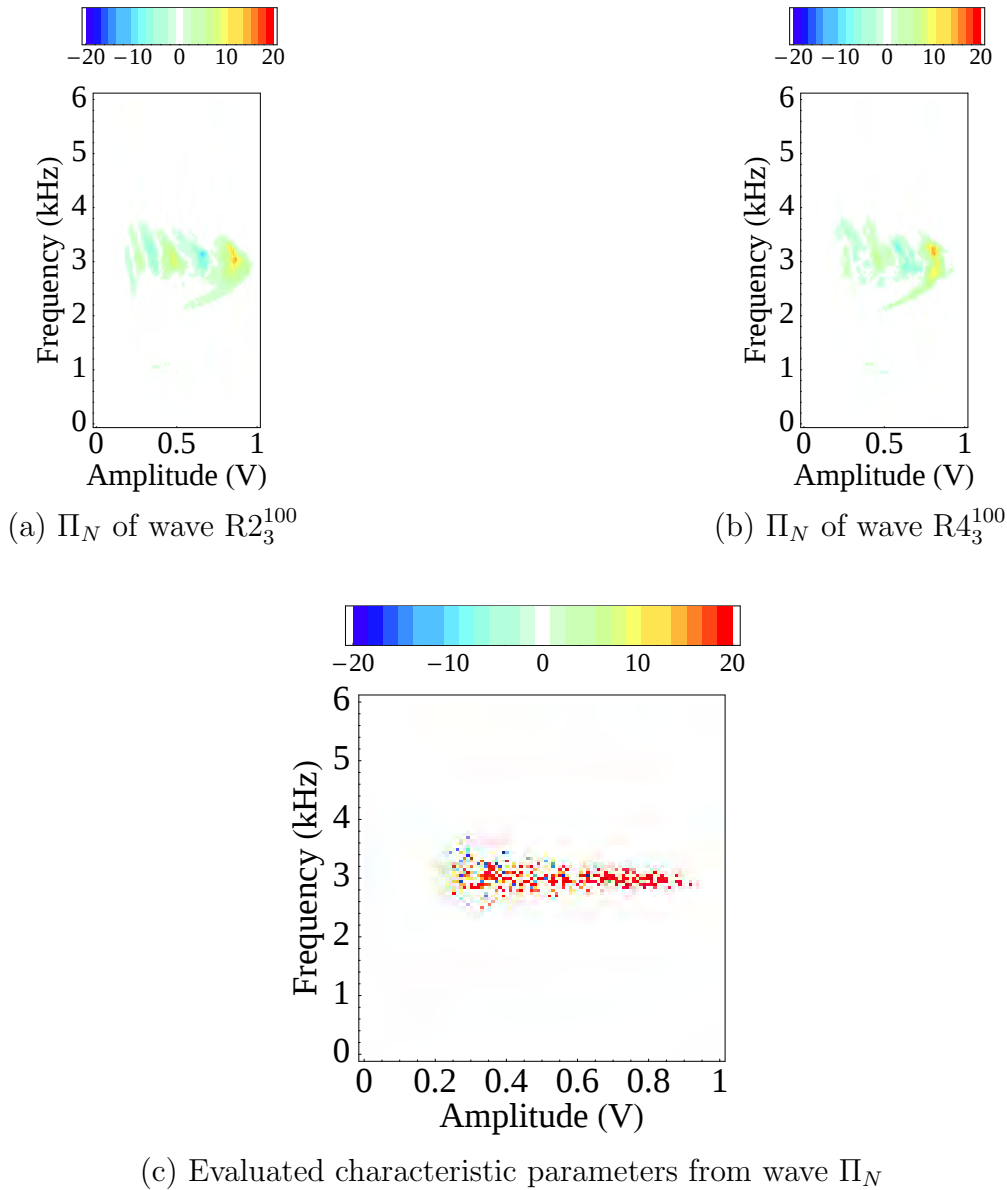


Fig. 3.14: Asymmetrical arising-ratio distributions and evaluated characteristic parameters for observed waveforms $R2_3^{**}$ and $R4_3^{**}$

3.4. 信号処理性能のシミュレーション的検証

波数 f_0 (kHz) を表し，点の色はカラーバーにしたがった生起率値の極大・極小値(%)へと対応している．

同時確率に基づく指標値 R_{JD} を本生起検出へと適用した場合には，局在型波形の生起頻度が低下するにしたがって，その指標値は減少してくることになる．しかし条件付き確率に基づいた生起率値 R_{CD} を指標値とする提案方法では，局在型波形の生起頻度が $1/2$, $1/4$ へと低下しても，生起率分布 Π_N 中の最大値は背景雑音の影響分に比較して依然高い値を維持したままであり，波形パラメータの評価精度にもほとんど影響は見られない．すなわちこれは，局在型波形の生起検出に際し，その生起頻度に依存しない検出が実現されることを示唆しており，未検出を抑制した「選択性」に優れた生起検出を実現できることが確認された結果である．

3.4.3.3 選択性の向上による誤検出の抑制

背景雑音成分の影響は主に生起率値の差分処理によって除去されることを確認してきたが，異常監視の開始後にもし当該成分が増加することが生じるような診断対象の場合には，その対応が難しくなる可能性がある．しかしそのようなケースにおいても，非対称生起率分布を利用することでその影響を低減し，高い選択性を保つことが可能である．

Fig.3.15 は，背景雑音成分 ψ_i の振幅値を変化させた模擬計測波形 $N2_3^{**}$, $N10_3^{**}$ および $N50_3^{**}$ の各 15 系列より非対称生起率分布 Π_N を算出した代表的な結果と，全計測波形に対する Π_N から極値を検出した後に，波形パラメータ平面上へとプロットした結果である．これまでと同様に，横軸は最大振幅 A (V)，縦軸は固有周波数 f_0 (kHz) を表し，点の色はカラーバーにしたがった生起率値の極大・極小値(%)へと対応している．

背景雑音成分の振幅値が大きく増加しているにも関わらず，その影響は Π_N の算出過程でほとんど除去されてしまい，背景雑音成分の振幅値が増加する以前の計測波形に対する Π_N (Fig.3.13-(c)) と比較してもほとんど相違のない，選択性に優れた生起率分布が獲得できている．波形パラメータの分布にも，背景雑音の影響が顕在化してきている様子は見受けられなく，局在型波形の波形パラメータ抽出についても変わること無く可能である．

3.4.4 情報分析処理としての有効性

3.4.4.1 診断波形の波形パラメータ抽出

基準計測波形から振幅と固有周波数をそれぞれ変化させた， $F_1^{**} \sim F_5^{**}$ の各 15 系列の模擬計測波形の離散振幅値系列に対して，非対称生起率分布 Π_N を算出した．さらにそれら生起率分布中の極値の存在を確認することで生起検出処理を済ませた後，情報分析処理としての波形パラメータ抽出結果として，波形パラメータ平面上に極値をプロットした結果が，Fig.3.16 である．

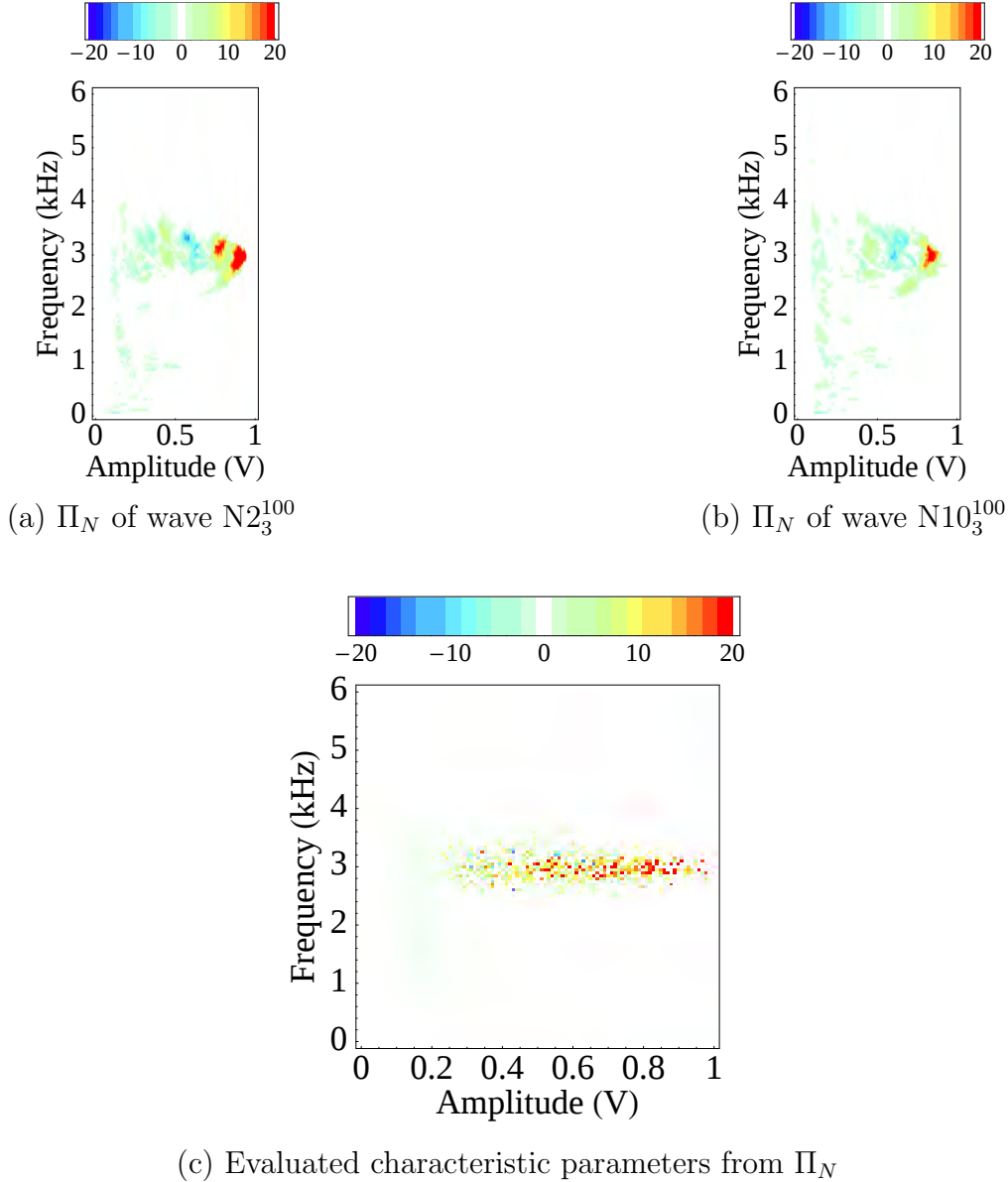


Fig. 3.15: Asymmetrical arising-ratio distributions for observed waveforms $N2_3^{100}$ and $N10_3^{100}$ and evaluated characteristic parameters for $N2_3^{**}$, $N10_3^{**}$ and $N50_3^{**}$

抽出された極値の中で絶対的にみて生起率値が大きな点は、波形の目視では診断波形の生起を判断することが難しくなる $A \geq 0.26$ ($A_0 \geq 0.3$) 程度の信号まで生起検出ができています。そして波形パラメータ平面上におけるそれら極値の位置は、混入させた局在型波形の波形パラメータ値へとおよそ一致している。代表的な例を挙げれば、 $f_0 = 3.0\text{kHz}$ 時の評価誤差の標準偏差は、 A : 0.036V 、 f_0 : 0.148kHz の結果を得るに至った。

これらの結果を踏まえれば、生起率分布に現れる極値の絶対値に対して単純な閾値処理を施すだけで、局在型波形の正確な生起検出が実現する。さらには、極値の存在領域に対応した最大振幅・固有周波数などの波形パラメータ値を判読すれば、診断波形の波形パラメータ抽出まで実現することが可能といえる。

3.4. 信号処理性能のシミュレーション的検証

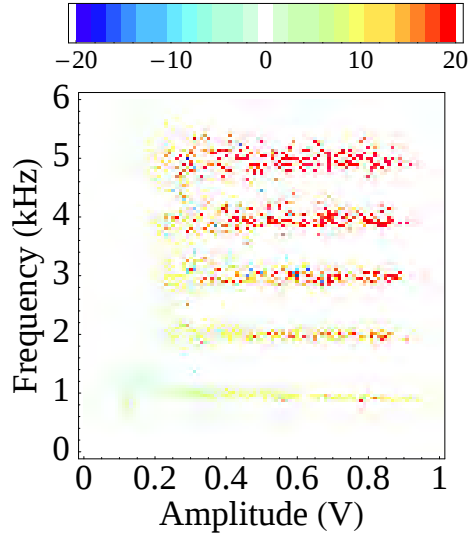


Fig. 3.16: Evaluated characteristic parameters from observed waveforms $F_1^{**} \sim F_5^{**}$ from Π_N

3.4.4.2 反転・非反転成分混在波形の識別

対称生起率分布 Π_S を利用すれば、反転・非反転成分が混在する診断波形を区別しながら処理を進めることが可能である。

Fig.3.17 は、診断波形としてのフレーキング波形に反転成分を混在させた模擬計測波形 I_3^{**} の各 15 系列より対称生起率分布 Π_S と非対称生起率分布 Π_N を算出し、さらに Π_S からは極値を抽出して波形パラメータ平面上へとプロットした結果である。計測波形 I_3^{**} 中には逆相の診断波形が混在しているため、Fig.3.13-(b) あるいは (c) とは対照的に、 Π_S には高生起率値を取る領域が出現するのに対して、 Π_N では高生起率値の領域はほとんど現れなくなる。

Π_S から抽出された極値の分布には、混入させた局在型波形の波形パラメータが的確に反映されていることから、 Π_S を利用すれば、反転・非反転成分が混在する局在型波形成分のみに着目した生起検出さらには情報分析が実現できる。

3.4.5 信号処理技術の優位性比較

本章では、確率論的アプローチを核とした不定生起診断波形の生起検出技術と、それを応用した波形パラメータ抽出技術を提案してきた。この診断波形の生起検出および情報分析の考え方は、先見情報として獲得されている波形形状情報を利用する点や、離散振幅値系列上へ基底関数を走査させながら生起検出を実現する点など、既存のマッチトフィルタ [51] やウェーブレット変換 [39] による生起検出技術と類似している。

波形形状の一致度を直接的に評価している点からは、マッチトフィルタが生起検出対象の波形形状そのものを利用するのに対して、提案技術ではそれを少ない情報によって代表させた波形テンプレートを利用するという相違があるものの、共通性が高い。両技

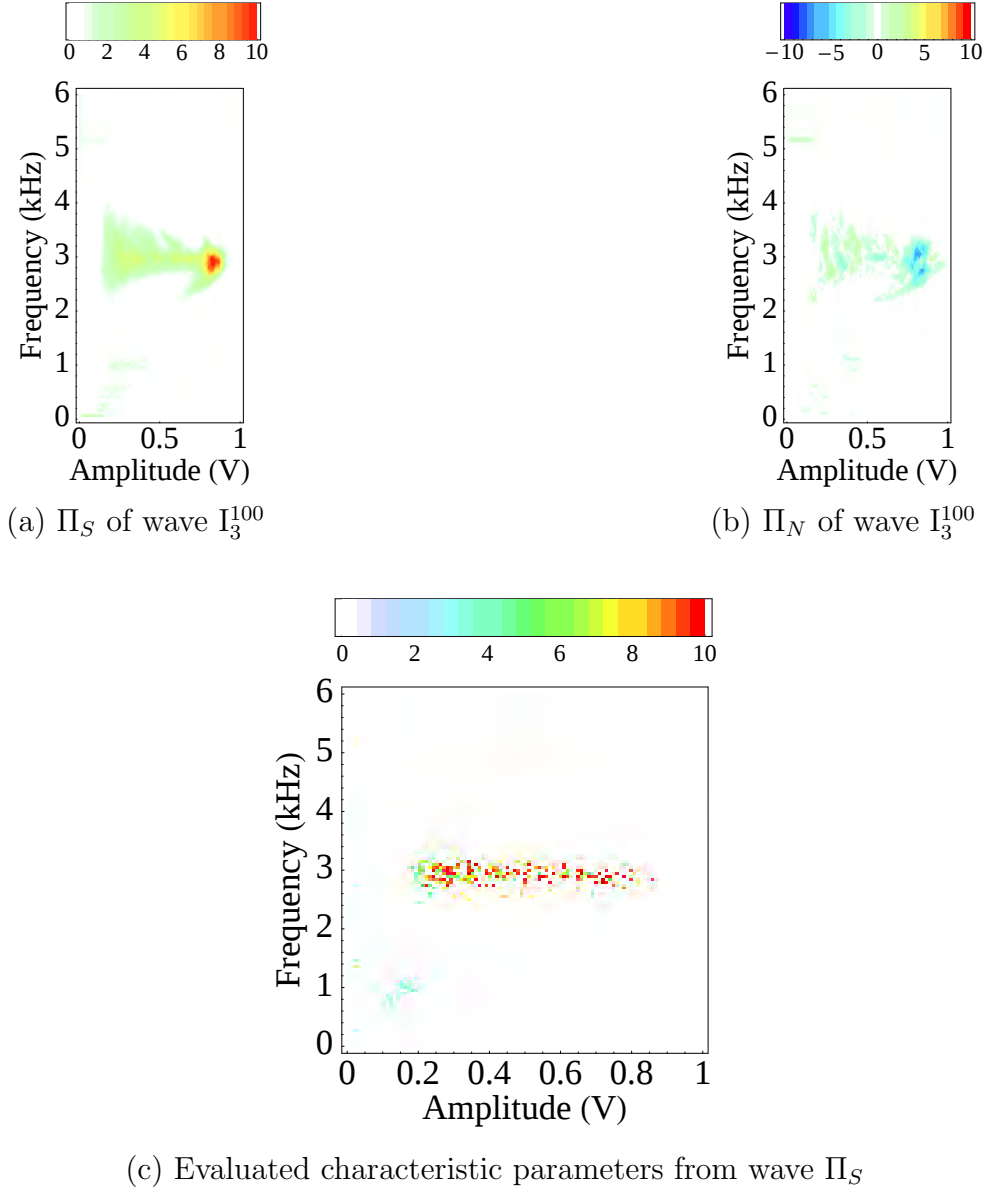


Fig. 3.17: Symmetrical and asymmetrical arising-ratio distributions and evaluated characteristic parameters for observed waveforms I_3^{**}

術とも「調査」あるいは「診断」を問わず適用することが可能ではあるが、調査段階では波形形状を規定する波形パラメータ値は未知であり、いずれの方法も広範な探索を必要とする。特に振幅値推定では、マッチフィルタが出力パルス的大小と符号から推定可能であるために、振幅をパラメータとして考慮しなくてよい一方で、提案技術は取り得る振幅値に対応した波形テンプレートを全て適用して探索しなければならない。

提案技術では、検出対象となる診断波形形状を的確に表現している特異な点を波形テンプレートとして採用することが、計算負荷を大幅に軽減しつつも十分な検出性能を保っている理由と考えられる。しかし、残念ながら調査段階だけをみれば、(探索範囲次第ではあるが) 総計算量での優位差は無い。しかし診断段階に移れば、探索範囲は調査値周辺

3.5. 診断実験：回転機器の軸受異常に関する診断

へと絞られることになる．ここでの決定的な相違は振幅軸方向の計算量にあり，この点で削減余地の無いマッチトフィルタに対し，提案技術は探索範囲の縮小に比例して削減することができ，リアルタイム診断を考えた際には優位に立つ．

またマッチトフィルタは局在型波形の1度の生起検出ごとに個別に波形パラメータを評価することも可能ではあるが，逆に混入した診断波形の平均的な波形パラメータ値を得るためには，もう1段の処理が必要である．提案技術は新たな処理を追加しなくとも，既に反転・非反転成分を区別した上で，診断波形ごとの平均的な波形パラメータ抽出を実現しているともいえ，生起頻度によらない一元的な生起検出機能をもつこととも併せて，実用的な診断には十分な機能をもつ．

一方，ウェーブレット変換を利用する診断でも局在型波形の生起検出あるいは波形パラメータ抽出は試みられているが，波形テンプレートを利用して計算負荷を軽減しながら生起検出・状態評価を試みる提案技術には，やはり計算量の観点から大きな優位性があるといえる．

ここで定量的な比較結果として，Fig.3.10に示した波形テンプレートの $\tilde{g}_0 \sim \tilde{g}_3$ 区間に一致するフレーキング信号波形を利用しながら，固有周波数 f_0 を振りつつマッチトフィルタにより生起検出を試みたところ，誤・過検出なく適切に処理ができたのは $A \geq 0.3$ 程度の信号波形までと，提案技術とほぼ同等であった．波形パラメータ抽出の結果も，平均的には診断波形の波形パラメータ値へ一致すると同時に，評価誤差の標準偏差は， $f_0 = 3.0\text{kHz}$ 時において $A: 0.033\text{V}$ ， $f_0: 0.172\text{kHz}$ となり，生起検出・情報分析性能とも，確率論的アプローチに基づく提案技術とおおよそ同等となった．

また両方法の演算内容が異なるため計算量の単純比較は難しいものの，今回の探索範囲における計算時間もほぼ同等であった．実用的にみた「診断」の段階ではパラメータ探索範囲あるいは探索刻みを絞って使用されるため，提案技術はマッチトフィルタ法に比較して大幅に計算量の削減を図りつつも，同等の処理性能を実現可能だといえる．

3.5 診断実験：回転機器の軸受異常に関する診断

3.5.1 実験装置の構成と診断波形の観測

3.5.1.1 実験装置の構成

Fig.3.2 および Fig.3.3 に示したような，回転機構をもった機械プラントの軸受部分を模擬した実験装置を用意し，局在型波形を含む計測波形を獲得した．

診断対象となる試験体ベアリング内輪はスチール製回転軸へと固定し，その回転軸にはプーリとベルトを介して，任意の回転速度をもってACモータの動力が伝達される．またベアリング外輪には荷重を掛けて負荷運転時の軸受状態を再現しつつ，その外輪上部に固定した圧電セラミック型の加速度センサ (MicroStone 社製：MA3-10Ac) によってラジアル方向の加速度を計測し，計測波形としてA/Dコンバータを介してPCで収録する．

試験体のベアリングには、NSK 製の単列深溝軸受 6802(内径 15mm) を使用した。診断実験の際には、負荷荷重を 200N、回転軸の速度を 2600rpm で連続運転しながら、サンプリング周波数を 500kHz・収録時間 0.4sec(200,000 点) 間のデータを 0.2V/G の検出感度で、計測波形として収録できる。

3.5.1.2 診断波形が混入した計測波形

異常状態の程度に尺度付けが可能なよう配慮し、局在型波形としてのフレーキング波形を発生させるための疑似的な損傷(圧痕)を、錘によった人為的な衝撃を与えることで形成することとした。衝撃エネルギーすなわち錘の落下高の違いによって、転送面に残る異常状態としての圧痕の程度に変化を与える。

錘の落下高と計測波形 No. の関係は、高さ 3.0cm (signal No.1~3) , 4.5cm (signal No.4~6) , 6.1cm (signal No.7~9) , 8.0cm (signal No.10~12) の 4 種類で計 12 データ、すなわち錘の落下高の違いごとに 3 個ずつの試験体ベアリングを用意した。代表的な計測波形およびそのパワースペクトルを、Fig.3.18 に示した。

落下によって与える衝撃エネルギーの増加にともない、スパイク状に発生しては減衰していく局在型波形成分の数・振幅ともに増加していることを確認できるが、これまでと同様に各計測波形のパワースペクトルからその変化を推定することは容易ではない。またシミュレーションの状況とは異なり、フレーキング波形としての振幅値・固有周波数以外の波形パラメータも必ずしも定常ではなく、その生起ごとにある程度変化している様子も観察できる。

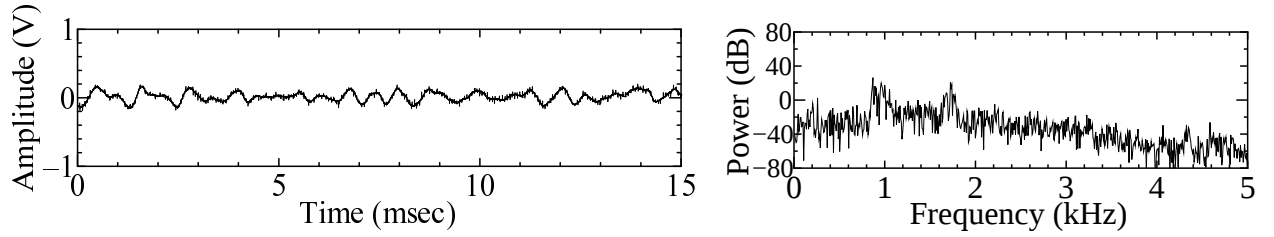
3.5.2 生起率分布の算出

波形テンプレートには、診断波形を代表する意味で、シミュレーション時と同一のフレーキング波形の波形形状へ設定し、各計測波形に対する差分確率値分布 Π_D を算出した。なお、波形テンプレートの形状を規定する波形パラメータについては、シミュレーション同様の固有振動数と最大振幅値に加え、実験時の計測波形形状の変化を鑑みて減衰率 ζ に関しても考慮に入れることとした。

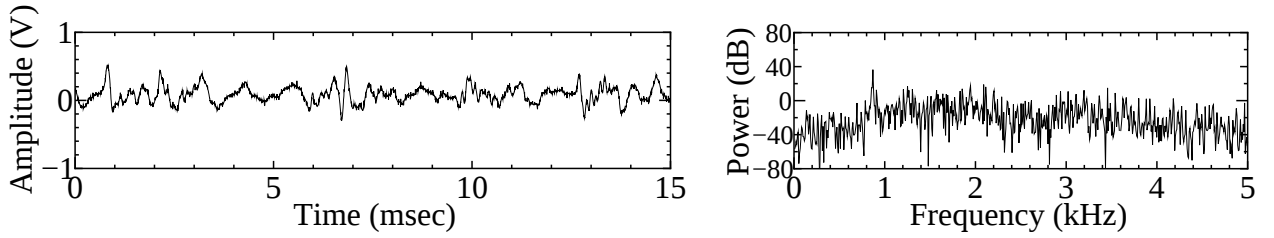
Fig.3.19 は、算出された生起率分布の中から減衰率 $\zeta=0.3$ における A - f 断面上の値を代表的に抽出して表示した結果である。シミュレーション時と同様に横軸が最大振幅 $A(V)$ 、縦軸が固有周波数 $f_0(Hz)$ で、色が生起率値 $R_c(\%)$ を表している。

分布中には生起率値が増加していることを意味する赤色領域をいくつか確認することができ、圧痕を形成するために与えた衝撃エネルギーを増加させた試験体ベアリングほど、その生起率分布の赤色領域は振幅値の大きな方向へ移動する傾向が見受けられる。これは、Fig.3.18 の時点で既に計測波形に生起していることが確認できていたフレーキング波形の振幅変化の傾向と一致しており、フレーキング波形あるいはそれに類似する局在型波形の生起が捕らえられたものと考えられる。

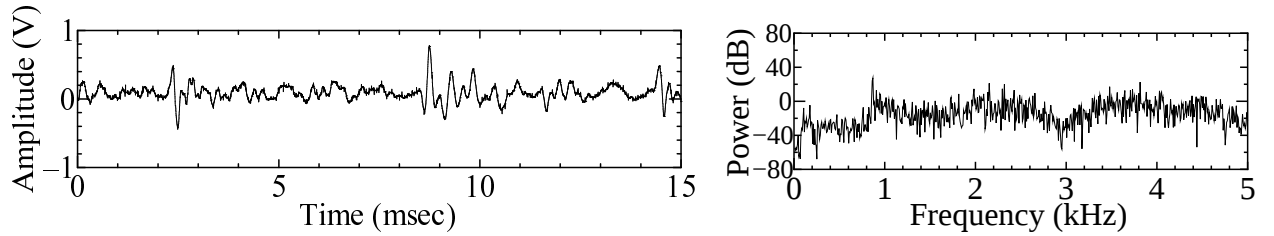
3.5. 診断実験: 回転機器の軸受異常に関する診断



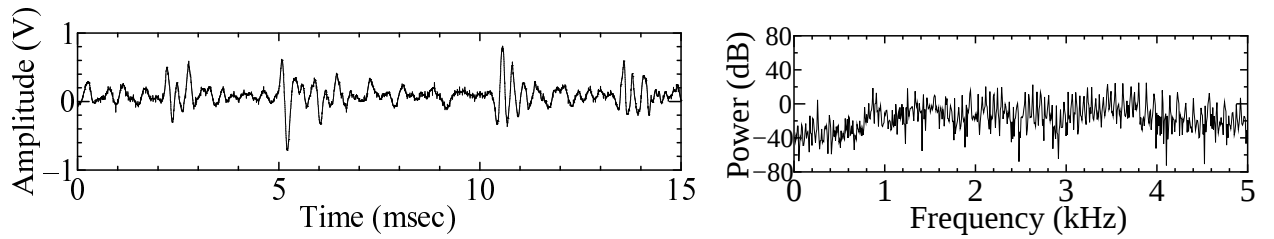
(a) Normal condition (at the beginning of use)



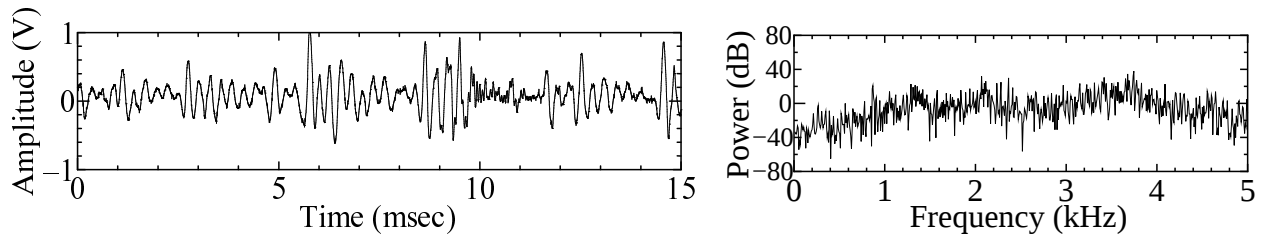
(b) No.2 (damaged by weight dropping from 2.0cm of height)



(c) No.6 (damaged by weight dropping from 4.5cm of height)



(d) No.9 (damaged by weight dropping from 6.1cm of height)



(e) No.11 (damaged by weight dropping from 8.0cm of height)

Fig. 3.18: Experimental observed waveforms and their power spectral densities for bearing test specimen

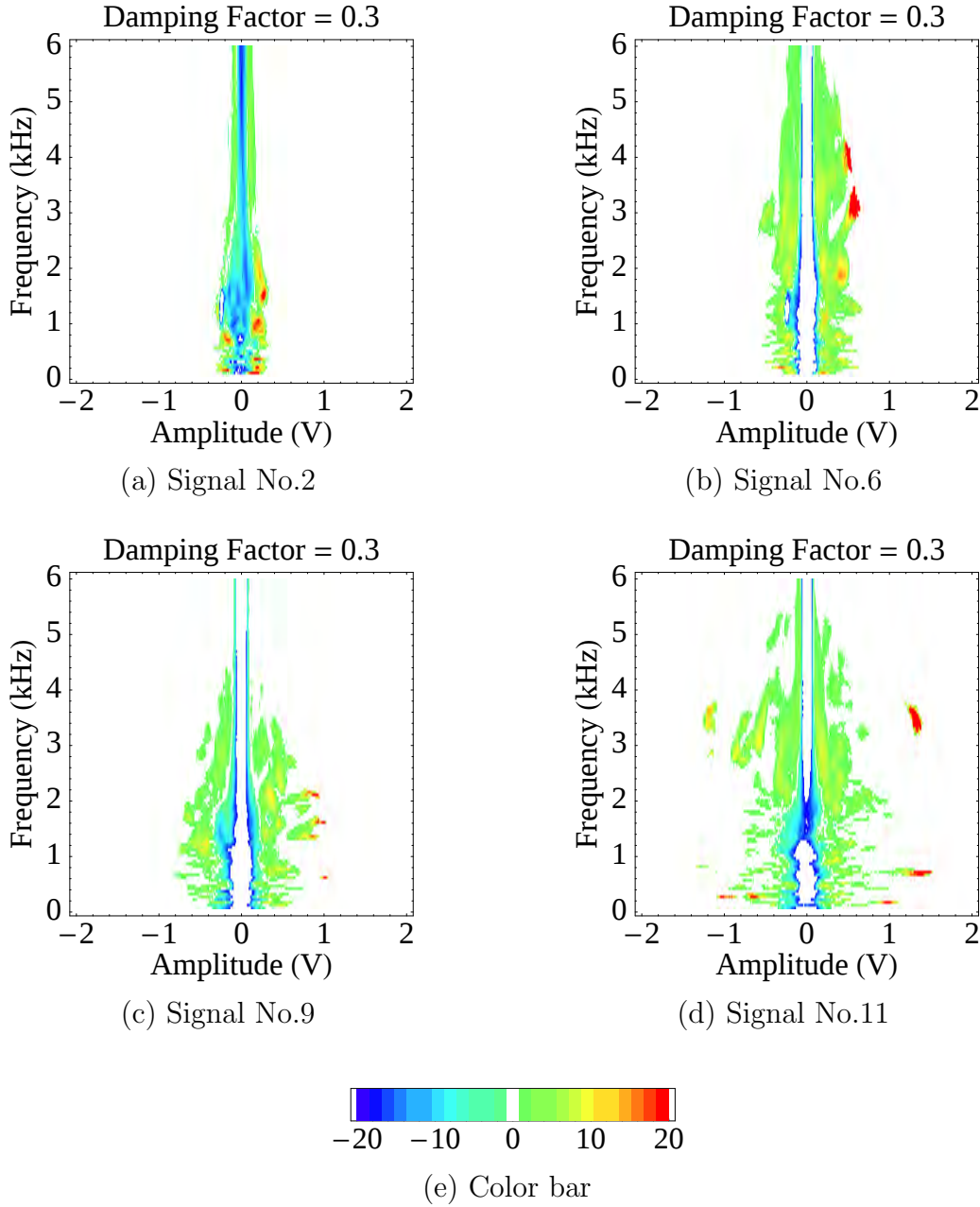


Fig. 3.19: Cross section of arising-ratio distributions Π_D of experimental observed waveforms on damping factor $\zeta=0.3$

3.5.3 生起検出・情報分析性能の検証

3.5.3.1 生起検出結果

計測波形を 20ms(10,000 サンプル点) ごと 20 区間に分割して、同様の手続きで分割区間毎に生起率分布を算出し、それらの分布に基づいて診断波形の生起検出を試みた。

Fig.3.20 は、生起検出対象としたフレーキング波形に対し、選択的に生起検出が実現されたか否かを判断するためのひとつの指針として、20 個の生起率分布中の最大極大値

3.5. 診断実験: 回転機器の軸受異常に関する診断

が抽出された領域に対応する振幅値，換言すれば生起したと考えられるフレーキング波形の最大振幅値を，診断波形 No. を横軸にとって示したものである．

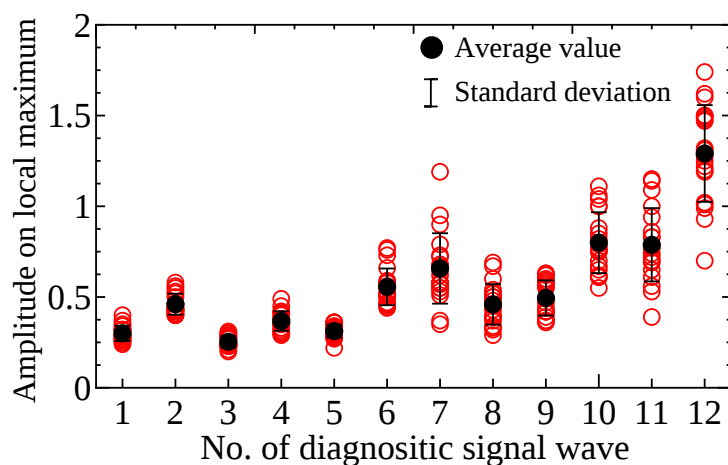


Fig. 3.20: Relations between number of signals and amplitude on localmaximum of contamination-ratio distributions

本実験の範囲では，模擬的な異常を生成するためのベアリングに与えた衝撃エネルギーと，診断波形として混入したフレーキング波形の振幅との相関関係を厳密に規定することはできない．しかしながら，衝撃エネルギーの増加にともなってフレーキング波形の振幅値の増加傾向が抽出されている様子を読み取ることができ，局在型波形としてのフレーキング波形に対しての選択的な生起検出が実現されているものと推察できる．

3.5.3.2 情報分析結果

Fig.3.21 は，生起検出において生起率値の最大極大値が抽出された領域に対応した最大振幅・固有周波数・減衰率の3種の波形パラメータ値の組について，縦軸・横軸にそれぞれ固有周波数値・最大振幅値を取り，点の色はカラーバーにしたがった色情報として減衰率値を表現し，波形パラメータ抽出結果としてプロットした図を示している．

評価された固有周波数・減衰率の各パラメータ値は，最大振幅値の増加すなわち異常状態の進行とも何らかの相関をもつことが無く，双方共にバラついてしまう結果となった．しかし Fig.3.18 から推測できたように，これは獲得されたフレーキング波形の波形パラメータがシミュレーションのように定常的とはいえず，ベアリング試験体ごとあるいは診断波形の混入ごとに異なっていたことが原因となっている可能性もある．逆にいえば，Fig.3.21 中で確認することができる，およそ 3kHz 付近を中心に散在する評価点は，実際に生起していたフレーキング波形の波形パラメータ値を評価することができた結果と考えられる．

すなわち，局在型波形に対する生起検出性能あるいは情報分析性能の高さが示された結果であり，従来の信号処理技術では難しかったこれら能力に関し，提案方法の有効性が再確認された結果と言い換えることもできる．

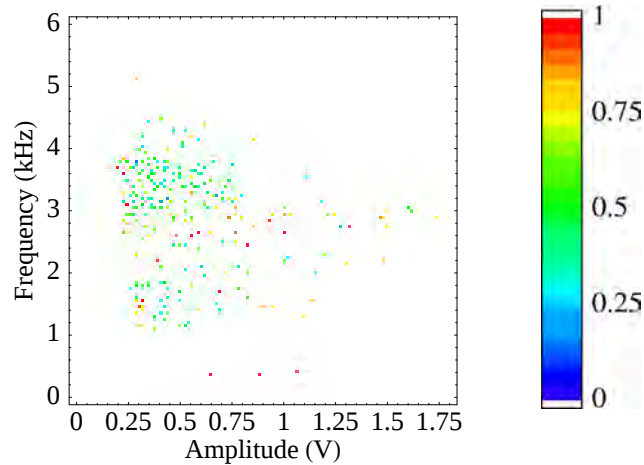


Fig. 3.21: Relations between extracted eigen frequency, damping factor and amplitude of experimental observed waveforms

以上、実際の診断波形を対象として提案方法の有効性を実験的に評価してきたが、適切な波形テンプレートの設計が実現されれば、局在型波形の的確な生起検出および情報分析を達成できることが確認された。なお本実験では検出対象のひとつの例としてフレーキング波形を挙げたが、波形テンプレート形状を任意に再設計することで、異なる形状の診断波形にも容易に対応することが可能である。

3.6 本章のまとめ

本章では、局在型の診断波形をもつ診断対象として、回転機器の軸受異常をケーススタディに、その診断のための信号処理技術の構築を試みた。はじめに診断波形の波形形状モデルを利用した生起検出処理として、波形テンプレートと計測波形形状のマッチングを確率論的に処理する検出方法を新たに提案し、選択性と効率性を備えた波形生起検出処理の構築を試みた。そして、差分処理による背景雑音の影響の低減、あるいは条件付き確率の考え方との組み合わせによって、更なる検出感度の向上を図った。また情報分析処理としての波形パラメータ抽出のための方法として、波形テンプレートの高度化すなわち波形テンプレートの形状を波形パラメータを媒介として変形させることを考案し、診断波形の生起検出機能を波形パラメータ抽出機能にまで拡張することを実現した。シミュレーションおよび実験的な検証を通して、提案した信号処理技術の有効性を評価するとともに、特に生起検出タスクにおける選択性の確保という観点において、提案した信号処理技術の意義が明らかになった。

第4章 紙幣の偽造診断における偏在型 波形の信号処理

本章では具体的な診断対象として光ファイバ触針走査による紙幣診断を採り挙げ、遍在型の診断波形を対象として、計測波形中の複数の診断波形から抽出される波形特性を統合利用することを軸とした、生起検出・情報分析のための信号処理技術に関する議論を展開する。基本的な指針として診断波形の波形形状モデルを利用する姿勢に変化は無いものの、計測波形中の2種類の診断波形とそれらに付随した複数の波形特性に着目しながら、紙幣の真贋・金種評価技術の構築を試みる。さらに実験的にその性能を検証することによって、波形特性を統合利用する信号処理技術の有効性について見極める。

4.1 診断波形形状の特異性

本節では、診断波形としての非定在波形がもつ特徴的な性質の中から、生起検出・情報分析処理の難易度に影響を及ぼしている性質と考えられる波形形状の特異性について、具体的な診断波形例とともに確認していく。この議論をとおして、生起検出・情報分析の双方の処理機能に関して性能向上を図ることの難しさが明らかとなるとともに、それらの両立を図るための信号処理のアプローチについても併せて述べる。なお波形形状の特異性に加えて、時間局所性としての遍在型波形を診断波形にもち、また逆問題としての伝達素性が既知な診断対象として、本研究では光ファイバ触針走査による紙幣診断を採り挙げることとし、その概要についてもここで触れる。

4.1.1 波形形状の特異性に起因した生起検出・情報分析の難しさ

偏在型波形に限った性質ではなく、1.1.3節においても触れたように、非定在性の診断波形は急峻な波形形状をもつことが多い。この特徴的な性質を表現するためのキーワードが特異性である。第3章において議論されたフレーキング波形について見ても、背景雑音に比較して、その波形形状に特異性をもつことを確認するのは容易である。しかしここでは、この性質がより端的に確認できるもうひとつの診断波形例として、心電検査におけるパルス状波形を挙げる。

Fig.4.1には、心電検査における診断波形の例を示した。診断波形の立ち上がりは背景雑音波形に比較して非常に急峻であり、かつその波形形状も特異で、正弦波に代表され

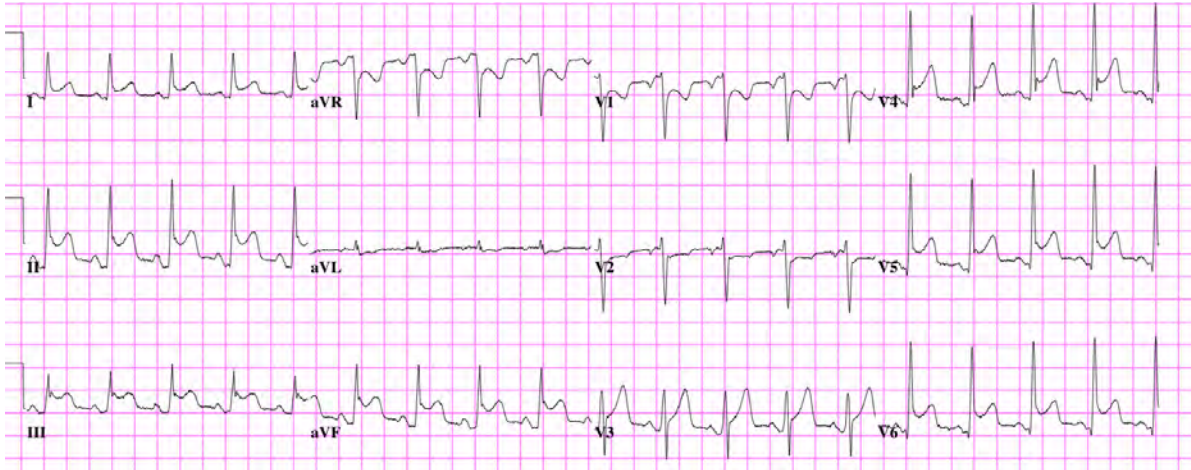


Fig. 4.1: Example of nonstationary diagnostic waves on cardiac electrogram

るような、定形的波形の単独あるいはその組合せによって波形形状を分析することは難しいと言わざるを得ない．このように波形形状に見られる特異性が、基本信号処理技術における定形・定在的波形による波形形状表現との相性が悪い原因であり、診断波形の生起検出あるいは診断対象の情報分析を難しくさせている．このような状況こそが、本研究における信号処理技術の構築に際して波形形状モデルを導入することを基本指針として定め、その特異性に対しての適応性を高めていくこととした理由である．

ところで局在型波形に比較すれば、波形の生起位相については、心拍というある種の繰り返し規則が緩やかな規則性を与えているとも解釈できる．すなわち計測波形に含まれている波形情報を積極的に利用することで、このような偏在型波形の生起位相に関する何らかの規則を見い出すことができれば、効率的・効果的な生起検出・情報分析を実現するための大きなアドバンテージとなる可能性がある．

4.1.2 光ファイバ触針走査による紙幣診断

4.1.2.1 紙幣診断の現状

紙幣診断技術とは、紙幣のもつ性状(金種・真贋・劣化)を見極めるための技術を指す．これらの中でも真贋についてのニーズは特に高く、かつその処理には信頼性の高さが要求されることは、ある種自明でもある．そこで真贋判別について内外の現状を見渡してみれば、簡易的なものとして透かしや印章を紫外線で浮かび上がらせる技術[52]や、微細な周期的印刷模様によって発生するモアレ現象に着眼した技術[53]を利用した製品がすでに市販化に達している．

また近年の研究では、空間周波数解析によってインクジェットプリンタで印刷された贋券に残る紙送り機構による紙面スパイク跡の特性を抽出して贋券を診断する方法[54]や、写真製版用フィルタをデジタルカメラ撮影画像に通すことで真券との微妙な印刷色の違いを見極める方法[55]などが研究・提案されてきている．しかしながら、ここで

4.1. 診断波形形状の特異性

挙げた技術は紙幣表面の印刷模様に着目するものがほとんどと言ってよく、真の紙幣のみで確認される固有な性状については、必ずしも有効に活用できていないというのが現状という分析結果に至る。

4.1.2.2 光ファイバ触針の走査波形を利用する紙幣診断

本研究では、紙幣診断の現状を踏まえながら、偏在型の診断波形が生起する具体的な診断対象として、光ファイバ触針走査型の試料表面性状測定装置 [56] を利用する紙幣診断を採り挙げることにする。ここではその端緒として、光ファイバ触針走査装置の概要を説明し、紙幣診断への利用方法を明らかにしておく。

光ファイバ触針走査装置の構成を Fig.4.2 に、その写真を Fig.4.3 に示す。精密移動台上に試料が固定され、その表面にはレーザダイオードによって先端を発光させた光ファイバ触針が押し付けられている。精密移動台を移動させることで試料が移動し、触針が試料表面を走査する構造である。また、触針支持部と共通の固定台座上には PSD センサが設置され、PSD と触針の間に凸レンズを介して結像系が構成されている。光ファイバ触針が試料表面をなぞるときに、触針先端から射出される光を PSD 受光面上に結像し、触針先端の水平方向の位置が計測される構成である [56]。

偏在型の診断波形が計測されることと併せて次節で詳細に説明するが、光ファイバ触針走査装置は、試料表面の性状と相関をもつ情報を獲得することに長けている。そこでこの試料に紙幣を適用することで、真贋、金種あるいは劣化までの見極めの実現を試みようとするものである。

4.1.3 検出・分析処理の両立を図るための信号処理の基本的アプローチ

偏在型波形の生起は何らかの規則にしたがうため、局在型波形の生起検出に比較すれば、生起検出処理における処理機能レベルの難易度は 1 段階低下する。局在型の診断波形に関する生起検出では未検出を容認することはできなく、多少の過検出を許容してでも診断波形の選択的な検出機能を確保する必要があった。これに対して偏在型波形に対する生起検出では、何らかの生起規則によって選択性を補助できるため、生起検出処理自身のもつ検出機能としての選択性を、過検出が生じない程度まで低下させることが可能と考えられる。

一方で情報分析処理における処理機能レベルは波形パラメータ抽出を越え、紙幣の性状に関するひとつの統合的な分析値としての結果を要求し、情報分析処理としての難易度は逆に 1 段階上昇する。ここでは生起検出処理において何らかの生起規則として利用できる波形特性が存在したという事実を踏まえれば、分析の対象となる波形特性は複数存在することになり、これらを統合的に利用することが組合せ効果を生むと考えられる。また生起検出において「過検出を生じない」という変化が、情報分析にも効果をもたらすと考えられる。すなわち、余分な波形成分を含まずに対象診断波形のみが検出されて

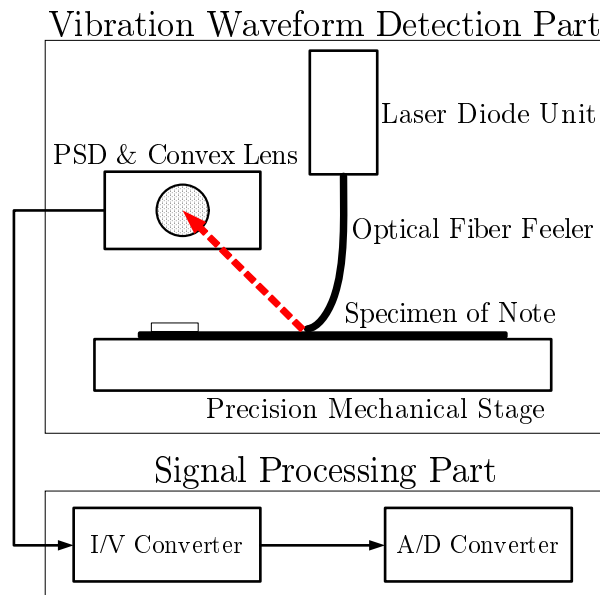


Fig. 4.2: Configuration of optical fiber feeler scanning system

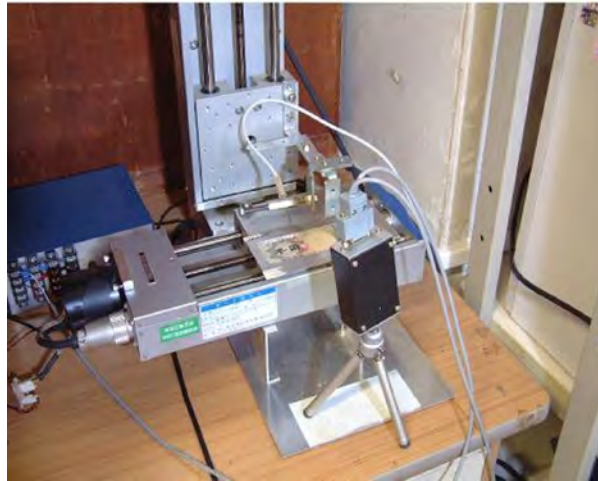


Fig. 4.3: Photograph of optical fiber feeler scanning system

いることで，結果としてそれら波形に対する分析を基にした分析値における正確性は向上してくる．

これらの議論を踏まえ，基本的な信号処理のアプローチとして，本研究では波形特性の統合利用を基盤に据える．すなわち，波形形状モデルを利用して波形形状の特異性への適応を図るという基本姿勢に変化は無いものの，生起検出の実現に際しては，診断波形に関する何らかの生起規則を計測波形から同定し，検出性能の確保と低負荷化を図っていく．また情報分析に際しても，個々の波形特性の抽出精度については波形パラメータ抽出と同等に据え置きながらも，それら特性の抽出結果を統合的に組み合わせて利用していくことで，診断対象の状態を定性的かつ一元的に評価可能な分析値まで落とし込

4.2. 光ファイバ触針の走査波形を利用した紙幣診断

むことを目標に据える．これらの検討を通し，波形特性を統合的に利用することによる，生起検出の選択性と情報分析の正確性への貢献度を見極める．

4.2 光ファイバ触針の走査波形を利用した紙幣診断

4.2.1 光ファイバ触針走査装置の構成

はじめに光ファイバ触針走査装置の構成について詳細に説明する．まず光ファイバには，弾性域が比較的広いプラスチック製の三菱レイヨン：CK-40を選定した．その主要な仕様については Table 4.1 にまとめておく [57]．光ファイバ触針の先端面は垂直に切断し

Table. 4.1: Dominant specifications of CK-40 type optical fiber

Item	Specification
Diameter	1.0mm
Diameter of core	0.980mm
Young's modulus of core	2.94GPa

た上で研磨処理を施し，触針の支持点から先端面までの長さは 30mm として固定してある．また，レーザダイオード光源には中心波長 670nm のオーディオテクニカ社：SU-32E を，PSD には感度波長が 320~1100nm である浜松ホトニクス：S3932 を，それぞれ使用している．

PSD からの出力電流信号は，電流-電圧変換回路および 16bit の AD コンバータを介して PC へと収録でき，PC 内部で触針先端変位への変換処理を施すことによって，走査波形として獲得することができる．精密移動台には中央精機：PS-120E，AD コンバータにはコンテック：AD16-16U(PCI)EH を使用した．走査波形獲得時の精密移動台の移動速度は 2.0mm/s，データサンプリングレートは 1kHz であり，500 点/mm で収録を行うことが可能である．

試料紙幣に光ファイバ触針を走査させるに際しては，試料と触針は Fig.4.4 に側面図を示すような位置関係に配置する．光ファイバ触針先端の押付力は，スティックスリップ成分の大きさや発生頻度と密接に関係してくる要因であるが，触針を片持梁でモデル化した解析に基づけば，本構成時の先端押付力はおよそ $7.2 \times 10^{-2} \text{N}$ と計算される．

なお紙幣診断を異常診断としてとらえるとき，走査波形は診断における計測波形として処理されることになるので，以降では走査波形を計測波形と呼び替えながら議論を進めることとする．

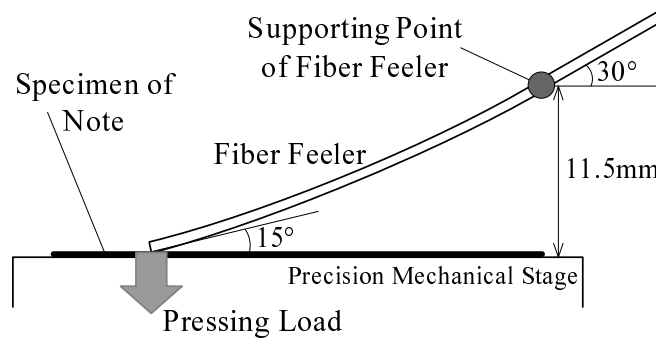


Fig. 4.4: Side view of alignment for optical-fiber feeler and test specimen of notes

4.2.2 計測波形から分析できる表面性状情報

4.2.2.1 直接光成分と反射光成分の同時計測

光ファイバ触針走査装置では，Fig.4.3 から判読できるように，触針に対して PSD を意図的に垂直より傾けて配置してある [58]．この効果として，Fig.4.5 に示したように，触針先端の射出光成分は，触針先端から PSD 受光面へと直接結像する「直接光」と，試料表面における射出光の乱反射成分が受光面へと結像する「反射光」の，2 つの成分に分離されて同時に観測されることになる．

直接光成分と反射光成分による PSD 受光面上の各結像点位置は，触針先端の水平方向の変位に応じて一緒に移動するが，このとき反射光による結像点の輝度により，試料表面の反射率によって変化が生じることになる．すなわち Fig.4.5 にも示したように，白色領域での反射光成分は PSD 上に結像するほど十分に強いが，黒色領域では光線のほとんどが吸収されてしまい，直接光成分のみが結像する．

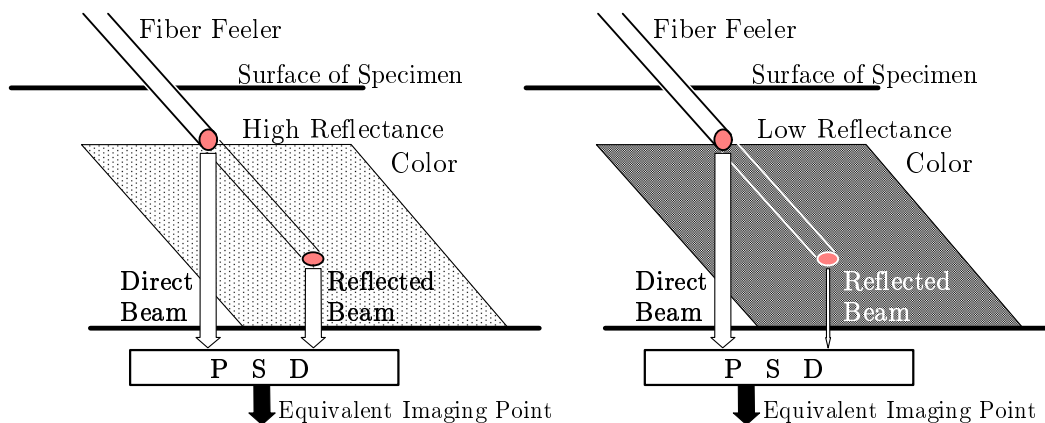


Fig. 4.5: Equivalent imaging point derived from direct and reflected beam

このように 2 つの成分が PSD 上で重み付きで重畳される結果，Fig.4.5 の場合を例に採れば，PSD 受光面での等価結像点の位置は，試料表面が黒色の場合には白色の場合に

4.2. 光ファイバ触針の走査波形を利用した紙幣診断

比較して左方向へシフトする．すなわち PSD の性質にしたがって，計測波形として獲得される等価結像点位置の変位はそれらの輝度を重みとする荷重平均として表現されることになり，触針の水平方向変位だけでなく，試料表面の反射率変化によっても移動するという性質をもち併せることになる．

4.2.2.2 直接光成分からの凹凸・摩擦係数情報の獲得

触針先端の水平方向の振動的変位を獲得できる直接光成分による PSD 上の結像点位置変化には，試料の凹凸や摩擦係数などといった表面性状を主要な要因とする，スティックスリップ波形 [59] が生起する．

スティックスリップ波形の生起要因となるスティックスリップ現象は，Fig.4.6 に示すような質点とバネによる力学モデルによって説明することができる．いま精密移動台を

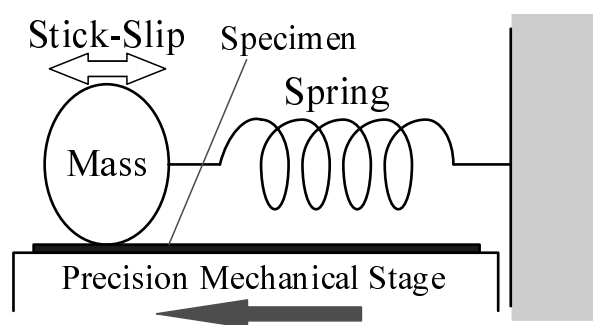


Fig. 4.6: Dynamical model of stick-slip phenomenon

矢印方向に動かすとき，初めは質点と試料表面間の最大静止摩擦力 > バネ力であるため，移動台の動きとともに質点は左に変位していく．これがスティック現象である．その後，最大静止摩擦力 < バネ力となった瞬間に質点は右に引戻される．これがスリップ現象であり，以降はこのような動作の繰り返しによって，質点には振動的な変位を生じることになる．

Fig.4.6 のモデルを光ファイバ触針走査装置に当てはめれば，Fig.4.7 のように試料表面の摩擦力変化や凹凸への引っ掛かりによって触針先端が試料表面に対し付着と滑走を繰り返す一連の動作が スティックスリップ現象であり，ノコギリ波状の波形として触針先端の振動変位が観測されることになる．すなわち触針が質点であると同時に，走査にもなって生じるしなりに対する復元力がバネの役割も果たしている．

Fig.4.8 は，触針先端に適当な押付力が印加された状態で，試料表面が凸凹・平滑な区間（背景色は一樣）において得られた計測波形の例であり，スティックスリップ波形成分の生起状況が試料表面の凹凸状態に応じて大きく変化するように確認できる．なお本計測波形獲得時の触針押付力は定量的に評価をしていなかったが，Fig.4.4 に示した観測条件とほぼ同一であったと考えられる．

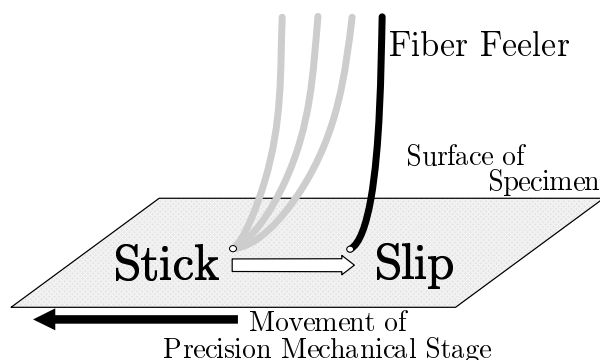


Fig. 4.7: Schematic view of stick-slip phenomenon

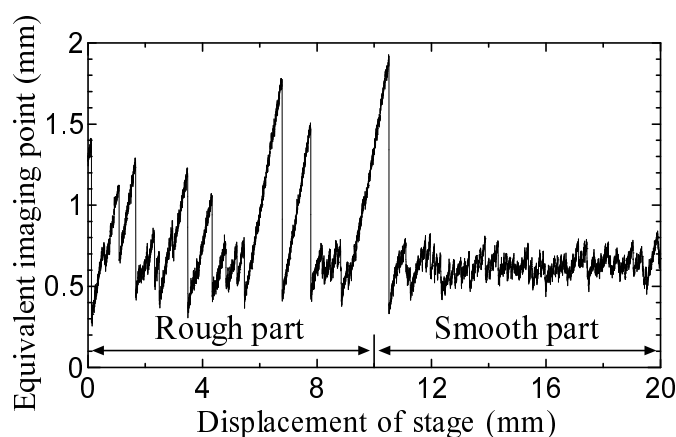


Fig. 4.8: Measured scanning waveform derived from rough and smooth surface

4.2.2.3 反射光成分からの印刷濃淡情報の獲得

反射光成分による PSD 上の結像点には，試料表面の印刷濃淡などによって輝度の変化が生じるため，試料表面における反射率変化，すなわち試料表面模様という表面性状を要因とした波形成分が生起する．

Fig.4.9-(b) は，Fig.4.9-(a) に示すような平滑な白→黒→白の印刷模様をもつ紙面を試料として獲得された計測波形の例である．黒色印刷の区間では直接光成分が支配的となった等価結像点位置が観測されているが，白色印刷の区間では反射光成分の影響も受けることによって等価結像点位置が移動する現象が起こり，結果としてスティックスリップ波形成分に比較して低周波な，印刷模様に対応した波形成分が見掛け上で観測されているようすが確認できる．

4.2.3 紙幣診断の実現可能性

4.2.3.1 紙幣診断実現のための着目点

現行紙幣 (E 券) には，従来からの透かしなどに加え，深凹版印刷・パールインク・ホログラムをはじめとした数々の新技術が導入されたことによって，真の紙幣のみに固有

4.2. 光ファイバ触針の走査波形を利用した紙幣診断

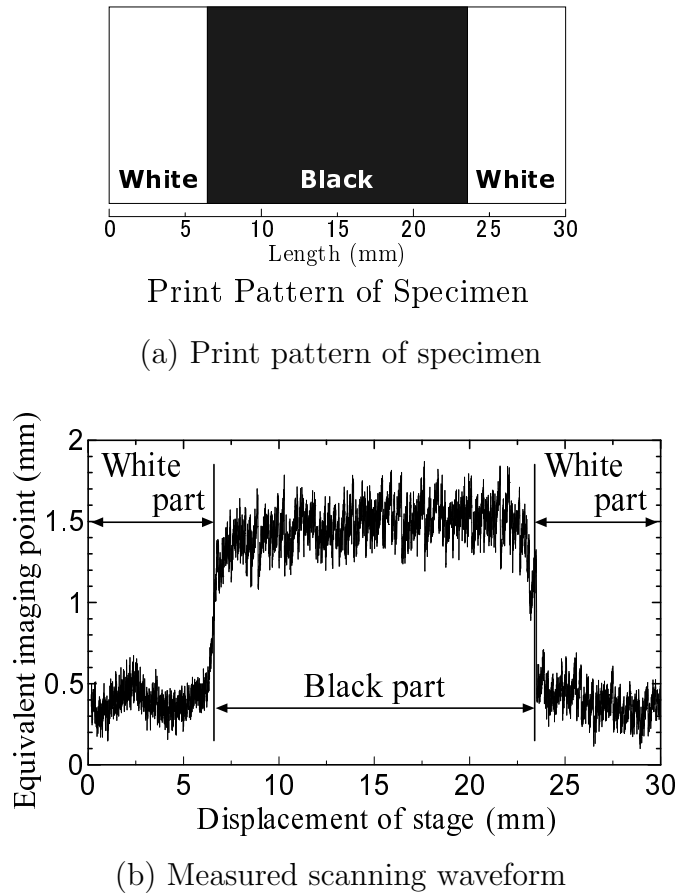


Fig. 4.9: Measured scanning waveform derived from black and white print pattern

な性状が増加している．裏を返せば，診断という側面からは，それらを統合的に利用することによって，その精度を高めていくことが望ましい．特に深凹版印刷の導入によって，現行紙幣は従来紙幣（D 券）に比較して印刷面の凹凸が際立っていることが特徴的であり，この性質は真贋診断へ積極的に利用されるべきと考えられる．

光ファイバ触針走査装置では，その走査波形中のスティックスリップ波形成分の有無あるいは大きさも，試料表面の性状と相関をもっていると考えられる．すなわち，紙幣表面の凹版印刷による微小な凹凸・表面粗さ，あるいは無印刷面と印刷面の違いによる摩擦係数変化などといった表面性状と相関をもつスティックスリップ成分の出現頻度や振幅，さらには印刷模様といった表面性状と相関をもつ（スティックスリップ成分に比較して）相対的に低周波数な波形成分の振幅値情報が，紙幣診断に際して有用な情報をもたらすものと考えられる．さらに，それらの獲得情報を統合的に利用することで，紙幣診断の信頼性が飛躍的に高められる可能性もある．

実際に先行研究の成果からは，触針を走査させた際のその先端の微小な振動変位成分がスティックスリップ現象であることは既に明らかになっており [56, 59]，そこで得られた知見は紙幣診断へも応用できる可能性が高い．

4.2.3.2 紙幣診断のための触針走査ラインの選定

一般的な紙幣診断を考えるとときに金種診断も不可欠となることは、光ファイバ触針走査装置による計測波形を利用して診断を構築する場合にも変わらない。裏を返せば、触針走査は各金種ごとに固有な性状をもった領域に対して施す必要がある。一方の真贋診断に際しては、真券(真の紙幣)のみに固有な性状として付帯する凹版印刷領域に対して、触針走査を施すことが効果的と考えられ、さらに劣化診断においては流通にともなって劣化していく性状に着目しなければならない。

紙幣表面上でこのような要件を同時に満たすことができる領域はいくつか考え得るが、今回は印刷インクの盛り上がりによる凹凸が顕著で、計測波形に相違が現れ易いと予測される金額面の凹版印刷部分を、走査ラインとして選択することとした。Fig.4.10 には 2000円札を例として、光ファイバ触針先端の走査ライン(矢印線)を図示するとともに、Fig.4.11 にはその走査ライン上の凹版印刷による凹凸情報を、触針式表面形状測定器((株)ミットヨ SV-624)にて間隔 $40\mu\text{m}$ ごとに測定した結果を示した。「2000円」の文字上に該

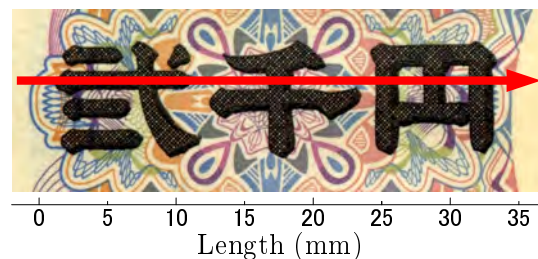


Fig. 4.10: Scanning line for 2,000Yen note covering intaglio prints

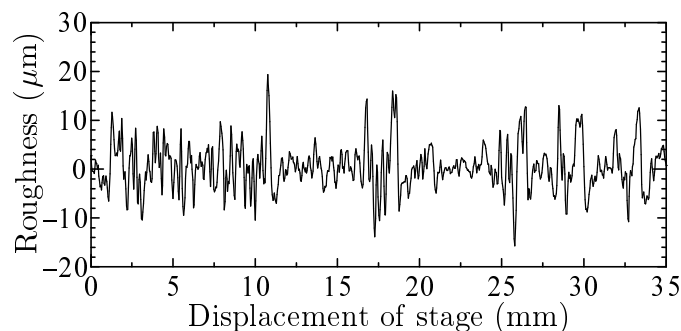


Fig. 4.11: Roughness on scanning line for 2,000Yen note including intaglio prints

当する区間には、深凹版印刷によるインク盛り上がり量 [60] とおよそ一致した、 $20\mu\text{m}$ 程度の微細な凹凸の存在を確認することができる。

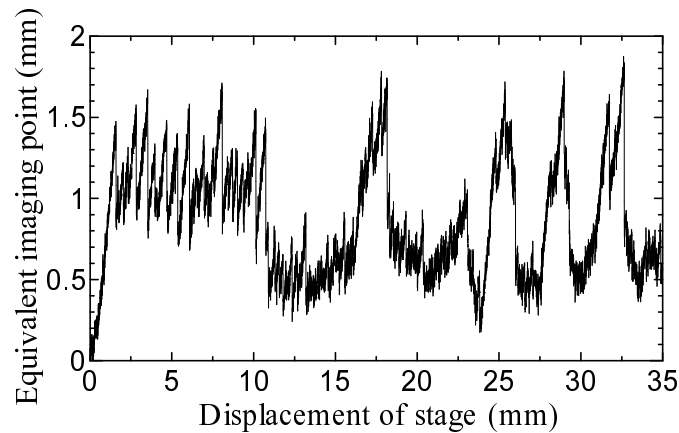
4.2. 光ファイバ触針の走査波形を利用した紙幣診断

4.2.4 診断波形として有効な波形成分

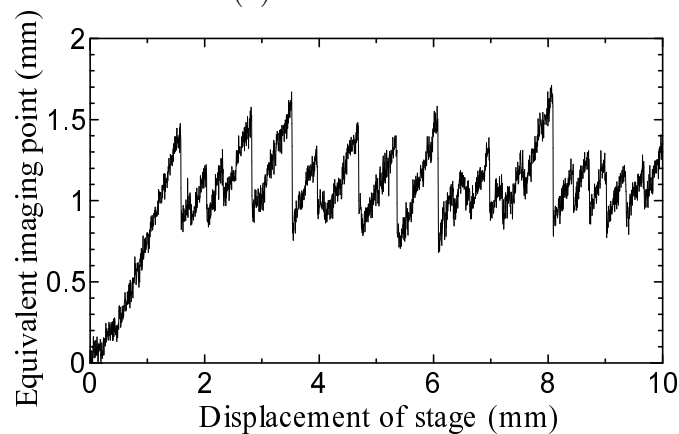
真券紙幣と贋券紙幣に対し，光ファイバ触針を走査させたときの触針先端変位の計測波形の相違について確認し，紙幣診断において診断波形として扱うべき波形成分を改めて明確化しておく．

4.2.4.1 真券の計測波形

Fig.4.12 は，光ファイバ触針走査装置による計測波形，およびその凹版印刷区間のみを拡大した図であり，横軸が精密移動台の移動距離，縦軸が PSD の等価結像点位置を表



(a) Overall view



(b) Enlarged view on intaglio print part

Fig. 4.12: Measured scanning waveforms for genuine note

している．

Fig.4.10 と照らし合わせると，低周波数成分が印刷模様と相関をもつことは明確である．言い換えればこれは，診断波形成分として計測波形の低周波数成分に着目すれば印刷模様（＝金種）に関する情報を獲得することが可能であるといえる．さらに Fig.4.11 と照らし合わせれば，凹版印刷区間にのみ明確にスティックスリップ波形が生起している

ことが読み取れ、これは異常状態としての真贋情報を評価するための重要な診断波形成分となり得る。

4.2.4.2 贋券の計測波形

国内で発見される贋券の多くが、凹版印刷までは施されていない稚拙なものである [61] という状況である。このような背景も踏まえ、本研究では真券の印刷模様の一部をスキャナで読み取り、上質紙にプリンタで印刷した式千円札を贋券試料として用意した。例えば従来の透過光量に基づく診断技術 [62] では、光線を照射しながら紙幣を移動させることによって得られる走査ライン上の光透過量の変化によって印刷模様が判読されることになるため、このような簡単に偽造が可能な贋券に対してすら、真贋抽出は難しいとされている。

Fig.4.13 は、真券の場合と同一条件における、贋券による計測波形とその印刷区間の拡大図を示した結果である。贋券試料においても、反射率という観点のみに着眼すれば

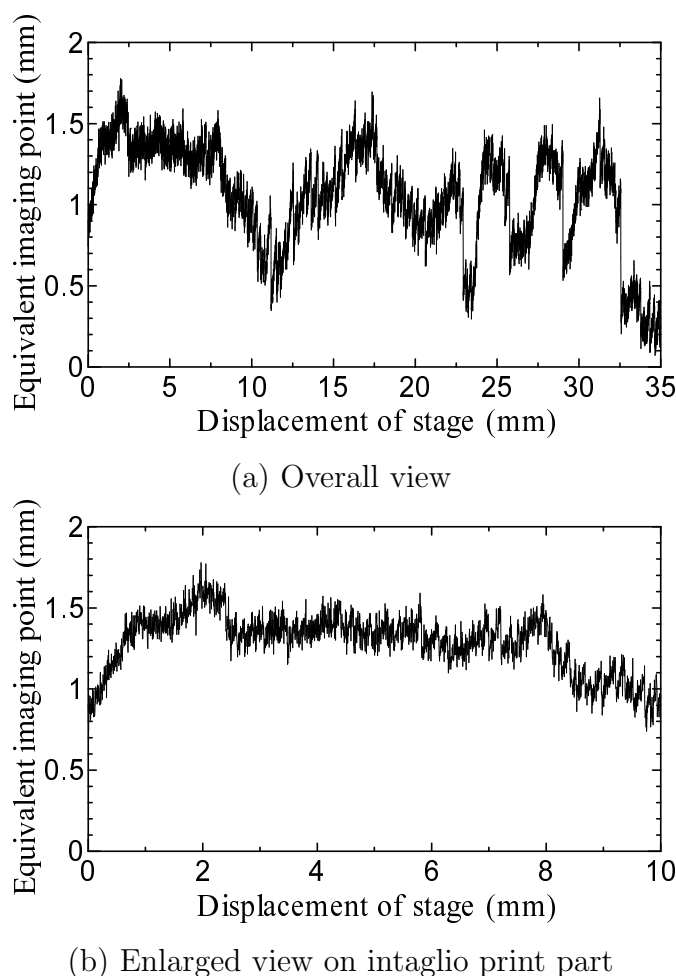


Fig. 4.13: OMeasured scanning waveforms for counterfeit note

印刷模様は真券と同一と考えても差し支えない。すなわち Fig.4.10 あるいは Fig.4.12 と

4.3. 偏在型波形の生起検出のための波形特性の統合利用

照らし合わせても明白のように、低周波成分の軌跡はほぼ一致し、それが紙幣の真贋には依らないことも示した結果であるといえる。

一方で、凹版印刷(であるべき)区間の波形に着目すれば、通常のプリンタによる印刷のためにほとんど凹凸が存在することのない贋券においては、スティックスリップ成分が全く生起していない。すなわち事前の予想どおり、凹版印刷の微小な凹凸の存在とスティックスリップ波形の生起状況は直接的に相関をもっており、診断波形としてその生起に着目することは、真贋評価に関する少なくともひとつの重要な情報の獲得へつなげると考えられる。

4.2.4.3 診断波形としての低周波数成分とスティックスリップ成分

ここまでで見てきたように、光ファイバ触針走査装置による紙幣表面の計測波形には、診断波形としての2つの成分、すなわち印刷模様に関する情報を提供できる低周波数成分と凹版印刷の存在情報を提供するスティックスリップ成分が含まれている。このうちスティックスリップ波形成分は、偏在型の波形成分と考えられる。詳しく見れば、印刷模様情報に基づいてその生起位相が拘束される波形成分であり、その生起検出タスクの実現に際しては計測波形の獲得時間領域全域に渡る生起検出処理は必要なく、印刷模様という規則情報を基にして生起検出処理を行うことでもその選択性を高めることが可能となる。

一方の情報分析処理においては、逆問題としての伝達特性の素性が既知な、定性値までの評価を実現すべき診断対象と考えられる。すなわち低周波数成分からは金種が、またスティックスリップ波形成分からは真贋が抽出可能と考えられるため、それらを利用したより高度な分析量を獲得できる可能性があるためである。一方で、紙幣診断における定量化とは劣化度合いを数値化することにあると考えられるが、そのような定量化という観点からは、劣化の程度と凹版印刷の凹凸の摩耗度合い、あるいは凹版印刷の摩耗度合いとスティックスリップ波形成分の大きさ・発生頻度における伝達特性が明確化されておらず、今後の課題となる可能性が高い。

4.3 偏在型波形の生起検出のための波形特性の統合利用

前節における検討結果から、紙幣に対する光ファイバ触針走査の計測波形より、真贋抽出あるいは金種抽出を実現するために必要とされる表面性状と相関をもつ、複数の波形特性を獲得できる可能性が明らかとなってきた。これまでの検討結果を踏まえれば、紙幣診断において診断性能を左右する鍵となる成分はスティックスリップ波形にあると考えられる。そこで、スティックスリップ成分検出のための信号処理技術自身の選択性を下げることで処理効率性の向上を図りながら、表面性状に纏わる波形情報を統合的に利用し、スティックスリップ成分生起の規則を見い出すことによって、生起検出処理全体における選択性は維持した形で信号処理技術の実現を検討していく。

4.3.1 定在性診断波形としての低周波数成分の生起検出

これまでの検討を踏まえれば，計測波形中の低周波数成分は印刷模様情報が重畳された診断波形と捉えることができ，当該成分の生起を検出することは紙幣診断へ有用な情報を提供することにつながると考えられる．この低周波数成分は印刷模様に対応する形で常に生起をしている定在性波形であるため，計測波形に対して高周波数成分および直流成分の除去処理を施すことで，その生起検出を十分に実現することが可能である．

Fig.4.14 は，官封券（新券）の弍千円札における触針走査の計測波形に対して，高周波数成分除去処理としての 500 点の移動平均処理と，直流成分除去処理を施した結果である．Fig.4.10 と比較すれば明らかなように，印刷模様と強い相関をもつ波形成分の検出

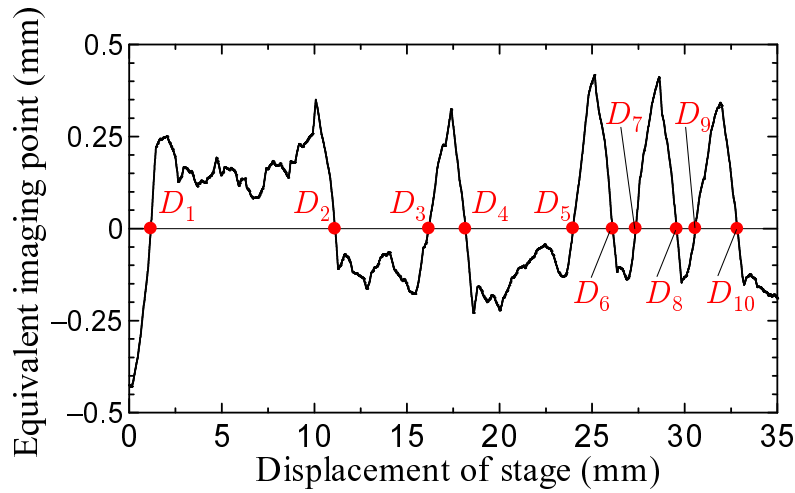


Fig. 4.14: Extracted low-frequency component from observed waveform of 2,000Yen note as stationary diagnostic waveform

が実現されており，この波形には印刷模様情報を獲得するための診断波形として利用価値があることは自明であろう．

4.3.2 非定在性波形の波形形状モデル

4.3.2.1 波形テンプレートの設計

非定在性波形としてのスティックスリップ成分の生起検出を実現するための波形テンプレートとして，Fig.4.15 に示すように極小値 $G_{\min[n]}$ と $G_{\min[n+1]}$ および極大値 $G_{\max[n]}$ を 1 組とみなす特徴的的代表点によってスティックスリップ波形をモデル化し，計測波形から当該成分の生起を検出する．ここで，検出されるスティックスリップ成分の総数を N として， n は $1 < n < N$ である．

波形テンプレートを変形させるための波形パラメータ値としては，Fig.4.15 に記したスティックの傾き θ_n および波形振幅値 L_n を導入する．既に 4.2.2 節にて示したスティック

4.3. 偏在型波形の生起検出のための波形特性の統合利用

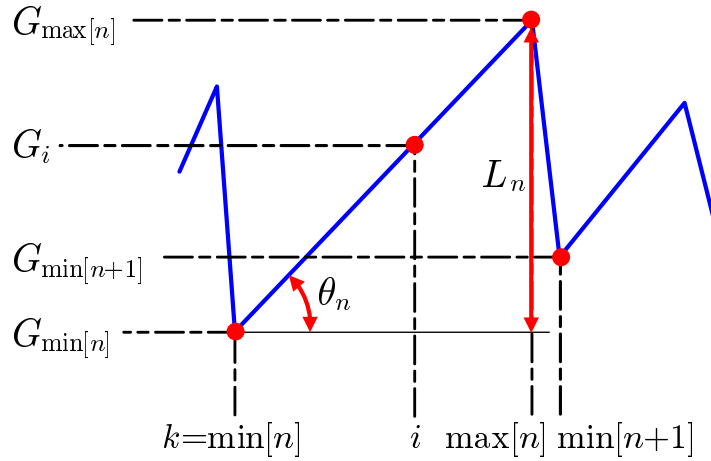


Fig. 4.15: Waveform template of stick-slip component

スリップの発生原理に従えば，スティック時の触針先端の変位は移動台の移動距離へと一致してくる．このため，Fig.4.15 の $\min[n]$ から $\max[n]$ 間のスティック時の傾きは 45deg に一致するという，スティックスリップ波形の大きな特徴に着目し，スティック時の傾きを表す波形パラメータとしての θ_n を導入する．具体的には (4.1) 式によって算出することができる．

$$\theta_n = \tan^{-1} \left\{ \frac{G_{\max[n]} - G_{\min[n]}}{\max[n] - \min[n]} \right\} \quad (4.1)$$

一方，波形振幅は試料表面の凹凸度合いとある種の相関をもってくると考えられるが，この振幅を表す波形パラメータとして (4.2) 式によって算出することができるスティック中の触針変位量に着目し， L_n として導入する．

$$L_n = G_{\max[n]} - G_{\min[n]} \quad (4.2)$$

L_n に関しては，スリップ現象時の触針変位量すなわち $G_{\max[n]} - G_{\min[n]}$ に着目して算出することも可能である．しかしながらスリップ現象中に触針が新たな凹凸への引っ掛かりを生じてしまう場合があるなど，振動変位を表すパラメータとして不安定な要素も多くなるため，本研究ではより正確性に優れた検出の実現を念頭に，触針に余計な振動変位が生じないスティック現象へと着目することとした．

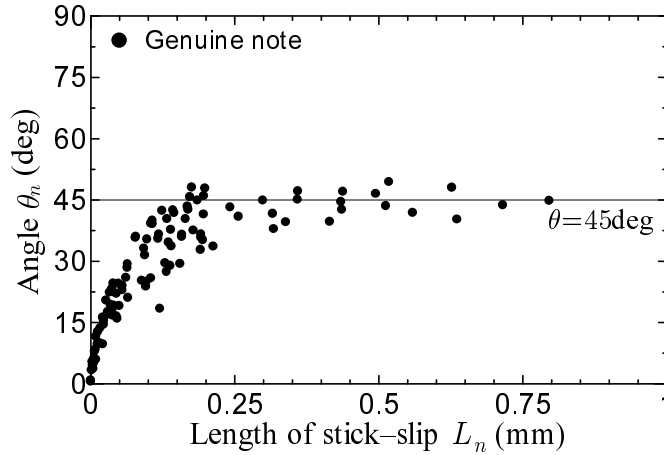
なお，情報分析処理においても検出された診断波形の波形形状的特徴を抽出する際に，これらの波形パラメータの値を利用することが可能である．

4.3.2.2 診断波形の生起検出性能の検証

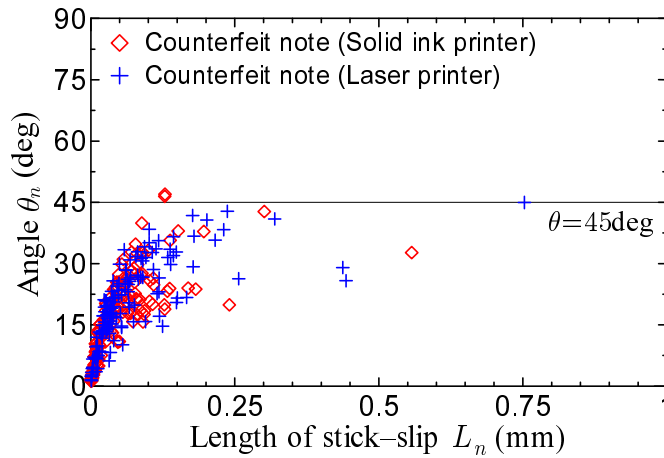
ソリッドインクプリンタとレーザプリンタで印刷した 2 種類の贋券と真券を合わせた，計 3 種類の試料の計測波形を獲得し，計測ノイズである高周波数成分を除去した後に，波形テンプレートを利用してスティックスリップ波形の生起検出を試みた．ここでは確率

論的アプローチなどの高度な処理は行わず，単純にテンプレートと合致した波形成分を検出する．なおスティックスリップ現象の生起中には同現象が重複して生起することは無いという性質に従い，ひとつの時間区間に対し，重複して検出処理を適用することを行わない．

波形テンプレートへ合致して検出された波形成分に対し，その波形パラメータ L_n と θ_n の関係を真贋の別にプロットした結果を Fig.4.16 に示す．ここで，第3章における生



(a) Genuine note



(b) Counterfeit note

 Fig. 4.16: Relations between L_n and θ_n for detected stick-slip component

起率値分布と異なり，Fig.4.16 の結果は当該波形パラメータ値の組合せをもった診断波形が1回生起していることを単純に示しただけの分布となっている点には注意されたい．

真券と贋券の計測波形を比較した際には，真券の計測波形にのみスティックスリップ波形の生起を確認することができていたが，Fig.4.16 はそれを的確に検出できていることを示した結果といえる．すなわち，真券に対する結果では特に波形振幅 L_n の大きな領域において傾き $\theta_n=45\text{deg}$ 近傍の分布が得られており，これは大振幅のスティックスリップ

4.3. 偏在型波形の生起検出のための波形特性の統合利用

波形成分の生起が検出された結果といえる． L_n が小さな領域では θ_n が小さくなる傾向にあるが，これは除去し切れていない観測ノイズ成分などを誤検出した影響による．贋券の計測波形では対照的に， L_n の大きな領域では $\theta_n=45\text{deg}$ 近傍にほとんど波形成分が存在しないという結果と同時に，真券同様に L_n が小さな領域では θ_n が小さくなる傾向が確認された．スティックスリップ成分が存在しないという贋券の計測波形の特徴が，正確に検出されている．

これらの結果は，波形テンプレートによるモデル化に基づいたスティックスリップ成分の生起検出の有効性を示した結果であるといえる．

4.3.3 生起規則情報を統合化した生起検出の実現

4.3.3.1 生起規則情報を統合する意義

ここまでは，紙幣表面の凹版印刷による凹凸の存在によって生起するスティックスリップ波形成分の生起を検出することが真贋評価における有用な情報を獲得することにつながると考え，その生起検出のための信号処理技術を考えてきた．しかしながら，Fig.4.8の先行実験において確認できたように，粗い紙面はスティックスリップ波形成分の発生要因となりうるため，スティックスリップ波形成分の生起のみに着目しては，真贋評価に際して誤った情報を提供してしまう可能性がある．

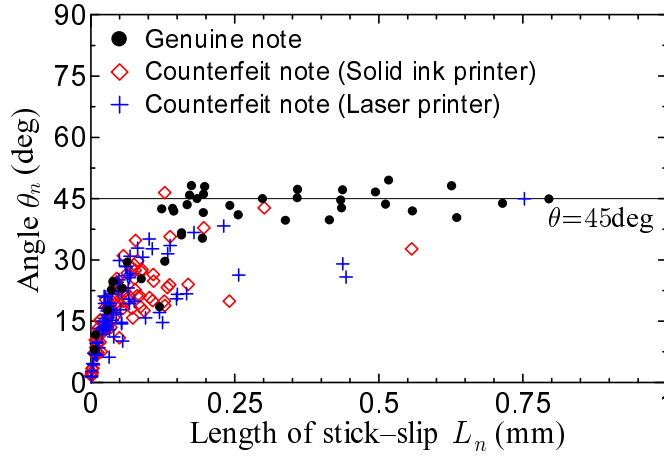
逆の見方をすれば，凹凸の多い(凹版)印刷区間と，本来は凹凸の無い無印刷区間におけるスティックスリップ波形成分の生起状況を個別に検出することができれば，後段の情報分析処理においては，より正確性に優れた真贋評価のための情報を提供できる可能性があるともいえる．すなわち，印刷・無印刷区間の生起状況を個別検出することができれば，印刷区間におけるスティックスリップ波形成分の生起要因となった表面性状が凹版印刷によるものか否かを確認することができ，ひいては真贋評価における正確性の向上を図ることにもつながってくる．

このような生起検出を実現するための観点として，計測波形から検出することができる他の波形特性を統合的に組み合わせて診断波形の生起規則を推定してから生起検出を実現する，偏在型波形のための生起検出技術について考える．

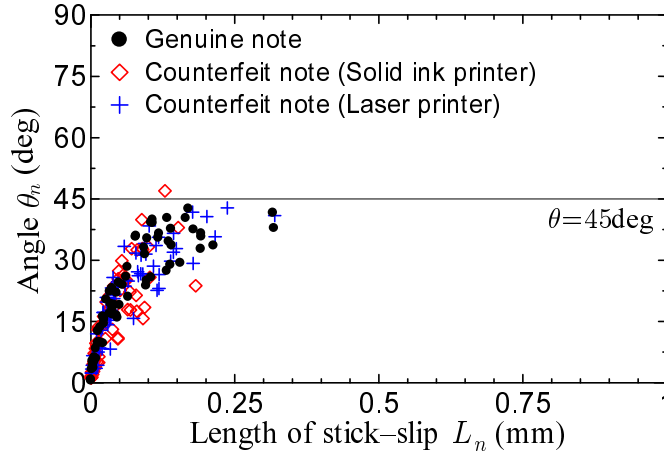
4.3.3.2 規則情報を統合化した生起検出技術

本研究では，生起検出へ統合的に利用する波形特性として，間接光成分として観測される波形から得られる印刷模様情報を与える．すなわち，各種紙幣試料の計測波形に見られるスティックスリップ波形成分に比較して低周波な印刷模様と相関をもつ波形成分をもとにして計測波形を印刷区間および無印刷区間に区分化する．

Fig.4.17 は，Fig.4.14 の印刷模様波形における 0 以上の区間と 0 未満の区間，すなわち印刷区間と無印刷区間各々の区間における各種紙幣試料の計測波形に対して，スティッ



(a) Print part



(b) Nonprint part

 Fig. 4.17: Relations between L_n and θ_n for stick-slip component on print and non-print part

クスリップ波形の生起検出処理を適用した際の波形パラメータ L_n と θ_n の関係を示している。贋券では、印刷区間と無印刷区間の双方の差はそれほど大きくなく、印刷・無印刷区間どちらからもスティックスリップ波形成分の生起をほとんど確認することができない。これに対し真券では、印刷区間における生起検出成分中の振幅が大きな波形成分の大多数が $\theta_n=45\text{deg}$ のスティックスリップ波形成分である。さらにいえば、無印刷区間との差は顕著であり、無印刷区間には振幅の大きな波形成分の生起は確認できない。あるいは別の解釈をすれば、無印刷区間は出現型、印刷区間は消滅型の診断波形生起規則に対応しており、生起規則を利用することで、異なる性質をもつ診断波形を区分しながらの検出を実現していると捉えることもできる。

4.4. 診断対象の定性評価のための波形特性の統合利用

4.3.3.3 生起検出技術としての選択性

さらに、生起規則を考慮した生起検出技術の選択性についても議論しておきたい。ここまで見てきたように、生起規則情報を基にして診断波形の生起検出を実現すれば、生起規則を利用した計測波形の区分化によって背景雑音の影響が低減され、SN 比の改善、すなわち選択性が高められたことと等価な効果をもつ。

より選択性に優れていると考えられる確率論的なアプローチを利用せずとも、診断波形の生起をこのような高い選択性を以って検出できる背景には、このような区分化が生起検出技術としての選択性の低下を補っているためであるといえる。生起規則に基づいて診断波形の生起領域を区分化することによって、診断波形の時間局所的な性質が局在型から確定型へ一歩近づいた偏在型波形として扱えるようになる。この結果として、より簡便な生起検出方式においても、計測波形全域に生起検出処理を施した場合に比較して、より選択性に優れた診断波形の生起検出が可能となってきたと考えられる。

4.4 診断対象の定性評価のための波形特性の統合利用

ここでは、情報分析処理のために、波形パラメータ抽出の処理機能レベルに比較して、その正確性を一段階高めた処理機能レベルである定性評価のための信号処理技術について検討を加える。その実現方法については、計測波形より獲得できる複数の波形特性情報を統合的に利用し、定性的情報に関する分析値を抽出する。

情報分析処理中の処理機能レベルとしての定性評価の対象となる診断対象は、逆問題という考え方において、異常状態を定量的に推測できるまでの精度の高い伝達特性までが既知でない対象へ適用するという考えであった。この観点からみれば紙幣診断はその条件に合致しており、本検討では紙幣の凹版印刷による凸凹が何 mm といった定量的な評価値としてではなく、金種あるいは真贋といった、診断対象に対する定性的な情報分析を下すことが具体的な目標である。

4.4.1 波形特性の統合利用と情報分析の試み

光ファイバ触針走査装置を利用した研究として、過去に布の表面を触針でなぞったときに発生する触針先端の振動変位を計測波形として獲得し、布の表面性状ひいては布の手触り感を評価しようとする試みがある。ここでは、その先行研究において試みられてきた診断波形の評価方法に関して簡潔にレビューすることで、波形情報の統合的な評価技術の意義や必要性についてみていきたい。

4.4.1.1 ヒゲ型触覚センサの設計と布の手触り感の計測 [63]

当該研究では「SDP(Symmetrized Dot Pattern)」を利用し、診断波形の評価を実現していた。SDP とはもともと IBM で開発された音声学の音素判別を目的としたパターン認識の方法であり、時系列波形を極座標変換し、その相関関係を対称なパターンとして表示することによって音素の違いを見分けられるようにしたものである。

その模式図を Fig.4.18 に示すように、具体的には離散波形データの f_i を半径成分、 f_{i+k} を角度成分へ極座標変換して座標平面上へとプロットすることで、 f_i と f_{i+k} の相関関係をドットパターンとして表現する。この変換アルゴリズムを数学的に表現すれば、(4.3)

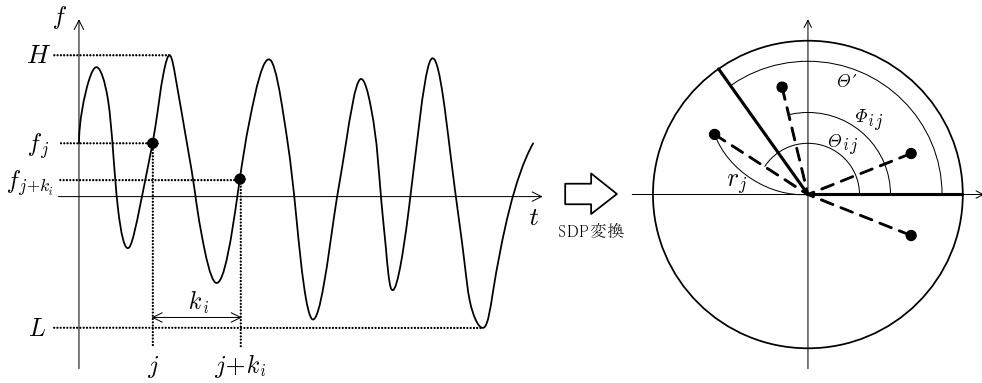


Fig. 4.18: Schematic view of SDP transform

～(4.5) 式によって記述することができる。

$$r_j = \left(\frac{f_j - L}{H - L} \right) r_0 \quad (4.3)$$

$$\Theta_{ij} = \Theta' + \left(\frac{f_{j+k_i} - L}{H - L} \right) \xi_0 \quad (4.4)$$

$$\Phi_{ij} = \Theta' - \left(\frac{f_{j+k_i} - L}{H - L} \right) \xi_0 \quad (4.5)$$

$$j = 1, 2, 3, \dots, N - k_i$$

ただし、 N は全データ数、 m は対象軸の数、 L および H はそれぞれデータの最小値と最大値、 r_0 および ξ_0 はそれぞれ分布の最大半径と最大開き角度、 k_i は注目する2点間の離散時間的距離をあらわす。また Θ' および k_i は

$$\Theta' = \frac{360}{m} i \quad (4.6)$$

$$k_i : \text{任意の } m \text{ 個の自然数 } (i = 1, 2, 3, \dots, m) \quad (4.7)$$

で規定される。

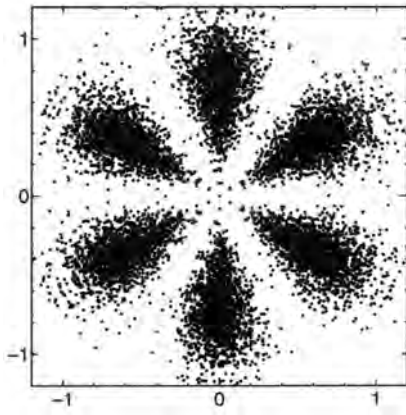
Table4.2 にその性状を示した、いくつかのサンプル診断波形データ(サンプリング周波数 500Hz、サンプリング点数 1024 点)に関する SDP を求めた結果が、Fig.4.19 となる。

4.4. 診断対象の定性評価のための波形特性の統合利用

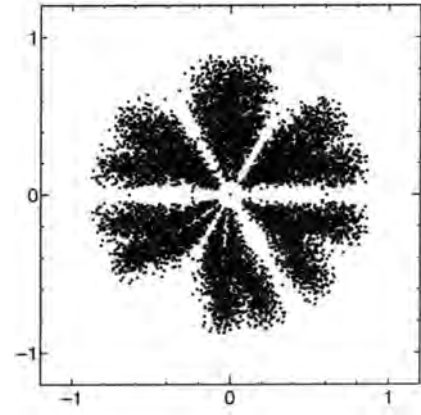
Table. 4.2: Parameters of sample observed waveforms data

データ名称	正規性ノイズ分散 (V)	正弦波振幅 (V)	正弦波周波数 (Hz)	SN 比
S_0	0.30^2	0	0	∞
S_1	0.45^2	0.3	12	1.5
S_2	0.45^2	0.3	24	1.5
S_3	0.30^2	0.3	12	1.0

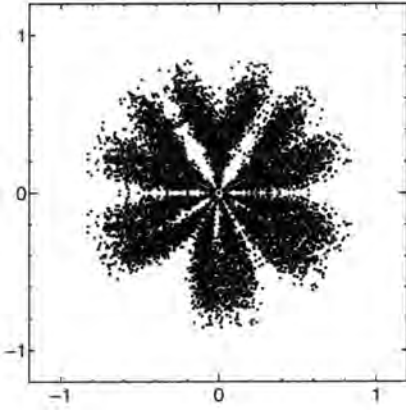
ただし各パラメータは, $H - L = 1.5$, $m = 6$, $k_i = 25, 50, 75, 100, 125, 150$, $r_0 = 1.0$, $\xi_0 = 40.0$ とした. 一見すると, SDP は診断波形の振幅という単一の波形パラメータによ



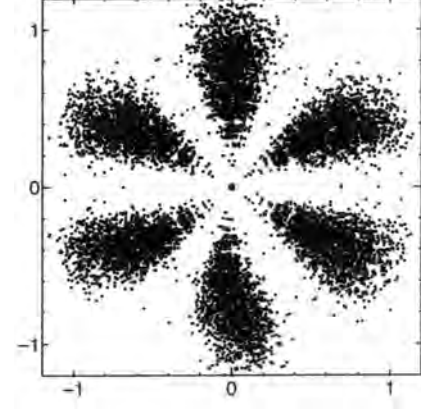
(a) For waveform S_0



(b) For waveform S_1



(c) For waveform S_2



(d) For waveform S_3

Fig. 4.19: Examples of SDP[64]

る評価ともとらえかねないが, 評価の対象となるサンプル点間の時間的距離を可変とすることで, 周波数と振幅の2つの波形パラメータを統合した評価を試みていると解釈でき, 既に研究の初期段階において統合的に評価することの必要性が認識されていたと捉えることができる.

4.4.1.2 光ファイバ触針の走査による布の手触り感の計測 [59]

当該研究では、「SPDF(Simultaneous Probability Density Function)に基づく評価方法」が提案されている。これは Fig.4.20 にその模式図を示したように、あるサンプル時刻 k だけ離れた離散診断波形 f_i と f_{i+k} の生の相関関係を局所的に分析すること念頭に置いた、同時確率密度関数の概念を利用した波形評価法である。

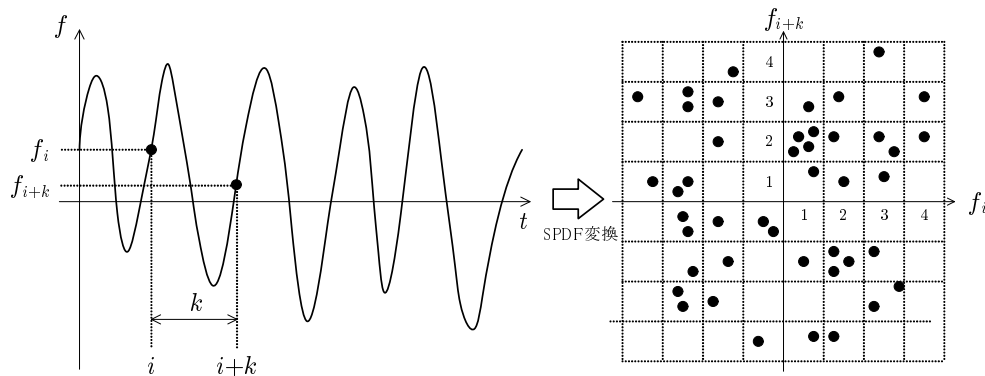


Fig. 4.20: Schematic view of SPDF[59]

具体的には、 f_i と f_{i+k} をそれぞれ横座標・縦座標とする散布図を作成し、離散時間的に k だけ離れた全ての離散診断波形のデータの組についてプロットしていく。波形の系列長を n とするとき、この散布図中には $n - k$ 個のデータが存在することになる。この散布図平面をメッシュに区切り、一つのメッシュに含まれている個数をカウントし(ヒストグラムを作る)、全データ数 $n - k$ で割ったものを求めれば、近似的に同時確率密度に比例した値を得ることができる。

Fig.4.21 には、Table4.2 に示したサンプル診断波形データに対し、パラメータ k を 25 として算出した SPDF を示した。SPDF も、評価の対象となるサンプル点の時間的距離を可変として SPDF 解析を繰り返すことで、SDP と同様に周波数と振幅という 2 つの波形パラメータに基づいた評価を試みていると解釈することができる。

4.4.1.3 光ファイバ触針による表面性情の分析 [58] ほか

これらの研究に続いた「光ファイバ触針による表面性情の分析」における評価方法の詳しい解説については紙面の都合で文献を参照されたいが、そこでは診断波形の特徴を捉えるためのいくつかの指標を導入し、それらによる特徴空間を作成することで複数の指標値を統合的に利用する評価方法を提案してきている。

このようにいずれの先行研究の過程を振り返ってみても、診断波形の評価には複数の波形パラメータへ着眼することの必要性が認識されており、実際に具体的な評価法のいくつかが議論されてきているという経緯がある。

4.4. 診断対象の定性評価のための波形特性の統合利用

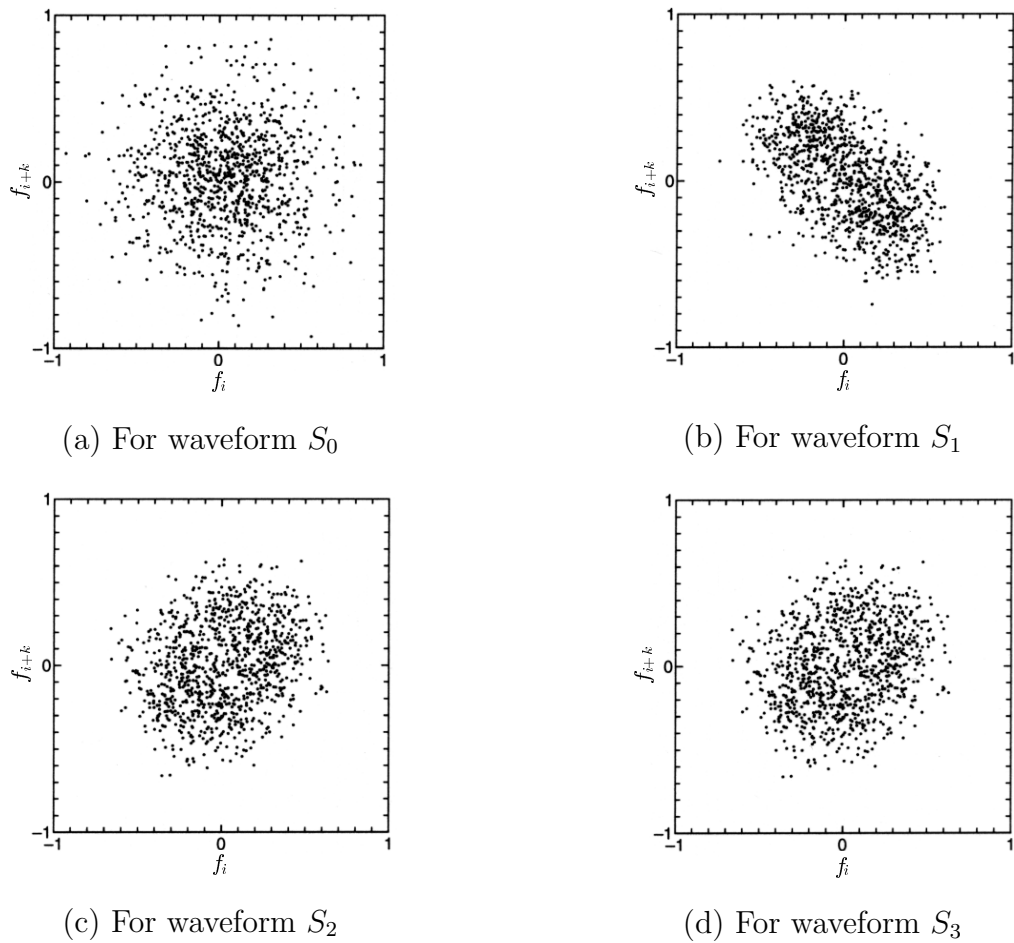


Fig. 4.21: Examples of SPDF

4.4.2 真贋・金種の独立抽出

4.4.2.1 真贋を抽出するための指標値

紙幣表面の凹版印刷に起因した凹凸がスティックスリップ波形成分の生起要因となることはもちろんだが、例えば粗い紙面もスティックスリップ波形の生起要因となりうる。すなわち、そのような粗い紙面をもった贋券に対する真贋抽出は、スティックスリップ波形の生起のみに着目しては実現できないということを示唆するものであり、このような観点に基づけば、凹版印刷の部分のみにスティックスリップ波形が生起していることを抽出する必要がある。

前節では診断波形の規則的な生起検出という側面より、印刷濃淡という波形特性情報によって規定された規則に則った生起検出技術の提案とその有用性を示してきたが、それは真贋抽出のための準備とも捉えることができる。ここでは、真贋抽出のための技術を、そのような生起規則を利用して実現する方法を検討していく。具体的には紙幣の定性的情報としての真贋情報を、計測波形中に生起しているスティックスリップ波形成分の妥当性を、複数の波形パラメータとしてではなく、統一的な指標値として抽出するこ

とを考える．

スティックスリップ波形生起の素性を評価する時，その特徴的性質であるスティック時の傾き θ_n が 45deg へ一致するという現象へ着目することは重要である．そこで，波形テンプレートと合致して検出された波形成分に対し，その傾きと振幅値を考慮に入れた，評価値 ρ を (4.8) 式によって定義する．

$$\rho = 1 - \left[\prod_{k=1}^{\tilde{N}} \left\{ 1 - e^{-\frac{(\theta_k - 45)^2}{2\sigma^2}} \right\} 10^{-L_k} \right]^{1/\tilde{N}} \quad (4.8)$$

傾き θ_n に関しては 45deg を平均値とした正規分布項，振幅 L_n に関しては $-L_n$ を指数とすべき乗項を基にして構成されている．(4.8) 式は， $\theta_n=45\text{deg}$ に近かつ L_n が大きい波形成分ほど影響力が強く， ρ 値は 1 に近づく．逆に $\theta_n=45\text{deg}$ から外れる，あるいは L_n が小さい波形成分は影響力が弱く，そのような波形成分が仮に存在していても， ρ 値は 0 からほとんど変動しない．これは，贋券に比較して真券の計測波形ほど，より大きなスティックスリップ波形成分が生起するという，実計測波形の特性に合致した指標値となっている．なお $\tilde{N}$ は，計測波形中の評価対象となる時間領域における波形テンプレートと合致する波形成分の生起検出数であり，また標準偏差 σ については，計測波形中の背景雑音の大きさなどに基づいてあらかじめ定めておく．

4.4.2.2 金種を抽出するための指標値

印刷濃淡情報すなわち印刷模様から金種抽出を実現する方法には幾つかのアプローチを考え得るが，ここでは信号処理機能の効率性がひとつの目標にあることを考慮に入れ，印刷の淡→濃あるいは濃→淡切替点の変位情報を利用する簡便な方法を採用することとした．

すなわち先に Fig.4.14 に示したように，検出された低周波成分のゼロクロス点から印刷濃淡切替点に関する情報を獲得できる．そこで，そのクロス点における精密移動台変位を $D_1, D_2, \dots$ とおき，金種抽出へと利用する．具体的には，金種ごとの走査ライン上における印刷濃淡の切替変位を記録したデータベース D_l^* (* は各金種を表すインデックス) を事前に用意しておく．そして，診断波形から検出・推定された D_l とデータベース D_l^* との相違度 E_* (* は同じく各金種を表すインデックス) を (4.9) 式にしたがって評価指標値として算出する．

$$E_* = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M (D_k^* - D_k)^2 \quad (4.9)$$

ここで M は，検出されたゼロクロス点の総数である．

4.4. 診断対象の定性評価のための波形特性の統合利用

4.4.3 抽出量を統合利用した紙幣分析の実現

4.4.3.1 紙幣分析のための信号処理の構成

ここまで提案してきた生起検出・情報分析のための信号処理技術要素の適性を考慮に入れ、各信号処理によって獲得できる診断波形特性情報を統合的に利用し、かつ効果的にその順序を組み合わせることによって、選択性・正確性そして効率性に優れた紙幣診断のための信号処理技術を実現する。

現在日本国内に流通する紙幣の場合を一例に、その信号処理のためのフローチャートを Fig.4.22 に示した。計測波形に対し、はじめに低周波数成分を検出した後に(真贋は問

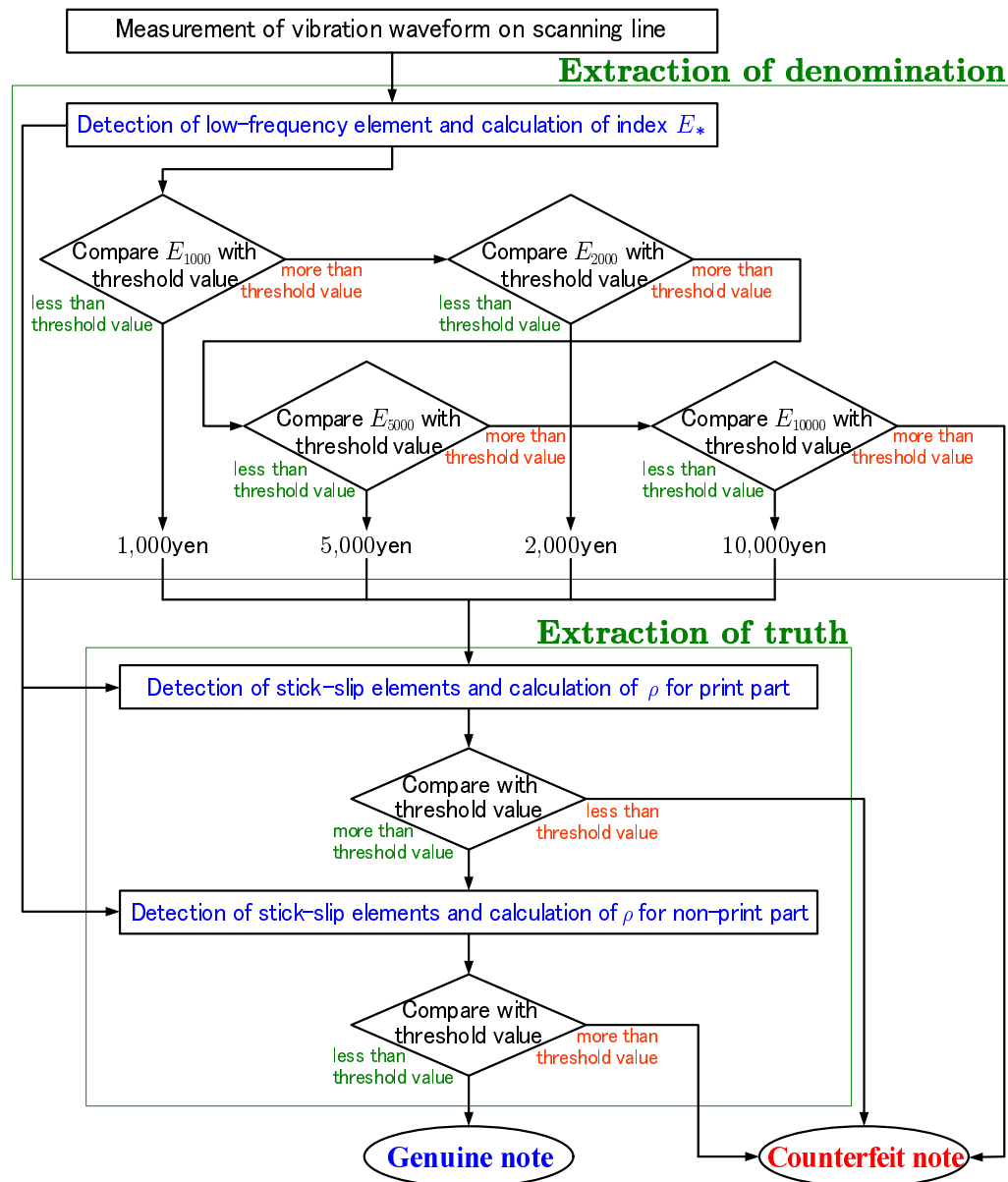


Fig. 4.22: Process flow of signal processing for circulated notes in market

わず) 金種抽出を実施し、指標値 E が最も小さくなる金種を試料に割り当てることで、4つの金種に分類する。同時に、この段階で全ての金種に対して指標値 E_* が大きな試料、すなわち印刷模様がいずれとも一致しない試料については贋券と分類してしまう。続いて真贋抽出を適用する。真贋抽出に際して統合的に利用するもうひとつの波形特性が、印刷濃淡情報としての低周波数成分である。低周波数成分の信号値が正の時間領域(印刷区間)と負の時間領域(無印刷区間)で計測波形を区分化して、生起規則を考慮した生起検出と情報分析を(凹版)印刷区間および無印刷区間に対して繰り返し、それぞれ生起が確認されたスティックスリップ波形の指標値 ρ を算出する。このとき、それぞれの時間領域におけるスティックスリップ波形の評価指標値を総合して、真贋抽出を実現する。すなわち印刷区間にのみ明確なスティックスリップ波形が存在する紙幣が、真券とみなされることになる。ここで、金種抽出・真贋抽出の各処理プロセスに個別に注目すれば、生起検出→情報分析の順に処理が施されている点に注意を促しておく。

なお、真贋・金種の抽出は、どちらを先に実施しても支障は無い。ここでは金種抽出を先に実施することで、印刷模様の一致度だけを抽出基準として印刷模様の一致しない稚拙な贋券を選別し、相対的に信号処理が複雑な真贋抽出の負荷を軽減することが狙いのひとつにある。また金種抽出を先に実施することで、真贋抽出における印刷区間選択を金種ごとに最適化させることも可能であり、誤抽出を減少させて正確性を高めることにも寄与してくる。

4.4.3.2 紙幣分析技術としての優位性比較

提案してきた紙幣診断のための信号処理技術による真贋・金種抽出に基づいた紙幣診断技術、および比較対象としての透過光量に基づく紙幣診断技術について、真券および各種贋券を診断対象とした場合の金種・真贋抽出への適性について整理した結果を、Table 4.3にまとめる。表中の記号に関しては、○は正確な抽出が可能なことを、×は抽出が不可能なことを、△は抽出精度が低下する可能性があることをそれぞれ意味している。

はじめに金種抽出では、提案する信号処理技術は真券と印刷模様が一致しない贋券に対して正しい金種抽出が期待できないが、この点は透過光量に基づく抽出でも同様である。この性質を利用して、全ての金種に一致しない試料は贋券と診断し、真贋抽出の一部を実現してしまうことも可能である。

真贋抽出においては、透過光量法では印刷模様が一致している贋券に対する抽出が不可能であることは明白である。印刷模様に合わせて紙表面の粗さを調節することは一般的に容易でないことを考えれば、贋券の紙表面は一樣な粗さを持つことになる。提案する処理技術では、紙表面の粗さ情報と印刷模様情報を統合的に組み合わせて抽出を実現しているため、印刷模様の一致度や紙表面の粗さに依らず正確な真贋抽出が実現可能である。強いていえば、印刷模様が一致していない紙幣に対しては最適な印刷・無印刷領域選択の補助へ金種情報を利用することが難しく、誤抽出の可能性が僅かに高まる可能性が無いとは言えず、その点を踏まえて としてある。

4.5. 診断実験: 実紙幣の診断

Table. 4.3: Propriety of a proposed method and transmitting light method for various type of notes

Counterfeit types of note	Proposed method		Transmitted light method	
	Denomination	Truth	Denomination	Truth
Genuine	○	○	○	○
Type 1	○	○	○	×
Type 2	○	○	○	×
Type 3	×		×	○
Type 4	×		×	○

Counterfeit type	Print pattern	Paper surface
Type 1	Corresponding to genuine note	Smooth
Type 2	Corresponding to genuine note	Rough
Type 3	Not corresponding to genuine note	Smooth
Type 4	Not corresponding to genuine note	Rough

Table 4.3 から明らかなように透過光量に基づく抽出とは正反対の特性であり，印刷模様が真券と一致して濃淡情報からの真贋抽出が難しいとされる贋券に対して正確な真贋抽出が可能なことは，提案する信号処理技術の大きな優位点となる．

4.5 診断実験: 実紙幣の診断

4.5.1 金種・真贋の抽出結果

4.5.1.1 金種の抽出

各金種の印刷模様データベースおよび紙幣 48 枚分の計測波形に対する診断波形 (低周波数成分) をフィルタリング & 直流成分除去処理によって用意し，(4.9) 式の印刷模様の相違度に関する評価指標値を算出した結果を，Table 4.4 に纏める．なお表の横方向には

Table. 4.4: Index E_* for each denomination of notes

	1,000 yen	2,000 yen	5,000 yen	10,000 yen
E_{1000}	2.4	14.9	15.2	21.2
E_{2000}	29.8	4.7	23.1	19.9
E_{5000}	27.9	20.8	1.6	22.2
E_{10000}	32.4	24.0	33.8	5.2

試料として用意した金種を，縦方向には診断波形に対して指標値を算出する際に印刷模様データベースとして使用された金種を示してある．

他金種データベースとの間で算出された指標値に比較して、自金種データベースとの間で算出された指標値は少なくとも一桁程の違いをもっていることを、全金種の診断波形において確認した。すなわち、提案した評価指標値 E_* の算出結果に対して単純な閾値処理を適用するだけで、金種情報の抽出を実現することが可能である。

4.5.1.2 真贋の抽出

真券試料として官封券および流通券の各 24 枚、贋券としてインクジェットプリンタおよびソリッドインクプリンタによる印刷の 24 枚を用意した。それぞれの計測波形に対して印刷区間・無印刷区間毎にスティックスリップ波形成分の検出処理を施し、さらに評価指標値として式 (4.8) 中の $\sigma=3.0\text{deg}$ として得られた ρ 値の平均値 $\bar{\rho}$ とその標準偏差 σ_ρ を、印刷・無印刷区間ごとにまとめたものが Table 4.5 と 4.6 である。

Table. 4.5: Indexes $\bar{\rho}$ and σ_ρ for print part

Index	New notes	Circulated notes	Counterfeit notes
$\bar{\rho}$	0.768	0.648	0.192
σ_ρ	0.114	0.106	0.040

Table. 4.6: Indexes $\bar{\rho}$ and σ_ρ for non-print part

Index	New notes	Circulated notes	Counterfeit notes
$\bar{\rho}$	0.300	0.277	0.152
σ_ρ	0.093	0.090	0.035

印刷区間に着目すると、大振幅のスティックスリップ波形成分が多数生起することになる真券の凹版印刷区間には、官封券・流通券によらず相対的に $\bar{\rho}$ 値は大きい。一方、贋券では印刷の凹凸が存在しないことで、印刷区間の $\bar{\rho}$ 値は真券に比較して大幅に小さくなる傾向を示している。また無印刷区間に着目すると、試料紙幣の真贋あるいは流通度に依存せず全ての試料でその値は小さい。すなわち、真券では印刷区間に対する $\bar{\rho}$ 値との開きが 2 倍以上となったのに対し、贋券では狙いどおり印刷区間・無印刷区間の $\bar{\rho}$ 値に大きな違いは無い。以上の結果より、印刷区間でのみ ρ 値の大きい試料を閾値処理によって選別することで、精度の高い真贋情報を抽出することが可能である。

このような真贋情報分析の結果は、診断波形の生起の有無あるいはそれらの波形パラメータのみならず、他の診断波形から得られる波形特性情報を統合的に利用することによって、情報の正確性を高められる例である。

4.5. 診断実験: 実紙幣の診断

4.5.2 定性評価性能の検証

ATM や店頭で入手可能な官封券・流通券(千, 弐千, 五千, 壹万円券), および先述のようにスキャナとプリンタで作製した贋券の計 72 枚から獲得された計測波形へ, 提案する信号処理技術を適用してその性能を検証した. なお 4.5.1 節での検討結果を踏まえ, 今回は金種評価における評価指標値 E_* に関する閾値は 10.0, 真贋評価における評価指標値 ρ に関する閾値はその分散値を踏まえ 0.46 と設定した.

実験結果は, 金種評価・真贋評価ともに成功率が 100% を達成することを示し, 特に透過光量に基づく診断技術では難しいとされる印刷模様が真券と一致している贋券試料に対して 100% の真贋評価成功率が達成されたことは, 本研究で提案する信号処理技術の優秀性が明らかになった結果であるといえる. 詳細な点に目を向ければ, 真贋評価に際しては評価指標値 ρ が閾値近傍をとる試料も一部見受けられた. しかしながらこれは流通券に限った現象であり, 流通による傷みの進行による凹版印刷部分の摩耗状況を鑑みれば, むしろ得られた指標値は妥当と思われる.

以上の結果から, 金種・真贋評価のための個別の信号処理技術, およびそれらを組み合わせた紙幣診断のための信号処理技術の有効性が確認された.

4.5.3 定量評価への拡張的应用可能性

傷み度合評価とは, 再流通させた際に贋券と区別がつかなくなる恐れのある汚れた券やよれた券などを取り除くことを目的に据えた評価項目である. 4.5.2 節における真贋診断実験の結果では, その指標値 ρ がばらつきをもっていることが明らかとなったが, これは流通による傷みすなわち凹版印刷面の摩耗がそのひとつの原因にあるのではないかと推察された.

すなわちこの点に着目すれば, 指標値 ρ 値によって, 真贋評価という定性的な評価を越えた, 傷み度合評価という定量的な評価まで踏み込める可能性を, 提案した信号処理技術は持ち合わせていると考えることもできる. Fig.4.23 は 4.5.2 節における診断実験の際に得られた, 真券の凹版印刷区間に対する ρ 値の度数分布を示した結果である. 流通に際しての擦れなどで凹版印刷の凹凸が摩耗・減少した, いわゆる傷みが進行した流通券では, 官封券に比較して ρ 値が小さな領域へ移行する傾向を確認できる.

そもそも指標値 ρ は凹版印刷による凹凸の存在を評価するために提案したものであるので, ρ 値の詳細に着目することによって, 従来はその実現性に関してあまり議論されることの無かった紙幣印刷面の摩耗すなわち傷み(劣化)度合評価を, 間接的に実現できる可能性も有している.

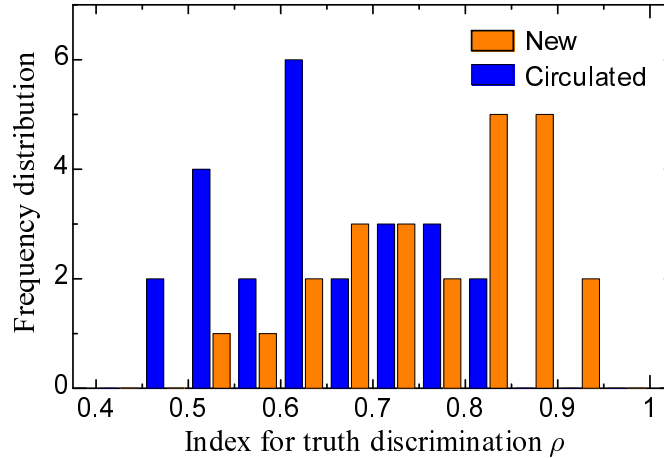


Fig. 4.23: Histogram of index ρ for intaglio print part of new and circulated notes in market

4.6 本章のまとめ

本章では、偏在型の診断波形をもつ診断対象として、光ファイバ触針走査による紙幣診断をケーススタディとして、計測波形中に生起した複数の診断波形から抽出できる波形特性を統合利用することに論点を置き、生起検出・情報分析のための信号処理技術を構築することについて議論した。はじめに光ファイバ触針走査装置によって獲得できる計測波形には、紙幣の印刷模様と表面凹凸という2種類の表面性状とそれぞれ相関をもった診断波形成分、すなわち低周波成分とスティックスリップ成分が生起していることを明らかにした。そして、それらの診断波形成分を個別に生起検出するため、低周波数成分から抽出できる情報を統合的に利用してスティックスリップ成分の生起検出のための処理機能について検討した。さらに情報分析処理においては、単独の診断波形成分からの分析では難しかった金種と真贋の同時評価を、情報の統合利用によって可能とした。すなわち紙幣の真贋・金種という定性評価を実現するための信号処理技術を構築し、実験的な検証を通して、実用に耐えうる十分な信号処理性能を確認するに至った。

第5章 コンクリート構造物の耐震診断における確定型波形の信号処理

本章では具体的な診断対象にマイクロ波レーダによるコンクリート中の鉄筋径診断を採り挙げ、確定型の診断波形を対象に情報分析処理へ重点を置き、定量評価を実現するための信号処理技術に関する議論を展開する。基本指針に診断波形の波形形状モデルを利用する姿勢は変わらず、情報分析処理としての逆問題の解法へ、波形形状モデルを拡張した先見的に得られる伝達特性を有効利用し、正確性の向上を図る。具体的にはコンクリート構造物中の鉄筋の位置・径・材質評価のための信号処理技術につき、評価値の精度が飛躍的に向上する信号処理技術を構築し、実際のコンクリート部材での検証実験を通して提案法の有効性を確認する。

5.1 診断波形形状への情報畳み込み

本節では、非定在性波形の特徴的性質の中から、情報分析処理における処理機能レベルとしての定量評価の実現へ影響を及ぼす性質について採り挙げ、具体的な診断波形例とともに確認をする。この議論を経ることで、診断波形形状への情報の畳み込みが情報分析の難易度を高めていることが明らかになるが、さらに情報分析における正確性を高めた信号処理技術を構築するための基本的指針についても明らかにしていく。なお本研究では診断波形形状へ情報が畳み込まれた非定在性の診断波形をもつ診断対象例として、マイクロ波レーダによるコンクリート中の鉄筋径診断を採り挙げることにし、その概要を併せて説明する。

5.1.1 波形形状への情報の畳み込みに起因した情報分析の難しさ

異常にともなって生起する診断波形には、多くの場合、診断対象の異常状態に関する情報が畳み込まれている。診断波形としての非定在性波形をみても、マクロな視点から見れば時間局所性をもって生起する一方で、ミクロな視点から見れば、その短時間の波形形状中に多くの情報が畳み込まれた形で現れている。

この情報の畳み込みという性質を端的に示されている具体的な診断波形と、それが問題となることを説明するための例として、Fig.5.1 に再掲したコンクリート壁面の剥離診断におけるハンマリング打撃音波形 [65] に改めて注目してみたい。なお Fig.5.2 には、ハ

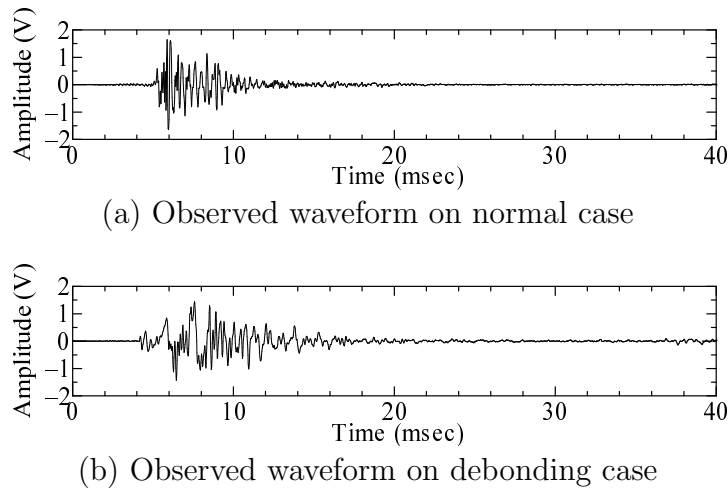


Fig. 5.1: Acoustic vibration waveforms on hammering test for debonding concrete wall (Redisplay)

ンマリングによる壁面剥離診断の様子も示した．この診断では，診断者が打診用ハンマ



Fig. 5.2: Appearance of hammering test for debonding concrete wall

で対象のコンクリート壁表面を叩き，その共振・共鳴音の微妙な変化を診断者自身が聞き分けることによって，剥離の有無に加えて，剥離の大きさや深さといった定量的な情報までの分析を実現する必要がある．診断には熟練の必要があることは一見するだけで察しが付き，自動診断への大きな期待が寄せられている分野であるともいえる．

ハンマリング音診断における診断波形形状へと目を移せば，信号波形の立ち上がりは背景雑音波形に比較して非常に急峻で，かつその波形形状も特異であることは判断できる．しかしハンマリング音は確定型波形と考えられるため，その生起検出はさほど難易度が高く無いと推測される．

しかし，波形形状と異常状態の関係性分析には，困難が付きまとう．熟練の診断者が診断を行えるからには，異常状態を分析するための何らかの情報が診断波形に畳み込まれているはずであるが，その情報を的確に分析することはなかなか難しいのが現状である．このような畳み込みが正確な情報分析を難しくしている大きな原因であり，本研究

5.1. 診断波形形状への情報量み込み

においても，このような現象に起因した情報分析精度の低下に関する問題を扱っていくことになる．

5.1.2 マイクロ波レーダによるコンクリート中の鉄筋径診断

マイクロ波レーダは，X線透過撮影による測定法 [66] や電磁誘導による測定法 [67] など他のコンクリート構造物の非破壊的な内部構造診断技術に比較して，深度の抽出精度が高い点や，金属物質以外への探査が可能な点，あるいはその扱いの容易さなどの点から，内部構造を視覚化するための技術としての長所を備えており，埋設物に関する定量的な情報分析の実現に対する期待も大きい．本研究では，耐震診断のためのマイクロ波レーダによるコンクリート構造物中の鉄筋径診断を，確定型の診断波形が生起する具体的な診断対象として採り挙げ，そのための信号処理技術の構築を試みる．

Fig.5.3 にはマイクロ波レーダによる鉄筋コンクリート構造物中の鉄筋位置測定 [68] を行った際の，レーダアンテナの受信波形を示した．また実際のアンテナ走査の様子を，

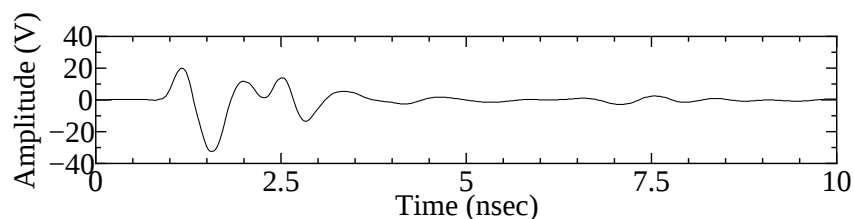


Fig. 5.3: Observed microwave for buried pipe in concrete wall

Fig.5.4 に示した．診断対象となるコンクリート構造物の表面に対して，マイクロ波の送



Fig. 5.4: Appearance of microwave radar survey

信を繰り返しながらレーダアンテナを走査させ，埋設物からの反射波を受信することによって物体の有無，さらにはその埋設位置・深度などを分析する．

このマイクロ波レーダによる鉄筋径診断における診断波形と考えられる Fig.5.3 の波形は，コンクリート部材中の鉄筋からの反射波形が受信されたものである．2.5ns 付近にみ

られる波形が鉄筋からの反射波形であるが、マイクロ波レーダの反射波形はその生起位相が限定されるので確定型波形として扱うことができ、やはりその生起検出は相対的に容易であると考えられる。しかしながら、反射波形には反射時刻に関する情報が畳み込まれているにもかかわらず、反射波形形状の時間軸方向への拡がりが原因で、鉄筋が埋設された深度に対応する反射時刻はただ1つであるのに対し、鉄筋表面での反射時刻が正確に定められない。すなわち、鉄筋の深度に関する正確な情報を分析することが困難となっている。また反射波形形状には埋設物の電気特性に関する情報が畳み込まれているにもかかわらず、その分析も容易ではない。情報分析処理においては定量的な情報評価を実現すべき診断対象でありながらも、このような状況は、それを難しくしている理由そのものに他ならない。

5.1.3 情報分析処理を実現するための信号処理の基本的アプローチ

生起検出対象が確定型波形となるために、比較的選択性の低い処理であっても、生起検出処理の実現可能性は高い。一方で情報分析処理に関しては、その伝達特性が既知であることから、診断対象の状態を評価できる定量的な分析値まで踏み込んだ詳細な分析を実現すべき必要があり、情報分析処理としては最も難易度の高い機能が要求されることになる。

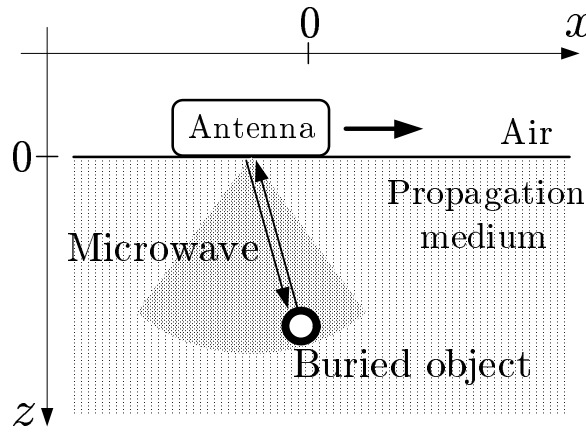
第4章での議論も踏まえれば、検出済の診断波形からさらに(多数の)波形特性を抽出して統合利用することも、波形パラメータ値から定性値まで分析の正確性を高めることへとつながるものの、複数の情報を獲得するにも往々にして限界がある。一方で、これまでの計測機器の高性能化といった正確性を高めるアプローチは、効率性という観点から異常診断との整合性を損なうとも考えられ、本研究では先見的な伝達特性を有効利用した定量評価技術について検討を進める。すなわち、先見知識として得られている、診断対象の異常状態によって生じる物理現象がモデル化された伝達特性を情報分析のための逆問題解法へ組み込むことにより、正確性を高めた分析値の獲得を試みていく。

5.2 マイクロ波レーダによる内部構造診断法

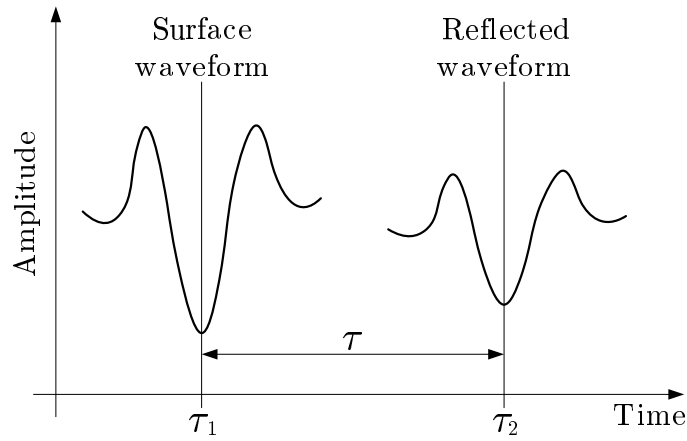
5.2.1 マイクロ波レーダによる埋設物探査原理

マイクロ波レーダの計測波形は、Fig.5.5に示すようにアンテナ内部の送信器から発信されたマイクロ波について、送信器から受信器へ直接伝搬する波(直達波)および構造物表面における反射波とが重なり合った表面波、および伝搬媒質とは電気的特性の異なる埋設物表面における反射波とが、伝搬時間差 τ だけの隔たりをもって、受信器において獲得された波形となる。追って詳細に議論することになるが、この反射波形が診断における診断波形に他ならないことを付け加えておく。

5.2. マイクロ波レーダによる内部構造診断法



(a) Schematic view of antenna survey



(b) Propagation time τ on observed wave

Fig. 5.5: Principle of internal construction estimation by using microwave radar

いま送受信器が同位置にあることと，それらが超指向特性をもつことの2つが仮定されれば，伝搬媒質中のマイクロ波伝搬速度を v として，埋設物までの距離 D は (5.1) 式によって抽出することができる．

$$D = \frac{v\tau}{2} \quad (5.1)$$

全診断領域に渡ってマイクロ波アンテナを走査させながら，このような埋設距離抽出を繰り返した結果を統合して，構造物内部の断面の様子が視覚化されていく．

5.2.2 レーダ画像による内部構造情報の表示

構造物の内部状態を診断するために使用する最も基本的な断面画像であるマイクロ波レーダ画像は，獲得された診断波形の振幅値を濃淡情報に変換して計測順に並べて得られる，いわゆる B-mode 画像に当たる．

Fig.5.6-(b) は，Fig.5.6-(a) に示した埋設物配置をもったコンクリート試験体に対し獲得された，マイクロ波レーダ画像の一例である．およそ鉄筋の位置と一致する埋設物像

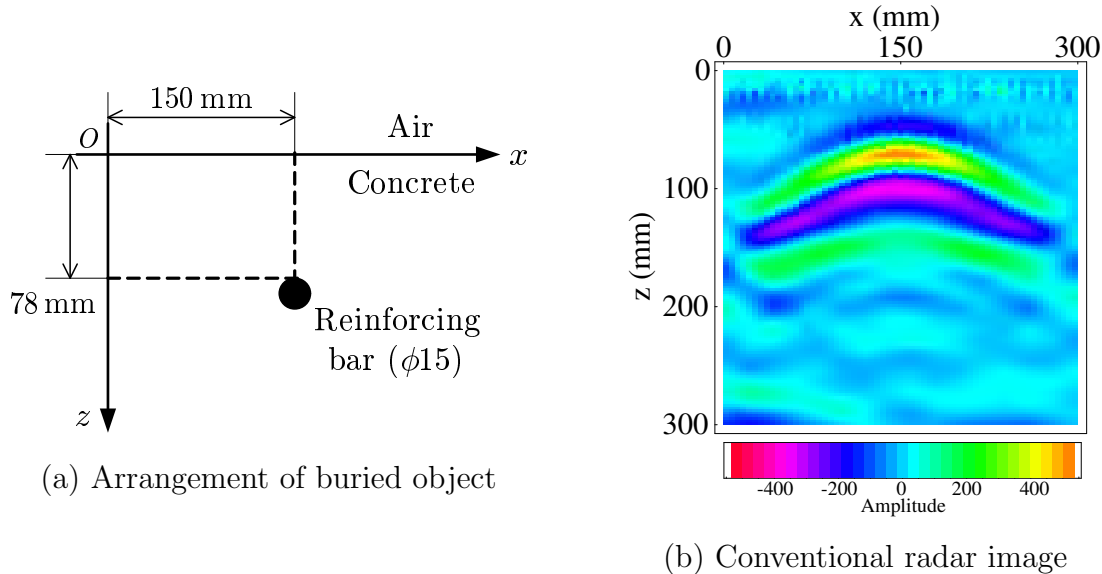


Fig. 5.6: Example of conventional radar image

が出現し，埋設物が存在することまでは確認可能である．しかしながら，逆投影された像の時間的・空間的な拡がりによって，埋設物の径あるいは形状といった詳細な情報まで分析することは非常に困難な状況にあり，レーダ画像は内部構造診断のための材料として必ずしも十分といえないのが現状である．

5.2.3 埋設物の情報分析に関する現状

マイクロ波レーダによる，埋設物の詳細情報を分析するためのアプローチは，2種類に大別される．そのひとつは，診断波形に対してモデルマッチングを図ることで，埋設物の最適な径や深さといった性状情報を推定する方法である．このための方法として，例えばマイクロ波の伝搬経路モデルに基づくモデル観測波と実観測波とのマッチングによって鉄筋（小径な金属棒）の深度・径を高精度に測定する方法 [69] が田中らによって提案されてきており，精度の高い径評価技術が実現する可能性もある．

もう一方のアプローチは，断面画像の精度の向上，すなわちマイクロ波レーダ画像の時間的・空間的な像の拡がりを抑制し，さらにその断面像から径や位置を評価する方法である．このようなアプローチに基づく信号処理技術はこれまでにいくつかの方法が示されてきており，例えば合成開口法 [70] もその実現に向けたひとつの技術として数えることも可能であるが，十分な分析精度を獲得しているとは言い難いのが現状である．

5.3 確定型波形のための生起検出処理

診断波形としてみれば，マイクロ波レーダの反射波は確定型波形と考えられ，ここで議論する相互相関包絡線法は，そのための検出技術として整理することができる．

第3章・第4章でも議論してきたように，診断波形の波形形状モデルを信号処理へ利用することは，波形形状に特殊性をもつ診断波形に対する生起検出あるいはそこからの情報分析を容易化することへ貢献してきた．相互相関包絡線法もそのような考え方を根底に据えた検出技術のひとつの例であり，波形形状モデルの一形態と考えられる伝達関数モデルを基にした予測反射波形と計測波形のマッチングを行い，診断波形としての反射波形の生起検出を試みた方法と解釈することができる．

確定型波形の生起検出技術には，診断波形の確定性から，相対的にみて局在型波形のための全域的な検出あるいは遍在型波形のための規則情報を統合した検出ほどの選択性が要求されないことを議論してきた．しかし実際には，選択性が不足しているケース，マイクロ波レーダに当てはめて具体的に述べれば，表面波との干渉によって十分な生起検出が達成されていない場合も見受けられる．そこで，相互相関包絡線法へ表面波成分の差分処理をさらに付加することによって，マイクロ波レーダにおける診断波形の生起検出性能を向上する方法についてさらに検討を進める．

5.3.1 生起検出のための相互相関包絡線法

相互相関包絡線法では，広義の波形形状モデルとして，送受信器特性・電波伝搬特性・埋設物表面の境界散乱特性を考慮に入れたマイクロ波レーダの伝達関数モデルが導入される．そして，計測波形に対するモデル適応度 [96] を算出することによって，診断波形である埋設物反射面での反射波の生起を検出すると同時に，5.4 節で詳述することになるが，埋設距離および材質の抽出にそれぞれ利用される反射面での反射時刻と反射位相までを一意に同定可能な信号処理技術である．

マイクロ波レーダの送信波形は一般にメキシカンハット型の形状であり，これはすなわち表面波あるいは反射波の波形形状も同様であることを意味しており，反射時刻を一意に同定することが難しい．そこでいま表面波 $u(t)$ を診断対象への入力波形と考え，診断対象の伝達関数から求まる予測反射波形 $s'(t)$ と計測波形 $s(t)$ に関する2乗誤差を，伝搬時間 τ の関数 $I(\tau)$ と捉える．このとき $I(\tau)$ は $s(t)$ と $s'(t)$ の相違度を意味しており，その値を最小化する伝達関数は，伝搬時間 τ を定めれば解析的に導くことが可能である [71]．

そこでさらに，モデル適応度 $O(\tau)$ を計測波形 $s(t)$ と予測反射波形 $s'(t)$ の一致度として，

$$O^2(\tau) = 1 - \frac{I(\tau)}{\|s(t)\|^2} \quad (5.2)$$

によって定義する．モデル適応度はその規格化相互相関関数の包絡線に基づく指標であるため， $s(t)$ と $s'(t)$ の波形形状が一致する埋設物表面を反射時刻とするときに最大とな

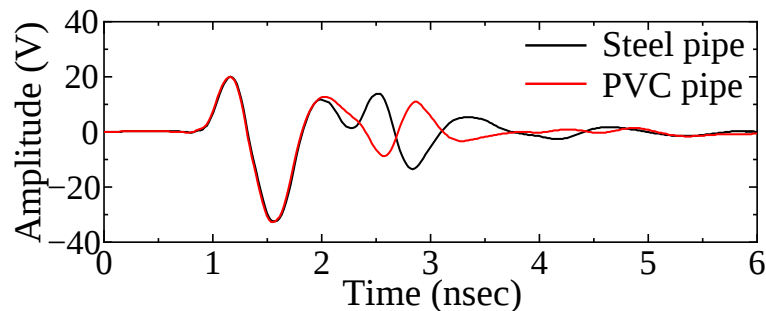
り，かつ単峰な頂点をもつことになる．

すなわち，反射波形の生起がモデル適応度に単峰の頂点を生起させるので，単峰の生起を検出することが診断波形としての反射波形の生起検出処理に相当してくる．同時に，単峰のピークが埋設物表面での反射時刻となるが，反射波そのものを利用する場合に比較して，次段の情報分析処理における反射時刻抽出精度の向上を見込むことができる．なおこの伝達関数モデルあるいはそこから求まる予測反射波形が，信号処理における波形形状モデルとして機能していることには注意されたい．

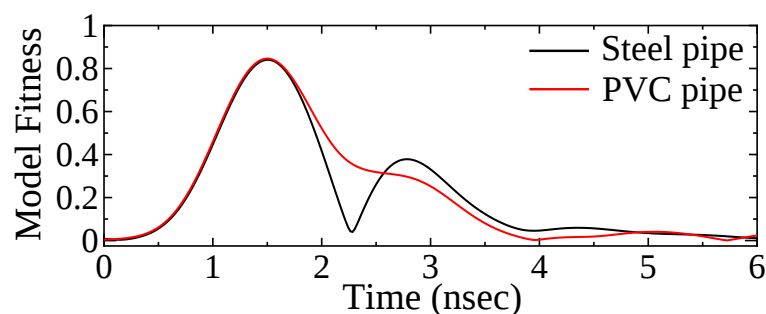
5.3.2 波形干渉による選択性の低下

コンクリート構造物を構成する部材の中でも，特に壁や床などでは，比較的低深度な表面近くに鉄筋や配管が埋設されていることも多い．その場合には，計測波形中で表面波形と反射波形が互いに干渉し合い，診断波形としての反射波形の生起検出が困難になってしまうケースが実際にある．

Fig.5.7 は，コンクリート構造物中の比較的低深度に埋設された鉄管（深さ=71mm，直径=35mm）とPVC(PolyVinyl Chloride) 樹脂管（深さ=78mm，直径=32mm）に対して獲得された，計測波形と，それらに対するモデル適応度の算出例を示した．埋設物が低深



(a) Observed waveforms



(b) Calculated model-fitness

Fig. 5.7: Observed waveforms including diagnostic waveform and their model-fitness with buried objects near concrete surface

度に位置することで，表面波形が十分に減衰し終わる前に反射波形が観測されて干渉し

5.3. 確定型波形のための生起検出処理

合い、互いの波形形状が変化してしまっているようすを確認できる。

モデル適応度にはこの干渉の影響が深刻に現れており、表面波形に対するそのピークは明確であるのに対し、特にPVC管では反射波形に対応する明瞭なピークを確認することができなく、すなわち診断波形としての反射波波形の生起検出が困難な状況へと陥っている。実際のコンクリート構造物では埋設深度がさらに浅い場合も数多く、このことがマイクロ波レーダによるコンクリート構造物内部診断における問題点のひとつとなっている。

5.3.3 波形形状モデルを利用した干渉抑制技術

5.3.3.1 干渉を抑制するための差分処理

マイクロ波レーダの計測波形中にみられる表面波形は、送信器から受信器への直達波形とコンクリート表面からの反射波形が支配的である。これは地中探査などへの応用[95]の場合とは大きく性質が異なり、コンクリート部材の表面形状や組成あるいはアンテナとコンクリート部材表面間の距離に劇的な変化を生じなければ計測波形中には観測点によらずほぼ同一の表面波形が含まれることを意味している。この性質を積極的に利用し、計測波形から表面波形成分の波形形状を直接差し引き、その影響を抑制する[72]ことも多い。

相互相関包絡線法に対しても同様の考え方を応用して表面波形との干渉の影響を抑制し、反射波形の生起検出性能の向上、ひいては反射時刻の同定精度を向上させることを検討する。具体的には、計測波形の一部分から同定される表面波形を規範的な波形形状モデルとして扱い、全計測波形からその波形形状モデルを差し引く。

5.3.3.2 波形形状モデルの同定

差し引く表面波形の波形形状モデルは、埋設物からの反射の影響を極力受けていないことが望ましい。そこで埋設物の存在しない観測点で獲得された計測波形から、全ての観測点における表面波形の規範となる波形成分を抽出する。このような方法では抽出区間の選定が問題となるが、ここではモデル適応度を利用して区間選定を行なう。これは、信号波形の振幅の大小を判断する指標として、モデル適応度値は波形の位相変化に依存せずに判断でき、都合が良いためである。

Fig.5.8は、周囲に埋設物の存在しない観測点で予め得られた計測波形と、そのモデル適応度の例を示した結果である。埋設物等からの反射が存在しないため、モデル適応度がはじめに極大値を取った時刻以降で単調減少している区間は、単純に表面波形が減衰しているものと考えられる。そこで、時刻0から極大値を取る時刻を過ぎてその減少が収束するまでの区間(0~3.5ns)に対応する計測波形を、ここでは規範的な表面波形の波形形状モデルとして抽出することとする。

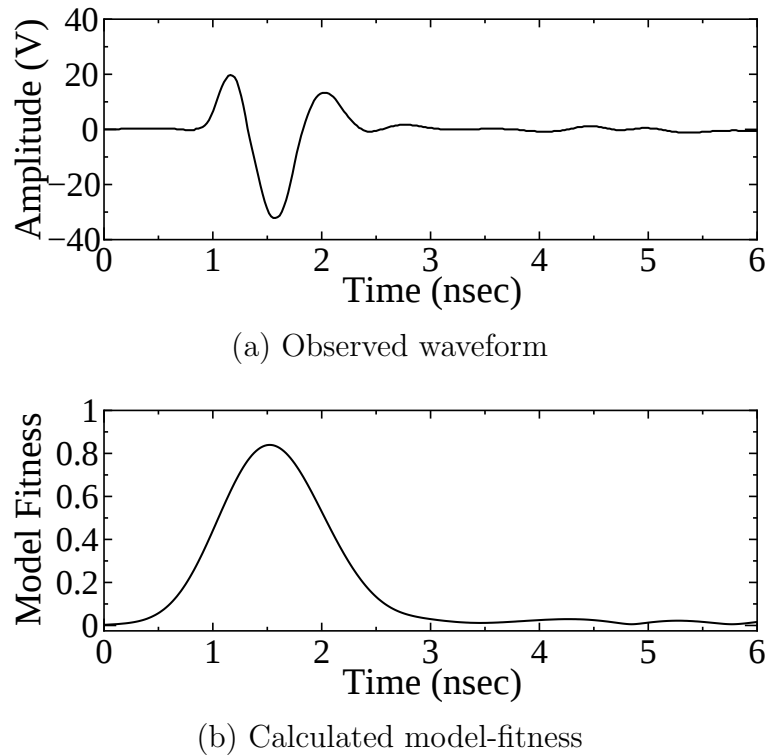


Fig. 5.8: Observed waveforms including diagnostic waveform and its model fitness without buried objects

5.3.3.3 選択性向上効果の確認

計測波形から波形形状モデルを差し引いた結果として、Fig.5.7 に示した診断波形に対する表面波形の波形形状モデル差し引き後の計測波形と、そのモデル適応度を Fig.5.9 に示した。1.5ns 付近の波形には、差し引きによっても除去し切れていない表面波形成分が僅かに残るが、その振幅は埋設物からの反射波形に比較して十分に低いレベルまで抑制されている。すなわち診断波形としての反射波形の波形形状は正確に認識できると同時に、波形レベルでも鉄とPVCでは反射波形の位相に変化を生じていることが鮮明である。

またモデル適応度に目をやれば、反射波形に対する成分が支配的となっていることを確認でき、最大の極大値も埋設物の反射面付近に得られ、生起検出技術としての性能向上は明白である。

5.4 診断対象の定量評価のための先見的伝達特性を利用するアプローチ

5.4.1 相互相関包絡線法による伝搬時間・反射位相の抽出

相互相関包絡線法の導入により、反射波形はその反射時刻をピークとする単峰な形状をもつモデル適応度へと変換される。したがって、埋設物の深度を結滞するためのマイ

5.4. 診断対象の定量評価のための先見的伝達特性を利用するアプローチ

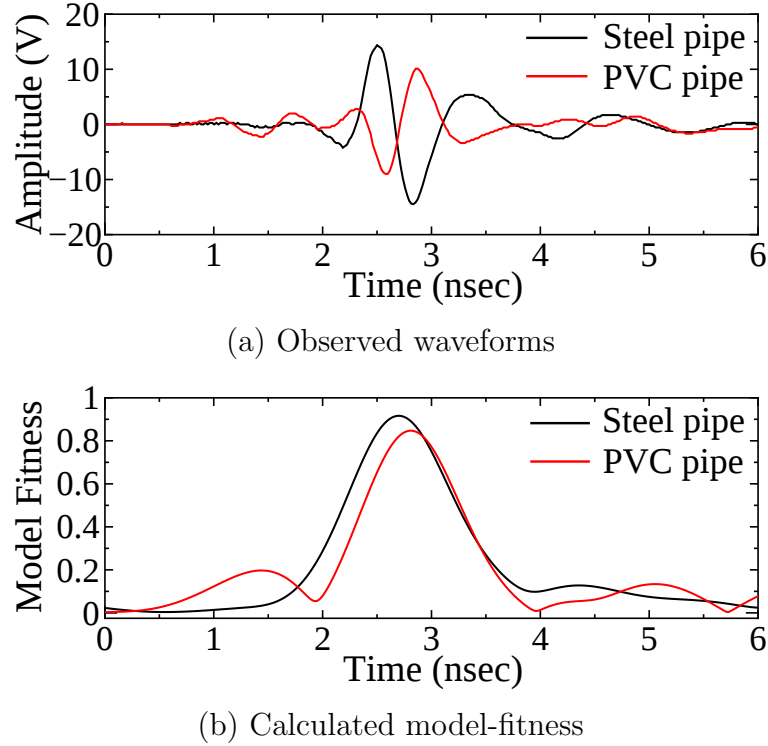


Fig. 5.9: Observed waveforms including diagnostic waveform and their model-fitness after nominal surface wave model subtraction

クロ波の伝搬時間は、表面波形と反射波形に関する各モデル適応度のピーク間時間を抽出すればよいことになる。なお実際の抽出に際しては、表面波形の波形形状モデル差し引き処理によって、表面波形と反射波形に対するモデル適応度が同一データ上に現れることは無くなるため、差し引き前の診断波形に対するモデル適応度から表面波に対応するピーク時刻を別途あらかじめ同定しておき、伝搬時間差抽出へと利用する。

一方、モデル適応度を導出する過程において解析的に求められる伝達関数について、その実部係数 $\hat{\Gamma}_{Re}(\tau)$ と虚部係数 $\hat{\Gamma}_{Im}(\tau)$ を用いると、反射位相 $P(\tau)$ が (5.3) 式によって定義することができる。

$$P(\tau) = \tan^{-1} \left\{ \frac{\hat{\Gamma}'_{Im}(\tau)}{\hat{\Gamma}'_{Re}(\tau)} \right\} \quad (5.3)$$

反射位相は複素反射係数に対応しており、その値には反射係数としての符号情報が含まれると同時に、反射係数同様に伝搬媒質と埋設物間の誘電率、透磁率、導電率の違いを反映する。すなわち、媒質が同一であるという条件下へ限定すれば、反射位相値の変化には埋設物ごとの電気的特性の相違が現れる。その電気的特性の違いに応じた反射係数の符号変化が、金属・非金属埋設物の材質評価へと利用できることはよく知られたとおりであるが、反射係数の符号情報まで包含した形の反射位相値の違いに着目すれば、材質評価をより詳細に実現できる可能性がある [129]。

このように相互相関包絡線法の導入は、埋設物表面に対応する反射時刻の抽出が高精度化・容易化されることは無論のこと、反射時刻の抽出精度の悪化に連鎖して低下して

いた反射位相の抽出精度も向上するため，材質評価もより有効に機能することが期待される．

5.4.2 逆投影ヒストグラム法による境界面像再構成

内部断面画像の再構成を実現するために導入する逆投影ヒストグラム法は，加法型重ね合せ処理に基づいた開口合成法 [70] と同じく，再構成される断面画像の正確性を高めることにその狙いがある．診断波形より相互相関包絡線法によって獲得された伝搬時間情報を伝達特性に基づいて逆投影し，それらの値を複数重ね合わせて画像を再構成するというアプローチを採る．この点では開口合成法と大きな違いはないが，加法型重ね合せ処理のみの開口合成法に比較して，乗法型重ね合せ処理を追加して再構成画像の水平分解能を高める点に逆投影ヒストグラム法のひとつの特徴がある．

5.4.2.1 境界面画像の再構成方法

いま，探査対象領域中の点 r の画像を再構成することを考えていく．診断波形からは埋設物の存在方向に関する情報は得られないため，Fig.5.10 に示したように i 番目の観測点 r_i における計測波形から，(5.4) 式にしたがって，最初に埋設物有無の信頼度として観測点 i におけるモデル適応度値 $O_i(r)$ を逆投影画像値 $B_i(r)$ へ付値する．

$$B_i(r) = O_i \left(\frac{2|r - r_i|}{v} \right) \quad (5.4)$$

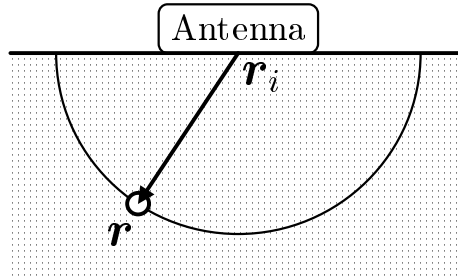


Fig. 5.10: Schematic view of back projection for observed wave

続いて Fig.5.11 に示すように，アンテナの開口長を考慮に入れて選択される点 r からの反射波形が観測可能な N 個の観測点中で，連続する M 個の点に関する初期画像を (5.5) 式の乗法型重ね合せ処理によって重ね合わせ，中間画像 $G_j(r)$ を獲得する．

$$G_j(r) = \left[\prod_{i=j}^{j+M-1} B_i(r) \right]^{1/M} \quad (j = 1, 2, \dots, N - M + 1) \quad (5.5)$$

5.4. 診断対象の定量評価のための先見的伝達特性を利用するアプローチ

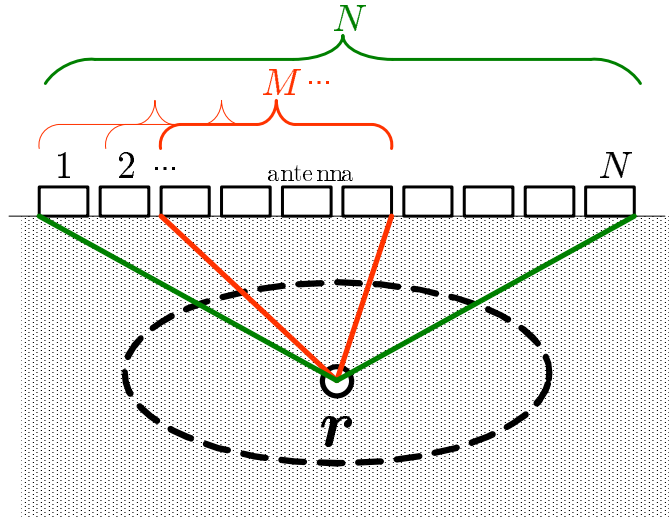


Fig. 5.11: Schematic view of observed points selection on back projection histogram method

最後に、中間画像に対して (5.6) 式にしたがって加法型の重ね合せ処理を施し、逆投影ヒストグラム画像 $\mathcal{I}(r)$ を順次獲得し、最終的な画素値 $\mathcal{I}(r)$ とする。

$$\mathcal{I}(r) = \frac{1}{N - M + 1} \sum_{j=1}^{N-M+1} \mathcal{G}_j(r) \quad (5.6)$$

5.4.2.2 重ね合わせ処理の効果

共通部分抽出型であるの乗法型重ね合せ処理では、同一対象からの反射波形を観測可能な近接する M 個の観測点グループによる $\mathcal{B}_i(r)$ へ適用し、像の拡がりを抑制して水平分解能を向上させる。また共通部分強調型である加法型重ね合せ処理では、再構成点 r からの開口幅内に属す N 個の観測点グループ内から得られた $\mathcal{G}_j(r)$ に適用し、再構成画像の SN 比を高める。

なおパラメータ M, N は、対象点の深度、送受信アンテナの指向特性などを考慮に入れてあらかじめ選定されるパラメータであり、特に M を大きくすることで共通部分が限定され、再構成断面画像の水平分解能が向上する。

5.4.2.3 再構成境界面画像における垂直分解能

開口合成法あるいは逆投影ヒストグラム法などに代表される、逆投影の考え方に基づいた断面画像の再構成法では、診断対象となる埋設物への距離・方向を考慮に入れた逆投影と、それら逆投影された情報を複数重ね合わせることで水平分解能が向上する。しかしながら逆投影をする際に、診断波形がもっている時間軸方向への情報

の拡がり再構成される境界面像を垂直方向へ拡がらせてしまう原因となり、結果として垂直分解能の低下を招くこととなる。

Fig.5.12は、先にFig.5.9に例を示した表面波の波形形状モデルを差し引き後の計測波形に対するモデル適応度を獲得された全計測波形に関して算出し、逆投影ヒストグラム法によって、それらから内部断面画像(逆投影ヒストグラム画像)を再構成した結果である。同図中の点線は実際の埋設物の位置および形状を表しており、再構成された境界面

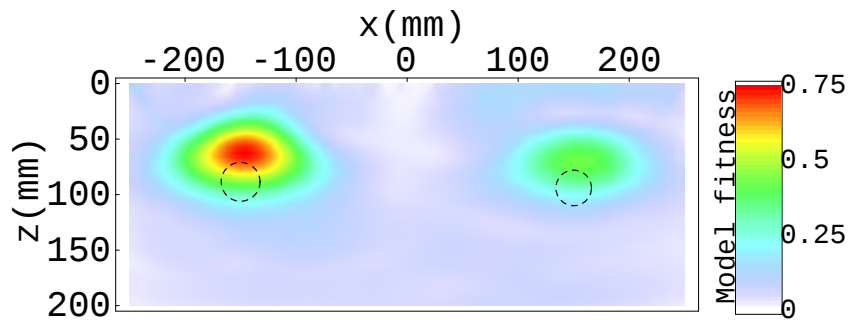


Fig. 5.12: Reconstructed back projection histogram images of buried objects near concrete surface (Dotted lines represent actual positions of buried objects)

像は特に垂直方向に対して顕著に拡散し、これはモデル適応度によるレーダ画像の拡散と大差ないレベルにある。Fig.5.9で見てきたように、波形形状モデルを差し引いた後に算出されたモデル適応度の段階では正確に生起が検出され、さらには反射時刻情報が精度よく抽出できる単峰形状としてモデル適応度が算出されているにもかかわらず、内部断面画像再構成の段階ではその正確な伝搬時間情報が十分に活用されず、埋設物の正確な位置・形状を評価することは難しいままである。

計測波形における診断波形の生起時刻、すなわち反射時刻の抽出精度自体は、モデル適応度の単峰性を利用することで飛躍的に高めることが可能となった。しかしながら、時間的な拡散性をもつ表面波形との規格化相互相関関数の包絡線であるモデル適応度では原理的に自身の時間軸方向への拡がり抑制できない。このことが再構成される断面画像の垂直分解能を低下させる要因になってしまっており、対象物のサイズに比較して、再構成される情報であるモデル適応度の時間軸方向に関する拡散性が無視できないといえる。

5.4.3 先見的伝達特性を利用する境界面像の鮮鋭化

5.4.3.1 先見的伝達特性を利用することの意義

前節で見てきたように、モデル適応度を利用した境界面像の再構成においては、伝搬時間情報であるモデル適応度の時間軸方向に関する拡散性が原因となり、分解能の高い埋設物像を獲得することが難しくなっている。この拡散性をもつ理由は、使用するマイ

5.4. 診断対象の定量評価のための先見的伝達特性を利用するアプローチ

クロ波レーダ自身から送信されるマイクロ波波形がもつ時間的な拡がりが直接的な原因である。

したがって、その分解能を高めるためのアプローチとしては、使用するマイクロ波アンテナの性能を向上させて診断波形の精度そのものを高めて対応する場合や、あるいは画像処理における超解像のように、使用デバイスの性能はそのままに高度な信号処理技術を組み合わせて実現することを考え得る。しかしながら、本研究における診断のための信号処理技術におけるひとつの目的である信号処理の効率化のためには、できるだけ簡易なデバイスと簡易な信号処理アルゴリズムによってその機能の実現を考えなければならない。ここでは、先見情報としての伝達特性を効果的に利用する信号処理技術について検討を行い、境界面像を簡易に鮮鋭化することを試みる。

具体的には、本来であれば使用デバイスの高性能化や超解像信号処理などによって獲得すべき情報を、先見情報を基にした物理的な因果関係を利用し、最適化された診断波形として獲得された診断波形と置換するものである。発生している異常現象に関する伝達特性的な先見情報をもたない場合には、この操作は実現することができないが、この場合には信号処理技術あるいは使用デバイスの性能向上をもって対応していく必要がある。しかし物理的因果関係に関する先見情報をもつ場合には、最適な診断波形を推定できる可能性があり、このような思想に基づく評価値の鮮鋭化について検討していく意味がある。

5.4.3.2 境界面モデル適応度の導入

モデル適応度に対して逆投影法を適用し、埋設物境界面像を再構成することを考えた場合には、逆投影の対象であるモデル適応度中で重要となる情報は、マイクロ波の反射時刻(=埋設距離)情報および埋設物境界面における反射強度および反射位相の3つの項目にあり、それ以外の情報に対しての必要性は薄い。この点に注目して、モデル適応度の時間軸方向に関する拡散性を制限して埋設物境界面のみを表現できるような最適化された波形形状モデルを導入し、ひいては拡がりを抑制した垂直分解能の高い再構成境界断面画像を獲得するための方法について検討する。

そもそも理想的なマイクロ波レーダの送信波形はインパルス状であるべきであるが、実際にはハードウェア的な制約から実現は難しい。しかしながら、マイクロ波信号に対するコンクリート構造物中の埋設物の伝達特性は減衰・位相遅れ・無駄時間の3要素からなる伝達関数として表されるので、仮想的なインパルス応答波形すなわちインパルス状のレーダ送信波形に対する反射波形を推定することは可能と考えられる。そこで、境界面のみを表現できると考えられる仮想的なインパルス応答波形を伝達関数の逆ラプラス変換により求め、最適化が施されたモデル適応度として置換し、逆投影ヒストグラム法へ適用することを考える。

実際には処理の効率性を考慮し、反射時刻情報と反射強度情報、すなわち元々のモデル適応度が極大をとる時刻とその極大値を保持した、インパルス形状を模擬したピーク

列波形へとモデル適応度を単純化することによって，仮想的なインパルス応答波形を獲得する．これは，境界面におけるマイクロ波の反射という物理的現象をとらえたときに，その反射時刻はただ一意に決まらなければならないという事実に着目したとも考えることができる．本来のモデル適応度と，このような先見的伝達特性を利用して獲得される仮想インパルス応答波形としてのピーク列波形の関係を模式的に示したものが，Fig.5.13である．

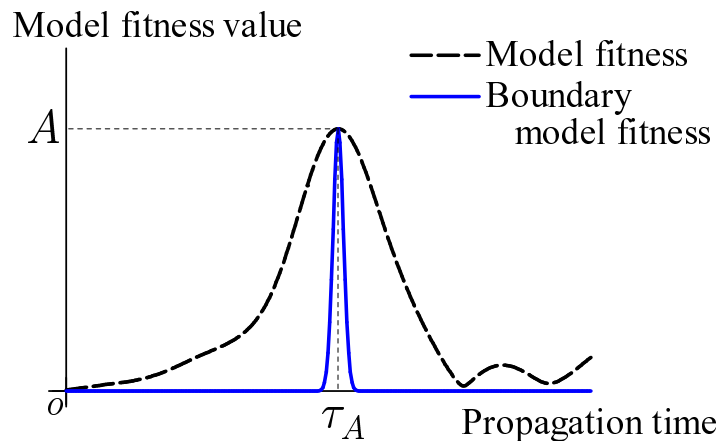


Fig. 5.13: Schematic view of boundary model fitness

境界断面画像を再構成する際に重要となる情報，すなわちモデル適応度の極大値 A とその時刻 τ_A のみを同定し， A を埋設物反射面における反射強度， τ_A を埋設物反射面における反射時刻として保持する．そして，時刻 τ_A において極大値 A をもち，かつ本来のモデル適応度に比較して時間的な拡がり非常に小さい，数学的に記述すれば分散の非常に小さな正規分布波形へとモデル適応度を置換して時間軸方向への拡がりを制限することで，境界面のみが表現された仮想インパルス応答波形とする．

この仮想インパルス応答波形は埋設物の境界面を表現することに着目した最適化処理を施すという観点から，新たなモデル適応度として「境界面モデル適応度」という名称を与えることとする．境界面モデル適応度に対して逆投影ヒストグラム法による重ね合わせ処理を施して獲得できる逆投影画像では，埋設物の再構成内部断面画像の鮮鋭化が期待できる．

Fig.5.14 には，実際の診断波形から算出されたモデル適応度，およびそれを基に算出した境界面モデル適応度の例を示した．境界面モデル適応度では，正規分布波形の分散値 σ^2 に任意性が残り，それによって時間軸方向の拡がりを定めることになる．すなわち， σ^2 を小さくすれば再構成される境界面像の垂直分解能が向上する方向に作用し，埋設物境界面の評価精度は高まる．しかし小さくし過ぎると波形間の共通部分が減少し，僅かなノイズなどの影響によっても境界面像が再構成できなくなる可能性もあり，要求される埋設物形状の評価精度や測定環境に起因するノイズの大きさなどを考慮して，その値の選定には慎重を期する必要がある．

5.4. 診断対象の定量評価のための先見的伝達特性を利用するアプローチ

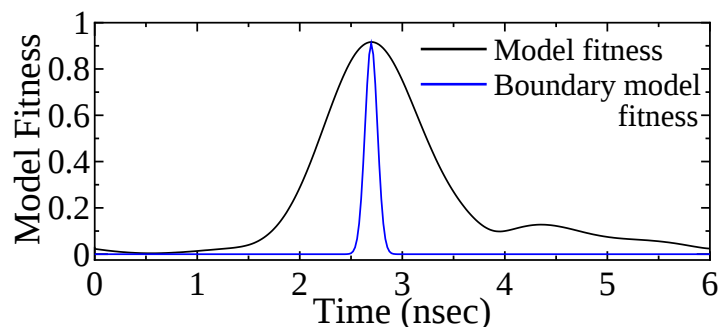


Fig. 5.14: An example of boundary model fitness

5.4.3.3 境界逆投影ヒストグラム画像の獲得

境界面モデル適応度から内部断面画像を再構成するための画像処理法には、モデル適応度の場合と同じく、逆投影ヒストグラム法を適用することが可能である。境界面モデル適応度の導入による内部断面画像の鮮鋭化効果について検証するため、先に Fig.5.9 に例を示した表面波の波形形状モデル差し引き後の診断波形から得られたモデル適応度を境界面モデル適応度へと変換した後に、逆投影ヒストグラム法へ適用して内部断面画像を算出した。このようにして獲得された画像を、Fig.5.15 に示す。

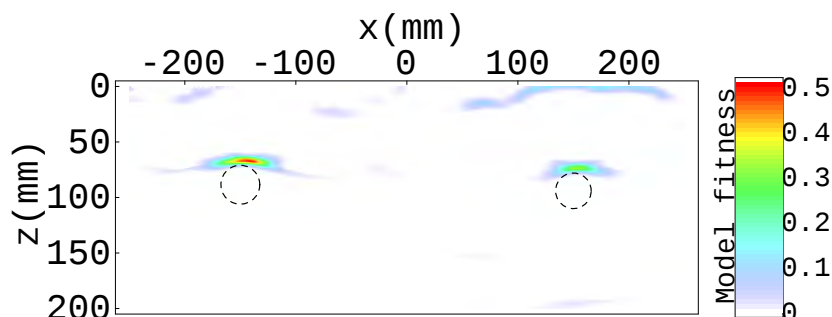


Fig. 5.15: Reconstructed back projection histogram images by using boundary model fitness (Dotted lines represent actual positions of buried objects)

先に Fig.5.12 に示したように、モデル適応度を利用して再構成された内部断面画像 (逆投影ヒストグラム画像) では境界面像が拡散し、埋設物の位置を正確に評価することが難しかった。しかし、境界面モデル適応度を利用して再構成される内部断面画像では境界面像は大幅に鮮鋭化され、より正確な埋設物の情報分析の実現へ向け、その潜在能力に期待がもてる。また再構成された境界面像の形状に注目しても、境界面モデル適応度に基づいた内部断面画像では画素値の大きな領域がおよそ埋設物の上側面に沿った形状に再構成されていることも確認でき、その鮮鋭化効果は大きいことを確認した。

なお以降では、境界面モデル適応度の再構成によって獲得された内部断面画像を「境界逆投影ヒストグラム画像」と呼び、逆投影された対象を明確化することとする。

5.4.4 境界面像に基づいた埋設物の定量評価

5.4.4.1 埋設物の位置・径の評価

境界逆投影ヒストグラム画像では，埋設物の境界面像は従来に比較して大幅に鮮鋭化される．コンクリート構造物中の主要な埋設物である鉄筋・配管などでは，各埋設物に対し再構成される境界面像は，Fig.5.15 で見てきたように半円弧状を描くようになり，さらに境界面像に対して形状マッチングなどの手法を応用すれば，管状埋設物の位置や形状の評価を実現できる可能性も期待できる．

そこで境界面像を円周の一部とみなして径と中心を同定し，埋設物の位置・径の評価を実現することについて検討する．具体的な方法として，今回は一般化ハフ変換を適用した円検出法 [73] を応用し，境界面像の同定を試みた．その手順は以下のとおりである．いま，再構成された埋設物境界面像を成している，ある一画素の座標を $r_k = (x_k, z_k)$ ，その画素値を $I(r_k)$ とすると，点 r_k を通過する円の候補は， (c_x, c_z) を円の中心座標， γ をその半径として，

$$(x_k - c_x)^2 + (z_k - c_z)^2 - \gamma^2 = 0 \quad (5.7)$$

によって記述することができる．そこで，(5.7) 式によって規定される曲面を， c_x, c_z および γ 軸から構成されたハフ空間へ描画し，その曲面上に位置する全ての点に対し，信頼度としての画素値 $I(r_k)$ の重みを付けた票を投じる．

ひとつの埋設物に関する境界面像を成している全画素に対してこのような重み付き投票を繰り返したとき，ハフ空間内で最も大きな投票値を得た点 $(\hat{c}_x, \hat{c}_z, \hat{\gamma})$ が，境界面像を円弧とみなした際に最適な同定パラメータ値が表されることになる．このとき埋設物の直径は $2\hat{\gamma}$ であり，またその埋設位置としての頂点座標は $(\hat{c}_x, \hat{c}_z + \hat{\gamma})$ と幾何学的に評価することができる．

本方法は，画素値分の重み付けをしながらハフ空間への投票を繰り返すことによって，境界逆投影ヒストグラム画像中の境界面像を構成している画素の信頼性を考慮に入れた評価方法となっている点に特徴がある．なお，このような投票による多数決を経て径を推定するために，少なくとも2画素以上から構成される境界面像が推定には必須であるが，その信頼性を考慮するならば「埋設物の径 $\gg$ メッシュの刻み」となることが望ましいと考えられる．逆に逆投影ヒストグラム画像におけるメッシュ刻みを限りなく0まで近づけていくことができれば，原理的には全ての埋設物に対する径推定が可能となる．

5.4.4.2 埋設物の材質評価

これまでも述べてきたように，埋設物の材質評価を実現するために，反射位相値に着目する．計測波形から表面波形を取り除いて表面波形と反射波形の干渉を抑制するため，波形形状モデルの差分処理を導入することによって，各計測波形における反射時刻の抽出精度が向上すれば，それにとまって境界面における反射位相値抽出の精度も大

5.5. 診断実験: コンクリート構造物の内部診断

きく改善する．そこで，境界逆投影ヒストグラム画像において獲得される境界面像の位置と，各計測波形に対するモデル適応度および反射位相値を統合的に利用し，埋設物の材質評価を実現する．

はじめに，境界逆投影ヒストグラム画像において境界面像が獲得された点 (x_b, z_b) の直上に位置する観測点として $(x_b, 0)$ を考える．そして，その計測波形によるモデル適応度から抽出された反射時刻 τ_b を反射位相値算出のための時刻情報として利用し，位相値 $P(\tau_b)$ を算出する．この反射位相値 $P(\tau_b)$ を当該観測点直下に埋設されている埋設物表面の材質情報として採用し，時刻 (伝搬距離) 情報とともに断面平面上の $(x_b, v\tau_b)$ 点へ B-mode 画像としてプロットしていく．この操作を境界面像が獲得された全ての観測点に対して繰り返し，最終的に材質評価画像とすることで，埋設物の材質が評価できる．

5.5 診断実験: コンクリート構造物の内部診断

5.5.1 構造物内部診断のための信号処理

コンクリート構造物の内部診断技術として，埋設物の位置・径および材質を評価するための，信号処理のフローチャートを Fig.5.16 に示す．信号処理技術における生起検出と情報分析の各処理に区分して，詳細を説明する．

確定型波形とみなすことができる，埋設物表面における反射波の生起検出タスクにおいては，送信波形の波形形状モデルと伝達関数モデルに基づいた相互相関包絡線法による生起検出処理 (P5) と，さらにその選択性を向上するための前処理として，表面波形の波形形状モデルの差し引き処理 (P4) から構成されている．一方，定量評価を実現する情報分析処理においては，重ね合わせ処理により信頼性の向上を図る逆投影ヒストグラム法 (P7) と，その逆投影対象であるモデル適応度の時間的拡がりを抑制して正確性を向上するための境界面モデル適応度の導出処理 (P6)，そして位置・径評価処理 (P8) と材質評価処理 (P10) から構成される．このとき材質評価処理では，先に述べたように，再構成された境界面像情報を位置・径の評価だけではなく材質評価処理へもフィードバックし，材質評価性能の正確性についても向上を図るようにしてある．

以上まとめれば，信号処理の具体的な手順は以下のとおりである．

1. P1・P2 の処理では，信号処理に先立ち，コンクリート部材中で埋設物が存在しない点においてマイクロ波の送受信を一度だけ行い，その計測波形から S1:規範表面波波形モデル $u(t)$ を同定する
2. 診断開始後，はじめに内部診断対象領域に対してマイクロ波アンテナを走査 (P3) させ，S2:計測波形 $\{s(t)\}$ を獲得する
3. S2:計測波形 $\{s(t)\}$ に対して表面波形の波形形状モデルの差し引き処理 (P4) を施し，S3:差分計測波形 $\{s'(t)\}$ を算出する

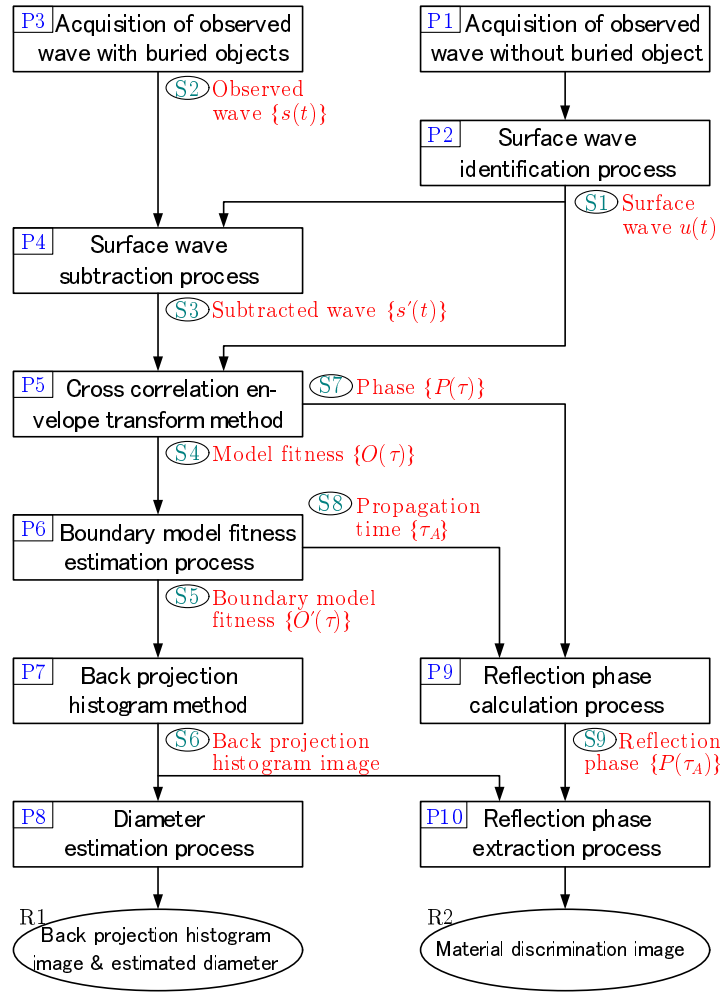


Fig. 5.16: Signal processing flow for evaluation of position, diameter and material information for buried objects

4. S3:差分計測波形 $\{s'(t)\}$ に対して相互相関包絡線法 (P5) を適用し, S4:モデル適応度 $\{O(\tau)\}$ と S7:反射位相 $\{P(\tau)\}$ を得る
5. 埋設物の位置・形状評価
 - 5-a. S4:モデル適応度 $\{O(\tau)\}$ を, P6・P7 の処理において S5:境界面モデル適応度 $\{O'(\tau)\}$ へと変換後, それらに逆投影ヒストグラム法を適用して得られる S6:境界逆投影ヒストグラム画像から埋設物の境界面像を得る
 - 5-b. 境界面像に対して位置・径評価処理 (P8) を施し, R1:境界面画像と埋設物の位置・径情報が獲得される
6. 埋設物の材質評価
 - 6-a. P9 の処理において, 境界面モデル適応度への変換過程で獲得された S8:反射時

5.5. 診断実験: コンクリート構造物の内部診断

刻 $\{\tau_A\}$ と反射位相 $\{P(\tau)\}$ から, S9:埋設物反射面における反射位相値 $\{P(\tau_A)\}$ を導出する

- 6-b. P10 の処理で, 逆投影ヒストグラム画像より得られた埋設物の境界面像位置に一致する反射位相値を $\{P(\tau_A)\}$ から画像上へ抽出してプロットして R2:材質評価画像とし, その反射位相値に基づいて埋設物ごとの材質評価を行う

埋設物の境界面形状に関する情報を材質評価処理へとフィードバックすることは, モデル適応度から同定される境界面と境界逆投影ヒストグラム画像から評価された境界面が一致している領域のみに対して材質評価を行なうことを意味し, 単にモデル適応度で同定された境界面における反射位相値のみを利用する評価に比較して, 正確性を向上できるという効果も期待できる.

5.5.2 実験装置の構成と試験体の性状

5.5.2.1 実験装置の構成

診断実験に使用するマイクロ波レーダ装置の模式的な構成図を Fig.5.17 に, その写真を Fig.5.18 に示した. 装置は, 送受信器一体型のアンテナとそのコントローラ, および

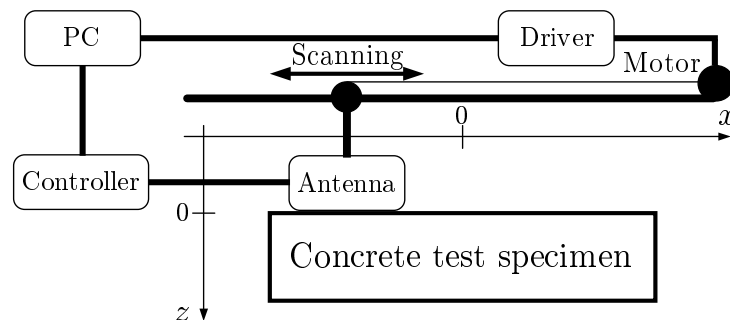


Fig. 5.17: Configuration of experimental microwave radar system

PC から構成されている.

マイクロ波アンテナには中心周波数 1.5GHz をもった GSSI 社製 model 5100 を, コントローラには同じく GSSI 社製のデジタル式レーダ装置 SIR-2000 を使用する. アンテナの走査には Fig.5.18-(b) に示した自動走査システム [74] を使用するが, 本装置はあらかじめ設定した任意距離間隔での測定を繰り返しながら設定した走査軌跡上を移動することができ, さらに計測波形とその観測点の座標情報が PC へと転送される.

5.5.2.2 試験体の性状

診断実験用コンクリート試験体の断面図を Fig.5.19 に示すとともに, 4 種類製作した試験体中の各埋設物に関するパラメータについて Table5.1 にまとめる.

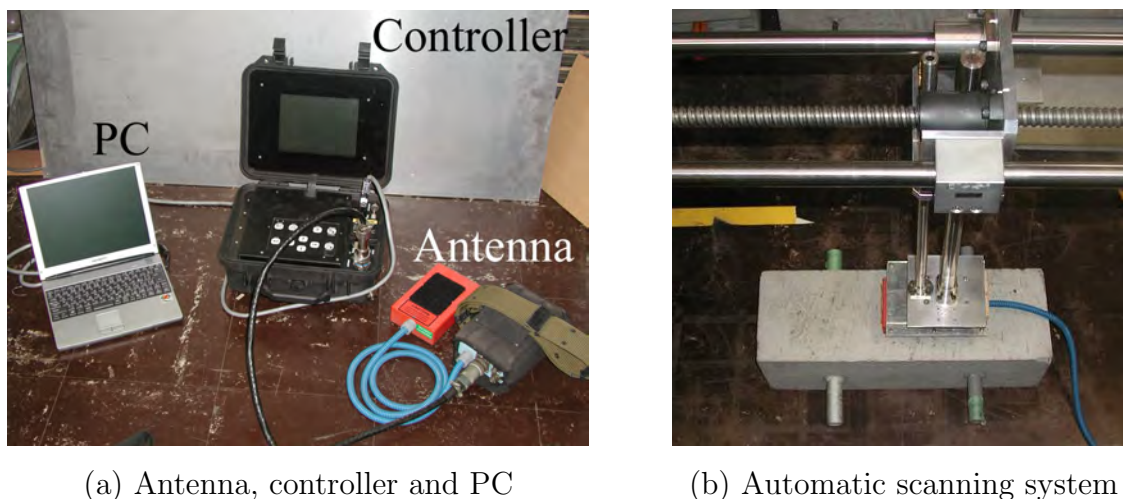


Fig. 5.18: Photograph of experimental microwave radar system

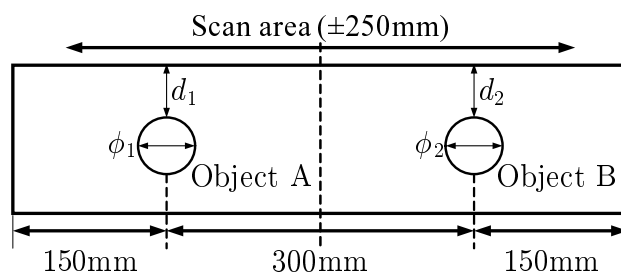


Fig. 5.19: Cross-section and dimensions of concrete test specimen No.1~4.

埋設物は、径に違いがある鉄筋・金属管・樹脂管で、金属管の分類には樹脂への被覆管も含められる。また埋設深度のほうは、一般的なコンクリート構造物でよくみられる30~50mmに比較して若干深めの設定値ではあるが、従来はこの程度の深度であっても位置・径・材質までを同時に評価することは全く困難であったことを踏まえれば、提案

Table. 5.1: Parameters of buried objects in specimen No.1~4

No.	Object A		Object B	
	$d_1(\text{mm})$	$\phi_1(\text{mm})$	$d_2(\text{mm})$	$\phi_2(\text{mm})$
1	Rounded steel pipe		Rounded PVC pipe	
	71.0	35.0	78.0	32.0
2	Combined duct (CD) pipe		Combined duct (CD) pipe	
	69.0	42.0	76.0	27.0
3	Deformed reinforcing bar		Deformed reinforcing bar	
	78.0	15.0	78.0	9.0
4	Plica tube		Plica tube	
	75.0	44.0	73.0	29.0

5.5. 診断実験: コンクリート構造物の内部診断

する信号処理技術の有効性を検証するためには十分な条件であると判断した。

なお Fig.5.19 にも図示したように，検証実験では埋設物 A, B の中間地点を原点とする水平方向へ $\pm 250\text{mm}$ の範囲を診断対象領域とし，自動走査システムによる直線走査により 2mm 間隔で計測波形を獲得していく。

5.5.2.3 生起検出と情報分析のための予備実験

内部診断実験に先立ち，診断波形としての反射波形の生起検出性能と，反射時刻・反射位相の抽出精度について先行して検証する。

コンクリート構造物中に埋設された鉄管および樹脂管の真上で得られた計測波形に対して，表面波形形状モデル差分処理後のモデル適応度から抽出された反射時刻から各埋設物までの距離を算出すると共に，反射時刻すなわち埋設物表面における反射位相を算出した。結果を Table5.2 に纏める。なお，コンクリート中のマイクロ波伝搬速度はコン

Table. 5.2: Estimated distance and reflection phase

Buried pipe type	Actual distance(mm)	Estimated distance(mm)	Estimated error(mm)	Reflection phase(deg)
Steel A	71.0	69.3	-1.7	73.1
Steel B	96.0	92.0	-4.0	75.5
PVC A	78.0	75.8	-2.2	-138.0
PVC B	92.0	92.0	0.0	-138.1

クリートの含水率や組成により異なる値をとるが，後の内部診断実験も含め，本研究では 110mm/ns を採用した。これは製作した試験体に対してあらかじめ実験的に同定した値を採用した結果であるが，標準的範囲の乾燥コンクリートの比誘電率である $\epsilon=7.5$ における伝搬速度と一致しており，一般性は十分に保障できる。

はじめに診断波形の生起検出技術という観点から見れば，表面波波形形状モデルの差し引き処理と相互相関包絡線法の組み合わせの選択性は非常に強力である。従来は難があった樹脂管を含め，いずれの埋設物に対する反射波形もその生起検出に成功している点が大きな変化であり，生起検出における選択性の向上という目的は達成されている。

埋設距離抽出と反射位相抽出は，診断対象の情報分析処理機能の一部に当たるが，ここではその精度のみ見てみたい。まず埋設距離に関しては，いずれの埋設物に対しても埋設距離の抽出誤差は数 mm まで向上しており，従来の $5\sim 10$ 倍に相当する正確性に優れた抽出を実現していることがまず実験的に確認された。また金属および樹脂埋設物に対する反射位相値について見れば，それぞれ 75deg および -138deg 付近に二分されて分布すると同時に，反射時刻の抽出精度が向上したことにより，金属と樹脂間の反射位相値の解離度合いと比較すれば，同一材質ごとの反射位相値のバラつきもほとんど無いと言ってよい。すなわち，実用上の金属・非金属の評価は，反射位相値がどちらの分布に

属すのかさえ判断すれば十分であることを意味し、これまでに比較して正確な評価が期待できる結果を示したといえる。

5.5.3 鉄筋・配管に対する定量評価性能の検証

5.5.3.1 信号処理パラメータの設定

内部診断のための信号処理のプロセスにおいては、境界面モデル適応度の分散 σ^2 と、逆投影ヒストグラム法における重ね合わせ点数 N および M をパラメータとして調整することが可能である。本検証実験では、経験的に $\sigma^2=6.17\text{mm}^2$ を採用するとともに、 N については先行する実験結果 [71] を基に、アンテナ開口長を 40deg とし、再構成対象点の深度に応じて適応的な値へと設定し、 M については $N/3$ として水平方向の拡散抑制効果を与えた。

なお、この議論からも明らかなように、これらのパラメータに関してはマイクロ波アンテナの指向特性、埋設物の深度・反射率など種々の要素が影響しており、現在のところ信号処理プロセスの中で一意に決めることができない。これらの最適な組み合わせの選択については、今後の課題としたい。

5.5.3.2 位置の評価

Fig.5.16 の手順にしたがい、各試験体の計測波形から境界面モデル適応度を算出し、それらを基にして得られた境界逆投影ヒストグラム画像を、はじめに Fig.5.20 に示す。樹脂表面は反射が複雑で弱く [75]、反射波形の検出が難しかった。すなわち、従来は十分な画像強度を得られないことも多々見受けられたわけであるが、その樹脂管を含めた全埋設物に対し境界面像が再構成され、その存在を確認することにまず成功している。

続いて境界面モデル適応度を採用したことによる垂直分解能向上作用も十分にその効果が発揮され、相対的に径が細い鉄筋に関しては境界面像が小さく、管径が増加するにしたがって反射面像のアーチ形状も大きくなる傾向を確認できる。埋設物形状は言及するまでも無く、埋設位置さえも正確に評価することが難しかった従来のレーダ画像に比較し、それらの評価精度すなわち正確性の向上は明白である。

さて本来の手順にしたがえば、埋設物の位置は 5.4.4 節で説明したハフ変換を利用する方法によって評価されるべきである。しかしながら、後述するように、今回はその精度が十分高まらなかったため、境界逆投影ヒストグラム画像における境界面像の頂点座標を以って埋設物の評価位置として精度を確認した。そのような比較では、 x 軸方向および z 軸方向の最大位置推定誤差はそれぞれ 10mm、7mm と、従来に比較して高精度で、正確性の高い埋設位置評価が実現していることを確認している。

5.5. 診断実験: コンクリート構造物の内部診断

5.5.3.3 材質の評価

次に，反射位相値と境界面情報に基づいて導出された材質評価画像を，Fig.5.21 に示す．金属と樹脂の電気的特性の違いに応じて，両者での反射位相値は明確に分離されており，反射時刻の抽出精度が向上したことに呼応して，反射位相の抽出値が有効に機能している．すなわち，抽出位相値に対して簡単な閾値処理を施すだけで，それらが属しているグループすなわち材質を評価することができ，金属・非金属間については非常に正確性の高い材質評価が実現可能である．

さらに詳細に見れば，金属管の位相値分布は 80deg 付近の狭い範囲に安定して得られたが，樹脂管の位相値分布は金属管からは離れた負の領域にありながらも，その値は少しずつばらついている．改めて視点を変えて Fig.5.21 をみれば，ひとつの樹脂管に対応する境界面像内における反射位相値のばらつきは金属管同様に小さいことがわかる．すなわち，このようなばらつきは誤差によるものではなく，同じ樹脂とは言いながらも，各管種の材質に応じた電気的特性や壁厚などの違いが複雑に影響を及ぼした結果と推測される．これは，これまでの同一材質とみなされてしまってきた種々の樹脂埋設物に対しても，位相値の微細な相違に注目すれば，より詳細な材質評価を実現できる可能性が示唆されているといえる．

5.5.3.4 鉄筋・金属製配管の径評価

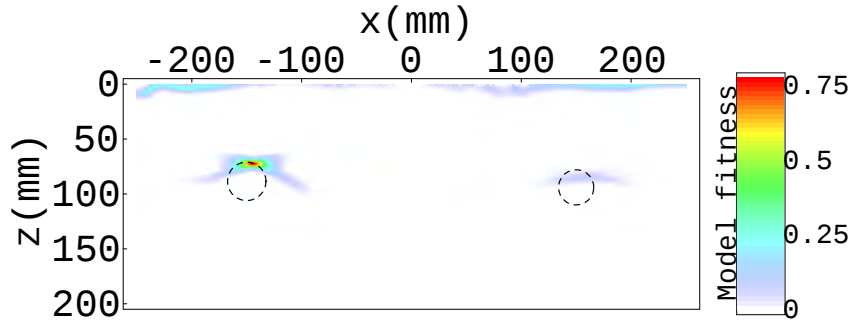
既設コンクリート構造物の安全性診断における鉄筋径評価を想定し，鉄筋および金属管の境界面像に対して径評価法を適用した．Fig.5.20 に得られた境界逆投影ヒストグラム画像における境界面像から算出された各埋設物に対する評価径と真径の関係を，Table5.3 にまとめる．なお Table5.3 中で，<> 内の数値は真径を表し，評価誤差に関しては真径

Table. 5.3: Estimated diameters of buried objects in specimen No.1~4

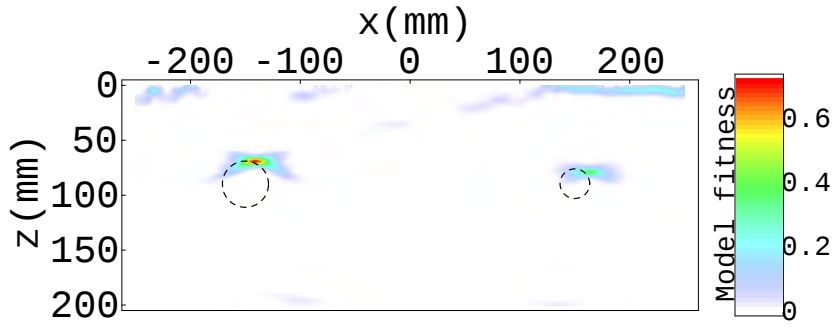
No.	Object A		Object B	
	$\phi(\text{mm})$	Error	$\phi(\text{mm})$	Error
1	60.0 < 35.0 >	×3.42	190.0 < 32.0 >	×6.56
2	45.0 < 42.0 >	×2.14	40.0 < 27.0 >	×2.96
3	40.0 < 15.0 >	×5.33	25.0 < 9.0 >	×5.55
4	65.0 < 44.0 >	×2.95	45.0 < 29.0 >	×3.10

に対する評価径の倍率を意味している．

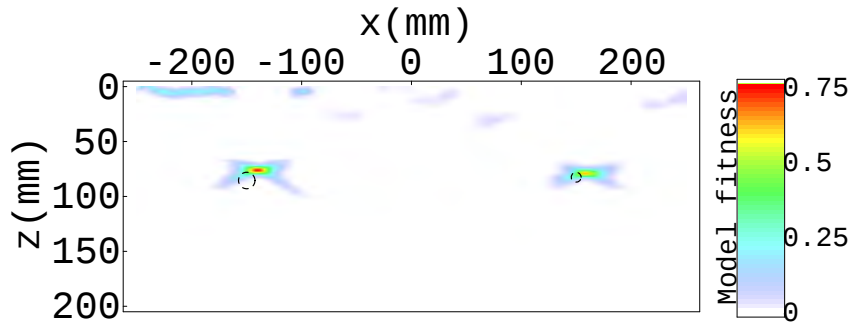
また Fig.5.22 には，Fig.5.21 の材質評価画像中の反射位相値から非金属と弁別することが可能な PVC 管および CD 管を除外した残り 5 つの金属埋設物に関する，評価径と真径との関係をプロットしたものである．評価径は真径に比較して一様に大きくなってはいるものの，各真径と評価径間での大小関係は保持され，さらにほぼ比例関係をもっていることがわかる．すなわち，倍率変換処理を施すことで，このままの手法によっても



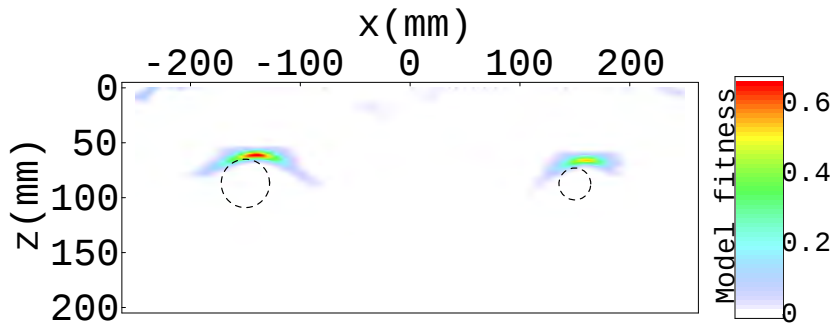
(a) For specimen No.1



(b) For specimen No.2



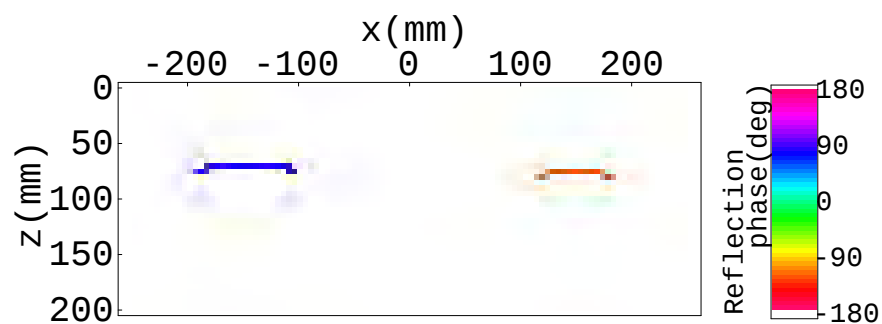
(c) For specimen No.3



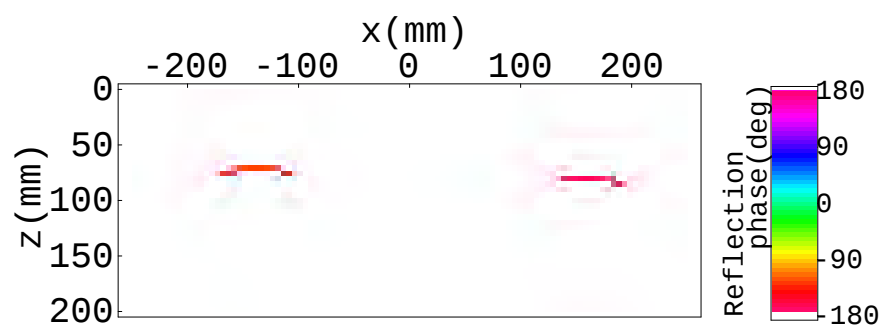
(d) For specimen No.4

Fig. 5.20: Boundary back projection histogram images for concrete test specimen No.1~4
(Dotted lines represent actual positions of buried objects)

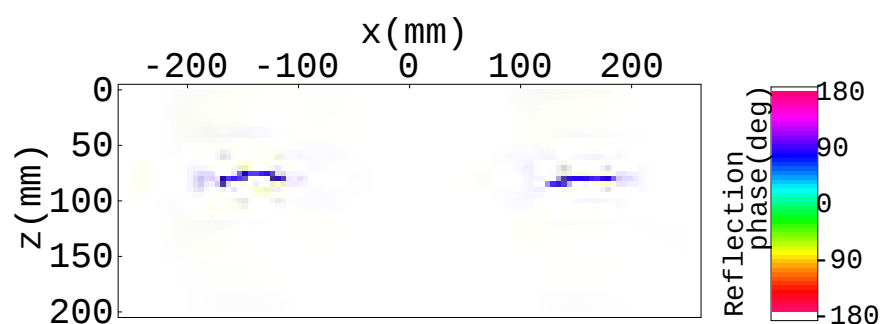
5.5. 診断実験: コンクリート構造物の内部診断



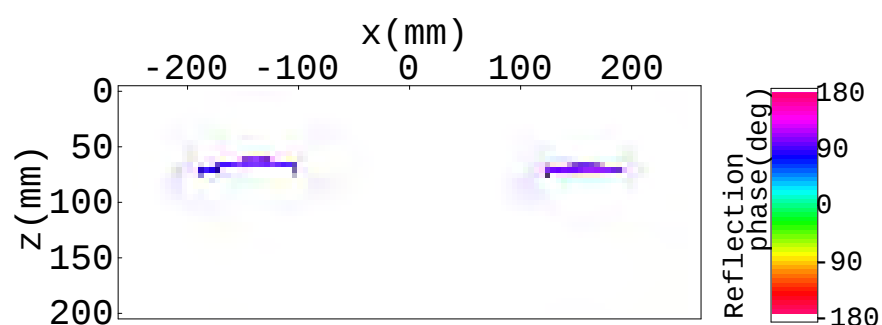
(a) For specimen No.1



(b) For specimen No.2



(c) For specimen No.3



(d) For specimen No.4

Fig. 5.21: Material evaluation images for concrete test specimen No.1~4

およそ真径の評価が可能である．これらの結果は，安全性を保障するための鉄筋径診断に際し，提案してきた信号処理技術は有効な情報を提供できることを意味する．さらに

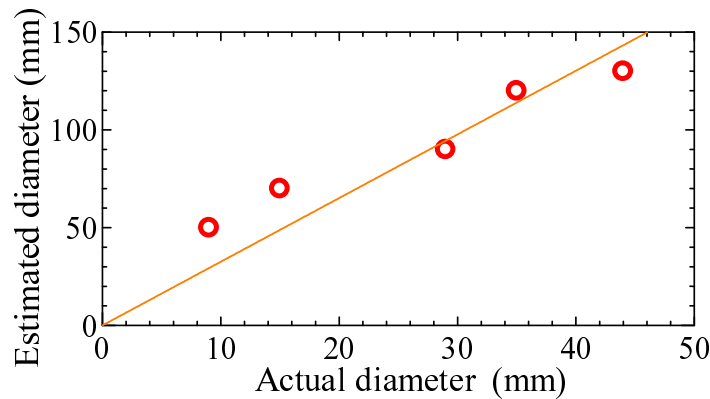


Fig. 5.22: Relation between actual and evaluated diameters for metallic buried objects

は埋設物の位置・材質評価情報と統合することにより、より広義でのコンクリート構造物安全性診断へ、マイクロ波レーダ法を応用できる可能性が示された結果といえる。

一方で、評価径は真径の約3倍ほどの値をとっており、絶対的な正確性として観点からは、さらに高めていく必要がある。このためのひとつの着目点は、境界面像を逆投影する際に実際にはアンテナ内部で距離をもつ送受信器配置の影響を考慮に入れることであり、埋設深度が小さいコンクリート部材では評価精度の向上が大いに期待できる。

また埋設距離推定には、マイクロ波伝搬速度(=コンクリートの誘電率)が必要である。診断対象に対してこの値が整合していなければ、逆投影ヒストグラム法における重ね合わせ処理が有効に機能しなくなり、十分な強度で境界面像が再構成されなくなる。これまで数種のコンクリート試験体へ適用した結果からは、同一伝搬速度を使用してもその影響が顕在化してくることは無かったものの、より厳密な精度を要求する診断、あるいはマイクロ波伝搬速度が大幅に異なる可能性がある診断対象の場合には、最適値を推定する方法 [96] を併用するなどに検討の余地を残している。

5.5.4 実コンクリート壁への応用

最後に、実コンクリート壁の内部診断に対して、提案してきた信号処理法を適用し、その有効性について検証した。

5.5.4.1 試験コンクリート壁

実験へと供試されたコンクリート壁の写真を Fig.5.23 に、その一部領域に対する X 線撮像結果の例を Fig.5.24 に示す。一枚の X 線撮像範囲は非常に狭いものではあるが、結果にはクロスした鉄筋の線が薄らと現れていることを確認できる。

何枚もの X 線撮像情報を基に推定した壁面の内部構造を、Fig.5.25 に模式的に示した。図中の細線は埋設された鉄筋を表しているが、周知のように X 線撮像情報では埋設深度情報が欠落するため、推定された鉄筋の位置には多少の誤差があることに注意されたい。

5.5. 診断実験: コンクリート構造物の内部診断



Fig. 5.23: Photograph of actual concrete wall to be surveyed

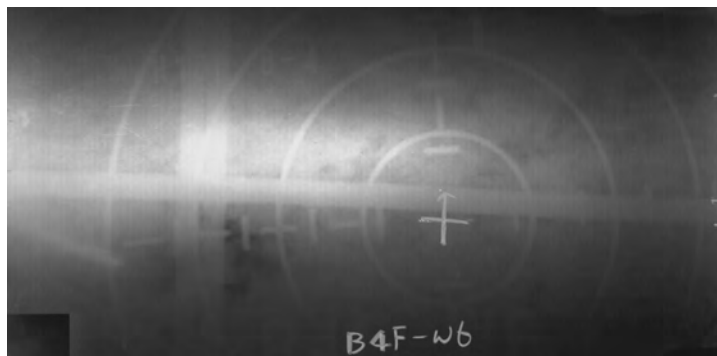


Fig. 5.24: Example of X-ray photograph of actual concrete wall

なお点線表記の部分については X 線撮像結果が無い場合、周囲の鉄筋がそのまま延長された構造となっていることを仮定して描いてある。

また番号の付いた太矢印線は、次小節で示すアンテナ走査ラインとその走査方向を、その始点・終点位置までを含めた正確な情報として示しており、各数字はその走査ライン番号に対応している。

5.5.4.2 埋設物の定量評価結果

Fig.5.19 に示した 3 本の走査ラインによる計測波形から得られた通常のレーダ画像と境界逆投影ヒストグラム画像を、それぞれ Fig.5.26~5.28 に示す。従来レーダ画像では鉄筋部分に像が現れてはいるものの、水平方向・垂直方向にいずれも拡散している。埋設物としての位置・径などを評価することは難しく、さらには鉄筋あるいは樹脂配管なのかを評価することも困難である。これに対して、提案する信号処理技術に基づく結果として提示した境界逆投影ヒストグラム画像では、境界面像の拡散は大幅に低減して鮮鋭化され、埋設物付近のみで像が得られていることを確認できる。

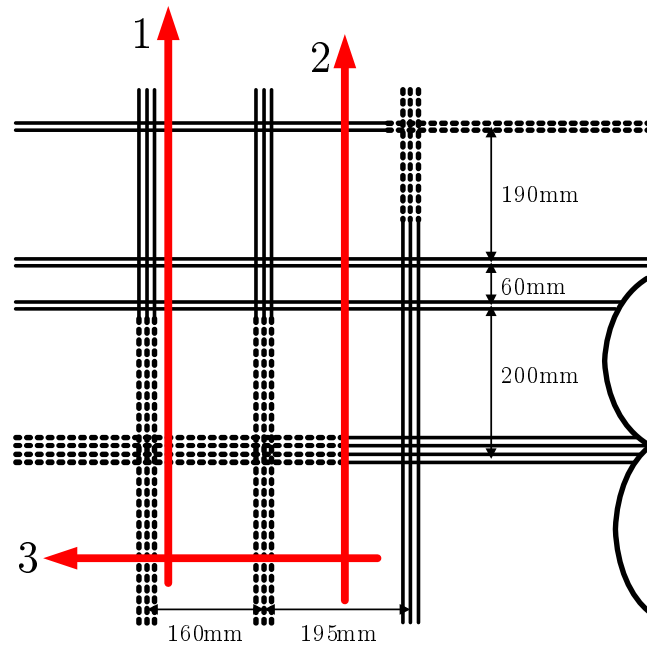
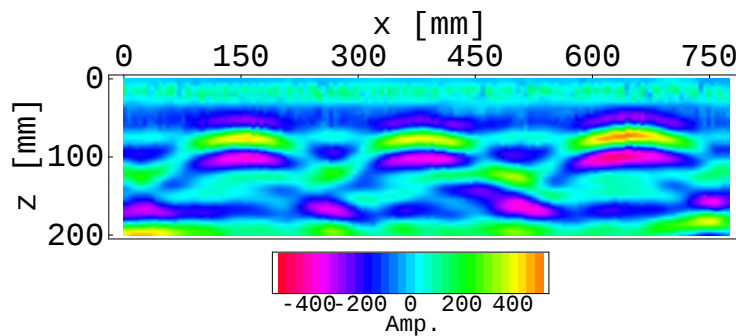
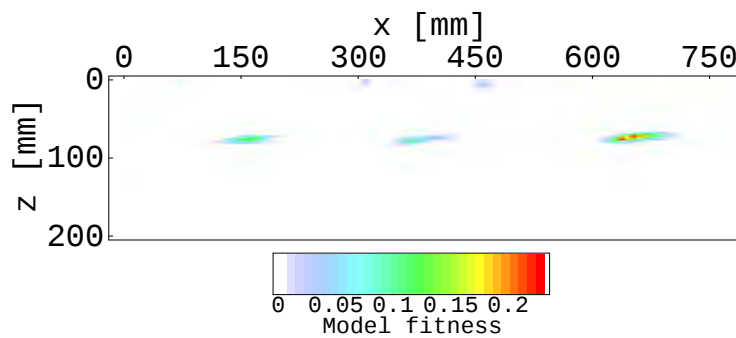


Fig. 5.25: Internal construction of reinforcing bars reconstructed from X-ray photographs and scanning lines for actual concrete wall



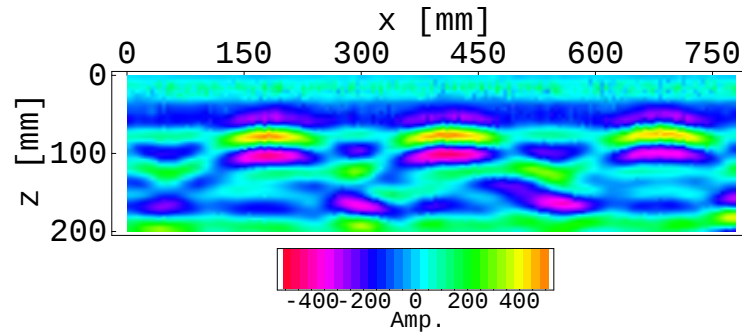
(a) Conventional radar image



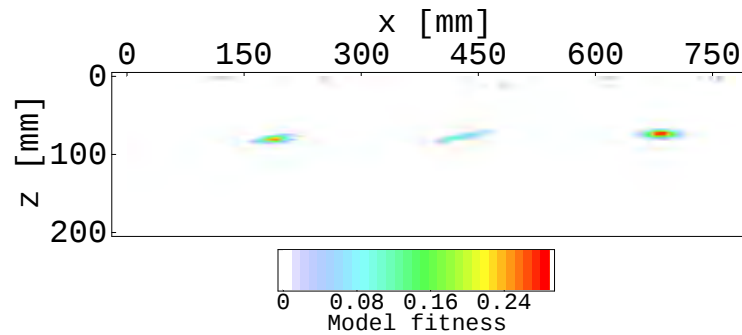
(b) Boundary back projection histogram image

Fig. 5.26: Radar image and evaluated boundary image for scanning lines on concrete wall for scanning line No.1

5.5. 診断実験: コンクリート構造物の内部診断

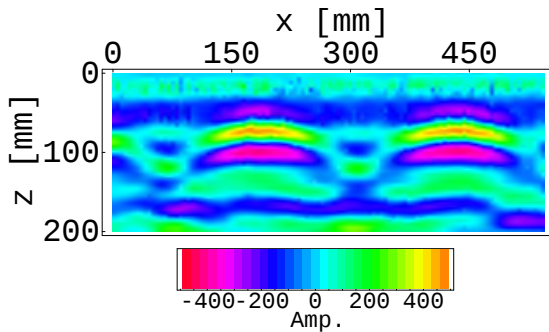


(a) Conventional radar image

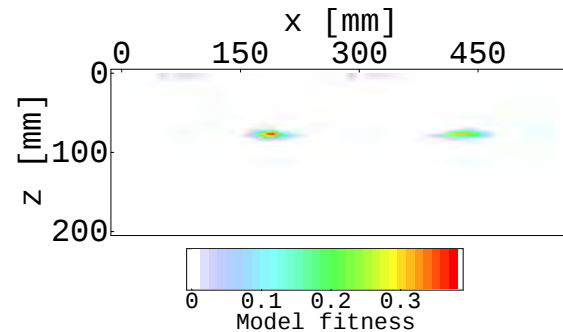


(b) Boundary back projection histogram image

Fig. 5.27: Radar image and evaluated boundary image for scanning lines on concrete wall for scanning line No.2



(a) Conventional radar image



(b) Boundary back projection histogram image

Fig. 5.28: Radar image and evaluated boundary image for scanning lines on concrete wall for scanning line No.3

このように実際のコンクリート構造物に対しても，マイクロ波レーダを利用した簡易に実現できる診断法でありながらも，信号処理技術の高度化によってX線撮像による結果と同等の評価精度が得られることを確認し，提案する信号処理技術の有効性が明らかにされたといえる．

再構成された境界面像は非常に小さい領域に分布して得られることが確認でき，埋設物の径評価にも十分適用可能であると考えられる．また今回の供試壁面では埋設物が全て鉄筋という条件に限られてしまったものの，境界面像の拡がり小さいことは反射位

相の安定化に寄与するので，金属・非金属間の材質評価も可能であると思われる．

5.6 本章のまとめ

本章では，確定型の診断波形をもつ診断対象として，マイクロ波レーダによるコンクリート中の鉄筋径診断をケーススタディに挙げ，情報分析処理における定量評価，具体的には位置・径・材質評価を実現する信号処理技術の構築に関する信号処理技術を中心に議論を進めた．生起検出処理については，確定型波形の検出技術として，波形形状モデルの差分処理を併用した相互相関包絡線法を導入することで，選択性の向上を図った．また情報分析処理については，抽出値の重ね合わせ処理に基づいて境界面像の正確性の向上を図る逆投影ヒストグラム法を導入するとともに，先見知識としての伝達特性を利用して逆投影される情報をインパルス化し，境界面像の鮮鋭化を図る方法を新たに提案した．これら信号処理技術によって，埋設物の定量情報としての位置・径・材質評価を実現する方法を構築するに至った．最後に試験体および実際のコンクリート壁面に対して提案した信号処理技術を適用し，実験的な性能検証を試みたところ，情報分析における正確性向上の効果として，定量情報の評価精度が飛躍的に向上することを明らかにした．

第6章 診断のための信号処理技術の高度化に関する議論

ここまでの議論で，診断のための信号処理技術に必要とされる処理機能を明確化し，非定在性波形の時間局所性に違いをもつ診断対象に対し，具体的な信号処理技術の構築を試みてきた．本章では，はじめに信頼性の側面から，提案してきた信号処理技術について改めて整理する．さらに信号処理技術の高度化として，階層型処理の考え方を適用することの有効性，そして診断対象との適応を図るための自由度の必要性について指摘する．また最後に，本研究で提案した特徴的な信号処理技術について，信号処理分野における新たな機能の創出という視点から，その意義について考察する．

6.1 診断のための信号処理技術の体系整理

6.1.1 非定在性波形の生起検出処理

生起検出は計測波形中への非定在性波形の混入を選択的に検出するための処理機能であるが，それらの生起確率や生起規則は，波形の非定在的な性質すなわち時間局在性によって大きく変化するため，対象の性質と整合した検出処理の適用が，信頼性・効率性の高い生起検出を実現する．前章までで見てきたように，非定在性波形の時間局在性は3種類に分類できる．ここでは生起検出処理内の処理機能レベルをその分類を基に整理し，さらに信頼性の側面から，それらの位置付けを議論する．

6.1.1.1 生起検出処理における3段階の処理機能レベル

生起検出処理における処理機能は，診断波形の時間局所性の相違と対応する監視時間領域の広さを物差しとして，分類することが可能である．

すなわち，時間領域の狭い順から，生起位相が確定している確定型波形に対する確定的検出，生起規則にしたがって生起の確率あるいは生起領域が規定されている偏在型波形に対する規則的検出，そして生起位相が不定かつその頻度も僅かな局在型波形に対する全域的検出，という3つの機能レベルである．それらの処理機能が対象としている監視時間領域の違いを模式的に示した結果が，Fig.6.1である．

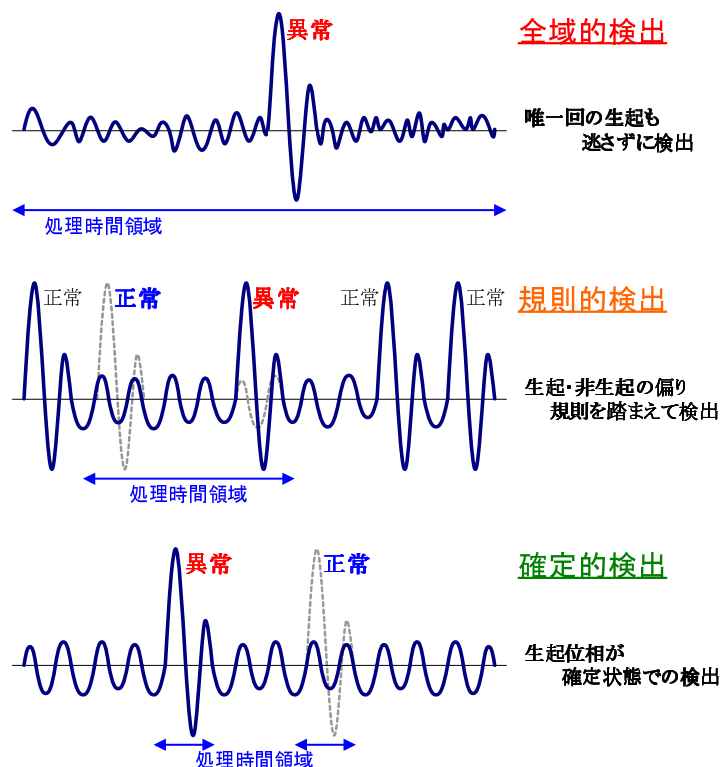


Fig. 6.1: Schematic view of three process levels on arising detection of diagnostic waves

6.1.1.2 医療検査との対比

生起検出処理が，診断対象に発生している異常に関する情報が畳み込まれた何らかの兆候（波形）の生起を検出するという観点では，同じ診断行為を実現する医療分野における「検査」と対比させながら説明されることも多い [17]．そこで最初に，医療分野における検査について考えてみる．

検査の目的は対象疾患を発症している人を発見することにあり，そこにはいくつかの検査レベルが存在する．Fig.6.2 は，医療における検査レベルとその内容を模式的に表現したものであり，不等号による大小関係は検査項目の数を比較している．局部検査とは，

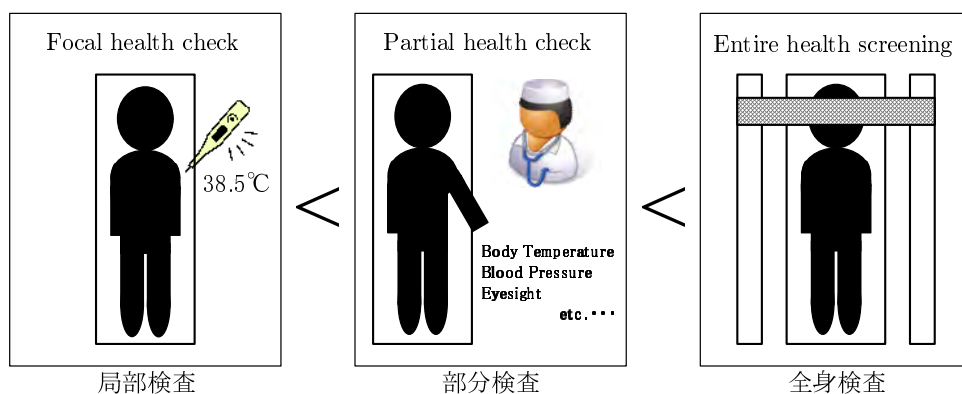


Fig. 6.2: Level of health check on medical field

6.1. 診断のための信号処理技術の体系整理

疾患が既に特定されている状況で、膨大な人体パラメータの中からそれに関わる項目のみの計測が行われる。例えば、ある疾患に的を絞った精密検査のような行為を指す。また検査項目を増加させた部分検査は、対象とする疾患の種類を増やして実施される検査に相当し、検査項目を拡げながら人体パラメータを計測するものである。そして検査項目が多数にわたる全身検査は、疾患の種類を限定せず、可能な人体の全パラメータについて計測を実施する行為を指し、いわゆるドックのような検査レベルである。

このような検査レベルの相違は、発見したい疾患の種類(数)と相関があり、疾患が確定しているほど人体パラメータの計測項目は絞り込まれる反面、逆に疾患が不確定なほど計測項目は増加する。すなわち、対象の疾患種類と計測項目数の間には、正の相関を見い出すことができる。対象の疾患種類(数)に応じて検査レベルが区分されることはある意味妥当なことではあるが、それは効率的な検査を実現するための有効な着眼点といえる。

このような着眼点を診断波形の生起検出処理へと当てはめてみると、疾患の種類は診断波形の生起位相へ、また人体パラメータ計測項目数は生起検出処理を施す時間領域の広さへとそれぞれ対応し、生起検出処理における処理機能レベルは、医療検査と同一の視点に基づいて効率性を確保していることになる。工学と医学という異なる分野でありながら、同様の考え方を適用できるという事実は興味深いことである。

6.1.1.3 各検出処理機能がもたらす選択性の相違

診断におけるたった一度の異常兆候の見落としは、診断対象の致命的なダメージにつながる可能性も多く、すなわち、生起検出処理の信頼性の向上には誤検出数を減少させることが意味をもってくる。それでは、誤検出数を減少させるためには何を考えればよいのだろうか？ この答えを導き出すために、検出性能を議論する上で欠くことのできない代表的パラメータである、検出率 (Alarm ratio) P 、未検出率 (Miss alarm ratio) P_M 、および過検出率 (False alarm ratio) P_F に注目してみる。

あるひとつの指標値に着目して異常検出を実現する際の、指標値の確率密度関数と検出率の関係を模式的に示した図が Fig.6.3 である。検出率 P は診断対象に異常が発生した際に正しく検出できる確率であり、また対象に異常が発生したにもかかわらず見落としとして、正常であると検出する確率が未検出率 P_M 、その逆のケースとして、正常であるにもかかわらず誤って異常と検出する確率が過検出率 P_F である。

誤検出数を減少させるには、未検出率 P_M および過検出率 P_F をともに低下させる必要がある。しかし Fig.6.3 から明らかなように、それらはトレードオフの関係にあり、閾値を操作するだけでは両者を同時に低下させることは不可能である。そこで指標値に感度差を与え、正常状態に比較して異常状態に対する感度を相対的に高める。このとき、正常時・異常時の各確率密度関数の形状、すなわち過検出率 P_F と未検出率 P_M には変化が生じないものの、正常時には指標値生起の絶対的な回数は減少し、過検出の数は減少する。ここでさらに検出のための閾値を小さくしていくと未検出率は低下し、過検出率

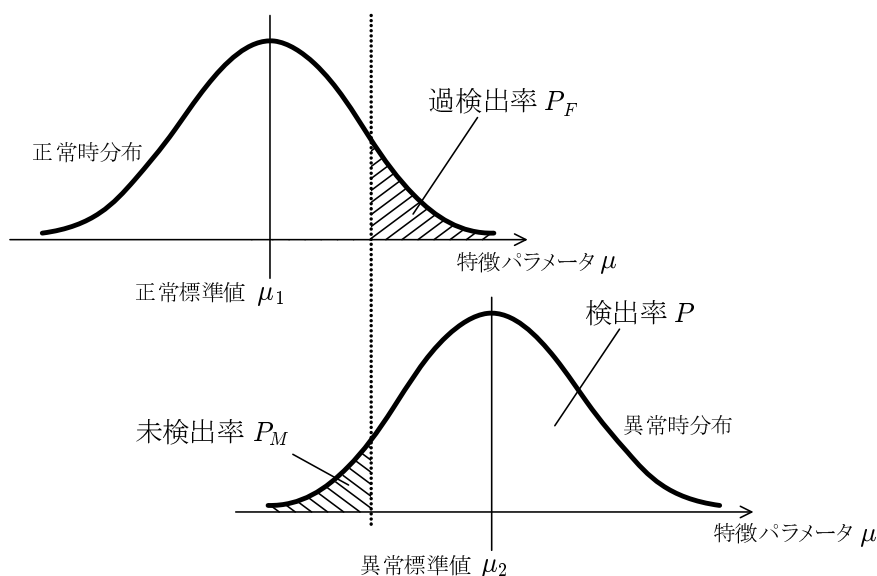


Fig. 6.3: Relations between alarm ratio and miss or false alarm ratio

は上昇することになる．しかし，指標値には感度差があり，過検出増加数を未検出減少数が上回るため，未検出数と過検出数を合計した総誤検出数は減少することとなり，検出処理としての信頼性は向上する．このように，対象とする異常状態に対してのみ指標値の感度をもつこと，すなわち診断波形への選択性を向上させることが，生起検出において信頼性を高める効果をもたらすといえる．

続いて，本研究で構築してきた各処理機能について，選択性の相違を整理する．Fig.6.4は，横軸に計算量の観点からみた生起検出処理実装の容易度，縦軸には信頼性としての選択性をとり，3つの処理機能レベルについてその関係を整理したものである．確定的

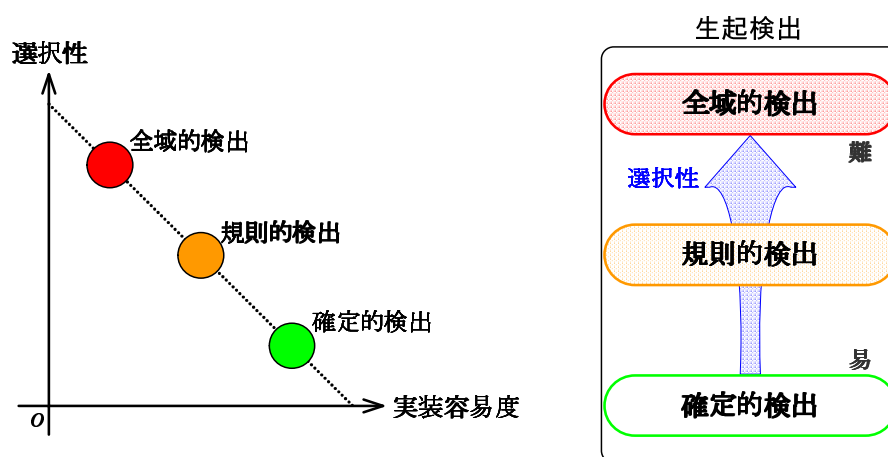


Fig. 6.4: Relations between selectivity and calculation amount on process level for arising detection

検出について，本研究の例では獲得時間領域全体に渡る相関処理を基にした処理について検討したが，診断波形の生起位相は確定しているため，生起検出技術として相対的に

6.1. 診断のための信号処理技術の体系整理

高い選択性をもつことは無くとも，その生起は検出可能であると考えられる．またその対極にある全域的検出については，診断波形に対する高い感度を実現する確率論的アプローチに基づく処理について検討したが，ここでは診断波形の生起位相は不定で全く予測できなくなるため，その一度の生起を逃さずに検出する選択性に優れた処理を実現してきた．これらに対して規則的検出は中間に位置し，本研究の例においては情報を統合利用する方法を検討し，抽出された生起規則を非定在性の診断波形の生起検出へと利用する方法について検討を行った．すなわち，生起規則情報によって診断波形の生起位相・領域が規定できるため，アルゴリズムが単純な方法ながらも，十分な選択性能を確保するに至った．

6.1.2 診断対象の情報分析処理

6.1.2.1 情報分析処理における3段階の処理機能レベル

情報分析処理では，逆問題における伝達特性に対する既知度の相違に起因し，獲得される分析値の質が変化する．すなわち伝達特性の既知度を物差しとして，処理機能レベルを分類することができる．伝達特性が完全に既知な診断対象に対しては診断対象の異常状態を規定している定量値までの分析を実現する定量評価，逆に伝達特性が全く不明な対象に対しては診断波形の波形形状を決定している波形パラメータ抽出に留まる波形パラメータ抽出，そしてそれらの中間に位置し，およその伝達特性の素性が既知な対象に対する（具体的な定量値としてまでの推定は不可能なものの）定性値までの分析を実現する定性評価の，3つのレベルである．

これらの処理機能レベルについては，一次的な要因である逆問題としての伝達特性の既知度だけではなく，副次的要因である分析値への要求精度を考慮に入れつつ，適用されていくこととなる．Fig.6.5は，これらの処理機能レベルによって獲得すべき分析量の質の相違を模式的に表した結果である．

6.1.2.2 医療診察との対比

情報分析処理は，診断対象の内部で発生している何らかの異常状態を分析するという観点では，医療分野における「診察」と対比させながら説明されることがある[17]．そこで生起検出の場合と同様に，はじめに医療の診察について考えてみたい．

診察の目的は，発症している（と推測される）疾患の状態を分析することであり，ここにもいくつかのレベルが存在する．Fig.6.6は，医療における診察レベルとその内容を模式的に表現したものであり，不等号による大小関係は分析値の質の高さを比較している．患者ははじめに自分自身に疾患があることを理解し，体温あるいは血圧・脈拍などの身体に関する情報を抽出する．この行為は診察と呼ぶよりもむしろ身体パラメータの抽出であるに過ぎず，分析値の質という観点からみれば低い．病院へ出向くと，いくつかの

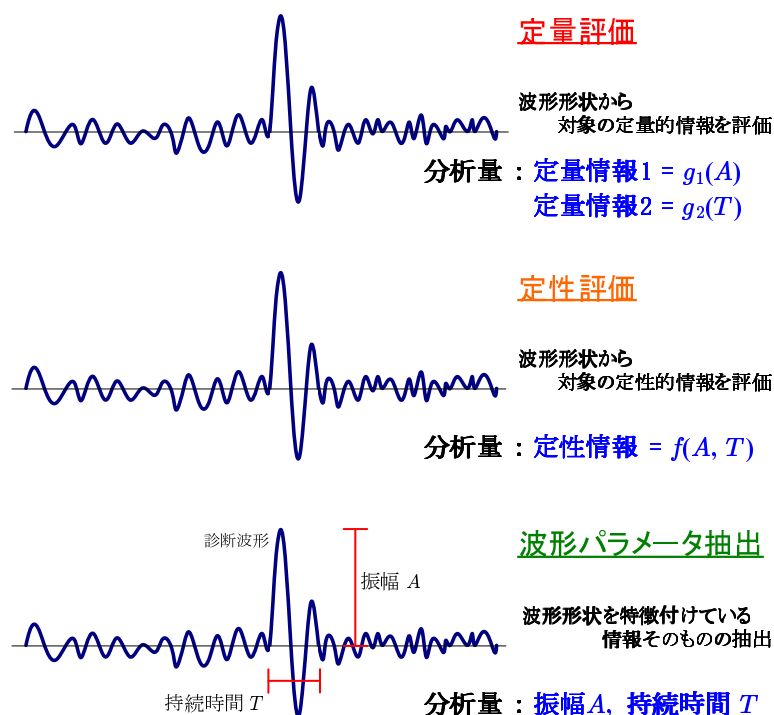


Fig. 6.5: Schematic view of three process levels on state evaluation of diagnostic target

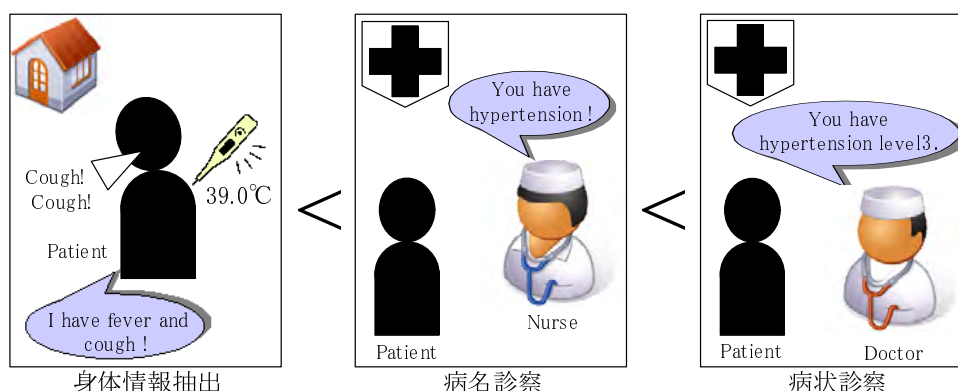


Fig. 6.6: Level of consultation on medical field

身体パラメータ値に看護師の問診結果が総合され、風邪あるいは盲腸などのような定性的な分析値としての病名が特定される。看護師は疾患分析に関する十分な知識を持ち合わせない場合もあり、疾患の病状まで定量的に分析することは難しく、この段階における診察は、定性的範囲に留まらざるを得ない。最終的には、疾患に関する多くの知識を持ち合せた医師による詳細な問診と、より多くの人体パラメータ値観測とを経ることで、「インフルエンザ・軽症」といったような定量的な分析値として、疾患の病状が分析されることになる。

ここから、診察結果として得られる結果が単なる身体パラメータ値なのかあるいは定量的な分析値の質が、診察におけるレベルと正の相関をもつことが見い出

6.1. 診断のための信号処理技術の体系整理

せる．すなわち，獲得を試みる分析値の質によって診察レベルの区分が決定されていることは，診察行為に見られるひとつの着眼点と考えられる．それではこの分析値の質を決める要素は何かと問われれば，それは患者が発している身体パラメータ値変化などの現象から疾患の病状を逆推定するために持ちあわせている知識量の相違である．これを異常診断における情報分析処理へ当てはめてみれば，診察における知識量の相違は，情報分析を逆問題とみなした時の伝達特性の既知度の相違に対応してくると考えられる．

6.1.2.3 各分析処理機能がもたらす正確性の相違

異常診断のプロセスにおいては，情報分析処理を経て獲得された分析値が推定系を経ることで最終的な診断結果が導出され，その診断結果に基づいて対象に対する処置が決定される．すなわち，情報分析処理では診断対象の情報を可能な限り正しく抽出・評価することが重要であり，この点から情報分析における信頼性が指し示す事柄は比較的明快で，「正確性」であるという解釈へ帰着できる．

続いて本研究で構築してきた各処理機能に関し，その正確性の相違について整理してみたい．Fig.6.7は，生起検出の場合と同様に横軸に計算量の観点からみた情報分析処理実装の容易度，縦軸には信頼性としての正確性をとり，3つの処理機能に関してその関係を整理したものである．波形パラメータ抽出は，その実現性という観点からは最も容

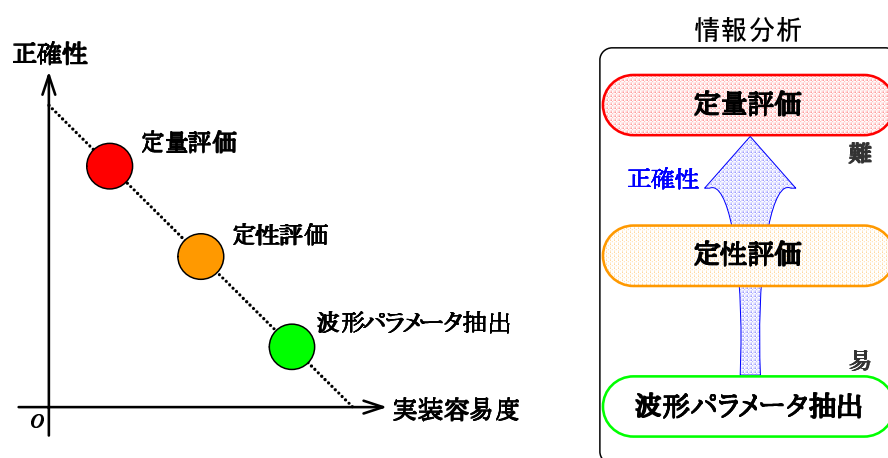


Fig. 6.7: Relations between strictness and calculation amount on process levels of state evaluation

易な反面，単に診断波形の波形形状を規定しているパラメータ値を分析するだけの処理である．すなわち計算量は少ないものの，診断対象の情報分析としては必ずしも正確性が高いとはいえない．定量評価は，分析値として診断対象の状態を規定している定量的な値まで分析を実現する処理である．波形形状あるいはそれを規定するパラメータ(群)の同定値に対し，さらに伝達特性を基にした分析によって，対象の状態を直接的に表現する量まで獲得する高度な処理のために計算量は多いが，評価値としての正確性も格段

に向上する．情報分析処理を逆問題として捉えた際に，伝達特性の既知度が十分に高い場合にのみ適用が可能であり，本研究ではその伝達特性を有効利用した定量評価法を検討してきた．最後に定性評価は，これらの中間に位置し，対象の異常状態を定性的に分析する．例えば，診断波形の波形形状がもつパラメータ情報を統合して扱う方法，あるいは先見的な診断対象モデルとの比較によって分析を実現する方法など，定量評価と比較して1段階処理の難易度は下がり，正確性という観点からも両者の中間に位置することになる．

6.1.3 階層型処理に基づいた信号処理の体系化

6.1.3.1 信号処理機能を分離することの利点

基本信号処理技術は波形の生起を仮定した，いわば「生起検出タスクは達成済み」という前提に立った，情報分析処理のみに特化した信号処理技術であったと解釈することができる．視点を変えれば，生起検出と情報分析を同時に実現する処理の試みであったとも解釈できるが，(それらが時間平均的な処理であったという事実とも無関係ではないものの)獲得された結果の信頼性を考えれば，逆に生起検出と情報分析を同時に処理することは難しいという問題を顕在化させていたとも解釈できる．さらに一度の処理によって生起検出と情報分析の2つの処理機能を同時に実現することが，必ずしも信頼性に優れた信号処理結果をもたらすとは言い難く，状況によっては性能の低下を招くことがあり得るということも示唆した結果といえる．

一方，現実的な診断現場を見渡しても，計測波形中に診断波形が生起する確率はごく僅かなケースが多い．したがって，もし仮に診断波形の生起位相あるいは生起時間領域を特定するための処理を実装せず，計測波形の全時間領域に対して情報分析の処理を繰り返すならば，計算機リソースを大量に消費することへもつながる．特にリソースが極端に限定され，そのリソースの範囲で限られた時間内に信号処理を完結させなければならないオンサイト診断においては，繰り返し計算によるリソース大量消費の代償として高度な信号処理アルゴリズムの実装が困難となる可能性もあり，結果的に処理性能の低下を招く可能性すらありうることに注意しなければならない．いずれにしても診断波形の生起を確認しない状況で詳細な情報分析処理を試みるのが非効率的であることは間違いなく，信頼性と効率性を高めた診断のための信号処理の実現には，生起検出と情報分析の各処理機能を分離した形態が，その方式として適当だという事実を導き出せそうである．

同時にこのような分離によって，各処理の目的のみへ特化・最適化された環境を提供することが可能になると考えられ，ひいては診断性能を向上することにもつながる．

6.1. 診断のための信号処理技術の体系整理

6.1.3.2 階層型信号処理の診断における有効性

本研究で採り挙げた具体的な診断対象がそうであったように，診断のための信号処理では，診断波形の生起が検出された時にのみ情報分析処理を施すことで必要にして十分であり，すなわち，生起検出の結果を受けてから情報分析を実施するか否か判断すれば問題無い．このような知見を踏まえれば，いわゆるカスケード処理，すなわちはじめに生起検出処理のみを計測波形に対して施し，さらに診断波形の生起が確認された時間領域にのみ情報分析処理を施す，階層型の信号処理が有効だと考える．

これに似た問題は計測の分野においても顕在化しており，例えば文献 [36] に見られるような２段階の計測を行うことを考え，計測精度の向上と計測時間の短縮を両立した事例も見受けられる．各計測タスクの要求精度に応じて最適化された計測環境を提供することによって，精度の向上と時間の短縮を両立しているばかりでなく，同時に前段の計測結果をフィードバックすることで次段での高精度計測を容易にする「学習漸進的計測系」となっている点にも大きな特徴を見い出せる．この学習漸進的計測系に関する議論では，そのような２段階構成が高精度計測に貢献することが実証されている．

すなわち診断のための信号処理における２つの処理機能，すなわち診断波形の生起検出と診断対象の情報分析を，それぞれ１次的処理と２次的処理としてカスケード化し，それらを階層的に実施する「階層型信号処理技術」を考える．この階層型信号処理では，２つの処理機能が分離されることによって，情報分析処理が過度に適用されることから解放され，効率性の改善を確実に図ることができる．また，学習漸進的計測の場合とは少々異なるものの，各処理の目的のみへ特化した処理環境を提供することを根拠として，信頼性が改善される可能性も有していると考えられる．

「生起検出処理」と「情報分析処理」をカスケードに組み合わせた，階層型信号処理技術に関する模式的な表現を，Fig.6.8 に示した．生起検出処理には確定的・規則的・全

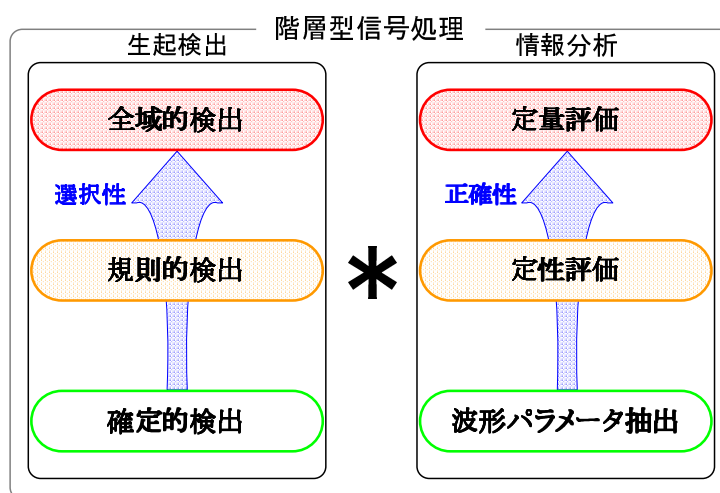


Fig. 6.8: Schematic view of hierarchic signal processing technique combined by waveform detection and state evaluation

域的検出の処理機能レベル，また情報分析処理には波形パラメータ抽出・定性評価・定量評価の処理機能レベル，それぞれ3つのレベルがある．これらのレベルは，2段階の信号処理において，診断対象の性質に応じてそれぞれ独立的に適用でき，原理的にはこれらレベルが組み合わされた計9通りの処理を，診断対象に応じて選択することが可能である．また各処理機能へ要求される分析値の精度を模式的に表した図が，Fig.6.9である．生起検出処理では診断波形の有無，すなわち異常・正常のみが分析され，情報分析処理

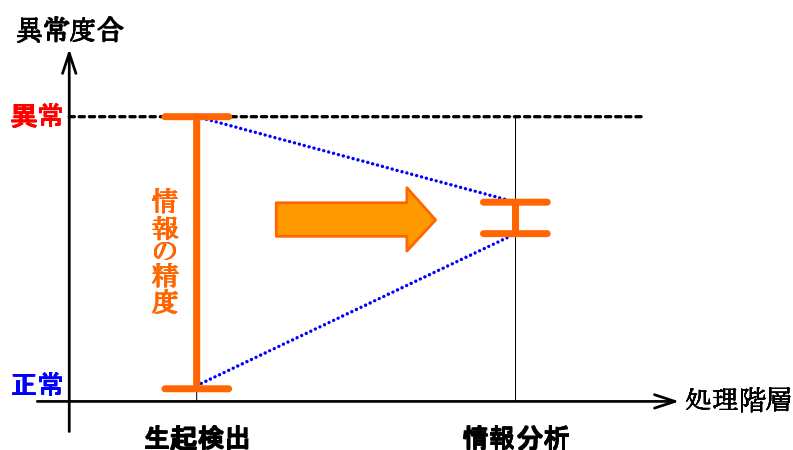


Fig. 6.9: Relation between signal processing class and evaluation accuracy

では診断波形を基にしてより詳細な異常状態が分析される．

分離によって，生起検出処理と情報分析処理それぞれにおける処理機能レベルは，生起検出ごとあるいは情報分析ごとに切り離して全く独立的に適用することが可能になるという利点を生む．これは，ひとたび生起検出処理が済んでしまえば生起位相が確定し，確定・偏在・局在型の各非定在性波形を区分して情報分析処理を適用する必要性がなくなるためである．このように診断波形の生起位相の相違が情報分析処理における処理機能レベル選択に干渉しない点が，階層型信号処理を適用することのもうひとつの利点でもある．また学習漸進的計測系の例にも見られたように，階層化によって上位の処理行為を進めて行くに際して既に完了した下位処理の情報をフィードバックでき，比較的容易な信号処理技術を組合せながらも，高精度・高効率な信号処理の実現を図ることも可能だと考えられる．

6.1.3.3 階層型信号処理における信頼性と効率性

生起検出と情報分析の各処理において，それぞれの信頼性が「選択性」と「正確性」に基づいて保証されることを指摘してきたが，ここではそれら2つの処理機能が組み合わされることになる階層型信号処理における信頼性について議論する．

階層型信号処理における総合的な信頼性は，各処理において選択される処理機能レベルの信頼性によって決定すると考えられる．Fig.6.10には，階層化信号処理における処

6.1. 診断のための信号処理技術の体系整理

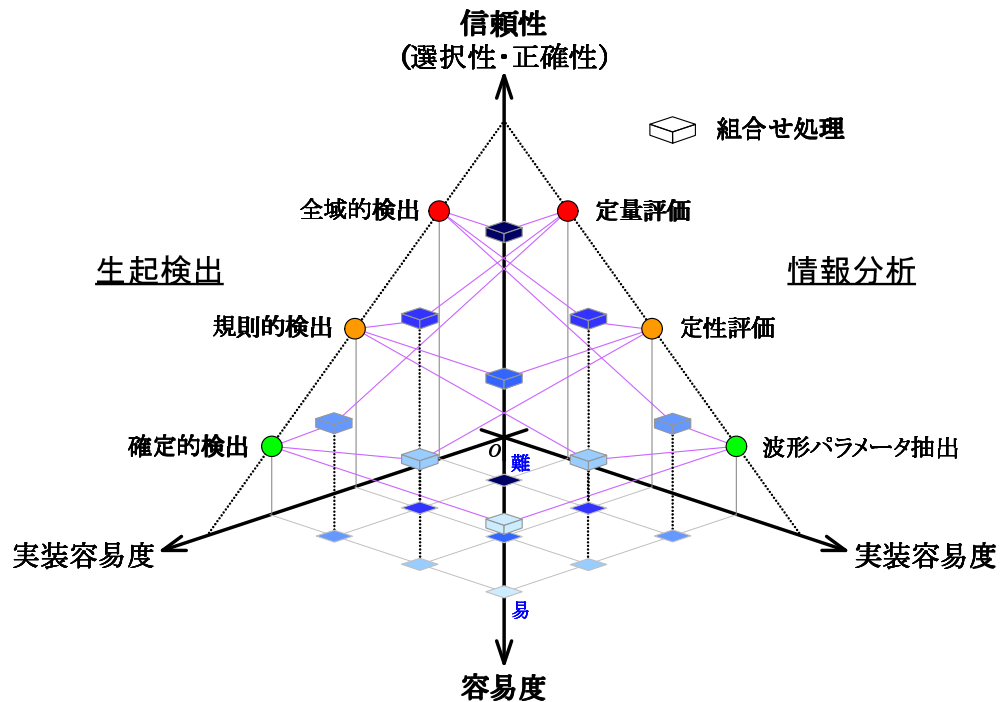


Fig. 6.10: Schematic view of reliability on proposed hierarchic signal processing technique

理機能レベル組み合わせと、それら組み合わせにおける信頼性の関係を模式図として示した。これは、Fig.6.4 および Fig.6.7 の、生起検出・情報分析における信頼性 (選択性・正確性) と計算量の間を、信頼性に関する軸を鉛直軸方向にまとめることによって3次元的に表現したものである。図中に Boxel の位置として明示した各処理機能レベルの組合せによって実現されることになる計9通りの組合せにつき、およそ鉛直軸方向の高さとしてその信頼性が判読できる。そして、各処理組合せの計算量も、図に示すような第4の軸方向の座標から読み取ることができる。

選択性が最上位にある全域的検出・正確性が最上位にある定量的評価の組合せから構成される信号処理は、最も信頼性が高い半面で計算量は最も多く、逆に確定的検出と波形パラメータ抽出の組合せから成る処理は、最も信頼性が低い反面で計算量も最も少なくなる。さらにこれらの間に位置する組合せ処理が診断対象の性質に応じて選択される。

6.1.3.4 計算能力に応じた処理機能選択の制限

階層型信号処理の適用に際しては、診断波形生起の特性あるいは診断対象の伝達特性の既知度・診断への要求精度を踏まえた上で決定できる。この決定により信号処理としての信頼性も定まることになるが、そこだけに目を向けていては、現実的な診断のための信号処理を構成することが難しくなるケースが考えられる。

Fig.6.11 は、Fig.6.10 の模式図について、信頼性に関する軸を圧縮して2次元化したものである。圧縮された信頼性軸に関する情報は、組合せ処理を意味する Boxel の青色濃

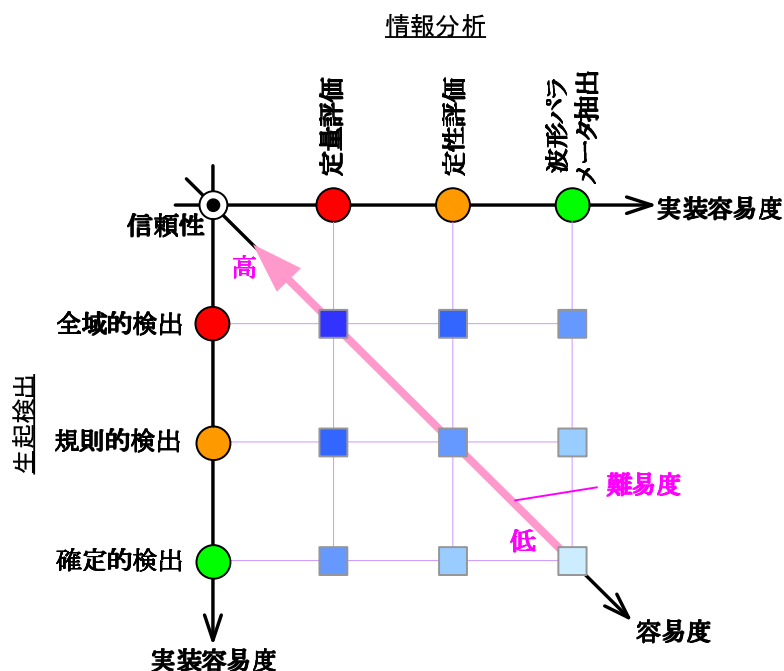


Fig. 6.11: Schematic view of 2D-compressed reliability on proposed hierarchic signal processing technique

度によって表現し、濃色ほど信頼性に優れることを表現している。計算量の少ない処理機能レベル同士による組合せ処理ほど結果の信頼性は低く、計算量の多い処理機能レベル同士の組合せ処理ほど信頼性は高くなる。信号処理の高度化というトレンドに沿うならば、より信頼性に優れた組合せ処理を選択することになるが、そのような組合せ処理は一方で計算負荷の増加やアルゴリズムの難易度上昇をとともなうため、一概に性能に優れた組合せ処理を選択することが効果的な診断を生むとは限らないと考えられる。

これによく似た事例は、QC(Quality Control: 品質制御)の分野に顕在化している[76]。QCにおける議論では、品質とコストのバランスを操作することが重要であり、これによって製品水準が制御されるとある。コストをできるだけ抑制することはもちろん重要であるが、それによって製品品質が低下して不良品が多発し、トータルでみたコストパフォーマンスが低下してしまえば意味がない。このように、製造現場における品質とコストは相反しており、同時に高い要求値を求めることは不可能である。それでは、このバランスの操作に対し、どのような意識をもつべきであろうか。

QCにおいては、適切な製品水準を設計するひとつの回答として、製品の特性に着目することを挙げている。すなわち、コストだけが重視されて大量生産される製品と、品質が最も重視される製品とで、そのバランス点を最適化する。QCに見られるこのような対象に応じた品質とコストの「バランス点の最適化」という観点は、階層型信号処理における計算負荷と信頼性の議論にも当てはまり、組合せ処理の選択に関する指針を構築する上でのひとつのヒントになり得ると考えられる。

6.2 信号処理技術の構築を通して得られた知見

6.2.1 適応性を高めるための自由度の必要性

本論文では診断波形の時間局所性に関する性質が異なった3つの診断対象を挙げ、そのための具体的な信号処理技術について検討を進めるとともに、その結果を踏まえ、生起検出・情報分析の各処理における処理機能レベルの整理、さらには信号処理の体系化として、階層型信号処理について議論してきた。

これらの検討の中で具体的に構築された信号処理技術に焦点を当ててみれば、それぞれの処理に、診断対象との適応性を保障するための自由度を備えていたという共通点を見い出すことができる。この共通点は診断のための信号処理技術に必要とされる機能の根幹を成していると考えられ、診断対象の性質に応じた調整の自由度が必要という結論は、本研究で得られたひとつの知見になる。以下では、信号処理技術に備えられていた自由度について挙げる。

6.2.1.1 波形形状モデルの利用

生起検出処理を構成する3つの処理機能レベルにおいて共通する波形形状モデルの利用は、特異な形状をもつ診断波形に対する選択性を確保するための手段として利用されてきた。すなわち、波形形状に応じて任意に形状調整が可能な自由度を設けたことが、基本信号処理技術では不可能であった診断波形に対する感度を十分に確保することへと有効に機能していたといえる。

6.2.1.2 処理機能選択の自由度

3つの具体的な診断対象に対して構築してきた信号処理技術を階層型信号処理の型に当てはめてみれば、生起検出処理においては診断波形の時間局所性、あるいは情報分析処理においては逆問題における伝達特性の既知度・分析値の要求精度などに応じて、各処理における処理機能レベルを選択し、診断対象の性質に応じた最適な処理を組み立ててきたといえる。このような診断対象の性質に応じた適応的な信号処理の組み立て自由度は、診断のための信号処理技術に必要とされる自由度のひとつと考えられる。

先に Fig.2.4 に示した診断波形分類に対して、階層型信号処理を適用する際の処理機能レベルの組合せについて検討した結果が、Fig.6.12 である。生起検出処理では診断波形の生起位相の相違に着目し、適用する処理機能レベルを決定することができる。すなわち、確定型波形へは確定的検出、局在型波形には全域的検出といった具合に、機械的に適用のレベルは決定する。また情報分析処理では逆問題としての伝達特性の既知度あるいは要求される評価値精度のみに着目して、生起検出とは全く独立に、最適な処理機能レベルを選択する。すなわち、生起検出タスクにおいて診断波形の生起は検出されているため、生起位相の相違が情報分析のための処理に影響することは無く、全ての診断波

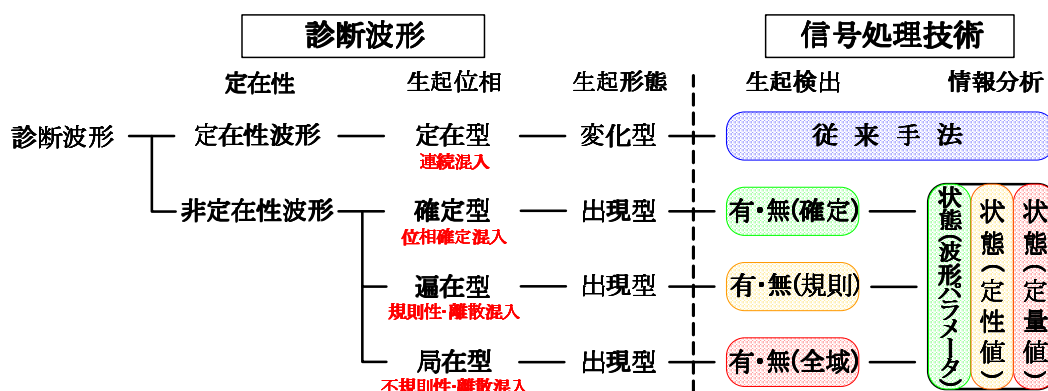


Fig. 6.12: Application of signal processing level for diagnostic waves

形を確定的に扱うことが可能である．このような処理機能レベルの組合せによって信号処理を構成することによって，ほとんどの現実的な診断対象への適応が可能とする．

6.2.2 診断対象の先見的属性の相違に着目した信号処理技術の構築

先行技術のレビューをとおり，非定在性の診断波形に関し，同一の視点に基づいた統一的なアプローチによってその全ての波形に対する信号処理を実現することは難しいとの知見を得た．そこで本研究では「定在・非定在」の分類をさらに推し進め，時間局所的な波形の生起位相に関する相違による確定型・偏在型・局在型の3種類の波形分類を基にした信号処理技術について検討を進め，一定の成果を得るに至ったといえる．

ところで計測という立場から見れば，より一般的な視点として，それらの診断形態すなわち能動型・受動型の相違に着目した分類も考え得る．そこで，診断波形に関する時間局所性と能動型・受動型との関係に改めて注目すれば，

- 情報能動型診断
計測のために試験波形を入力：生起位相を外部情報として提供可
確定型波形の性質そのもの
- エネルギー能動型診断
計測のためのエネルギーのみ供給：生起位相は外部情報として提供不可
偏在型波形，局在型波形
- 受動型診断
計測に際しての働き掛けは一切なし：生起位相は外部情報として提供不可
局在型波形，偏在型波形

と整理でき，この関係を模式的に示したものは Fig.6.13 となる．本研究で検討された確定型波形のための生起検出処理は，(一般的に見て能動型を指す) 情報能動型診断のための検討と等価であったと考えてよい．しかしながら同じ能動型診断ではありながらも，生起検出処理の観点すなわち生起する診断波形の時間局所性の側面からは，エネルギー能

6.2. 信号処理技術の構築を通して得られた知見

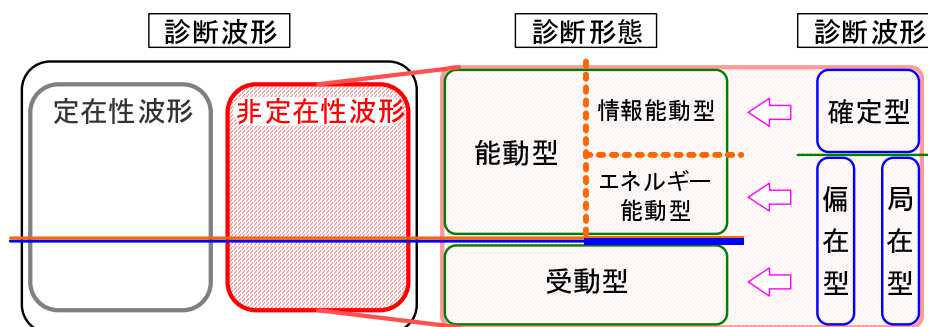


Fig. 6.13: Relations between diagnostic types and diagnostic waves

動型診断はむしろ受動型診断と同類に扱われなければならない，そこには(受動型も含め) 偏在型波形・局在型波形の2種類の診断波形生起を考え得る．

本研究における検討結果を考慮に入れるならば，偏在型，局在型あるいは確定型の診断波形の間では，それぞれその生起検出処理のためのアプローチに大きな相違をとまっており，これは必ずしも能動・受動の区分と信号処理としての最適なアプローチの区分は整合してこないことを意味している．さらには偏在型と局在型の診断波形についてもそれぞれ最適な生起検出処理のアプローチは異なっており，エネルギー能動型診断と受動型診断をひとつの区分によって扱うことも難しい．すなわち，時間局所性を有する診断波形に対する生起検出処理技術の適用に際しては，処理を適用する際の視点として能動・受動型の区分よりも適した視点があるといえる．本研究の検討結果に基づけば，それは診断波形が時間軸上のどこへ生起するのか，換言すれば「生起位相の時間局所性」の相違であったと結論づけることができる．

一方の情報分析処理について見ても，生起位相の時間局所性に関する性質とは直交的な要素である診断対象の「伝達特性の既知度」の相違に着目しながら，最適な信号処理を選択することが効果的であるとの結果を得ている．すなわち情報分析処理技術の適用にもまた，能動・受動型の区分から離れた視点に基づく適用が有効という結論を導き出せる．

それでは，本研究ではどのような視点に基づく信号処理技術を検討してきたことになるのか？ これを一言で纏めるならば，「診断対象の属性に関する先見知識の相違」へと適応する信号処理技術に関する検討を進めてきたとの解釈に至る．この診断対象の属性とは，いま議論してきた「診断波形生起の時間局所性」あるいは「診断対象の伝達特性の既知度」といった信号処理のアプローチを大きく変化させることとなった2つの要素が包含されることはもちろん，本来は「診断波形の波形形状」もそこへ含まれるべき要素である．本研究では，診断波形の波形形状は先見知識として得られることを仮定した信号処理技術について検討を進めてきたわけであるが，実際には波形形状モデル自動設計のための手段，すなわち生起検出処理に先んじた第3の処理機能として「波形形状モデル設計処理」を実装する必要がある，そしてそこにも先見知識量の相違に応じた処理機能レベルの検討が必要になるものと考えられる．

6.2.3 逆問題の性質が診断性能に及ぼす影響

実際の診断対象では，異常にともない生起する診断波形の中で，計測可能なものが多数存在することも考え得る．このような逆問題選択における自由度も，広い意味で解釈すれば診断性能を左右することになる．そのようなケースでは，どのような現象に対する計測・信号処理系を構成することがよりよい診断を実現するのか，本研究で得られた結果を基にして考えてみたい．

Fig.6.14 は，診断における逆問題の構成を再図示したものである．計測量である「診

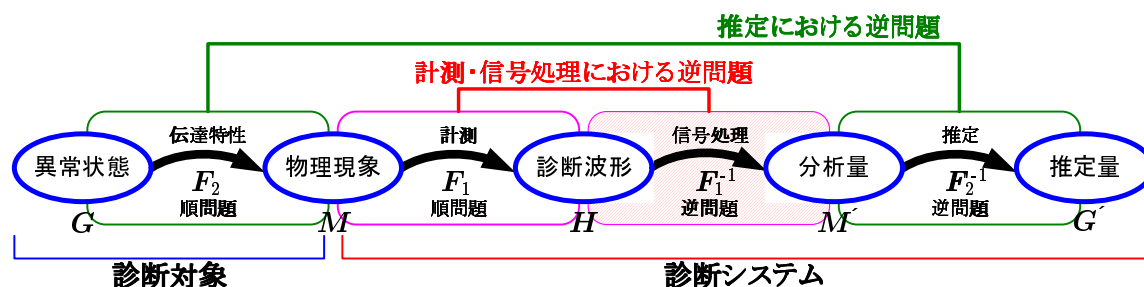


Fig. 6.14: Relations between sensing and signal processing on inverse problem of diagnosis (Redisplay)

断波形として何を選択するのか？」という質問は，「どのような逆問題を選択するのか？」という質問に置き換えられることがわかり，それはさらに以下の2つの状態に関する選択問題へと集約される．

1. 計測量の質は高いものの，伝達特性 F_1^{-1} が不明確な逆問題
2. 計測量の質は低い，伝達特性 F_1^{-1} が明確な逆問題

1. のような場合に関しては，複数の現象 (計測量) を選び出し，それらに対する評価情報を統合的に利用することで信頼性を高めることが効果的と考えられる．本研究で扱った，光ファイバ触針の走査波形による紙幣診断はそのようなひとつの例であり，そこでは検出された低周波数成分およびスティックスリップ成分それぞれの波形成分の質は高かったものの，それら単独から定量的な分析量を獲得することは叶わなかった．そこで，それら波形成分から抽出された金種，真贋という情報を統合し，情報の信頼性を高めていたといえる．

また2. のような場合には，単一の現象 (計測量) を基にした情報分析を繰り返し，繰り返し効果によって信頼性を高めることが効果的であろう．マイクロ波レーダによるコンクリート中の鉄筋径診断は，そのひとつの例と考えられる．すなわち，マイクロ波反射波形からは正確な反射時間を抽出できるものの，1回の評価では埋設物全体に関する情報を評価することはできない．そこで多数の観測を繰り返し，それら観測点における評価情報を重ね合わせることによって，位置・径あるいは材質といった定量情報の信頼性を高めていたといえる．

6.3. 本研究で提案してきた信号処理技術の意義

このように異常診断の性能とは信号処理の性能だけで決定するものではなく、実際の診断対象のための信号処理技術を構築する際には、その性質を事前に良く調査し、設計していく必要があると言えそうである。

6.3 本研究で提案してきた信号処理技術の意義

最後に本節では、本研究で提案してきたいくつかの特徴的な信号処理技術について、信号処理分野における新たな機能の創出という視点を踏まえながら、本研究で提案してきた信号処理技術の意義について考察する。

6.3.1 確率論的アプローチに基づいた生起検出技術

局在型波形の特徴は波形生起の時間局所性とその不定性にあり、そこには十分な診断波形の生起頻度が保障されないこと、すなわち診断波形の計測波形中への混入確率の低さという問題が付随していた。生起検出における信頼性とは選択性の向上にあることに触れてきたが、非定在性波形に対する選択性を向上するためには、時間平均的いわば確定論的なアプローチに基づいた信号処理法から脱却することが必要である。そこで、このような診断波形の生起を逃すことなく検出するための信号処理技術として、確率論的なアプローチに基づいた処理について検討を進め、局在型波形の性質と整合する時間局所的な信号処理法を実現すること、具体的には「波形形状モデル」と「確率論的アプローチ」という2つの手段を組み合わせることによって新たな生起検出原理の構築に至った。

提案した確率論的アプローチに基づく診断波形の生起検出原理では、2つの効果によって、その選択性を高めることに成功した。ひとつは確率論的な扱いに基づく背景雑音の影響抑制であり、もうひとつは条件付き確率の考え方を導入したことによる検出感度の向上である。具体的には計測波形を確率論的に処理することで、通常では抑制することが不可能な正規性雑音による影響を差分処理によって抑えることでSN比の改善に成功し、選択性の向上が図られることとなった。また、生起検出の考え方としては自然ではあるものの、同時確率に基づいた生起検出の考え方はいわば時間平均的な信号処理の域を脱していない。すなわち診断波形にのみ感度を持つとはいえ、生起検出のための指標値の大小が診断波形の生起頻度に依存してしまい、生起頻度が低い場面では小さくなるという、時間平均的処理としての負の性質をもっていた。しかし同じ確率という表現を用いながら、条件付き確率という枠組みの導入で、生起検出処理を施すためのトリガ条件を設けることに成功し、信号処理に時間局所性を与えること、指標値の感度を大きくとれること、という2つの効果をもたらした。すなわち同時確率の場合と検出に関する基本的な思想は変えることなく、一元的な指標による診断波形の生起検出を実現し、選択性を高める効果を生んだ。

一方、計算負荷の軽減という観点からも、確率論的アプローチの導入は効果を生み出している。すなわち条件付き確率の考え方にしたいが、対象とする診断信号波形が生起

した可能性が高まったことをトリガ条件として、続く高度な信号処理(波形テンプレートとの一致検査)を実施することは、常に波形テンプレートとの一致検査をするという不要な演算を抑制している。またテンプレート化による計算点数の削減も、大幅な計算負荷の軽減に貢献していることを補足しておく。

このように、確率論的アプローチに基づいた波形生起検出技術は、その選択性を効果的に実現した信号処理技術である。同時に、このような信号処理としてのアプローチは、その適用先が診断分野へと限定されるものではない。例えば文献[77]のようなパルスエコー探査における収録音波形など、処理対象となる波形が生起している時間局所に対して処理を施すことが必要とされる問題は、信号処理の分野において他にも多々見受けらる。提案したアプローチはそれら信号処理への応用も大いに期待できる技術であるといえる。

6.3.2 先見的伝達特性に基づいた情報分析技術

診断波形は、異常にともなって生じた物理現象が何らかの伝達特性を介して獲得された結果であり、そのような伝達特性による診断波形形状の変形が、異常現象の分析精度の低下、すなわち情報分析技術としての「正確性」を低下させてしまうことがありうる。別の見方をすれば、伝達特性の存在によって、異常に関する情報が診断波形形状へ畳み込まれてしまうことを意味し、獲得された診断波形そのものからは、診断対象の正確な情報を容易に分析できないことが多い。

センサデバイスの高性能化あるいは信号処理の高度化によって伝達特性を改善し、獲得される診断波形を鮮鋭化することが常套的には行われるが、信号処理の低負荷性ということを念頭に置いた異常診断においては、この限りではないと考えられた。そこで本研究では、このような伝達特性に関する先見的な知識を効果的に利用することを考え、これによってより容易に正確性を備えた評価値を獲得できる可能性がある点を明らかにし、実際にそのような視点に基づいた信号処理技術の構築を試みてきた。

具体的には、伝達特性を利用して理想的な診断波形を仮想推定し、それらに基づいて情報分析を実現する方法を提案した。このような伝達特性を仮定した信号処理は必ずしも効果を生まないことも多々あるが、先見情報として物理的因果関係に基づいた正確な伝達特性が保証されていれば、有効な処理を容易に達成することが可能であることを今回実証できたといえる。これはある意味で、計測デバイスの性能的限界を補完する機能を導入したと捉えることもできる。Fig.6.15は、伝達特性を利用して診断波形形状を改善することによって、情報分析精度を向上させた際に見込まれる効果について模式的に表現したものである。

このように先見的伝達特性を有効利用する定量評価技術は、分析値の「正確性」を高めるために有効な視点であり、特に負荷を軽減した信号処理技術を構築する際には非常に効果的に働くと言及できる。

6.3. 本研究で提案してきた信号処理技術の意義

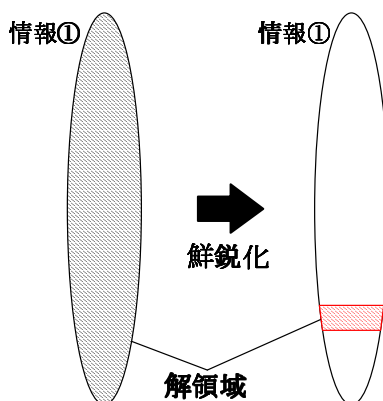


Fig. 6.15: Enhancement of state evaluation accuracy based on usage of using transfer function

6.3.3 波形特性を統合利用した選択性・正確性向上技術

偏在型波形の生起検出では，その生起規則さえ理解してしまえば診断波形の生起検出区間を限定することができ，生起検出法として選択性に優れた高度な信号処理技術を利用しなくとも十分な選択性を確保できる．このような生起規則の抽出へ多数の波形特性を統合利用すれば，生起検出を容易化することが可能である．また情報分析については，診断対象の異常現象に関する状態を分析するために注目したパラメータが，診断対象とは異なった他の異常現象に起因して変動してしまう場合には，それらを混同して分析してしまう可能性があり，単独のパラメータのみに依存して情報分析を行うことでは十分な正確性を確保できない．

このような背景から，多数の波形特性を統合的に利用し，単独の特性値に基づく信号処理以上の分析性能を獲得しようと試みた信号処理が，波形特性を統合利用する信号処理技術であった．複数の波形特性値を統合的に利用することの意義は，Fig.6.16にも示すように比較的明瞭である．すなわち，仮にひとつの波形特性のみを注視していた場合には，生起検出・情報分析のいずれであっても，計測システムの性能を向上させるなどして解の領域を狭めることは容易ではなく，十分な精度を獲得することはなかなか困難である．これに対して複数の波形特性に注視すれば，たとえ各々の波形特性に対する獲得精度は変わらなくとも，それらに共通部分があることに着目することで，比較的容易に精度を高められる可能性をもっている．

この結果として，生起検出では確率論的アプローチなどの高度な処理に頼らず，すなわち信号処理技術自身としての選択性は低下させつつも，生起検出のための信号処理としては十分な選択性を持たせることを実現した．また情報分析においても，診断対象の異常状態に相関をもつ複数の波形特性を同時に注視すれば，それらが一斉に異常を提示する状況では異常状態にある可能性がより高くなると考えられ，個々の波形特性のみに着目しては解領域が制限できずに十分な分析が難しい条件であっても，正確性に優れた分析が可能となることを明らかにすることができた．

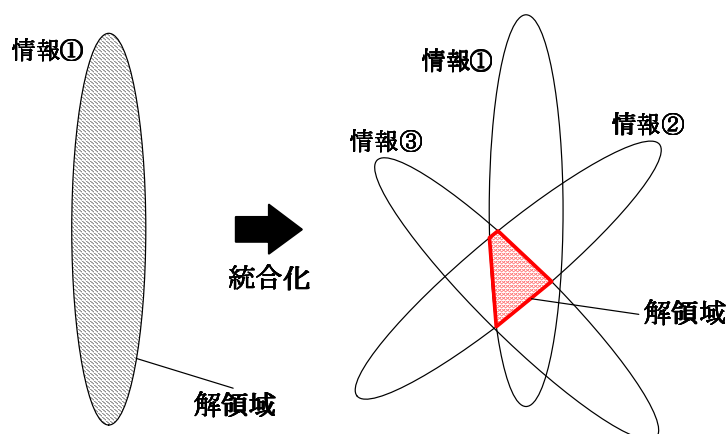


Fig. 6.16: Enhancement of state evaluation accuracy based on usage of characteristic parameters fusion method

そして波形特性を統合利用することには、もうひとつの利点、すなわち単独の波形特性に対する分析精度を追及する必要性の低さが挙げられる。単独の波形特性分析によって Fig.6.16 における統合分析と同等の十分な精度を得ようとすれば、そのための特性分析には、それ相応の精度が要求されることは明らかである。しかし波形特性分析を統合的に組み合わせる場合には、各波形特性分析の精度にはさほど高度な要求をする必要性は低くなる。Fig.6.16 はこのことも模式的に示しており、ひとつの波形特性値の解領域すなわち分析精度は統合利用をする前後で変わらないにも拘らず、複数の波形特性の共通部分に着目することによって総合的にみた診断精度を高めることが可能となり、正確性の向上には有効に作用している。

このように、統合的に波形特性値を利用する信号処理技術は、非定在性の診断波形に関する信号処理における生起検出の「選択性」と情報分析の「正確性」を容易に向上させるためのアプローチとして有用である。

6.4 本章のまとめ

本章では、本研究で提案してきた診断のための信号処理技術に関する総括として、各処理における処理機能レベルを信頼性の側面から分析・整理するとともに、診断のための信号処理技術を効果的に構築するための方法として、生起検出と情報分析の処理をカスケードに施す階層型信号処理が有効であることを見い出すとともに、その視点に基づいた信号処理の体系整理を行った。また、診断のための信号処理技術には診断対象との適応性を高めるための自由度が必要であるというひとつの知見を得た。最後に、本研究で提案された特徴的な信号処理技術、すなわち確率論的アプローチに基づく生起検出技術、「先見的伝達特性を有効利用する定量評価技術」および「波形特性を統合利用する選択性・正確性の向上技術」に関し、その意義を考察した。

第7章 結言

7.1 本論文のまとめ

本研究における議論をとおして得られた成果に関し，その研究目的に即して整理するとともに，そこから得られた結論について述べる．

第1の目的に掲げた「診断のための信号処理技術を構築する際の着眼点の明確化」に関しては，第2章を中心に議論を展開した．はじめに，時間局所性という観点から診断波形を分類するとともに，時間領域・周波数領域における基本信号処理技術による主要な診断波形への解析を試みた結果，診断のための信号処理技術が扱わなければならない診断波形と，それらに対する信号処理上の問題点を明らかにした．

具体的に述べれば，信号処理が扱わなければならない診断波形は非定在性波形であり，それらは時間局所性の相違から

- 確定型波形
- 偏在型波形
- 局在型波形

の3種類に細分され，そしてこれらの波形に対して信号処理を実現するには，

- A. 時間平均的な処理が，非定在性波形の時間局所性と整合しない
- B. 定形・定在的な波形の重ね合わせによる，非定在性波形の分析が難しい

ということが，問題点に挙げられることが浮き彫りになった．さらに診断のための信号処理技術についてより詳細に分析したところ，そこには，

- 生起検出：計測波形中に診断波形が生起しているか否かを判断する機能
- 情報分析：診断対象の異常状態を推定するための指標値を獲得する機能

の2種類の処理機能を実装しなければならないことを見い出した．また一方で，これまでに提案された異常診断と関連深い信号処理技術をいくつか採り挙げて分析したところ，

- 波形形状モデルを利用すること
- 時間局所性を付与すること

の2つが、診断のための信号処理技術を構築するための基本指針として有効であるとの結果を抽出した。

続いて第2の目的である「高度化が図られた具体的な信号処理技術の構築」に関しては、第1の目的に関する議論で得られた結論に即しながら、はじめに非定在性波形の時間局所性に適応する新たな信号処理技術について第3章から第5章において検討した。

生起位相が不確定な「局在型波形」のための信号処理については、生起検出機能の実現手法を中心に、第3章において検討した。すなわち、波形テンプレートを利用した確率論的アプローチに基づく波形生起検出技術を新たに提案し、計測波形の離散振幅値系列とテンプレートとのマッチングを条件付き確率値として獲得し、確率値を基に生起検出する手法を構築した。この結果、診断波形の時間局所性や背景雑音の影響を抑制した、選択性に優れた検出技術を構築することが可能となった。併せて情報分析技術として、提案した生起検出技術を応用する、波形パラメータ抽出法も提案した。回転機器の軸受異常診断に関するシミュレーションおよび実験を通し、これらの有効性を検証した結果、不定局在型波形に対して十分な処理性能を提供できることが示された。

生起位相情報を波形自身に内包する「偏在型波形」のための信号処理技術については、光ファイバ触針走査による紙幣診断を対象として、診断波形から得られる複数の波形特性の統合利用を軸とした信号処理の選択性・正確性を高めるための手法を、第4章において検討した。生起検出技術として、検出の容易な定在性波形より非定在性・偏在型波形の生起位相情報を抽出し、検出処理へ積極的に利用する手法を、また情報分析技術として、定在性波形から抽出された金種情報と偏在型波形から抽出された真贋情報を統合利用する紙幣の定性情報評価法を提案し、選択性と正確性を同時に高めた処理技術を確立した。実験を通してこれらの有効性を検証した結果、真贋・金種ともに十分実用にも耐えうる正解率が達成された。

また、生起位相が確定的な「確定型波形」のための信号処理では、マイクロ波レーダによるコンクリート中の鉄筋径診断を対象に、診断対象の情報分析機能の実現手法を中心に、第5章において検討した。生起検出技術では、計測波形との相関をとる相互相関包絡線法への波形形状モデルの適用ばかりでなく、差分処理による背景雑音低減処理にまで利用し、選択性の向上を図った。主題となる情報分析技術には、獲得情報の重ね合わせにより正確性の向上を図る逆投影ヒストグラム法の導入と、先見的伝達特性を基に、重ね合わせられるモデル適応度をインパルス化して再構成像の大幅な鮮鋭化を図り、正確性に優れた位置・系・材質の定量評価法を考案した。これらの結果、コンクリート模擬試験体・実構造物に対する実験では、評価精度が大きく改善した。

これらの具体的な診断波形・診断対象に関する信号処理技術の構築を通して診断性能の大幅な向上が図られることを確認できたため、信号処理技術の高度化という視点から、第2の目的の後半部に当たる「信号処理の体系整理」を試みた。ここでは、生起検出処

7.1. 本論文のまとめ

理では非定在性波形の生起位相の相違に適応した

1. 全域的検出
2. 規則的検出
3. 確定的検出

の処理機能レベル，情報分析処理では診断対象の伝達特性の相違に適応した

1. 定量評価
2. 定性評価
3. 波形パラメータ抽出

の処理機能レベルを設けること，そして診断対象の属性に関する先見知識量に応じてこれらの処理機能レベルを適応的に選択・適用していくことの有効性を指摘した．さらにそれぞれの処理機能について詳細にみれば「モデル」を介した調整の自由度が与えられていたことが確認でき，信号処理技術として調整の自由度をもつことが，診断のための信号処理技術としての必須の機能であるというひとつの知見を得た．

加えて，生起検出処理 - 情報分析処理の順に処理機能をカスケード的に適用することが，診断のための信号処理技術の信頼性・効率性を向上する可能性について指摘し，それを階層型信号処理技術として，信号処理の体系を整理した．

また診断のための信号処理技術としての枠組みを離れ，第3の目的である「信号処理技術としての新たな機能の創出」という側面からは，本研究で提案してきた以下の3つの特徴的な信号処理技術の意義に関して考察した．

- 確率論的アプローチに基づいた生起検出技術
- 先見的伝達特性に基づいた情報分析技術
- 波形特性を統合利用する選択性・正確性の向上技術

「確率論的アプローチに基づいた生起検出技術」は，背景雑音成分の低減・指標値感度の向上など，診断波形の生起を確率値の変化として扱うことによって選択性を飛躍的に高めるとともに，処理のための時間局所を自動的に特定することで効率性の向上を図ることが可能な点で，これまでにない信号波形検出のアプローチであった．また「先見的伝達特性に基づく情報分析技術」は，物理的因果関係に基づく先見知識としての伝達関数を利用することで評価値の精度を高めた．これは，センシング装置については何ら変更を加えずに，その性能的限界を越えた計測性能を付与したことと同義に当たる．診断に代表される限られたリソース内では大きな有効性をもつ．一方「波形特性を統合利用する選択性・正確性の向上技術」では，単独の波形特性に固執して評価精度を高めていくよりも，精度は低くとも容易に獲得可能な複数の波形特性を組み合わせたほうが，より信頼性・効率性に優れた結果を獲得可能であることを示した．

最後に、それぞれの議論を通して得られた診断のための信号処理技術構築に関する結論を、以下のように纏める。すなわち、非定在性波形の信号処理に際しては、時間局所を特定し生起を検出する機能として確率論的なアプローチが有効であり、伝達特性に基づいて診断波形推定を実現する機能は情報分析の精度を効果的に高めることへ有効であり、それら処理へさらに多くの波形特性を統合的に利用することが、より信号処理の精度を高める効果を生み出すことになる。そしてこれらの処理機能には、診断対象への適応性を高めるための自由度が必要とされる。

7.2 残された課題

はじめに本論文の範囲では解決に至らなかった研究全体を通した課題について説明したのち、個別の研究課題に関して残された課題について述べる。

- 信号処理技術の体系化とその効果の検証

本論文の範囲では、診断のための信号処理技術として階層型信号処理技術を挙げ、その視点から信号処理の体系について整理することを試みたが、体系化と言うには十分な検討が行えていない部分も残されている。特に階層化の効果として挙げた信頼性・効率性の向上については、定量的な検証を試みていく必要がある。

- 波形形状モデル設計の自動化

第3章における「波形テンプレート形状」、第4章の「スティックスリップ波形モデル」あるいは第5章の「伝達関数モデル」は、広い意味でいずれも診断波形の波形形状モデルとなっている。現在のまでところそれらは先見知識を基に人間の手で与えられており、診断システムとしての自動化を達成するためには、計測波形を観察しながら適応的に構築するための技術に関する検討が必須である。

本論中でも議論をしたように、波形形状モデル「診断波形の形状的特徴を表現している代表点」となっていることが重要であった。すなわち診断波形の「適切な形状的特徴」に着目しているならば、診断波形形状を厳密に規定することの無い代表点だが、診断波形の生起した僅かな時間局所候補点を探索するための波形形状モデルとして有効性をもってくる。本研究での検討における「波形形状の急峻性」のように、波形形状に関する何らかの先見知識があるならば、そこへ着目することを出発点とした波形形状モデルの自動設計法が成立し得ると考えられる。

- 信号処理技術の普遍化

本論文の検討範囲では、診断に適した信号処理技術の構築に際し、具体的なケーススタディを挙げながら議論を進めてきた。今後はより広範な対象に対して適用可能なよう一般化を進めるべきである。そのためには、さらにいくつかの診断対象への応用について検討した上で、それらを踏まえて手順・設計論等を整理し普遍化していくことが必要となる。

7.3. 今後の展望

続いて、個別の研究課題に関する課題について述べる。

- 波形テンプレートの設計指針

第3章で扱った「局在型診断波形の生起検出」においては、診断波形であるフレーキング波形の波形形状を基にして、特徴的な代表点を人為的に選択して波形テンプレートを構成した。すなわち、このように波形形状が既知な場合においても、本研究の範囲では代表点選択の基準を明確化するには至っておらず、最も効果的な検出が実現するように代表点を選択するためのアルゴリズムについて検討を加える必要がある。

- 走査時間短縮のための高速走査に関する検討

第4章で扱った「光ファイバ触針走査探査による紙幣診断」においては、触針走査速度は実用上必ずしも十分ではないため、触針の剛性や押付圧なども考慮に入れた上で、実用的な走査時間を確保するための高速走査の実現に関する検討が必要である。また本論文の範囲では透過光量変化を利用する手法では真贋診断が難しいとされるタイプの贋券試料を用意したが、光ファイバ触針による表面性状診断が有効となる凹凸の程度を正確な紙面の凹凸情報との比較によって明らかにし、提案方法による分析が可能な範囲を確認しておく必要もある。

- 埋設物推定の高精度化

第5章で扱った「マイクロ波レーダによるコンクリート中の鉄筋径診断」においては、本文中にも記したように埋設物径推定の高精度化が今後の課題として挙げられている。また逆投影処理における最適パラメータ組み合わせの検討とともに、マイクロ波伝搬速度の最適値を推定する方法の構築といったその精度の向上を図るための検討、あるいは反射位相値の詳細に着目する樹脂同士間の材質弁別など、信号処理に関するいくつかの検討項目も残している。また一方で、断面診断から3次元的な空間画像を利用した診断への拡張も大きな課題である。

7.3 今後の展望

最後に今後の展望として、本研究で議論された階層型の信号処理技術の応用について述べる。本研究では、診断波形の生起検出と、さらに生起が検出された診断波形の波形情報に基づく情報分析の、2つの処理機能を階層化することの有効性について述べた。すなわち、計測波形に対してそれらをカスケードに適用することによって、各階層段階における処理内容を診断波形の性質に整合させる自由度を与えて最適化し、診断として効果的かつ効率的な処理の構築を試みた。このような階層型信号処理の考え方は、その適用範囲が必ずしも診断のための信号処理に限定されるものではなく、多方面の計測・信号処理に関する課題へと広く応用が検討されるべきものである。

例えば本研究でもケーススタディとして挙げたマイクロ波レーダによるコンクリート内部構造探査においては，次なる課題として断面画像による評価を越えた3次元的な評価に対する検討をスタートしている [91] が，ここでも階層型の信号処理の考え方を応用した探査ステップを構築することが効果的であるとの検討結果が得られている．このような例を挙げるまでも無く他にも多くの適用先が考えられるが，そのためにも先に述べた信号処理技術としての普遍化に関する検討を進めていく必要があるといえる．

参考文献

- [1] 鳥井弘之: 科学技術と社会の共進化, 東工大クロニクル No.395, 東京工業大学広報・社会連携センター (2005)
- [2] M. Weiser: The computer for the 21st century, Scientific American, Vol.265, No.3, 94/104 (1991)
- [3] 森川, 南, 青山: STONE:環境適応型ネットワークサービスアーキテクチャ, 電子情報通信学会技報, IN2001-12, (2001)
- [4] 垣谷宏子: つながりとしての生命認識, NUCB journal of economics and information science, Vol.50, No.2, 21/32 (2006)
- [5] 阿波俊一郎: マイクロマシン技術を用いたセンサデバイスの開発と適用事例, 電子情報通信学会誌, Vol.89, No.5, 399/404 (2006)
- [6] 安藤, 田村, 戸辺, 南: センサネットワーク技術 - ユビキタス情報環境の構築に向けて, 東京電機大学出版局 (2005)
- [7] 姉齒 (あねは) 建築設計事務所による構造計算書の偽造とその対応について:
http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha05/07/071117_.html
- [8] 朝日新聞社: 社説 エレベーター事故—総合的な調査の仕組みを, 2009/7/27 付朝日新聞 (2009)
- [9] 文部科学省: 大阪教育大学附属池田小学校事件に関する遠山文部科学大臣緊急アピール, http://www.mext.go.jp/b_menu/houdou/13/06/010698.htm
- [10] 毎日新聞社: 中国製ギョーザ:基準 10 万倍超のメタミドホス検出, 2008/5/16 付毎日新聞 (2008)
- [11] 堀井秀之: 安全安心のための社会技術, 東京大学出版会 (2006)
- [12] 小林英夫: 社会の安全・安心のための評価・診断技術, 評価・診断に関するシンポジウム講演論文集, 33/38 (2004)
- [13] 藤本, 三吉, 岡本, 田中: 加速度ピックアップを用いたコンクリート構造物の傾斜クラック高精度検出, 電気学会論文誌 C, Vol.129, No.6, 1087/1093 (2009)

- [14] 蔦田, 平位, 鷺見, 伊藤, 志賀: 手すり加速度を用いたエスカレーターチェーンの弛み異常診断, 計測自動制御学会論文集, Vol.44, No.8, 622/628 (2008)
- [15] 西村, 山縣, 立野, 武田, 柘植, 松山: 空調設備の異常診断システム, 電子情報通信学会技術研究報告.R, Vol.100, No.377, 1/6 (2000)
- [16] 日本プラントメンテナンス協会設備診断技術委員会編: 設備診断技術入門, 日本プラントメンテナンス協会 (1994)
- [17] 豊田利夫: 設備診断のための信号処理の進め方, 日本プラントメンテナンス協会 (1996)
- [18] 石川正俊: 光センシングの現状と将来, 計測と制御, Vol.32, No.11, 877/883 (1993)
- [19] 藤田幸多雄: 地中埋設物探査のための3次元表示に関する研究, 東京工業大学制御システム工学科卒業論文 (2003)
- [20] 佳永翼: 2次元走査型マイクロ波レーダシステムの開発, 東京工業大学制御システム工学科卒業論文 (2009)
- [21] 安藤繁: センシングの構造とインテリジェンス, 計測と制御, Vol.36, No.3, 211/218 (1997)
- [22] 高橋, 国岡, 小沼: センサ工学概論, 朝倉書店 (1988)
- [23] 犬塚, 五福, 田中: プラント異常時における異常原因推定・提示手法に関する研究, 日本機械学会 設計工学・システム部門講演会講演論文集 2001, 65/66 (2001)
- [24] 石川芳城: 保全情報検索システム開発によるNC設備のMTTR短縮, Yamaha Motor Technical Review, No.40, 118/126 (2005)
- [25] 章, 川畑: ウェーブレット変換による異常信号診断法に関する研究, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.67, No.657, 1289/1296 (2001)
- [26] 山口, 高木, 山田, 川田: ウェーブレット解析を利用した軸振動診断: ラビングと軸受給油不足の検出, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.72, No.722, 3099/3105 (2006)
- [27] 宋, 陳, 豊田: 逐次ファジィ・ニューラルネットワークを用いた歯車装置の異常診断, 日本設備管理学会誌, Vol.10, No.1, 15/20 (1998)
- [28] 玄, 辻村: 遺伝的アルゴリズムの工学問題への応用, 日本信頼性学会誌, Vol.18, No.2, 146/155 (1996)

参考文献

- [29] P. Chen and T. Toyota: Extraction Method of Failure Signal by Genetic Algorithm and the Application to Inspection and Diagnosis Robot, IEICE Trans., Vol.78-A, No.12, 1620/1626 (1995)
- [30] 樋口知之: 粒子フィルタ, 電子情報通信学会誌, Vol.88, No.12, 989/994 (2005)
- [31] 赤尾準一: 逆フィルタを使った回転機械の音響設備診断, Yamatake Savemation Review 2001 年, 28/34 (2001)
- [32] 森下, 小畑: 信号処理, (社) 計測自動制御学会 (1982)
- [33] 豊田利夫: 回転機械診断の進め方, 日本プラントメンテナンス協会 (1991)
- [34] 長谷川, 石田, 千脇, 格内: 圧延加工における表面粗さの変動特性, 精密工学会誌 Vol.54, No.7, 1285/1290 (1988)
- [35] 設備管理技術辞典編集委員会: 設備管理技術辞典, (株) 産業技術サービスセンター (2003)
- [36] 大山真司: 信号場の概念を導入した能動的計測系の高度化に関する研究, 東京工業大学制御工学専攻学位論文 (1998)
- [37] 上田, 油田: 超音波診断における信号処理技術の現状, 日本音響学会誌, Vol.42, No.2, 132/138 (1986)
- [38] 土屋, 高木: 回転機械の振動音響診断技術 (ウェーブレット変換による回転機械の故障診断), 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.64, No.618, 465/471 (1998)
- [39] 前田, 佐野, 貴家, 原: ウェーブレット変換とその応用, 朝倉書店 (2001)
- [40] 石崎, 鳥居: 回転軸の不安定現象, 国立天文台報, (1997)
- [41] 大津政康: アコースティック・エミッションの特性と理論, 森北出版 (2005)
- [42] 小林, 鈴木, 金井, 大橋: 音・振動による診断工学, コロナ社 (2000)
- [43] 村田昇: 入門 独立成分分析, 東京電機大学出版局 (2004)
- [44] Y. Tamanoi, T. Ohtsuka and R. Ohba: Machine Diagnosis Using Acoustic Signal Processing Techniques and Special Sound Collecting Hood, IEICE Trans., Vol.E78-A, No.12, 1627/1633 (1995)
- [45] 伊庭斉志: 遺伝的アルゴリズムの基礎, オーム社 (1994)
- [46] 陳鵬: 音響・振動による機械設備の診断, 日本音響学会誌, Vol.58, No.5, 289/294 (2002)

- [47] 徳野慎一: 心電図 波形見きわめ完全ガイド, 照林社 (2005)
- [48] 岡島光治: 心電図コンピュータ診断, 中山書店 (1989)
- [49] 柳沢, 和田: 聴診・心音図診断プラクティス, 中外医学社 (1988)
- [50] 徳野慎一: 早わかり心電図読み方ノート, 照林社 (2007)
- [51] G. L. Turin: An Introduction to Matched Filters, IRE Trans. on Information Theory, Vol.6, No.3, 311/329 (1960)
- [52] 読売新聞社: 偽札判別ツール, 2005/4/6 付読売新聞 (2005)
- [53] 読売新聞社: 瞬時に偽札判別「マジックシート」, 2005/12/7 付読売新聞 (2005)
- [54] Y. Akao, K. Kobayashi, S. Sugawara and Y. Seki: Discrimination of inkjet-printed counterfeits by spur marks and feature extraction by spatial frequency analysis, Proceedings of SPIE, Vol.4677, 129/137 (2002)
- [55] 朝日新聞社: 2006/6/15 付朝日新聞 (2006)
- [56] 田中, 曹, 大山, 小林: 光ファイバ触針による布の手触り感計測のための走査方式の検討とデータ解析, 電気学会センサ・マイクロマシン部門総合研究会資料, 13/18 (1997)
- [57] 三菱レイヨン: Eska カタログ (1999)
- [58] 西澤晃一: 光ファイバ触針による表面性状の分析, 東京工業大学機械制御システム専攻修士論文 (2003)
- [59] 田中, 曹, 大山, 小林: 光ファイバ触針の走査による布の識別, 計測自動制御学会論文集, Vol.36, No.2, 151/158 (2000)
- [60] 日本の通貨偽造防止技術は世界トップクラス:
<http://www.gov-online.go.jp/useful/article/200806/2.html>
- [61] 読売新聞社: 社説 偽札事件 一刻も早く根絶すべき犯罪だ, 2005/1/18 付読売新聞 (2005)
- [62] 木寺, 橋本, 橋本, 大野: 公開特許「紙幣真偽判別方式」, 特許公報 昭 58-42913 (1983)
- [63] 的場, 曹, 大山, 小林: ヒゲ型触覚センサを用いた布の手触り感の計測, 第 36 回計測自動制御学会学術講演会予稿集, 289/290 (1997)
- [64] 田中正行: 光ファイバ触針の操作による布の手触り感の計測, 東京工業大学制御システム工学科卒業論文 (1998)

参考文献

- [65] 金森, 飯坂, 菊川, 梅原: コンクリートの打音による健全性の評価について, 日本コンクリート工学協会 コンクリート工学年次論文報告集, 601/606 (2001)
- [66] 魚本, 広野, 加藤: コンクリート構造物の非破壊検査 コンクリート構造物の耐久性診断シリーズ, 森北出版 (1990)
- [67] 小井戸純司: 鉄筋位置測定のための非破壊試験—電磁誘導法—, 非破壊検査, Vol.47, No.10, 717/722 (1998)
- [68] 吉村明彦: 鉄筋位置測定のための非破壊試験—電磁波法—, 非破壊検査, Vol.47, No.10, 712/716 (1998)
- [69] S. Tanaka and M. Wakabayashi: On Measurement of the Depth and the Diameter of Steel Bars in Reinforced Concrete Using Electromagnetic Wave(Radar), Proceedings of SICE-ICASE International Joint Conference 2006, 2555/2559 (2006)
- [70] 永島, 吉田, 増田, 小松: ゼロクロス合成開口法を用いた埋設管位置推定法, 電子情報通信学会論文誌 B-II, Vol.J76-B-II, No.7, 634/640 (1993)
- [71] 田中正行: 地中レーダ画像の高機能化表示のための複合的信号処理に関する研究, 東京工業大学機械制御システム専攻学位論文 (2003)
- [72] 西山, 鈴木, 笠井: GPR におけるデータ処理法, 地質ニュース, No.537, 53/60 (1999)
- [73] 木村, 渡辺: 図形検出力を向上させた高速一般化ハフ変換, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J83-D-II, No.5, 1256/1265 (2000)
- [74] 遠藤良二: マイクロ波地中レーダのバイスタティック適応的走査アルゴリズムの検証, 平成 16 年度 日立工業専門学院研究報告書 (2005-03)
- [75] F. Roth, P. Van Genderen and M.Verhagen: Radar response approximations for buried plastic landmines, Proceedings of SPIE 9th International Conference on Ground Penetrating Radar, Vol.4758, 234/239 (2002)
- [76] 田口玄一 監修: 品質工学便覧, (株) 日刊工業新聞社 (2007)
- [77] 山田晃: 超音波パルスエコー法の分解能向上のためのデコンボリューションフィルタ処理, 電子情報通信学会論文誌 A, Vol.J71-A, No.3, 570/579 (1988)

本研究に関する発表論文リスト

印刷論文

- [78] 高山, 田中, 早川, 大山, 小林: コンクリート構造物の診断・評価のための鉄筋および配管の位置・径推定と材質弁別, 計測自動制御学会論文誌, Vol.43, No.9, 741/748 (2007-09)
- [79] 高山, 大山, 小林: 光ファイバ触針走査による表面性状情報を利用した紙幣の真贋・金種判別, 電気学会論文誌 E, Vol.128, No.2, 34/40 (2008-02)
- [80] 高山, 大山, 小林: 波形テンプレートを利用する局在信号の検出と波形形状推定, 電気学会論文誌 C, Vol.128, No.12, 1773/1780 (2008-12)

国際学会発表論文

- [81] S. Kumagai, J. Takayama, S. Ohyama and A. Kobayashi: Fault Detection using Multi-order Conditional Probability Density Distribution, Proceedings of SICE Annual Conference 2002, 1531/1534 (2002-08)
- [82] J. Takayama, S. Ohyama and A. Kobayashi: Detection of Failed State based on Variance of Periodic Sampling Signals, Proceedings of SICE Annual Conference 2005, 2149/2154 (2005-08)
- [83] J. Takayama, T. Tanaka, A. Hayakawa, S. Ohyama and A. Kobayashi: Enhanced Discrimination for Boundary and Material of Buried Objects in Concrete Structure using Microwave Subsurface Radar, Proceedings of SICE-ICASE International Joint Conference 2006, 272/277 (2006-10)
- [84] J. Takayama, T. Miyagawa and S. Ohyama: Advanced Visualization of Inner Concrete Structure using Microwave Subsurface Radar, Proceedings of SICE 2008, 1967/1972 (2008-08)
- [85] J. Takayama, T. Yoshinaga, A. Hayakawa and S. Ohyama: 3D image reconstruction of reinforce bar and pipe using microwave handy scanner, Proceedings of ICCAS-SICE 2009, 3387/3392 (2009-08)

国内口頭発表論文

- [86] 村山, 高山, 大山, 小林: 故障検知のための高次同時確率分布信号分析, 計測自動制御学会第40回学術講演会予稿集, 105A-4 (2001-07)

参考文献

- [87] 高山, 久保田, 大山, 小林: 光ファイバ触針走査による表面性状に起因する特徴的波形成分を利用した紙幣の真贋・状態判別, 電気学会マイクロマシン・センサシステム研究会予稿集, 29/34 (2005-06)
- [88] 高山, 大山, 小林: 故障診断のための確率密度関数の微小変化を利用した局所的故障波形の検出, 第 22 回センシングフォーラム資料, 3/8 (2005-09)
- [89] 高山, 田中, 早川, 大山, 小林: 境界逆投影ヒストグラム法を利用したコンクリート構造物における埋設物の画像鮮鋭化と材質弁別, 第 23 回センシングフォーラム資料, 333/338 (2006-10)
- [90] 高山, 田中, 早川, 大山, 小林: コンクリート構造物の診断・評価のための鉄筋および配管の位置・径推定と材質弁別, 第 24 回センシングフォーラム資料, 338/345 (2007-10)
- [91] 高山, 宮川, 大山: 簡易的なマイクロ波レーダ 2 次元走査装置によるコンクリート内部構造の可視化, 第 25 回センシングフォーラム資料, 211/216 (2008-09)
- [92] 高山, 佳永, 早川, 大山: マイクロ波レーダによるコンクリート構造物診断のための鉄筋・管の径推定, 第 26 回センシングフォーラム資料, 77/82 (2009-09)

特許

- [93] 早川, 大島, 小澤, 大山, 高山, 小林, 田中: 非破壊探査装置及びその方法並びにプログラム - 特許第 4318189 号 (2009-06 取得)

本研究以外の発表論文リスト

印刷論文

- [94] 田中, 高山, 大山, 小林: 地中探査レーダのための逆投影ヒストグラム法による画像再構成, 計測自動制御学会論文集, Vol.38, No.9 (2002-09)
- [95] 田中, 高山, 大山, 小林: 地中レーダにおけるバースタティック走査による地中埋設物画像の再構成, 計測自動制御学会論文集, Vol.39, No.4, 325/331 (2003-04)
- [96] 田中, 高山, 大山, 小林: マイクロ波地中レーダのためのモデル適応度による伝搬時間推定, 計測自動制御学会論文集, Vol.39, No.4, 332/341 (2003-04)
- [97] 鳥海, 高山, 大山, 小林: 帯関数を用いたパネルの比較判別能力の分析, 計測自動制御学会論文集, Vol.39, No.8, 709/716 (2003-08)
- [98] S. Ohyama, J. Iizuka, J. Takayama and A. Kobayashi: Position measurement an enclosed signal field with pulse-width-modulated function, Sensors and Actuators A, Vol.113, 54/59 (2004-01)
- [99] H. Go, T. Ogawa, J. Takayama, S. Ohyama and A. Kobayashi: Current-division-type variable spatial filtering detector with multi-valued weighting functions, Sensors and Actuators A, Vol.112, 87/93 (2004-04)
- [100] 篠原, 高山, 大山, 小林: X線CT画像を利用した織物構造の分析, 計測自動制御学会論文集, Vol.40, No.10, 1000/1007 (2004-10)
- [101] 田中, 高山, 大山, 小林: 地中レーダのための微小鏡面モデルに基づく境界面方向推定および画像再構成, 計測自動制御学会論文集, Vol.41, No.1, 8/15 (2005-01)
- [102] S. Ohyama, I. Yoshida, J. Takayama and A. Kobayashi: Enclosed signal field with level difference and its application to position measurement for multiple objects, Sensors and Actuators A, Vol.119, 575/582 (2005-05)
- [103] 篠原, 高山, 大山, 小林: X線CT画像による3次元ボクセルデータを利用した織物構造の分析, 計測自動制御学会論文集, Vol.41, No.11, 879/885 (2005-11)
- [104] H.Go, J.Takayama, S.Ohyama and A.Kobayashi: Integrated Current-Mode Spatial Filtering Detector With Variable Multi-Valued Weighting, IEEE Transactions on Sensors and Micromachines, Vol.126, No.2, 47/53 (2006-02)
- [105] S. Ohyama, Y. Sasagawa, J. Takayama and A. Kobayashi: Enclosed microphone array system with point-listening characteristics based on adjustment of complex weighting, Sensors and Actuators A, Vol.126, 348/354 (2006-02)

参考文献

- [106] S. Ohyama, K. Tanaka and J. Takayama: 2-D localization system by M-sequence encoded laser beam scanning, Chinese Journal of Scientific Instrument, Vol.28, No.3, 403/413 (2007-03)
- [107] S. Ohyama, H. Iwasawa and J. Takayama: 3D attitude measurement by means of spread spectrum modulated ultrasonic wave, Chinese Journal of Scientific Instrument, Vol.28, No.4, 590/596 (2007-04)
- [108] S. Ohyama, Ali Husein Alasiry, J. Takayama and A. Kobayashi: Determining 2D positions of sensor network nodes for temperature distribution measurement, Sensors Actuators A, Vol.135, 203/208 (2007-04)
- [109] 鳥海, 小林, 高山, 大山: 逐次一対比較法の提案, 計測自動制御学会論文集, Vol.43, No.10, 839/846 (2007-10)
- [110] T. Shinohara, J. Takayama, S. Ohyama and A. Kobayashi: Analysis of Woven Fabric Structure using X-ray CT Images, Trans. of the Society of Instrument and Control Engineers, Vol.E-4, No.1, 50/58 (2007-11)
- [111] 山田, 高山, 大山: 非計量多次元尺度法による受信電波強度の大小関係に着目した無線端末の位置計測, 電子情報通信学会論文誌 B, Vol.J90-B, No.12, 1314/1325 (2007-12)
- [112] S. Ohyama, T. Oga, K. Oshima and J. Takayama: Acoustic CT system for temperature distribution measurement, Chinese Journal of Scientific Instrument, Vol.29, No.5, 897/902 (2008-05)
- [113] 山田, 高山, 大山: 複数の無線接続強度情報を用いた距離不等式に基づく無線端末の位置計測, 電子情報通信学会論文誌 B, Vol.J91-B, No.6, 685/694 (2008-06)
- [114] T. Shinohara, J. Takayama, S. Ohyama and A. Kobayashi: Extraction of Yarn Positional Information from Three-dimensional CT Image of Textile Fabric Using a Yarn Model for its Structure Analysis Chinese Journal of Scientific Instrument, Vol.29, No.8, 1569/1576 (2008-08)
- [115] T. Shinohara, J. Takayama, S. Ohyama and A. Kobayashi: Automatic Weave Diagram Construction from Yarn Positional Data of Woven Fabric, Textile Research Journal, Vol.78, No.9, 745/751 (2008-09)
- [116] S. Ohyama, J. Takayama, Y. Watanabe, T. Takahoshi and K. Oshima: Temperature distribution and wind vector measurement using ultrasonic CT based on the time of flight detection, Sensors and Actuators A, Vol. 151, No.2, 159/167 (2009-3)

- [117] T. Shinohara, S. Ohyama, J. Takayama and A. Kobayashi: Extraction of Yarn Positional Information from Three-dimensional CT Image of Textile Fabric Using Yarn Tracing with Filament Model for Structure Analysis, Textile Research Journal, Vol.79, No.3, 10/15 (2009-3)

国際学会発表論文

- [118] T. Shinohara, J. Takayama, S. Ohyama and A. Kobayashi: Three-dimensional Reconstruction of Textile Structure Using Discrete Cross Sectional Images to Analyze Fabric Weave Structure, Proceedings of ICCAS 2001, 250/253 (2001-10)
- [119] J. Takayama, S. Ohyama and A. Kobayashi: Realization of High Precision Position Measurement System Using M-sequence Encoded Laser Beam Scanning, Proceedings of ICCAS 2001, 883/886 (2001-10)
- [120] F. Toriumi, J. Takayama, S. Ohyama and A. Kobayashi: Analysis of Inspection Panel's Ability Using BMPC Method, Proceedings of ICCAS 2001, 1189/1192 (2001-10)
- [121] H. Go, J. Takayama, S. Ohyama and A. Kobayashi: Variable Multi-valued Spatial Filter Detector with High Speed Exchangeable Weighting Function and Its Application, Proceedings of ICCAS 2002, 1302/1306 (2002-10)
- [122] F. Toriumi, J. Takayama, S. Ohyama and A. Kobayashi: New Sequential Paired Comparison Method to Decrease Number of Comparison Using BMPC Method, Proceedings of ICCAS 2002, 1517/1520 (2002-10)
- [123] J. Takayama, M. Mada, S. Ohyama and A. Kobayashi: Detection and Analysis of Moving Objects using Time Series Stereo Difference Images, Proceedings of SICE Annual Conference 2002, 228/232 (2002-08)
- [124] F. Okuyama, J. Takayama, S. Ohyama and A. Kobayashi: A Study on Determination of a Sound Wave Propagation Direction for Tracing a Sound Source, Proceedings of SICE Annual Conference 2002, 355/357 (2002-08)
- [125] H. Nakano, J. Takayama, S. Ohyama and A. Kobayashi: A Study on Encoded Laser Beam Scanning Type Signal Field -2- - Improvement of Position Measurement Accuracy Using Phase Shift Value of Observed Signal - , Proceedings of SICE Annual Conference 2002, 1474/1478 (2002-08)
- [126] N. Iguchi, M. Tanaka, J. Takayama, S. Ohyama and A. Kobayashi: Identification of Transmitting Wave Form for Deconvolution Process - A Study on High Resolution

参考文献

- Microwave Subsurface Rader Image -1- - , Proceedings of SICE Annual Conference 2002, 1891/1893 (2002-08)
- [127] M. Tanaka, J. Takayama, S. Ohyama and A. Kobayashi: Propagation Time Estimation for Microwave Subsurface Rader by Novel Cross-correlation and Envelope Method - A Study on High Resolution Microwave Subsurface Rader Image -2- - , Proceedings of SICE Annual Conference 2002, 1894/1897 (2002-08)
- [128] F. Toriumi, J. Takayama, S. Ohyama and A. Kobayashi: New Method for Incomplete Paired Comparison using the BMPC Method, Proceedings of SICE Annual Conference 2002, 2141/2143 (2002-08)
- [129] M. Tanaka, J. Takayama, S. Ohyama and A. Kobayashi: Buried Object Discrimination with Reflection Phase Characteristics for Microwave Subsurface Radar, Proceedings of ICCAS 2002, 1481/1485 (2002-10)
- [130] T. Shinohara, J. Takayama, S. Ohyama and A. Kobayashi: Analysis of Textile Fabric Structure with the CT Images, Proceedings of SICE Annual Conference 2003, 234/238 (2003-08)
- [131] T. Shinohara, J. Takayama, S. Ohyama and A. Kobayashi: Analysis of Knit Fabric Structure with its Voxel Data, Proceedings of ICCAS 2003, 53/56 (2003-10)
- [132] F. Toriumi, J. Takayama, S. Ohyama and A. Kobayashi: Analysis of Individual Differences of Examinee Using BMPC Method, Proceedings of ICCAS 2003, 61/64 (2003-10)
- [133] H. Go, J. Takayama, S. Ohyama and A. Kobayashi: Integration of Variable Spatial Filter Detector with Multi-valued Weight Values, Proceedings of ICCAS 2003, 921/926 (2003-10)
- [134] T. Shinohara, J. Takayama, S. Ohyama and A. Kobayashi: Analysis of Textile Fabric Structure Based on Three-dimensional Fiber Model Matching Method, Proceedings of SICE Annual Conference 2004, 399/403 (2004-08)
- [135] T. Shinohara, J. Takayama, S. Ohyama and A. Kobayashi: Yarn Segmentation from 3-D Voxel Data for Analysis of Textile Fabric Structure, Proceedings of ICCAS 2005, 877/881 (2005-06)
- [136] S. Ohyama, Ali Husein Alasiry, J. Takayama and A. Kobayashi: Sensor Nodes Localization for Temperature Distribution Measurement System, Proceedings of ICCAS 2005, 1781/1786 (2005-06)

- [137] D. Sannomiya, H. Kitano, J. Takayama, S. Ohyama and A. Kobayashi: Multiplexed CSP Analysis for Multiple Sound Sources Localization using Sparse Microphone Array, Proceedings of SICE Annual Conference 2005, 172/175 (2005-08)
- [138] T. Shinohara, Y. Ueda, J. Takayama, S. Ohyama and A. Kobayashi: Automatic Weave Diagram Construction from Yarn Positional Data of Woven Fabric, Proceedings of SICE Annual Conference 2005, 1071/1075 (2005-08)
- [139] H. Go, J. Takayama, S. Ohyama and A. Kobayashi: Adaptive Measurement System using Integrated Spatial Filtering Detector Chip, Proceedings of SICE Annual Conference 2005, 1705/1710 (2005-08)
- [140] S. Yamada, R. Enomoto, J. Takayama and S. Ohyama: Sensor Nodes Localization Based on Inequalities of Electric Field Intensity, Proceedings of the 4th IEEE International Conference on Sensors, 82 (2005-11)
- [141] T. Shinohara, J. Takayama, S. Ohyama and A. Kobayashi: Extraction of Yarn Positional Information from 3-D Voxel Data for Analysis of Textile Fabric Structure, Proceedings of SICE-ICASE International Joint Conference 2006, 2284/2289 (2006-10)
- [142] S. Yamada, J. Takayama and S. Ohyama: Sensor Node Localization Based on Inequalities of Radio Field Intensity -Comparison of Simulation and Experiments-, Proceedings of SICE-ICASE International Joint Conference 2006, 1947/1952 (2006-10)
- [143] H. Iwasawa, J. Takayama and S. Ohyama: A 3-D Attitude Measurement Method using Spread Spectrum Modulated Ultrasonic Wave, Proceedings of SICE-ICASE International Joint Conference 2006, 2802/2807 (2006-10)
- [144] T. Shinohara, J. Takayama, S. Ohyama and A. Kobayashi: Yarn Segmentation Based on Filament Direction in 3-D CT Images for Structure Analysis of Textile Fabric, Proceedings of IECON 2006, 3338/3343 (2006-11)
- [145] T. Shinohara, J. Takayama, S. Ohyama and A. Kobayashi: Yarn segmentation based on filament direction in 3D CT images for structure analysis of textile fabric, Proceedings of ISIE2007, 1633/1638 (2007-06)
- [146] J. Takayama, Y. Watanabe, T. Takahoshi, K. Ohshima and S. Ohyama: Temperature distribution and wind velocity vector measurement using ultrasonic CT technique, Proceedings of SICE Annual Conference 2007, 2418/2423 (2007-09)

参考文献

- [147] S. Ohyama, K. Ohshima and J. Takayama: Temperature distribution and wind vector measurement using ultrasonic CT based on time of flight detection, Proceedings of ICCAS 2007, 165/170 (2007-10)
- [148] S. Ohyama, J. Takayama and K. Ohshima: Acoustic CT System for Temperature Distribution and Wind Velocity Vector Measurement, Proceedings of International Congress on Image and Signal Processing, 13/17 (2008-05)
- [149] S. Yamada, J. Takayama and S. Ohyama: Wireless Sensor Nodes Localization based on Multiple Range Data Fusion, Proceedings of International Conference on Networked Sensing Systems, 207/210 (2008-06)
- [150] S. Ko, J. Takayama and S. Ohyama: A Novel RF Symmetric Double Sided Two Way Range Finder based on Vernier Effect, Proceedings of ICCAS 2008, 1802/1807 (2008-10)
- [151] S. Ohyama, T. Oga and J. Takayama: Temperature Distribution Measurement Using Acoustic CT and Cooling Effect Evaluation of Fine Water Mist, Proceedings of IEEE International Conference on Sensors, 1253/1256 (2008-10)
- [152] S. Ko, J. Takayama and S. Ohyama: Short range measurement using RF signal propagation time based on vernier effect, Proceedings of ICCAS-SICE 2009, 1956/1961 (2009-08)
- [153] S. Ko, J. Takayama and S. Ohyama: RF time of flight measurement based on vernier effect for short distance ranging, Proceeding of IEEE International Conference on Sensors 2009, 2/5 (2009-10)
- [154] S. Ko, J. Takayama and S. Ohyama: Experimental Study on Time of Flight Measurement System Based on Vernier Effect, Proceedings of the 26th Sensor Symposium, 36/39 (2009-10)
- [155] R. Fukushima, J. Takayama and H. Hachiya: Estimation of acoustic reflection characteristics of human target, Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics, Vol.30, 235/236 (2009-11)

国内口頭発表論文

- [156] 高山, 戸塚, 真田, 北川: 比例制御弁を用いた乗用車用自動変速機油圧回路のシミュレーション, 第15回シミュレーション・テクノロジー・コンファレンス発表論文集, 105 (1996-06)

- [157] 高山, 曹, 大山, 小林: 光源長を考慮したズーミング機能の基礎特性測定 囲い込み信号場に関する研究-第9報-, 計測自動制御学会第36回学術講演会予稿集, 891/892 (1997-08)
- [158] 高山, 塚田, 曹, 大山, 小林: ズーミング機能を用いた高精度位置計測の実現, 計測自動制御学会第37回学術講演会予稿集, 633/634 (1998-08)
- [159] 田中, 高山, 大山, 小林: マイクロ波地中レーダを利用した逆投影ヒストグラム法による地中埋設管の検出, 第43回自動制御連合講演会予稿集, 231/232 (2000-11)
- [160] 篠原, 高山, 大山, 小林: 離散的断面画像を利用した織物の3次元糸目構造再構成, 計測自動制御学会第40回学術講演会予稿集, 101A-3 (2001-07)
- [161] 小森, 高山, 大山, 小林: M系列を用いたコード化変調レーザビーム走査による位置同定システム, 計測自動制御学会第40回学術講演会予稿集, 102C-3 (2001-07)
- [162] 吉田, 高山, 大山, 小林: 座標軸分離走査型囲い込み信号場の設計, 計測自動制御学会第40回学術講演会予稿集, 102C-4 (2001-07)
- [163] 鈴木, 田中, 高山, 大山, 小林: 送信波形の広がりを考慮するマイクロ波地中レーダ画像の鮮鋭化, 計測自動制御学会第40回学術講演会予稿集, 201B-1 (2001-07)
- [164] 田中, 高山, 大山, 小林: バイスタティックレーダによる地中埋設物形状検出アルゴリズムの検討, 計測自動制御学会第40回学術講演会予稿集, 201B-2 (2001-07)
- [165] 三宮, 高山, 大山, 小林: 布表面の幾何学的構造に着目した手触り感の計測, 計測自動制御学会第40回学術講演会予稿集, 302C-4 (2001-07)
- [166] 鳥海, 高山, 大山, 小林: BMPC法を用いた被験者の個人差分析, 計測自動制御学会第40回学術講演会予稿集, 302C-5 (2001-07)
- [167] 鳥海, 高山, 大山, 小林: 帯関数を用いたパネルの識別能力分析, 第18回センシングフォーラム資料, 59/63 (2001-10)
- [168] 田中, 高山, 大山, 小林: マイクロ波地中レーダのための伝達関数モデルの検討, 第18回センシングフォーラム資料, 113/118 (2001-10)
- [169] 鳥海, 高山, 大山, 小林: 帯関数を用いたパネルの検査能力評価, 第4回日本感性工学会大会予稿集, 202 (2002-09)
- [170] 鳥海, 高山, 大山, 小林: 逐次比較による一対比較処理法, 第19回センシングフォーラム資料, 169/173 (2002-09)
- [171] 田中, 高山, 大山, 小林: マイクロ波伝播速度を仮定しない点的埋設物位置座標の同定, 第19回センシングフォーラム資料, 393/398 (2002-09)

参考文献

- [172] 高山, 田中, 大山, 小林: マイクロ波地中レーダのための微小鏡面モデルに基づく画像再構成, 第 20 回センシングフォーラム資料, 25/30 (2003-09)
- [173] 鳥海, 高山, 大山, 小林: 生きる力の計測, 第 20 回センシングフォーラム資料, 377/382 (2003-09)
- [174] 鳥海, 高山, 大山, 小林: 生きる力の尺度付け, 第 5 回日本感性工学会大会予稿集, 96 (2003-11)
- [175] 山田, 榎本, 高山, 大山, 小林: センサネットワークにおける電波強度の大小関係情報に基づくノード位置推定, 電気学会マイクロマシン・センサシステム研究会予稿集, 11/16 (2005-06)
- [176] S. Yamada, R. Enomoto, J. Takayama and S. Ohyama: Evaluation of Initial Arrangements for Sensor Nodes Localization Based on Inequalities of Electric Field Intensity, Proceedings of the 22nd Sensor Symposium, 421/424 (2005-10)
- [177] D. Sannomiya, H. Kitano, J. Takayama, S. Ohyama and A. Kobayashi: Multiplexed CSP Analysis for Multiple Sound Sources Localization -Improvement of TDOA Estimation and Determination of Sound Source Quantity-, Proceedings of the 22nd Sensor Symposium, 392/397 (2005-10)
- [178] 三宮, 大島, 高山, 大山, 小林: 短時間信号に対する相関処理の性質を考慮した M-CSP 法による複数音源の音波到来時間差推定, 第 23 回センシングフォーラム資料, 17/21 (2006-10)
- [179] 篠原, 高山, 大山, 小林: 糸位置情報推定に基づく織編物の構造分析, 第 23 回センシングフォーラム資料, 91/96 (2006-10)
- [180] 山田, 高山, 大山: 電波強度不等式に基づく屋内・屋外におけるノード位置特定, 第 23 回センシングフォーラム資料, 97/102 (2006-10)
- [181] S. Yamada, J. Takayama and S. Ohyama: Range-Inequality-Based Localization using Comparisons of Minimum Hop Count for Sparse Wireless Sensor Networks, Proceedings of the 24th Sensor Symposium, 441/444 (2007-10)
- [182] 山田, 高山, 大山: 最小ホップ数と受信電波電力に基づく距離不等式による無線センサ位置計測の高精度化, 第 24 回センシングフォーラム資料, 42/47 (2007-10)
- [183] 三村, 山田, 高山, 大山: 距離不等式に基づく団体球技選手の位置計測に関する研究, 第 25 回センシングフォーラム資料, 288/293 (2008-09)
- [184] 高, 高山, 大山: バーニア効果に基づく RF 飛行時間計測のための基礎的研究, 第 26 回センシングフォーラム資料, 277/282 (2009-09)

- [185] 手嶋, 大島, 高山, 大山: M-CSP 法を用いた実作業音の到来時間差に基づく人物位置推定, 第 26 回センシングフォーラム資料, 142/147 (2009-09)
- [186] 福島, 高山, 蜂屋: 空中超音波を用いた人表面の振動計測, 日本超音波医学会基礎技術研究会資料, Vol.2009, No.4, 38/43 (2009-12)

謝辞

本研究を進めるに当たりご指導を頂いた，東京工業大学 大学院理工学研究科機械制御システム専攻 大山真司准教授に心より感謝致します．先生は本学位論文審査員の主査であり，筆者が学生の頃からご指導を頂いてきました．そして現在は共同研究者でもあり，本研究はまた，先生から頂いた多くのアイデアやヒントを参考にして検討を重ねてきた成果であるとも言えます．審査員の機械制御システム専攻 北川能教授，蜂屋弘之教授，奥富正敏教授，田中正行准教授には，論文をまとめるに当たって適切なご助言を頂きました．深く御礼を申し上げます．

本論文は筆者が東京工業大学に勤務した 2000 年度から現在までの研究成果を纏めたものでありますが，この間 2004 年度末までご指導を頂いた，帝京平成大学 小林彬教授 (元東京工業大学 教授) に深謝致します．先生からは，研究に関するアドバイスのみならず，研究者としての物事の考え方など数々のことも学ばせて頂きました．さらに遠藤由紀元事務官，山崎明子事務官，石川寛子事務官，阿達三枝事務員には，ご支援を頂きましたことを感謝致します．

また，本研究を遂行するに当たって実験機器・機材等をサポートして頂きました，大島一夫氏 (現在 NTT ファシリティーズ総合研究所)，早川輝氏をはじめとする NTT ファシリティーズの皆さま，そして緑川賢司氏をはじめとする ミナロの皆さまに感謝致します．

東京工業大学 制御システム工学科・機械制御システム専攻 小林彬・大山真司研究室においては，多くの学生諸君と一緒に研究を進めてきました．本論文はそれら成果から得られた知見に基づき，まとめられています．以下に改めて氏名を記すことにより，感謝の意を表したいと思います．

村山大君 (平成 12 年度修士論文)，熊谷周亮君 (平成 13 年度卒業論文，平成 15 年度修士論文)，久保田信也君 (平成 14 年度卒業論文，平成 16 年度修士論文)，伊藤寛之君 (平成 15 年度卒業論文)，田中隆行君 (平成 15 年度卒業論文，平成 17 年度修士論文)，清水快男君 (平成 16 年度修士論文)，野口潤君 (平成 16 年度卒業論文)，渡辺友希君 (平成 16 年度卒業論文)，宮川忠久君 (平成 17 年度卒業論文，平成 19 年度修士論文)，平岡英資君 (平成 18 年度修士論文)，佳永翼君 (平成 20 年度卒業論文)

最後に，研究を進めるに当たって筆者を見守り・支えてくれた家族，特に本論文の執筆期間中に他界した父に感謝したいと思います．ありがとうございました．