

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	能動型匂い・ガス源探知システムの研究
Title(English)	
著者(和文)	石田寛
Author(English)	HIROSHI ISHIDA
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:甲第3447号, 授与年月日:1997年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:
Citation(English)	Degree:Doctor of Engineering, Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第3447号, Conferred date:1997/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

能動型匂い・ガス源探知システムの研究

東京工業大学 理工学研究科
電気・電子工学専攻 博士後期課程

石田 寛

平成9年1月

指導教官 森泉 豊榮 教授 中本 高道 助教授

緒論

近年、防災用警報器の開発を主な目的にガスセンサの研究が進み、実用化に至っている。半導体工場のように危険ガスを扱う場所には必ず警報器が設置されており、また家庭にも都市ガス警報器が広く普及している。しかし、警報器の設置場所を注意深く選ぶ必要がある。設置場所を誤ると、高濃度の危険ガスが部屋に充満するまで警報が発せられないこともある。

これに対し、犬などの生物は空気中を漂う匂いを辿り、その発生源を探し出す能力を持つ。この生物行動と同様に、警報器を移動して匂い・ガスの発生源を探知する装置が開発されれば、ガス漏れ箇所や火元の探索に非常に有効である。阪神大震災時には地中のガス管が寸断され、破損箇所を探索して修復するまでに長時間を要した。このような場合にも匂い・ガス源の探知システムが望まれている。

このような災害時の危険ガス探知を想定すると、ロボットシステムにより匂い源の探索を自動化することが望ましい。現在までに、視覚や熱センサを用いて初期火災を探索する警備ロボットなどが研究されている。しかし、目標物発見のための手がかりが嗅覚によってしか得られない場合や、嗅覚情報が他の感覚情報に先立って得られる場合があり、嗅覚情報を利用した目標物の探索の意義は大きい。例えば、人間が火災に気付くのは大抵、焦げ臭い匂いを感じることによる。部屋を出て廊下や他の部屋を探索して初めて、炎を発見し、異常な高温を検出することができる。

このような現状をふまえ、本研究では移動して匂い・ガスの発生源を探索するアクティブセンシングシステムの開発を目的においた。空気中を漂う匂いの分布は非常に不安定であるため、従来、このような匂い源探知システムの研究はほとんど行われていない。数例有る研究のほとんどは不安定な濃度勾配を用いて匂い源を探索しており、信頼性が低い。これに対し、本研究では二つのシステムを提案する。一つは、濃度情報に加えて匂いを運ぶ風の情報を利用する自走匂い源探知システムである。二つめは能動サンプリング型匂い源探知システムと名付けられており、能動的に匂いを採取する行為を通じ、匂い源方向に関する情報を引き出す。

こうしたロボットシステムによる匂い源探知の可能性を実験的に示したのは本研究が初めてであり、本論文に述べる成果が今後、ロボットの応用分野を広げていくと期待される。

目次

緒論	i
1 総論	1
1.1 はじめに	1
1.2 生物の匂い源探知行動	2
1.2.1 流体中を広がる匂いの分布	2
1.2.2 生物の受容する匂い情報	6
1.2.3 単細胞動物の匂い源探知行動	10
1.2.4 無脊椎動物の匂い源探知行動	14
1.2.5 脊椎動物の匂い源探知行動	16
1.3 蛾の匂い源探知行動	17
1.3.1 実験装置	17
1.3.2 行動メカニズムのモデル	19
1.3.3 行動メカニズム解明のための神経生理学的アプローチ	24
1.4 ガスセンサ、匂いセンサの研究動向	26
1.4.1 匂い・ガス源探知に必要なセンサの条件	27
1.4.2 センサの種類	28
1.4.3 複数センサの応答パターンを利用した匂い・ガスの識別	31
1.5 アクティブセンシングに関する研究動向	32
1.5.1 視覚のアクティブセンシング	34
1.5.2 触覚のアクティブセンシング	37
1.5.3 ロボットによる環境認識	40
1.5.4 嗅覚のアクティブセンシング	43
1.6 ガスセンサを搭載したロボットの研究動向	48
1.6.1 匂い源探知システム	48
1.6.2 匂いのマーキングを利用したロボットの誘導	54
1.6.3 生物を模倣したロボットシステム	54
1.7 本研究の目的と構成	57

2	センサ応答特性と実験環境	63
2.1	はじめに	63
2.2	半導体ガスセンサ	63
2.2.1	原理	63
2.2.2	センサの応答特性と感度校正法	65
2.3	風向判定プローブ	70
2.3.1	サーミスタ式風速センサの原理と応答特性	70
2.3.2	風向判定方法	72
2.4	実験環境	74
2.4.1	風洞	74
2.4.2	クリーンルーム	76
2.5	乱流拡散理論による環境のモデル化	79
2.5.1	乱流拡散方程式とロバートの解	81
2.5.2	ロバートのプルームモデルの適用結果	83
2.6	まとめ	87
3	ガスセンサと風速センサを用いた自走型匂い源探知システム	89
3.1	はじめに	89
3.2	システムの構成	89
3.3	匂い源探知アルゴリズム	90
3.3.1	ステップバイステップ法	90
3.3.2	ジグザグ接近法	93
3.4	風洞実験によるジグザグ接近法の改良	95
3.4.1	プルームの方向判定による探知開始方向の改善	95
3.4.2	方向転換時のプルーム蛇行方向の判定	98
3.4.3	地図の導入による同一地点停留の防止	100
3.5	まとめ	102
4	自走型探知システムの現実環境への適用	107
4.1	はじめに	107
4.2	探知システムの構成	107
4.3	複数の風源に対応した探知アルゴリズム	109
4.3.1	フェーズ 1: 探知開始	110
4.3.2	フェーズ 2: プルームの探索	112
4.3.3	フェーズ 3: 後退	113
4.3.4	フェーズ 4: プルームのトラッキング	113
4.3.5	フェーズ 5: スキャン	114
4.4	匂い源探知実験の結果	115
4.4.1	フェーズ切り替えの効果	115
4.4.2	風と垂直方向のスキャンの効果	117

4.5	まとめ	120
5	自走型探知システムによる匂い源のリモートセンシング	123
5.1	はじめに	123
5.2	匂い源位置の推定アルゴリズム	124
5.2.1	ガスセンサの応答時系列のモデル化	124
5.2.2	拡張カルマンフィルタによるパラメータ推定法	128
5.2.3	匂い源位置推定の手順	131
5.3	匂い源探知実験	132
5.3.1	匂い源位置の推定実験	132
5.3.2	推定匂い源位置を利用した匂い源探知	137
5.4	まとめ	137
6	能動サンプリング型匂い源探知システム	141
6.1	はじめに	141
6.2	カイコガの匂い源探知行動の観察	142
6.2.1	実験方法	142
6.2.2	結果	142
6.3	能動サンプリング型匂い源探知システムの構築と評価	146
6.3.1	システムの構造	146
6.3.2	風洞実験によるシステムの評価	147
6.4	クリーンルームにおける3次元匂い源探知	149
6.4.1	3次元探知を目指したシステムの改良	149
6.4.2	匂い源探知実験の結果	154
6.5	まとめ	154
7	匂い源探知コンパス	159
7.1	はじめに	159
7.2	匂い源探知コンパスの構造と原理	159
7.2.1	匂い源探知コンパスの構造	159
7.2.2	ブルーム変形のモデル化	163
7.2.3	評価実験	165
7.3	匂い源探知実験の結果	171
7.3.1	2次元コンパスによる匂い源探知実験	171
7.3.2	3次元コンパスによる匂い源探知実験	174
7.4	まとめ	179
8	匂い源探知コンパスの高速化	181
8.1	はじめに	181
8.2	高速方向推定アルゴリズム	181
8.2.1	センサ応答のモデル化	181

8.2.2	匂い源方向の推定法	183
8.2.3	予備実験結果	185
8.3	高速回転型匂い源探知コンパス	189
8.3.1	方向推定アルゴリズムの改良	189
8.3.2	ファンの風量の最適化	191
8.3.3	実験結果	191
8.4	まとめ	199
9	結論	203
9.1	本研究で得られた成果	203
9.2	今後の展望	204

Chapter 1

総論

1.1 はじめに

生物の多くは、漂ってくる匂いを辿ってその発生源を探し出すことができる。代表的な例として、瓦礫に埋もれた人を探索する救助犬や、警察犬、麻薬犬が挙げられる。また、夜行性動物や深海魚の場合には、仲間や餌の場所などを探す際に視覚がほとんど役に立たない。彼らにとって嗅覚は、生存のために必要不可欠な感覚である。

このような生物の匂い源探知行動は、その驚くべき能力の高さ故に多くの生物学者の興味を集めてきた。また、工学的立場から見ても、匂い源探知システムの実現は興味深いテーマである。匂い源探知システムが実現されれば、危険ガス発生箇所や火元の探索を始め、警察犬、麻薬犬、救助犬の代行など広い分野に応用することが可能である。

しかし、匂い・ガスの発生源探索装置の開発を目指した研究は非常に少ない。また、生物の匂い源探知行動メカニズムも解明されていない部分が多く、この分野の研究は遅れている。これは、視覚や聴覚の場合と対照的である。視覚における目標物体の追跡や、聴覚における音源定位の機構などは生理学的にかなり解明されており、また、その成果を利用したロボットも開発されている。

このように匂い源探知の研究が遅れている原因は、空間を漂う匂いの分布が非常に不安定であること、匂い・ガスが目に見えないため全体的な分布を見渡せないことなどである。また、視覚や聴覚の場合と異なり、生物の嗅覚と同等の性能を持つ優れたセンサが開発されていないことも原因の一つである。

本章では、匂い源探知システムの実現に関連する研究を調査し、検討する。初めに、生物の匂い源探知行動に関して現在までに明らかになっていることを1.2節にまとめる。バクテリアから哺乳類、昆虫にいたるまで数多くの動物に対して研究が行われているが、いずれも匂い源探知行動のメカニズムは完全には解明されていない。しかし、様々な行動モデルが提案されており、工学的な匂い源探知システムの実現にあたって参考になることも多い。生物行動の中でも最も詳細に研究が行われているのは、雄の蛾が性フェロモンの匂いを頼りに雌を発見する際の行動である。特に近年の神経生理学の発展により、蛾の行動メカニズムについて新たな知見が得られている。そこで、これに関しては別に1.3節を設

けて説明を行う。

1.4節では、匂い源探知システムにおいて中心的な役割を果たすガスセンサ、匂いセンサについて概説する。近年、ガスセンサ、匂いセンサに関する研究が活発に行われている。しかし、その焦点は匂いを識別するセンシングシステムの開発にあり、匂い源探知システムに応用する場合とセンサに対する要求が異なる。そこで、1.4節では、匂い源探知システムへの応用を前提にセンサの種類の選択を行い、応用上問題となる点を述べる。

また、先述のように空気中を漂う匂いの分布が不安定であるため、嗅覚情報を受動的に観測するだけでは信頼性が低い。匂いの発生源探索のためには生物のように動き回って情報を集めることが必要不可欠である。このため、匂い源探知システムは必然的にアクティブセンシングの形態をとる。現在までのアクティブセンシングに関する研究は、視覚や触覚を扱ったものがほとんどであるが、環境認識の手法など匂い源探知に参考になる点も多い。そこで、その研究動向を1.5節で述べる。

本研究は匂い源探知システムの分野で先駆的な存在であるが、本研究以外にも匂い源探知システムを実現しようという試みが数例ある。また、匂い源探知システム以外にもガスセンサを移動ロボットに搭載し、ロボットの行動に役立てようという研究が数例ある。そこで、これらの比較を1.6節で行って本研究の特徴を明らかにし、最後に1.7節で本研究の目的を述べる。

1.2 生物の匂い源探知行動

生物の匂い源探知行動を大別すると、地面に残された匂いを辿る行動と、空気や水などの流体中を漂ってきた匂いを辿る行動に分けることができる。前者の代表例はアリの行動であり、仲間がマークした道しるべフェロモンの匂いを辿って餌場へ向かう。また、ウミウシも道しるべフェロモンを用いて仲間の後を追いかけて、食料や配偶者を見つける。このような行動のメカニズムは単純である。地面に付けられた道しるべフェロモンが揮発すると、道の真上で最も濃度が高くなる。したがって、左右の濃度を比較しながら進めば、道から外れないように進むことができる [3]。

一方、流体中を広がる匂いを辿ることは容易ではなく、その行動メカニズムも複雑である。しかし、そのために逆に学問的興味を持たれ、行動メカニズムの解明に向けて精力的な研究が行われてきた。本論文の研究も、空気中を漂ってくる匂いの発生源を探知することを目標として設定する。本節では、初めに匂いの広がる様子と生物が受容する匂い情報について説明し、匂い源探知行動の難しさを示す。次に、バクテリアから脊椎動物にいたる動物の匂い源探知行動について述べる。

1.2.1 流体中を広がる匂いの分布

流体中に放出された匂い分子は、次の二つの機構で流体中を拡散し、広がっていく。

- 分子がランダムな熱運動によって広がる。これは分子拡散と呼ばれる。

1.2. 生物の匂い源探知行動

Table 1.1 空気に対する分子拡散係数 (25°C、1 atm) [35, 39]

物質	拡散係数 [cm^2/s]
水素	0.410
エタノール	0.119
エチルエーテル	0.093
ベンゼン	0.096

- 分子が流れに運ばれて広がる。特に、流れが乱流の場合は、流れに含まれる渦の攪拌作用によって速やかに分子が拡散する。これは乱流拡散と呼ばれる。

一般に、前者の分子拡散は後者に比べて非常に遅い。分子拡散の拡散係数 D_m は、分子の平均速度 v_m とその平均自由行程 l_m の積により $D_m = v_m l_m$ と表される。空気の場合、およそ $v_m \simeq 10^4 \text{ cm/s}$ 、 $l_m \simeq 10^{-5} \text{ cm}$ であるから、 $D_m \simeq 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{s}$ となる [39]。この数値は、Table 1.1 に示す代表的なガス分子の拡散係数とオーダが一致する。例としてエタノールの匂いの拡散を考えると、拡散長 $L = \sqrt{D_m t}$ は $t = 3600 \text{ 秒}$ としても $L = 20.7 \text{ cm}$ となり非常に小さい。1時間たっても匂いが 20.7 cm しか拡散しないことを意味するが、これは日常の体験と大きくかけ離れている。

その理由は、一般的な環境では自然対流などにより流れが必ず存在し、これに運ばれて匂い分子が広がるからである。乱流拡散については 2.5.1 節で述べるが、その拡散係数 D_t は風速変動の大きさ v' と乱れの長さスケール l_t により $D_t = v' l_t$ と表される。大気中では $v' \simeq 1 \text{ cm/s}$ 、 $l_t \simeq 10^2 \text{ cm}$ 程度であり、 $D_t \simeq 10^2 \text{ cm}^2/\text{s}$ のオーダとなる [39]。この値が分子拡散の場合に比べてきわめて大きいことから、通常環境では分子拡散を無視して良い。分子拡散を無視できない環境は、乱流中に含まれる最小の渦の径（大気中で約 1 cm [74]）よりも小さいミクロなスケールの現象や、小さな密閉容器のように流れの全くない環境などの特珠な場合だけである。

そこで、以下では、乱流拡散で匂い分子が広がる場合を考える。流れに受動的に運ばれる流体の塊をプルームと呼ぶ [34]。乱流中を広がる匂い分子のプルームの形状を Fig. 1.1 に示す [75]。乱流中には様々な大きさの渦が多数含まれているため、漂う匂い分子は不規則な動きを行い、濃度分布は時間的に変動する。しかし、十分に長い観測時間で濃度の平均値を求めると、その分布は Fig. 1.1 (a) のようになる。図中の斜線を引いた楕円は、流れと垂直なプルーム断面における濃度分布がガウス分布になることを表している。

このようなガウス分布のプルームは、乱流拡散方程式の解や Sutton が半経験的に求めた式によりモデル化することができる。生物学的にはフェロモンなどの匂いがどの程度遠方まで効果を持つかという問題に興味を持たれており、Bossert らは Sutton の式を用いて昆虫が出すフェロモンのプルーム形状を計算した [14]。地面にいる昆虫がフェロモンを連続的に放出していると仮定する。座標系の原点を昆虫の場所に置き、 x 軸を風と平行な向きに、 z 軸を鉛直上向きにとる。風速を u 、単位時間当たりのフェロモン放出量を Q とする

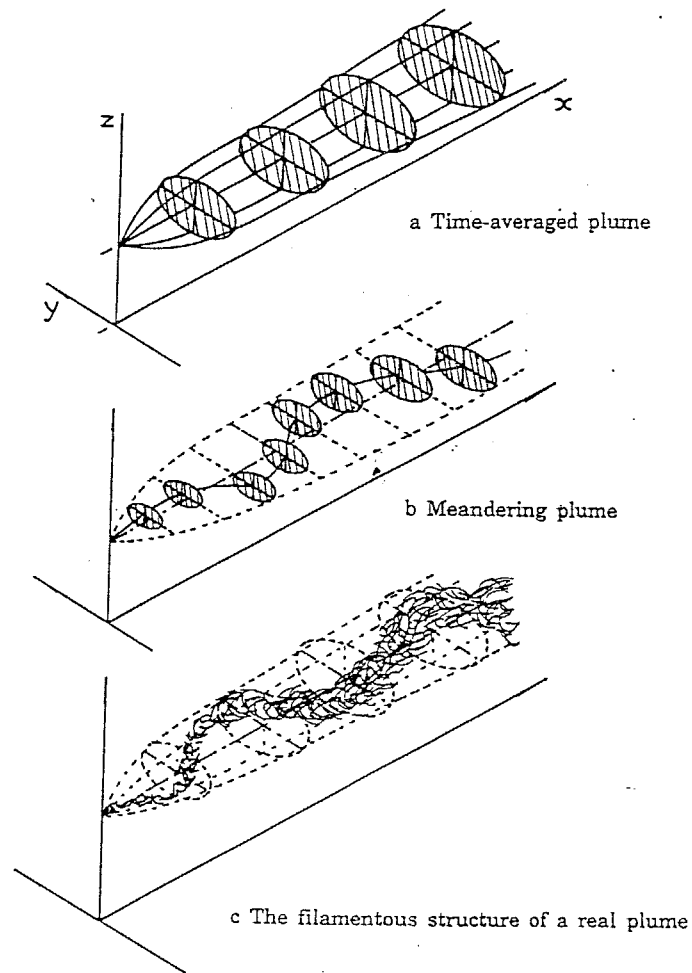


Fig. 1.1 乱流中のプルーム形状 [75]

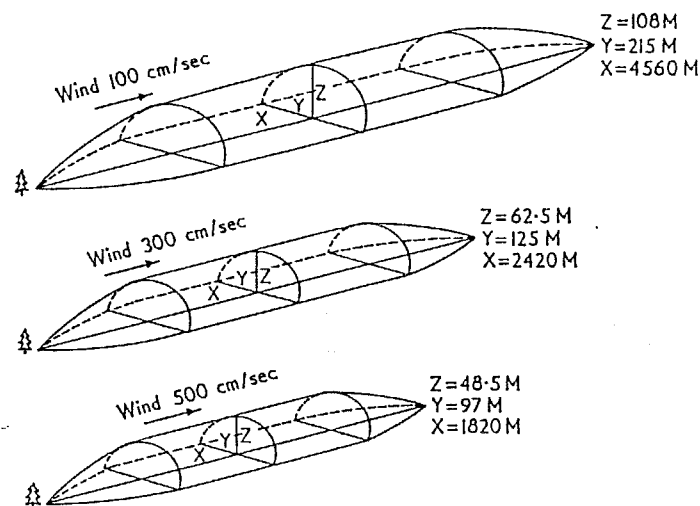


Fig. 1.2 雌のマイマイガが放出する性フェロモンの有効範囲 [14]

と、時間平均濃度 $\bar{C}$ の分布は地面付近の連続点源からの拡散を表す Sutton の式により

$$\bar{C}(x, y, z) = \frac{2Q}{\pi u c_y c_z x^{2-n}} \exp \left[-x^{n-2} \left(\frac{y^2}{c_y^2} + \frac{z^2}{c_z^2} \right) \right] \quad (1.1)$$

となる。パラメータ n , c_y , c_z の値は流れ場によって異なるが、平坦な場所で大気が中立安定な場合は、 $n = 1/4$, $c_y = 0.4 \text{ cm}^{1/8}$, $c_z = 0.2 \text{ cm}^{1/8}$ という経験値が得られている。

Bossert らは実例として、雌のマイマイガが性フェロモンを放出して雄を誘引する場合について考察した。雄蛾の性フェロモンに対する閾値濃度を C_c とし、フェロモン濃度が C_c を越える空間をフェロモンの有効範囲と考える。このようにすると、フェロモンプルームの長さ X 、最大横幅 Y 、最大高度 Z を式 (1.1) から求めることができ、Fig. 1.2 を得る。同図によれば、雄蛾は数 km 離れた地点から匂いを検出できることになる。

しかし、その後の研究によりフェロモンの有効範囲は Fig. 1.2 より更に広いことが分かった。式 (1.1) で表される濃度分布は時間平均濃度 (3 分間以上) を表している。実際の濃度分布は流れの乱れにより不規則に変動しており、平均濃度が閾値以下の場所でも瞬間濃度は閾値を超えることがある。この濃度分布の変動をモデルに取り入れるため、Gifford は Fig. 1.1 (b) のようなプルームモデルを提案した [29]。このモデルでは、ガウス状の断面濃度分布を持つ円盤の連なりでプルームを表す。これを Fig. 1.1 (b) では斜線を引いた楕円形で表している。ただし、この円盤は Fig. 1.1 (a) のように流れの方向に直線的に並ぶのではなく、円盤の中心位置が流れの乱れにより上下左右に移動すると考える。

これは、プルームの幅 (円盤の幅) よりも大きな径の渦によりプルーム全体が蛇行することをモデル化したものである。乱流中には様々な大きさの渦が含まれるので、蛇行の振幅や周期は幅広いスペクトルを持ち、プルームの動きは不規則になる。Gifford は、プルーム中心軸からの円盤の変位 D がガウス確率分布 (平均 0、標準偏差 $\sqrt{D^2}$) に従うと仮定し、プルームの不規則な蛇行をモデル化した。大気中の拡散実験により求めた $\sqrt{D^2}$ の値

は、源近くではブルーム半幅の数倍から 10 倍に達する [29]。このような場所に観測器を設置すると、ブルームが大きく蛇行して観測器の位置から去ってしまうことがあり、間欠的に濃度が検出される。濃度検出の周期、すなわちブルーム蛇行周期は先述のように不規則であるが、大気拡散の場合には通常、数秒程度である [74]。一方、源から離れるにつれてブルーム幅が大きくなり、それ以上の径を持つ渦の数が減る。このため、ブルームの蛇行は徐々に穏やかになる。

実際に、Fig. 1.1 (a) よりも観測時間が短い場合には Gifford のモデルに近いブルーム形状が得られる。このようにブルームの蛇行をモデルに取り入れる試みはその後も引き続いて行われている [30, 87]。濃度変動の大きさや濃度のピーク値について Fig. 1.1 (a) のガウスブルームモデルよりも実際の測定に近い結果が得られており、今後の発展が期待できる。

実際のブルーム形状は更に複雑であり、Fig. 1.1 (c) のようになる。乱流の中には無数の細かい渦が含まれており、初めは連続的であったブルームも小さな渦によって細かく引きちぎられる。その結果、ブルーム形状は多数の曲がりくねったフィラメント（またはパッチと呼ばれる）の集合となる。そして、このブルームが大きな渦の作用により全体として蛇行する。このような真のブルーム形状は、高い時間分解能で瞬間的な濃度分布を観測しないと得られない。

このように、観測時間によって得られるブルーム形状は変化する。観測時間を十分に長くすれば Fig. 1.1 (a) のような分布が得られるので、濃度勾配を辿れば匂い源を容易に探知できるように思われる。しかし、同図から明らかなように、流れと平行な x 軸方向の濃度勾配が非常に小さく、検出が困難である。Bossert らの計算では、Fig. 1.2 のブルーム中を x 軸方向に 1 m 移動した際の場所による濃度変化はわずか 0.013% にすぎない [14]。

また、Fig. 1.1 (a) のような分布を得るためには、観測時間を少なくとも数分以上としなければならない。生物が実際の行動に要する時間を考えると、Fig. 1.1 (b)、(c) のようなブルーム形状を考えなければならない。したがって、知覚する匂い濃度は常に変動し、濃度勾配を辿って匂い源に向かうのは更に困難になる。

1.2.2 生物の受容する匂い情報

生物の匂い源探知行動のメカニズムを解明するためには、実際の環境で生物がどのような匂い情報を知覚しているのかを知る必要がある。その第一歩は実際の環境におけるブルームの形状と構造を調べることであるが、このとき以下に示す乱流の特徴を十分に考慮しなければならない。

- 乱流では、系外から流れに加えられるエネルギー（流れの駆動力）によって流れ場の大きさのスケールを持つ大きな渦が発生し、より小さな渦へそのエネルギーが順次手渡されていく。したがって、流れ場が大きくてもその中には非常に小さな渦も含まれている。大気の場合、最小の渦径は 1 cm 程度であり、ブルーム形状を詳細に調べるためにはこの程度の空間分解能が必要である [74]。
- 上の議論において、大きな渦は流速変動の低周波数成分、小さな渦は高周波数成分に対応する。このため、ブルームに対する小さな渦の影響まで正確に測定するために

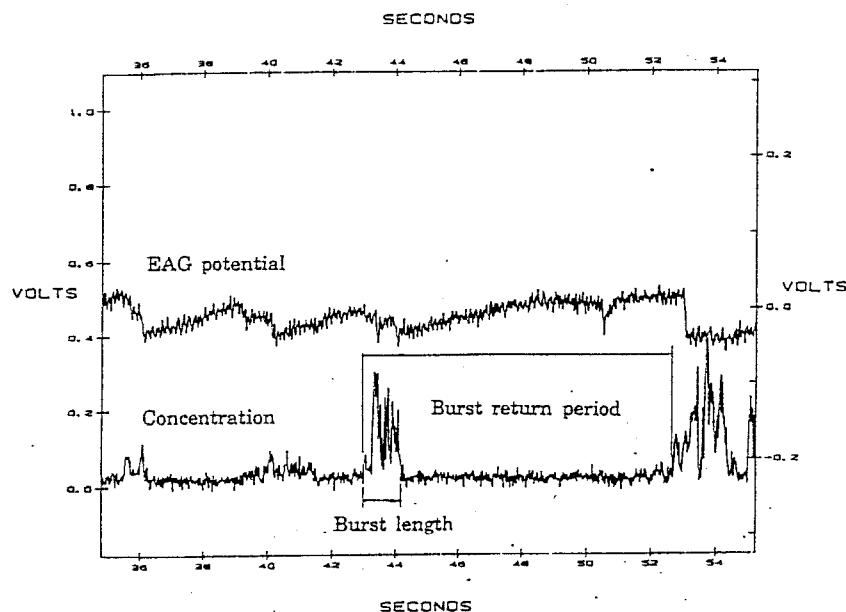


Fig. 1.3 イオン検出器と EAG の測定結果 [75]

は、高い時間分解能が要求される。大気の場合、ms オーダの測定が必要である [74]。

また、生物が実際に感じている匂い濃度を調べるためには、生物と同等の空間・時間分解能で測定を行わなければならない。嗅覚の時間分解能は数分の1秒と言われており、蛾の場合で0.1秒、ロブスターで0.5秒という値が得られている [72]。

匂い濃度の測定方法には、ガスクロマトグラムなどの分析機器を用いる方法や1.4節で述べる匂いセンサを用いる方法がある。しかし、プルーム構造の調査に必要なmsオーダの時間分解能で実際に生物が感じている匂いを測定できる装置は開発されていない。生物の嗅覚と同等な0.1sオーダの測定も困難である。そこで通常は、煙やSO₂などを匂いの代わりに用い、その分布を測定する方法がとられる。このとき、匂いの代用にする物質をトレーサと呼ぶ。乱流拡散の場合には、流れから沈降しないトレーサ物質を選べば、物質によらず匂い分子と同じプルーム形状が得られる。

このような点に注意して匂いのプルームを詳細に調べた研究を以下に2例紹介する。Murlisらは、イオン化した空気をトレーサとして用い、これを電極プローブ [13] で検出することによって時間分解能5ms以上を得た [74~76]。屋外でトレーサの放出実験を行った際の典型的な測定波形をFig. 1.3に示す。Murlisらはトレーサと同時にマイマイガの性フェロモンを放出し、マイマイガの触角をセンサとして濃度を測定している。触角にある嗅覚受容器がフェロモンを検出すると受容細胞に電気パルスが発生し、触角先端と根本に電位差が生じる。これをEAG（触角電図、Electroantennogram）と呼ぶ。Fig. 1.3には、EAGの測定結果も併せて示した。同図では、電極プローブが高濃度のイオンを検出すると触角もフェロモンを検出してEAG電位が低下しており、両者の傾向は良く一致している。

Table 1.2 イオンとフェロモンのプルームにおける統計値 [76]

	平地			森林	
距離 [m]	2.5	10	20	2.5	10
間欠性	0.4	0.17	0.12	0.2	0.04
バースト持続時間 [s]	0.42	0.63	0.97	2.0	1.5
バースト間隔 [s]	0.99	3.7	7.3	8.0	4.8
条件付き平均濃度 [V]	315	36	12	45	12
全時間平均濃度 [V]	131	6.5	1.4	10	0.4
最大ピーク/条件付き平均濃度	11	57	87	7.5	12
EAG 振幅 [mV]	0.21	0.25	—	0.44	0.75

Fig. 1.3 に示すイオン濃度の時間変化を詳しくみると、間欠的にバーストが現れておりその間のイオン濃度はほとんどゼロに近いことが分かる。この間欠的な変化は、Fig. 1.1 (b)、(c) のプルームの蛇行に対応しており、プルームがプローブ位置まで蛇行してきた時にバーストが現れる。また、バーストが持続している間の濃度変動は Fig. 1.1 (c) に示すプルーム内部構造に起因する。

匂い源を探索するためには、このような変動する波形から匂い源の方向や距離に関する情報を引き出さなければいけない。そこで、Murlis らはイオン濃度変化の波形の特徴を表すいくつかのパラメータを選び、匂い源から電極プローブまでの距離を変えた際のパラメータの変化を調べた。この結果を Table 1.2 に示す。

表中の間欠性 (intermittency) は、Fig. 1.3 のような濃度変動の波形をイオンの有無によって2値化した後に、その波形の平均値を求めたものである。また、バースト持続時間 (burst length) とバースト間隔 (return period) の定義は、Fig. 1.3 に示されている。イオン濃度の平均値については (1) バーストが持続している部分だけ求めた平均値と (2) 全測定時間における平均値の2通りを求めた。前者は Fig. 1.1 (b) のプルーム内部における時間平均値に相当し、ここでは条件付き平均濃度 (conditional mean concentration) と呼んでいる。また、後者をここでは全時間平均濃度 (overall mean concentration) と呼んでいるが、これは Fig. 1.1 (a) のプルームにおける時間平均値に相当する。Table 1.2 の計算にあたっては、1時間の測定波形から最も激しく濃度変動している3分間の波形を切り出して用いた。

Table 1.2 のように各パラメータは匂い源からの距離にしたがって変化を見せている。全体的な傾向としては、匂い源から遠く離れるほどプルームの幅が広がり、蛇行が大きくゆっくりとしたものになる。このため、バースト持続時間とバースト間隔が増え、間欠性が小さくなる。平地と森林の中を比べると、森林の中の方が風向が安定している。このため、森林の場合の方がプルームの蛇行が小さく、その結果バースト持続時間は長くなっている。

また、条件付き平均濃度、全時間平均濃度はともに匂い源から離れると急速に減少する。しかし、最大ピーク/条件付き平均濃度の値は大きくなっており、匂い源から遠く離れた

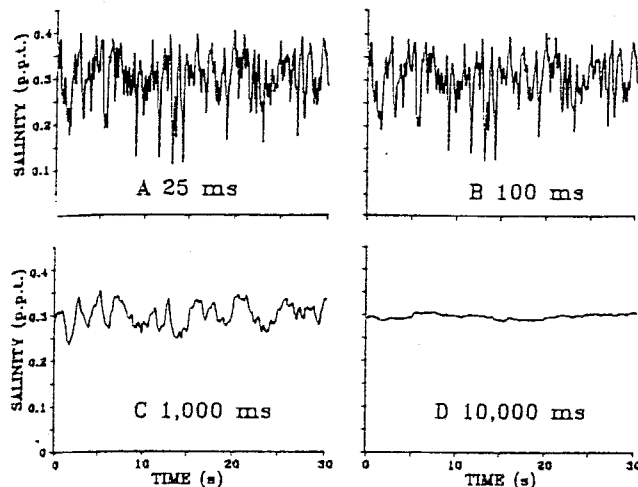


Fig. 1.4 嗅覚順応の時間フィルタモデル [71]

場所でも瞬間的には大きなピークが時折観察されることを示している。したがって、瞬間的な濃度を比較しても、匂い源からの距離を知ることはできない。

一方、Moore らはロブスターの匂い源探知行動を調べるため、水中の匂いプルームについて詳細に研究している [71, 72]。ロブスターは小触角で匂いを感知するが、その大きさから考えて空間分解能は約 1 cm と考えられる [71]。また、時間分解能は 100 ~ 500 ms 程度と言われている [72]。この時間、空間分解能を得るため匂いの代わりに 0.7% 食塩水を水槽中に流し、この濃度を大きさ 1 cm の銀電極で測定した (サンプリング時間は 25 ms)。この結果得られた濃度変動波形は Fig. 1.3 と同様に細かいピークを多数含んでおり、匂い源からの距離に応じてピーク立ち上がり時の傾きが変化することが分かった。

更に、Moore らは実際に生物が知覚する匂い濃度を調べるため、嗅覚の順応の影響を調べている。過去の一定期間 T の間の匂い刺激が現在の順応度に影響すると仮定し、順応をモデル化した時間フィルタを考える。このパラメータ T を変えてフィルタ通過後の濃度変化波形を求めると、Fig. 1.4 のように T が大きいほどピークが平滑化された滑らかな波形が得られた。この波形に含まれるピークの立ち上がりの傾きを計算した結果を Fig. 1.5 に示す。同図のように、 $T \leq 1000$ ms の範囲では匂い源からの距離にしたがってピークの傾きの度数分布が分離した。このような高時間分解能の濃度測定を行えば、時間変化波形から距離情報を得ることができる。

以上のように、匂い源の距離に関する情報を匂い濃度波形から引き出す研究が行われている。高い時間分解能の測定器を用いればバースト持続時間や、ピーク立ち上がりの傾きなどの統計値によって匂い源までの距離情報を得ることができる。しかし、濃度の変動が大きいため判定は確率的なものになってしまう。また、統計値を得るためには少なくとも数分間の観測が必要であり、短時間の匂い源探知は期待できない。更に、生物の嗅覚器官や 1.4 節に示すガス・匂いセンサの場合には十分な時間分解能が得られないため、バースト持続時間などの波形パラメータはあまり距離に依存しなくなってしまう。実際の生物行

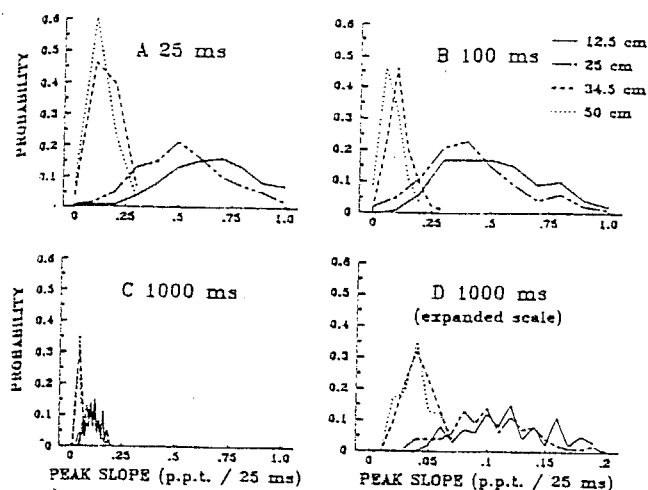


Fig. 1.5 フィルタ処理後のピーク立ち上がりの傾き [71]

動においては、匂い源からの距離に応じて行動パターンが変化する例もあるが、どのような情報を生物が利用しているかは依然として明らかではない。したがって、匂い源の距離情報を濃度変化波形から得るのは簡単でない。

匂いの受容において、時間分解能以外の興味深い点として離散時間的な匂いのサンプリングが挙げられる。多くの生物は漂ってくる匂いを離散時間的に捉えて、受容する [94]。哺乳類はくぐんと間欠的に息を吸いながら匂いを嗅ぎ、蛇は舌の出し入れによって、魚は口の開閉によって匂いを嗅覚器官に送る。昆虫やロブスターなどの節足動物も、匂いを嗅ぐときには触角を細かく振動させる。しかし、このような匂いの離散時間的なサンプリング動作の持つ意味は完全には解明されていない。Moore らも、水槽中のプルーム測定実験において匂い濃度の離散時間的なサンプリングを試みているが、明確な結果は得られていない [71]。

1.2.3 単細胞動物の匂い源探知行動

匂い源の位置を知るための手がかりとなる情報を大まかに分類すると、Table 1.3 のようになる。生物は移動しながら匂いを嗅ぎまわるので、受容した匂い濃度の時間変化は場所による濃度の違いに対応する。昆虫の左右の触角のように複数の嗅覚受容器官を持つ生物は、それらが受容する匂い刺激を比較すれば移動しなくても濃度の勾配が得られる。また、匂いは風や水流によって運ばれるので、流れの方向は非常に重要な情報である。大抵は流れに逆らって移動すれば匂い源に近付くことができる。Table 1.3 以外にも、前節で述べた微視的な濃度変動の波形も匂い源探知の手がかりと考えられる。しかし、これを生物がどのように利用しているかは明らかでないので、Table 1.3 からは除外した。

大腸菌のような単純な構造のバクテリアも、何らかの化学物質を検出し、快適な環境を求めて移動する。また、精子は卵子の分泌する物質に誘引されて泳ぐ。本論文では、このような行動も匂い源探知に含めて考える。単細胞生物の匂い源探知行動に関する研究は数多く

Table 1.3 匂い源探知に有効な情報

(1)	匂い濃度の時間変化
(2)	受容器間の刺激濃度差
(3)	流れの方向

あり、バクテリア、精子の他にもゾウリムシ、白血球などの行動が詳細に研究されている。生物の匂い源探知行動メカニズムを解き明かすためには、匂い刺激などの条件を厳密に制御した環境下で注意深く行動観察を行わねばならず、困難を究める。しかし、単細胞生物の行動メカニズムに関しては現在までに多くの知見が得られており、その行動は Table 1.3 の項目に対応して3種類に分類することができる。

(1) 匂い濃度の時間変化を利用した探知行動

大腸菌は誘引物質（例えばアスパラギン酸、セリンなどのアミノ酸 [11]）の源に向けて移動することができる。大腸菌の行動を注意深く観察すると、誘引物質の濃度が高くなる方向には直線的に移動することが分かる。逆に、誘引物質濃度が低くなる方向へ移動した場合や忌避物質を検出した場合には、その方向へ進むのを避けるため大きな方向転換を行う。しかし、大腸菌には瞬間的な濃度の増減は分かっても、濃度勾配や空間的な濃度分布を把握する能力がないため、方向転換後に進む方向は必ずしも誘引物質源へ向かう方向とは一致しない。すなわち、誘引物質濃度によって方向転換の頻度は変化するが、方向転換後の進路はランダムである。

このような行動はクリノキネシス（変向無定位運動性、klinokinesis）と呼ばれ、Fig. 1.6 のようなフローチャートで表される [10]。すなわち、移動しながら匂い濃度を観測し、濃度が増加中であれば方向転換の頻度を増す。逆に、濃度が減少中であれば方向転換の頻度を減らす。濃度が一定であれば、方向転換の頻度は変化しない。クリノキネシスは一見すると無秩序な行動のようであるが、匂い源探知に有効であることが行動モデルのコンピュータシミュレーションによって証明されている [20]。シミュレーションによって得られた行動の軌跡を Fig. 1.7 に示す。図の左端にある点線がスタートラインを表す。匂い濃度の勾配は水平方向につけられており、右側に行くほど濃度が高くなる。したがって、左に向かった場合は速やかに方向転換が行われ、軌跡は徐々に右側へのびる。このように、クリノキネシスの場合には移動することによって場所による濃度差を検出する。

(2) 受容器間の刺激濃度差を利用した探知行動

人間の体内に雑菌が侵入すると、雑菌の分泌する化学物質を白血球が検知し、その雑菌に向かって集合する。Fig. 1.8 は、白血球が γ グロブリンを検出した際の行動軌跡を表す [117]。図中の折れ線は、1 秒ごとに白血球の位置を測定して求めた。また、図中には 30 秒ごとに観察した白血球の外形を書き込んである。探知開始地点は図の下端であり、上に行くほど濃度が高くなるように濃度勾配がつけられている。この行動軌跡を Fig. 1.7 に示

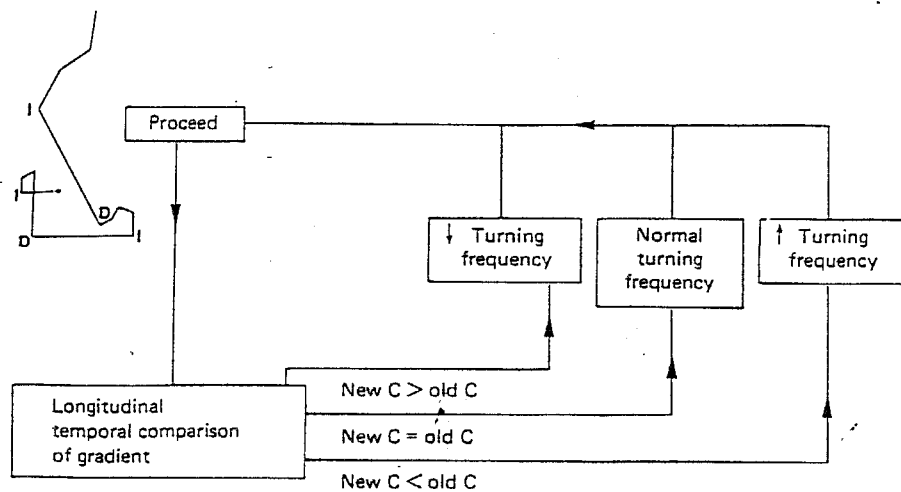


Fig. 1.6 匂い源探知におけるクリノキネシス [10]
 図中左下の口で進行方向の濃度変化を調べる。

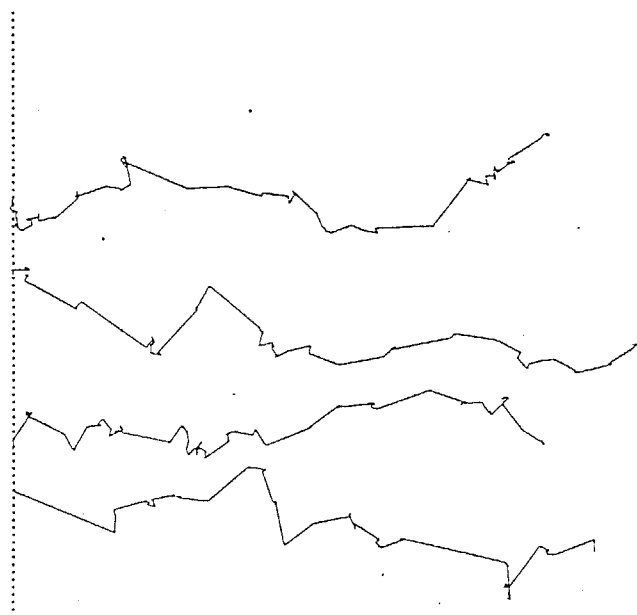


Fig. 1.7 クリノキネシスのコンピュータシミュレーション [20]

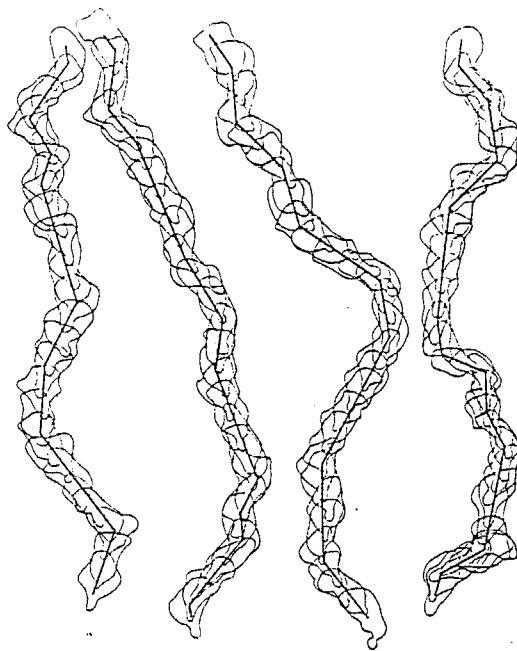


Fig. 1.8 白血球の移動軌跡 [117]

したクリノキネシスの場合と比べると、白血球の方が効率よく直線的に匂い源に向かっていくことが分かる。

このことから、白血球は体表面に分布する受容サイト間で刺激の大きさを比較し、濃度勾配を検出していると考えられている。Zigmond は、匂い源に向かう白血球の行動軌跡を解析して匂い源の方向と進行方向のずれを求め、Fig. 1.9 のような度数分布を得た [117]。同図のように進行方向は匂い源方向に良く一致しており、白血球が濃度勾配の方向に移動するという説を支持している。

このように、化学物質の濃度勾配を検出してその方向へ向かう行動を走化性 (chemotaxis) と呼ぶ。なお、匂い源に向かう行動や匂いを忌避する行動を総して走化性と呼ぶ場合もある。しかし、匂い源に向かう行動の中には、後述するように流れの方向に進むことで匂い源に向かう行動などメカニズムの異なる行動が混ざっている。そこで、最近では濃度勾配を利用した行動のみを走化性と呼ぶ場合が多い [10, 51]。また、左右の感覚受容器で検出した刺激を比較し、左右等しく刺激を受ける方向に進む行動を転向走性 (tropotaxis) と呼ぶ。

(3) 流れの方向を利用した探知行動

単細胞生物の場合、匂い源探知に流れの方向を利用していることが実験的に証明された例は少ない。しかし、海洋性バクテリアの一種が流れの方向に逆らって泳ぐことにより匂い源を発見しているという報告がある [10]。このような行動は、空気中の場合には走風性 (anemotaxis)、水中の場合には走流性 (rheotaxis) と呼ばれる。

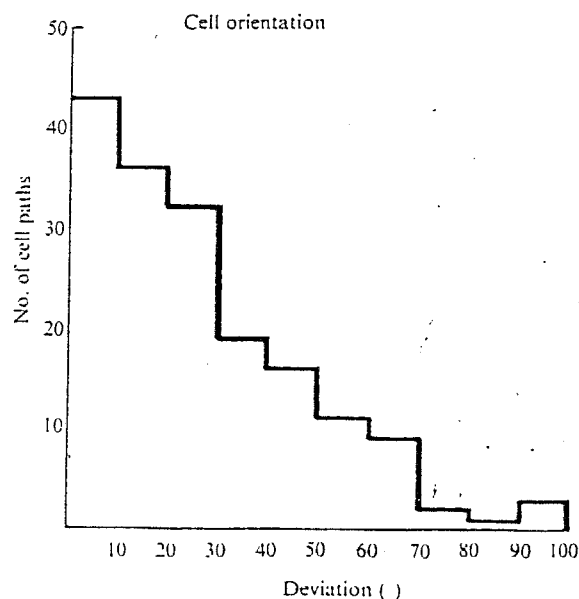


Fig. 1.9 白血球の移動方向と匂い源方向の偏差 [117]

1.2.4 無脊椎動物の匂い源探知行動

無脊椎動物の匂い源探知行動に関しても多くの研究例がある。主に研究に用いられているのは、扁形動物のプラナリア、カタツムリや巻き貝などの腹足類、エビなどの水生節足動物、そして昆虫である。前節で述べた単細胞生物の三つの行動パターンは、これらの無脊椎動物の匂い源探知行動の場合にも基礎となる。

しかし、無脊椎動物の場合には新たな行動パターンが加わる。無脊椎動物の場合には単細胞動物に比べて神経系が発達しており、場所の知覚が可能な生物が現れる。これによって、左右に移動して匂い濃度を比較し、勾配を検出することが可能になる。このような行動は屈曲走性 (klinotaxis) と呼ばれる。屈曲走性と前節で述べた変向無定位運動性はどちらも刺激の時間変化を用いているが、匂い源へ向かう効率は屈曲走性の方がはるかに高い。また、左右の嗅覚器官で濃度を比較する転向走性と異なり、屈曲走性の場合には巻き貝など嗅覚器官が一つしかない生物でも濃度勾配を利用できる。

単細胞生物には見られなかった無脊椎動物のもう一つの特徴は、複数の行動メカニズムを統合しているものが多いことである。例として、餌の匂いを嗅ぎつけたプラナリアの行動を Fig. 1.10 に示す。静水中でプラナリアを泳がし、餌の匂いで刺激する。プラナリアは初めに匂いの漂ってくる方向を確認するかのように同じ場所で旋回し、Fig. 1.10 (b) のように匂い源の方向へ進む。このとき、頭を大きく左右に振って濃度を比較していることが知られている。この結果だけを見れば、プラナリアは屈曲走性により匂い源を探知すると考えられる。

しかし、匂い源に近い場所でプラナリアの行動を観察すると、Fig. 1.10 (a) のように頭を振らず直線的に匂い源に向かう場合がある。このとき、左右どちらかの嗅覚受容器を切除すると、プラナリアは残された受容器の方向にのみ移動する。したがって、この行動は

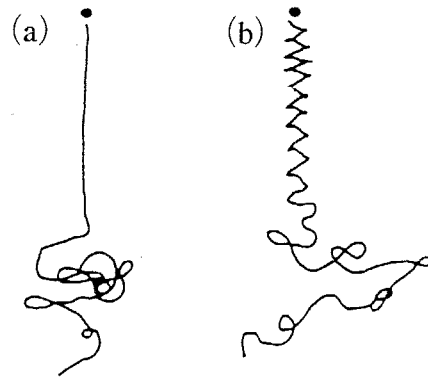


Fig. 1.10 匂い源に向かうプラナリアの行動 [10]

(a) 匂い源に近い場合 (b) 匂い源から遠い場合

転向走性であると考えられている。旋回 → 体を振りながら前進 → 直進という行動の変化は、昆虫や巻き貝などにも見られる。このような行動の切り替えは、濃度勾配の大きさによると言われている。濃度勾配が急峻な匂い源付近では、左右の嗅覚器官で十分な濃度差が検出できるので、勾配の方向が即座に得られる。一方、匂い源から遠い場所では体を振ることによって測定領域を広げ、微小な濃度勾配を検出する。

別の例として、ゴキブリの行動を風洞で観察した結果を Fig. 1.11 に示す [104]。風は右向きに 22 cm/s で吹いており、図の左端に性フェロモンを入れた容器を置く。そして、図の右端に雄のゴキブリを放すと、ゴキブリはフェロモン源に向けて歩き出す。性フェロモンの容器は大小 2 種類用意されており、形成されるフェロモンプルームの幅を変えることができる。Fig. 1.11 (A) は小さな容器の場合に形成されるプルームを煙で可視化した結果であり、Fig. 1.11 (B) から (D) はこのときのゴキブリの行動例を示す。同様の実験を大きな容器を用いて行った結果が Fig. 1.11 (E) から (H) である。ゴキブリのフェロモン源探索には主に風向が用いられており、ゴキブリは風上に向かって歩行する。しかし、Fig. 1.11 が示すようにゴキブリはジグザグに歩行しており、ジグザグの振幅はプルームの幅とほぼ等しい。

したがって、ゴキブリはフェロモン濃度の変化を利用してプルーム端を検出していると考えられる。ゴキブリの片方の触角を切断すると残された触角の方向にばかり移動することから、左右の触角で濃度差を検出しているのは確かである。しかし、触角を片方切断されたゴキブリも最終的にはフェロモン源を探知することができる。また、切断後しばらくたつと探知能力が回復し、両方の触角があるゴキブリと同様にすばやくフェロモン源へ向かうことができるようになる。これらの結果から、ゴキブリは場所によるフェロモン濃度の違いを歩き回ることによって検出し、探知に役立てていると考えられている。

結論として、ゴキブリはフェロモン源の探索の際に主に風向を利用する他、左右の触角で受容する濃度差、濃度の時間変化という情報を統合し、行動していることになる。このように、昆虫の匂い源探知行動には利用できる情報が全てどん欲に活用されている。ただし、1.2.2 節で述べたように、風の小さな乱れによって濃度の分布は大きく揺らぎ、濃度情報よりも風向の方が信頼できる場合が多い。このため、まず風向を用いて風上に向かい、

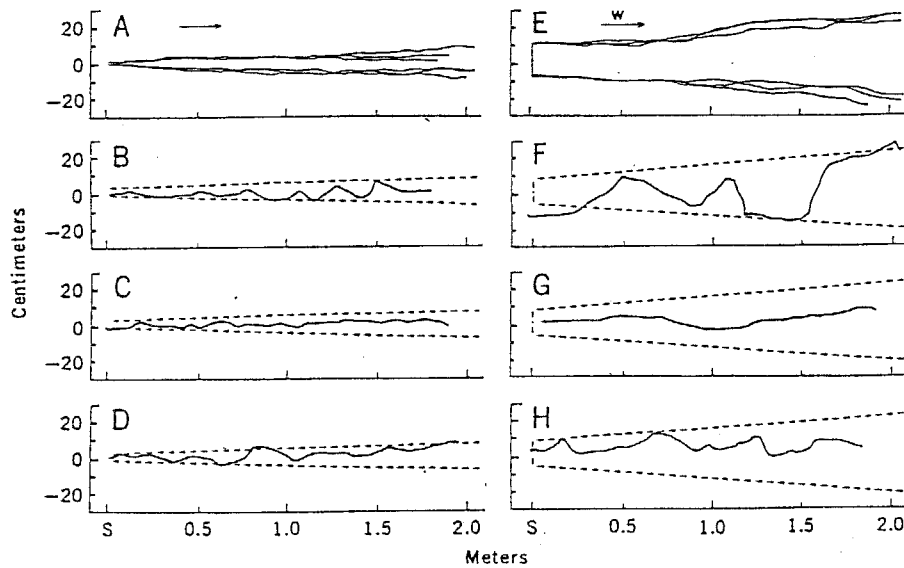


Fig. 1.11 性フェロモンに誘引された雄ゴキブリの行動 [104]

(A) 煙により可視化した幅の狭いプルームの境界線

(B ~ D) 幅の狭いプルーム中を歩く 3 匹のゴキブリの行動軌跡

(E) 煙により可視化した幅の広いプルームの境界線

(F ~ H) 幅の広いプルーム中を歩く 3 匹のゴキブリの行動軌跡

次に左右の触角を利用して風と直角な方向の位置調節をする昆虫が多い。匂い源から遠く離れ、左右の触角に十分な応答差が得られない場合などに、濃度の時間変化を利用して濃度の分布を検出する [10]。

昆虫の中でも蛾のフェロモン源探索行動に関して盛んに研究が行われており、行動メカニズムが次第に明らかになってきている。これに関しては、1.3 節で述べる。

1.2.5 脊椎動物の匂い源探知行動

脊椎動物の匂い源探知行動に関しては、魚類を中心に研究されている。有名な例としてはサケの母川回帰があり、サケは匂いを頼りに川をさかのぼる。その他、タラ、サメ、コイなど様々な魚について研究が行われているが、ここではナマズを用いた興味深い実験を紹介する [9]。

水槽中でナマズの行動観察を行った結果を Fig. 1.12 に示す。ナマズは餌から水中に染み出す化学物質を検出して餌を探すため、目をつぶされても同図 (a) のように正しく餌の方向へ泳ぐ。また、左側の鼻孔を焼灼されても同図 (b) のように即座に餌を見つけ出した。しかし、ヒゲを全て切除した上で体側の味覚受容器に向かう神経を右側のみ全て切断すると、ナマズは Fig. 1.12 (c) のように左側に回転を始めた。同図のように最終的には餌を発見したものの、非常に効率の悪い軌跡をとった。Fig. 1.12 (d) は、味覚受容器を全て残し、右のヒゲのみを切除した結果である。この場合、同図 (c) より餌の探索効率が向上

したが、ヒゲが残っている左側へ向かう傾向が見られた。以上の結果から、ナマズの行動には嗅覚（鼻で検出される感覚）だけでなく体側やヒゲに分布する味覚受容器も用いられていることが分かる。Bardach らは、体表面に分布するこれらの感覚器官の応答パターンからナマズが濃度勾配を検出していると結論した。

このように、脊椎動物の場合には、嗅覚のみならず他の感覚情報も総動員して探索する行動が多く見られる。両生類、は虫類、鳥類、哺乳類と進化が進むにつれ、この点はますます顕著になる。このため実験を通じて行動を解析することが困難になり、鳥類や哺乳類の匂い源探知行動に関しては未解明の部分が多い。

1.3 蛾の匂い源探知行動

雌の蛾を虫かごに置いて屋外に放置すると、雌の出す性フェロモンの匂いに惹かれ、時には数 km も先から雄蛾が集まってくる。この行動が雌の出す匂いの誘引作用によるという仮説は 19 世紀に既に提案されており、ファーブルの「昆虫記」にもオオクジャクガの行動に関する記載がある。そして、1950 年代に Butenandt らがカイコガの性フェロモンを単離・同定したことによってフェロモンという「匂い」による個体間コミュニケーションの存在が明らかとなった。雄蛾は触角でフェロモンを検出するが、その感度は非常に高くフェロモン 1 分子を検出できると言われている。

それ以来、蛾のフェロモン源定位行動に関し、生物の匂い源探知行動の中でも特に詳細に研究が行われており、行動メカニズムが徐々に明らかになってきた。本節ではこうした研究の成果をまとめる。

1.3.1 実験装置

蛾の行動メカニズムを明らかにするために、制御された環境の中で行動を観察する手法がとられる。匂い源探知の場合には 1.2 節で述べたように風が重要であるので、風を制御するために Fig. 1.13 のような風洞で実験を行うことが多い。同図の風洞では左から右へ風が流れており、風洞の左端にある棒の先端にフェロモンをしみこませた濾紙をセットする。蛾は視覚情報を頼りに飛行を制御するので、これを助けるために Fig. 1.13 の風洞では床面に模様が描かれている。夜行性の蛾を実験に使用する際は、明るさや蛾の日周リズムにも注意する必要がある。フェロモン源に向かう蛾の行動は風洞の上のビデオカメラに撮影され、飛行速度や進行方向などの詳しい解析を行う。

行動メカニズムの解明のためには飛行中の蛾がどのような匂い刺激を受けているかを調べる必要がある。そのための手法としては、フェロモンに煙を混ぜて風洞に導入し、プルームを可視化する方法が一般的である。発煙材としては TiCl_4 が多く用いられる。Fig. 1.13 ではフェロモン源は点状であるが、フェロモンを染み込ませる濾紙の幅を変えれば、プルームの幅を変化させることができる。チューブを利用してフェロモンを風洞内に送り込めば、電磁弁を利用してフェロモンの放出を制御することもできる。

Baker らは、風向が変化した際の蛾の反応を調べるため、Fig. 1.14 のような装置を製作

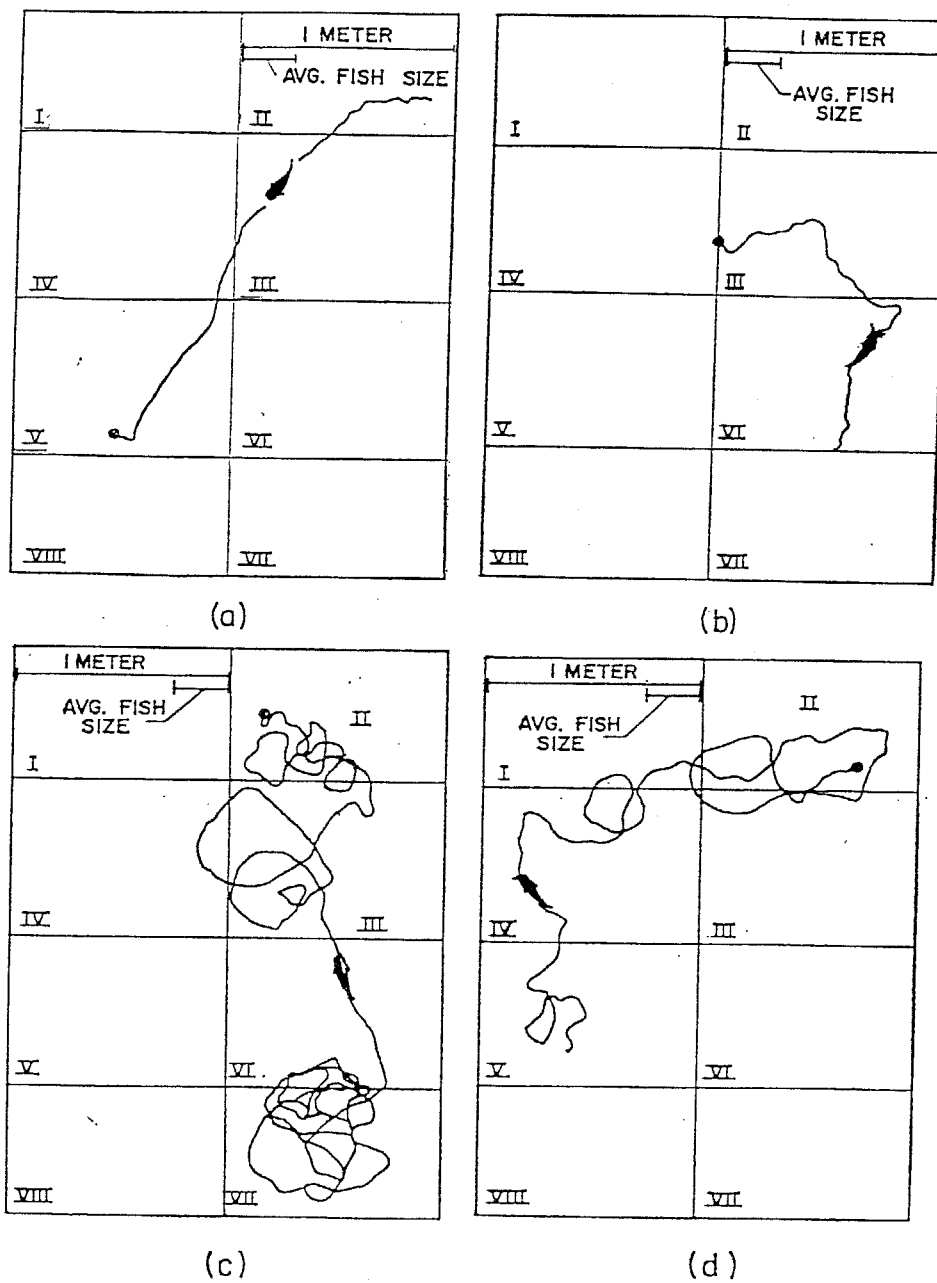


Fig. 1.12 目をつぶされたナマズの餌に向かう行動 [9]

- (a) 左右の鼻孔を焼灼し、鼻と顎のヒゲを切除したナマズ
- (b) 左の鼻孔のみを焼灼したナマズ
- (c) 全てのヒゲを切除し、右わき腹の味覚受容器へ向かう神経を切断したナマズ
- (d) 右側のヒゲを全て切除したナマズ

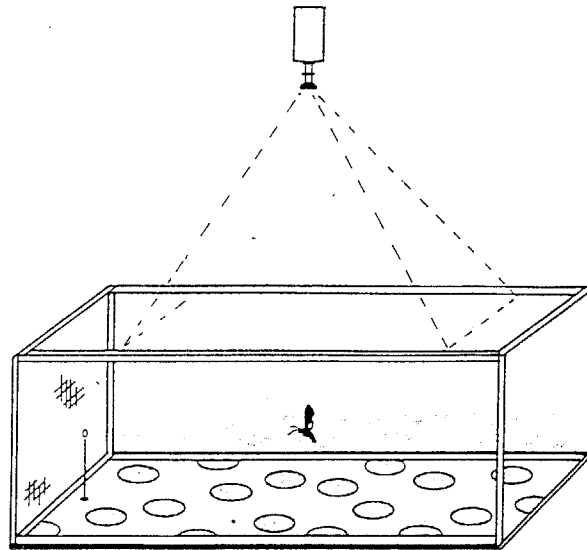


Fig. 1.13 行動観察実験用の風洞 [6]

した [8]。同図の装置では送風機 B を車輪付きの台の上に設置してあり、これを回転することで蛾の飛行中に風向を変えることができる。床面にはタフトと呼ばれる小さなふきながし状の器具が並べられており、これがたなびく方向から風向を知ることができる。

また、蛾を台の上に縛り付け、風や匂い刺激を与えたときの反応を調べる実験も行われている。この場合は、片側の触角に強く刺激を与えるなど刺激の与え方をきめ細かく制御できるが、蛾の自由な行動を妨げるという欠点がある。これを改善した実験装置に「Kramer の行動補償器」というものがある [10]。これは歩行する昆虫を球の上に載せて行動を観察する装置で、昆虫の移動をカメラ像から検出し、常に昆虫が像の中心に来るように球を回転させる。これによって昆虫の自由な歩行を妨げることなく、昆虫を一定位置に置き、刺激の細かい制御が可能となる。

さらに、屋外で行動を観察する実験も行われている [18]。この場合には、煙の他にシャボン玉などがプルーム可視化のために用いられる。また、タフトを用いて風向を得るのは先述の Baker の装置と同様である。

1.3.2 行動メカニズムのモデル

蛾の行動をその初期段階から追ってみる。初めに、雌の蛾は産卵場所を探して飛び回り、適切な場所を見つけると着地する。蛾は種類によって決まった植物に卵を産みつけることが多く、匂いを頼りにその植物を探索することが知られている [32]。このような雌の探索行動のメカニズムは、雄の性フェロモン探索行動のものと同一であると考えられている [108]。産卵場所に着地した雌は、その場に止まってフェロモンを放出する。

一方、雄の蛾は飛行中に性フェロモンを検知すると、その発生源である雌の探索を始める。雌を最終的に発見するのは視覚が関与していると考えられており、カイコガは雌と同

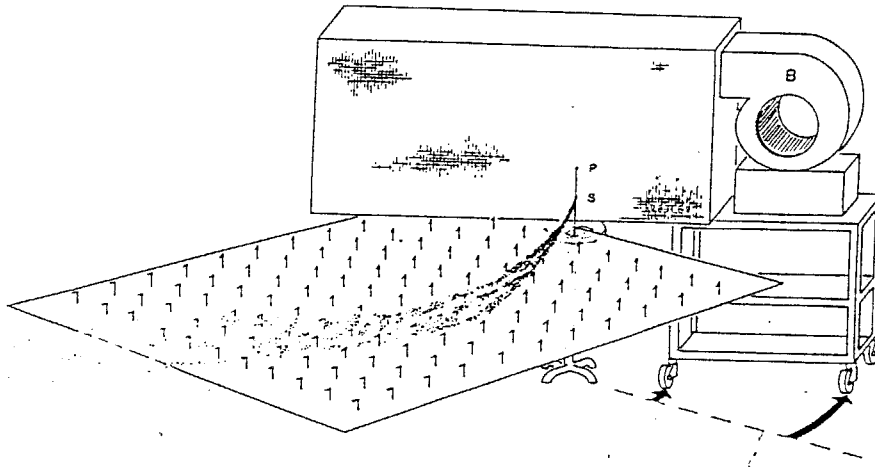


Fig. 1.14 風向を変えられる風洞 [8]

じ大きさの白い物体に対して反応を示す。フェロモンを検知する前の蛾の行動については、フェロモンのプルームを発見するために能動的に探索行動をとっているとする説がある [21, 22]。しかし、カイコガのようにフェロモンを検知しないときにはじっと静止して体力を温存するものもあり、詳細は不明である。

フェロモン源へ向かう雄蛾は風上に向かってジグザグに飛行する。この定位行動について現在までに様々な仮説が提案されている。1970年代には、蛾の行動は走化性であり、濃度差を検出して濃度の高い方向へ飛ぶとする意見もあった [27]。しかし近年では、蛾は匂いを検出すると風上へ飛行してフェロモン源へ向かうとする走風性説が有力視されている [6, 51]。前節の実験装置を用いた詳細な実験によって、蛾の定位行動は風上視運動操縦とプログラム化された行動パターンの二つの要素からなることが分かってきた [51]。

風上視運動操縦 (optomotor anemotaxis) とは視覚を用いた飛行制御方法である。この方法では、目に映る景色の変化から風に体が流されたことを検出し、それによって風向を判断して風上に向かう。蛾が匂い刺激を受けたときにどのような情報を利用してどのように進路を定めるのかは明らかでない。しかし、匂い刺激を受けると風上視運動操縦が開始され、風上に近い方向に進路が設定されるという点では多くの意見が一致している [6]。したがって、蛾の脳内には嗅覚情報と視覚情報を統合する複雑な情報処理機構が存在すると考えられる。

蛾の定位行動のもう一つの要素は、プログラム化された行動パターンの存在である。蛾の脳内にはあるリズムで飛行の方向を転換するプログラムがあり、この結果、蛾はジグザグに飛行すると考えられている。この行動パターンの風洞実験による観察例を Fig. 1.15 に示す。同図は短いパルス状のフェロモン刺激を与えたときの蛾の飛行軌跡を示しており、上から下に 50 cm/s の風が吹いている。蛾はフェロモンパルスを検出するとまず風上に向かい、その後は徐々に振幅を広げながらジグザグに飛行する (キャストイング飛翔と呼ばれる)。Fig. 1.15 ではキャストイング飛翔の途中から飛行軌跡を示しており、蛾は初め左右方向に飛んでいる。この途中で2回目のフェロモンパルス刺激を受けると、蛾は再び風上に向かい、その後キャストイング飛翔を行った。同図にはフェロモンパルスと蛾の接触位置

が図示されている。この位置は、行動観察に先立って煙によるフェロモンパルスの可視化実験を行い、匂い源から放出されたフェロモンパルスが毎回同じように移動していくと仮定して求めた。この実験の場合、風洞の風の乱れが小さいため、このような仮定が有効となる。Fig. 1.15 では複数の蛾を用いて同じ実験を4回繰り返しているが、いずれも同様に風上への飛行からキャスティング飛翔へ移行する行動が観察された。したがって、この一連の行動が脳内にプログラムされており、フェロモンパルスとの接触によってプログラムが開始され则认为られている。

実際の環境で蛾が行動する際には、フェロモンのパルスが次々と風に運ばれてくる。このため、蛾は Fig. 1.15 のようなプログラム化された行動を実行中に次のフェロモンパルスを検出する。その場合には、プログラムがリセットされ、初めから行動パターンが繰り返される。Fig. 1.16 (c) と (d) はフェロモンパルスを高頻度で繰り返し風洞に放出した場合の蛾の行動を示す。この場合、キャスティング飛翔が始まる前にプログラムがリセットされるので、Fig. 1.16 (c) のように蛾は直線的に風上のフェロモン源へ向かうことが多い。まれに Fig. 1.16 (d) のようにジグザグ行動をとることもあるが、左右方向の動きは緩やかである。

一方パルスの間隔を長くすると、パルスと一度接触してから次のパルスと接触するまでの間にキャスティング飛翔が行われるようになる。この結果、Fig. 1.16 (b) のように軌跡はジグザグになる。図中の小さなグラフは風上に対する蛾の進路の度数分布を表しており、同図 (b) の場合には左右方向への飛翔が多いため $+90^\circ$ と -90° に二つのピークが生じている。また Fig. 1.16 (a) は、乱れの少ない風の中に連続的にフェロモンを放出した場合の実験結果を示す。この場合、プルームは連続したリボン状の形状になり、蛾には一定濃度のフェロモンが継続して与えられる。このため嗅覚の順応が起こり、蛾は Fig. 1.16 (a) のようにフェロモンを感じなくなったときと同様の行動を示した。したがって、蛾が風上への定位行動を続けるためには、乱流によってフェロモン濃度が変化していなければならないことが分かる。

以上の結果から、蛾のフェロモン源定位行動は Fig. 1.17 のように考えられている。蛾がプルーム内を飛行しているときには、フェロモン刺激を繰り返し受けるため直線的に風上に向かう (a)。途中、風向の変化などによりフェロモンとの接触が一定時間以上無くなると、キャスティング飛翔が開始される (b)。このキャスティング飛翔にはプルームを左右方向に探索する効果があり、プルームを再発見すると再び風上への飛行が繰り返される。このような行動は雄蛾のみならず雌の蛾やその他の昆虫でも見られるため、種を越えた共通のメカニズムであると考えられている [108]。

しかし、以上の説明は定性的なものであり、匂い源探知への応用に向けて行動メカニズムをロボットシステムに実装するためには更に詳細な実験が必要である。左右の触角で匂い濃度差を検出し、刺激を受けた触角と同じ側からジグザグ行動を開始するなどの詳しい実験を行った報告もある [55]。しかし、ジグザグの振幅や飛行速度を蛾がどのように決定しているかなど未解明な部分も多い。こうした実験を実際の生物相手に行うのは困難なので、ロボットを用いた生物匂い源探知行動のシミュレーションを通じ、未解決部分を解明していくことが望まれる。

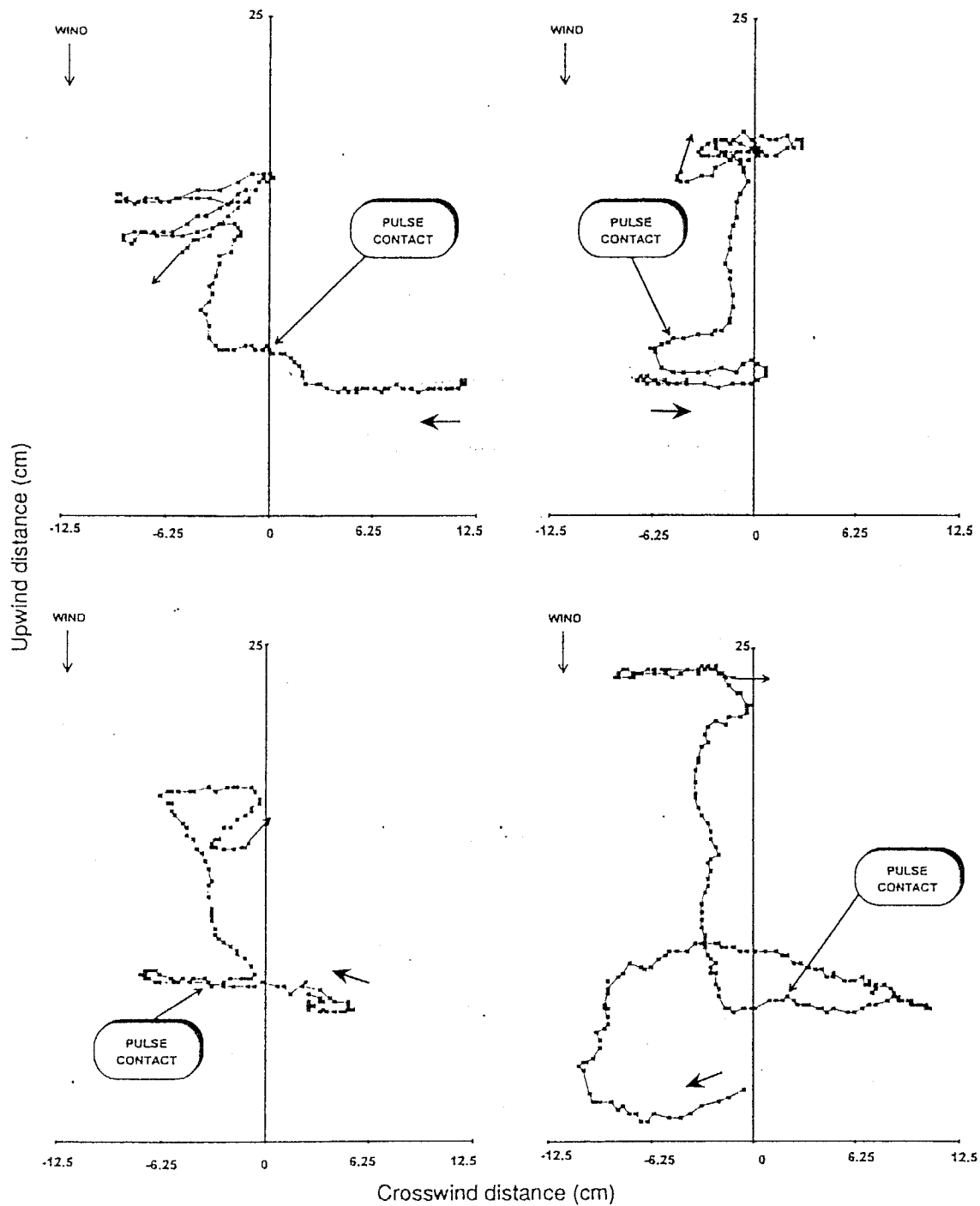


Fig. 1.15 パルス状の匂い刺激に対する蛾の反応 [68]

図中の黒点は1/60秒ごとの蛾の位置を表す。

複数の雄蛾（種類は同一、*Cadra cautella*）を用いて同じ実験を4回繰り返した。

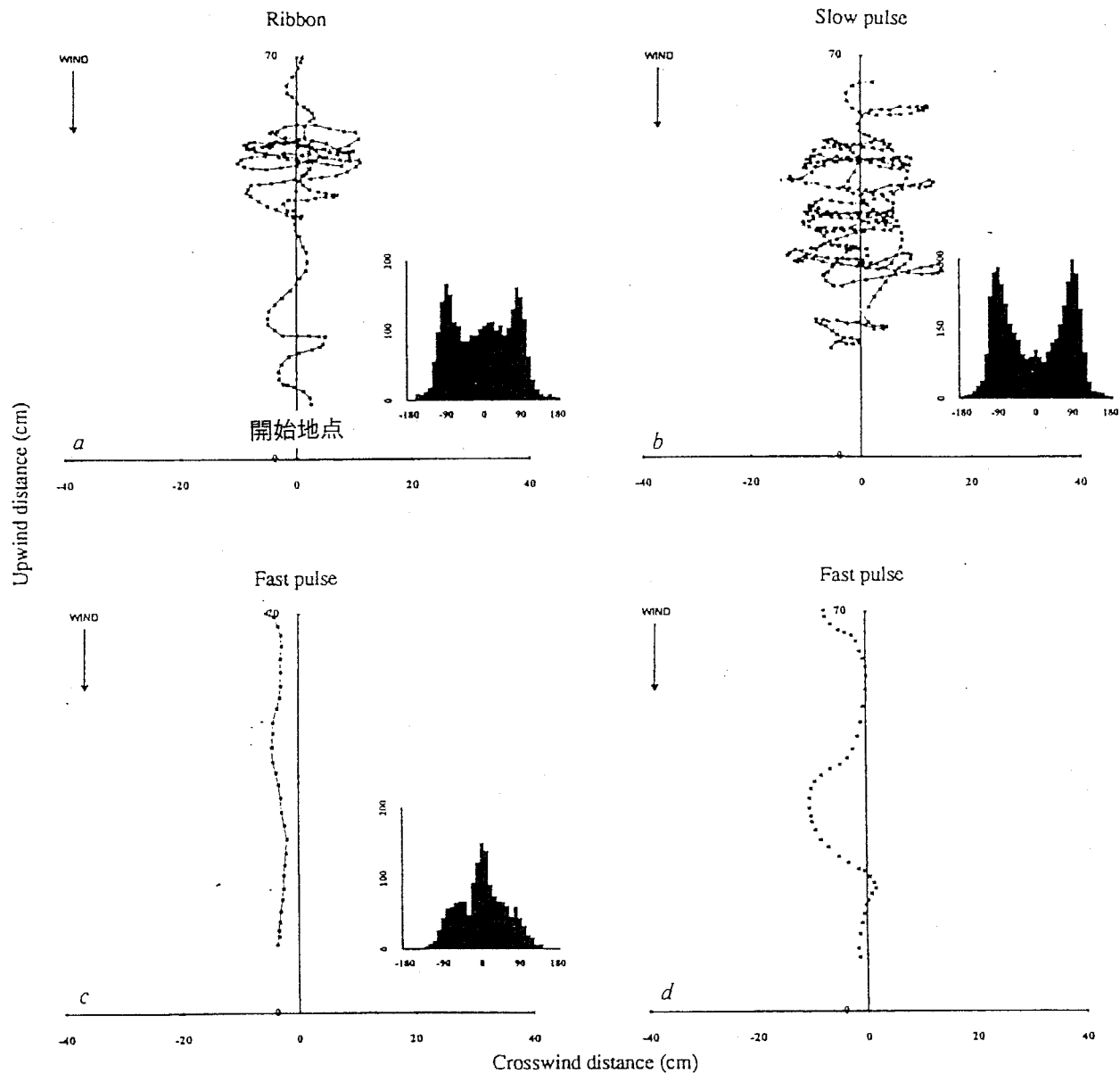


Fig. 1.16 プルーム構造による蛾の行動の変化 [68]

図中の黒点は 1/30 秒ごとの蛾の位置を表す。

- (a) リボン状の連続したプルームの場合
- (b) フェロモンパルスを低頻度 (約 0.6 Hz) で放出した場合
- (c) フェロモンパルスを高頻度 (約 5 Hz) で放出した場合の典型例
- (d) (c) と同様の実験条件における別の行動例

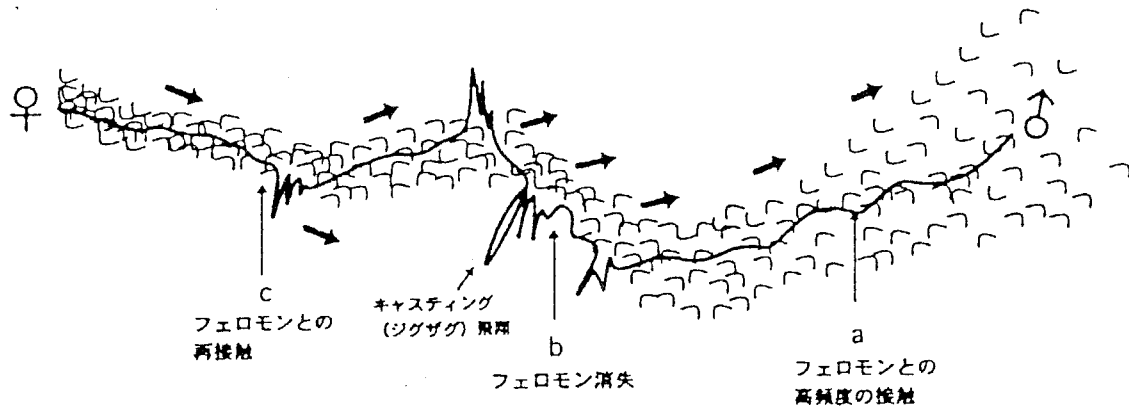


Fig. 1.17 匂い源へ向かう蛾の飛行パターン [51]

1.3.3 行動メカニズム解明のための神経生理学的アプローチ

前節で述べた行動メカニズムは、神経生理学の分野における最近の研究成果からも支持されている。蛾の頭部を切開し、微小な電極を顕微鏡下で神経細胞に刺入する。触角にフェロモン刺激を与え、電極を挿した神経細胞の活動電位を測定すれば、その細胞がフェロモン情報の処理経路上にあるか否かが分かる。カイコガを用いた調査では、脳内のフェロモン情報経路が Fig. 1.18 に示すレベルまで解明されている。触角のフェロモン受容細胞からのびた軸索は、中大脳の大糸球体に終末する。そして、その情報は介在神経で中継されながらキノコ体、前大脳側部を通り、触角と同側の LAL (Lateral Accessory Lobe) と呼ばれる領域に送られる [51, 53]。最終的には LAL から下行性介在神経を通して胸部の運動中枢へ情報が伝達される。このとき同側を下行する神経と、反側の LAL を経て反側を下行する神経の 2 種類があり、Fig. 1.18 ではこの 2 種類の神経細胞をそれぞれグループ II、グループ I と分類している。

神崎らはこの下行性介在神経のフェロモンに対する応答を調べ、フリップ・フロップ型の応答を示す神経を発見した [51, 53]。この神経は、Fig. 1.19 (A) に示すようにフェロモン刺激を受ける度に活動状態が反転する。しかも、左右の LAL 間で相互抑制がかかっており、興奮状態は左右で逆転している。更に詳しく調べると、反側を下行するグループ I の神経の応答 (ff 型と呼ぶ) と同側を下行するグループ II の神経の応答 (FF 型と呼ぶ) は逆転しており、左側のグループ I の神経は右側のグループ II の神経の応答と等しいことが分かった。このようなフリップフロップ応答は、Fig. 1.19 (B) に示すように顎神経の興奮状態変化とも同期している。カイコガは方向転換を行う際に必ず顎をターン方向へ回転させるので、このフリップフロップ応答がフェロモン源に向かうジグザグ行動を制御する信号であると考えられている。

このような神経生理学的知見を基に、下山と神崎はカイコガの行動のコンピュータシミュレーションを始めている [97]。神経細胞 8 個からなる簡単なニューロンモデルを作り、風上の匂い源へ向かう行動を学習させることに成功している。こうした研究を通じて生物の行動メカニズムを明らかにし、同時に生物の長所を模倣した工学システムを実現すること

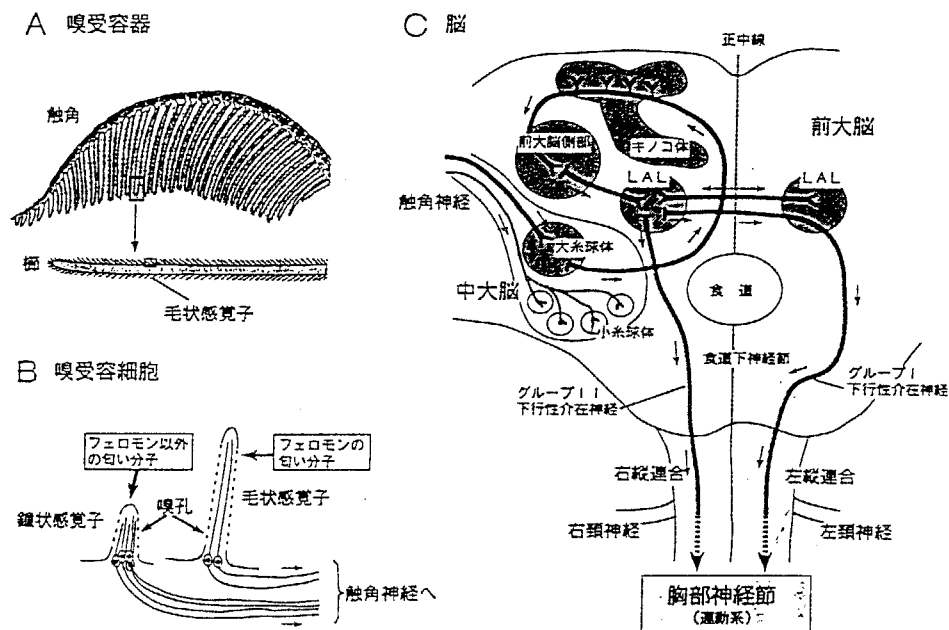


Fig. 1.18 カイコガの脳内のフェロモン情報処理経路 [51]

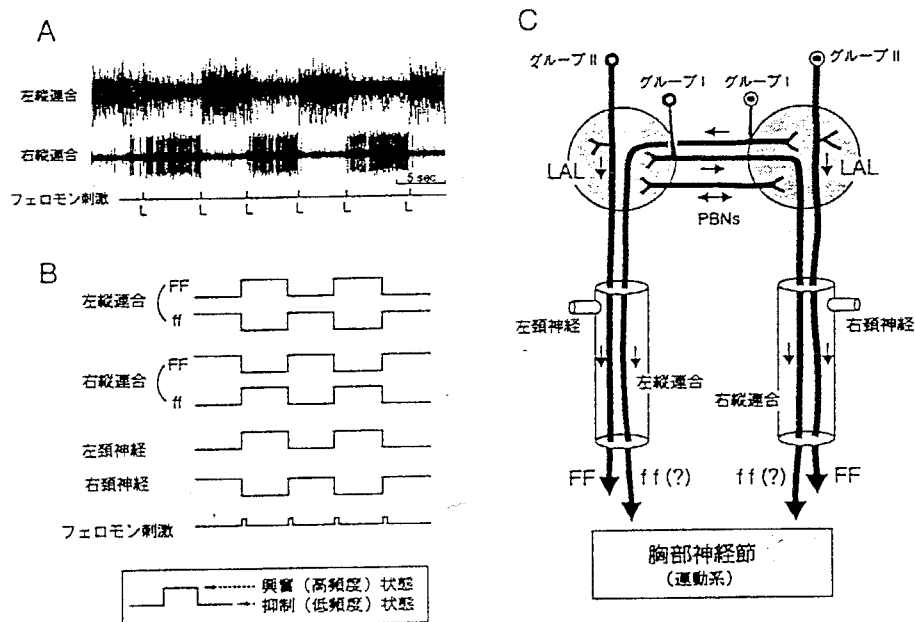


Fig. 1.19 下行性介在神経に見られるフリップ・フロップ型応答 [51]

- (A) FF 型フリップフロップ応答の実測例
(B) フリップフロップ応答のタイミングチャート
(C) 神経経路の模式図 (ff?は、ffの経路をまだ完全に断定していないことを示す)

Table 1.4 生物の匂い源探知行動メカニズムのまとめ

生物	メカニズム	特徴
単細胞動物	クリノキネシス 転向走性に基づく走化性 走風性または走流性	右記いずれか一つのみを使用 方向判定を繰り返しながら移動
無脊椎動物	単細胞動物のメカニズムに 屈曲走性が加わる	複数のメカニズムの組み合わせ 環境や匂い源からの距離に応じた メカニズムの使い分け
脊椎動物	基本的には無脊椎動物と同様	視覚、聴覚なども利用 様々な情報を総合して探知
蛾	主に走風性 プログラム化された行動パターン まず風上へ移動 次第にキャスティング飛翔へ移行	ブルーム蛇行に対する対応策 (キャスティング飛翔)

を今後、活発に行う必要がある。

以上、前節と本節で述べた生物の匂い源探知行動メカニズムをまとめると、Table 1.4 のようになる。空気中を漂う匂いの分布は不安定であるため、受動的に濃度を観測するだけでは情報の信頼性が低い。そこで生物は、方向判定を繰り返しながら移動する、移動して場所による濃度差を観測する（屈曲走性）などによって信頼性を高めている。蛾のキャスティング飛翔は見失ったブルームを再発見するための行動戦略であり、ブルームを辿ることに一度失敗しても、繰り返し探知を試みることによって信頼性向上を図っている。また、高等な動物ほど複数の探知メカニズムを使い分けており、環境変化に適応する能力を持つ。

1.4 ガスセンサ、匂いセンサの研究動向

本節では、匂い源探知システムへの応用を前提にガスセンサ、匂いセンサの研究動向をまとめる。本論文では文献 [96] にならい、ガスセンサを「気体中に含まれる目的の成分ガスを検出し、それを電気信号として取り出すデバイス」と定義する。匂いセンサという言葉は現在曖昧に用いられているが、ガスセンサの中で人間が感じる匂い物質を検出対象としたものを匂いセンサと呼ぶ場合が多い。したがって、以下では匂いセンサをガスセンサに含め、呼び名をガスセンサに統一した。

1. 感度	1. 感度
2. 選択性	2. 精度
3. 精度	3. 応答速度
4. 応答速度	4. 選択性
(a) 一般的な優先順位	(b) 匂い源探知における優先順位

Fig. 1.20 ガスセンサに要求される性能

1.4.1 匂い・ガス源探知に必要なセンサの条件

ガスセンサの性能を表す基本的な特性として、感度、選択性、精度、応答回復速度が挙げられる。ここでは「感度」を検出可能な最低濃度と定義する。「選択性」は、異なる種類のガスや匂いを識別する能力である。「精度」は対象ガスの濃度を定量する際の安定性を意味する。ガスセンサの場合には、気温や湿度、気流などの影響で応答特性が変化してしまうことや、使用を続けるうちに特性が変わることがある。一般には、得られる電気信号の分解能やノイズよりも、このような現象が精度を決定する場合が多い。また本論文では、低ガス濃度の雰囲気から高ガス濃度雰囲気へセンサを移したときの応答の変化速度を「応答速度」とよぶ。逆に、高ガス濃度雰囲気から低ガス濃度雰囲気へ移した際の応答変化速度を「回復速度」とする。

1960年代から今日に至るまでに様々なガスセンサが開発され、その改良が行われている。一般に、ガスセンサの開発方針は Fig. 1.20 (a) のような優先順位であることが多い。ガスセンサの応用の中心はガス漏れ警報器など危険ガスの検出であり、対象のガスを必要な感度で検出することはガスセンサの必要最低限の条件である。また、検出対象以外のガスに反応しては警報器として使用できないので、選択性も重要である。最近実用化されつつある匂いセンサ、匂いセンシングシステムの場合には、応用中心が食品や香料の品質管理である。したがって、この場合も微妙な匂いの違いを識別する選択性が重視される。一方、精度や応答回復速度はあまり重要視されないことが多い。

これに対して、匂い・ガス源探知に必要なセンサの条件を Fig. 1.20 (b) に示す。匂いやガスが空気中に放出されると、急速に希釈される。このため、探知システムには希薄なガスを検出する能力が必要とされるので、やはりセンサの感度が第一条件となる。しかし、匂い・ガス源探知の場合、次に必要なのはセンサの精度である。匂い源に向かうためには、微小な濃度差を検出して濃度勾配を観測しなければならない。

また、応答速度も重要な要素である。ガスセンサ応答にしたがってロボットを匂い源に移動させることを考えると、最低でも秒オーダーの応答回復速度が望まれる。しかし、ガスセンサには応答回復に数十秒から数分を要する遅い素子が多い。このため、ガスセンサの応答が完全に变化するのを待っていては、匂い源に到達するまでに膨大な時間を必要とし

てしまう。この問題を解決する方法として、センサ応答を信号処理にかけることが考えられる。センサの入出力関係を1次遅れ系や2次遅れ系などの線形システムで表すことができれば、遅いセンサの応答から入力の変化する速さを求めることが可能になる。しかし、後述するように現在開発されているセンサは原理的に非線形システムで表されるものが多く、その応答の信号処理は困難である。線形システムで表される素直な特性のセンサを開発することが望まれる。

以上の三つの条件を満たせば、匂いやガスの発生源を探索することが可能となる。現実の環境では対象以外の匂いやガスが必ず存在するので、これらに加えて選択性も必要である。しかし、本研究ではまず探知可能なシステムの開発を目指し、選択性については考えずに対象以外の匂い・ガスが存在しない環境下で実験を行った。

また、ロボットに搭載して匂い源探知システムを構成する場合には、センサの大きさや消費電力なども問題となる。特性が優れていても、大きなセンサや消費電力の多いセンサは使用できない。

1.4.2 センサの種類

現在までに数多くのガスセンサが提案されているが、実用化まで至ったものは少ない。代表的なセンサとして、次のセンサが挙げられる。

- 酸化物半導体ガスセンサ [95]
- 有機薄膜を塗布した圧電素子センサ [57]
- FET 型ガスセンサ [67]
- 導電性高分子センサ [31]
- 電気化学センサ [101]

(1) 酸化物半導体ガスセンサ

酸化物半導体ガスセンサは、 SnO_2 や ZnO などの金属酸化物半導体を 300°C 程度に加熱して用い、還元性ガス中における表面酸化状態の変化を素子抵抗の変化として検出する。ガスセンサとしては最も研究の歴史が古く、1969年には田口によって実用化されている。水素、一酸化炭素、メタン、アルコールなどの可燃性ガスに対して非常に感度が高いのが特長であり、数 ppm のアルコールガスを検出可能である。人間が感じる匂い物質の場合には、還元性がそれほど強くないので感度は落ちるが検出は可能である。

一方、欠点として選択性が低いことや応答の回復速度が遅いことが挙げられる。半導体ガスセンサの動作原理については2.2節で述べるが、センサの応答時にはセンサ表面がガスによって還元され、回復時は逆に空気中の酸素によってセンサ表面が再酸化される。この前者の反応が速やかに行われるのに対し、後者の反応は非常に遅い。代表的なセンサの応答波形として、 SnO_2 ガスセンサのイソブタンに対する応答を Fig. 1.21 に示す。同図で

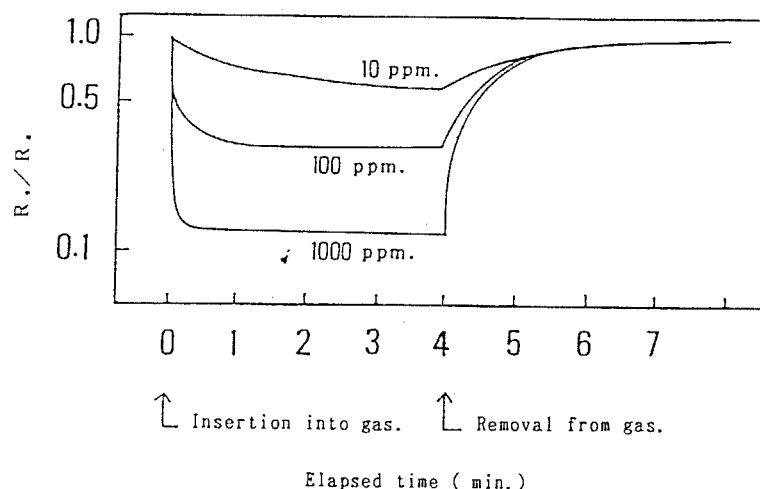


Fig. 1.21 半導体ガスセンサの応答波形 [41]

はガス中のセンサ抵抗と空気中のセンサ抵抗の比をセンサ応答として定義しており、ガスを検出するとその値が小さくなる。同図に示すように、半導体ガスセンサの応答は速やかであるが、回復には数分を要する。このように応答速度と回復速度が異なるため、ガスセンサ応答の動特性を線形システムの伝達関数で厳密に表すことはできない。また、定常応答に関してもガス濃度のべき乗で表されることが知られており、非線形性を有する [41]。

こうした欠点にも関わらず、半導体ガスセンサの場合には高感度であるという最優先の条件を備えており、また応答の安定性も比較的優れていることから、空調機や電子レンジの制御などに実際に応用されている。匂い源探知への使用に関しても、半導体ガスセンサの他に使用可能なセンサが無いというのが現状である。

また、半導体ガスセンサには、センサを加熱して用いることからヒータの消費電力が大きいという欠点もある。近年、ヒータ電圧を短時間のパルス駆動として消費電力を減らしたセンサや、センサ素子を小型集積化した薄膜型半導体ガスセンサも開発されている [5, 93]。しかし、感度や応答の安定性などについて研究の余地がある。

同様の原理のガスセンサとして、触媒を用いてガスを酸化した際の反応熱を検出する接触燃焼式ガスセンサも開発されている。しかし、定常応答がガスに比例するという特長はあるものの、感度が悪いという匂い源探知にとって致命的な欠点を持つ。

(2) 有機薄膜を塗布した圧電素子センサ

水晶振動子や表面弾性波素子の表面に有機薄膜を塗布すると、膜に吸着したガス分子の質量に比例して共振周波数が変化する [57]。膜材料としてはガスクロマトグラムの固定相材料を始め各種の有機物を用いることができ、特性の異なる多様なセンサを作ることができる。特に、生体膜材料である脂質を用いることによって人間の嗅覚に近い応答特性が得られる可能性がある [85]。しかし、ガスの検出感度は比較的悪く、検出下限濃度が数十 ppm 程度の場合が多い。また、当研究室で予備的実験を行った結果、センサに風が当たると応

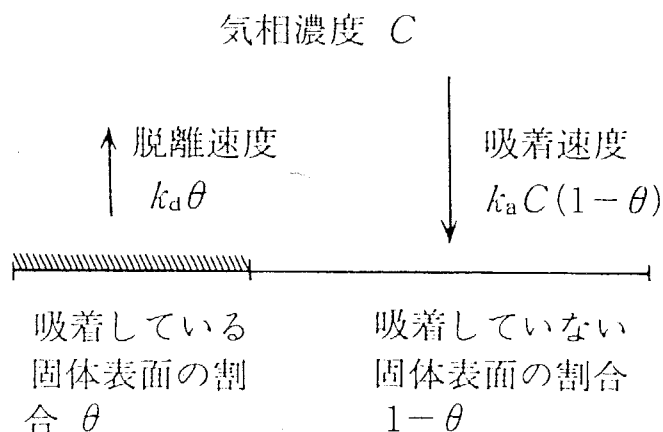


Fig. 1.22 ラングミュア吸着における吸着・脱着速度 [59]

答が変動するという問題があった。これを解決すれば、匂い源探知に使用できる可能性はある [112]。

圧電素子センサの応答・回復速度は、有機薄膜へのガスの吸着・脱着速度によって決まる。簡単のためガスが膜表面にのみ吸着すると考える。このような吸着はラングミュア吸着と呼ばれ、気相中のガス濃度 C と吸脱着の速度は Fig. 1.22 のように表される。したがって、吸着濃度 θ の時間変化を表す微分方程式は、吸着・脱着の速度定数をそれぞれ k_a 、 k_d とすると、

$$\frac{d\theta}{dt} = k_a C(1 - \theta) - k_d \theta \quad (1.2)$$

となる。上式は非線形項 $k_a C \theta$ を含むため、圧電素子センサの場合にも応答の動特性を線形システムで厳密に表すことはできない。また、このことから吸着平衡を利用したセンサは全て非線形な動特性を持つと考えられる。実際のセンサの動特性は、膜構造や膜表面の境界層厚さなどにも影響されるためさらに複雑である。

(3) その他のガスセンサ

FET 型ガスセンサは、MOSFET のゲート金属としてパラジウムや白金などの触媒効果のある金属を使用したものである。このセンサを 150°C 程度に加熱すると、ゲート金属に H_2 などのガスが解離吸着し、双極子層を作る。これによって FET のしきい値電圧が変化することを利用し、ガスを検出する。微細化や集積化が容易という長所があるが、広く普及するまでには至っていない。

導電性高分子センサは、ポリピロールなどの導電性高分子の導電率がガス吸着によって変化することを利用する。このセンサの場合も集積化が容易という特長があるが、センサの安定性や感度に研究の余地が残されている。電気化学センサは、対象ガスに対して電気化学的な酸化・還元反応を起こし、その反応量を電極から電流として取り出す。低分子量の炭化水素や O_2 、 SO_2 、 HCl などに対して高感度なセンサが市販されているが、匂い検出用にはあまり用いられない。

1.4.3 複数センサの応答パターンを利用した匂い・ガスの識別

前節までに述べたガスセンサは通常、検出対象のガスを感度良く検出し、その他のガスをあまり検出しないように設計される。しかし、それだけでは選択性が十分でないことが多い。例えば、ガス漏れ警報器用の半導体ガスセンサは、可燃性ガス全般に応答してしまうため調理用酒による誤動作が問題となる。

また、匂いセンサの一つの開発目標は、人間の鼻と同様に様々な匂いを検出して嗅ぎ分けることのできるシステムである。しかし、人間の鼻が匂いを感じる物質は40万種以上有り、その一つ一つに特異的に応答するセンサを用意することは得策でない[73]。

こうした問題に対して Persaud らは、生物の嗅覚系を模倣し、複数のセンサの応答パターンを利用した匂い識別法を提案した[86]。生物の嗅覚受容細胞は、1種類の匂い物質のみに応答するのではない。哺乳類の嗅覚系には約1千種類の嗅覚受容細胞があると言われ、その一つ一つが分子構造の似た一群の分子に対して応答を示す[73]。このように選択性は弱い特性の異なるセンサを複数使用すれば、匂いごとに異なる応答パターンが得られるので、匂いを識別することが可能になる。

この考え方を受け継ぎ、兼安らは6種の半導体ガスセンサを1チップ上に集積化したセンサアレイを製作し、出力パターンの類似度を用いてガスの種類を識別した[50]。Abe らは複数半導体ガスセンサの応答パターンの分類に主成分分析やクラスター分析などの統計的手法を用い、エーテル臭、ミント臭などの匂いの分類に成功した[1]。

また、Lundström らは Fig. 1.23 に示すようなセンサを開発した[66]。同図のセンサは、彼らの開発したFET型ガスセンサを発展させたもので、ゲートにPt、Ir、Pdの3種類の金属を用いている他、センサの加熱温度が図の手前と奥で変えられている。したがって、このFETセンサはゲート内の場所によって応答特性が異なる。そこで、レーザー光を Fig. 1.23 に示すように上から照射し、照射部分のみの応答を取り出す。レーザー光を前後左右に走査し、応答を測定すると Fig. 1.24 (a) ~ (c) のような3次元グラフを得る。そして、応答の大きさに応じて点の明るさを変えた画像を描けば、同図(d) ~ (f) のような像が得られる。同図の(d)、(e)、(f) はそれぞれアンモニア、水素、エタノールに対して得られた画像を示しており、画像の違いからガス種を識別できることが分かる。Lundström はこの装置を「嗅覚カメラ」(olfactory camera) と呼んでいる。

中本らはセンサ応答パターンの識別にニューラルネットワークを用いた[26]。Abe らが用いた統計的手法は、パターンの境界が直線的である場合にしか有効でない。これに対しニューラルネットワークを用いれば、境界が複雑な曲線の場合にも識別可能である。したがって、銘柄の異なるウイスキーの匂いの識別など微妙な匂いの識別が可能となる[78]。

このため、最近ではニューラルネットワークを用いた研究例が増えており、ワイン品質の識別[83]や魚肉の品質の識別[107]などに应用されている。例えば、Lundström らは、2種類のFET型ガスセンサと2種類の半導体ガスセンサを用いて、紙の匂いの識別を試みている[40]。これは、紙を食品包装紙として用いる場合、食品に不要な匂いを付けないように品質を管理することが望まれているためである。この場合4個のセンサを用いているため、紙の匂いに対するセンサの応答パターンは4次元のベクトルで表される。これを主成分分析により2次元平面上に投影した結果を Fig. 1.25 に示す。図中の1から5までの番号

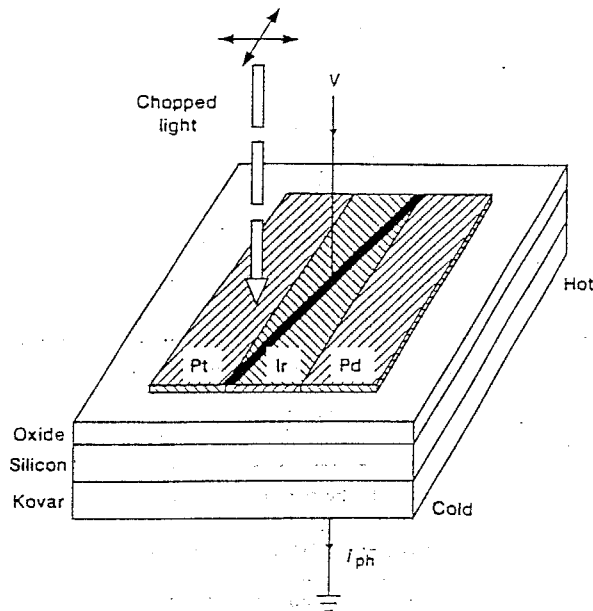


Fig. 1.23 嗅覚カメラの原理図 [66]

は紙の種類を表しており、5種類の紙から異なるセンサ応答パターンが得られている。パターンの分離がこの程度得られていればニューラルネットワークによる識別は容易であり、正解率 100%で識別することができる。

1.5 アクティブセンシングに関する研究動向

最も単純なセンシング形態は、対象から直接得られる信号をセンサが受動的に検出する方法である。しかし、必要な情報を「探る」行為をセンシングに加えると、受動的なセンシングでは得られなかった情報が検出できる。このようなセンシングの形態は「アクティブセンシング」と呼ばれる。石川はアクティブセンシングを「センシングの実現のため、被測定系に対して何らかの形でエネルギーを供給するセンシング形態」と定義しており [47]、他にも同様の定義をしている文献が多い [48, 105]。本論文でもこの定義を採用する。

アクティブセンシングには、二つの形態がある。一つはセンサを動かしてセンシングを行うタイプであり、もう一つはセンサから対象へ何らかの信号を発し、それに対する対象の反応から必要な情報を得るタイプである [49, 102]。谷江は前者を「運動型アクティブセンシング」、後者を「作用・反作用型アクティブセンシング」と呼んだ [102]。

運動型アクティブセンシングの特長は、センサを動かすことによってセンサ単体の場合の欠点を克服できることである [47]。例えば、センサの移動によるセンシング領域の拡大、機械的走査による空間分解能の向上などが可能となる。また、人間の皮膚の受容器や焦電センサのように微分的な時間特性を持つセンサの場合、定常状態では応答が無くなってしまっているので、センサを動かすことが不可欠である。一方、作用・反作用型アクティブセンシングの代表例としては、超音波の反射を利用した魚群探知機や、レーザの吸収から大気中

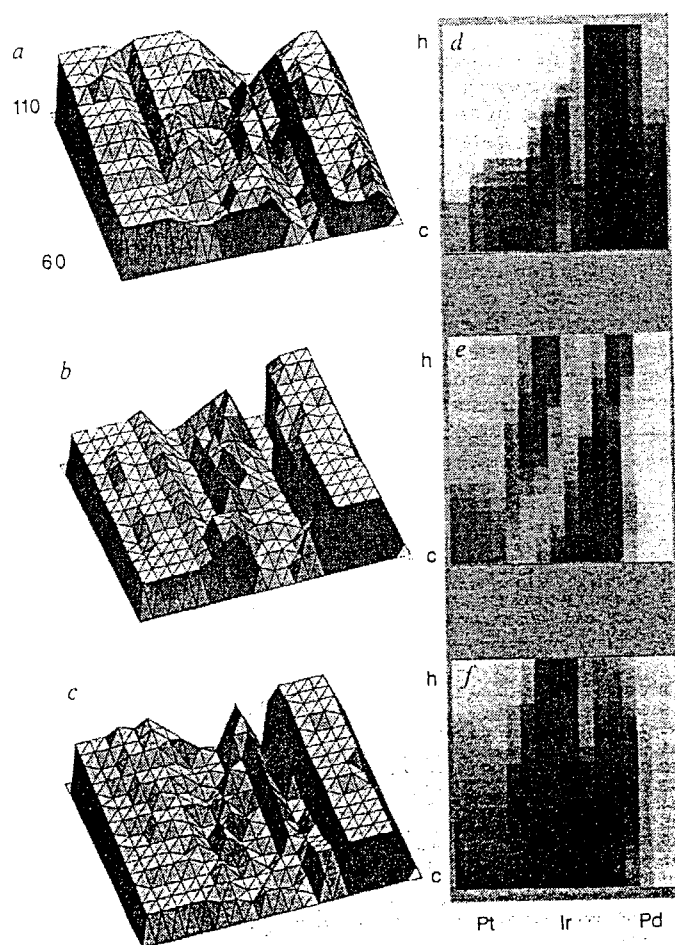


Fig. 1.24 嗅覚カメラによるガス測定結果 [66]

- (a)、(d) アンモニアに対するセンサ応答と画像イメージ
- (b)、(e) 水素に対するセンサ応答と画像イメージ
- (c)、(f) エタノールに対するセンサ応答と画像イメージ

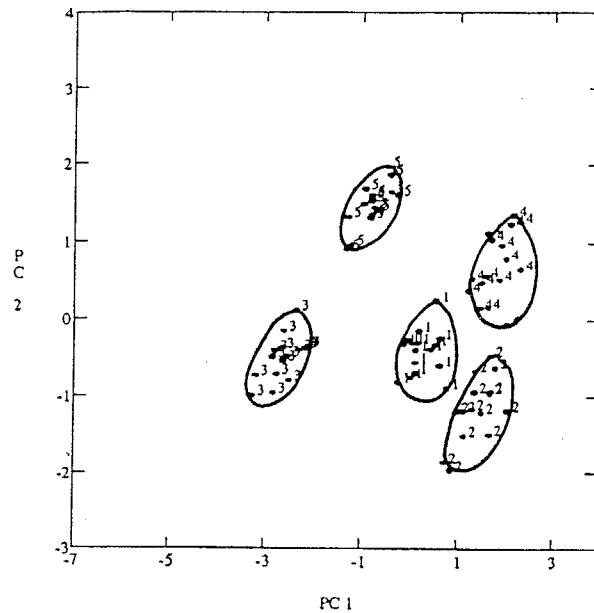


Fig. 1.25 5種類の紙に対するセンサ応答 [40]

の汚染物質分布を計測するレーザレーダなどが挙げられる。このタイプのセンシングの特長は対象に直接触れることができない場合でも計測可能であることであり、距離計測やリモートセンシング、非侵襲計測を目的とした研究例が多い。

以下の節では、アクティブセンシングの具体的な研究例を紹介する。アクティブセンシングの研究は、ロボット用の視覚、触覚の研究が中心であり、初めにこれらのアクティブセンシングについて述べる。次に、本研究と関係の深いロボットによる環境認識と嗅覚関連のアクティブセンシングについてまとめる。

1.5.1 視覚のアクティブセンシング

アクティブな視覚センシングは、その形態から運動型と作用・反作用型に分けることができる。運動型のセンシングに関しては、移動するカメラの情報を用いた3次元形状や距離の認識、カメラの視線制御による動物体の追跡、最適なカメラ位置への移動など数多くの研究例がある [102]。

研究例として初めに、カメラの移動を利用した距離認識を紹介する。物体までの距離や物体の3次元形状を得るためには、両眼視差による立体視を初め、物体にできる影や物体のテクスチャの利用など様々な受動的 방법이提案されており、カメラを移動しなくとも良い。しかし、いずれの場合も対象物に関する3次元情報が2次元カメラ像に圧縮されている。このため、3次元情報の再構成は不良設定問題（求める未知変数の数に対して方程式の数が不足しており、解が定まらない問題）となってしまうことが多い。Aloimonosらは、カメラを動かすことによって種々の不良設定問題が解消できることを理論的に示し、このようなセンシングアプローチをアクティブビジョンと呼んだ [4]。

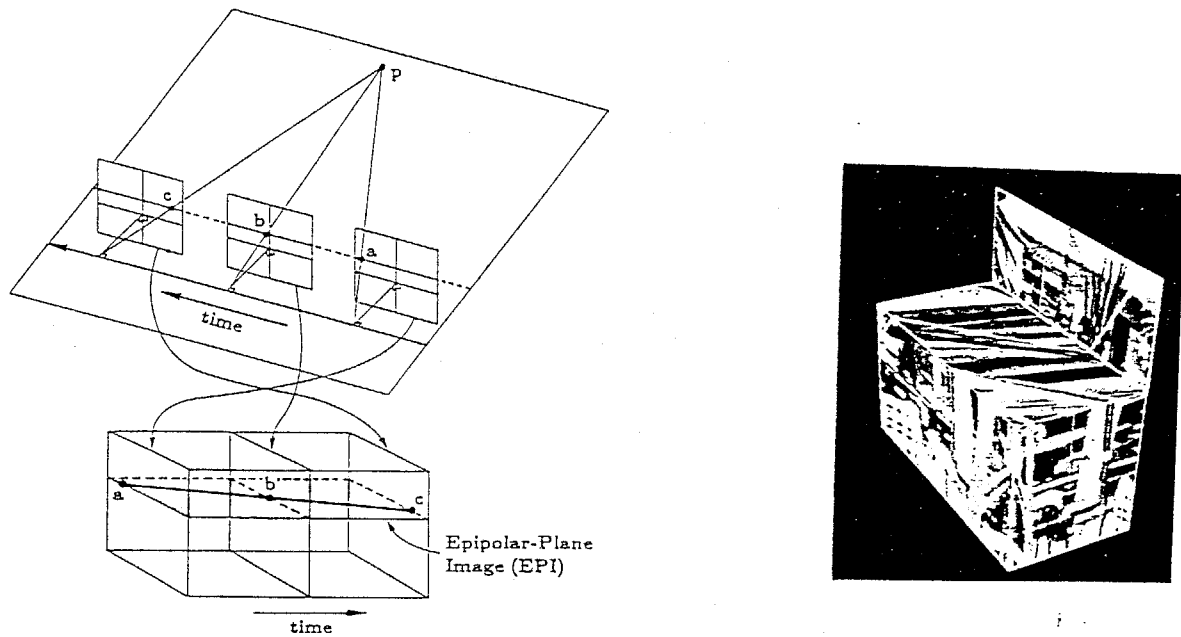
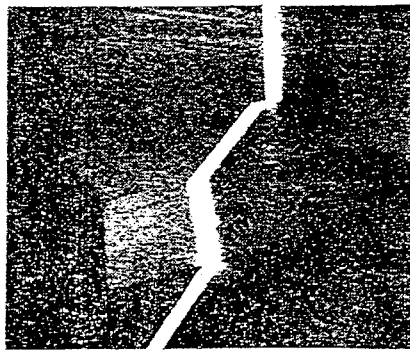


Fig. 1.26 エピポーラ画面を利用した物体の距離認識 [12]

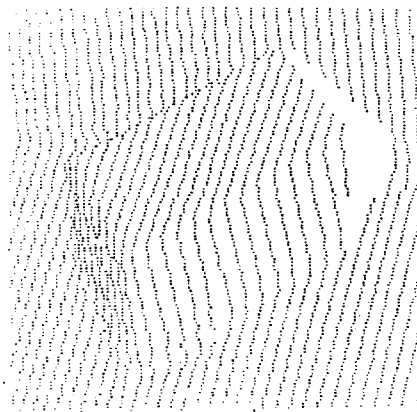
例えば Bolles らは、Fig. 1.26 のようにカメラを等速直線移動させた際の画像を解析した [12]。得られた2次元画像 (u, v) の時系列を同図に示すように時間軸を奥行き方向にとって重ね、3次元画像 (u, v, t) として扱う。今、点 P を注目する観測点とすると、 P は画像中で視線と同じ高さの点に射影され、カメラの移動に伴って $a \rightarrow b \rightarrow c$ と移動する。したがって、3次元画像 (u, v, t) を視線の高さで切った断面（エピポーラ画面像と呼ばれる）内で、観測点 P の像が直線的に移動する。このときの移動速度は P までの距離によって決まるので、直線の傾きを求めれば観測点までの距離を容易に求めることができる。通常の両眼立体視では片方の画像中の点がもう一方の画像のどの点に対応するかという画面間の対応を求めるのが非常に困難である。しかし、エピポーラ画面像を利用すると対応問題の解決は不要となる。また、複数の観測点を考えた場合、エピポーラ画面像中で両者の軌跡の交差を調べれば物体の見え隠れの関係が分かる。

カメラの視線制御による動物体の追跡に関しては、石川らの超並列・超高速ビジョンシステムが興味深い [45, 77]。このシステムでは画像の各画素に専用信号処理回路を設けて完全並列処理を実現し、1画面（フレームと呼ばれる）の信号処理時間が1 ms 以下という高速動作を実現した。動物体の追跡を行う場合はフレーム間の画像の変化から対象物の動きを検出する必要があり、フレーム間の対応を求めるのが困難である。しかし、このような超高速システムを用いれば、高速に運動する対象に対してもフレーム間の対象の動きが微小になる。1 m/s 程度の移動速度の対象物であれば、移動量がわずか1画素（1 mm 程度）になるので物体の移動検出が容易になる。

一方、作用・反作用型のアクティブセンシングに関しては、対象にスポット光やスリット状の光をあてて物体の形状認識に利用する研究が古くから行われており、このような手法



(a) スリット光の照射

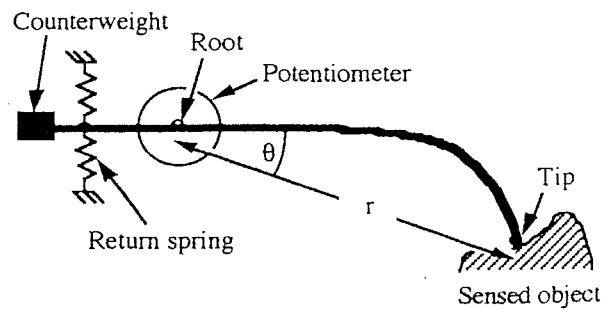


(b) 得られた3次元物体形状

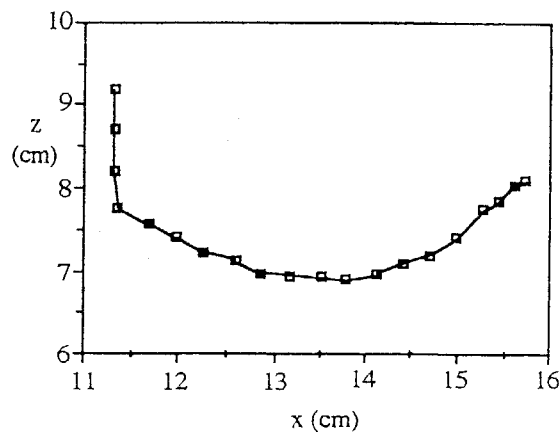
Fig. 1.27 スリット光の照射による物体形状の認識 [99]

は構造化照明と呼ぶ。スリット光を用いた物体形状認識の例を Fig. 1.27 に示す [99]。同図 (a) は直方体の物体に垂直なスリット光を照射した際の画像を表しており、光の当たっている部分は物体をスリットの平面で切断した際の切り口に相当する。したがって、このスリット光を左右に走査すれば、同図 (b) のような物体形状が容易に得られる。このように、構造化照明には対象の注目すべき点を明示する効果があり、両眼立体視で問題となる画像間の対応づけが不要になる。

以上の例から明らかなように、視覚センシングの場合には扱う信号の量が膨大であるので、能動性を加えることによって情報の抽出を簡単化し、計算量を抑えることが研究の中心である。



(a) センサ概略図



(b) ティースプーン表面形状の測定結果

Fig. 1.28 ヒゲ状のセンサによる物体表面形状の計測 [89]

1.5.2 触覚のアクティブセンシング

CCD カメラのような視覚センサは、一度の計測で対象物の全体像を把握することができる。これに対し、触覚センサの場合には対象物との接触点付近の局所的な情報しか得られない。このため、対象の全体像を把握するためにはセンサを動かして対象をなぞる動作が必要となり、触覚の場合には必然的に運動型のアクティブセンシングが多くなる。例えば、Russell は猫のヒゲをヒントに針金状のセンサを製作した [89]。Fig. 1.28 (a) のように、針金状のセンサを対象物表面に押しつけながら動かすと、針金の曲がり角 θ から対象物表面の凹凸が分かる。Fig. 1.28 (b) はティースプーンをなぞりながらセンサを動かした場合（この方向に x 軸をとる）の測定結果であり、スプーン先端の凹面形状（ z 軸方向）が得られている。場所をずらしながらこのようなスキャン動作を繰り返せば、対象物の形状を認識することができる。

この研究の場合には、生物を模倣して簡単で安価なセンサを実現した点が面白い。しかし、触覚センサを用いてなぞる動作を実現する場合には、センサの構造だけでなくそれを

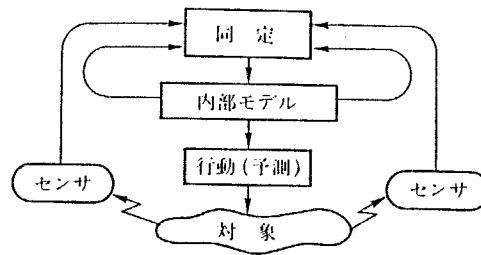


Fig. 1.29 アクティブセンシングシステムの構造 [114]

どのように動かすかということも重要である。対象物をなぞるためには対象の形状が分からなければならないが、形状を完全に把握するためには対象をなぞらなければならない。このため、情報が不完全であってもセンシング行動を起こし、行動を通じて情報の量や質を高めていく工夫が必要になる。

この問題に対し、Hillis はトップダウン的なセンシングシステム構造を提案した [33]。従来の静的なセンシングでは初めに測定を行い、その結果を解析して対象物を認識するボトムアップ的な方法がとられる。これに対し、アクティブセンシングの場合は、初めに仮説に基づいてセンシング行動を起こし、得られた測定結果を用いて仮説を検証するトップダウン的なシステム構造となる。

また、石川も Fig. 1.29 のようなシステム構造を提案している [114]。同図のシステムでは、センシングの途中であってもその時まで得られた情報を用いて内部モデルの同定を行う。そして、このモデルを用いて予測を行い、行動を起こす。その結果得られた新しい情報は、内部モデルを更新するためにフィードバックされる。このようなシステムを石川は触覚センサを用いた物体形状の認識に応用し、内部モデルを用いた予測を通じて高速な物体のエッジトラッキング動作を実現している [46]。

触覚センサを動かすことによって可能となるのは、なぞり動作による対象物の認識だけではない。人間は表面に指を滑らすことによって物体の荒さや滑り覚を得ることができる。これをロボットフィンガーで実現しようという研究例は数多く、様々な形態のセンサが提案されている。ここでは例として篠田らの超音波を利用した触覚センサを紹介する [98]。このセンサは Fig. 1.30 に示すように、半球状のラテックスゴム製カバーとその中心に埋め込まれた超音波センサからなる。カバーが物体表面に接触するとそこで超音波が発生し、ゴム中を伝搬する。超音波センサは、4 枚の圧電性高分子薄膜（ポリフッ化ビニリデン、PVDF）からなり、それぞれの膜で検出した超音波強度を信号処理することにより超音波の発生位置、すなわち接触点に分かる。

さらに、Fig. 1.30 に示すように様々な情報をこのセンサから得ることができる。例えば、複数の近接した接触点が同時に観察された場合には、センサが荒い物体の表面に接触したことを表す。また、物体表面をセンサが滑っている場合には、超音波の持続時間が長くなる。このような情報は、センサが静止してしまうと超音波が発生しないため検出できず、セ

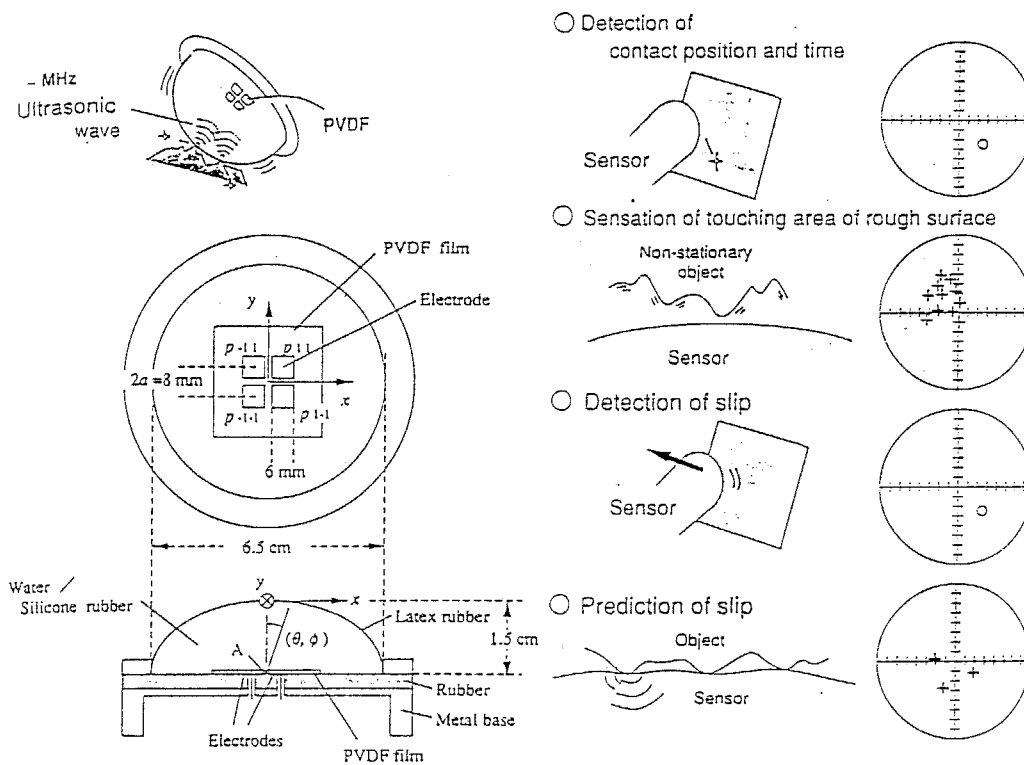


Fig. 1.30 超音波輻射触覚センサ [98]

		Shape	Bumps	Stability
	Machine screw	Long	+	Yes
	Dowel pin	Long	0	Yes
	Cotter pin	Long	0	No
	Set screw	Round	0	Yes
	Lock washer	Round	+	No
	Flat washer	Round	0	No

Fig. 1.31 実験に用いた物体とその特徴 [33]

ンサを動かすことによって初めて検出可能になる点が面白い。また、多数のセンサを密に配置したアレイを構成することなくカバー表面全域の接触を検出できる、超音波センサがカバーに埋め込まれており外からの衝撃に対して頑丈であるなど、従来の触覚センサにない特長を持っている。

一方、作用反作用型の触覚センサには、超音波や光を利用した圧力センサがある [102]。これらのセンサでは、センサ表面を弾性体カバーで覆い、内側からカバーに超音波や光を照射する。そして、反射してきた信号からカバーのへこみ具合を検出し、圧力を求める。

また、Hillis らはロボットの指先に 256 個の触覚センサを並べ、物体の識別を行った [33]。指先を対象物に押し当てると、対象物の形状に応じた圧力分布が得られるので、物体の形状や凹凸を識別できる。しかし、この方法ではネジやピンなどの細かい物体の識別が困難であり、ロボットに組み立て作業などを行わせることができない。そこで、Hillis は、ロボットの指を動かして物体を転がし、その時に必要な力の大きさを物体の識別に利用した。対象とした物体とその特徴を Fig. 1.31 に示す。図中の項目のうち、“shape” は触覚センサアレイから得た物体形状を表し、“bump” は物体が凸であるか凹であるかを符号で示す。この二つの情報だけでは、合わせ釘 (dowel pin) と割りピン (cotter pin) の区別が付かない。しかし、割りピンの方が転がりにくく安定な形状であることから、この二つの物体の識別が可能となる。このセンシングシステムの場合、指先を動かすという点では運動型アクティブセンシングであるが、物体に力を加えたときの反応を測定するという点から見れば作用・反作用型ともいえる点が興味深い。

以上のように、触覚センサの場合には効率よく情報を集めるためにはセンサをどのように動かすか、またアクティブな行為を付け加えることによって目的の情報をいかに取り出すかということが研究の中心となる。

1.5.3 ロボットによる環境認識

ロボットの理想的な形態は未知環境で任意の作業を行う自律ロボットであるが、現在の技術レベルでは実現困難である。そこで、問題を個々の要素に分け、それら一つ一つを解決

していくアプローチがとられている。例えば、未知の環境で障害物の配置を認識する技術、障害物を避けながら目標に向けて移動する経路の探索技術、作業計画に基づいてロボットの目標を決定する技術などに分類される。このうちの、未知環境における障害物の認識を単にロボットによる環境認識と呼ぶことが多い。

このような障害物認識を行う場合、使用されるセンサはステレオカメラや超音波距離センサなどであり、基本的には物体までの距離や物体の形状からどの位置にどのような障害物があるかを認識すればよい。しかし、障害物認識システムをロボットに搭載すると、移動しながら多数の観測点でデータを集めることができる。このデータをうまく統合すれば、環境に関して信頼性の高いデータが得られる。

例として、ステレオカメラによる多点観測を考える [60]。今、Fig. 1.32 に示す P_1 、 P_2 の 2 点から、二つの物体 O_1 、 O_2 を観測したとする。ステレオカメラにより求めた物体までの距離は必ず観測誤差を含むので、その誤差を楕円により図示すると Fig. 1.32 (a) のようになる。さらに、ロボットが P_1 から P_2 まで移動する際に、必ず移動距離や方向の誤差が生じる。この誤差は P_2 の位置の不確かさとして現れるだけでなく、 P_2 から観測した O_1 、 O_2 の位置の観測誤差にも重畳する。したがって、トータルの観測誤差は Fig. 1.32 (b) のように大きくなってしまう。しかし、 P_1 から見た O_1 、 O_2 と、 P_2 から見た O_1 、 O_2 が同じ物体を指しているという事実を利用し、観測結果を統合することができる。例えば、観測誤差と位置の誤差がガウス性雑音であれば、カルマンフィルタを利用して統計的に最適な物体推定位置を求めることができる。この場合、Fig. 1.32 (c) のように 1 点観測に比べて物体推定位置の誤差を減少できるだけでなく、同時に P_2 の位置誤差も軽減することが可能である。

また、浅田はレーザレンジファインダを用いた多視点観測データの統合を研究した [7]。レーザレンジファインダは、物体にレーザ光を照射した際の反射光を利用して物体までの距離を求める装置であり、レーザを走査することにより目の環境に対して密な距離情報を得ることができる。しかし、データ量を増やす逆効果となり、異なる視点のデータ間の対応が容易には得られなくなってしまう。そこで、地面を座標平面とする「高さ地図」を用意し、地図上の各点に対して高さ情報をマッピングする手法が用いられる。異なる観測地点で得たデータを同一地図上に射影すれば、観測点間の測定誤差が最小となるようにデータを統合することができる。浅田はレンジファインダを自動車に搭載し、高さ地図を路面認識などに応用している。

以上の手法は、観測を繰り返して情報を冗長に蓄えるのが特徴である。このように冗長な情報や相補的な情報を統合し、単一の情報からは得られない新たな情報を得ることを「センサフュージョン」と呼ぶ [7]。センサフュージョンには、先述した多視点観測情報の統合の他、複数のセンサ情報の統合も考えられる。Elfes は複数のセンサから得られた情報を「占有確率地図」と呼ばれる一枚の地図上に統合する手法を提案した [23, 70]。占有確率地図は地面を座標平面とし、格子状に区切られている。格子の一つ一つには、その中に障害物が含まれている確率をマッピングする。

超音波距離センサとステレオカメラの 2 種類のセンサを用いた占有確率地図の測定例を Fig. 1.33 に示す。図中の白い部分は障害物の存在確率が低いと判断された場所を表し、黒い部分は存在確率の高い領域を示す。小さい+印の部分は未観測の領域を意味し、図の中

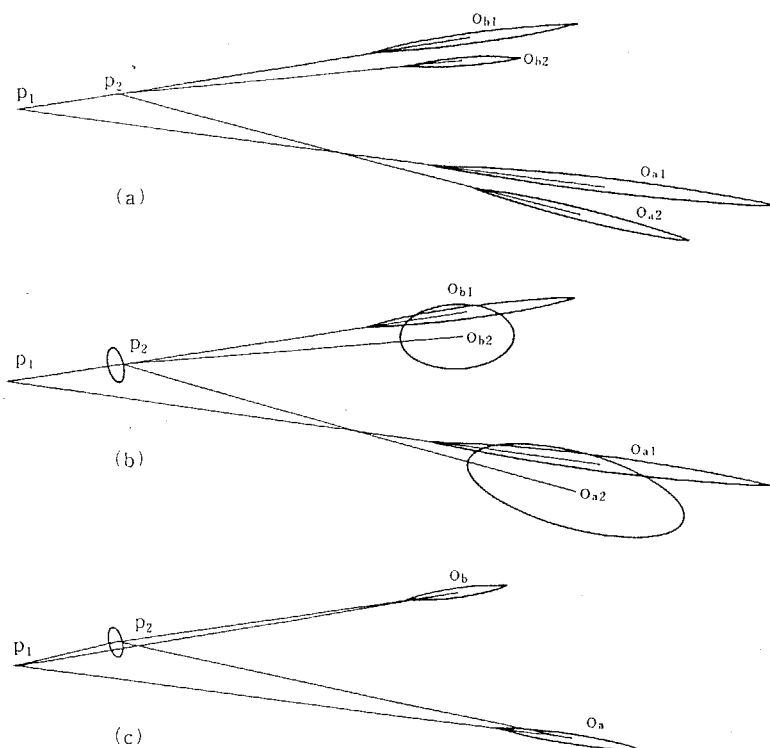


Fig. 1.32 多視点観測による観測精度の向上 [114]

央下部にある大きな+印がロボットの位置を示す。Fig. 1.33 (a) は超音波センサによる測定結果を示す。このような地図は、センサの指向性や距離測定精度を考慮したセンサモデルから計算される。また同図 (b) は、ロボットを前進させながら距離測定を 10 回行い、得られた 10 枚の地図をベイズ法により統合した結果である。超音波センサは放射状に 12 個取り付けられているため、一度の測定で全方位をカバーでき、左右の壁までの距離が正確に判定されている。しかし、指向性が悪いいため、地図中央部にある円形の柱と右壁の間の隙間を認識できていない。

一方、ステレオカメラによる測定結果を Fig. 1.33 (c)、(d) に示す。ステレオカメラの場合、柱と壁の間の隙間は正しく認識されているが、視野が狭いという欠点がある。この 2 種類のセンサから得た地図を統合した結果が Fig. 1.33 (e)、(f) である。同図では、超音波センサの測定範囲の広さを保ちながら、同時に前方の柱と壁の隙間がステレオカメラの情報により正しく認識されている。このように、異なるセンサ、異なる観測位置の情報を全て同一の地図上に統合することにより、信頼性の高い環境認識を実現している。

Elfes は近年、占有確率地図を拡張した「推論地図」も提案している [24, 25]。推論地図では障害物の存在確率に加え、タスク達成のために関心のある領域なども地図上にマッピングする。このように、全ての情報を一枚の地図上に集めれば、環境認識、行動計画、経路計画まで全てを推論地図上で行うことができる。

しかし、以上に述べたような環境認識は膨大な計算量を必要とするという批判がある。このため、環境認識から実際にロボットにタスクを実行させるまでの全てを統合したシステムはほとんど存在しない。これに対して Brooks は、複雑な環境認識を行わう代わりに、単純で反射的な行動を組み合わせることでロボットにタスクを実行させる手法を提案した [15]。従来のロボット制御は Fig. 1.34 (a) のような構造であり、センサからアクチュエータにいたる情報の流れにしたがって構築される。一方、Brooks の手法では制御システムを同図 (b) のように基本的な行動に分解し、それを並列に並べる。行動を分解したことによって一つの行動制御プログラムの実現は容易になっており、障害物回避ならば障害物を検出するセンサの出力のみをモニタすればよい。タスクの実行は、その場の環境に応じて適切な行動を選択し、組み合わせることによって実行される。Fig. 1.34 (b) の例では下にあるタスクほど優先順位が高くなっている。例えば、探索を行っている際に誤って障害物に近付くと、最下層の障害物回避が優先され、回避行動が行われる。

このようなメカニズムは behavior-based 制御と呼ばれており、昆虫の行動をヒントにしている。行動の選択方法や分解法などが確立されていないという批判もあるが、少ない労力で実際に動作するロボットを実現するためには有効な方法であり、近年活発に研究されている [65, 106]。

1.5.4 嗅覚のアクティブセンシング

嗅覚センサによるアクティブセンシングは、(1) センサのガス検出機構そのものがアクティブであるもの、(2) センサにガスを供給する機構がアクティブなもの、(3) 運動型アクティブセンシングによる匂い源探知の三つに大別できる。このうち、本論文と直接関係する匂い源探知については 1.6 節で述べる。

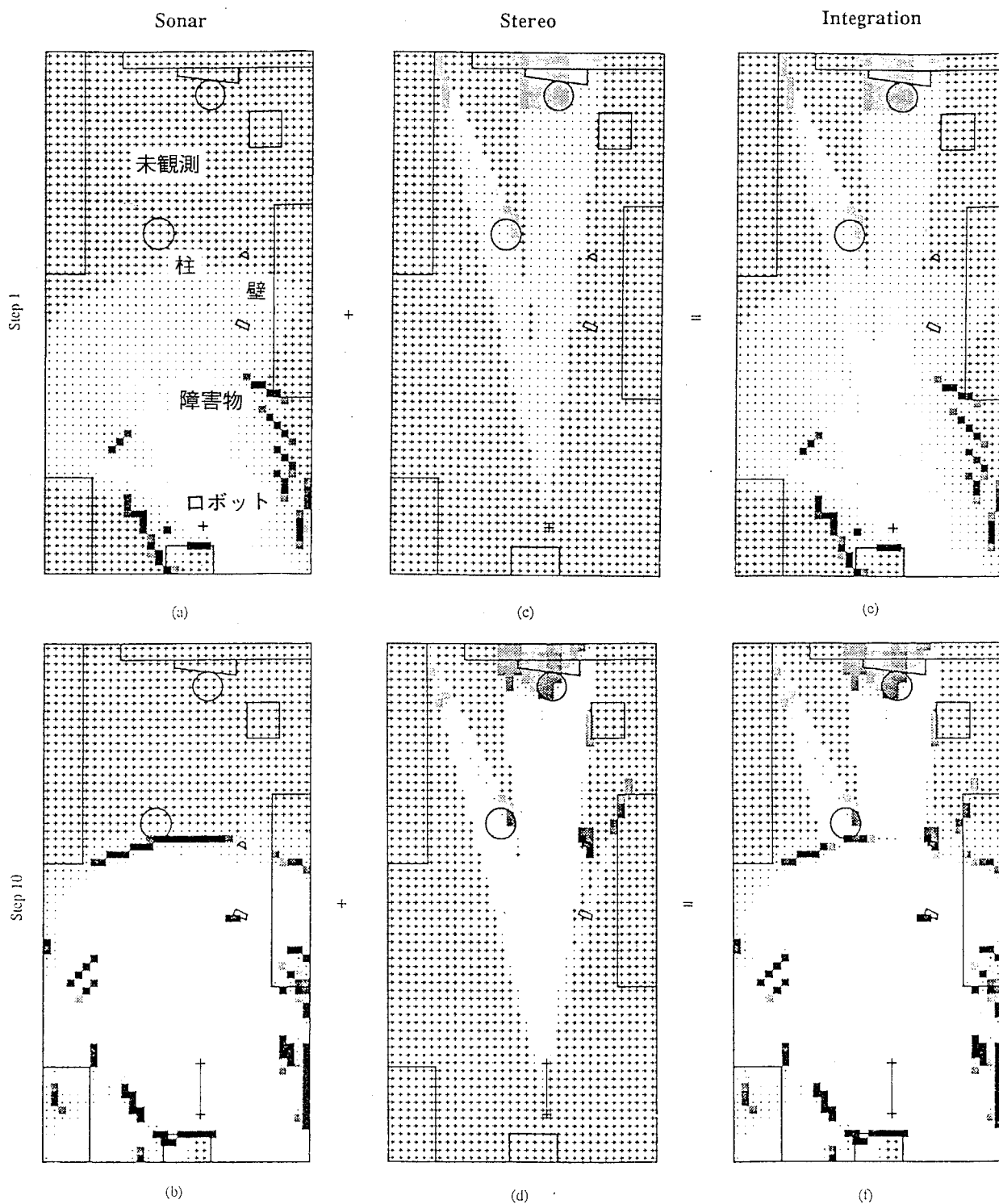


Fig. 1.33 占有確率地図 [70]

(a)、(b) は超音波センサ、(c)、(d) はステレオカメラによる地図。
 (e)、(f) は2種類のセンサ情報を統合した地図。
 また、(a)、(c)、(e) は1回の測定で得られた地図を表す。
 (b)、(d)、(f) は10回の測定結果を統合した地図。

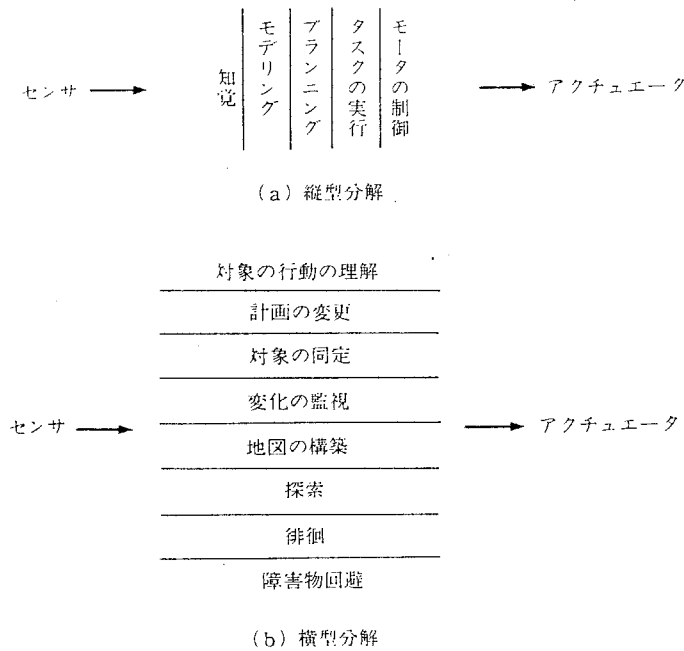


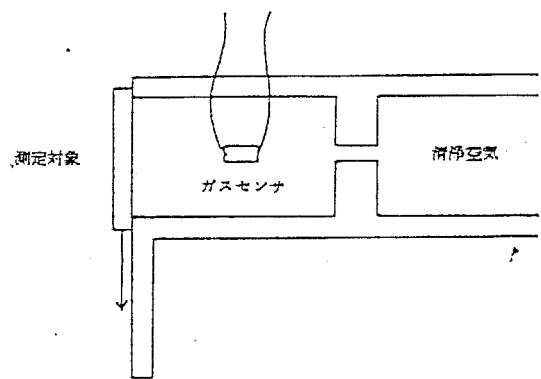
Fig. 1.34 ロボットセンシングシステムの構造 [114]

まず、アクティブなガス検出機構を持つセンサとしては、素子を加熱して用いる半導体ガスセンサが挙げられる。1.4.3 節で述べたように、ガス種を認識するためには特性の異なる複数センサの出力パターンを用いる方法が一般的である。しかし、半導体ガスセンサの温度を変えると応答特性が変化することを利用し、温度を変えながらセンサの過渡応答を測定すれば、複数センサを用いたのと同じ効果をセンサ 1 個で実現できる [36, 82]。

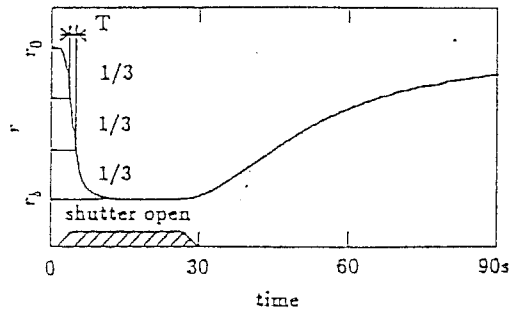
次に、センサに対しアクティブにガスを供給するシステムを紹介する。平中らは、Fig. 1.35 のようにセンサを取り付けた小部屋（以降ではセンサセルと呼ぶ）の前面にシャッタを設けた実験装置を作った [35]。シャッタを開いてガスをセンサセルに導入した後、再びシャッタを閉じると、Fig. 1.35 (b) のような過渡応答が得られる。このときのセンサ応答の緩やかな回復は、ガスが Fig. 1.35 (a) 右側の開口部から外へ拡散したために生じる。したがって、回復の時定数からガスの拡散係数 D を求めてガスを識別することが可能となる。

また、人間が匂いを嗅ぐときには鼻をくんとさせ、周期的に空気を吸い込む。これを模倣して匂いの識別を行うことを試みた例を Fig. 1.36 に示す [116]。センサ素子の前に吸気用ファンを取り付け、ファンの電源を周期的に入れると、周期的な応答波形が得られる。このとき、同図 (a) から (c) のようにガス種や濃度の違いによって異なる波形が得られると結論されている。しかし、ファンの風をセンサに当てるとセンサの温度が低下し、応答も変化する。応答波形がセンサの温度変化によるのかファンの吸引効果によるのか調査することが必要である。

その他、中本らはガスに対する応答測定システムに混合ガス合成システムを組み合わせ、ガスの成分定量を行うアクティブセンシングシステムを開発した [79, 80]。このシステムでは、測定対象のガスに含まれていると予想される成分ガスを用意し、それを混合する。混



(a) 装置概略図



(b) センサの応答例

Fig. 1.35 シャッタ法によるセンサ過渡応答の測定 [35]

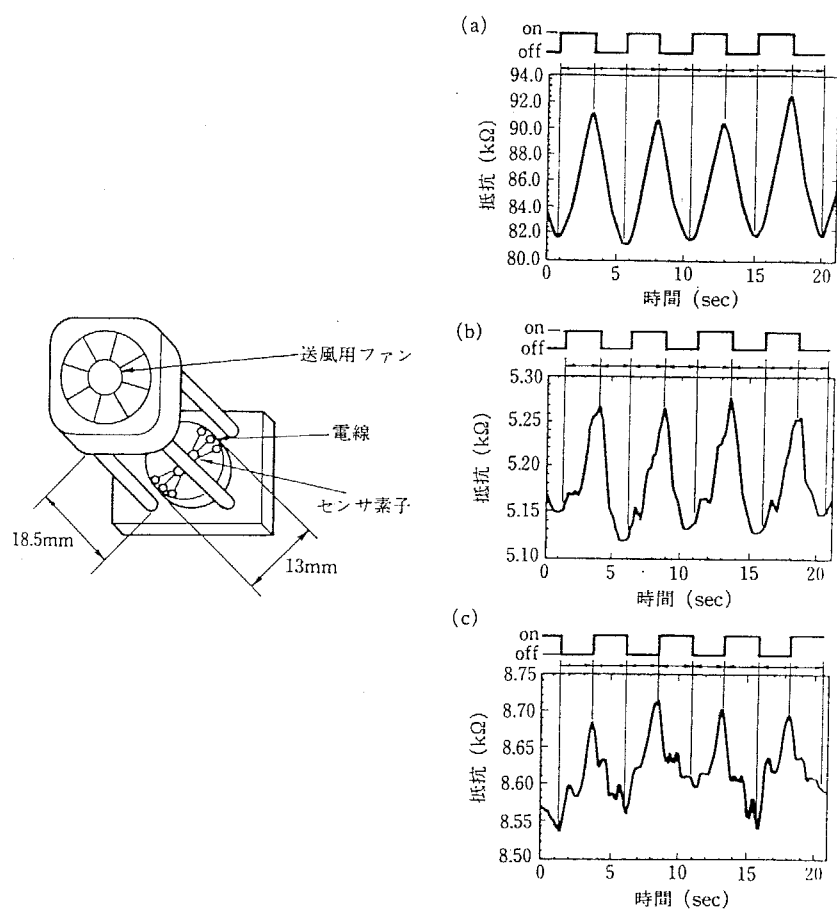


Fig. 1.36 “嗅ぐ” センサの実験装置と結果 [116]

図中の on、off はファンの電源入、切を意味する。

(a) 空気 (b) 1000 ppm エチレン (c) 1000 ppm CO

合ガスに対するガスセンサの応答パターンが対象ガスに対する応答パターンと等しくなるように混合比を調節すれば、ガスの定量を行うことができる。匂いは通常、膨大な種類の分子から構成されており、それら全てを成分定量するのは不可能に近い。しかし、混合ガスを用いた成分定量の場合には成分ガスとして多数の分子を含む匂いを用いることができる。例えば、ある香料がどの天然製油を混ぜて作ったものかといった定量を行うことができ、また、定量と同時に対象ガスの複製が得られる点が面白い。

以上のように、嗅覚に関係したアクティブセンシングの研究が行われている。しかし、視覚や触覚の場合と比べてアクティブな行為の利用形態は少なく、今後の研究の発展が望まれる。特に、1.6 節で述べるように、ガスセンサに運動性を付加したセンシングシステムはほとんど研究されていないのが現状である。

1.6 ガスセンサを搭載したロボットの研究動向

本研究と同様に、匂い・ガス源を探知するシステムの開発を目指した研究は非常に少ない。また、ガスセンサをロボットに搭載し、ロボットの行動に利用した例も少ない。その原因として、以下のような点が挙げられる。

- 空気中を匂いが漂ってくる場合、わずかな風の乱れによって匂い濃度は大きく変動する。このため、光や音波など他の感覚情報に比べて匂い情報の信頼性は低い。
- 同様の理由で、実験の再現性が乏しく、実験が困難である。
- ガスセンサや匂いセンサの性能は、生物の嗅覚器官に比べて安定性や応答速度などで劣っている。

これまでに報告されている研究例をまとめると、Fig. 1.37 のようになる。同図のように、匂い・ガス源探知システム、匂いのマーキングを利用したロボット誘導システム、生物を模倣したロボットシステムの三つの観点から研究が行われている。なお、簡単のため以下の記述では匂い源探知システムとガス源探知システムをまとめて匂い源探知システムと呼ぶものとする。

1.6.1 匂い源探知システム

平中らは 1987 年から 1989 年にかけてガスセンサアレイを利用した匂い濃度分布の可視化を研究した [35, 37, 38]。製作したセンサアレイは Fig. 1.38 のように 8×8 個の半導体ガスセンサを 2 次元平面に並べたものであり、センサ応答をコンピュータに取り込んで CRT 上にガス濃度分布を可視化する。また、同時にビデオカメラでセンサアレイを撮影し、ガスの可視化像と現場の像を CRT 上に重ねて表示することにより、実体感のある可視化を実現した。平中らは可視化した濃度分布から匂いやガスの発生源を探することを提案している。また、この研究に刺激を受け、山川らは光ファイバを用いたガスセンサのアレイを構築し、アルコールガス分布の可視化実験を行った [110, 111]。しかし、この方法では匂い源

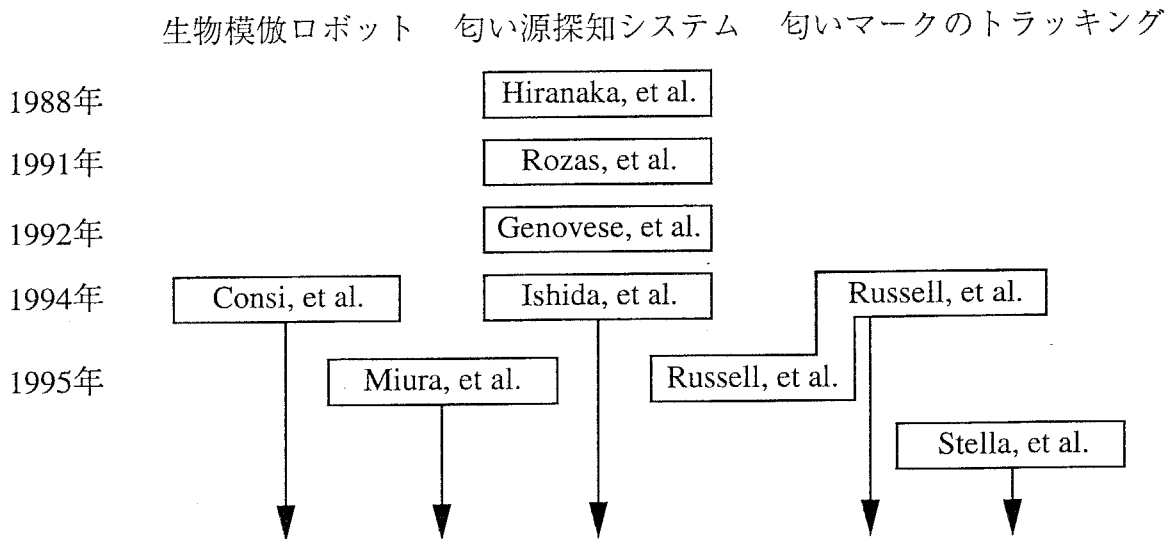


Fig. 1.37 ロボットへのガスセンサの応用

の周囲に予めセンサが配置されている必要があり汎用性に問題がある。このため、以降の研究ではガスセンサを動かして空間を探索する方法が用いられている。

Rozas らは 1991 年に、ロボット搭載用のガスセンシングシステムを発表した [88]。システムは Fig. 1.39 のようにガスセンサを金属製の箱に取り付けたもので、箱の入り口にはガスの吸引と排出を行うファンが取り付けられている。センサには 6 種類の半導体ガスセンサを用いており、応答パターンをクラスター分析や主成分分析などの統計処理にかけることによりガス種の識別が可能となっている。Rozas らはこのシステムをロボットに搭載し、ガス濃度勾配を辿って移動させれば匂い源探知が可能であると主張している。しかし、文献 [88] では匂いの識別法の記述が中心であり、匂い源探知に成功したことを表す結果は示されていない。実際には、風向と平行な方向の濃度勾配が非常に小さいため、この方法で匂い源を探知するのは困難である。また、Fig. 1.39 のシステムは、生物が鼻をくんとするように吸排気を繰り返してガスを取り込む点が興味深い。しかし、この効果に対する考察は行われていない。また、ファンの換気力が十分でないため 1 回の濃度測定に 30 秒も要しており、濃度測定を繰り返して探知を行うためには膨大な時間を必要とする。

Genovese らは、群知能ロボットによる匂い源の探索を提案した [28]。群知能とは、同じ機能を持つ個体を多数用意し、群として秩序ある行動を行わせることにより知的行動を実現する機能を指す。代表例はアリの群行動であり、一つ一つの個体の知能が低くても、それぞれがあるルールに従って行動する。これによって群として大きな食料を共同で運ぶなどの作業を実現している。Genovese らは、濃度勾配にしたがって移動するロボットを多数用意し、これを四方に向けて一斉に動かすことで汚染物質の発生源を探索することを考えた。シミュレーション結果を Fig. 1.40 に示す。同図 (a) 右下にある放射状に集まった点がロボットの初期位置を表す。ロボットが図中の円内に入ると汚染物質が検出され、ロボットは濃度勾配を辿って左上の汚染物質源に向かう。一方、汚染物質が検出されない領域で

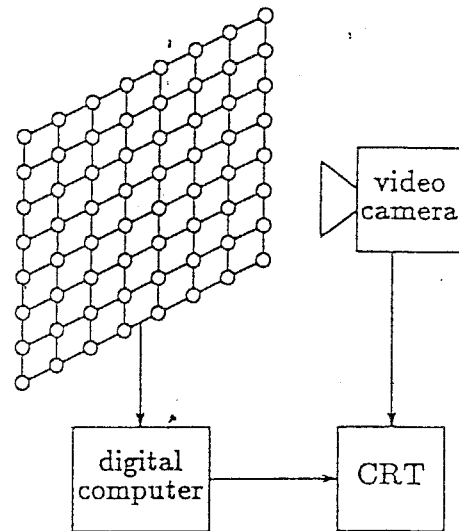


Fig. 1.38 ガス濃度分布の可視化装置 [37]

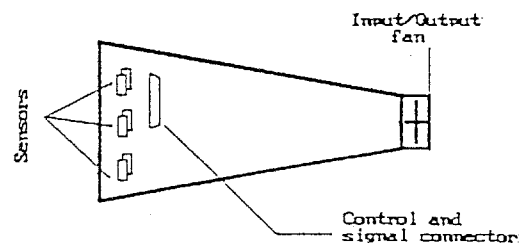


Fig. 1.39 ロボット搭載用ガスセンシングシステム [88]

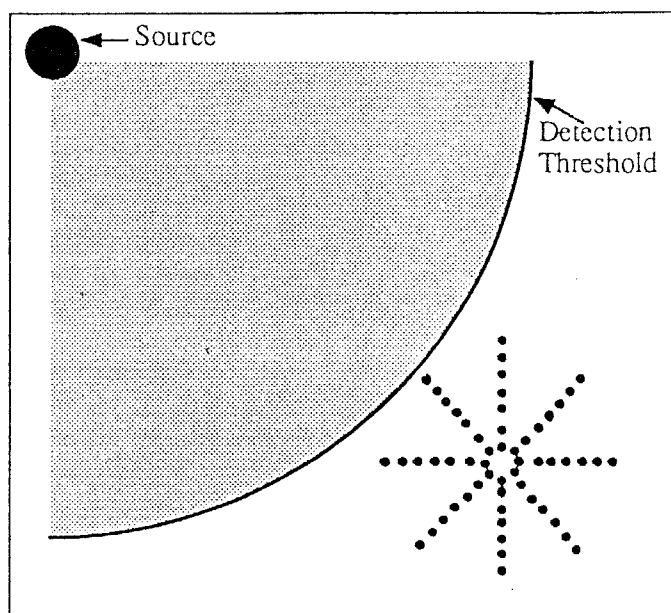
は、ロボットは直進する。最終的なロボットの配置は Fig. 1.40 のようになり、汚染物質源付近にロボットが集まった。しかし、Genovese らは実験によるアルゴリズムの検証を行っていない。実際の環境では風のために Fig. 1.40 のような整った濃度勾配はあり得ない。風の乱れによる濃度分布の変動などに個々のロボットが対応できるように、ロボットの高知能化を図る必要がある。

一方、本研究者は 1992 年から匂い源探知システムの研究を始めた。初めに、先述の研究例と同様にガスセンサ濃度情報を用いて匂い源を探知することを試みた [42]。しかし、風の乱れにより濃度分布が揺らぐため、十分な探知成功率を得るためには時間平均濃度の分布を測定する必要があった。このため、わずか 50 cm の距離から匂い源に到達するまでに 6 時間も必要とした [43]。

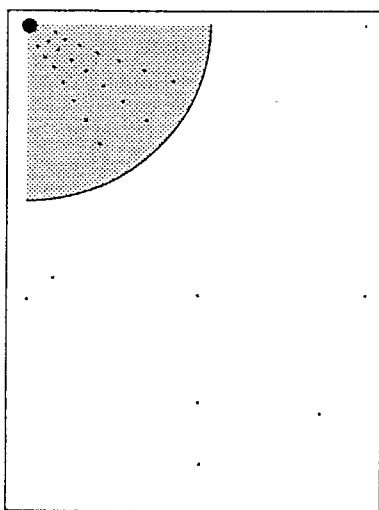
そこで、ガスセンサに加えて風速センサを搭載した匂い源探知システムを 1994 年に開発した [44]。このシステムでは、先述の研究例と同様の半導体ガスセンサを用い濃度勾配を検出する。しかし、ガスは風に運ばれて広がるので風と垂直な方向の濃度勾配は比較的急峻だが、風と平行な方向の濃度勾配が小さく検出が困難である。そこで、サーミスタ式風速センサを用いて風向を検出し、風と垂直方向の濃度勾配と組み合わせることにより、信頼性の高い匂い源方向の判定を可能にした。また、方向判定を行ってその方向に少し前進するという動作を繰り返し行い、匂い源探知行動全体の信頼性を向上している。文献 [44] は、ガスセンサと風速センサを組み合わせた匂い源探知システムを最初に提案しているだけでなく、実際に匂い源探知が可能なことを実験的に示した初めての論文である。このシステムについては第 3 章で詳しく説明する。

1995 年には、Russell らもガスセンサと風向センサを用いた匂い源探知ロボットを発表した [91]。このシステムでは、自由に回転する小さな旗をロボットに立て、風見鶏の原理で風向を検出している。また、先述の研究例は全て半導体ガスセンサを使用しているのに対し、ここでは水晶振動子式のガスセンサを用いている。一般に水晶振動子センサは数 ppm のガス感度を要求する匂い源探知実験には不向きだが、振動子に塗布する膜材料と対象ガスを選ぶことによってここでは 1 Hz/ppm の感度を実現している。本論文とほぼ同様の匂い源探知アルゴリズムを使用しているが、Russell らのシステムには障害物センサが搭載されており、Fig. 1.41 (a) のように障害物を避けて移動できる。この特性を生かし、Russell らはどの物体がガスを放出しているかを認識する機能も実現した。Fig. 1.41 (b) のように障害物を避けて風上側に移動した際にガスが検出されなくなれば、その物体が匂い源であると判定できる。

以上のように、匂い源探知システムの研究は歴史が浅く、匂い源探知が可能であるということがようやく実験的に示された段階である。しかし、その実験も文献 [44] は風洞というモデル環境で行っている。文献 [91] は建物の廊下で実験しており、より現実的であるが、空調の風が一様に吹いている場所を選んでシステムのテストを行っている。複雑な風速場を持つ実際の環境では匂い源探知が非常に困難になるのは明白であり、どのような環境でも確実に匂い源探知を行うことができるようにシステムを改良することが望まれる。

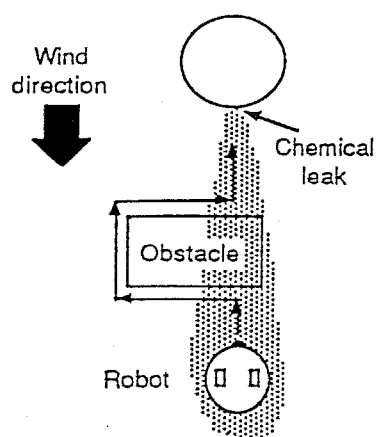


(a) 初期配置

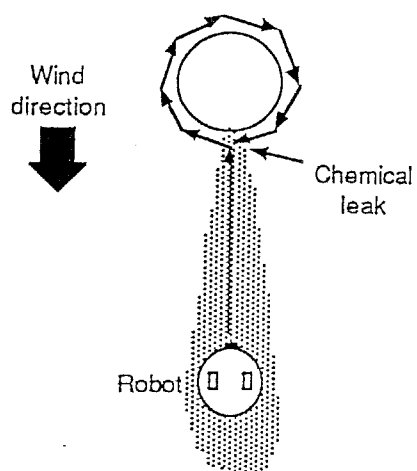


(b) ロボットの最終位置

Fig. 1.40 群知能ロボットによる汚染物質源の探索 [28]



(a) 探知途中の障害物回避



(b) 匂い源の特定

Fig. 1.41 匂い源探知行動と障害物回避行動の統合 [91]

1.6.2 匂いのマーキングを利用したロボットの誘導

本節では匂いを地面にマーキングし、それを辿って移動するロボットを紹介する。匂い源探知と直接の関連は薄いですが、ロボットに匂いセンサを導入することによって、複雑な行動を簡単に実現しようとする試みが面白い。

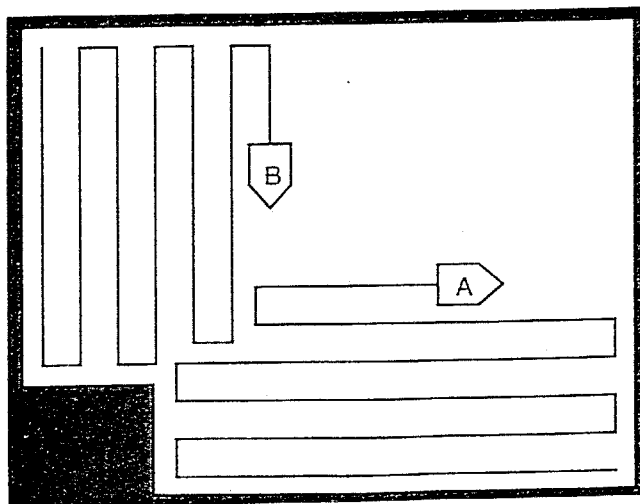
アリは餌場から巣に戻るときに道しるべフェロモンを地面にマークし、他のアリに餌場の位置を知らせる。Russell らはこのような生物行動をロボットに取り入れることを考え、匂いのマーキングについて Fig. 1.42 のような利用を提案した [19, 90]。同図 (a) では2台のロボットが部屋の中を掃除しているが、このように複数のロボットが協力して掃除を行う場合、複雑な作業計画機能が必要となる。しかし、掃除が済んだ領域に匂いをマークしておけば、各ロボットに対してマーク済みの領域を避けて掃除するようにプログラムするだけで効率よく掃除を行うことができる。しかも、マークした匂いは徐々に揮発して無くなるため、後片づけの必要がない。Fig. 1.42 (b) は、複数のロボットで荷物を運ぶ状況を想定している。このような場合、障害物を回避しながら目的地までのルートを求める機能をロボットに設ける必要がある。しかし、先頭のロボットがルートを探索し、匂いをマーキングしながら移動すれば、残りのロボットは単に匂いを辿る機能を持つだけでよい。また、自らがマークした匂いを逆に辿れば、未知環境を探索した後にスタート地点に戻るという機能を簡単に実現できる。

このようなロボットシステムを実現するため、Russell らは水晶振動子式匂いセンサを用いて Fig. 1.43 のようなセンシング機構を製作した。センサが左右に2個ずつ取り付けられているが、1個は匂いを吸着する感応膜を塗布した振動子、もう1個は参照用の何も膜を塗布していない振動子であり、両者の差が匂い濃度に対応する。同図に示すセンシング機構では、地面にマークされた匂いを吸引してセンサに導く。そして、左右のセンサ応答を比べ、マークされた匂いの道筋から外れないように移動する。しかし、単に吸引するだけでは左のセンサに対して右側からも匂いを吸引してしまうなど、左右のクロストークが問題となる。そこで、匂いを吸引する開口部分の周りに空気を吹き出してエアカーテンを作り、クロストークを改善する工夫がとられている。このように地面にマークされた匂いを辿る場合には、空気中を漂う匂いを辿る場合と異なり濃度分布の不規則な変動が無いので、実現は容易である。

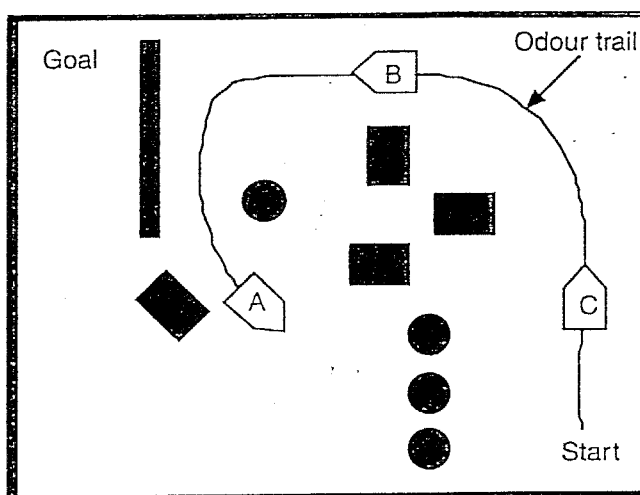
また、Stella らも同様のロボットを導電性高分子匂いセンサを用いて製作した [100]。工場 で用いられている軌道搬送車の軌道を従来の磁力方式から匂いのマーキングに置き換えることにより、コストダウンが期待できるとしている。

1.6.3 生物を模倣したロボットシステム

1.6.1 節で紹介した研究例は、工学的な観点から匂い源探知システムを実現しようというものであった。これに対し、Consi らは生物の匂い源探知行動のメカニズム解明を目的に、生物を模倣したロボットを製作した [16, 17]。製作したロボットの構造を Fig. 1.44 に示す。このロボットは、ロブスターの匂い源探知行動をモデル化するために作られており、水中を走行することができる。対象となる匂いはロブスターの場合には餌の匂いなどであるが、



(a) 掃除ロボット



(b) 搬送ロボット

Fig. 1.42 匂いマーキング機能の利用 [90]

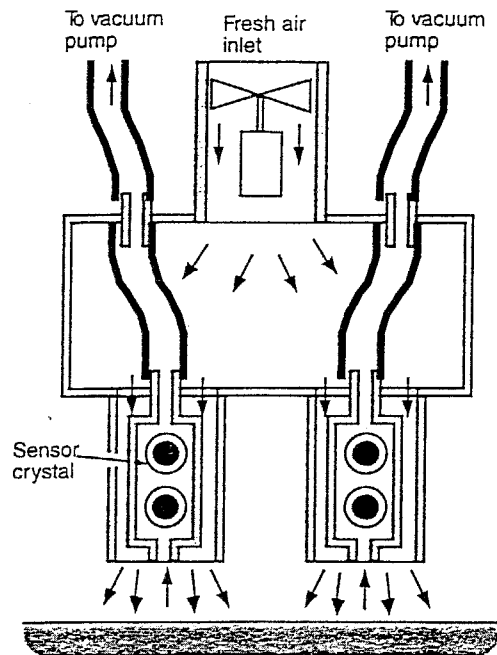


Fig. 1.43 エアカーテンを用いた匂いの検出機構 [90]

ロボットによる実験では食塩水を用いた。食塩水濃度は、水の導電率変化を電極で測定することによって検出する。ロボスターの匂い源探知行動について Atema は走化性を主張し、走流性ではないとしている [16]。そこで、Consi は走化性をモデル化した行動をロボットにプログラムし、実験を行った。その結果、匂い源の近傍では走化性で探知に成功したが、匂い源から離れてプルームの形が乱れてくると匂い源に到達できないという結論が得られた。実際のロボスターは匂い源からの距離に応じて異なった行動パターンを示すことが知られており、匂い源から離れた場所では流れの情報が有効であることを改めて示している。

また、桑名らはカイコガの触角をセンサとして用いた匂い源探知システムを提案した [62~64]。カイコガの触角を切断し、Fig. 1.45 (a) のようにリンガー液を満たしたガラスキャピラリーをかぶせる。こうして触角のフェロモン受容細胞で発生した電気パルスを経路に導き、触角電図を測定する。このような方法は、簡便なフェロモン濃度測定器として用いられている [92]。触角のフェロモンに対する応答波形は Fig. 1.45 (b) に示すように秒オーダーの回復を示し、既存のガスセンサに比べて高速である。また、カイコガはフェロモン分子 1 個を検出可能であると言われており、高感度センサの実現が期待される。フェロモン以外の匂い物質にはほとんど応答しないという欠点があるが、都市ガス中に微量なフェロモンを混ぜてガスを送り、ガス漏れ場所を探索するなどの応用が可能である。

桑名らはこのフェロモンセンサを左右に搭載したロボットを製作し、匂い源探知を試みた。しかし、そのアルゴリズムは左右の応答を比較して応答の強い方向へ進むという単純なものである。このように単純に濃度勾配を辿るだけでは匂い源の探知は困難であり、セ

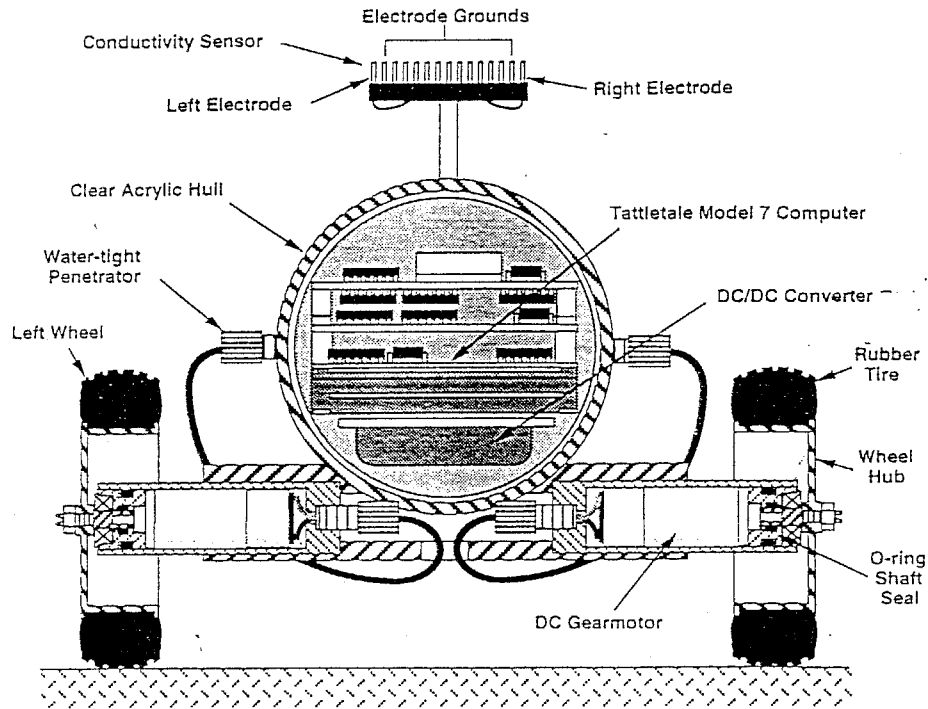


Fig. 1.44 水中匂い源探知ロボット [16]

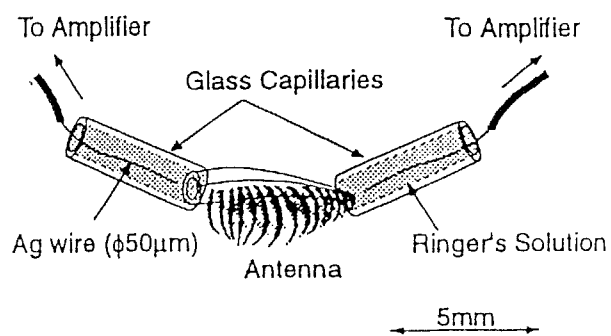
ンサだけでなくアルゴリズム面もカイコガを模倣して改良することが必要である。また、現実に測定される触角電図の大きさは Fig. 1.45 (b) のように非常に小さく、フェロモン検出の感度も悪い。フェロモン受容細胞で発生した電位の測定法を改良する必要がある。

1.7 本研究の目的と構成

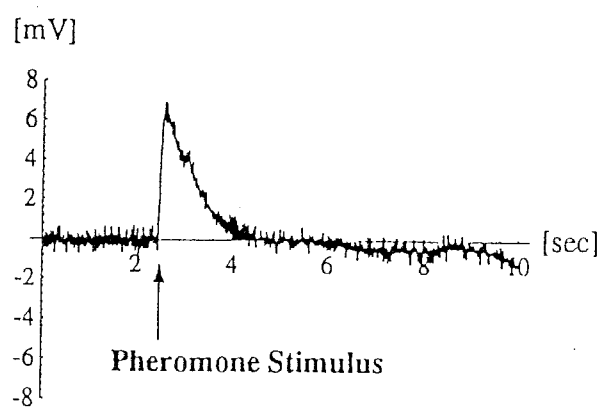
本章では、匂い源探知に関連する研究を生物学と工学の両面から述べた。また、匂い源探知システム構築の要素となるガスセンサ、匂いセンサの開発状況、アクティブセンシングシステムの研究動向について概説した。

生物のような匂い源探知能力が要求される分野は多い。例えば、ガス漏れや火災発生の検出などの防災対策や、汚染物質のモニタリングなどの環境計測が挙げられる。従来、こうした作業は人手と時間をかけて丹念に探すか、または警察犬のように犬に頼るかのどちらかであった。そこで、ロボットシステムによる自動化が望まれている。

このようなロボットシステムを構築する際に、生物の行動は良い手本となる。生物の匂い源探知行動には様々な形態があるが、多くの生物に共通する点として以下の2点を挙げることができる。第一に、生物は匂い源に向かって移動し、その過程で情報を集める。これはロボットによる環境認識と同様の、アクティブセンシングに他ならない。また、方向判定を繰り返して進路を修正する、一時的にブルームを見失ってもブルーム探索行動を繰



(a) センサの構造



(b) 応答波形

Fig. 1.45 カイコガの触角を利用したフェロモンセンサ [64]

り返し行うなど、繰り返しによって探知行動の信頼性を高めている。このような信頼性向上のための方策を、ロボットシステムにも取り入れる必要がある。

第二に、生物は左右の嗅覚器官の刺激を比較して単純に刺激の強い方へ行動するのではなく、流れの方向や、移動しながら観測した場所による濃度の変化などを統合して匂い源を探す。また、このような複数の情報を状況に応じて使い分け、環境変化に適応している。現在までに匂い源探知システムの開発を目指した研究はほとんどない。しかも、そのほとんどが単純に濃度勾配を辿って匂い源に向かうことを考えている。しかし、実環境では濃度分布が不安定であること、風と平行な方向の濃度勾配が微小であることを考えると、このような方法では匂い源への到達は困難である。

以上の点をふまえ、本研究ではアクティブセンシングの立場から、移動して匂い源を探知するシステムを構築することを目的においた。そして、その実現のために2種類のシステムを提案する。一つは、ガスセンサに加えて風速センサを搭載したロボットシステムである。濃度情報に加えて風向情報を用いることにより匂い源方向判定の信頼性が向上し、またセンサに運動性を付加したことによって移動しながら情報を収集する能力を持つ。したがって、このシステムは運動型のアクティブセンシングに分類できる。二つめのシステムでは、自ら風を起こすことによって匂いをセンサに能動的に引き寄せる。このアクティブな行為を通じて匂い源方向に関する情報を引き出す。このシステムは、環境に働きかけてその反応を観測するという点で作用・反作用型のアクティブセンシングと考えられる。本論文では匂いを能動的に採取するという意味で、このシステムを能動サンプリングシステムと名付けた。

本論文の構成図を Fig. 1.46 に示す。第2章では、本研究に用いた半導体ガスセンサとサーミスタ式風速センサの応答特性を述べる。また、実験環境として選んだクリーンルームについて説明する。

第3章では、ガスセンサと風速センサを用いた自走型匂い源探知システムの構築について述べる。ここでは、風洞という理想的な環境を用意し、濃度情報と風向情報を利用してシステムを移動させるアルゴリズムについて検討する。そして、濃度勾配と風向を用いて匂い源方向を判定し、これを繰り返しながら移動することで匂い源に到達可能であることを示す。

第4章では、構築したシステムを用い、現実環境であるクリーンルームで匂い源探知を試みる。クリーンルームの環境は空調の風が一定に吹いているという点で風洞環境に近いが、空調の給気口は複数有り、場所によって風向が異なる。これに対応するため、状況に応じてシステムの動作を切り替える適応能力をシステムに付加する。これによって、現実的な環境で匂い源探知が可能となったことを示す。

以上のシステムは匂い源まで移動することによって匂い源を探知する。これに対し、第5章では遠方から匂い源位置を推定することを試みる。システムを移動させてセンサ応答の時系列を観測し、その測定結果に対してプルームモデルをカーブフィットすることにより匂いの空間分布と匂い源位置を推定する。これは、ロボットによる匂い伝達場の認識と位置づけられる。

第6章から第8章では、能動サンプリング型の匂い源探知システムについて述べる。まず第6章では、能動サンプリング型システムの基本構成について述べ、能動的な匂いの採

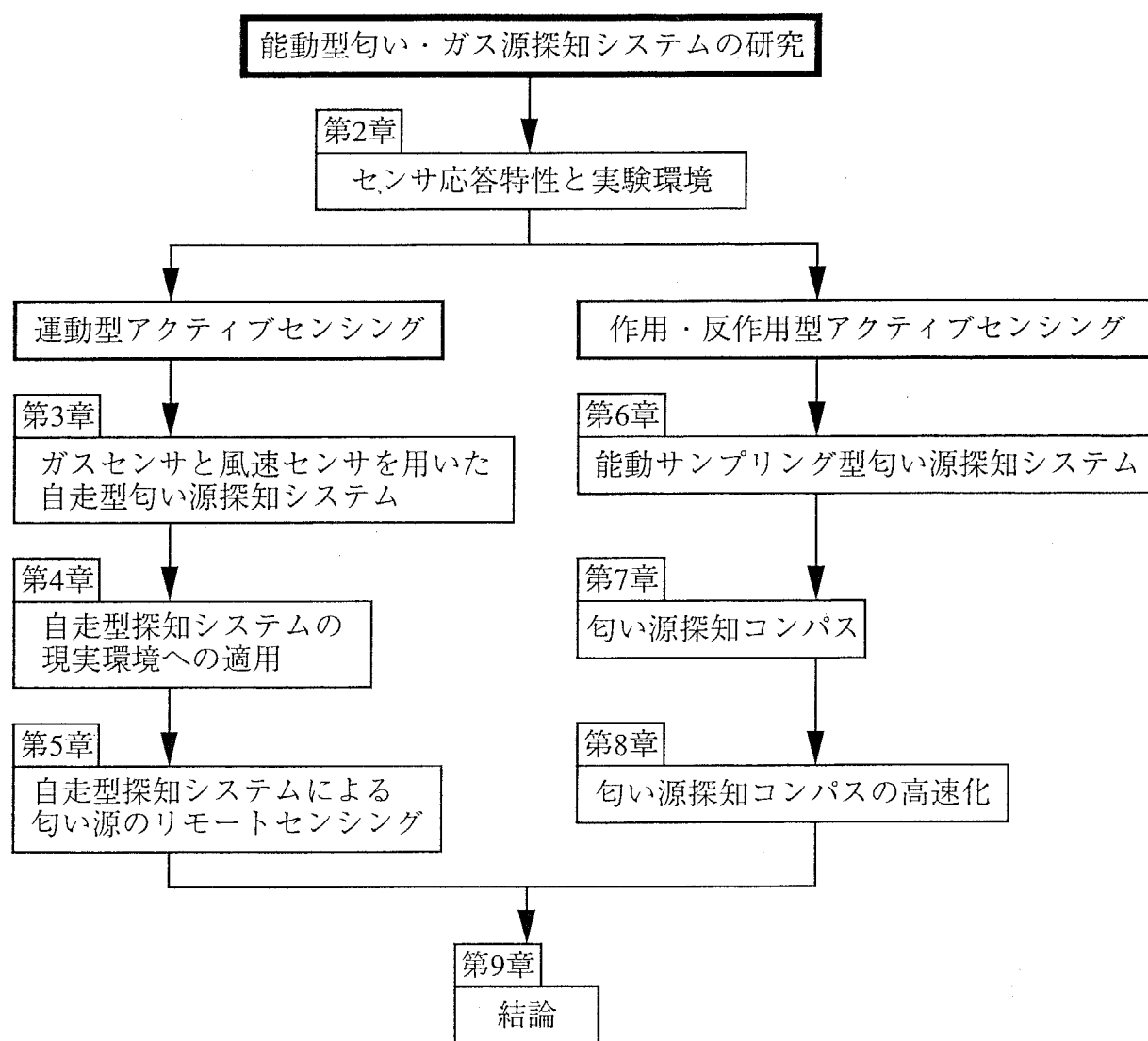


Fig. 1.46 本論文の構成

取行為により風速センサを用いなくても匂い源の方向判定が可能となることを示す。

第7章では、能動サンプリング型システムを応用した匂い源探知コンパスの開発を行う。このシステムは方位磁針のように匂い源の方向を指し示すことができ、匂い源へ人間やロボットを誘導する簡便な装置として使用できる。また、匂い源の方向を3次元的に指し示す3次元コンパスについても検討し、このシステムが現実環境で有効であることを示す。

第8章では、匂い源探知コンパスの動作速度向上について検討した。従来のシステムではセンサ応答の遅れが大きく、これがシステムの動作速度を律速していた。しかし、匂い源探知コンパスにおけるセンサ応答のダイナミクスをモデル化することにより、遅いガスセンサの応答からすばやく匂い源方向を推定することが可能であることを示す。

最後に第9章において本研究で得られた成果をまとめ、今後の課題について述べる。



Chapter 2

センサ応答特性と実験環境

2.1 はじめに

本章では、実験に使用したセンサと実験環境について説明する。

現在開発されている主なガスセンサを第1章で紹介したが、匂い源探知システム実現のために十分な感度と応答回復速度を持つセンサは少ない。そこで、応答回復速度に関しては妥協し、システム実現のための第一条件である感度を優先して半導体ガスセンサを選択した。2.2節では選択したガスセンサの原理と応答特性を述べ、微小な濃度差を測定するために行った感度校正法について説明する。

また、本研究では濃度情報に加えて風向を匂い源探知に利用することを提案する。このため風向を検出するセンサが必要となるが、小型で簡便な風向センサはほとんどないのが現状である。風を検出するセンサとして最も一般的な熱式センサは風向を検出できない。そこで、熱式センサを複数配置して風向を判定するプローブを製作した。これについて2.3節で述べる。

2.4節では、実験環境について説明する。本研究では、クリーンルームにおける匂い源探知の達成に目標を絞った。クリーンルームでは空調が常に稼働しているため、この環境は「一定強度、一定風向の風が常に吹いている環境」をモデル化したものと考えられる。ただし、空調の給気口は複数有り、クリーンルーム内の場所によって風向は異なる。このような環境としてはクリーンルーム以外にも空調完備のビルなどが考えられる。また、装置や探知アルゴリズムの試験環境として風洞も用意した。2.5節では、乱流拡散理論を用いて実験環境における匂いの分布をモデル化することを検討する。

2.2 半導体ガスセンサ

2.2.1 原理

半導体ガスセンサは金属酸化物半導体を材料とし、ガス雰囲気中における半導体材料の導電率変化を検出する。材料としては SnO_2 、 ZnO 、 TiO_2 などの n 型半導体と CuO 、 NiO

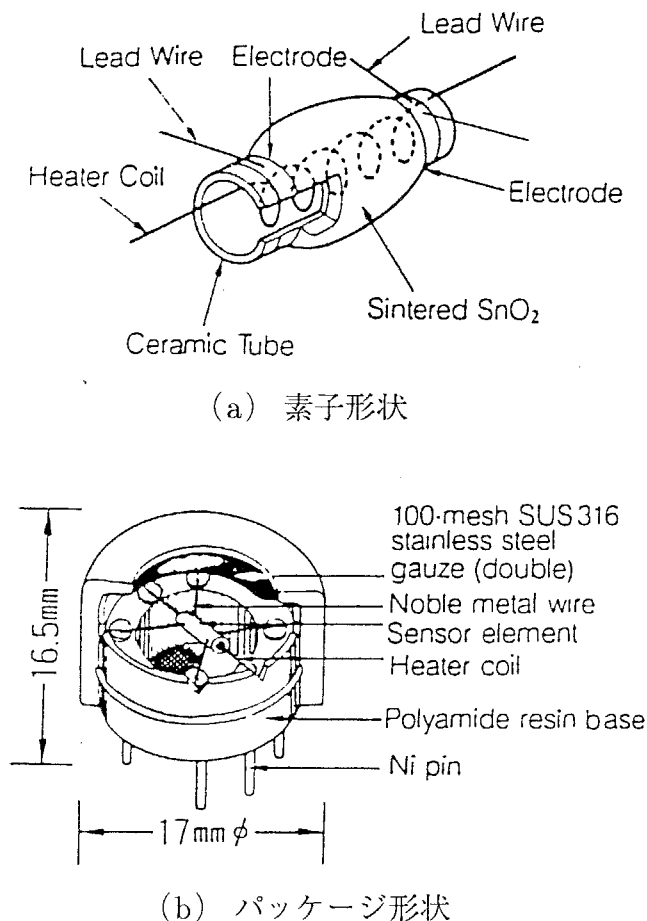
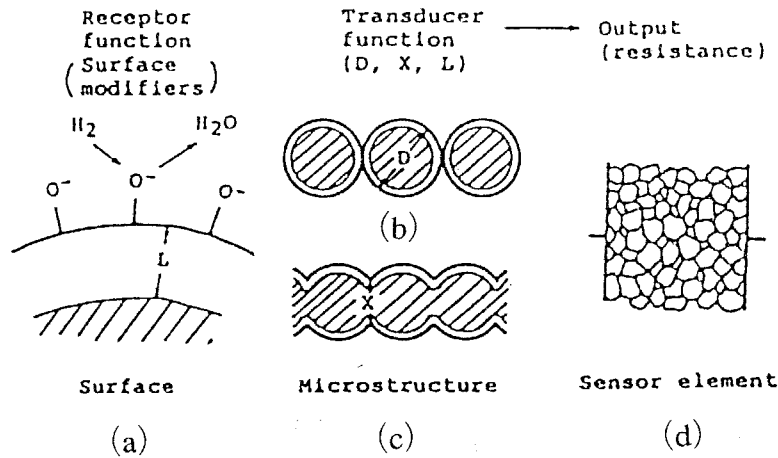


Fig. 2.1 半導体ガスセンサの形状 [41]

などの p 型半導体があるが、最も良く使用されるのは SnO_2 である。センサはその構造から焼結体素子、厚膜素子、薄膜素子の 3 種類に分類することができ、この順に半導体材料の膜厚が小さくなる。一般的な傾向として、膜厚が大きくなるほど応答回復が遅くなるが、感度は向上する。本研究では市販の SnO_2 焼結体センサを使用した。

使用したセンサの形状を Fig. 2.1 に示す。同図 (a) に示すように、セラミックチューブ上に SnO_2 ゲルを塊状に焼結した素子構造になっており、中央のコイル状の電極はヒータである。この素子は Fig. 2.1 (b) に示す樹脂パッケージに納められており、ステンレスメッシュを通して拡散してきたガスを検出する。ステンレスメッシュは防爆用であり、ガスがヒータにより引火しても火花を外へ漏らさない。また、素子に直接気流があたると、素子温度が変動して応答が不安定になる。ステンレスメッシュにはこれを防ぐ効果もある。

SnO_2 の焼結体は、Fig. 2.2 (d) に示すような多結晶構造となるように作成される。個々の SnO_2 結晶中には多数の格子欠陥が存在し、化学結合に預けられなかった電子が格子欠陥に捕捉されている。 SnO_2 は n 型半導体であり、この電子が熱励起してキャリアとなる。セ

Fig. 2.2 SnO_2 結晶表面の空間電荷層 [115]

ンサ使用時にはヒータを用いて素子を数百 $^{\circ}\text{C}$ に加熱するが、このとき大気中の酸素分子が SnO_2 結晶表面に解離吸着することが知られている。Fig. 2.2 (a) に示すように、吸着した酸素は電子を受容して O^- となり、この結果 SnO_2 結晶表面に空間電荷層が形成される。

このような SnO_2 結晶粒子が連なって多結晶体を構成する。このとき、Fig. 2.2 (b) のように粒界を介して結晶同士が接触する場合と、同図 (c) のようにネックを介して結合する場合がある。前者の場合は粒界の空間電荷層が電位障壁を形成し、後者の場合は空間電荷層によって電子の通るチャネル幅 X が狭くなる。したがって、いずれの場合も素子の導電率は低くなる。この状態でセンサを還元性ガス雰囲気中に置くと、Fig. 2.2 (a) に示すように還元性ガスが酸化され、 SnO_2 表面の吸着酸素が消費される。この結果、空間電荷層の厚さ L が減少して素子の導電率が増加するため、ガスを検出することができる。還元性ガスとしては H_2 、 CO 、炭化水素、アルコールなどが挙げられる。これらのガス種によって素子表面の還元反応速度が異なるため、ガスによって感度が異なる。

また、通常は SnO_2 中にPtやPdなどの添加剤が加えられる。このような貴金属はガスの酸化を促進する触媒として働き、ガスセンサの感度が向上する。添加する材料とセンサの動作温度をうまく設定すれば、特定のガスに対する酸化作用のみを促進することができる。これによってセンサ応答にガス選択性を持たせることができる。

2.2.2 センサの応答特性と感度校正法

本研究ではアルコール用半導体ガスセンサ (TGS822、フィガロ技研) を用い、匂い源探知実験にはエタノールガスを使用した。本論文ではガスセンサ応答 r を次式のように定義した。

$$r = r_{\text{gas}} / r_{\text{air}} \quad (2.1)$$

ただし、 r_{gas} と r_{air} はそれぞれガス雰囲気中でのセンサ抵抗と空気中でのセンサ抵抗を表す。

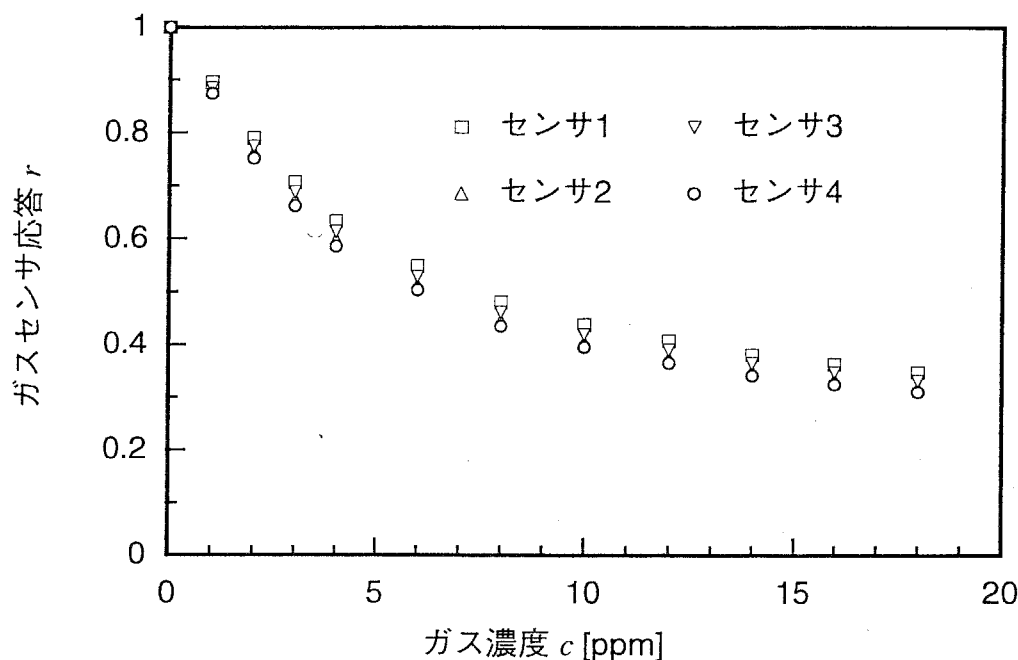


Fig. 2.3 ガスセンサ応答の濃度依存性

このように定義したセンサ応答のガス濃度依存性を Fig. 2.3 に示す。この測定は Fig. 2.4 のような測定系を用いて行った。まず、容積 18 l のテドラーバッグに液体のエタノールを 2 μ l 注入し、揮発するのを待つ。これによって、濃度 46 ppm のエタノールガスが得られる。次に、得られたエタノールガスと空気を混合してガスを希釈し、4 個の半導体ガスセンサを取り付けた測定容器（容積 540 ml）に送る。ガスの希釈率はマスフローコントローラ（以下 MFC と略記する）によって調節する。ここでは MFC1 を流量 138 ml/min に設定し、MFC2 の流量を 3 ~ 54 ml/min の範囲で変えて異なる濃度のエタノールガスを作成した。MFC3 はエタノールガスの経路と空気の経路の負荷の釣り合いをとるためのもので、ここではバルブを全開にして用いた。MFC3 がなければ空気側の負荷が軽くなり、空気ばかりが測定容器に向けて吸引されてしまう。また、MFC1 がいない時も MFC2 と 3 によりエタノールガスの希釈率を変えられるが、MFC の流量制御誤差により測定容器を流れる総流量がわずかに変化してしまう。このために測定容器内の圧力が変わり、センサ応答がドリフトする傾向が見られたので、総流量を一定に保つために MFC1 の流量設定値を固定して用いた。

Fig. 2.3 では、MFC の流量を設定した後、センサ応答が定常値に達するのを待って応答を測定した。半導体ガスセンサは還元性ガスを検出すると抵抗が減少するので、式 (2.1) で定義されたセンサ応答 r はガス濃度の増加とともに小さくなる。また、ガス濃度がゼロの時、 r は 1 となる。Fig. 2.3 に示すように、わずか 1 ppm のエタノールガスに対してもセンサ応答が変化しており、センサが非常に高感度であることが分かる。

しかし、4 個のガスセンサの間で感度のばらつきがあり、このままでは複数のセンサ応

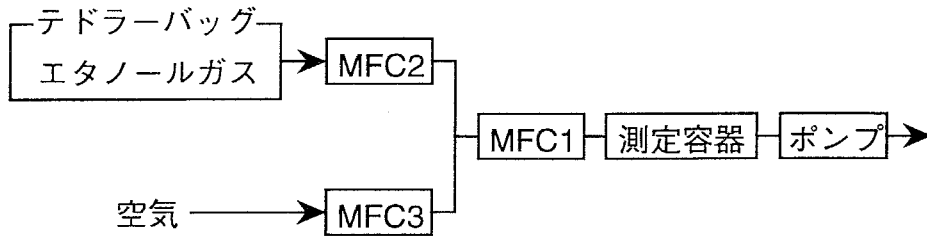


Fig. 2.4 一定濃度のエタノールガスを供給するセンサ応答測定系

答を比較して微小な濃度勾配を検出することができない。そこでセンサ応答の校正を行い、センサ感度を揃えてから実験に使用した。以下に示すように、感度校正は高ガス濃度領域と低ガス濃度領域の二つの領域に分けて行う。高濃度領域と低濃度領域の切替はセンサ応答が 0.8 程度のところで行った。

(1) 高ガス濃度領域の感度校正法

感度の異なる 2 個のガスセンサがあると仮定し、これをセンサ 1、2 とする。半導体ガスセンサの応答 r はガス濃度 c が十分高いときに対数則に従うことが知られているので、センサ 1、2 の応答 r_1 、 r_2 の濃度依存性は次式で表される [109]。

$$\begin{aligned}\log r_1(c) &= m_1 \log c + n_1 \\ \log r_2(c) &= m_2 \log c + n_2\end{aligned}\quad (2.2)$$

ただし、 m_1 、 n_1 、 m_2 、 n_2 はセンサとガス種によって決まる定数である。この式から c を消去すると、

$$\log r_1(c) = \alpha \log r_2(c) + \beta \quad (2.3)$$

ただし、

$$\begin{aligned}\alpha &= m_1/m_2 \\ \beta &= n_1 - m_1 n_2/m_2\end{aligned}\quad (2.4)$$

となる。

この式 (2.3) は、センサ 2 の応答をセンサ 1 の応答に変換する式を表しており、この式を用いてセンサの感度を揃えることができる。式 (2.2) で表されるセンサ応答は両対数グラフ上で Fig. 2.5 のような 2 本の直線となる。式 (2.3) は直線 $r_2(c)$ を直線 $r_1(c)$ 上へ 1 次変換する式と解釈することもできる。

この変換を行うためには α 、 β を求めなければならない。そのためには、ある 2 点の濃度 c_1 、 c_2 におけるセンサ 1 と 2 の応答を測定すればよい。このとき、式 (2.3) より

$$\begin{aligned}\log r_1(c_1) &= \alpha \log r_2(c_1) + \beta \\ \log r_1(c_2) &= \alpha \log r_2(c_2) + \beta\end{aligned}\quad (2.5)$$

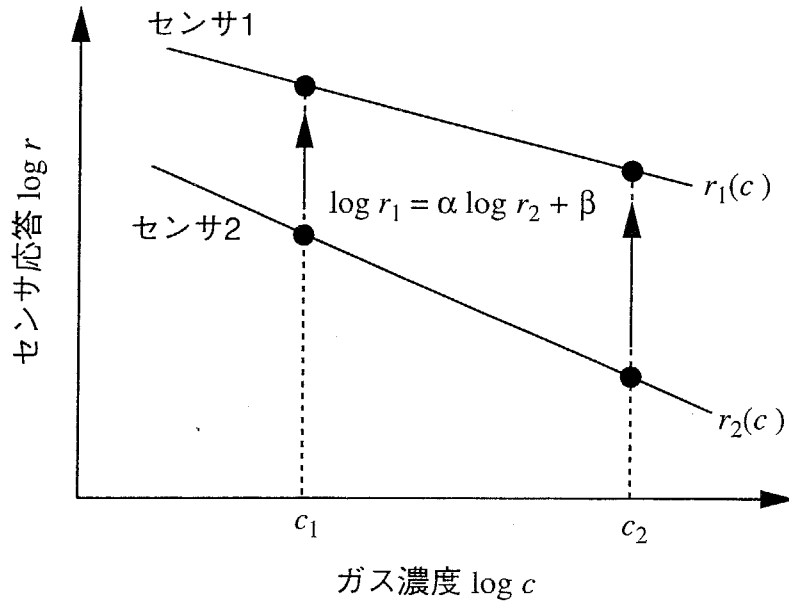


Fig. 2.5 高ガス濃度領域における感度校正

となるので、この式を α 、 β について解くと

$$\begin{aligned}\alpha &= \frac{\log r_1(c_1) - \log r_1(c_2)}{\log r_2(c_1) - \log r_2(c_2)} \\ \beta &= \frac{\log r_1(c_2) \log r_2(c_1) - \log r_1(c_1) \log r_2(c_2)}{\log r_2(c_1) - \log r_2(c_2)}\end{aligned}\quad (2.6)$$

となる。上式により α 、 β を求める際に、 c_1 、 c_2 の値が既知である必要はない。このため、既知濃度のガスを作り出す Fig. 2.4 のような装置やパーミエータなどは不要である。密閉容器中に複数のセンサを入れ、適当な量のエタノールガスを注入して応答を測定するだけでよい。

(2) 低ガス濃度領域の感度校正法

式 (2.2) は対数関数を含むためガス濃度 c がゼロの時に成立しない。このため、ガス濃度がゼロに近付くと、センサ応答は式 (2.2) から次第に外れる。そこで、 $c < c_1$ の低ガス濃度領域ではセンサ応答を以下の式で表す。

$$\begin{aligned}r_1(c) &= 1 - l_1 c \\ r_2(c) &= 1 - l_2 c\end{aligned}\quad (2.7)$$

ただし、 l_1 、 l_2 は定数である。先述の議論と同様にこの式から c を消去すると、

$$r_1(c) = 1 - \gamma [1 - r_2(c)] \quad (2.8)$$

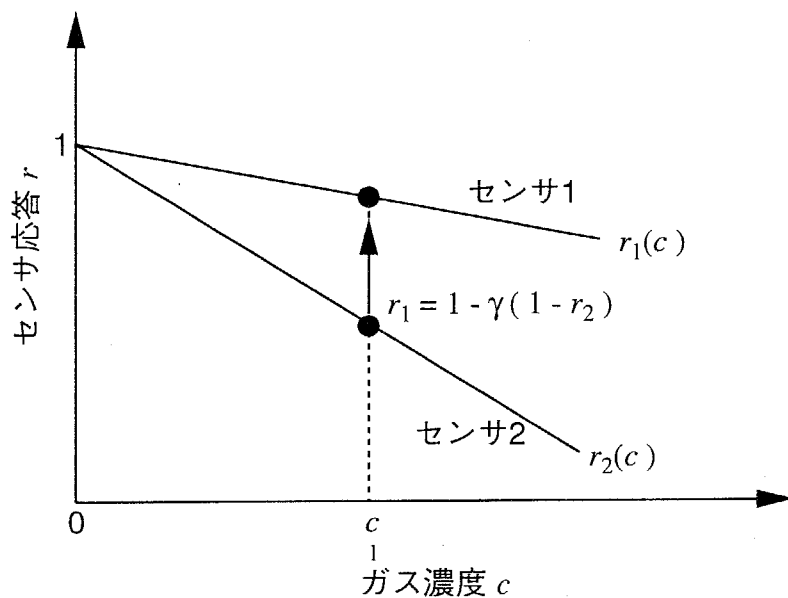


Fig. 2.6 低ガス濃度領域における感度校正

ただし、

$$\gamma = l_1/l_2 \quad (2.9)$$

となる。

この式 (2.8) は、Fig. 2.6 中の直線 $r_2(c)$ を直線 $r_1(c)$ 上へ変換する式を表す。 γ を求めるためには、低濃度領域中の任意の濃度 c_1 におけるセンサ 1 と 2 の応答を測定すれば良い。式 (2.8) より

$$r_1(c_1) = 1 - \gamma[1 - r_2(c_1)] \quad (2.10)$$

となるので、

$$\gamma = \frac{1 - r_1(c_1)}{1 - r_2(c_1)} \quad (2.11)$$

を得る。

よって、 $r_2(c_1)$ をしきい値とし、これよりも低濃度領域では式 (2.3) を使い、高濃度領域では式 (2.8) を使えば、両方の領域ともにセンサ感度を揃えることができる。例として $c_1 = 3$ ppm、 $c_2 = 18$ ppm とし、Fig. 2.3 に示すセンサ応答を校正した結果を Fig. 2.7 に示す。同図より、センサ応答の広い範囲で感度が良く揃っていることが分かる。同図でプロットが一つにしか見えない測定点もあるが、これは四つの測定点が重なっているためである。

ただし、本論文の第 3 章の実験では高濃度領域における校正式のみを用いた。また、第 4 章、第 7 章の実験では低濃度領域における校正式のみを用いた。第 5 章と第 8 章の実験では両方の校正式を使用した。

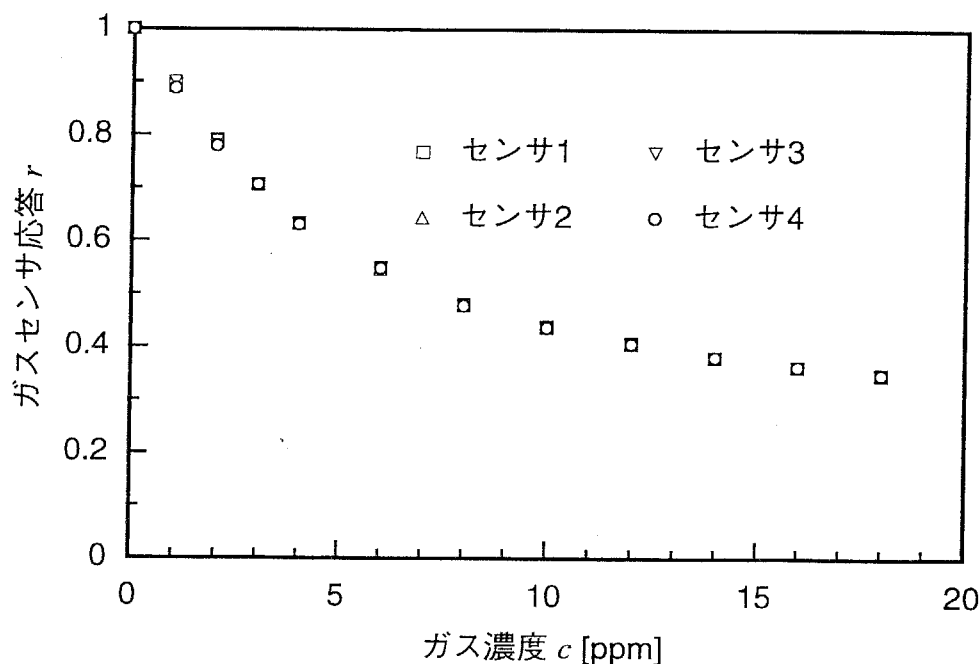


Fig. 2.7 感度校正後のガスセンサ応答

2.3 風向判定プローブ

2.3.1 サーミスタ式風速センサの原理と応答特性

現在一般的に使用されている風速計は Table 2.1 に示す 5 種類である。本研究では室内環境における匂い源探知を目標としたが、通常の室内風速は数 cm/s から数十 cm/s のオーダーの微風速である。Table 2.1 の中でレーザドップラー流速計と超音波流速計はこのような微風速を十分に検出でき、しかも風向も検出可能である。しかし、小型ロボットに搭載するにはこれらの流速計は大きすぎる。逆にピトー管式流速計と翼車形流速計は検出下限風速が数十 cm/s であり、微風速の計測には向かない。残る熱線式流速計は検出下限が 5 ~ 10 cm/s 程度であり、かろうじて使用可能である。

そこで、熱式風速計と同じ原理のサーミスタ式風速センサ (F6201-1、芝浦電子) を選択した。用いた風速センサの形状を Fig. 2.8 に示す。図中の風速センサと示された場所にサーミスタが取り付けられており、これに電流を流して自己発熱させる。そして、温度によるサーミスタの抵抗変化を利用し、サーミスタ温度が一定となるように電流フィードバックをかける。風によりサーミスタから熱が奪われるとフィードバック電流が増加するので、これを利用して風を検出する。気温が変化すると出力も変化するため、通常はもう一つサーミスタを用いて気温を検出し、センサの出力を補償する。F6201-1 センサには、フィードバック回路と温度補償回路がパッケージ化されたハイブリッド IC が付属しており、そこから風速に応じた電圧出力を得ることができる。

Table 2.1 代表的な風速計

名称	原理	感度	風向検出
ピトー管式流速計	よどみ点の圧力上昇	△	○
翼車形流速計	翼車の回転数	△	○
熱式流速計	熱線から奪われる熱量	○	×
レーザドップラー流速計	微粒子による散乱光のドップラー効果	◎	○
超音波流速計	超音波伝搬時間またはドップラー効果	◎	○

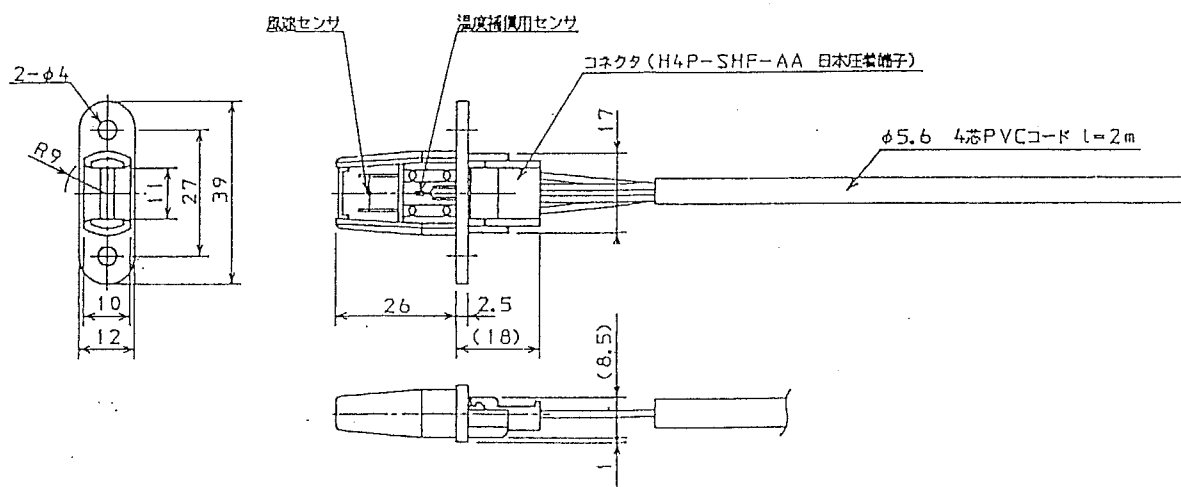


Fig. 2.8 サーミスタ式風速センサの外形図（芝浦電子製品仕様書より抜粋）

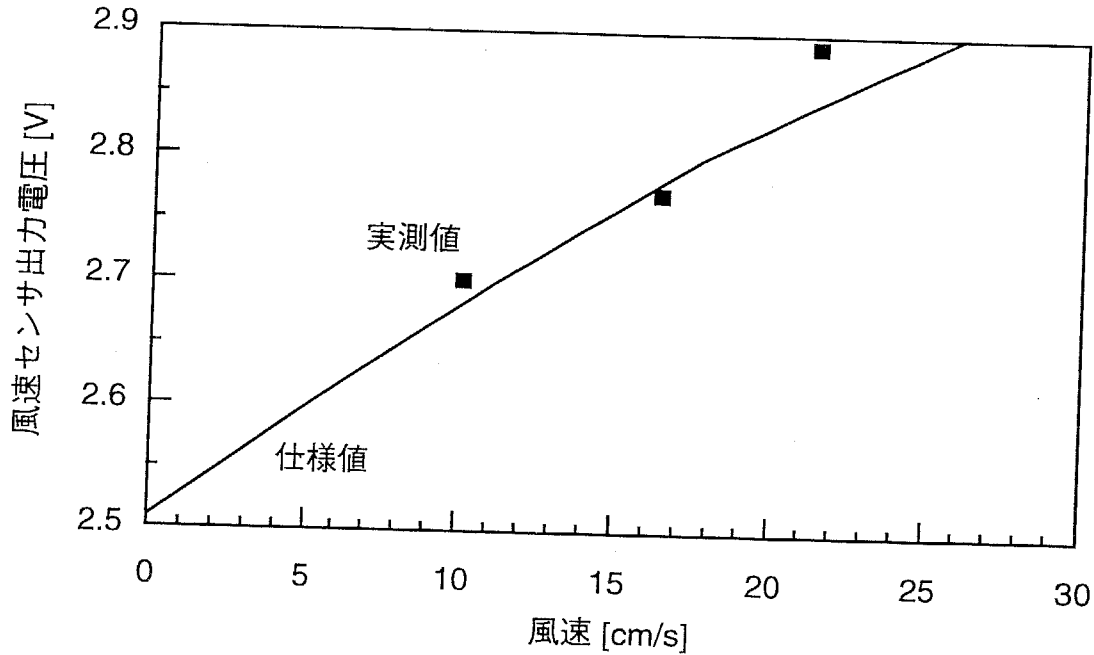


Fig. 2.9 風速センサの出力特性

この風速センサの出力特性を Fig. 2.9 に示す。図中の実測値は、後述する風洞を用いて測定したもので、3 分間の時間平均値を表す。また、センサ出力の測定と同時に校正済みの風速計（HONFIELD PROBE MODEL QB、本田工業）を用いて風速を測定し、これを Fig. 2.9 の横軸の値として用いた。センサの電圧出力は風速に対して非線形に変化するが、同図に示すように本研究で使用した風速範囲では出力特性をほぼ線形とみなすことができる。ただし、このセンサは風が前から吹いても後ろから吹いても同じ出力となるので、風向を判定することはできない。

2.3.2 風向判定方法

指向性が不十分なサーミスタ式風速センサを用いて風向を判定するため、複数のセンサを角柱の周りに配置し、風向判定プローブを構築した。製作したプローブの構造を Fig. 2.10 に示す。同図に示すように 4 個の風速センサが角柱の周りに配置されており、風下側のセンサは角柱に風を遮られる。このため、風下側のセンサ出力が小さくなるので、4 個のセンサの応答パターンから風向を判定することが可能になる。

以下に風向の判定法を述べる。初めに、センサの応答パターン $\mathbf{v}$ を次式の 4 次元ベクトルで表す。

$$\mathbf{v} = (\Delta v_1, \Delta v_2, \Delta v_3, \Delta v_4)^T \quad (2.12)$$

ただし、 $\Delta v_i, i = 1, \dots, 4$ は風速ゼロの時のセンサ出力を基準とした出力電圧の変化分を表す。Fig. 2.9 に示すように、風速が十分小さい場合 Δv_i を風速に対して線形とみなすこと

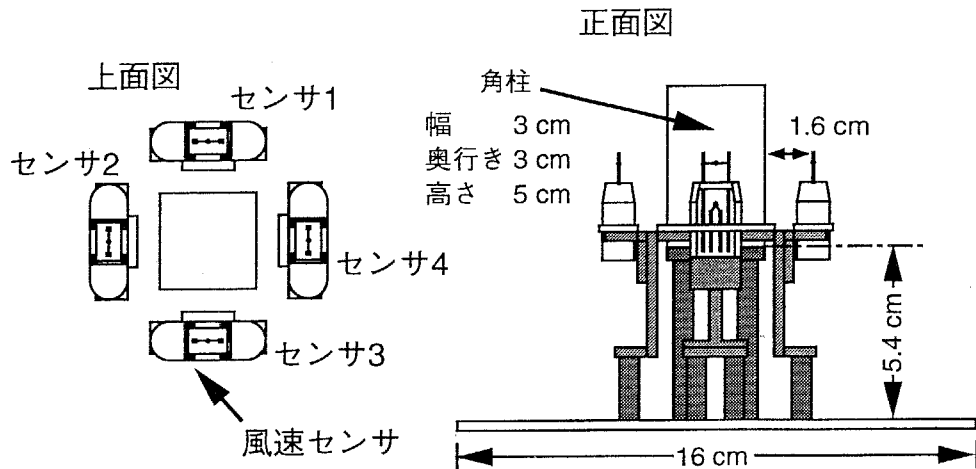


Fig. 2.10 風向判定プローブの概略図

ができる。このため、 $\mathbf{v}$ を大きさが 1 となるように規格化すれば風速に依存しない応答パターン $\mathbf{v}_N$ を得ることができる。

$$\mathbf{v}_N = \frac{1}{\sqrt{\sum_{i=1}^4 \Delta v_i^2}} \mathbf{v} \quad (2.13)$$

規格化したセンサ応答の測定例を Fig. 2.11 に示す。同図のようにセンサ応答パターンは風向によって変化するので、これを利用して風向を判定することができる。しかし、パターンの変化が小さいため、風向が 45° 程度変化しないとパターンを区別することができない。また、風向が非常に不安定な場合は、風上側と風下側のセンサの間に十分な応答差が得られない。

このため、風向の判定は 45° 単位とし、また、風向判定に十分なセンサ応答差が得られているか否かを確認する機能を設けた。 45° おきのセンサ応答パターンベクトル八つと、全てのセンサ応答を等しいとした応答パターンベクトルの計九つのベクトルをコンピュータに記憶させる。この中から、測定した応答パターンベクトルとのユークリッド距離が最も小さいものを選び出すことにより風向を判定する。得られた風向は、次式のように風上方向を向いた長さ 1 のベクトル $\mathbf{w}$ で表すものとする。

$$\mathbf{w} = \begin{pmatrix} \cos n(\pi/4) \\ \sin n(\pi/4) \end{pmatrix}, (n = -3, -2, \dots, 4) \quad (2.14)$$

全てのセンサ応答が等しいとしたベクトルが選ばれた場合には、風向判定に十分なセンサ応答差が得られていないと判断し、 $\mathbf{w} = \mathbf{0}$ とした。

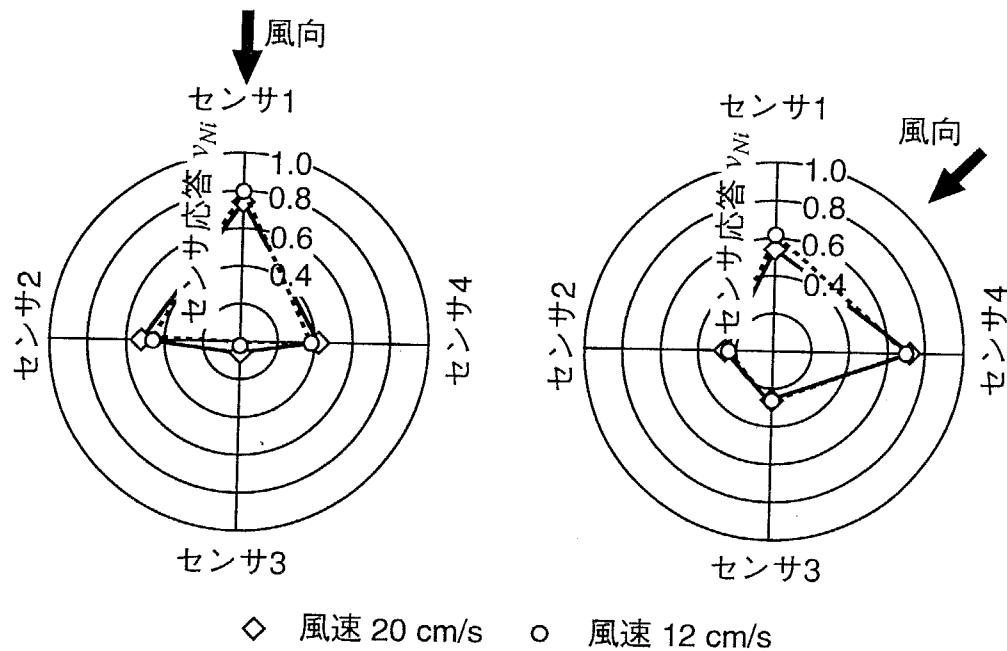


Fig. 2.11 規格化された風速センサ応答パターン

2.4 実験環境

2.4.1 風洞

本研究では、装置や探知アルゴリズムの試験を行う環境として風洞を用いた。風洞の概略図及び本論文で用いた座標系を Fig. 2.12 に示す。風洞内の風には実際の環境と同様に乱れがあり、風洞中で風速センサの応答を測定すると Fig. 2.13 のように変動した。この風速センサ応答から風速の変動係数を求めると 16%であった。この値は自然風の変動係数 21 ~ 26% に比べ小さいが [58]、扇風機の風の乱れ 15% に匹敵する [61]。しかし、風向の変動は小さく、45° おきの風向判定では 90% 以上の正解率が得られる。時間平均風速は風洞の中ではほぼ一様であり、AC ファンの電圧により 12 ~ 20 cm/s の範囲で調節する。この値は人間の気流知覚の閾値に近く、風はほとんど感じられない [61]。

この風洞の中央に半導体ガスセンサを置き、ノズルからエタノール飽和蒸気を噴出した際のガスセンサ応答を Fig. 2.14 に示す。エタノール飽和蒸気はバブリングによって作成し、その噴出量は 75 ml/min とした。以降、本論文ではこのノズルの先端を匂い源と呼ぶ。風の乱れによってエタノールガスのプルームが蛇行するため、ガスセンサの応答は不規則に変動する。このプルームの蛇行は、発煙材を用いてプルームを可視化すると明らかになる。ノズルから発煙材 TiCl_4 の煙を噴出した際のプルームを Fig. 2.15 に示す。同図 (a) では風の乱れのため下側にプルームが蛇行している。これに対し、5 秒後に撮影した同図 (b) ではプルームが反対側に移動している。また、プルーム内部に不規則な濃度のむらがある

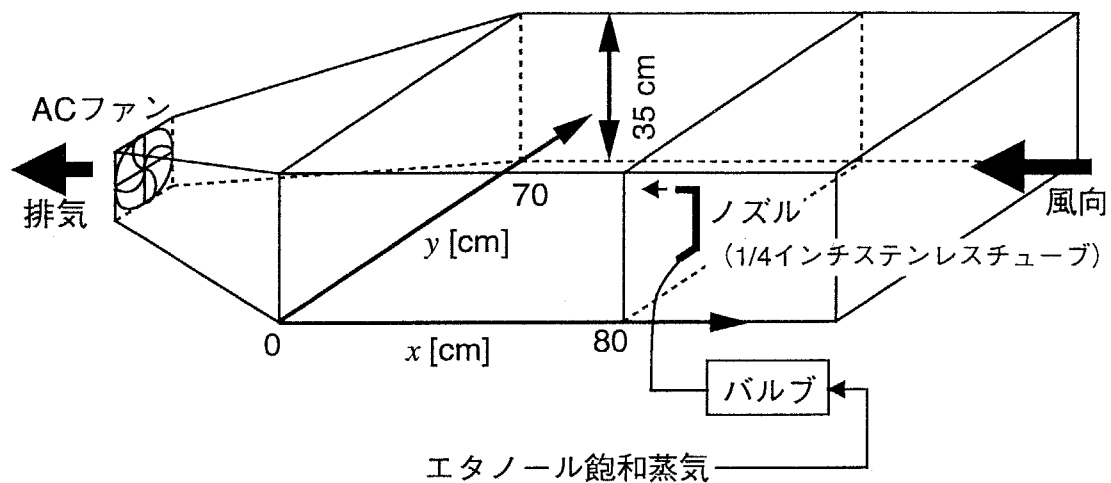


Fig. 2.12 風洞の概略図

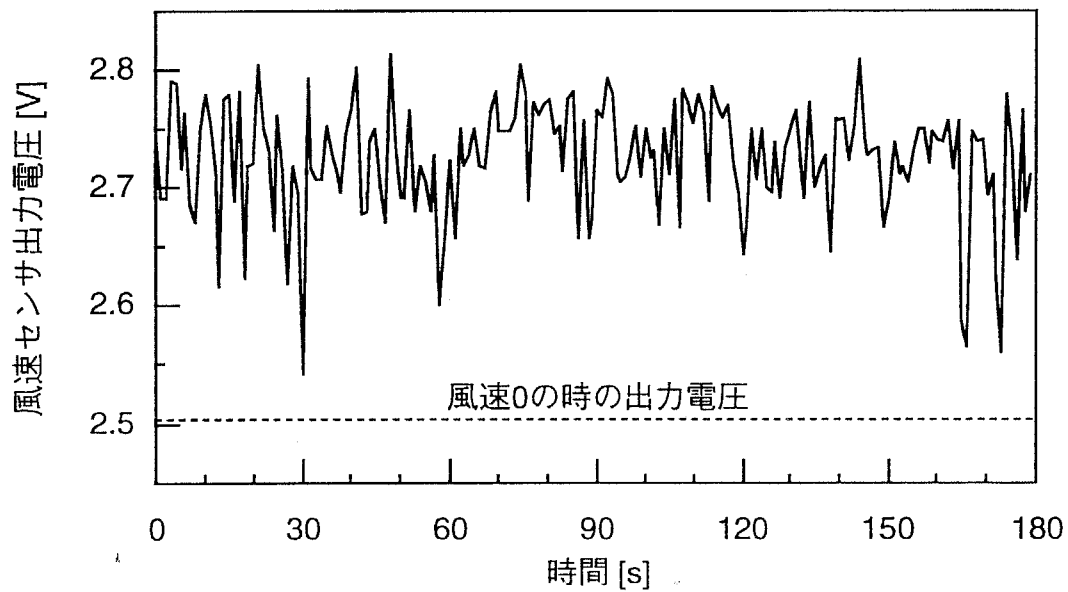


Fig. 2.13 風洞内で測定した風速センサ応答 (サンプリング時間は1秒)

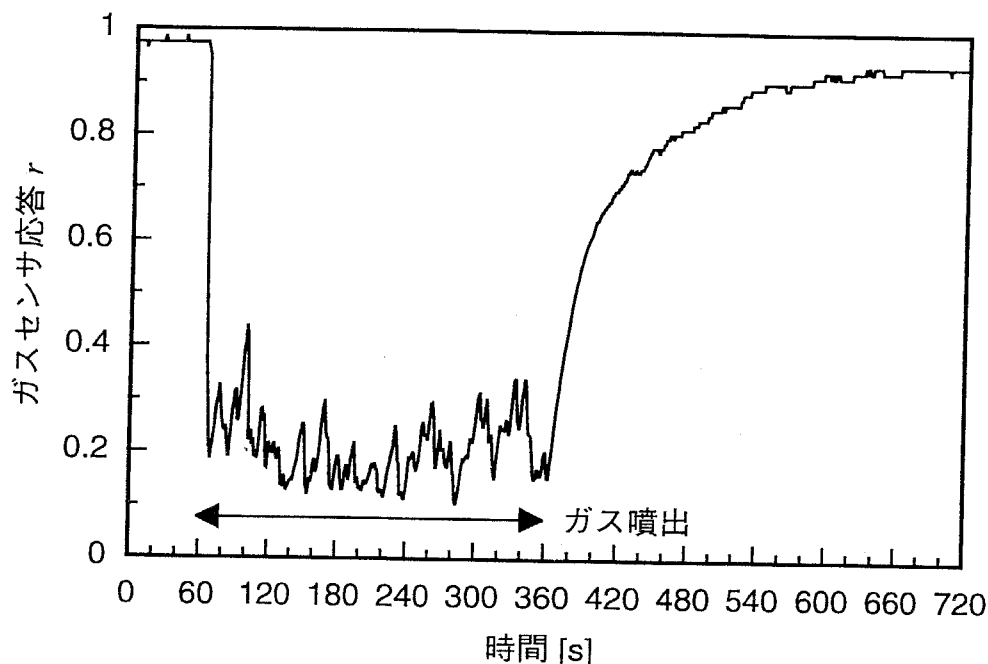


Fig. 2.14 風に運ばれるエタノールガスに対するガスセンサ応答

ことが分かる。Fig. 2.14 にみられるセンサ応答の変動はこのような原因で生じる。

Fig. 2.14 は、ガスセンサ応答の動特性も表している。同図に示すように、半導体ガスセンサはガスの噴出を開始した際には速やかに応答するが、ガスの噴出を止めても応答は数分間回復しない。匂い源探知を行う際は、このようなガスセンサ応答回復の大きな遅れに注意しなければならない。

ガスセンサ応答の5分間の平均値を測定し、噴出されたエタノールガスの分布を求めた結果を Fig. 2.16 に示す。同図では33点の測定結果を用い、測定点の間におけるセンサ応答を直線補間して等高線を表示した。ノズルは床面から高さ 21 cm に置き、ガスセンサの高さもこれに合わせた。また、この測定を行ったときの風速は 18.4 cm/s であった。Fig. 2.16 は蛇行するプルームを長時間にわたって重ね合わせた時間平均分布を示しており、プルームが $y = 35$ を中心に蛇行していたことが分かる。この中心線から離れるにつれ、プルームが蛇行してその場所を通過する頻度が減るため、時間平均濃度は急速に低くなる。一方、風と平行な方向の濃度勾配は非常に小さく、これを検出して匂い源に向かうのは困難である。

2.4.2 クリーンルーム

本研究では、Fig. 2.17 に示すクリーンルーム (10^5 クラス) で実験を行った。図中の二つの給気口は天井に取り付けられており、ここから風が吹き下ろす。排気口は図の上部に2箇所あり、これは床面付近に取り付けられている。本研究では、Fig. 2.17 に示すように、

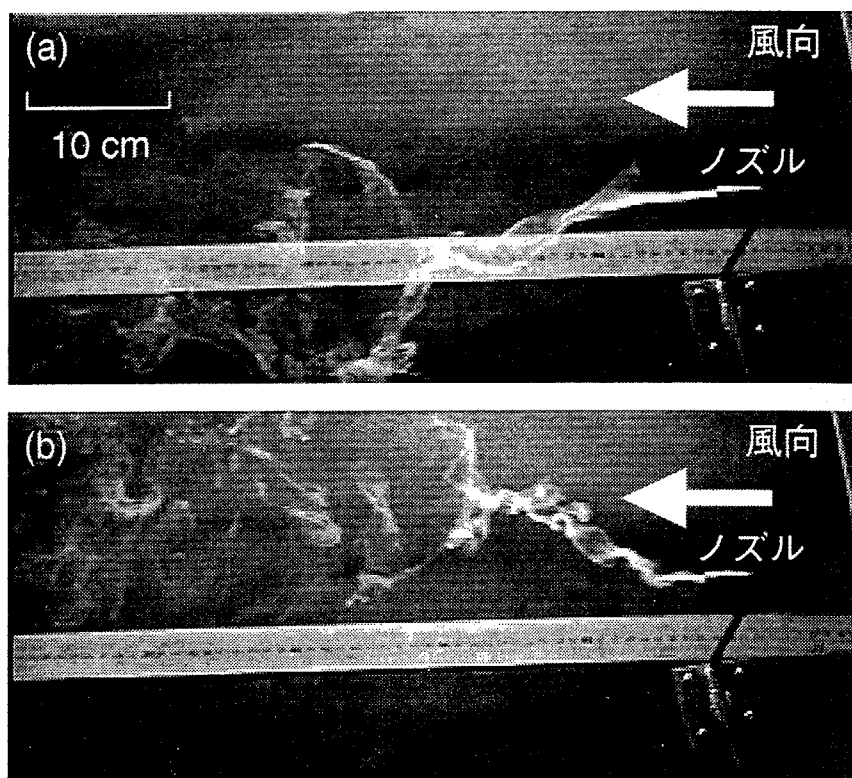


Fig. 2.15 発煙材で可視化したプルーム
(b) は (a) の 5 秒後に撮影した。

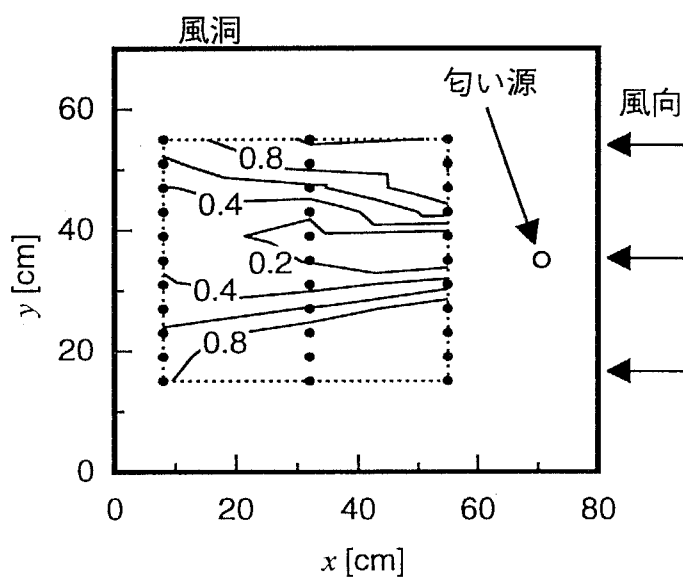


Fig. 2.16 ガスセンサ応答の時間平均値の等高線

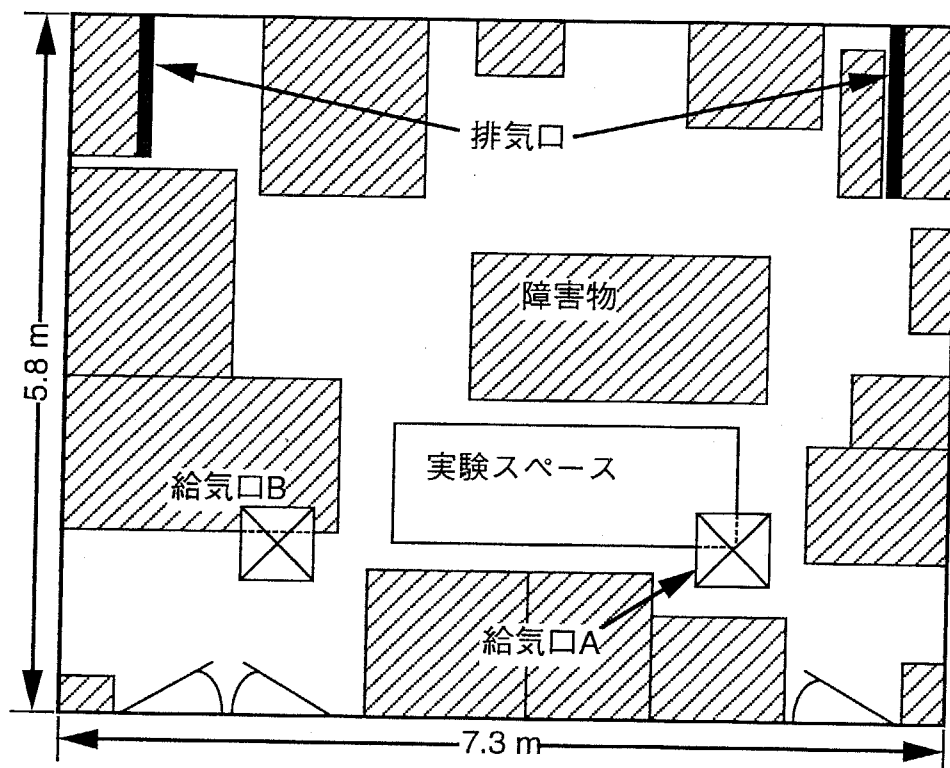


Fig. 2.17 クリーンルーム概略図

給気口 A の近くに実験スペースをとった。その理由は、この付近の風が比較的強く、風速センサで十分に検出できるためである。また、給気口から出る風の温度が変化すると、風速場が大きく変わってしまう。これを避けるために、夏場は空調を一定強度の冷房運転とし、それ以外の場合は送風運転とした。

この実験スペースで風向の測定を行った結果を Fig. 2.18 に示す。図中の黒い点は測定点であり、矢印は風向ベクトル $-w$ の 60 秒間の和を表す。 $-w$ は風下方向を向いた単位ベクトルであり、この和を採ることによって矢印は 60 秒間の平均的な風向を指す。また、風向が不安定な場所では判定を行う度に $-w$ の方向が変化するので、矢印は短くなる。したがって、矢印の長さが長いほど風向が安定であることを意味する。Fig. 2.18 より、実験スペースの右半分では比較的安定な風が給気口 A から吹いていることが分かる。この付近の風速は 20 ~ 30 cm/s 程度であるが、空調の状態によっても異なる。風洞の場合と同様に風速の変動係数を求めた結果、クリーンルームでは 44.3% となった。この値は、先述した風洞風速の変動係数 16% や自然風の変動係数 21 ~ 26% に比べて非常に大きい。このため、クリーンルームではブルームが大きく蛇行する。

また、Fig. 2.18 の左側では給気口 B から風が吹いており、実験スペース内でも場所によって風向が異なる。二つの給気口からの風がぶつかる Fig. 2.18 の中央部では風向が不安定なため、矢印が短くなっている。ただし、数分間の時間平均値に関しては「一定強度、一定風向の風」であると言える。

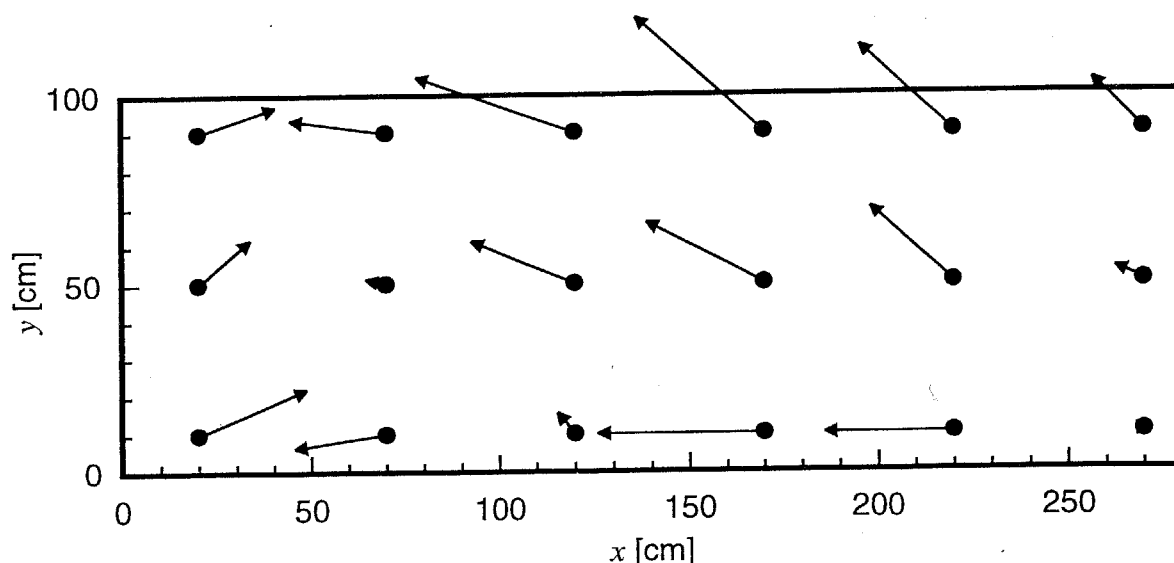


Fig. 2.18 クリーンルーム内の風向

風洞の場合と同様に、クリーンルームでもエタノール飽和蒸気を噴出するノズルを匂い源として用い、ガス噴出量は 75 ml/min とした。Fig. 2.16 と同様にガスセンサ応答 r の5分間の平均値を測定し、ガス濃度分布をセンサ応答の等高線で表すと Fig. 2.19 のようになる。匂い源の高さは 23.5 cm とし、ガスセンサ応答の測定もこの高さで行った。

しかし、クリーンルームにおける実際の風の流れは3次元的である。このため、高さによってエタノールガス濃度の分布が多少異なる。Fig. 2.20 は、高さ 12 cm における測定結果である。匂い源付近では天井の給気口から風が吹き下ろすため、プルームは下にのびる。このため匂い源より下の方がガス濃度が高く、Fig. 2.20 ではガスセンサの応答値 r が小さくなっている。

Fig. 2.19、Fig. 2.20 に示すプルームの特徴として、風洞の場合に比べて幅が広いことが挙げられる。これはクリーンルームの方が風速の変動係数、すなわち風の乱れが大きいためである。また、両者ともに初めは匂い源から左上方向にプルームがのびていくが、 $x = 100$ から $x = 140$ 付近を境にプルームが真横方向に折れ曲がっている。これは、Fig. 2.18 に示すように風向がこの付近で変化するためである。Fig. 2.17 に示すように実験スペースの上には大きな障害物があり、この障害物が風向とプルーム方向の変化を引き起こす。

2.5 乱流拡散理論による環境のモデル化

本節では乱流拡散理論を用いて、風洞やクリーンルーム内の匂い濃度分布をモデル化する。拡散物質の分布を求める方法には、Taylor の拡散理論、Richardson の相対拡散理論、フィック型乱流拡散方程式の利用、Sutton の半経験式の利用などがある [34]。このうち前二者は、測定が非常に困難な風速の相関関数を必要とする。一方、フィック型乱流拡散方程式の基本解や Sutton の式からは Fig. 1.1 のようなガウス分布を持つプルームが得られ、

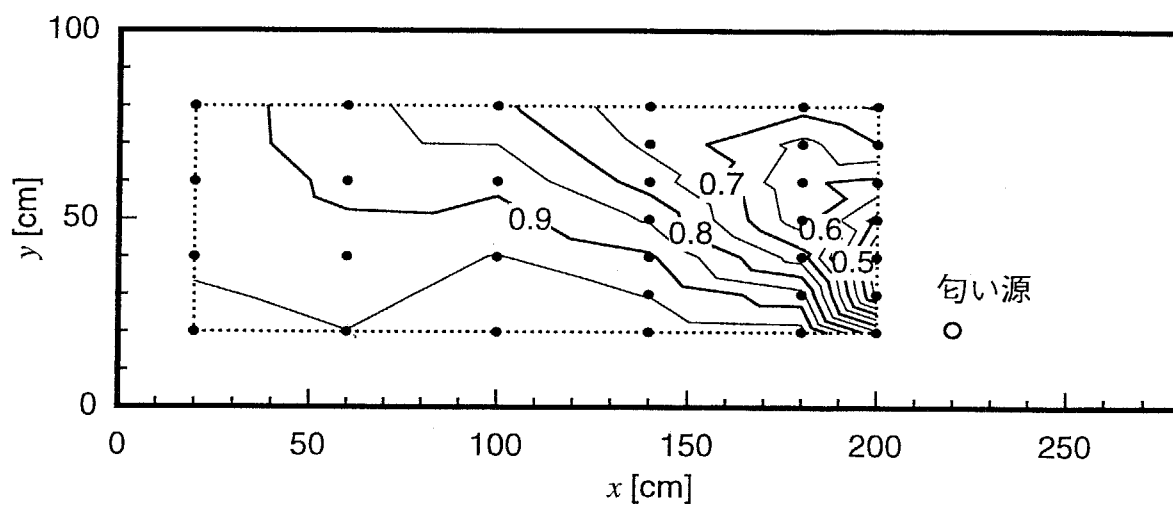


Fig. 2.19 ガスセンサ応答の時間平均値の等高線 (高さ 23.5 cm)

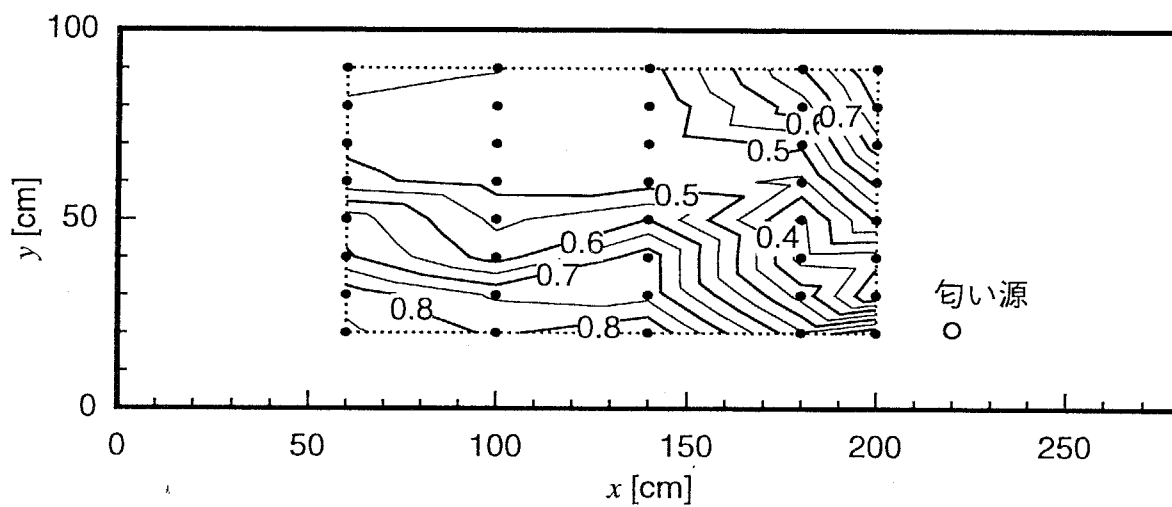


Fig. 2.20 ガスセンサ応答の時間平均値の等高線 (高さ 12.0 cm)

これを実際のプルームの第一近似として用いることが多い [69]。しかし、Sutton の半経験式は屋外の大規模な拡散に適用される式で、室内環境には適さない。そこで、本研究ではフィック型乱流拡散方程式に対するロバートの解をプルームモデルとして利用した。

2.5.1 乱流拡散方程式とロバートの解

ここでは、フィック型乱流拡散方程式とその解について説明する。この方程式は、フィックの拡散方程式を拡張して乱流拡散に適用したものである [34]。

通常物質拡散の場合は、「単位時間、単位面積当たりの物質輸送量 F は物質濃度 C のその点における勾配に比例する」というフィックの法則を基礎とする。等方性媒体中の拡散を考え、3次元の座標系 (x, y, z) においてフィックの法則を式で表すと、

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{pmatrix} = D \begin{pmatrix} -\frac{\partial C}{\partial x} \\ -\frac{\partial C}{\partial y} \\ -\frac{\partial C}{\partial z} \end{pmatrix} \quad (2.15)$$

となる。ただし、 D は拡散係数と呼ばれる定数である。このフィックの法則から拡散方程式を導くことができ、

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\text{div} \mathbf{F} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad (2.16)$$

を得る。

この拡散方程式を流れ中の拡散に適用するためには、左辺の偏微分 $\partial/\partial t$ を実質微分 D/Dt に置き換えればよい。実質微分とは流体中の微小塊に注目し、その微小塊とともに運動した際の時間変化を表す式である。流れの x, y, z 方向の成分をそれぞれ u, v, w とすると、

$$\frac{D}{Dt} = \left(\frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z} \right) \quad (2.17)$$

となる。よって、流体中の拡散方程式は、

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = D_m \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_m \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D_m \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad (2.18)$$

となる。上式では式 (2.16) 中の D を分子拡散係数 D_m で置き換えた。

流れが乱流であれば、流速 u, v, w や濃度 C は不規則に変動する。そこで、これらの物理量を統計的平均値 $\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}, \bar{C}$ とその周りの変動分 u', v', w', C' に分けて表示する。

$$u = \bar{u} + u', v = \bar{v} + v', w = \bar{w} + w', C = \bar{C} + C' \quad (2.19)$$

これを式 (2.18) に代入した後、アンサンブル平均（同一条件下における多数の測定の平均）をとる。このとき、変動分 u', v', w', C' の期待値がゼロであることと、流れの連続の方程式

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.20)$$

を用いて式を整理すると、次式を得る。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{C}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{C}}{\partial z} \\ &= D_m \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x^2} + D_m \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial y^2} + D_m \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial z^2} + \frac{\partial(-\overline{u'C'})}{\partial x} + \frac{\partial(-\overline{v'C'})}{\partial y} + \frac{\partial(-\overline{w'C'})}{\partial z} \end{aligned} \quad (2.21)$$

上式中の $-\overline{u'C'}$ 、 $-\overline{v'C'}$ 、 $-\overline{w'C'}$ は乱流運動による物質輸送を表すが、これは未知変数でありこのままでは上式を解くことはできない。

そこで、乱流運動による物質輸送を式 (2.15) とのアナロジーにより

$$\overline{u'C'} = -K_x \frac{\partial \bar{C}}{\partial x}, \overline{v'C'} = -K_y \frac{\partial \bar{C}}{\partial y}, \overline{w'C'} = -K_z \frac{\partial \bar{C}}{\partial z} \quad (2.22)$$

とモデル化する。これは流体力学の分野で良く用いられている手法である。すると、フィック型の乱流拡散方程式

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{C}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{C}}{\partial z} \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left[(D_m + K_x) \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(D_m + K_y) \frac{\partial \bar{C}}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[(D_m + K_z) \frac{\partial \bar{C}}{\partial z} \right] \end{aligned} \quad (2.23)$$

が導かれる。 K_x 、 K_y 、 K_z は乱流拡散係数と呼ばれる。通常は分子拡散係数に比べて乱流拡散係数が卓越するので、 $D_m \simeq 0$ としてよい。

分子拡散の場合と異なり乱流拡散係数は x 、 y 、 z の関数となるため、この方程式を解くことは容易でない。そこで、ここでは最も簡単な一様等方性乱流中の拡散を考え、 $\bar{u} = U$ 、 $\bar{v} = \bar{w} = 0$ とする。この場合、乱流拡散係数は定数となり、 $K_x = K_y = K_z = K$ となる。この条件の下で原点から連続的に物質を放出した場合の解は、ロバートによって次式のように与えられている。

$$\bar{C}(x, y, z) = \frac{q}{4\pi K d} \exp \left[-\frac{U}{2K} (d - x) \right] \quad (2.24)$$

ただし、 q は単位時間当たりの物質放出量を表し、

$$d = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (2.25)$$

である。匂い源から遠い場所のプルーム中心軸付近では $x \gg y, z$ の関係が成り立ち、上式を近似的に

$$\bar{C}(x, y, z) = \frac{q}{4\pi K x} \exp \left[-\frac{U(y^2 + z^2)}{4Kx} \right] \quad (2.26)$$

と表すことができる。この式より、ロバートの解で表されるプルームの断面濃度分布がガウス分布状であることが分かる。

なお、以上の議論は時間平均濃度 $\bar{C}$ に関するものであることに注意が必要である。実際のプルームは風の乱れにより不規則に蛇行しており、式 (2.24) はこれを長時間にわたって重ね合わせた形状を表すと考えることができる。

2.5.2 ロバートのプルームモデルの適用結果

風洞やクリーンルームで実測したエタノールガスの時間平均濃度分布を、式 (2.24) のロバートのプルームモデルで表すことを考える。そのために、式 (2.24) で計算される濃度をガスセンサ応答に換算し、それを Fig. 2.16 などのガスセンサの時間平均応答にカーブフィットする。

初めに、センサ応答 r とガス濃度 C の換算を行う。先述のように、高濃度ガスに対するセンサ応答は式 (2.2) の対数則に従い、低濃度に対しては式 (2.7) で線形近似できる。そこで、この両者をまとめ、次式でセンサ応答の濃度依存性をモデル化した。

$$r = (1 + aC)^b \quad (2.27)$$

このモデル式を Fig. 2.7 のセンサ 1 にカーブフィットした結果を Fig. 2.21 に示す。このカーブフィットは、パラメータ a 、 b を軸とする座標空間でモデル式と実測値の 2 乗誤差を最小化する非線形最小 2 乗問題となる。Fig. 2.21 では軸方向繰り返し探索法を用いた。すなわち、初めにパラメータ a のみを変化させ、2 乗誤差が極小となる a の値を探す。次に、 a をその値に固定したまま b を変え、2 乗誤差極小となる b の値を探す。これを繰り返し行うことによって 2 乗誤差が最小となる a 、 b の値の組を探した結果、次式を得た。

$$r = (1 + 0.2309C[\text{ppm}])^{-0.6705} \quad (2.28)$$

Fig. 2.21 のように、本研究で用いた濃度範囲において上式は実測値とよく一致する。

この式 (2.28) を用いてロバートのプルームモデルをガスセンサ応答に変換し、センサ応答の実測値にカーブフィットする。プルームモデルを表す式 (2.24) は匂い源が一様な流れの中におかれた場合のプルームを表しており、匂い源の周囲に壁や床があると成立しない。しかし、Fig. 2.16 に示す風洞実験の場合には匂い源から最も近い風洞上壁までの距離が 14 cm であり、プルーム幅はこれよりも小さい。風洞の風下端近くでようやくプルームが風洞上壁に達するまで広がるため、風洞壁の影響は無視できる。

そこで、式 (2.24) を Fig. 2.16 の実測値にカーブフィットした。この結果を Fig. 2.22 に示す。このカーブフィットにも先述のセンサ応答モデルの場合と同様に軸方向繰り返し探索法を用いた。未知パラメータは乱流拡散係数 K 、ガス放出量 q と風向 θ (風上方向) であり、カーブフィットによって得られた値は、

$$\begin{aligned} K &= 5.42 \text{ cm}^2/\text{s} \\ q &= 72.5 \text{ ml/min} \\ \theta &= -1.70^\circ \end{aligned} \quad (2.29)$$

となった。ただし、角度は反時計周りを正とし、 x 軸方向を 0° とする。ガス噴出量 q は 30°C におけるエタノール飽和蒸気を噴出したと仮定して求めたが、実際の噴出量 75 ml/min にほぼ等しい値が得られた。また、センサ応答の平均 2 乗誤差は 0.109 であり、Fig. 2.22 は濃度分布の実測値とよく一致している。

同様のカーブフィットをクリーンルームにおけるガス濃度分布の測定結果である Fig. 2.19 や Fig. 2.20 に対して適用する際には注意が必要である。これらの図では匂い源の高さに比

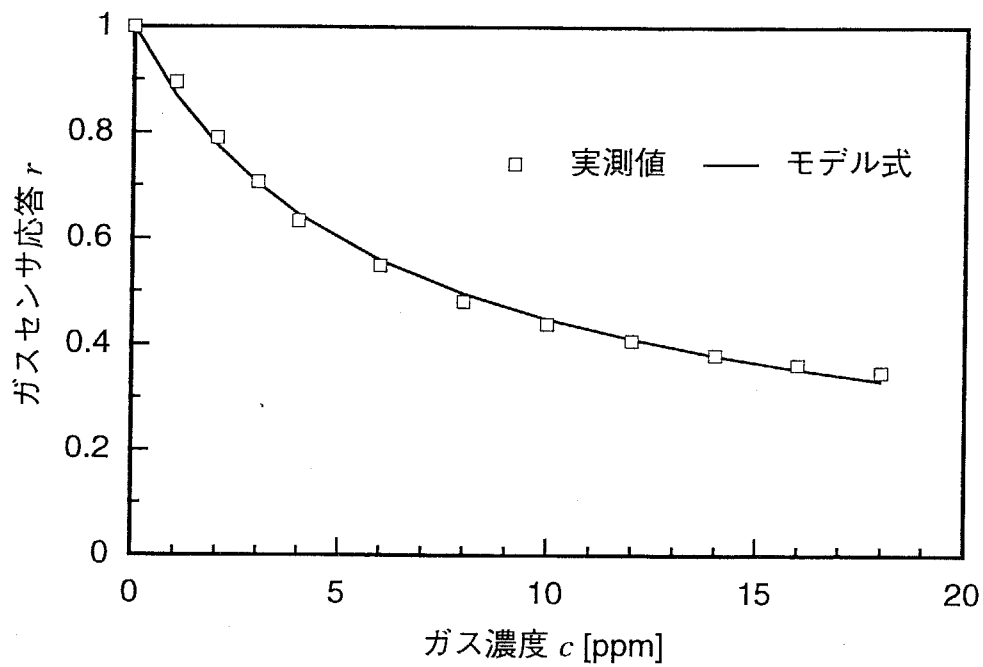


Fig. 2.21 ガスセンサ応答の濃度依存性を表すモデル式

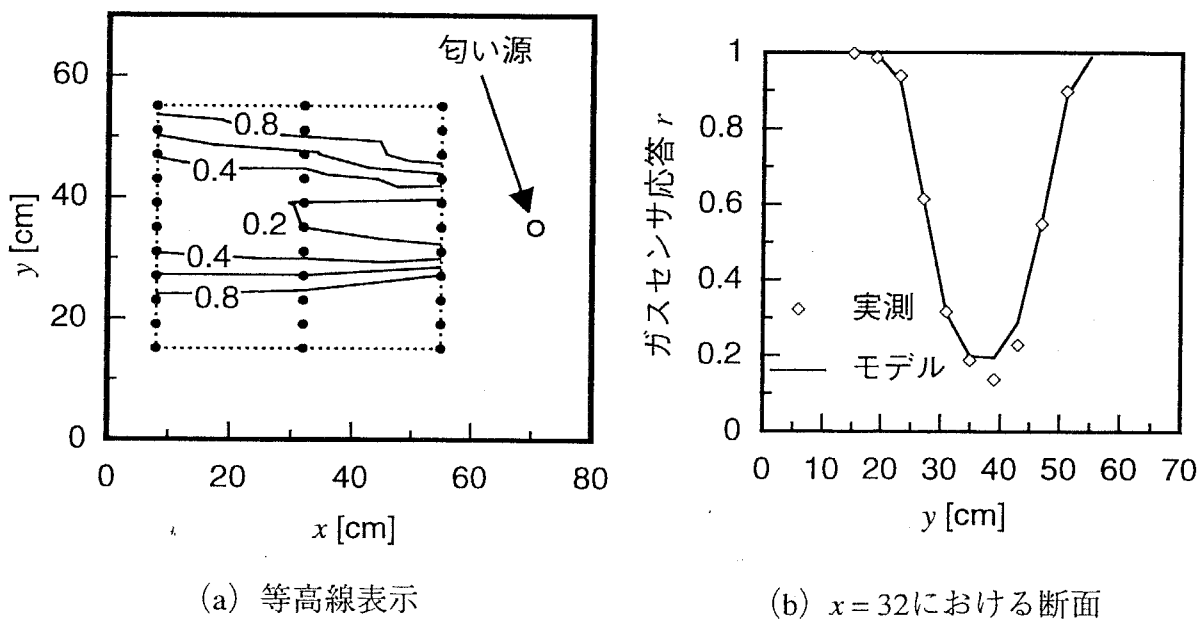


Fig. 2.22 風洞内のプルームモデル

べてブルームの幅が広いと、床面の影響を考慮しなければならない。そこで、地面の影響を考慮して式 (2.24) を修正したブルームモデルを用いる。簡単のため、匂い源が地面に置かれ、風が地面と平行に吹いていると考える。地表面 $z=0$ を通して匂いが拡散がしないと仮定すれば、境界条件として $\partial \bar{C} / \partial z|_{z=0} = 0$ が与えられる。この条件を満足する解は鏡像の原理によって求めることができ、地表面を対象面として虚像の匂い源を地下に置けばよい [69]。今の場合、地表面からの匂い源の高さがゼロなので虚像は真の匂い源と重なる。したがって、地面の影響を考慮したガス濃度分布 $\bar{C}(x, y)$ は、式 (2.24) 中の噴出量 q を $2q$ で置き換えた式によって与えられ、

$$\bar{C}(x, y) = \frac{2q}{4\pi K d} \exp \left[-\frac{U}{2K}(d-x) \right] \quad (2.30)$$

となる。

この式をブルームモデルとして用い、クリーンルームにおけるガス濃度分布 Fig. 2.19 にカーブフィットした結果を Fig. 2.23 に示す。カーブフィットの方法は風洞の場合と同様であり、

$$\begin{aligned} K &= 47.8 \text{ cm}^2/\text{s} \\ q &= 51.0 \text{ ml/min} \\ \theta &= -47^\circ \end{aligned} \quad (2.31)$$

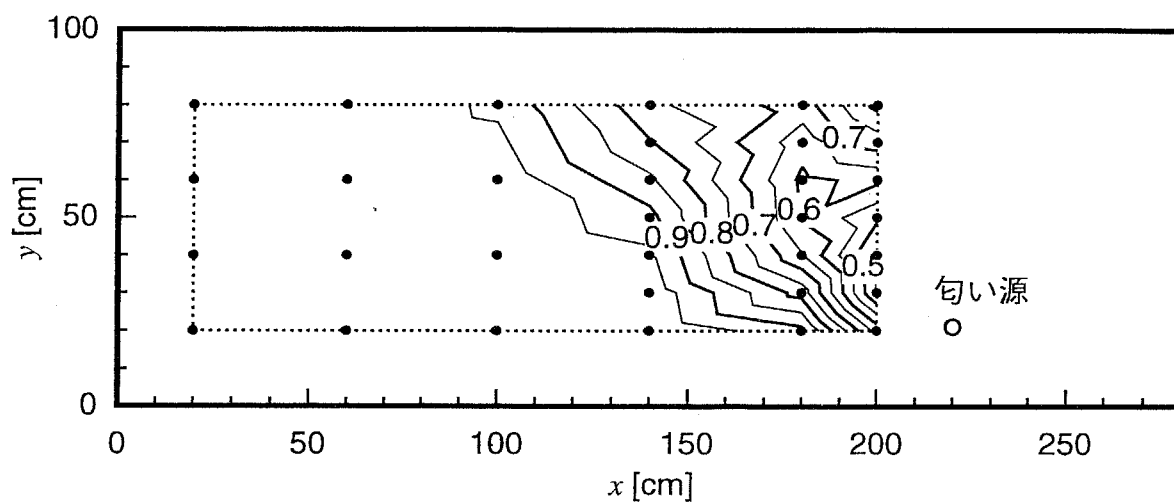
が得られた。ただし、式 (2.30) 中の風速 U は、Fig. 2.19 においてブルーム中心部分にあたる点 (170, 90) における実測値を用い、 $U = 18.8 \text{ cm/s}$ とした。実際のクリーンルームでは匂い源や測定場所が床面から高さを持ち、また風向や風速も場所によって異なる。したがって、式 (2.30) の導出時の仮定と実際の環境の間で異なる点が多い。このため、ガス放出量が実測値 75 ml/min と異なる。また、先述したように $x = 100$ 付近からブルームが真横に折れ曲がるため、 $x \leq 100$ ではモデルが実測値と合わない。

しかし、Fig. 2.23 におけるセンサ応答の平均 2 乗誤差は 0.066 と小さい。特に $x \geq 140$ ではブルームの幅がモデルと実測値で良く一致しており、匂い源付近の濃度分布を表す目的には式 (2.30) を使用することができる。

また、床面近くで測定したセンサ応答 Fig. 2.20 に対するカーブフィット結果を Fig. 2.24 に示す。このカーブフィットはブルームが折れ曲がる前の $x \geq 140$ の測定点のみを用いて行い、式 (2.30) 中の風速 U にはブルーム中央にあたる点 (140, 80) における実測値 13.0 cm/s を用いた。得られたパラメータの値は、

$$\begin{aligned} K &= 38.3 \text{ cm}^2/\text{s} \\ q &= 96.4 \text{ ml/min} \\ \theta &= -35^\circ \end{aligned} \quad (2.32)$$

である。モデル式の仮定と実際の不一致により、ガス放出量は実測値 75 ml/min より大きな値となった。しかし、センサ応答の平均 2 乗誤差は 0.0823 でありこの場合も分布形状は良く一致した。



(a) 等高線表示

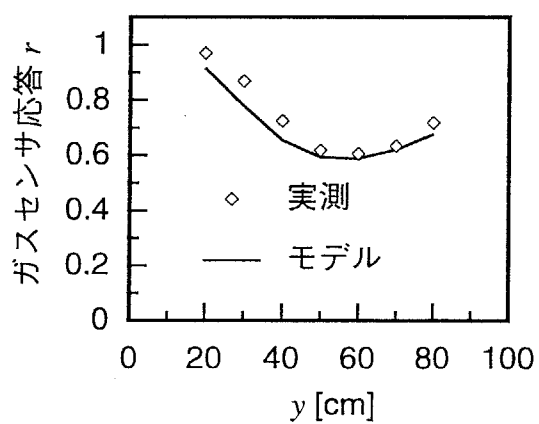
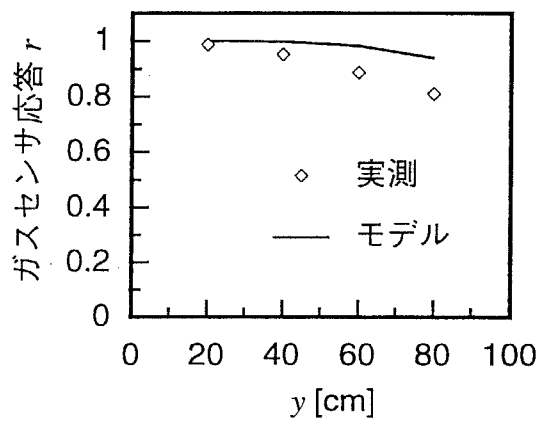
(b) $x = 180$ における断面(c) $x = 100$ における断面

Fig. 2.23 クリーンルーム内のプルームモデル (高さ 23.5 cm)

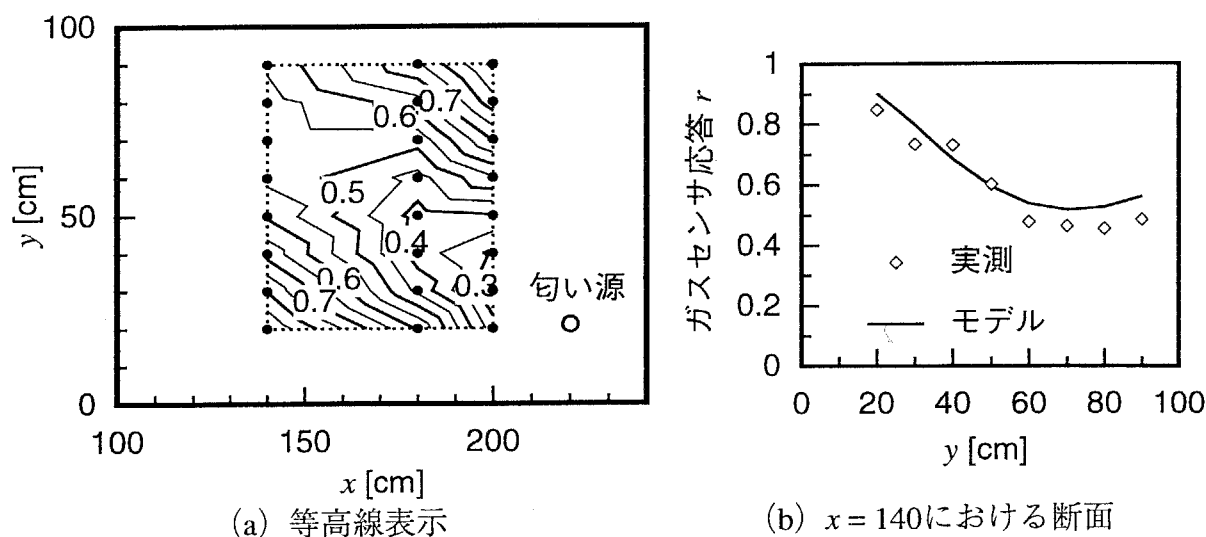


Fig. 2.24 クリーンルーム内のプルームモデル (高さ 12.0 cm)

2.6 まとめ

本章では半導体ガスセンサの応答の定義と感度校正法を述べ、サーミスタ式風速センサを用いた風向判定プローブについて説明した。また、風洞とクリーンルームの二つの実験環境について、環境内の風向やガス濃度の分布を調べた。

どちらの環境においてもガスは風に運ばれて広がり、プルームを形成する。このため、風と平行な方向の濃度勾配が非常に小さい。また、簡単化された環境である風洞においても、風の乱れのためにガス濃度分布が大きく揺らぐ。このため、ガスセンサ応答の時間平均をとらなければ、小さな濃度勾配を検出することができない。したがって、濃度勾配を頼りに短時間で匂い源を探知することは難しい。一方、風洞とクリーンルームのどちらも、環境内の風向は比較的安定している。風向に関しては短時間で信頼性の高い情報が得られるので、これを利用した探知が有効である。

また、クリーンルームでは風向が場所によって変わるため、これに合わせてプルームも折れ曲がる。光や音波は直進するので、遠方から光源や音源の位置を探知することができる。しかし、匂い源探知の場合はプルームの曲がり具合を予測し、遠方から高精度で匂い源位置を探知することは困難である。したがって、匂い源方向の判定を繰り返し行いながら、匂い源に近付いてその位置を確認することが必要になる。こうした観点から、匂い源探知の場合は運動型のアクティブセンシングが有効であると言える。

ただし、プルームが直線的にのびている範囲では、時間平均濃度の分布をロバートのプルームモデルでモデル化することができる。この範囲内では、モデルを利用して匂い源位置を予測することが可能である。

Chapter 3

ガスセンサと風速センサを用いた 自走型匂い源探知システム

3.1 はじめに

前章までに述べたように風と平行な方向の濃度勾配が小さいため、濃度勾配を辿って匂い源に到達するのは困難である。この解決策としては、風向を利用することが考えられる。風と垂直な方向の濃度勾配は比較的急峻であり、この方向の位置調節は濃度勾配を利用すればよい。そこで、ガスセンサと風速センサを用いた匂い源探知システムを開発した。

匂い源を探知するためには、第2章で述べたように匂い源に向けて移動し、その位置を確かめるシステムが有効であると考えられる。そこで、センサを移動台車に搭載した自走型のシステムを構築した。また、風向や濃度分布の揺らぎのため、常に100%の正解率で匂い源方向を判定するのは難しい。そこで、方向判定を繰り返し行うことで探知の信頼性を高める方針を採る。

本章では、以降の実験の基本となる探知アルゴリズムについて説明し、風洞実験によりその有効性を確かめる。アルゴリズムとしては、ステップバイステップ法とジグザグ接近法の2通りを考え、比較を行った。後者は匂い源にジグザグに向かう昆虫の行動[10]を模倣したものであるが、実験を通じてその欠点が明らかになったので改良を行った。最後に、こうした実験結果を踏まえて二つのアルゴリズムを統合する。

3.2 システムの構成

自走型匂い源探知システムの概略を Fig. 3.1 に示す。移動台車上に Fig. 2.10 に示した風向判定プローブを取り付けており、45° 単位の風向を得ることができる。半導体ガスセンサは、風向判定プローブの角柱による気流の乱れを避け、角柱の上部に配置した。本システムでは、風と垂直な方向の濃度勾配を検出するためにガスセンサを用いる。そこで、4個のガスセンサを Fig. 3.1 のように配置した。このように配置したことにより、45° 単位の風向がどのように判定されても、それと直角に並ぶガスセンサを探して応答差を測定し、濃

度勾配を得ることができる。この半導体ガスセンサと風向判定プローブが、匂い源の方向判定プローブを構成する。

システムの構成を Fig. 3.2 に示す。半導体ガスセンサと風速センサの応答は A/D コンバータを通してパーソナルコンピュータに取り込まれる。Fig. 2.14 に示すように半導体ガスセンサは応答の回復に数分を要する遅いセンサであるので、本システムではセンサ応答のサンプリング周期を 1 秒とした。

こうして取り込んだセンサ応答を基にコンピュータで台車の移動すべき方向を判断し、左右の車輪を駆動する。台車は左右の車輪を同速度同方向に回転することにより直進する。また、左右の車輪を同じ速度で異なる方向に回転すると、台車はその場で旋回する。以降ではこれを単に「方向転換」と呼ぶものとする。

3.3 匂い源探知アルゴリズム

3.3.1 ステップバイステップ法

ステップバイステップ法は、匂い源方向の判定を繰り返しながら、その方向に 1 ステップずつ移動する探知アルゴリズムである。匂い源方向の判定は、風に垂直な方向の濃度勾配と風向を組み合わせで行う。ステップバイステップ法による探知の手順をまとめると以下ようになる。

- (1) 風速センサの応答パターンから風向を判定する。
- (2) 判定された風向と垂直に並ぶ 2 個のガスセンサを選択し、応答を比較することによって濃度勾配の方向を判定する。
- (3) 以上の手順で得られた風向と濃度勾配は直交しており、匂い源の方向は両者の間にあると考えられる。ここでは、両者の中間にあたる 45° 方向を匂い源方向の推定値とする。
- (4) 推定された方向に一定距離だけ前進する。ここでは 1 回の方向判定につき 2 cm 移動するものとし、移動速度は 1.1 cm/s とした。
- (5) 以上の手順 1 から 4 を匂い源に到達するまで繰り返す。

ただし、風洞でアルゴリズムの動作を調べた結果、検出されたガス濃度が非常に低い場合には濃度勾配の誤判定が多いことが分かった。そこで、手順 2 で選択された 2 個のガスセンサの応答 r がどちらも 0.7 より大きい場合には、その場に台車を止めてガスが来るのを待つ機能を設けた。

ステップバイステップ法による風洞内の匂い源探知例を Fig. 3.3 に示す。同図では、風洞の風速を約 20 cm/s とし、エタノールガスの噴出量は 150 ml/min とした。また、この実験例に限って風向の方向判定を簡略化し、一番応答の小さい風速センサを風下のセンサとすることで 90° 単位の風向判定を行った。Fig. 3.3 中のジグザグな折れ線は台車の移動軌跡

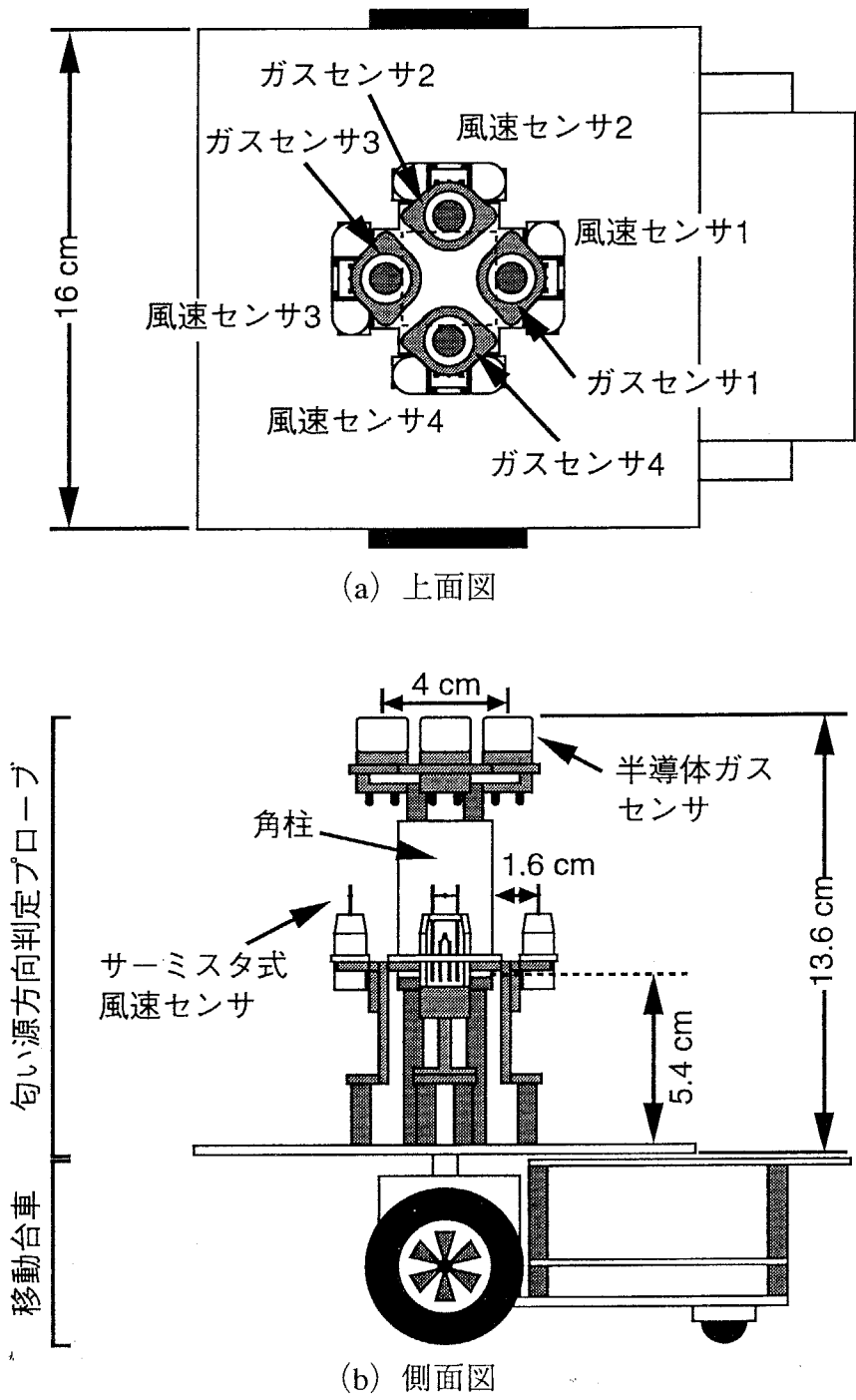


Fig. 3.1 自走型匂い源探知システム概略図

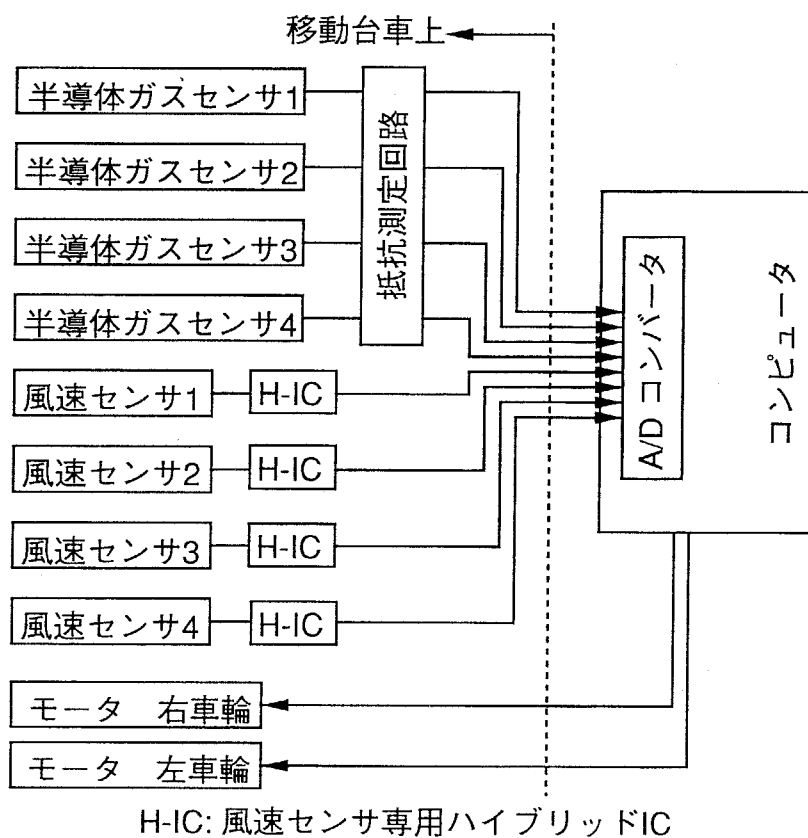


Fig. 3.2 システムの構成

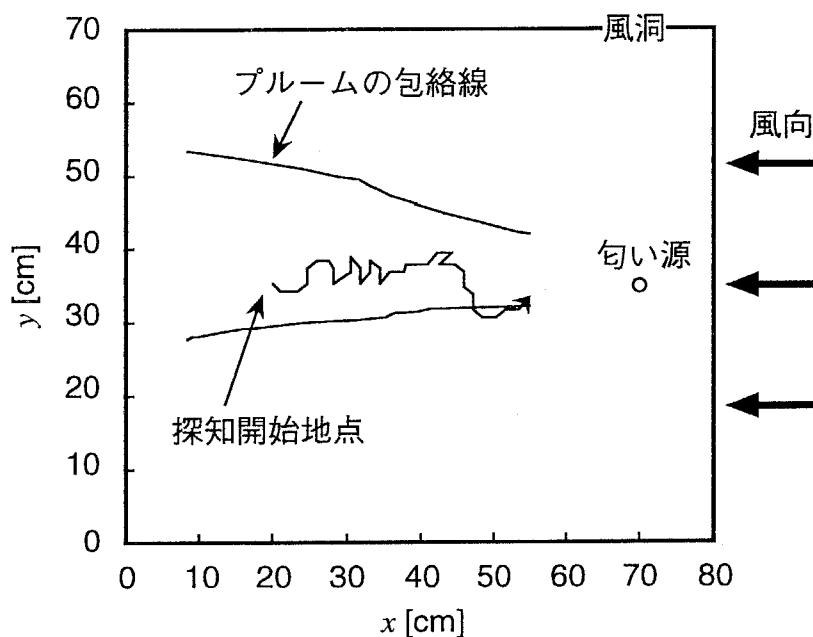


Fig. 3.3 ステップバイステップ法による匂い源探知結果

を表し、プルームの包絡線はガスセンサの時間平均応答が 0.4 となった等ガス濃度線を示す。探知の終了条件は、匂い源を中心とする一辺 26 cm の正方形内に台車上のプローブ中心が入ることとした。この条件は、台車が匂い源に接触する程度まで近付いたことを意味する。Fig. 3.3 では 33 ステップで台車が匂い源に到達し、要した時間は 240 秒であった。

Fig. 3.3 以外に、(1) 風洞風速を 12 cm/s に落とす、(2) ガス噴出量を 75 ml/min に落とす、(3) スタート地点をプルーム中央からプルーム端に移すなど様々な条件で探知を試みた。風速が小さくなると風向の誤判定が多くなり、また、ガス噴出量が少なくなると濃度勾配の誤判定が多くなる傾向はあったものの、どの条件でもほぼ同程度の時間で匂い源に到達することができた。

3.3.2 ジグザグ接近法

第 1 章で述べたように、昆虫はプルームの外へ出ないようにターンを繰り返し、風上の匂い源に向かう。ジグザグ接近法はこの行動を模倣したアルゴリズムである。プログラムは Table 3.1 から Table 3.4 に示すルールで記述した。表中ではガスセンサ i の応答を r_i と表し、 $i = 1, 2, 3, 4$ に対して r_i の最大値を $r_{\max}$ 、最小値を $r_{\min}$ と記述した。ルールは各フェーズのルール 1 から順に評価し、最初にマッチングしたルールを適用して台車を動かす。ルールの評価は 1 秒ごとに繰り返し行う。

匂い源探知開始時には Table 3.1 (フェーズ 1) が評価される。ここではガスセンサ応答のしきい値 $r_{\text{th}2} = 0.7$ を用いてガスの有無を判定しており、ガスが検出されると台車が移動を開始する。このときの進路 θ は風上を基準として $\theta_1 = 60^\circ$ または $\theta_2 = -60^\circ$ のい

Table 3.1 フェーズ 1: 匂い源探知の開始

ルール 1	If ($r_{\min} \leq r_{th2}$) then (風上から θ の方向へ方向転換) and (フェーズ 2 へ)
ルール 2	If (上のルールにマッチしない) then (1 秒間静止)

Table 3.2 フェーズ 2: プルームの探索

ルール 1	If ($r_{\max} \leq r_{th1}$) then (フェーズ 3 へ)
ルール 2	If ($r_{\min} > r_{th2}$) then (フェーズ 4 へ)
ルール 3	If (上のルールのいずれにもマッチしない) then (距離 d だけ前進)

Table 3.3 フェーズ 3: プルーム端の検出

ルール 1	If ($r_{\min} > r_{th1}$) and (台車は θ_1 方向に前進中) then (θ_2 方向へ方向転換) and (フェーズ 2 へ)
ルール 2	If ($r_{\min} > r_{th1}$) and (台車は θ_2 方向に前進中) then (θ_1 方向へ方向転換) and (フェーズ 2 へ)
ルール 3	If (上のルールのいずれにもマッチしない) then (距離 d だけ前進)

Table 3.4 フェーズ 4: 後退

ルール 1	If ($r_{\max} \leq r_{th1}$) then (フェーズ 2 へ)
ルール 2	If (探知開始地点まで後退) then (フェーズ 1 へ)
ルール 3	If (上のルールのいずれにもマッチしない) then (来た経路を辿って距離 d だけ後退)

れからランダムに選ばれる。なお、角度は反時計回りを正とする。

台車が移動を始めると、Table 3.2 (フェーズ 2) が適用される。フェーズ 2 では、台車はプルームに入るまで毎秒距離 d ずつ前進する。プルームに入ったか否かの判定にはしきい値 $r_{th1} = 0.5$ を用いる。台車がプルームに入ると、Table 3.3 (フェーズ 3) が適用される。この結果、台車はプルームを横断するまで更に前進を続け、反対側のプルーム端に達すると風上に対して逆方向へ方向転換を行う。フェーズ 2 と 3 のルールを繰り返し適用することにより、台車はプルームを風上に辿りながらジグザグに匂い源に向かう。

しかし、濃度分布は不規則に揺らぐため、台車が誤った方向転換を行って探知に失敗することがある。そこで、誤った方向に進んでしまいガスが検出されなくなった場合には、探知をやり直すようにした。このためのルールを Table 3.4 (フェーズ 4) に示す。台車は探知開始地点に向けて来た経路を引き返す。途中でプルームを再発見した場合には、その場所から探知を再開する。

本章に述べる実験では台車の 1 秒間の移動距離 d を 1.8 mm と十分遅くした。これは、ガスセンサの回復速度が遅く、センサ応答が変化する前に台車が風洞の壁まで達してしまうことが多かったためである。第 4 章で述べるように広い空間で探知を行う場合には、台車移動速度を向上することができる。また、ガスの有無を判定するしきい値 r_{th2} とプルーム端判定のしきい値 r_{th1} は実験的に定めた。この場合も、台車が風洞の壁に到達する前にプルーム端が判定され、台車の方向転換が行われるように値を設定した。

ジグザグ接近法による探知結果の例を Fig. 3.4 に示す。ここでは風洞風速を 12 cm/s、ガス噴出量を 75 ml/min とした。プルームの蛇行中心線 $y = 35$ 上にある点 (20, 35) から探知を開始すると、台車は破線の軌跡のように容易に匂い源に向かった。しかし、中心線から離れガス濃度が低い点 (20, 50) から探知を開始すると、台車は実線の軌跡のように開始地点付近で迷ってしまい、匂い源到達に時間がかかった。このような低ガス濃度の場所からの探知能力は先述のステップバイステップ法の方が優れている。次節では、この欠点を解決するために行ったジグザグ接近法の改良について述べる。

3.4 風洞実験によるジグザグ接近法の改良

3.4.1 プルームの方向判定による探知開始方向の改善

Table 3.1 では、探知開始時の台車進行方向として 60° と -60° のいずれかをランダムに選択していた。このため、Fig. 3.4 の☆印の箇所のように実際のプルームから遠ざかる向きに探知が開始されることがあるが、プルーム方向を判断して探知を開始するのが望ましい。

Fig. 3.5 は、風速を 20 cm/s、エタノール噴出量を 75 ml/min として台車を点 (40, 50) に置き、ガスセンサ応答を測定した結果である。この地点から探知を開始しても十分なガスセンサ応答が得られないためシステムが迷うことが多い。

Fig. 3.5 (a) は、同図 (b) のように風向と垂直に配置した 2 個のガスセンサの応答を示す。Fig. 3.5 (a) では数十秒に 1 回の頻度でセンサ応答に大きなディップが現れている。これは、同図 (c) のように台車の位置までプルームが蛇行してきたと考えられる。このディッ

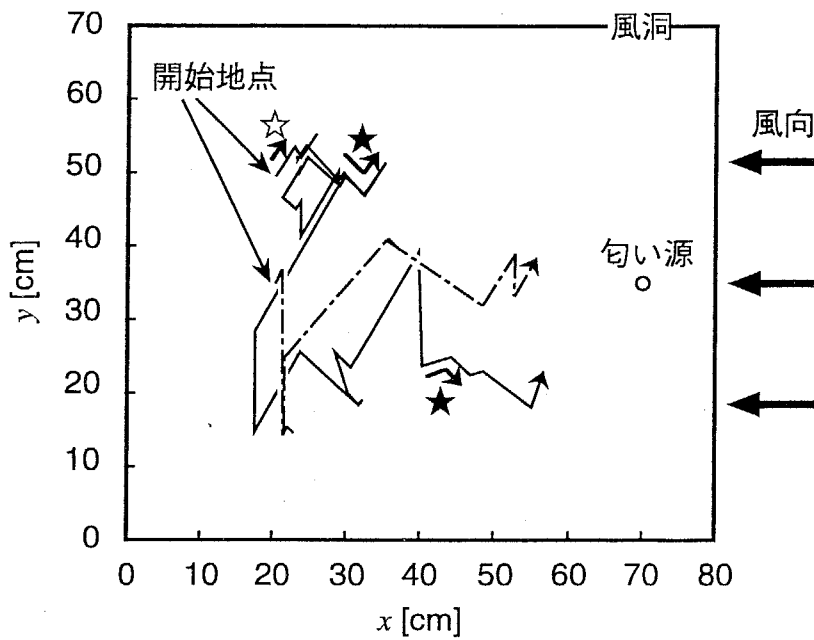


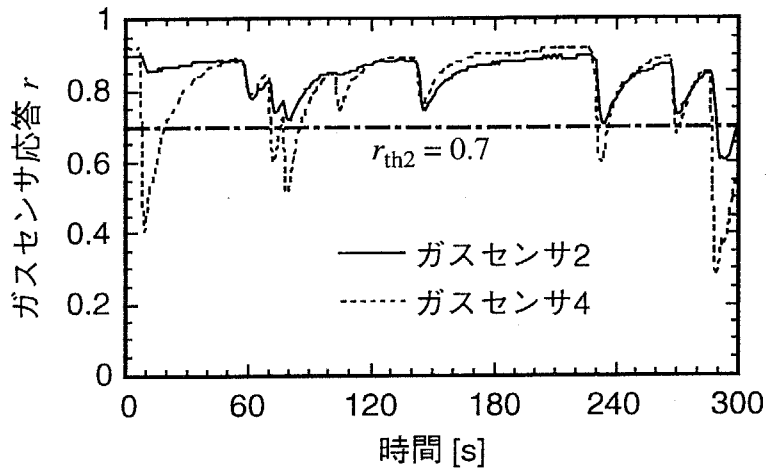
Fig. 3.4 ジグザグ接近法による匂い源探知結果

プ部分でセンサ応答を比較すると、蛇行中心線に近いセンサ 4 の方が小さな応答値を示すことが多い。

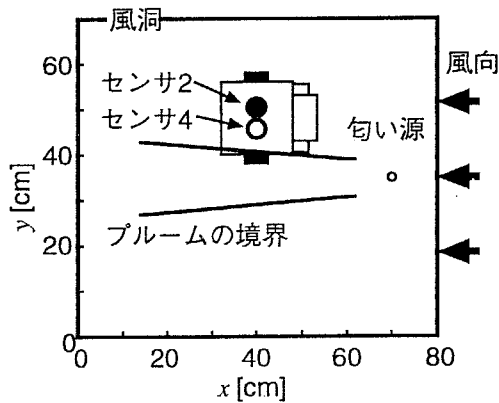
この関係を用いればブルームの方向を判定できる。予備実験を行い、2 個のガスセンサの応答極小値を比較した結果、67%の確率（試行回数 $n = 15$ ）でブルーム蛇行中心線に近いセンサの応答値が小さかった。ブルーム方向判定の正解率はあまり高くないが、従来法の正解率 50% に比べて改善が期待できる。実際には、ブルームが Fig. 3.5 (c) よりも更に外側まで蛇行することがあり、100% 近い高確率で蛇行中心線の方を判定することはできない。方向判定を誤った場合には、従来と同様に探知を繰り返す機能により対処する。

以上述べた探知開始方向の判定を組み込むため、フェーズ 1 のルールを Table 3.5 のように変えた。表中の r_{right} 、 r_{left} は、それぞれ風上に向かって右側、左側にあるガスセンサの応答を表す。このセンサ対は、4 個のセンサの中から風に対して最も垂直に近い角度で並んでいる対を選ぶ。Table 3.5 に示すルールを用いて r_{right} 、 r_{left} のどちらか小さい方が極小値をとるまで待ち、そのセンサの方向に移動を開始する。

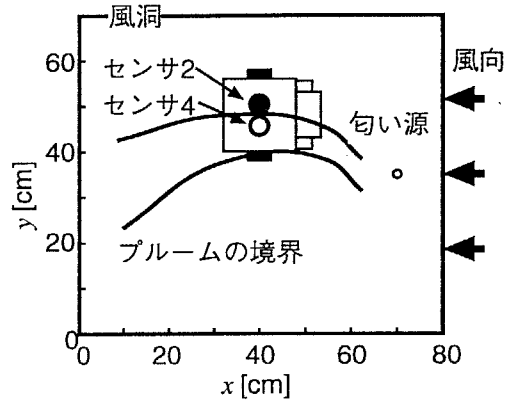
更に、Table 3.5 では探知開始時の進路を風上から $\pm 120^\circ$ に変更した。ブルームの幅は匂い源から遠ざかるほど広がるので、 $\pm 60^\circ$ に進む場合よりも短い距離でブルームに入ることができる。ブルームに入った際に $\pm 60^\circ$ に方向転換を行うため、Table 3.6 に示すフェーズ 5 を追加した。



(a) 風と垂直に並ぶ2個のガスセンサの応答



(b) 台車とガスセンサの配置



(c) プルーム蛇行の模式図

Fig. 3.5 プルーム端の探知開始地点で観測されるガスセンサ応答

Table 3.5 改良後のフェーズ1

ルール 1	If ($r_{\text{left}} < r_{\text{right}}$) and ($r_{\text{left}} \leq r_{\text{th2}}$) and (r_{left} は増加中) then ($\theta_3 = 120^\circ$ 方向へ方向転換) and (フェーズ 5 へ)
ルール 2	If ($r_{\text{right}} \leq r_{\text{left}}$) and ($r_{\text{right}} \leq r_{\text{th2}}$) and (r_{right} は増加中) then ($\theta_4 = -120^\circ$ 方向へ方向転換) and (フェーズ 5 へ)
ルール 3	If (上のルールのいずれにもマッチしない) then (1 秒間静止)

Table 3.6 フェーズ 5: プルーム発見時の方向転換

ルール 1	If ($r_{\max} \leq r_{\text{th1}}$) and (台車は θ_3 方向に前進中) then (θ_1 方向へ方向転換) and (フェーズ 3 へ)
ルール 2	If ($r_{\max} \leq r_{\text{th1}}$) and (台車は θ_4 方向に前進中) then (θ_2 方向へ方向転換) and (フェーズ 3 へ)
ルール 3	If ($r_{\min} > r_{\text{th2}}$) then (フェーズ 4 へ)
ルール 4	If (上のルールのいずれにもマッチしない) then (距離 d だけ前進)

3.4.2 方向転換時のプルーム蛇行方向の判定

Fig. 3.4 に示すように、ジグザグ接近法がうまく働かない場合には台車の無駄な方向転換が多く見られる。そこで、システムの動作をビデオ撮影して観察した結果、フェーズ 3 の方向転換は Fig. 3.6 (a) に示す 3 種に分類できた。(i) の方向転換はプルームの蛇行中心線 $y = 35$ をまたいでから行われており、ジグザグ接近法で意図した動作である。しかし、実際には (ii)、(iii) のように中心線をまたがずに方向転換が行われることがある。特に (iii) の方向転換の場合、Fig. 3.4 の★印の箇所のように蛇行中心線から離れる方向に進んでしまうため、すばやい探知を妨げている。

(iii) 型方向転換の例を Fig. 3.6 (b) に示す。また、このときのガスセンサ応答を同図 (c) に示す。同図ではエタノールガス噴出量を 75 ml/min とし、風速を 20 cm/s とした。図中には台車の進行方向に並ぶガスセンサ 1 と 3 の応答のみを示す。

Fig. 3.6 (b) の軌跡は以下のように解釈できる。この探知開始地点のようにプルーム中心線から離れた場所ではガス濃度が低い。このため、台車は初め静止していたが、Fig. 3.5 (c) のようにプルームが蛇行してきた結果、Table 3.5 のルールに従って探知が開始された。しかし、プルームが蛇行中心線付近に素早く戻ってしまったため、台車は取り残され、プルームから出てしまった。このときにフェーズ 3 のルールに従って方向転換をしてしまうと (iii) 型の方向転換となる。

そこで、(iii) の場合を (i)、(ii) の場合と区別し、(iii) の場合は方向転換を行わないようにアルゴリズムを改良する。Fig. 3.6 (b) において (iii) 型の方向転換が行われた P 点におけるセンサ応答を見ると、同図 (c) のようにプルームが去った方向に位置していたセンサ 1 の回復が遅れていた。この回復時間差は、プルームがセンサの位置を通過していった時刻の違いによって生じると考えられる。これを利用し、フェーズ 3 のルールを Table 3.7 のように変更した。これによって、Fig. 3.6 (a) の (i)、(ii) のようにプルームが台車後方のセンサ 3 の方向に去った場合には方向転換を行い、(iii) のように前方のセンサ 1 側に去った場合には直進してプルームを追うことが可能になる。

予備実験として、台車がプルームの蛇行中心線をまたぐ前に行った方向転換 (ii)、(iii) についてその際のガスセンサ応答を調べた。この結果、従来アルゴリズムでは (ii) のような方向転換後正しく蛇行中心線へ向かう確率が 46% ($n = 37$) であった。一方、Table 3.7 のルールに従えば、この確率は 76% ($n = 37$) に向上した。(i) の方向転換を (iii) と誤

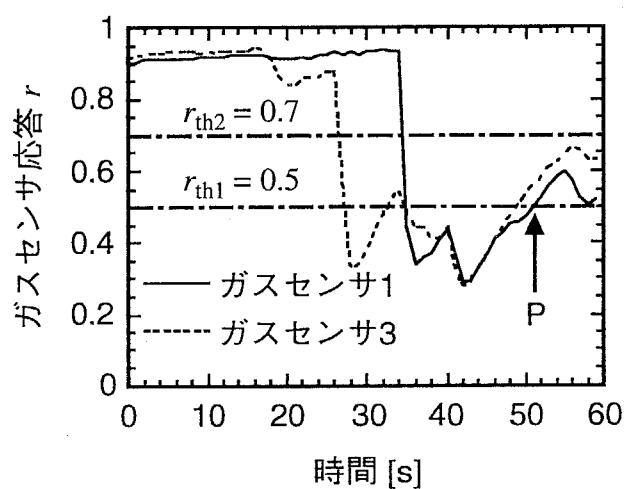
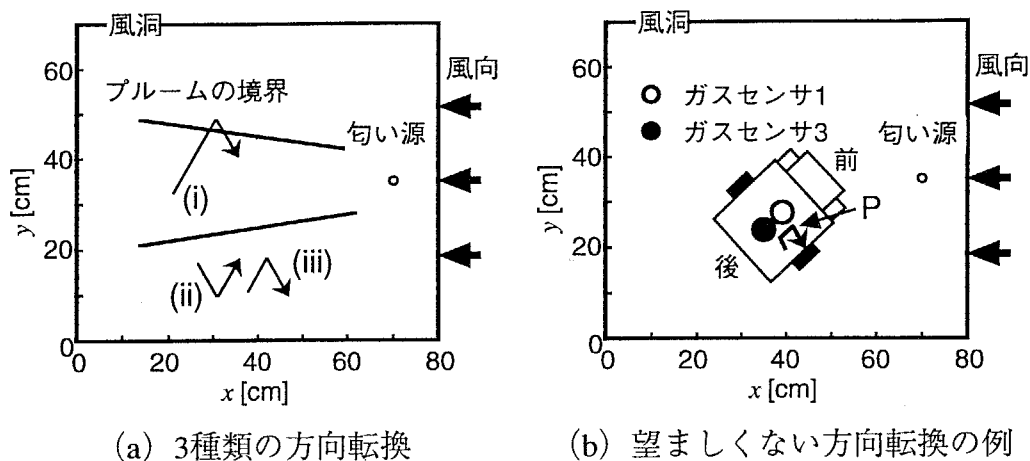


Fig. 3.6 方向転換に関する解析

Table 3.7 改良後のフェーズ3

ルール 1	If ($r_{\min} > r_{th1}$) and ($r_1 > r_3$) and (台車は θ_1 方向に前進中) then (θ_2 方向へ方向転換) and (フェーズ 2 へ)
ルール 2	If ($r_{\min} > r_{th1}$) and ($r_1 > r_3$) and (台車は θ_2 方向に前進中) then (θ_1 方向へ方向転換) and (フェーズ 2 へ)
ルール 3	If ($r_{\min} > r_{th1}$) and ($r_1 \leq r_3$) then (フェーズ 2 へ)
ルール 4	If (上のルールのいずれにもマッチしない) then (距離 d だけ前進)

Table 3.8 地図導入のためのルール変更

フェーズ2のルール2	If ($r_{\min} > r_{th2}$) and (現在位置が地図にマークされて いない) then (フェーズ4へ)
フェーズ5のルール3	If ($r_{\min} > r_{th2}$) and (現在位置が地図にマークされて いない) then (フェーズ4へ)

判定して直進してしまう確率は6% ($n=18$) と低かった。

Table 3.5 から Table 3.7 までのルールを組み込む前後のシステムの動作を Fig. 3.7 で比較する。ガス噴出量は 75 ml/min、風速は 20 cm/s とした。所要時間は同図 (a)、(b) それぞれ 569 秒、527 秒であった。従来アルゴリズムによる Fig. 3.7 (a) の軌跡は、開始地点付近で何度も (iii) 型方向転換が生じたため複雑である。これに対し、同図 (b) に示す改良後の軌跡は一度も迷わずに匂い源に向かっている。前節と本節で述べた改良により、ブルームを見失ってもその蛇行方向を判定することが可能になり、探知効率が向上したことが確認された。

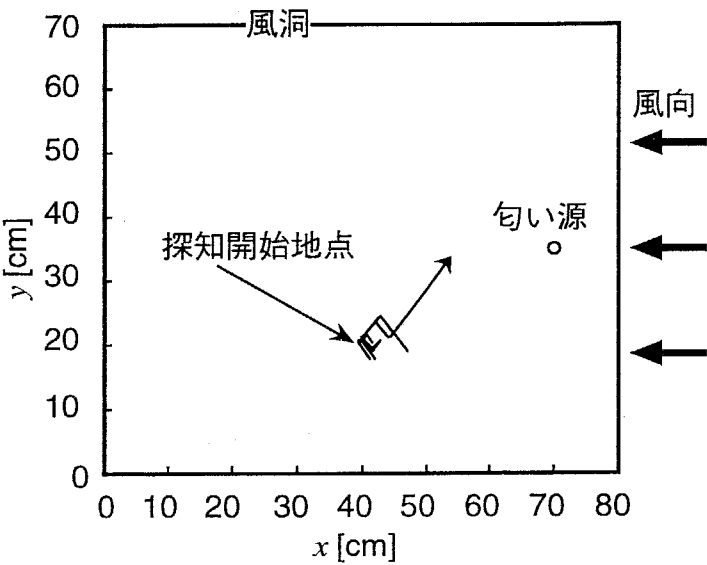
3.4.3 地図の導入による同一地点停留の防止

前節までの改良を全て加えても、Fig. 3.7 より更にブルームの外側の地点からは匂い源に到達できなかった。蛇行中心線から遠く離れた場所ではブルームが蛇行してくる時間が短く、Fig. 3.5 に示すガスセンサ応答のディップが小さい。ディップが観測されると台車が移動を始めるが、すぐにブルームが去ってしまい完全にガスが検出されなくなる。すると台車はフェーズ4のルールに従って探知開始地点に引き返してしまう。この結果、台車は途中まで探知して引き返すという動作を繰り返すばかりで、匂い源に到達できなかった。

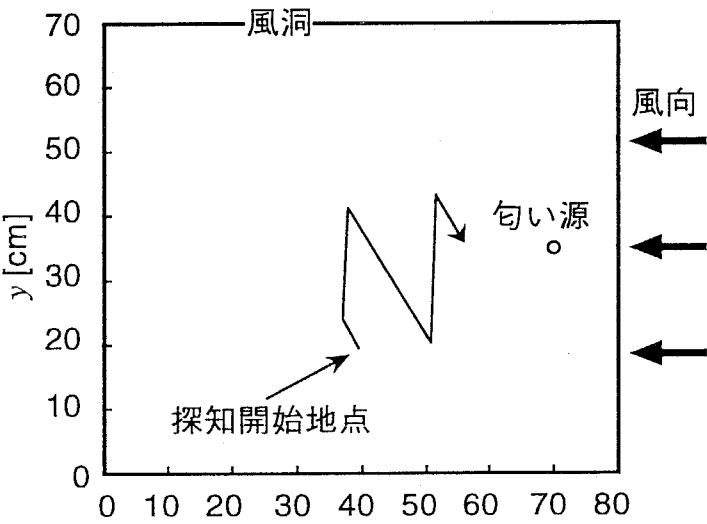
そこで、同じ場所に留まらずに徐々に探索範囲を広げるため、台車の軌跡を記憶する地図をシステムに導入した。まず、風洞全域を一辺 2 cm の正方形の格子に切った地図をコンピュータ内に用意する。台車の移動時には常に、現在位置を含む格子とこれを取り囲む八つの格子にマークを付けながら進む。この様子を Fig. 3.8 に示す。

この地図を用いて Table 3.8 のようにルールを変更し、マークのついた格子の中を再び通過する際にはブルームを見失っても後退しないようにした。これにより前回よりも必ず格子一つ分先まで探知を行うことになり、探索範囲は徐々に広がる。

地図の効果を確認する実験は、Fig. 3.9 のように風洞の天井を取り外し、側壁を高くした環境で行った。この変更により AC ファンを取り付けたテーパー部分の上からも風が吹き下ろすようになり、テーパー部分に近付くと風向が安定しない。Fig. 3.9 の風洞で Fig. 2.16 と同様の測定を行った結果を Fig. 3.10 に示す。Fig. 3.9 に示すように風が上から吹き下ろすので、ブルームは AC ファンに近付くにつれて下に向かい、匂い源と同じ高さで測定したガス濃度は低くなる。これは、匂い源から遠く離れ、ガスがほとんど到達しない地点に近い環境と考えられる。このため、元の風洞の状態に比べて匂い源探知は困難になる。また、風速は $x=8$ で 15 cm/s、 $x=56$ で 7 cm/s であった。このようにファンから遠ざか



(a) 従来アルゴリズムによる探知結果



(b) 改良アルゴリズムによる探知結果

Fig. 3.7 アルゴリズム改良の効果

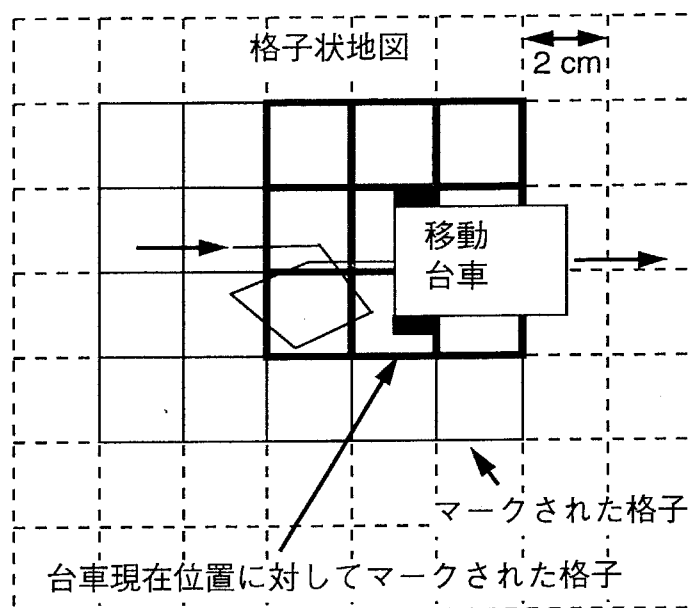


Fig. 3.8 地図へのマーク方法

るにつれて風が弱くなるため、風向判定の誤りも多くなる。

Fig. 3.9 の環境における探知結果を Fig. 3.11 に示す。同図では、ガス噴出量は 75 ml/min とし、探知開始地点をガス濃度の低い (20, 20) とした。このため、Table 3.5 から Table 3.7 までの改良ルールを全て組み込んだ場合でも、Fig. 3.11 (a) に示すように台車は前進・後退を繰り返し、2000 秒を過ぎても開始地点を離れなかった。

一方、地図を導入した Fig. 3.11 (b) の場合も初めは前進・後退を繰り返した。拡大図中の (1) ~ (10) の数字は、開始地点付近の台車の軌跡を時間の順に示したものである。拡大図に示すように、(7)、(9) と徐々に探索範囲を広げ、(10) によってプルームの蛇行中心線に到達した結果、匂い源に向かうことができた。風向の誤判定のため、蛇行中心線と逆に向かう軌跡 (1) ~ (6) が生じたが、探知をやり直す機能により最終的に匂い源に到達できた。所要時間は 2814 秒であった。

以上のように、地図を用いて探索範囲を徐々に広げることにより、ガス濃度が非常に低い場所からも探知が行えるようになった。

3.5 まとめ

本章では、ガスセンサと風速センサを用いた匂い源探知システムの構成を説明し、探知の基本アルゴリズムを検討した。

ステップバイステップ法とジグザグ接近法の 2 種類のアルゴリズムを考え、風洞実験によりその性能を比較したところ、ジグザグ接近法の方が低ガス濃度の地点からの探知能力が劣るという結果になった。そこで、ジグザグ接近法に関しては、プルーム方向への探知

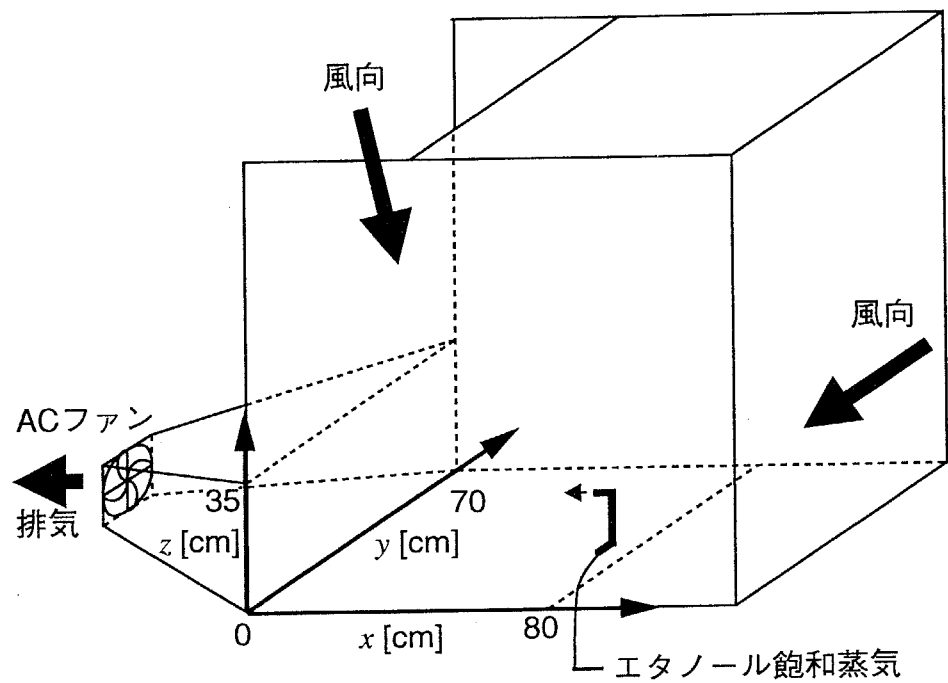


Fig. 3.9 天井を取り外した風洞

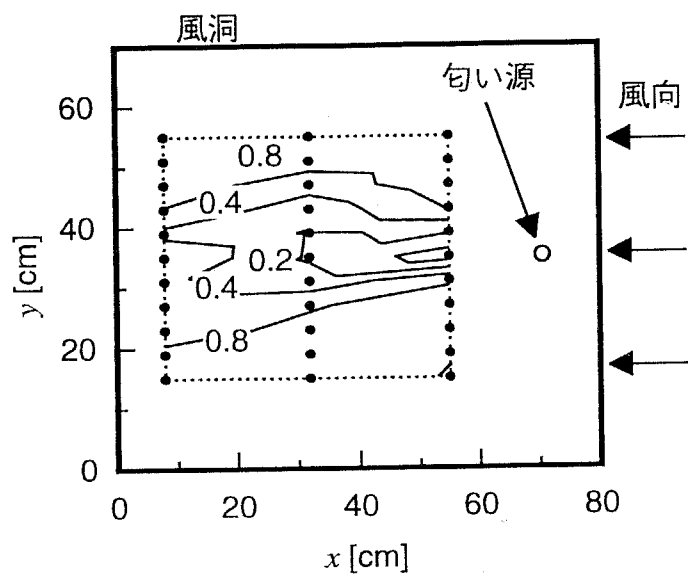
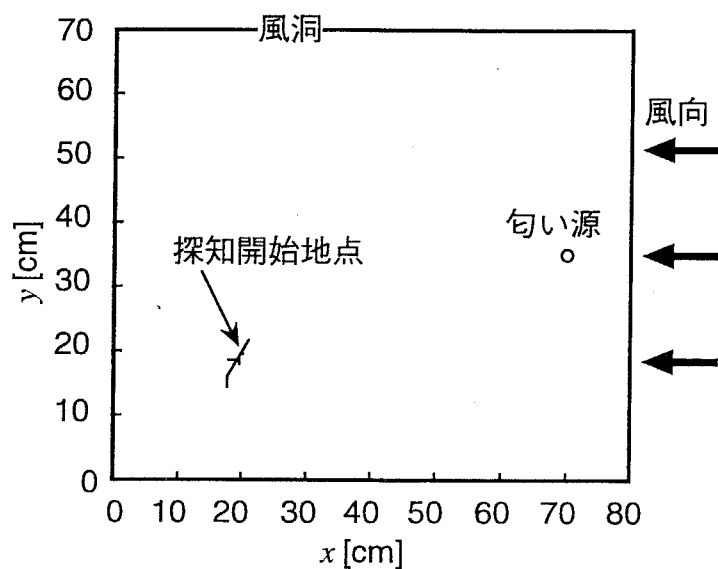
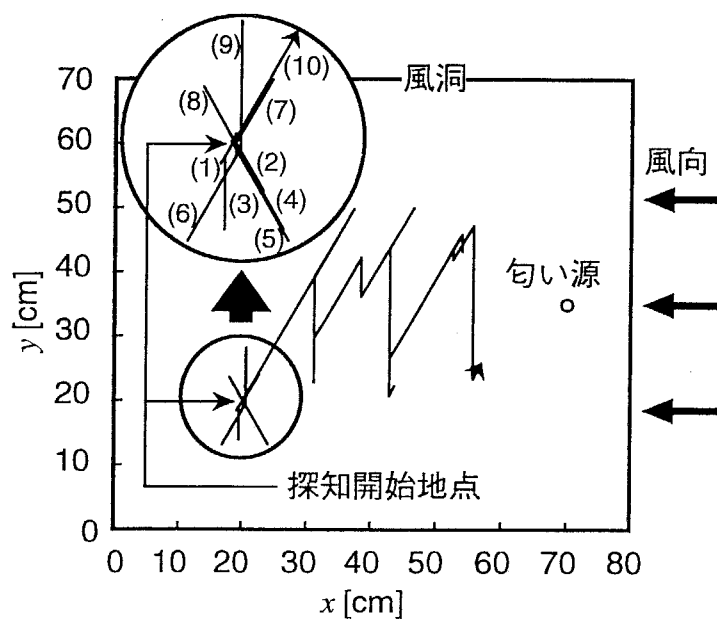


Fig. 3.10 天井を取り外した風洞におけるガス濃度分布



(a) 地図を用いない場合の探知結果



(b) 地図を用いた場合の探知結果

Fig. 3.11 地図の導入効果

開始、方向転換時のブルーム蛇行方向の判定、同一地点停留を防止する地図の導入の三つの改良を行った。これらの改良の結果、低ガス濃度時の探知能力は大きく向上した。

この三つの改良点のうち前二者は、風と垂直な方向のガスセンサ応答を比較してブルームの蛇行方向へ移動することを狙いとする。ステップバイステップ法では濃度勾配と風向を組み合わせた方向に台車を移動しており、これらの改良点はジグザグ接近法にステップバイステップ法の要素を加えたことを意味する。Bell らは文献 [10] において、初期のジグザグ接近法と同様の方向転換が生物にも見られると述べている。しかし本章で述べた実験結果は、濃度が低くなった際に無条件に方向転換するだけでは探知効率が悪いことを示している。

一方、探知のやり直し機能や地図に関しては、ステップバイステップ法の場合にも有用である。したがって、最善のアルゴリズムはステップバイステップ法とジグザグ接近法を統合したものとなる。すなわち、

1. ガスが検出されている間はステップバイステップ法と同様に、風と垂直方向の濃度勾配と風向を組み合わせた方向に進む。
2. ガスが検出されなくなった場合には、ガスが再び検出されるまで探知開始地点に向けて後退する。
3. 探知途中の軌跡を地図にマークし、探索範囲を徐々に広げる。

Table 1.3 に示したように、生物は濃度の時間変化、複数受容器間の受容濃度差、流れの方向の3種類の情報を探知行動に利用していると考えられている。上記の匂い源探知アルゴリズムは、これら全てを利用することが効率良い探知の実現に不可欠であることを示している。

また、本章で述べた探知アルゴリズムは、風洞の天井を取り外した環境でも有効であった。これは、風速場や濃度分布が3次元的な現実環境にもシステムが対応する可能性を示している。そこで、次章では、クリーンルーム内の現実環境へのシステムの適用を検討する。

Chapter 4

自走型探知システムの現実環境への適用

4.1 はじめに

本章では、ガスセンサと風速センサを搭載した自走型匂い源探知システムを現実的な環境に適用することを検討する。現実の環境には室内から屋外まで様々なものが考えられる。ここでは風洞実験の次のステップとして、「空調により一定強度の風が吹いている室内環境」に目標を絞り、クリーンルームで実験を行った。

第3章で述べた探知アルゴリズムは風向を重要視する。しかし、第2章で述べたように、このクリーンルームには複数の給気口があり、二つの給気口からの風が衝突する領域が存在する。予備的実験の結果、風が衝突する領域には同アルゴリズムを適用できず、状況に応じて探索アルゴリズムを切り替える必要があることが分かった。

そこで、このような適応性をシステムに付加することを検討する。視覚を用いたロボットの誘導の場合には、豊富な情報を利用して綿密な行動計画を立てることができる。しかし、触覚や嗅覚による誘導では、得られる情報が少ない場合にも何らかの行動を起こし、情報を集めることが必要となる。第1章で述べたように、このようなロボットを簡便に実現する手法として behavior-based ロボットが提案されている。Behavior-based ロボットでは、ロボットの行動を基本的な要素に分解し、状況に応じて条件反射的にそれらを切り替えることでロボットを環境に適応させる。本章ではこのような手法を用い、ガスセンサと風速センサによるロボットの誘導法を提案する。

4.2 探知システムの構成

第2章で説明したクリーンルームで探知実験を行うためには、探知システムに高い可搬性と自由な可動性が要求される。そこで、第3章で述べた自走型探知システムの構成を Fig. 4.1 のように変更した。まず、ホストコンピュータにノートブック型パソコンを用い、これと移動台車の間で無線通信できるようにした。台車上にはワンボードマイコンが搭載されており、これを用いてセンサ応答の取得とモータ制御を行う。移動台車は充電池駆動により連続2時間程度の使用が可能である。

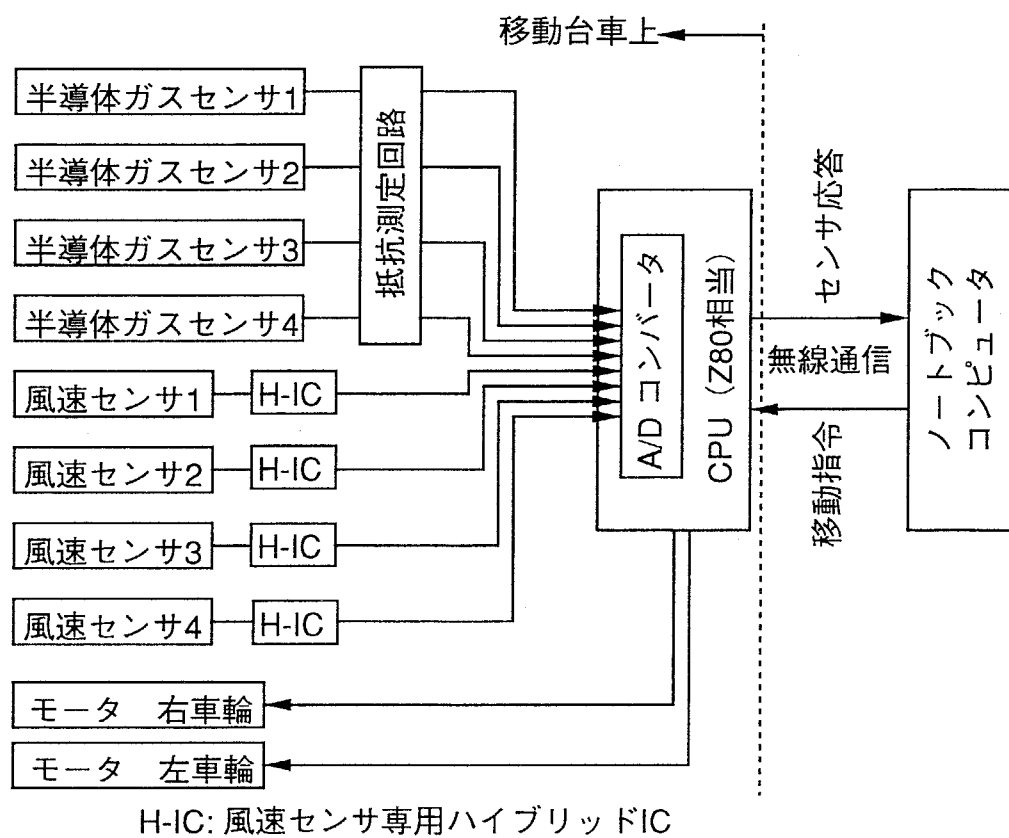


Fig. 4.1 自走型匂い源探知システムのシステム構成

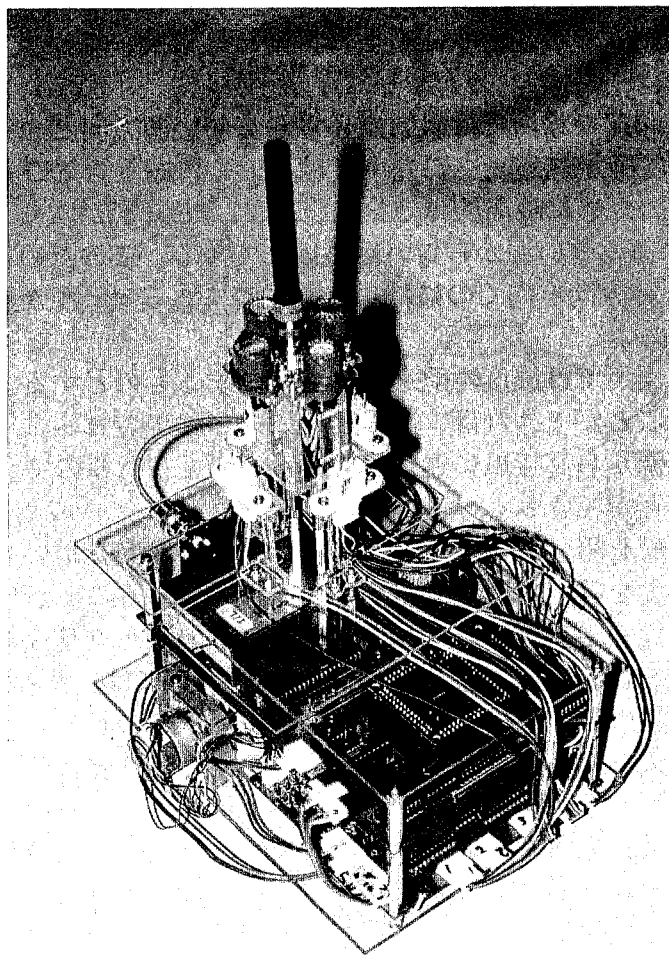


Fig. 4.2 自走型匂い源探知システム

製作したシステムの写真を Fig. 4.2 に示す。センサの配置や台車の移動方法は第3章で説明したシステムと同じであり、台車には4個のガスセンサと4個の風速センサが搭載される。

4.3 複数の風源に対応した探知アルゴリズム

第3章では、風洞実験を通じてステップバイステップ法とジグザグ接近法の統合アルゴリズムを提案した。このアルゴリズムは風と垂直な方向の濃度勾配と風向を組み合わせ、探知を行うため、ガスが検出されている間は常に風上方向へ台車が移動する。

初めに予備実験として統合アルゴリズムをシステムに組み込み、クリーンルームで匂い源探知実験を行った。この結果、風上方向へ移動するアルゴリズムでは実環境に十分に対応できないことが分かった。第2章の Fig. 2.18 に示すように、このクリーンルームでは二

つの給気口から風が吹き出す。匂い源の設置位置は、Fig. 2.17 の右下に示す給気口 A 付近としたが、このとき左側の給気口 B 付近でも希薄なガスが検出される。このため、給気口 B の付近から探知を開始すると、台車は風上に移動した結果、匂い源方向とは逆の給気口 B へ向かってしまった。

これは、ガス濃度が希薄な場所では風向が必ずしも匂い源方向と一致しないことを示している。Fig. 2.17 に示す実験スペースの左下では、近くにある給気口 B の方向から風が吹く。しかし、風の乱れのために瞬間的には給気口 A の方から風が吹くことがあり、このときに給気口 A の方向にある匂い源から匂いが運ばれてくる。このために、測定された風向が高い確率で給気口 B の方向を向くのに対し、逆方向にある匂い源からもわずかな匂いが運ばれてくることになる。

そこで、このような場所では濃度勾配を辿って移動するものとする。台車が移動した結果プルームを発見することができれば、高濃度のガスが検出されるようになる。このような高濃度のガスは匂い源から直接風に運ばれてくると考えられるので、プルームに入れば風向情報を利用することができる。

したがって、濃度勾配を用いたプルームの探索行動と、風向を用いてプルームを風上に辿る行動の 2 種類の行動を状況に応じて切り替える必要があることが分かる。そこで、以下に示す適応型匂い源探知アルゴリズムを提案する。このアルゴリズムではプルームの外と内で 2 種類の探索動作を切り替える。プルーム内外の判定には、ガス濃度のしきい値（すなわち、ガスセンサ応答のしきい値）を用いた。しかし、このしきい値は匂い源におけるガス濃度など、環境によって異なった値をとる。このため、状況に応じてしきい値を自動調節する機能を設けた。

また、予備実験の結果、探知途中に一時的にプルームを見失った場合に濃度勾配の方向を辿るだけでは、プルームを素早く再発見することができなかった。そこで、このような場合のために蛾の行動を模倣したプルーム探索機能を追加した。探知アルゴリズムは第 3 章で述べたジグザグ接近法と同様にルールで記述されており、Fig. 4.3 に示す五つのフェーズに分けられる。

4.3.1 フェーズ 1: 探知開始

探知開始時に適用するルールを Table 4.1 に示す。第 3 章と同様にガスセンサ i の応答を r_i と表し、 $i = 1, 2, 3, 4$ に対して r_i の最大値を $r_{\max}$ 、最小値を $r_{\min}$ とする。探知開始時には、4 個のガスセンサのいずれかがガスを検出するまで台車を静止して待つ。ガスを検知していないときのセンサ応答 r は 1 となるが、このベースラインは多少変動する。このようなドリフトの影響を避けるため、しきい値 $r_{\text{th2}} = 0.95$ を用いてガスの存在を判定した。

第 3 章で述べたように、ガス濃度が希薄な地点で探知を開始した場合、時折ガスセンサ応答にディップが観測される。そして、ディップの極小値部分でセンサ応答を比較することにより、探知開始方向を決定することができる。Table 4.1 ではこれを考慮し、センサ応答が極小値をとった時点でフェーズ 2 に移り、プルームの探索を開始するものとした。

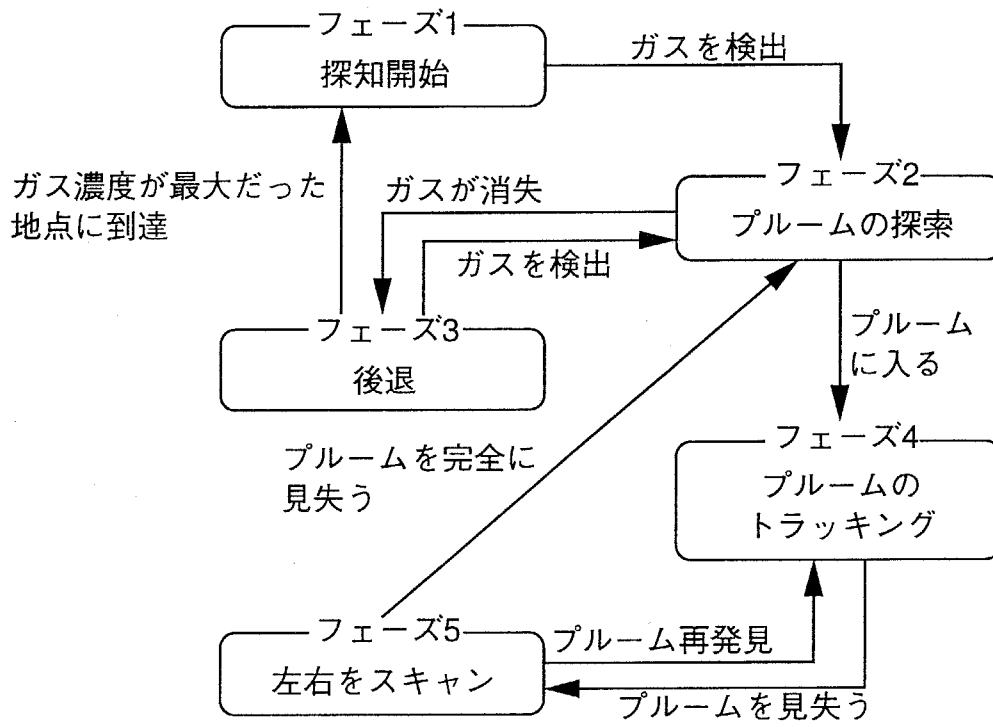


Fig. 4.3 探知アルゴリズム中のフェーズ

Table 4.1 フェーズ 1: 探知開始

ルール 1	If ($r_{\min} \leq r_{th2}$) and ($r_{\min}$ が上昇中) then (フェーズ 2 へ)
ルール 2	If (上のルールにマッチしない) then (1 秒間静止)

Table 4.2 フェーズ 2: プルームの探索

ルール 1	If (探索効率 $E < 0.2$) then ($r_{th1} = r_{max} + \Delta r$)
ルール 2	If ($r_{max} \leq r_{th1}$) then (フェーズ 4 へ)
ルール 3	If ($r_{min} > r_{th2}$) and (現在位置が地図にマークされていない) then (フェーズ 3 へ)
ルール 4	If (上のルールのいずれにもマッチしない) then (濃度勾配ベクトル g の方向へ方向転換し距離 d だけ前進)

4.3.2 フェーズ 2: プルームの探索

プルームの探索に用いるルールを Table 4.2 に示す。このフェーズでは濃度勾配を辿って移動することにより、プルームを探索する。風と垂直方向の濃度勾配は比較的急峻であるため、濃度勾配を辿ることにより台車はプルームの中心線に近付いていく。全てのガスセンサ応答がしきい値 r_{th1} 以下になったら、プルームに入ったと判断し、フェーズ 4 に移る。プルームを探索している途中でガスが検出されなくなり、全てのガスセンサ応答が r_{th2} よりも大きくなったら、探知をやり直すためフェーズ 3 に移る。

表中の濃度勾配ベクトル g は、Fig. 3.1 において対角線上に並ぶ 2 組のガスセンサの応答差を用い、

$$g = \begin{pmatrix} g_X \\ g_Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_3 - r_1 \\ r_4 - r_2 \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

と定義する。ただし、座標系 (X, Y) はプローブの中心を原点として台車とともに移動する座標系であり、 X 軸は台車前方を、 Y 軸は台車の左側を向く。第 2 章で述べたように、ガスセンサ応答の回復速度は非常に遅い。このため、台車の移動速度が速すぎると、場所による勾配方向の変化にセンサ応答が追従しない。これは台車の方向転換時も同様である。このセンサの遅れを考慮して台車の移動速度を 1 cm/s と遅くし、1 回の濃度勾配判定で進む距離 d を 10 cm とした。したがって、台車が g の方向に方向転換した後 10 秒間は直進することになり、この間にセンサ応答の追従を待つ。

Table 4.2 ではプルームに入ったことを判定するためにしきい値 r_{th1} を用いるが、この最適値は環境によって異なる。もし、 r_{th1} を必要以上に小さな値にしてしまうと、台車が実際のプルームに入ってもフェーズが切り替わらない。この場合、プルーム内では風と平行な方向の濃度勾配が小さいため、台車はプルーム中心部でさまよってしまう。しかし、この状態でプルームを辿るアルゴリズムが正しく適用されれば、台車を匂い源に向かわせることができる。このため、しきい値を環境に合わせた最適値に調節することが必要である。

そこで、台車がさまよっている状態を検出するため、次式の探索効率 E を導入した。

$$E = \frac{P_0 P_{59}}{\sum_{i=0}^{58} P_i P_{i+1}} \quad (4.2)$$

ただし、 P_i は現時刻から i 秒前の台車位置を表す。式 (4.2) の分母は、過去 60 秒間における台車の移動距離を表し、分子は P_0 から P_{59} まで移動するための最短距離を表す。した

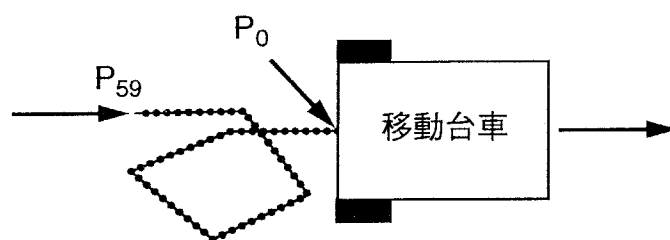


Fig. 4.4 探索効率の低い軌跡例

がって、台車が同じ場所をさまよい、その軌跡が Fig. 4.4 の用にループを描くと、 E は小さな値になる。Table 4.2 では、 E が 0.2 より小さくなったときにしきい値 r_{th1} を

$$r_{th1} = r_{max} + \Delta r \quad (4.3)$$

と変更する。この 0.2 という値は、数回実験を行って決定した。式 (4.3) によって、全てのガスセンサ応答が r_{th1} より小さくなるように r_{th1} が変更されるので、ルール 2 に従ってフェーズの切り替えが行われる。ここでは $\Delta r = 0.02$ とした。この値は、センサ応答の雑音、変動レベルを考慮して決めた。

また、フェーズの切替後 59 秒間は式 (4.2) の計算に過去のフェーズの軌跡データが混入するので、新しいフェーズのみの探索効率を求めることができない。そこで、この間はしきい値の自動調節を行わないものとした。

4.3.3 フェーズ 3: 後退

風の乱れにより濃度分布が不規則に揺らぐため、匂い源探知の途中でガスが検出されなくなることがある。濃度勾配や風向の判定を誤った場合も同様である。このような場合は、探知をやり直すために台車を後退させる。

このとき適用するルールを Table 4.3 に示す。台車を後退させる際は、来た経路を辿って過去最高濃度のガスを検出した地点まで引き返すものとした。この地点で待っていれば、再び漂ってきたガスを検出できる確率が最も高いと考えられる。そこで、この地点に到達したらフェーズ 1「探知開始」に切り替える。また、後退する途中でガスを検出した場合には、即座にフェーズ 2「プルームの探索」に切り替え、探知を再開する。

また、第 3 章で説明した同一地点停留防止用の地図を本アルゴリズムでも使用した。地図中の格子間隔は 10 cm とし、第 3 章の実験と同様に台車の軌跡を地図上にマークしながら探知を行う。Table 4.2 のルール 3 のように、過去に一度通ったことのある場所を再び通過する際はガスが消失しても台車を後退させない。これによって、探索範囲を徐々に広げる。

4.3.4 フェーズ 4: プルームのトラッキング

ガス濃度が十分に高い場合には、その地点の風上に匂い源が存在すると考えられる。したがって、風上にプルームを辿るアルゴリズムが有効である。

Table 4.3 フェーズ 3: 後退

ルール 1	If ($r_{\max} \leq r_{th2}$) then (フェーズ 2 へ)
ルール 2	If (ガスセンサの応答が過去最小だった地点まで後退) then (フェーズ 1 へ)
ルール 3	If (上のルールのいずれにもマッチしない) then (1 cm 後退)

Table 4.4 フェーズ 4: プルームのトラッキング

ルール 1	If (探索効率 $E < 0.2$) then ($r_{th1} = r_{\min} - \Delta r$)
ルール 2	If ($r_{\min} > r_{th1}$) then (フェーズ 5 へ)
ルール 3	If (上のルールのいずれにもマッチしない) then (風上から一定角度の方向へ方向転換し距離 d だけ前進)

プルームを辿るためのルールを Table 4.4 に示す。ここでは、第 3 章で述べたステップバイステップ法やジグザグ接近法のように、風上から一定角度の方向へ台車を移動させるものとした。風上からの角度を α 、 $-\alpha$ ($\alpha > 0$) のどちらにするかは、風と垂直方向の濃度勾配により決定する。これによって台車はプルームの中心線付近をジグザグに移動する。

このフェーズでは、風速センサで判定した風向の信頼性が重要であり、風向判定を誤るとプルームを辿ることができない。第 2 章で述べたように、風洞環境に比べてクリーンルーム環境の方が風の乱れが大きい。そこで、式 (2.14) に示す風向ベクトル $\mathbf{w}$ を過去 5 秒間にわたって足し合わせ、この和ベクトル $\mathbf{w}_{\text{sum}}$ の方向を風向として利用した。このようにすると $\mathbf{w}_{\text{sum}}$ の方向は過去 5 秒間の平均的な風向を表す。また、風向が安定しているほど過去 5 秒間の $\mathbf{w}$ は似通った方向を向くので、 $\mathbf{w}_{\text{sum}}$ の長さが長くなる。そこで、 $\mathbf{w}_{\text{sum}}$ の長さを風向の信頼性を表す指標として用いる。以降の実験では $|\mathbf{w}_{\text{sum}}| \geq 3$ のときのみ風向を使用可能とした。使用不可能の時は台車をそのまま直進させる。

また、Table 4.4 ではしきい値 r_{th1} を用いて台車がプルームから出たことを判定し、フェーズをプルームの再発見モード (フェーズ 5: スキャン) に切り替える。このときのしきい値を自動調節するため、ルール 1 を設けた。風向が不安定な場合などに台車が同じ場所をさまよいつつ始めたら、ルール 1 に従ってしきい値を変更する。この結果、全てのガスセンサ応答が r_{th1} より大きくなるので、ルール 2 に従ってフェーズの切り替えが行われる。

4.3.5 フェーズ 5: スキャン

第 1 章で述べたように、蛾は匂い源探知途中でプルームを見失うと、左右を行き来してプルームを探す。フェーズ 5 では、このような左右方向のスキャンを行うことによりプルームを探索する。

適用するルールを Table 4.5 に示す。フェーズ 5 に動作が切り替わるとルール 4 が適用さ

Table 4.5 フェーズ 5: スキャン

ルール 1	If ($r_{\max} \leq r_{\text{th1}}$) then (フェーズ 4 へ)
ルール 2	If (左右 2 回ずつスキャンを行った) then (フェーズ 2 へ)
ルール 3	If (現在位置が地図にマークされていない) then (進行方向を 180° 反転する)
ルール 4	If (上のルールのいずれにもマッチしない) then (進行方向と風上となす角度が 90° となるように方向転換し距離 d だけ前進)

れ、台車は風上から 90° 方向へ進む。地図上にマークがない領域に出たら進行方向を 180° 反転することによって、台車は左右を交互に探索する。また、先述のように地図の利用により、同方向への探索は徐々にその範囲が広がる。探索の途中でプルームを再発見した場合にはフェーズ 4 に戻り、プルームを辿って匂い源に向かう。左右を 2 回ずつスキャンしてもプルームが発見されなかった場合には、プルームを完全に見失ったと判断し、濃度勾配によるプルーム探索にフェーズを切り替える。

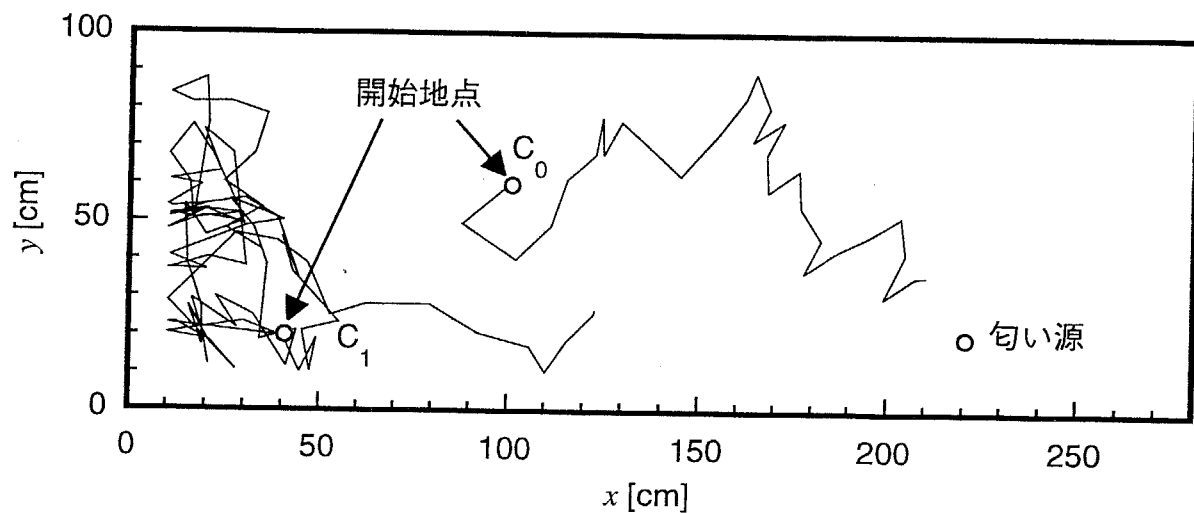
4.4 匂い源探知実験の結果

4.4.1 フェーズ切り替えの効果

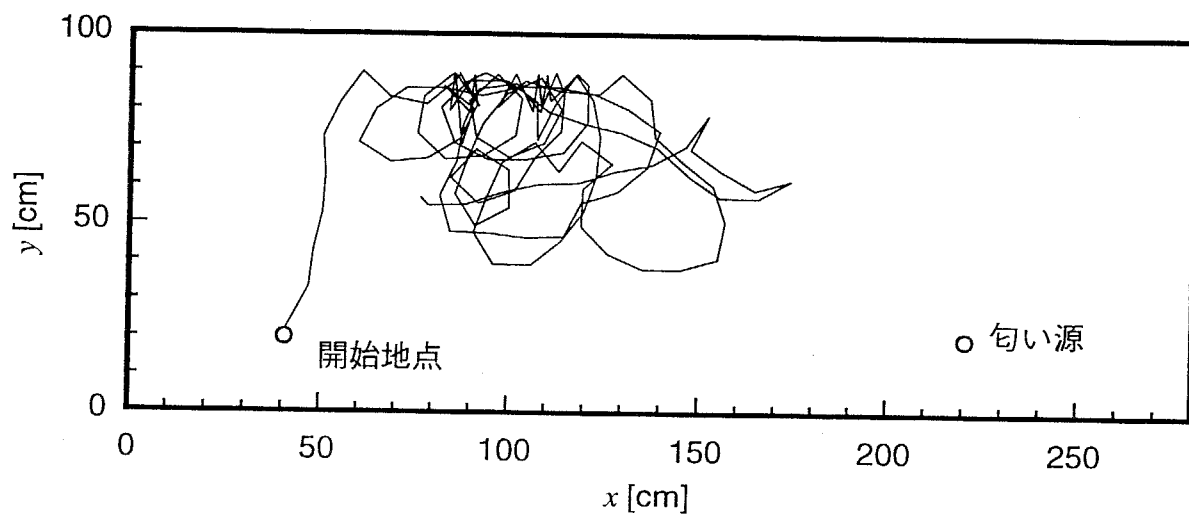
初めに、前節で述べた探知アルゴリズムの一部のみを用いて予備的実験を行った。風上方向にプルームを辿るフェーズ 4 のみを用いて匂い源探知を行った結果を Fig. 4.5 (a) に示す。風上を基準としたときの台車進行方向を表す角度定数 α は、ここでは 60° とした。また、匂い源からのエタノールガス噴出量はこれまでの実験と同様に 75 ml/min とした。図中の点 C_0 は、Fig. 2.19 に示すプルームの中央付近にあたる。この点から探知を開始すると、台車は容易に匂い源に向かった。しかし、点 C_1 から探知を開始すると、台車は匂い源に到達しなかった。これは、図の左下にある給気口 B から風が吹いているためであり、台車はこの方向へ向かってしまった。

一方、Fig. 4.5 (b) は、濃度勾配を辿ってプルームを探索するフェーズ 2 のみを用いて探知を行った場合の結果である。同図では給気口 B の影響が強い地点から探知を開始したが、濃度勾配を辿ることによってプルーム中心部まで移動することに成功している。しかし、プルーム中心部でさまようばかりで匂い源に到達することはできなかった。これは、プルーム中心部で風と平行な方向の濃度勾配が小さいためである。

以上の結果のように、フェーズ 2 と 4 を単独に用いた場合は匂い源に到達できない。そこで、次にガスセンサ応答のしきい値を用いて両者を切り替える機能を組み込んだ。この結果を Fig. 4.6 に示す。まず同図 (a) では、フェーズ 2 と 4 を切り替えるしきい値 r_{th1} を実験的に求めた最適値 0.88 に固定して実験を行った。Fig. 4.6 では、太線がフェーズ 2 における台車移動軌跡を表し、細線がフェーズ 4 における軌跡を示す。台車は初め濃度勾配



(a) 風向を利用して移動



(b) 濃度勾配を辿って移動

Fig. 4.5 探知アルゴリズムの一部のみを用いた予備実験

を辿って移動し、正しくプルームに入ることができた。その後、フェーズの切り替えが起こり、風上にプルームを辿ることによって匂い源に到達できた。

しかし、しきい値 r_{th1} が適切でない場合には匂い源を探知することができない。Fig. 4.6 (b) ではしきい値を 0.88 にしたまま、噴出するエタノールガスの濃度を飽和蒸気の 1/3 に減らした。この操作によりプルーム内のガス濃度が低くなるため、台車がプルームに入ってもガスセンサ応答がしきい値 0.88 を下回らない。したがって、フェーズの切り替えが起こらないので、台車は匂い源に到達できなかった。

これらの結果は、環境に応じてしきい値を自動調節する機能の必要性を示している。そこで、Fig. 4.6 (c) ではしきい値 r_{th1} の自動調節機能を組み込んだ。実験条件は同図 (b) と等しい。また、この実験ではしきい値の自動調節機能の働きの観察できるように、 r_{th1} の初期値を 0 とした。プルームに入ると台車はさまよい始め、Fig. 4.6 (c) 中の領域 D 内で台車の軌跡がループを描いた。この結果、式 (4.2) の探索効率 E が 0.2 より小さくなり、しきい値の自動調節が行われた。調節後のしきい値は 0.91 であり、この値によってフェーズが切り替えられた結果、台車は匂い源に到達した。この値は飽和蒸気を噴出した場合の最適値 0.88 に近いが、この辺りの濃度ではしきい値変化が探知結果に敏感に影響する。

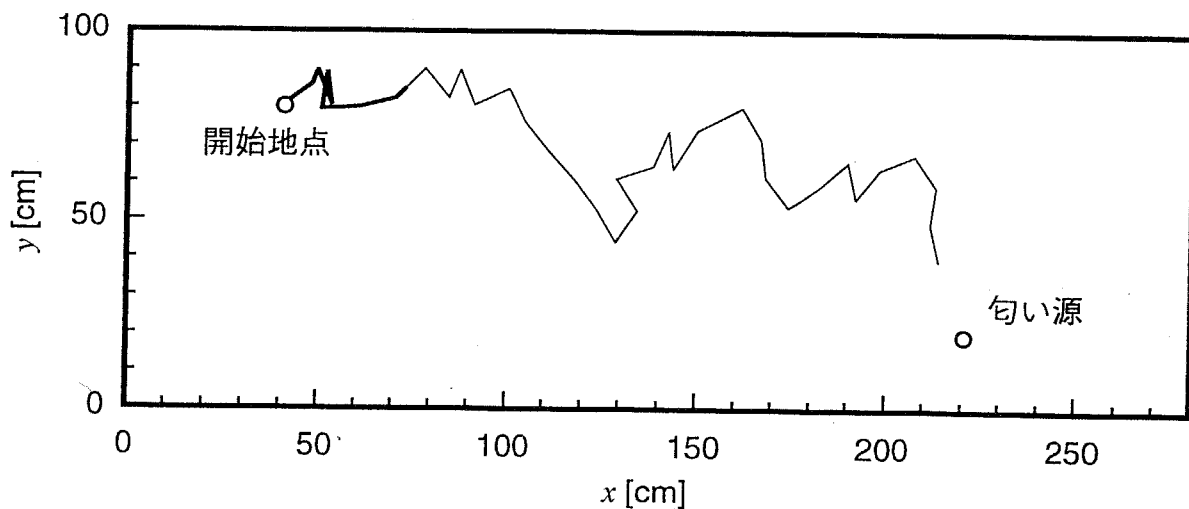
4.4.2 風と垂直方向のスキャンの効果

本章で提案する探知アルゴリズムのもう一つの改良点は、フェーズ 5 のスキャン動作によるプルームの探索機能である。この機能の効果を Fig. 4.7 に示す。同図 (a) は、フェーズ 5 によるスキャン動作を用いずに探知を行った場合の結果である。同図では噴出するエタノールガス濃度を飽和蒸気の 1/3 に減らしており、探知中に観測されるガス濃度が低い。このため、図中の点 F のように濃度勾配の判定を誤り、台車がプルームの外へ出てしまうことが多い。このとき、プルーム再発見のためにフェーズ 2 を適用したところ、台車は開始地点の方向へ戻ってしまった。これは、この付近の濃度勾配が Fig. 2.19 に示すように、風下に向いているためである。

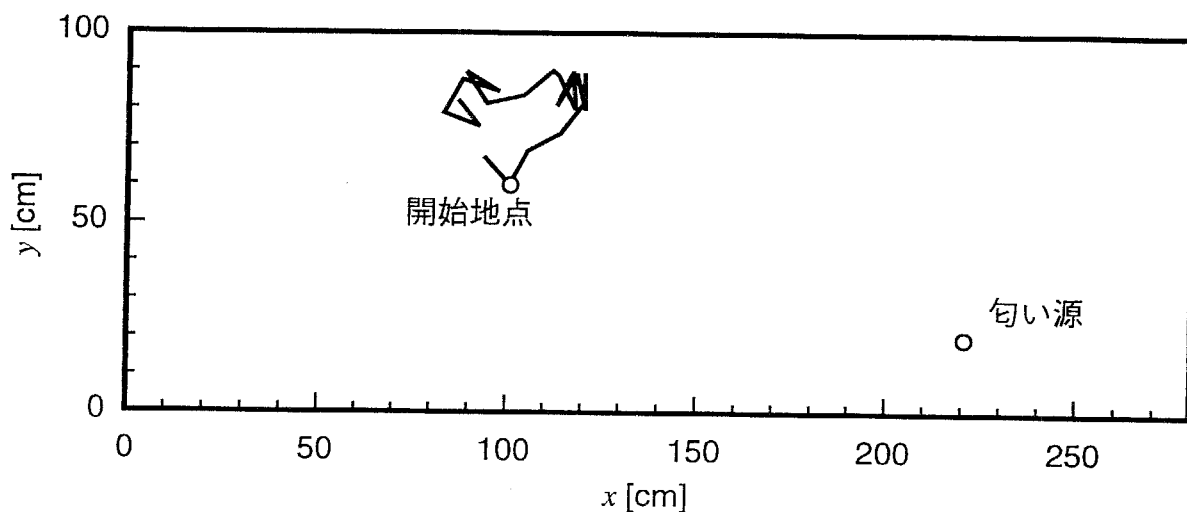
これに対し、フェーズ 5 のスキャン動作を用いた場合の探知結果を Fig. 4.7 (b) に示す。図中の破線がフェーズ 5 における台車移動軌跡を表す。また、これまでの図と同様に太線と細線がそれぞれフェーズ 2 と 4 の軌跡を表す。実験条件は同図 (a) と等しく、この場合も台車は点 H においてプルームから外へ出てしまった。しかし、フェーズ 5 を適用したところ台車は風と垂直方向に移動し、破線の軌跡のように素早くプルームに戻った。したがって、一時的にプルームを見失った場合にスキャン動作が有効であることが分かる。

以上のように、台車がプルームから出てしまうことがあるのは、応答の遅いセンサを用いて幅の狭いプルームを辿ろうとしているからである。Fig. 4.8 では、風上を基準とした台車の進路 α をこれまでの 60° から 30° に変更した。この結果、風と垂直方向の台車移動速度が遅くなり、センサ応答が台車移動に追従しやすくなる。このため、台車は一度もプルームから出ることなく、匂い源に到達した。しかし、 $\alpha = 30^\circ$ とした場合でも、プルーム幅の環境による変化に対応するためにフェーズ 5 を組み込むことが望ましい。

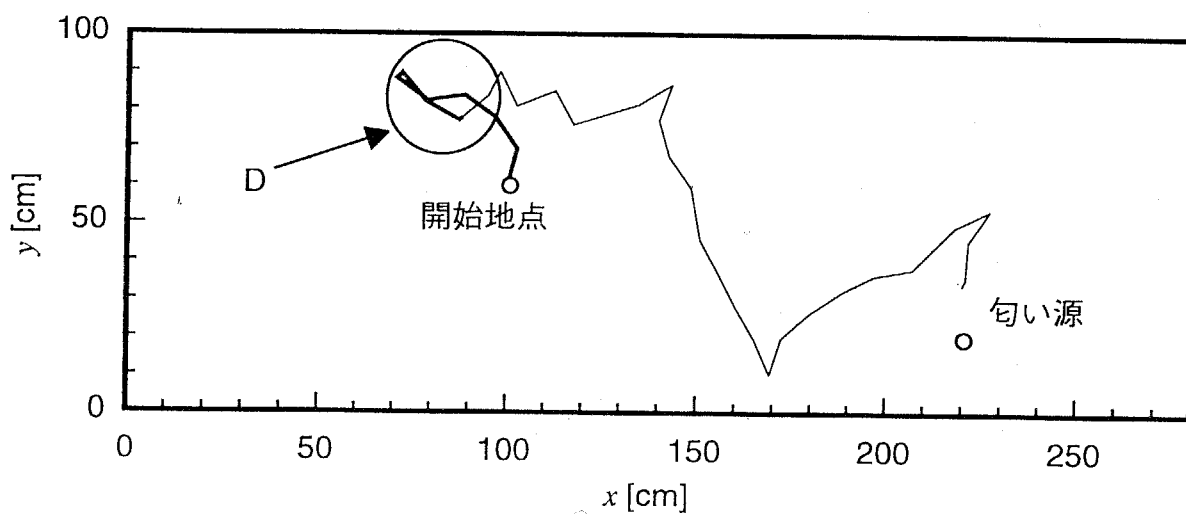
また、Fig. 4.8 には、地図の効果も現れている。第 3 章に示したように、同方向への探索は地図の利用により徐々に広がる。Fig. 4.8 では初め軌跡 J 上を台車が移動したが、途中



(a) しきい値を最適値に固定した場合 (探知時間595秒)

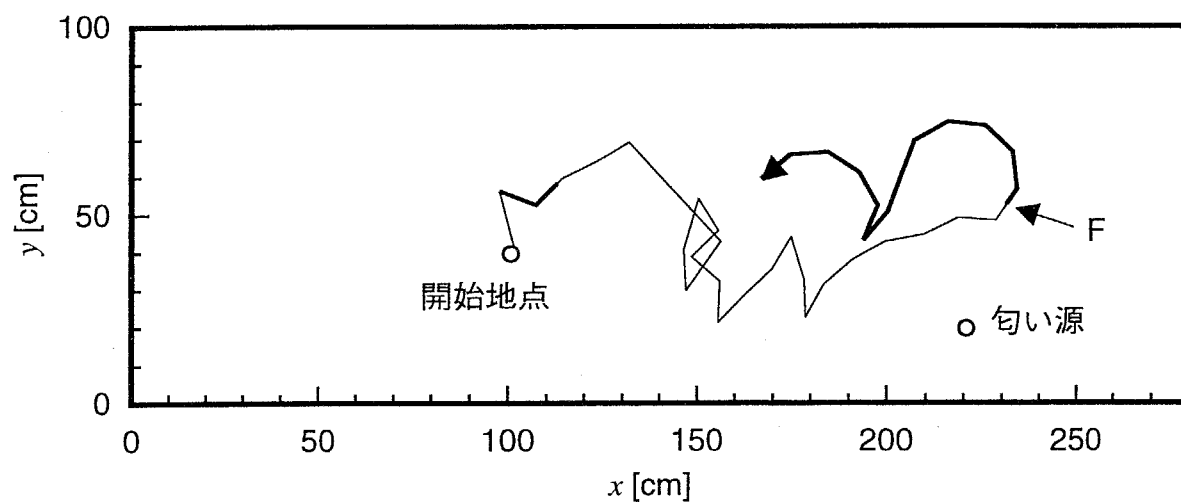


(b) しきい値が適切でない場合

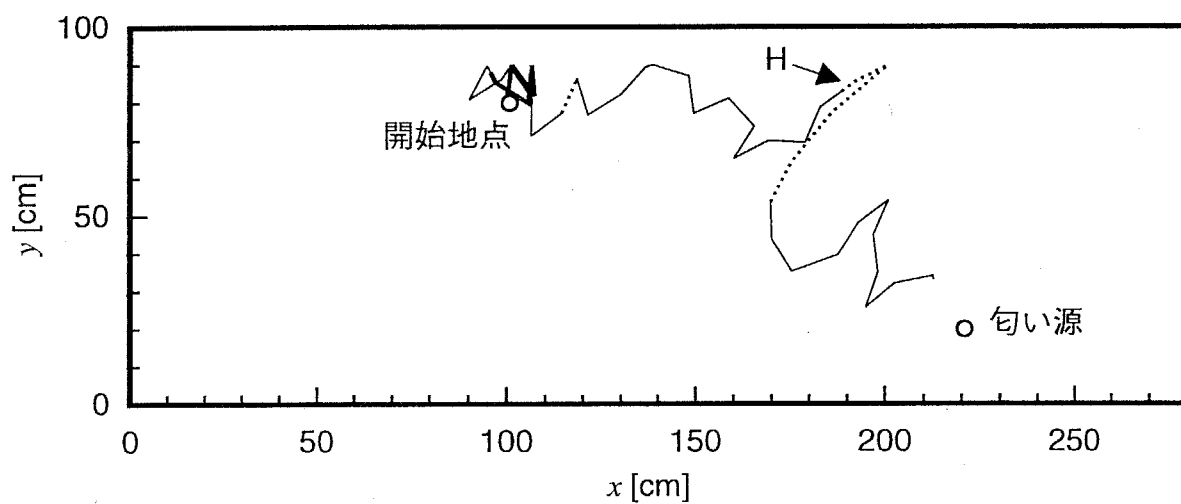


(c) しきい値を自動調節した場合 (探知時間399秒)

Fig. 4.6 しきい値を用いたフェーズの切り替え



(a) スキャン動作によるプルーム探索を用いない場合



(b) 全フェーズを用いた場合 (探知時間503秒)

Fig. 4.7 風と垂直方向のスキャン動作

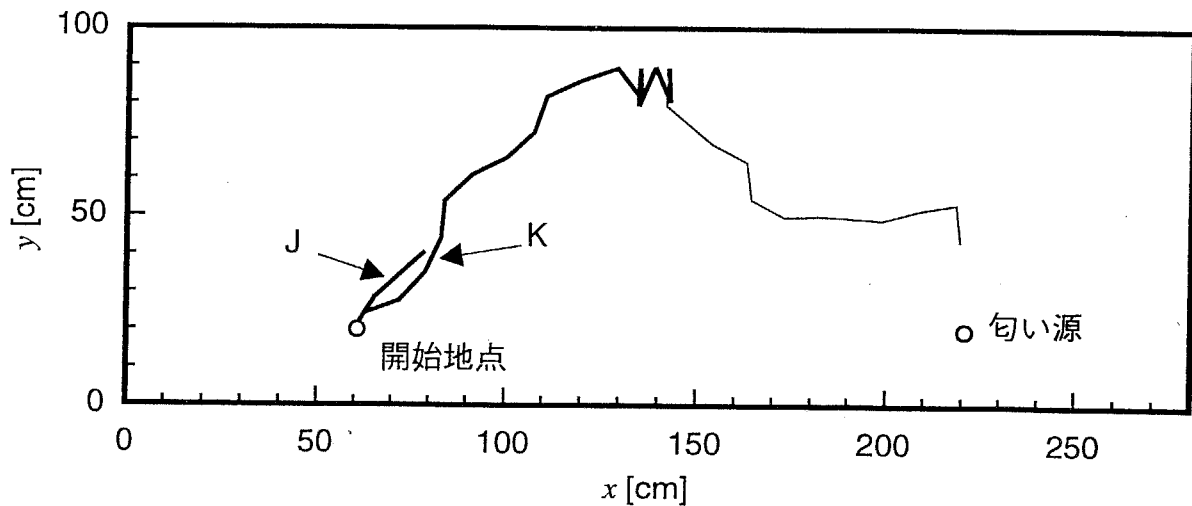


Fig. 4.8 台車進行方向を風上より ($\alpha: 60^\circ \rightarrow 30^\circ$) に変更した場合 (探知時間 804 秒)

でガスが検出されなくなった。このため、台車は探知開始点に向けて一度引き返し、二度目の軌跡 K によってプルームまで到達することができた。

Fig. 4.8 の探知中に得られたガスセンサの応答を Fig. 4.9 に示す。探知開始地点のガス濃度は非常に低いが、プルームに入ると高濃度のガスが検出されている。このため、従来の固定式ガス漏れ警報器では設置場所を注意深く選ばないと、このような高濃度のガスの存在を検知できない危険性がある。したがって、本システムのような自走型アクティブセンシングシステムが有効であることが分かる。

4.5 まとめ

本章では、実環境における匂い源探知を実現するための適応型探知アルゴリズムを提案し、その有効性をクリーンルームにおける実験により確かめた。提案した探知アルゴリズムは、三つの探索動作を状況に応じて切り替えることで環境の変化に適応する。

一つめは、濃度勾配を利用したプルームの探索動作であり、これはガス濃度の低い場所からプルームを探索するのに有効である。このような場所では匂い源の方向からの風とそれ以外の方向からの風が混在している可能性があり、風向情報は信頼できない。二つめは、発見したプルームを風上に辿る動作である。プルームに入り、高い濃度のガスが検出されれば、その場所の風上に匂い源があると考えられる。従って、この場合は風向情報が有効となる。三つめは、風と垂直に左右をスキャンしてプルームを探す動作である。この動作は、プルームを辿っている途中で一時的にプルームを見失った場合に有効である。

これらの動作の切り替えは、ガスセンサ応答のしきい値を用いて行う。このとき、システムが順調に探索を進めているかどうかを常にチェックしておき、ある動作の探索効率が低下した場合にはしきい値を調節して他の動作に切り替えを行う。これによって、未知環

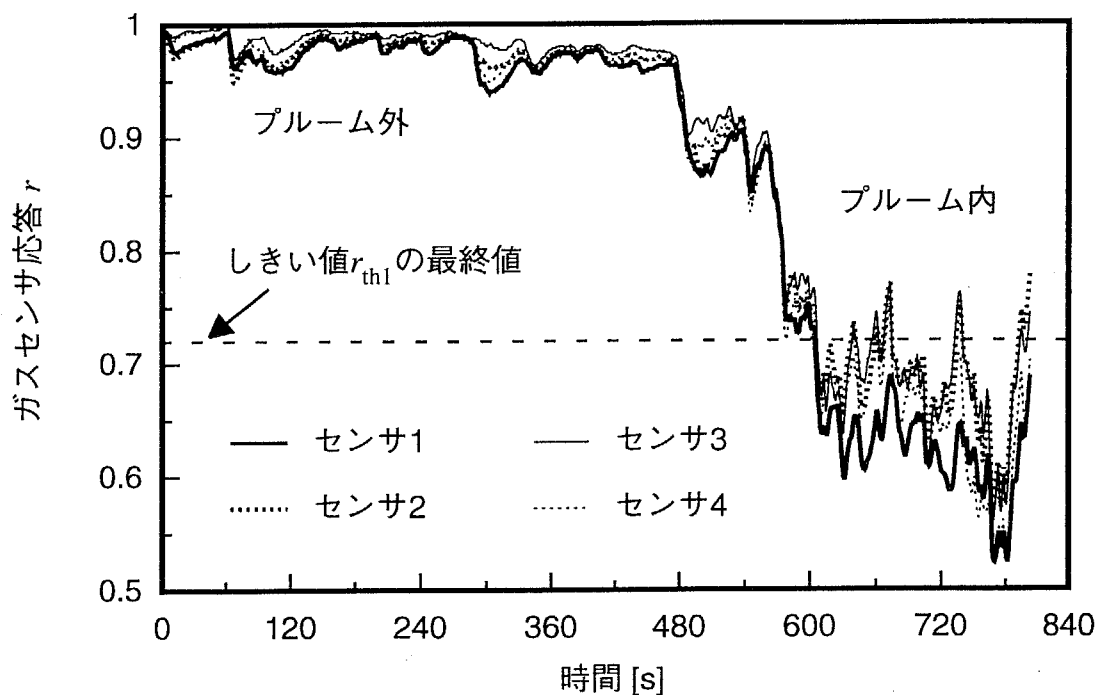


Fig. 4.9 匂い源探知動作中のガスセンサ応答

境下でもしきい値の自動調節が可能となった。以上の改良により、クリーンルームに設けた実験スペース内のほぼ全域から匂い源に到達できるようになった。

しかし、匂い源探知システムの実用化に向けて残された課題は多い。最も大きな問題はシステムの動作速度が遅いことである。本研究で用いたガスセンサは、高感度であるが回復が遅い。このため、システムの動作速度がガスセンサに律速されており、2 m 離れた匂い源の探知に 600 秒を要する。Russell らの匂い源探知ロボットの場合も同様の問題がある [91]。

この問題の解決策として、ガスセンサ応答の信号処理により、遅いガスセンサ応答から元の素早い濃度変化を引き出すことが考えられる。本論文の範囲外なので詳細は省略するが本研究では、本研究で用いたガスセンサの応答に低感度だが高回復速度であるセンサの応答を融合し、回復速度を向上するフィルタを構築する方法を開発した [113]。これにより、本章で述べた探知アルゴリズムを用いて約 3 倍の探知速度向上が得られた。

もう一つの解決策として、ガスセンサ応答の遅れをモデル化し、時系列データを利用することが考えられる。そこで、次章では Fig. 4.9 のようなセンサ応答の時系列を利用した匂い源位置の予測法を説明する。

Chapter 5

自走型探知システムによる 匂い源のリモートセンシング

5.1 はじめに

第4章では、適応型探知アルゴリズムにより自走型匂い源探知システムを現実環境に対応させた。しかし、ガスセンサの大きな応答遅れのため、システムの動作速度が遅いという問題があった。

本章ではその解決策の一つとして、遠方から匂い源位置を予測することを提案する。第4章で述べたように、自走システムが匂い源に近づくにつれて高濃度のガスが検出されるようになり、ガスセンサ応答 r は次第に減少する。これはシステムの移動に伴い、環境内のガス濃度分布に応じたセンサ応答が観測されるためである。このガスセンサ応答の時系列データから環境内のガス濃度分布を再構成することができれば、その分布形状から匂い源位置を予測することが可能になる。このとき、ガスセンサの応答に遅れがあることに注意する必要がある。この応答遅れのために、応答変化はシステムの移動に完全には追従しない。

そこで、センサ応答時系列のモデル化を検討した。第2章で述べたように、匂い源近傍のプルーム形状はロバートのプルームモデルで近似することができるので、これをガス濃度分布のモデルとして使用した。一方、ガスセンサの応答遅れは1次遅れ系でモデル化した。この二つのモデルを組み合わせることによって、センサ応答時系列のモデルが得られる。これを実際に観測されたセンサ応答時系列にカーブフィットすれば、環境内のガス濃度分布が得られる。カーブフィットにはオンライン推定アルゴリズムである拡張カルマンフィルタを用いた。

本章では、初めにセンサ応答モデルを説明し、その有効性を確かめる予備実験の結果を示す。次に、カルマンフィルタを用いた匂い源位置のオンライン推定法について述べ、匂い源位置予測を利用した探知結果を示す。

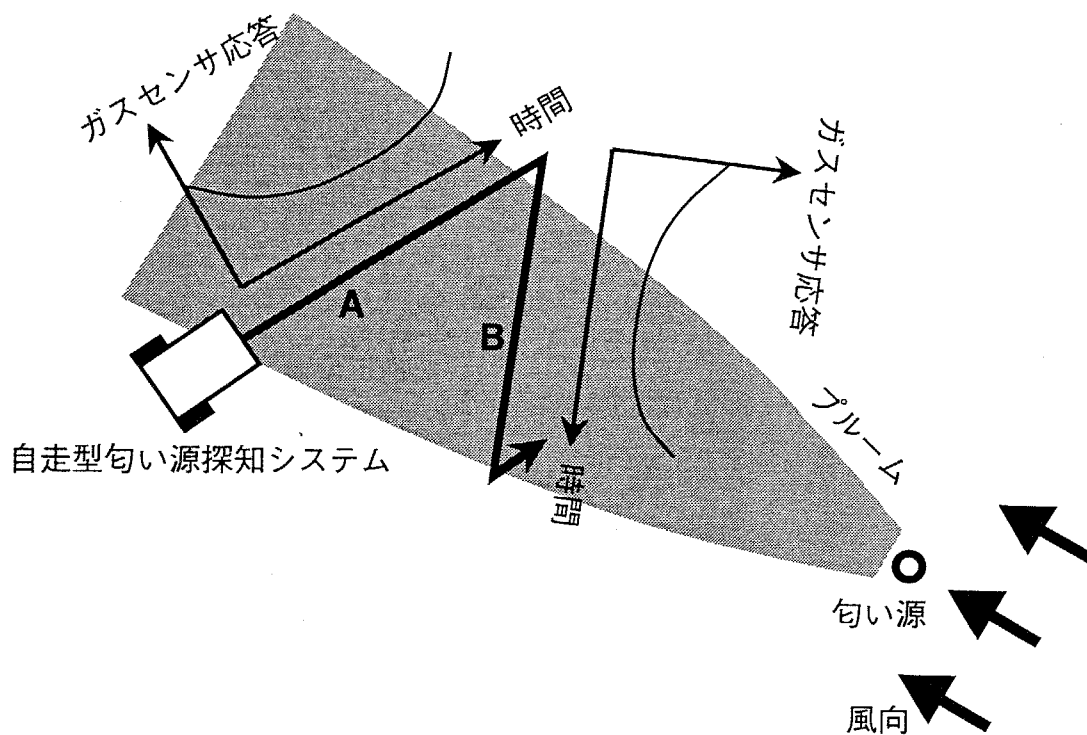


Fig. 5.1 ガスセンサ応答の時系列による匂い濃度分布推定の概念図

5.2 匂い源位置の推定アルゴリズム

ガスセンサ応答の時系列データを用いた匂い濃度分布推定の概念を Fig. 5.1 に示す。同図に示すように、自走システムの移動台車がプルームの中を移動すれば、ガス濃度分布に応じてセンサ応答が変化する。このような測定を図中の A、B と繰り返せば、得られたガスセンサの応答時系列にプルームのモデル式をカーブフィットすることができる。これによって、環境内全域のガス濃度分布を推定し、匂い源位置を遠方から予測する。基本的に風速センサから得られる風向は推定濃度分布の初期値を決めるために用い、匂い源位置の予測による探知中は使用していない。以下に、そのアルゴリズムを説明する。

5.2.1 ガスセンサの応答時系列のモデル化

ガスセンサの応答時系列は、(1) ガス濃度分布のモデル化、(2) ガス濃度からセンサ応答への変換、(3) センサ応答ダイナミクスモデル化の三つのステップによりモデル化される。

(1) 環境内のガス濃度分布のモデル化

ここでは、一様な風の流れの中で、匂い源が床に置かれた場合を仮定する。このとき、ガス濃度の時間平均値の分布は第2章で述べたロバートのプルームモデルで表すことができる。

環境の中に座標系 (x, y) を考え、匂い源位置を (x_s, y_s) 、風上方向を θ とする。ただし、角度は x 軸の正方向を 0° とし、左回りを正とする。このとき点 (x, y) における時間平均濃度 $\bar{C}(x, y)$ は式 (2.30) を座標変換することによって求めることができ、

$$\begin{aligned}\bar{C}(x, y) &= \frac{2q}{4\pi K} \frac{1}{d} \exp\left[-\frac{U}{2K}(d - \Delta x)\right] \\ &= p_1 \frac{1}{d} \exp[-p_2(d - \Delta x)]\end{aligned}\quad (5.1)$$

ただし、

$$d = \sqrt{(x_s - x)^2 + (y_s - y)^2} \quad (5.2)$$

$$\Delta x = (x_s - x) \cos \theta + (y_s - y) \sin \theta \quad (5.3)$$

となる。ここで、 q はガス噴出量、 K は乱流拡散係数、 U は風速である。

上式中の匂い源座標 (x_s, y_s) 、風向 θ およびパラメータ $p_1 = 2q/4\pi K$ 、 $p_2 = U/2K$ の五つの値は、環境によって異なる値をとる。逆に、これらの値を求めることができれば、環境内のガス濃度分布は式 (5.1) によって決定される。このように、式 (5.1) は環境を匂いという観点からモデル化した式であるので、これを匂い環境モデルと呼ぶことにする。

(2) ガス濃度からセンサ応答への変換

ガス濃度とセンサ応答の対応をつけるために、式 (2.28) を用いる。この式は、定常状態におけるガス濃度とセンサ応答の関係を与える。したがって、これに式 (5.1) で求めた時間平均濃度を代入することにより、ガスセンサの定常応答 r_0 が得られる。

$$r_0(x, y) = (1 + \bar{C}(x, y))^{-0.6705} \quad (5.4)$$

式 (2.28) の右辺では $\bar{C}$ に定数 0.2309 を乗じている。上式ではこの定数を式 (5.1) 中のパラメータ p_1 に含めるものとし、式 (5.4) から除いた。

(3) ガスセンサ応答ダイナミクスのモデル化

第2章で述べたように、ガスセンサ応答の回復速度は非常に遅い。このため、台車が移動した際の応答変化は、場所によるガス濃度の変化に完全には追従しない。このため、第4章のシステムでは台車移動速度が 1 cm/s に制限されていた。

そこで、ガスセンサ応答ダイナミクスをモデル化し、回復の遅れを補正してガス濃度分布を求めることを考えた。これにより、台車を高速移動させ、広い領域のガス濃度情報を短時間で収集することが期待される。このようなセンサ応答の遅れをモデル化する最も簡

単な方法は、1 次遅れや 2 次遅れなどの線形システムでセンサを表すことである。第 1 章で述べたように、半導体ガスセンサは応答速度と回復速度が異なるため、その応答を線形システムで完全に表すことはできない。しかし、第 8 章で述べるように、1 次遅れや 2 次遅れ系で近似した場合も、ある程度の近似精度は得られる。

第 8 章ではセンサ応答変化を 2 次遅れ系で記述したが、本章ではパラメータの数をなるべく減らすため、1 次遅れ系を用いる。時刻 k における台車位置を (x_k, y_k) 、センサ応答を r_k とする。ここで、 r_k を状態変数、 $r_0(x_k, y_k)$ を入力とし、定常状態で $r_{k+1} = r_k = r_0$ となることを考慮して状態方程式を導くと、

$$r_{k+1} = p_3 r_k + (1 - p_3) r_0(x_k, y_k) \quad (5.5)$$

となる。ただし、第 8 章の実験結果 (Fig. 8.10) を考慮し、上式の右辺第 2 項には無駄時間要素を 1 秒加えた。この無駄時間要素がなければ、第 2 項は $(1 - p_3) r_0(x_{k+1}, y_{k+1})$ となる。式 (5.5) では、 p_3 が未知パラメータとなる。

以上の、式 (5.1)、式 (5.4)、式 (5.5) によってガスセンサ応答の時系列が記述される。そこで、このモデルを第 4 章で述べたシステムに適用する。移動台車上には 4 個のガスセンサが搭載されているが、ここではこれらのセンサの平均値に対してモデル式をカーブフィットする。

このモデルの有効性を確かめるために行った予備実験の結果を Fig. 5.2 に示す。同図のガスセンサ応答実測値は、Fig. 4.7 (b) に示す匂い源探知中に測定されたデータである。モデル式は未知パラメータに関して非線形なので、カーブフィットは非線形最小 2 乗問題となる。ここでは、 $x_s, y_s, \theta, p_1, p_2, p_3$ の六つをパラメータとして軸方向繰り返し探索法を用い、探知開始から匂い源到達までの 503 秒間のセンサ応答をカーブフィットにかけた。ただし、この場合パラメータの初期値はランダムに決めた。軸方向繰り返し探索法では、パラメータを一つずつ最適化する操作を繰り返し行う。ここで、六つのパラメータを 1 回ずつ最適化する操作を「1 サイクル」と呼ぶものとする。Fig. 5.2 のカーブフィットにおいては、パラメータが収束するまでに約 100 サイクルを要し、そのための計算時間は約 60 分であった (Power Macintosh 6300、Apple、68k エミュレーション時)。

Fig. 5.2 中のセンサ応答の予測値とは、時刻 0 におけるセンサ応答を初期値とし、得られたパラメータの値をモデル式に代入してその後のセンサ応答変化を計算した値を表す。同図のように、センサ応答時系列の実測値は、モデルによる予測値と良く一致する。実測値の方が応答の細かい変動が多いが、これは風の乱れによりガス濃度分布が変動するためである。これに対しモデル式による予測値は時間平均濃度分布を基礎とするため、実測値の不規則な変動を平均化したカーブとなる。

カーブフィットにより得られたパラメータの値を以下に示す。

$$\begin{aligned} (x_s, y_s) &= (210, 31) \text{ [cm]} \\ \theta &= -32^\circ \\ K &= 15.2 \text{ [cm}^2/\text{s]} \\ q &= 37.5 \text{ [ml/min]} \\ p_3 &= 0.97 \end{aligned} \quad (5.6)$$

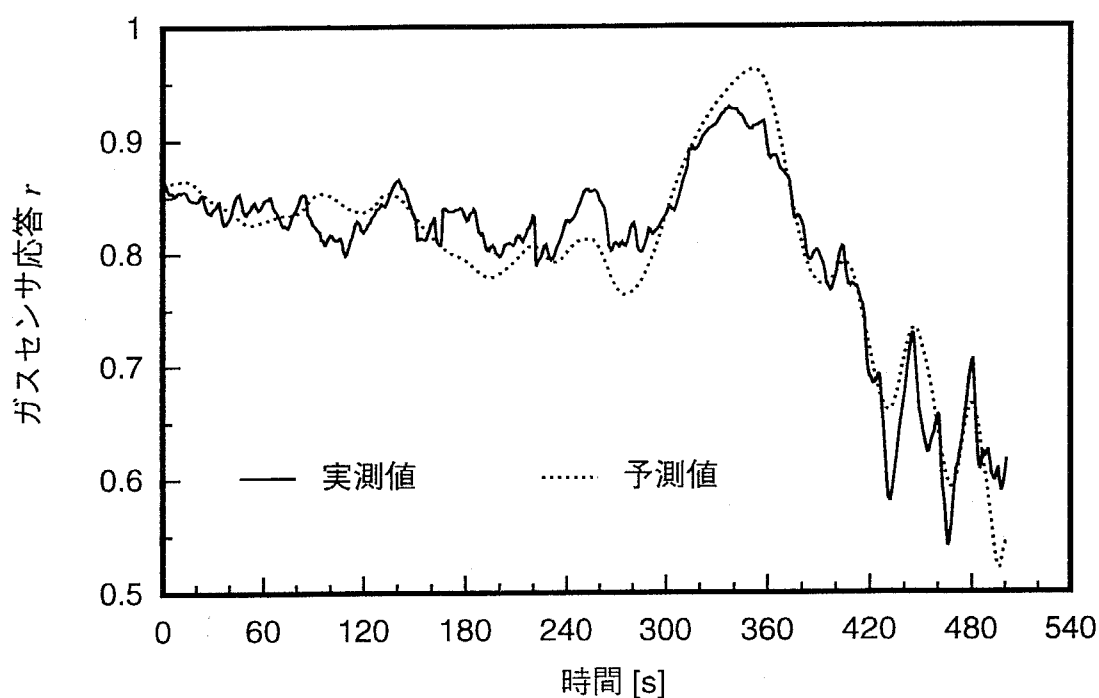


Fig. 5.2 応答時系列モデルのカーブフィット例

ただし、乱流拡散係数 K とガス噴出量 q は式 (5.1) を用いてパラメータ p_1 、 p_2 から計算した。このとき、環境風速として風速計 (HONFIELD PROBE MODEL QB、本田工業) による実測値 $U = 18.8 \text{ cm/s}$ を用いた。第2章では、ガスセンサ応答の時間平均値にロバートのプルームモデルをカーブフィットした。この結果である式 (2.31) と上式を比べると、乱流拡散係数 K の値が一致していない。

また、Fig. 4.7 (b) では噴出するガス濃度を飽和蒸気濃度の $1/3$ とした。そこで、上式中のガス噴出量 q はこの濃度のガスを噴出した際の噴出量として求めた。この値も実際の噴出量 75 ml/min の半分となってしまった。このように K や q の値が一致しないのは、ガス濃度の観測時間が短いためと考えられる。式 (2.31) では各測定点 300 秒、Fig. 5.2 では探知所要時間の 503 秒である。しかし、実際のガス濃度分布はこれよりも長い周期で揺らいでおり、この程度の観測時間では平均値が一定しない。

しかし、式 (5.5) によって予測されるセンサ応答は Fig. 5.2 のように実際のガスセンサ応答と良く一致しており、観測時間における平均ガス濃度分布を良く表していると考えられる。このため、推定匂い源位置 (x_s, y_s) は実際の位置 (220, 20) に近い値が得られている。また、風向 θ に関しても、Fig. 4.7 (b) において風上に向けてジグザグに移動するシステムの移動軌跡の方向とほぼ一致した値が得られた。

以上の結果から、ロバートのプルームモデルとセンサ応答の1次遅れ近似によってセンサ応答時系列をモデル化することが可能であると分かった。センサ応答にモデルをカーブフィットして得られたパラメータの値は、実際の値と完全には一致しない。しかし、先述

の観測時間の問題やモデル導出のために一様な風速場という強い仮定を用いていることを考えると、実際の値と良く一致したと言える。

センサ応答の時定数を表すパラメータ p_3 に関しては、Fig. 5.2 以外のデータにもカーブフィットを行った結果、 $p_3 = 0.95 \sim 0.97$ という値を得た。これを時定数に換算すると $19.5 \sim 32.8$ s となり、Fig. 2.14 に示したガスセンサ応答の回復時定数とほぼ一致する。このパラメータはセンサと検出対象ガスの種類によって決まる定数と考えられる。そこで、以降の実験では推定するパラメータの数を減らすために p_3 を定数として扱い、その値は 0.95 とした。

5.2.2 拡張カルマンフィルタによるパラメータ推定法

前節で述べたモデル式を匂い源探知に利用するためには、観測したセンサ応答時系列にオンラインでモデル式をカーブフィットしなければならない。この方法として、本研究では拡張カルマンフィルタを用いた [81]。これは、収束性に優れたオンライン推定アルゴリズムであるカルマンフィルタを非線形システムに適用したものである。このアルゴリズムを用いたパラメータ推定法を以下に説明する。

まず、推定すべきパラメータは x_s 、 y_s 、 θ 、 p_1 、 p_2 の五つであり、これらの値をガスセンサ応答 r_k の観測を通じて推定する。しかし、予備実験の結果、 p_2 の推定を拡張カルマンフィルタに含めると、パラメータ推定値の収束性が非常に悪くなることが分かった。カルマンフィルタは、推定されたパラメータから予測されるセンサ応答 r_k を計算し、この予測値と実測値の差を最小化するようにパラメータ推定値を更新する。このとき微係数 $\partial r_k / \partial x_s$ 、 $\partial r_k / \partial y_s$ 、 $\partial r_k / \partial \theta$ 、 $\partial r_k / \partial p_1$ 、 $\partial r_k / \partial p_2$ によって各パラメータの更新量が決定される。この五つの微係数の中では $\partial r_k / \partial p_2$ の値が卓越するので、 p_2 の値が大きく更新される。このため、センサ応答の変動などの影響で p_2 が真値から大きく外れた値をとることが多く、そのまま推定値がローカルミニマムに陥ってしまい、推定値の更新がそれ以上行われなくなってしまう。

また、 θ に関しても、推定の初期段階において p_2 の推定と同様の問題があった。そこで、推定の初期段階においてはこれらのパラメータを除いた残りの三つのパラメータをカルマンフィルタで推定するものとした。このとき、 p_2 に対しては後述する学習計測法に従って値の候補を用意し、 p_2 を定数として扱う。また、 θ には風速センサで測定した風向を代入し、やはり定数として扱う。そして、推定が進みパラメータ x_s 、 y_s 、 p_1 の値がある程度真値に近付いたら、カルマンフィルタによるパラメータ推定に θ も加えた。これによって風向判定の誤差を取り除き、 θ の値を微調整する。

ここではまず、 θ も加えた四つのパラメータを推定するカルマンフィルタについて説明する。時刻 k におけるパラメータの値を並べて、状態ベクトル $\mathbf{x}_k$ を次式のように定義する。

$$\mathbf{x}_k = \begin{pmatrix} x_s \\ y_s \\ \theta \\ p_1 \end{pmatrix} \quad (5.7)$$

これらのパラメータの値を時不変であると仮定すると、状態方程式は、

$$\mathbf{x}_{k+1} = I\mathbf{x}_k \quad (5.8)$$

となる。ただし、 I は単位行列を表す。ここでは $\mathbf{x}_k$ をガウス性確率変数ベクトルであると仮定する。

一方、時刻 k におけるセンサ応答 r_k の観測方程式は、式 (5.1)、式 (5.4)、式 (5.5) より、

$$\begin{aligned} r_k &= h(\mathbf{x}_k) + v_k \\ &= p_3 r_{k-1} + (1 - p_3) \left[1 + \bar{C}(x_{k-1}, y_{k-1}) \right]^{-0.6705} + v_k \\ \bar{C}(x_k, y_k) &= p_1 \frac{1}{d} \exp[-p_2(d - \Delta x)] \end{aligned} \quad (5.9)$$

ただし、

$$d = \sqrt{(x_s - x_k)^2 + (y_s - y_k)^2} \quad (5.10)$$

$$\Delta x = (x_s - x_k) \cos \theta + (y_s - y_k) \sin \theta \quad (5.11)$$

となる。上式中の $h(\mathbf{x}_k)$ は、 $\mathbf{x}_k$ と r_k の関係を表す非線形関数である。ノイズ項 v_k は、ブルーム蛇行によって生じたガスセンサ応答変動やモデル化誤差を表し、ここではガウス性白色雑音であると仮定する。また、状態ベクトルと同様にセンサ応答 r_k もガウス性確率変数であると仮定する。

状態ベクトル $\mathbf{x}_k$ の推定値は、拡張カルマンフィルタの理論を利用して求める。式 (5.8) と式 (5.9) で表されるシステムは非線形な観測方程式を持つので、そのままではカルマンフィルタを適用できない。そこで、これを状態ベクトルの推定値の周りにテーラー展開し、第1次項のみを用いて線形近似する。近似されたシステムに対してカルマンフィルタを適用すると、推定誤差の分散を最小化する最適推定値が得られる。このフィルタ式は、次式で与えられる。

$$\hat{\mathbf{x}}_{k/k} = \hat{\mathbf{x}}_{k-1/k-1} + K_k [r_k - h(\hat{\mathbf{x}}_{k-1/k-1})] \quad (5.12)$$

$$K_k = \hat{Q}_{k-1/k-1} H_k^T [H_k \hat{Q}_{k-1/k-1} H_k^T + Q_{v_k}]^{-1} \quad (5.13)$$

$$\hat{Q}_{k/k} = \hat{Q}_{k-1/k-1} - K_k H_k \hat{Q}_{k-1/k-1} \quad (5.14)$$

ただし、

$$H_k = \left(\frac{\partial r_k}{\partial x_s} \quad \frac{\partial r_k}{\partial y_s} \quad \frac{\partial r_k}{\partial \theta} \quad \frac{\partial r_k}{\partial p_1} \right) |_{\hat{\mathbf{x}}_{k-1/k-1}} \quad (5.15)$$

$$\frac{\partial r_k}{\partial x_s} = \frac{\partial r_k}{\partial \bar{C}} \left(-\frac{x_s - x_{k-1}}{d^2} - p_2 \frac{x_s - x_{k-1}}{d} + p_2 \cos \theta \right) \bar{C} \quad (5.16)$$

$$\frac{\partial r_k}{\partial y_s} = \frac{\partial r_k}{\partial \bar{C}} \left(-\frac{y_s - y_{k-1}}{d^2} - p_2 \frac{y_s - y_{k-1}}{d} + p_2 \sin \theta \right) \bar{C} \quad (5.17)$$

$$\frac{\partial r_k}{\partial \theta} = \frac{\partial r_k}{\partial \bar{C}} p_2 [-(x_s - x_{k-1}) \sin \theta + (y_s - y_{k-1}) \cos \theta] \bar{C} \quad (5.18)$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial r_k}{\partial p_1} &= \frac{\partial r_k}{\partial \bar{C}} \frac{\bar{C}}{p_1} \\ \frac{\partial r_k}{\partial \bar{C}} &= -0.6705(1 - p_3)(1 + \bar{C})^{-1.6705}\end{aligned}\quad (5.19)$$

であり、 Q_{vk} は観測雑音 v_k の分散である。上式中の $\hat{\mathbf{x}}_{k/k}$ は、時刻 k までに観測したセンサ応答から求めた状態ベクトルの推定値を表す。また、 $\hat{Q}_{k/k}$ は推定誤差の共分散行列である。センサ応答を毎秒観測する度に式 (5.12) を繰り返し適用すれば、状態ベクトル推定値の推定精度を次第に高めていくことができる。

パラメータ θ を除いた推定を行うためには、式 (5.12) において θ を含む行を全て取り除いた式を作ればよい。

残されたパラメータ p_2 の推定は、学習計測の手法を用いる [103]。まず、 p_2 のとる値の候補を幾つか設定する。これを Ω_i 、 $i = 1, \dots, M$ と表し、 Ω_i の各候補に対して式 (5.12) の拡張カルマンフィルタを適用する。候補 Ω_i を用いた際の状態ベクトル推定値を $\hat{\mathbf{x}}_{k/k}^i$ とすれば、最終的な推定値 $\hat{\mathbf{x}}_{k/k}$ は期待値操作により

$$\hat{\mathbf{x}}_{k/k} = \sum_{i=1}^M P(\Omega_i/Y^k) \hat{\mathbf{x}}_{k/k}^i \quad (5.20)$$

となる。ただし、 $Y^k = \{r_0, r_1, \dots, r_k\}$ は時刻 k までの観測情報を表す。

上式の期待値操作を行うためには、時刻 k における候補 Ω_i の実現事後確率 $P(\Omega_i/Y^k)$ が必要となる。これを求めるため、ベイズの定理を用い

$$P(\Omega_i/Y^k) = \frac{p(r_k/\Omega_i, Y^{k-1})P(\Omega_i/Y^{k-1})}{p(r_k/Y^{k-1})} \quad (5.21)$$

と変形する。ここで、状態変数ベクトル $\mathbf{x}_k$ とセンサ応答 r_k に関するガウス性の仮定を用いる。このときカルマンフィルタ理論により、線形近似したシステムにおける確率 $p(r_k/\Omega_i, Y^{k-1})$ がガウス分布に従うことが導かれる。すなわち、 $\hat{r}_k$ はガウス確率変数となり、その中心は $r_{mean}^i = H_k^i \hat{\mathbf{x}}_{k-1/k-1}$ 、共分散は $\sigma^{i2} = H_k^i \hat{Q}_{k-1/k-1}^i H_k^{iT} + Q_{vk}$ となる。したがって、

$$p(r_k/\Omega_i, Y^{k-1}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma^i} \exp \left[-\frac{1}{2} \frac{(r_k - r_{mean}^i)^2}{\sigma^{i2}} \right] \quad (5.22)$$

となる。

また、式 (5.21) の右辺分母が i の値によらない定数であり、 $\sum_{i=1}^M P(\Omega_i/Y^k) = 1$ と規格化する役割を担っている点に注意する。このとき、式 (5.21) は次のように書き換えられる。

$$P(\Omega_i/Y^k) = \frac{p(r_k/\Omega_i, Y^{k-1})P(\Omega_i/Y^{k-1})}{\sum_{i=1}^M p(r_k/\Omega_i, Y^{k-1})P(\Omega_i/Y^{k-1})} \quad (5.23)$$

この漸化式に式 (5.22) を代入することにより $P(\Omega_i/Y^k)$ を求めれば、式 (5.20) の期待値操作を行うことができる。 $P(\Omega_i/Y^k)$ の初期値 P_0^i は

$$P_0^i = 1/M \quad (5.24)$$

とすればよい。

5.2.3 匂い源位置推定の手順

式 (5.12) を用いた状態ベクトルの推定のためには、状態ベクトル推定値とその推定誤差共分散行列の初期値 $\hat{\mathbf{x}}_{0/0}$ 、 $\hat{\mathbf{Q}}_{0/0}$ を設定する必要がある。線形システムに対してカルマンフィルタを適用した場合には、必ず推定誤差の分散を最小化する推定値が得られる。しかし、非線形拡張カルマンフィルタの場合には、非線形な方程式を状態ベクトル推定値の周りに線形近似するため、最小化に関する保証はなくなる。したがって、初期値と真値が大きくかけ離れていると、推定値がローカルミニマムに陥ることや、場合によってフィルタ式が発散してしまうこともある。

そこで、なるべく真値に近い初期値を設定する工夫が必要である。第4章で述べたシステムが匂い源を探索して移動している状況を考える。このとき、カルマンフィルタを用いた匂い源位置の推定は、システムの移動台車がプルームに入ってから始めるものと定める。本研究では、第4章で述べたルールに従ってシステムがプルームに入ったと認識され、その後プルーム中を 20 cm 以上前進した時点で推定を開始するものとした。

このようにすることによって、匂い源位置の候補を移動台車の風上方向に絞り込むことができる。このとき風向は、システムの風速センサを用いて判定すればよい。ここでは風向判定の信頼性を向上するため、式 (2.14) の風向ベクトル $\mathbf{w}$ を過去 3 秒間にわたって足し合わせたベクトル $\mathbf{w}_{\text{sum}}$ を計算し、これによって過去 3 秒間の平均的な風向を求めた。また、十分風向が安定しているときに判定した風向を用いるようにするため、 $|\mathbf{w}_{\text{sum}}| \geq 2.4$ となった際の $\mathbf{w}_{\text{sum}}$ の方向を θ の初期値とした。匂い源位置の初期値は、推定開始時の台車位置を 10 cm 風上に移動した点とした。

また、 p_1 の初期値は 10 とした。式 (5.19) では、 p_1 の初期値が大きいと $\partial r_k / \partial p_1$ が小さな値になってしまう。このため式 (5.12) による p_1 の更新がほとんど行われなくなってしまうので、 p_1 の初期値は小さい方がよい。本研究の実験環境では、 p_1 の真値は前節で示したように 50 ~ 100 程度の値となる。

一方、推定誤差共分散行列の初期値は、予備実験を行い

$$\hat{\mathbf{Q}}_{0/0} = \begin{pmatrix} 100 & 0 & 0 \\ 0 & 100 & 0 \\ 0 & 0 & 100 \end{pmatrix} \quad (5.25)$$

と定めた。先述のように推定の初期段階では状態ベクトルとして $\mathbf{x}_k = (x_s, y_s, p_1)^T$ を用いるので、 $\hat{\mathbf{Q}}_{0/0}$ は 3 次正方行列となる。対角要素の値は、 x_s 、 y_s の推定誤差 10 cm、 p_1 の推定誤差 10 に対応する。また、センサ応答の観測誤差の分散は、

$$Q_{vk} = 0.000001 \quad (5.26)$$

とし、Fig. 5.2 に示すような実際の応答変動（分散 0.0001 程度）に比べて小さく設定した。これは、少ない観測データでカルマンフィルタを収束させるためである。

以上の値を用いて、カルマンフィルタによるパラメータ推定を開始する。観測データは、台車がプルームに入る 30 秒前のセンサ応答から順に与えるものとした。そして、推定開始時のセンサ応答までフィルタに与えたら、その後は θ の推定もカルマンフィルタに加える

ものとした。このとき、 θ の推定誤差共分散 σ_θ^2 が初期値として必要になるので、次式によって計算した値を用いた。

$$\sigma_\theta^2 = \frac{\sigma_{x_s}^2 + \sigma_{y_s}^2}{2} \left(\frac{\pi}{180} \right)^2 \quad (5.27)$$

この式により、cm を単位とした x_s 、 y_s の推定精度と、度を単位とした風向の推定誤差が等しく設定される。したがって、カルマンフィルタ適用時のパラメータの更新量が x_s 、 y_s 、 θ の全てについて同程度行われるようになることが期待される。

さらに、 p_2 の候補の設定も必要である。式 (5.1) より、 $p_2 = U/2K$ と表される。第1章で述べたように乱流拡散係数 K は風速変動の大きさ v' と乱れの長さスケール l_t の積で表される。これを利用すると p_2 を

$$p_2 = \frac{U}{2v'l_t} = \frac{1}{2l_t} \left(\frac{v'}{U} \right)^{-1} \quad (5.28)$$

と書き換えることができる。上式中の v'/U は風速の変動係数を表し、通常的环境では 10 ~ 30% 程度の値となる。また、 l_t については場の大きさから値を概算することができる。ここでは場の大きさが 2 ~ 4 m 程度であり、 l_t をその数分の 1 のオーダーと考えることができる。そこで、 $l_t \leq 50$ cm 程度と考え、 $p_2 = 0.1 \sim 0.85$ の範囲で候補値 Ω_i を設定した。

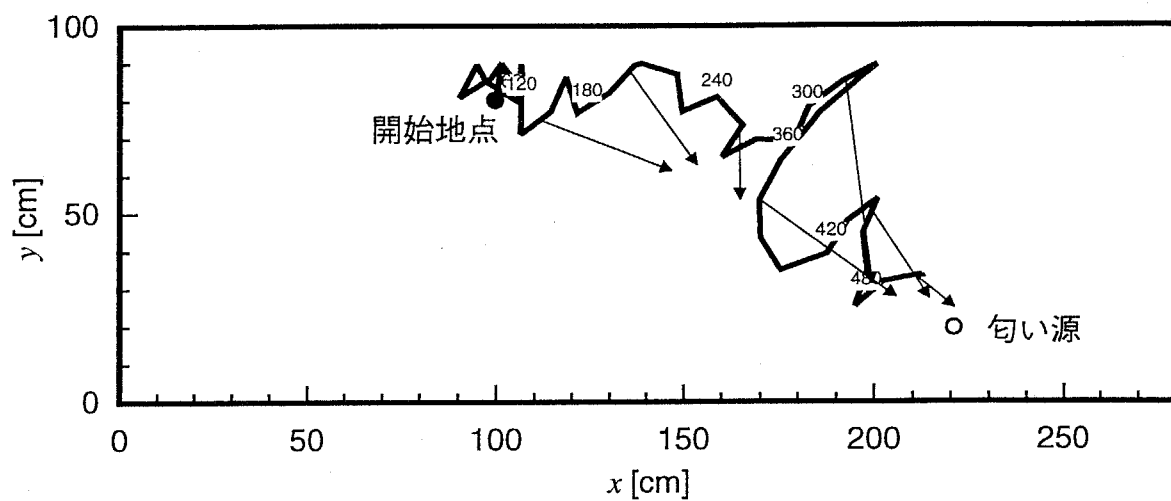
5.3 匂い源探知実験

5.3.1 匂い源位置の推定実験

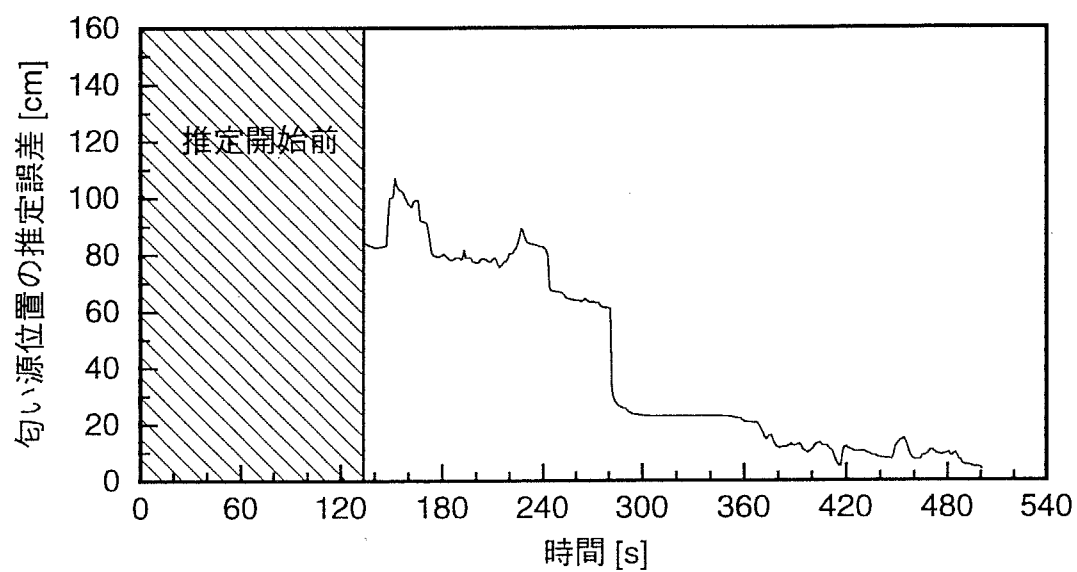
前節で述べた匂い源位置推定法を実際に適用した結果を Fig. 5.3 に示す。同図では第4章で述べた適応型アルゴリズムに従って台車を移動させ、その間に観測されたセンサ応答を用いて匂い源位置の推定を行った。また、 p_2 の値の候補として、0.1 から 0.85 まで 0.05 おきの 16 候補を用意した。Fig. 5.3 (a) 中の太線は台車の移動軌跡を示しており、このデータは Fig. 4.7 (b) と同一である。図中の小さな数字は探知開始からの秒数を示す。匂い源位置の推定は前節で述べた手順に従って、探知開始から 135 秒後に開始された。Fig. 5.3 (a) 中の矢印の先端は推定された匂い源位置を 60 秒ごとに指している。推定開始直後はデータ数が不足するため、推定匂い源位置は実際の位置と大きく異なる。しかし、台車が匂い源に向けて進むにつれてデータ数も増し、匂い源位置の推定は次第に正確になる。

Fig. 5.3 (b) は、推定された匂い源位置の誤差を示している。同図の場合、台車が匂い源に到達するまでに 503 秒を要したが、推定匂い源位置の誤差は 370 秒後には 20 cm 以内に収束している。このように、匂い源に向かって移動する途中で匂い源位置を予測することが可能であることが分かった。503 秒間のデータを全てカルマンフィルタにかけた後の最終的なパラメータ推定値を以下に示す。

$$\begin{aligned} (x_s, y_s) &= (222, 24) \text{ [cm]} \\ \theta &= -29^\circ \\ K &= 12.5 \text{ [cm}^2/\text{s]} \\ q &= 24.2 \text{ [ml/min]} \end{aligned} \quad (5.29)$$



(a) 推定された匂い源位置



(b) 匂い源位置推定誤差の推移

Fig. 5.3 匂い源位置の推定結果

匂い源位置の最終的な推定誤差は 4.0 cm であり、その他の推定値も同じデータに軸方向繰り返し探索法を適用した式 (5.6) に近い値が得られている。したがって、拡張カルマンフィルタによるオンライン推定が正しく動作していることが分かる。

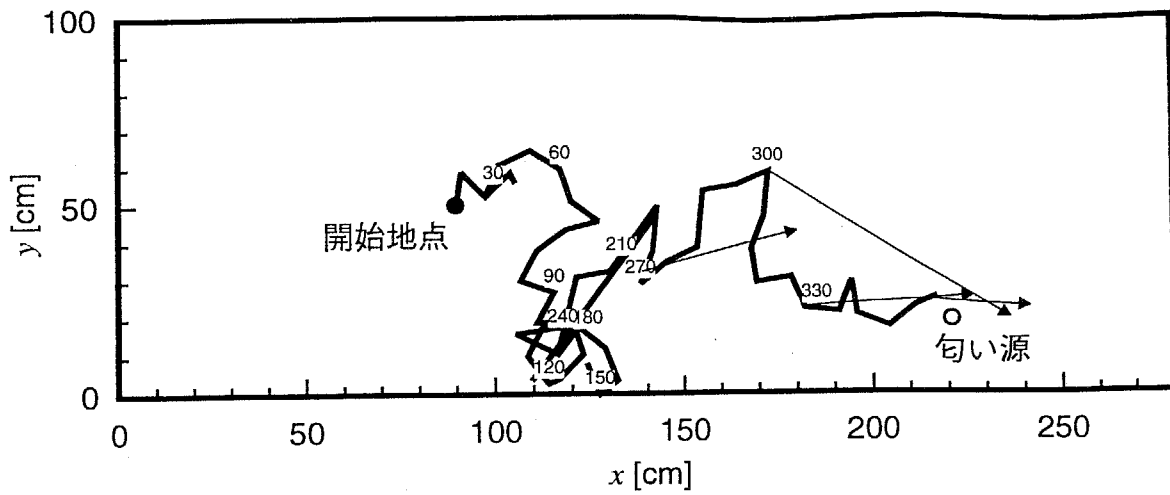
また、本方法ではセンサ応答の遅れを考慮して匂い源位置推定を行うため、台車移動を高速化することが可能である。Fig. 5.3 では台車移動速度を 1 cm/s としていたが、これを 3 cm/s に上げたときの推定結果を Fig. 5.4 に示す。本研究者は、遅れを持つセンサの応答から実際の素早い濃度変化を復元するフィルタを考案し、台車移動速度を 3 cm/s まで向上することに成功した [113]。Fig. 5.4 では、探知開始から匂い源到達までこのフィルタと第 4 章の適応型探知アルゴリズムを用いて台車を移動させた。プルームに入った後に開始される匂い源位置推定にはフィルタ適用前のガスセンサ応答をそのまま用いた。

Fig. 5.4 では、台車の匂い源到達所要時間が 357 秒であったのに対し、推定された匂い源位置の誤差は探知開始後約 300 秒で 20 cm 程度に収束している。同図 (a) 中の矢印の先端は 30 秒ごとの推定匂い源位置を指し示しており、台車移動速度を上げて匂い源位置の予測が可能であることを示している。ただし、台車移動の高速化に伴い得られるデータ数が減ったため、最終的な匂い源位置推定誤差は 22 cm に増えた。

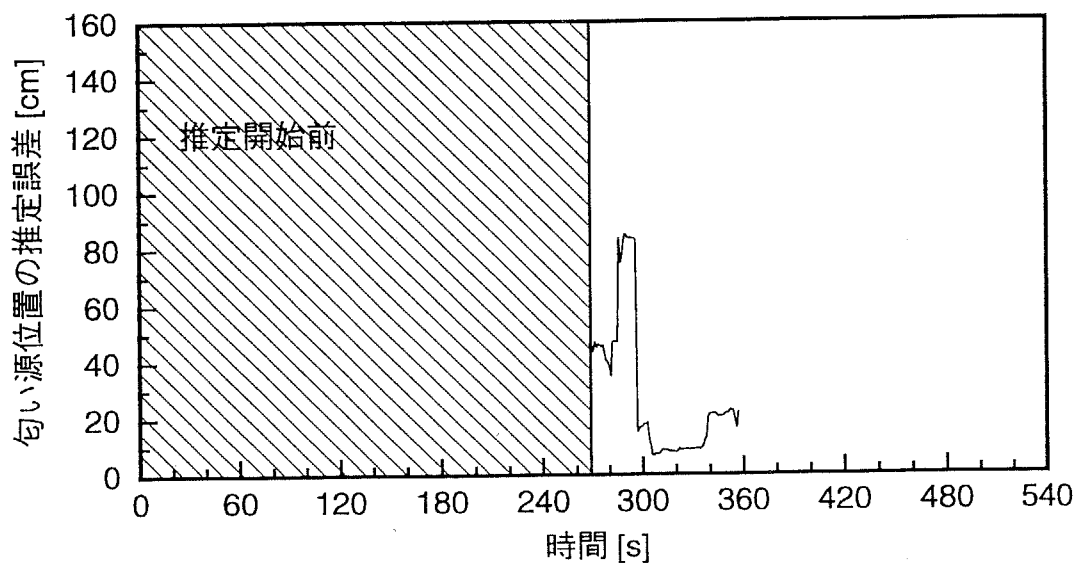
以上の例では匂い源位置の推定に成功したが、状況によって推定に失敗することもある。この失敗例を Fig. 5.5 に示す。Fig. 5.5 (b) 中のガスセンサ応答の予測値は、推定されたパラメータ値をモデル式に代入して計算したセンサ応答を示す。同図のように予測値と実測値は良く一致しており、センサ応答モデルのカーブフィットはうまく行われていることを示している。しかし、同図 (a) のように推定された匂い源位置は実際の位置と大きく異なる。

これは、台車の通った軌跡のためである。第 4 章で述べた探知アルゴリズムでは初めに濃度勾配を辿ってプルームを探索する。そして、プルームに入ると台車がさまよい始めるので、これを探索効率 E を利用して判定し、風上にプルームを辿る動作に切り替える。しかし、Fig. 5.5 では台車がプルームに入る前に E がしきい値以下に減少してしまい、台車はその後プルーム端付近を直線的に風上に移動した。この結果、Fig. 5.5 (b) に示すように探知途中に検出されたガス濃度が低く、場所によるセンサ応答の変化が小さい。したがって、これにセンサ応答モデルをカーブフィットしても正しい匂い源位置は得られなかった。これはプルームに入ったと判定された場所が適当でなかったためであり、このような場合は匂い源位置の推定誤差が大きい。

また、本研究ではタイヤの回転から台車の 1 秒ごとの位置を計算し、これを匂い源位置推定アルゴリズムに使用している。しかし、こうして求めた台車位置は、タイヤのスリップにより時折大きな誤差を持つことがある。本章で述べた匂い源位置推定アルゴリズムでは場所によるセンサ応答の変化を利用するため、このような場合には位置推定がうまく行われなかった。しかし、このような点に注意すれば先述のアルゴリズムによって匂い源位置を推定することができる。そこで、次節では匂い源位置推定を探知アルゴリズムに組み込んだ実験を述べる。

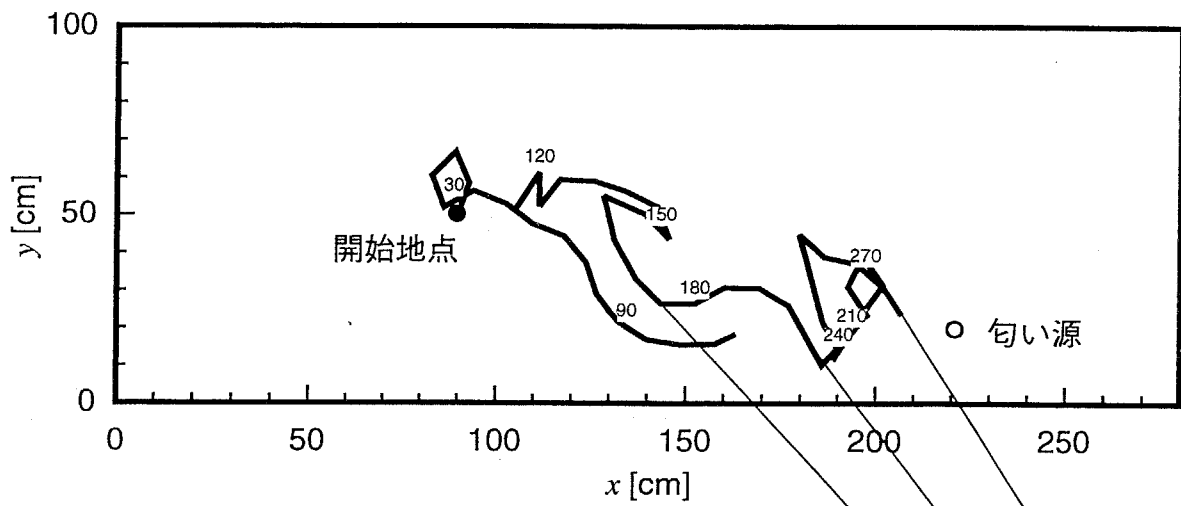


(a) 推定された匂い源位置

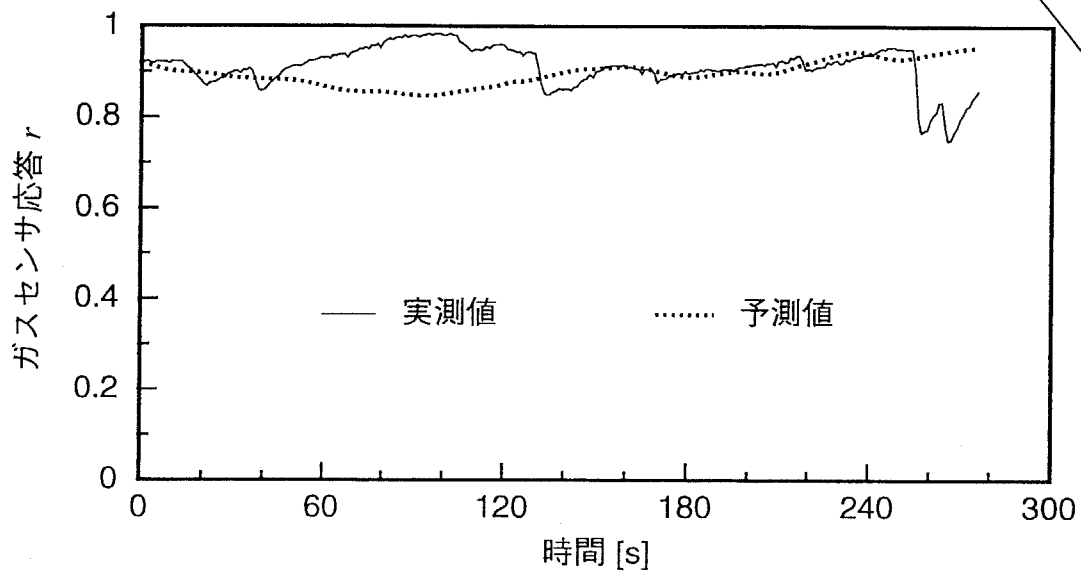


(b) 匂い源位置推定誤差の推移

Fig. 5.4 台車高速移動時の匂い源位置推定結果



(a) 推定された匂い源位置



(b) 探知途中のガスセンサ応答

Fig. 5.5 匂い源位置推定の失敗例

5.3.2 推定匂い源位置を利用した匂い源探知

前節で述べた匂い源位置推定アルゴリズムを利用し、第4章で述べた適応型探知アルゴリズムを以下のように変更した。

まず、前節の推定手順に従って位置推定が開始されるまでは、適応型探知アルゴリズムをそのまま用いる。ただし、センサ応答の回復速度を向上するフィルタを用い、台車移動速度を 3 cm/s に上げた。前節の推定手順では、移動台車がプルームに入り、さらにプルーム中を 20 cm 移動した時点で匂い源位置の推定が開始される。この後は、推定された匂い源位置に向けて台車を移動するものとした。推定匂い源位置まで台車が到達したら、匂い源探知完了となる。

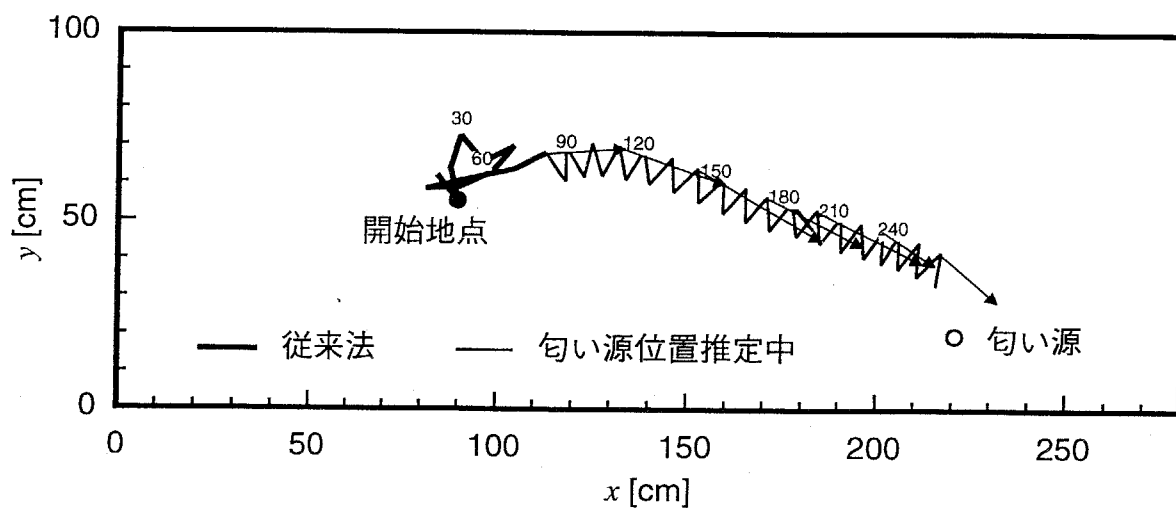
しかし、前節で述べたように推定開始直後は推定位置の誤差が大きい。そこで、推定位置に移動しながら新たな情報を集め、推定位置を更新する必要がある。このとき、匂い源の推定位置に直線的に向かうよりは、プルームを横断するようにジグザグに向かった方が良い。これは、プルームを横断するように移動した方が場所によるセンサ応答の変化が大きく、センサ応答モデルのカーブフィットが行いやすいためである。ここでは、台車進行方向を推定された匂い源方向から 60° 回転した方向とすることによって、台車をジグザグに移動させた。また、その振幅は 10 cm とした。

以上のアルゴリズムに従って匂い源を探知した結果を Fig. 5.6 に示す。ただし、ここでは 486DX 相当の CPU を持つノートパソコンでサンプリング周期 1 秒の間のオンライン推定を実現するため、 p_2 の値の候補を 0.1 から 0.45 まで 0.05 おきの 8 候補に減らした。この場合、式 (5.12) によるパラメータ推定値の更新を約 1/4 秒で行うことができ、残りの時間を通信やモータ制御に用いることができる。同図 (a) 中の太線は、従来法によりプルームを探索中の台車の軌跡を表す。一方、匂い源位置推定開始後の台車軌跡は細線で表した。前節に示した予備実験の結果と同様に、Fig. 5.6 においても台車の移動に伴って推定匂い源位置が更新され、台車は正しく匂い源の方向へ向かった。ただしここでは、推定匂い源位置に向かう途中で台車が匂い源に接触しそうなほど近付いたので、従来アルゴリズムの終了条件にしたがって探知を終了させた。この所要時間は 267 秒であったが、Fig. 5.6 (b) に示すように探知開始から約 220 秒で匂い源位置の推定誤差が 20 cm 以下に収束した。

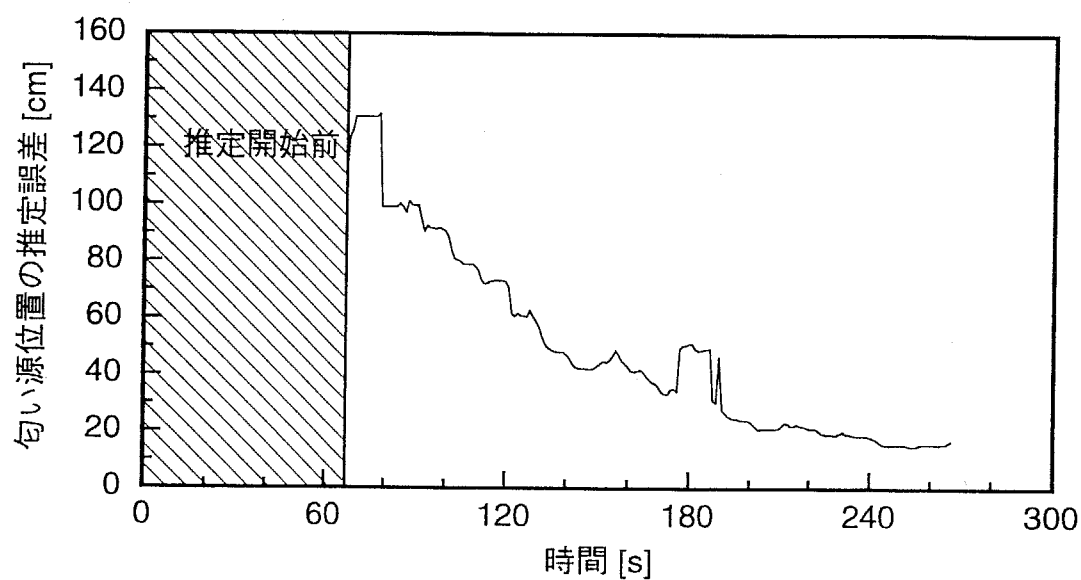
最終的に得られたパラメータ推定値を用い、式 (5.1) を用いて環境内のガス濃度分布を計算した結果を Fig. 5.7 に示す。先述のように、得られたパラメータの値は実際の値と完全には一致しない。しかし、推定されたプルームの幅や予測されるセンサ応答値に関しては、Fig. 2.19 に示す実測値と良く一致した。このように本章で述べた方法は、匂い源位置の推定を行うだけでなく、同時に環境内のガス濃度分布や匂い源からのガス噴出量も予測することができる。

5.4 まとめ

本章では、ガスセンサ応答の時系列を利用した匂い源位置の予測法と、これを利用した匂い源探知結果について述べた。初めにロバートのプルームモデルにより環境内のガス濃度分布をモデル化し、これとセンサの動特性モデルを組み合わせることで応答時系列モデルを構



(a) 台車移動軌跡



(b) 匂い源位置推定誤差の推移

Fig. 5.6 匂い源探知結果

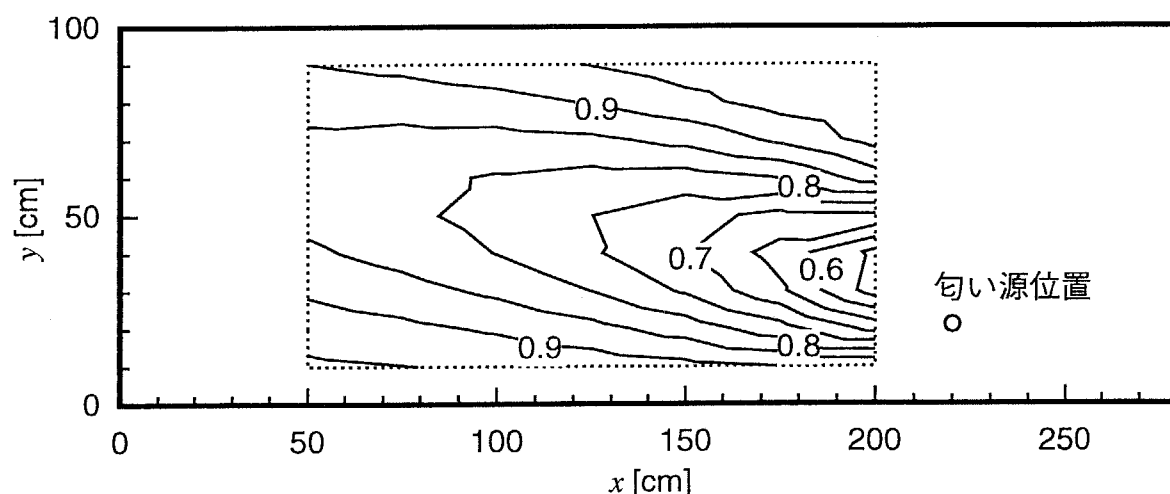


Fig. 5.7 推定されたガス濃度分布

築した。そして、このモデル中のパラメータを非線形拡張カルマンフィルタによりオンライン推定することによって、匂い源位置が予測できることを示した。

このような内部モデルを用いた手法は、音や電磁波のセンサを利用した音源、電波源探知には従来から用いられている。しかし、ガスセンサを用いた匂い源探知にこのような手法を利用した例はない。遠方から匂い源位置を予測できる特長を活かせば、匂い源探知システムの性能を大幅に高めることができると期待される。また、音や電磁波のセンサに比べて動作速度の非常に遅いガスセンサを扱うために、本研究では環境モデルとセンサ動特性のモデルを組み合わせることを提案した。従来のシステムではガスセンサの回復速度がシステムの動作を律速しており、このような手法によって動作速度の問題を解決できると期待される。ただし今回は、移動台車のモータ駆動力の制約から台車移動速度をさらに上げた実験を行うことができなかった。今後、本方法による動作速度向上の限界を確かめる実験が必要である。

また、本章の実験では非線形パラメータ推定を行っているため、推定結果はパラメータの初期値や推定中の台車移動経路に大きく依存した。そこで、今後、推定をうまく行うための台車移動経路の計画方法を検討する。パラメータ初期値に関しても、初めにプルーム幅を計測するなどの台車移動方法の工夫が可能である。

さらに、第2章で述べたように、現実環境では複雑な気流によってプルームが折れ曲がる。本章のアルゴリズムではプルームが直線的にのびると仮定して匂い源位置推定を行うため、プルームが曲がった場合には位置推定の精度が低下する。このような場合に備え、本章で述べたアルゴリズムでは推定された匂い源位置に近付き、その位置を実際に確認する方法をとった。プルームが曲がり始める地点よりも匂い源に近付けば、本章で述べた位置推定法が有効となる。今後、様々な環境において匂い源からの距離と位置推定精度の関係を検討する必要がある。

このような問題点も明らかになったが、本手法の特長も示すことができた。本手法では

匂い源位置の予測だけでなく、環境内のガス濃度分布や匂い源からのガス噴出量も同時に推定することができた。このような特長は、環境計測において非常に有利に働く。例えば、悪臭のモニタリングを行う場合を考えると、本システムにより最も悪臭のひどい発生源を突き止めることができるだけでなく、その発生源が周辺に与える影響も予測可能となる。

このような観点から考えると、本章で提案したシステムはガスセンサ応答を通じて匂いの運ばれる伝達場の認識を行っているといえる。従来、単に「ロボットによる環境認識」と言えば視覚や距離センサを用いた障害物の認識を指していた。今後、ガスセンサを用いた匂い伝達場の認識により、ロボットの応用が大きく広がると期待される。

Chapter 6

能動サンプリング型匂い源探知システム

6.1 はじめに

前章までに述べた自走型匂い源探知システムは、匂い源探知に濃度情報と風向情報の二つを利用する。しかし、第2章で述べたように高感度な風速センサは少ない。自走型探知システムに搭載したサーミスタ式風速センサで確実に風向を求めるためには、クリーンルームのように 20 cm/s 程度の風速が必要である。これに対し、一般的な室内環境の風速は、人間が知覚し得ない 10 cm/s 以下であることも多い。

そこで、風速センサを用いずに匂い源を探知する新たなシステムの開発を目指した。第1章で述べたように生物の匂い源探知行動について数多くの研究がある。なかでも蛾の行動が詳細に研究されており、これを模倣できれば優れた匂い源探知システムが実現できる。

このような考えから、本研究では性フェロモンの匂いを頼りに雌を探すカイコガの行動に注目した。カイコガは飛ぶことのできない蛾なので、他の飛翔する蛾に比べて行動観察や工学的模倣が容易である。カイコガの雄は、フェロモン刺激がないときにはほとんど活動しないが、フェロモン刺激を受けると「婚礼ダンス」と呼ばれる行動を採り、雌に向けて歩き始める。この行動の特徴の一つはジグザグな歩行パターンであり、これは第1章で説明した他の蛾の行動と同様である [51]。

しかし、この行動にはもう一つの特徴がある。雌を探す雄カイコガは飛べないにも関わらず、必ず翅を激しく羽ばたく。小原は、カイコガの翅を切除すると雌を探す能力が低下することを示した [84]。この結果から、カイコガは羽ばたきによりフェロモンを引き寄せ、前方のフェロモン源の存在を認識していると考えた。

また、神崎らは羽ばたきの効果に関して新たな提案をしている [52]。すなわち、カイコガがフェロモン源の方向を向いた際には、小原の指摘のように羽ばたきの風がフェロモンを引き寄せる。これに対し、カイコガがフェロモン源と逆方向を向いたときには、羽ばたきの風がフェロモンをカイコガから遠ざける。したがって、カイコガの体の向きによって受容するフェロモン濃度が変化することになり、容易にフェロモン源の方向を知ることができる。

本章では、このカイコガの羽ばたきを模倣した匂い源探知システムの開発について説明

する。このシステムは羽ばたきをファンで模倣し、ガスセンサに対して空気を吸引・排出する。前章までのシステムは、漂ってきた匂いを受動的に検出していた。これに対し、本システムではファンによって環境に働きかけて匂いを採取するので、作用・反作用型のアクティブセンシングシステムである。そこで、本システムを「能動サンプリング」型システムと名付けた。

初めにカイコガの行動観察を行い、羽ばたきの効果を確認する実験を行った。次に、羽ばたきの効果を模倣した人工システムのプロトタイプを作成し、風洞実験を通じてその有効性を確かめた。最後に、実環境における匂い源探知に向けてシステムを改良した結果を述べ、3次元的に匂いが広がる複雑な環境の匂い源探知実験を報告する。

6.2 カイコガの匂い源探知行動の観察

6.2.1 実験方法

実験には羽化後5日以内の雄のカイコガ (*Bombyx mori*) を用いた。カイコガのフェロモンの主成分はボンピコール (E, Z)-10, 12-hexadecadien-1-ol であり、カイコガの場合にはこの物質のみで完全な探知行動が誘発される。実験には、合成ボンピコールを用いた。

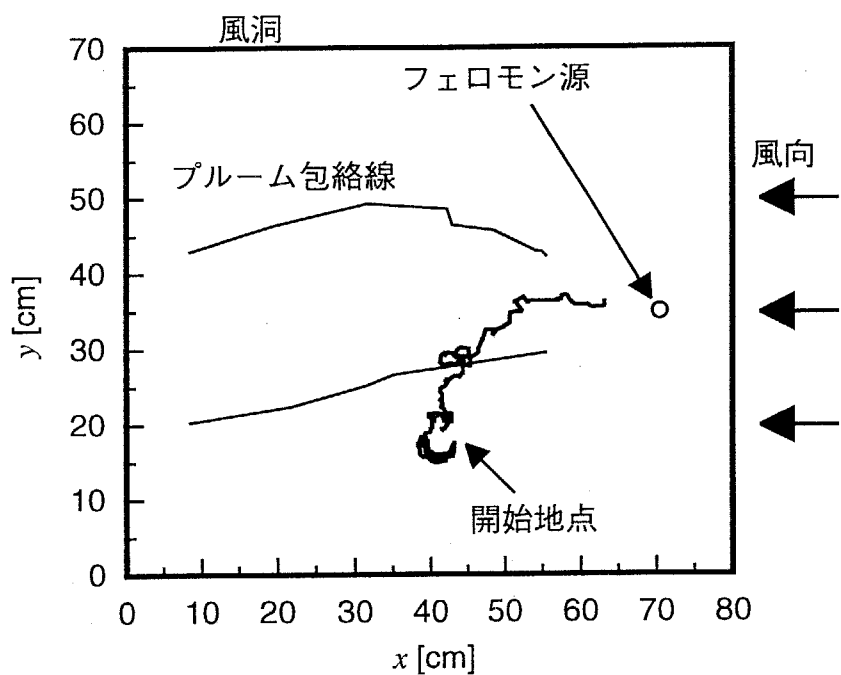
カイコガの行動観察は、Fig. 3.9 に示す風洞を用いた。フェロモンの放出は、Fig. 3.9 に示すノズルから行った。雌1頭分 (1 μ g) のボンピコールをヘキサンで希釈して、濾紙に染み込ませる。これをガラス管に入れて空気を流し、風洞内のノズルから放出した。以降、このノズル先端をフェロモン源と呼ぶ。

これによって、空中にフェロモンのプルームが形成される。しかし、床を歩行するカイコガにはフェロモンが到達しない。そこで、フェロモン源と同じ高さにナイロン製の網 (40 cm $\times$ 70 cm) を張り、雄カイコガをこの上で歩行させた。この行動を記録するためにまずビデオカメラで行動を撮影し、その画像をコンピュータ画面上にスーパーインポーズした。そして、カイコガの頭部の位置を 0.25 秒ごとにマウスでコンピュータに入力し、行動軌跡を求めた [54]。

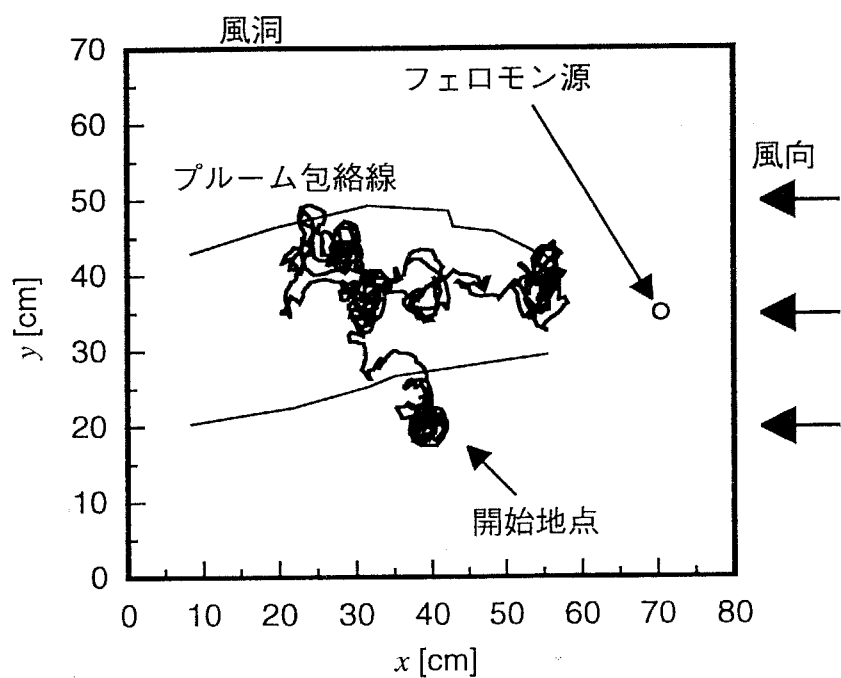
6.2.2 結果

羽ばたきの効果を調べるため、翅を切除した雄カイコガと切除していないカイコガの行動を比較した。この結果を Fig. 6.1 に示す。図中に示すプルームの包絡線は、Fig. 3.10 に示すガス濃度分布の測定において、ガスセンサ応答の時間平均が 0.8 となった等濃度線を表す。

Fig. 6.1 (a) に示すように翅を持つカイコガは容易にフェロモン源へ向かい、到達までに要した時間は 180 秒であった。Fig. 6.1 (b) も同じ蛾による方向軌跡を示すが、この場合は翅を切除して行動観察を行った。翅を切除された蛾はフェロモン源の方向が分からない様子で複雑な軌跡を描いており、フェロモン源到達の所用時間は 290 秒であった。これらの行動軌跡からカイコガの歩行速度を求めた結果、翅の有無に関わらず歩行速度は約 1



(a) 翅の切除前



(b) 翅の切除後

Fig. 6.1 カイコガの歩行軌跡

Table 6.1 翅の有無によるフェロモン源到達所用時間の違い

翅	開始位置	到達回数	所用時間 [s]
有	ブルーム中央	5 / 5	85 ± 25
無	ブルーム中央	5 / 7	243 ± 55
有	ブルーム端	7 / 13	156 ± 71
無	ブルーム端	4 / 13	448 ± 142

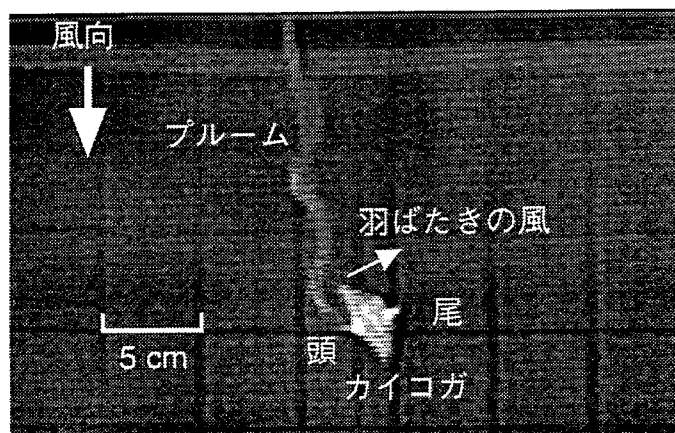
cm/s であった。したがって、翅を切除しても歩行速度に影響は無く、所用時間の差は探知能力を反映したものだと考えられる。

そこで、フェロモン源到達までの所用時間を翅の有無により比較した。フェロモン源到達の成功率と、その際の所用時間を Table 6.1 に示す。カイコガがナイロン製網の端に達してそこから落ちた場合や、フェロモン源に向かう途中で動かなくなった場合は探知失敗とみなした。探知開始地点の項目の「ブルーム中央」は Fig. 6.1 の座標系における点 (40, 35) を指し、「ブルーム端」は (40, 20) または (40, 50) を表す。また、所用時間はカイコガがナイロン製網端の最もフェロモン源に近い場所に到達するまでの時間を表しており、探知に成功した蛾について平均値と標準偏差を求めた。

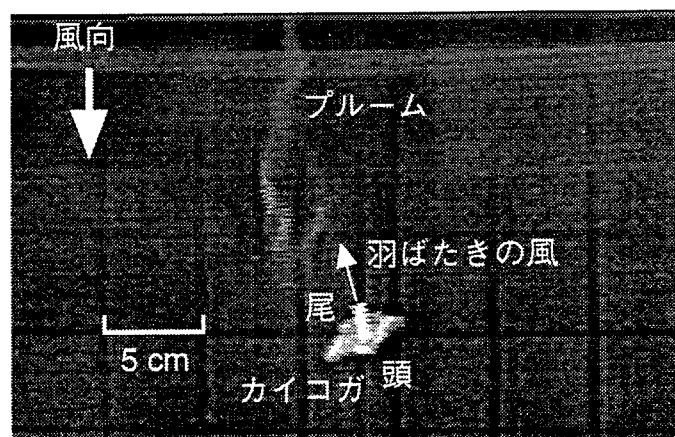
Table 6.1 を見ると、ブルーム中央から探知を開始した場合にはほとんどのカイコガがフェロモン源探知に成功したことが分かる。しかし翅の無い蛾は、翅の有る蛾に比べて約 3 倍の時間をフェロモン源到達に必要とした。また、ブルーム端から探知を開始した場合は、開始地点付近のフェロモン濃度が低い。このため、翅の有る蛾でも 54% しかフェロモン源に到達しなかった。翅のない蛾の場合には、探知成功率は更に下がって 31% となり、所用時間も長い。

以上のように、カイコガの羽ばたきは匂い源探知行動に大きな影響を持つ。羽ばたきにより生じる風の速度は約 1 m/s であり、風洞の風速 (7 ~ 15 cm/s) に比べて大きい。このため、風洞内のフェロモン濃度分布は羽ばたきによって能動的に変更される。

この羽ばたきの影響を確かめるため、フェロモンと同時に発煙材 TiCl_4 の煙を流し、ブルームを可視化して行動観察を行った。この結果を Fig. 6.2 に示す。同図 (a) のようにカイコガがブルームの方向を向いた場合には、羽ばたきの風が煙を引き寄せる様子が観察された。一方、同図 (b) のようにカイコガがフェロモン源と逆を向いた場合には、煙がカイコガの後方へはじき飛ばされた。この結果、カイコガの付近には煙がなくなっている。したがって、羽ばたきの風には体の向きによって受容するフェロモン濃度を変化させる効果があることが分かった。



(a) 前方から匂いが漂ってくる場合



(b) 後方から匂いが漂ってくる場合

Fig. 6.2 羽ばたきの効果

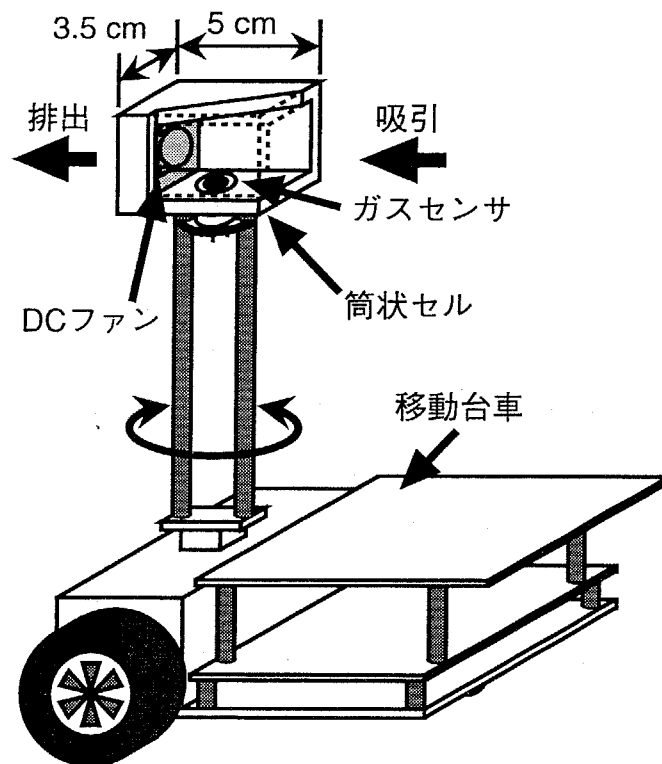


Fig. 6.3 能動サンプリング型匂い源探知システム

6.3 能動サンプリング型匂い源探知システムの構築と評価

6.3.1 システムの構造

前節で述べたカイコガの羽ばたきの効果を模倣し、Fig. 6.3 に示す能動サンプリング型匂い源探知システムを製作した。このシステムは匂い源方向判定のためのプローブと移動台車の二つの部分に分けることができ、移動台車には Fig. 3.1 と同じものを使用した。

プローブ部分では、カイコガの翅の代わりに小型 DC ファン (12 V、0.09 A) を用いて能動的に風を起こし、匂い濃度を触角の代わりに半導体ガスセンサで測定する。半導体ガスセンサは前章までと同じ TGS822 (Figaro 技研) を用いた。このセンサはヒータによって素子を加熱して使用するため、直接ファンの風が当たると温度が変化し、応答が変動してしまう。そこで筒状のセンサセルを用意し、半導体ガスセンサの開口部分のみを筒状セルの内壁に出す構造とした。このため、ガスセンサのパッケージに直接風が当たることは無い。この筒状セルは、ステッピングモータにより左右に回転できる。

前章までの匂い源探知システムと異なり、能動サンプリングシステムは風速センサを用いずに匂い源の方向を判定することができる。また、ガスセンサを 1 個しか用いていないので、ガスセンサの感度を揃える感度校正は不要になる。

6.3.2 風洞実験によるシステムの評価

製作したシステムの評価を、カイコガの行動観察と同じく Fig. 3.9 に示す風洞で行った。匂い源としては、前章までと同様にエタノール飽和蒸気を流量 75 ml/min で噴出するノズルを用いた。

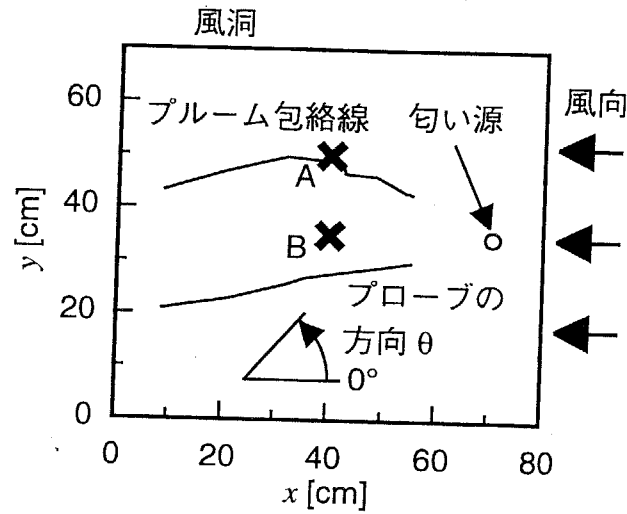
Fig. 6.3 に示すシステムを風洞の中に置き、ガスセンサの応答を測定した結果を Fig. 6.4 に示す。図中の棒グラフはガスセンサ応答の 8 分間の平均値を示し、誤差棒はこの間のセンサ応答の標準偏差を表す。吸引方向 θ はこの方向から空気を吸引することを意味し、Fig. 6.4 (a) のように x 軸の正方向を 0° として反時計回りに角度をとる。また、同図 (a) 中のブルームの包絡線は、Fig. 6.1 と同様にガスセンサ応答の時間平均が 0.8 となった等ガス濃度線を表す。

Fig. 6.4 (b) は、同図 (a) 中の点 A におけるガスセンサの応答を表す。この点はブルーム端に相当し、ガス濃度が低い。このため、小型ファンを停止した場合にはプローブの方向に関係なくガスセンサ応答 r は 1 に近くなる。これに対し、小型ファンを作動した場合には $\theta = 180^\circ$ と 270° においてセンサ応答 r が小さくなった。この方向 ($180 \sim 270^\circ$) は、Fig. 3.10 における濃度勾配の方向と一致する。したがって、この方向には高濃度のガスが存在し、小型ファンによってこのガスが吸引されたと考えられる。

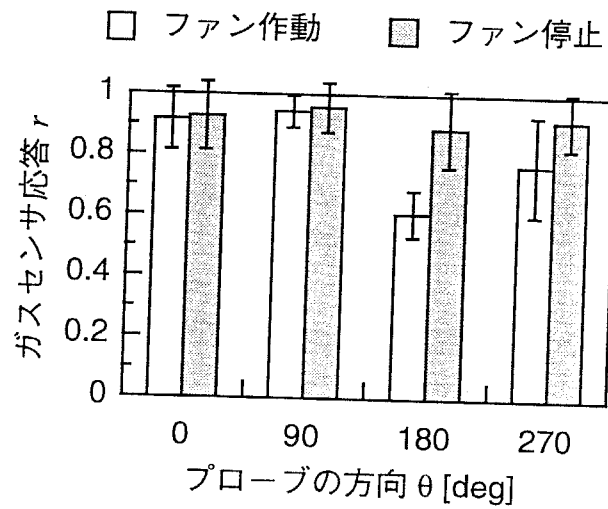
一方、Fig. 6.4 (c) は、同図 (a) 中の点 B におけるガスセンサ応答を示す。この点はブルーム中央に位置し、高濃度のガスが風に運ばれてくる。このため、Fig. 6.4 (c) ではガスを吸引する効果よりもガスをはじき返す効果の方がはっきりと現れた。小型ファンを作動した場合には、匂い源と逆向きの $\theta = 180^\circ$ にプローブを向けたときにセンサ応答が大きくなる。

以上の結果から、プローブを向ける方向によってセンサ応答が変化することが分かった。そこで、これを利用して移動台車を動かし、匂い源探知を試みた。探知手順をまとめると以下ようになる。匂い源の方向判定は、Fig. 6.4 の (b) と (c) に対応する二つの場合に分けて行う。

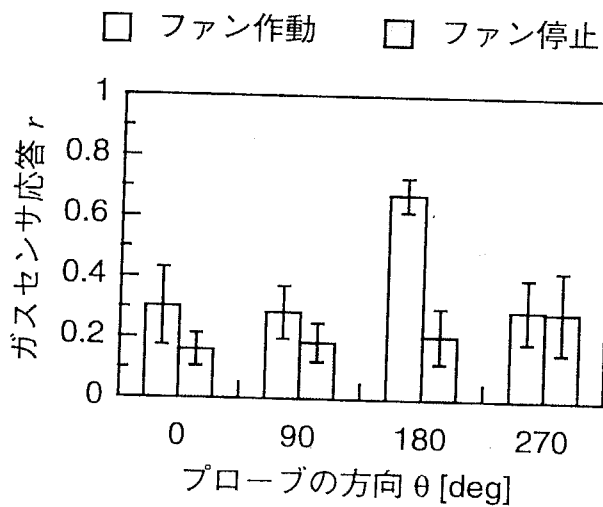
- (1) プローブを 360° 回転し、ガスセンサ応答 r を測定する。
- (2) プローブを回転した際の r の最大値が 0.5 以上の場合は、その場所をブルーム外と判断する。この場合は Fig. 6.4 (b) のようにブルームの方向で r が最小となる。しかし、実際にはセンサ応答に遅れがあるので、応答 r が減少し始めた方向をブルームの方向とした。
- (3) r の最大値が 0.5 より小さい場合には、その場所をブルーム内と判断する。この場合、Fig. 6.4 (c) のように匂い源と逆方向で r が最大となる。しかし、半導体ガスセンサの回復速度が遅いため、実際に最大値をとる時間は遅れる。そこで、予め実験的に遅れ角を求めて角度の補正を行った。
- (4) このように得られたブルームの方向または匂い源の方向へ 1 ステップ前進する。以上の手順を繰り返して匂い源に向かう。



(a) 測定場所



(b) 点Aにおけるガスセンサ応答



(c) 点Bにおけるガスセンサ応答

Fig. 6.4 吸引方向別のガスセンサ応答

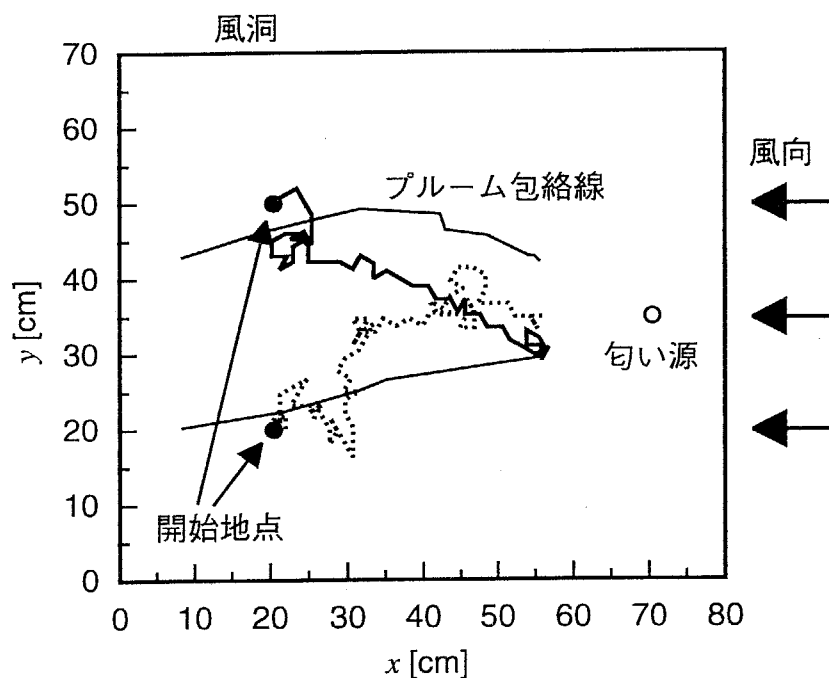


Fig. 6.5 匂い源探知結果

手順 (4) では 1 ステップを 2 cm とし、台車移動速度は 1 cm/s とした。この速度はカイコガの歩行速度とほぼ等しい。一方、手順 (1) におけるプローブ回転速度は $30^\circ/\text{s}$ とし、カイコガの行動速度よりも遅くした。これは、半導体ガスセンサの遅い回復速度を考慮したためである。この回転速度の時、手順 (3) における遅れ角は 90° であった。

以上の探知アルゴリズムを用いて匂い源を探知した結果を Fig. 6.5 に示す。探知所用時間は、開始地点が (20, 20) の場合で 1307 秒、(20, 50) の場合で 837 秒であった。探知に長時間を必要とするのは、方向判定を 1 回行う度にプローブを 360° 回転するためである。方向判定の効率化を図り、システム動作速度を高速化することについては、次章以降で述べる。

6.4 クリーンルームにおける 3 次元匂い源探知

6.4.1 3 次元探知を目指したシステムの改良

前節では、能動サンプリング型システムによって風洞内の匂い源探知に成功したことを述べた。そこで、システム開発の次のステップとして、実環境であるクリーンルームで匂い源探知実験を行った。

能動サンプリング型匂い源探知システムの構成は、前章までに述べた風速センサを用いたシステムに比べて簡単である。このため能動サンプリングシステムでは、プローブ部分

を人間が手に持ち、匂い源方向を人間に指示する使用法が考えられる。ロボットによる自走システムでは3次元的な移動が困難であるが、人間がプローブを持てばこの問題は解決される。

そこで、本節では能動サンプリング型プローブによる3次元的な匂い源探知の達成を目指した。しかし、Fig. 6.3に示す能動サンプリング型プローブのプロトタイプは、Fig. 6.4(c)に示すように匂い源と正反対を向いたときにしかセンサ応答が変化しないという欠点がある。このため、3次元的にプローブを回転し、センサ応答が変化する方向を探すのは困難である。

そこで、センサ応答の指向性を改善するため、Fig. 6.6(b)、(c)に示すプローブを製作した。同図(a)のプロトタイププローブの構造はFig. 6.3とほぼ等しい。これらのプローブのファンが作り出す風の指向性をFig. 6.7に示す。同図ではファンの後方30 cmにサーミスタ式風速計(HONFIELD PROBE MODEL QB、本田工業)を設置し、プローブを回転しながら風速を測定した。測定場所はFig. 2.17に示すクリーンルームであり、空調の風の影響をなくするために測定時には空調を止めた。

Fig. 6.7に示すように、大型ファンプローブでは生じる風が他の2種類のプローブに比べて非常に大きい。一方、マルチファンプローブでは、風速はプロトタイププローブとほぼ等しい。しかし、後方へ排出する風の指向性が広げられている。

これらのプローブを用いて測定したガスセンサ応答をFig. 6.8に示す。実験は第2章で述べたクリーンルームで行い、Fig. 2.20と同じ条件で実験を行った。クリーンルームの風速は約30 cm/sであった。

Fig. 6.8(a)では、匂い源から90 cm離れた場所にプローブを設置し、匂い源を含む平面内でプローブを $2^\circ/\text{s}$ で回転した。回転速度が前節の風洞実験の場合よりも遅いのは、クリーンルーム環境の方がガスが希薄なことによる。このためセンサ応答が小さい上に応答が追従しないので、方向による応答差が小さく、プローブを高速に回転してしまうと差が現れない。Fig. 6.8(a)を見ると、観測されるセンサ応答が風の乱れのために変動していることが分かる。しかし、3種類のプローブのいずれも匂い源と反対の $\theta = 180^\circ$ 付近でセンサ応答が上昇しており、このときガスをはじき返していることが分かる。

一方、Fig. 6.8(b)に、プローブ回転軸を同図(a)に比べて 30° 傾けた場合のセンサ応答を示す。この場合、プロトタイププローブのセンサ応答は、吸引方向を変えてもほとんど変化しない。これは、後方に排出する風の指向性が鋭く、斜め方向から漂ってくるガスをはじき返せないためである。これに対し、大型ファンプローブとマルチファンプローブの場合には、 $\theta = 180^\circ$ 付近でセンサ応答の上昇が見られる。したがって、この逆方向に匂い源があると判定することができる。以上の結果から、大型ファンプローブのようにファンの風を強くするか、またはマルチファンプローブのように風の指向性を広げることによってプロトタイププローブの欠点が解決できることが分かる。

しかし、ファンにより強い風を起こすと床や壁に近い場所では問題が生じる。例えば、Fig. 6.9(a)に示すように床面近くに匂い源があり、これに向かってファンの風を吹き付けた場合を考える。このとき同図のようにファンの風がガスを巻き上げるため、プローブが匂い源と逆方向を向いているにも関わらず高濃度のガスが検出される。Fig. 6.9(b)は、同図(a)のような状況においてプルームの形状を発煙器(スモークマシン1000、ロスコ)

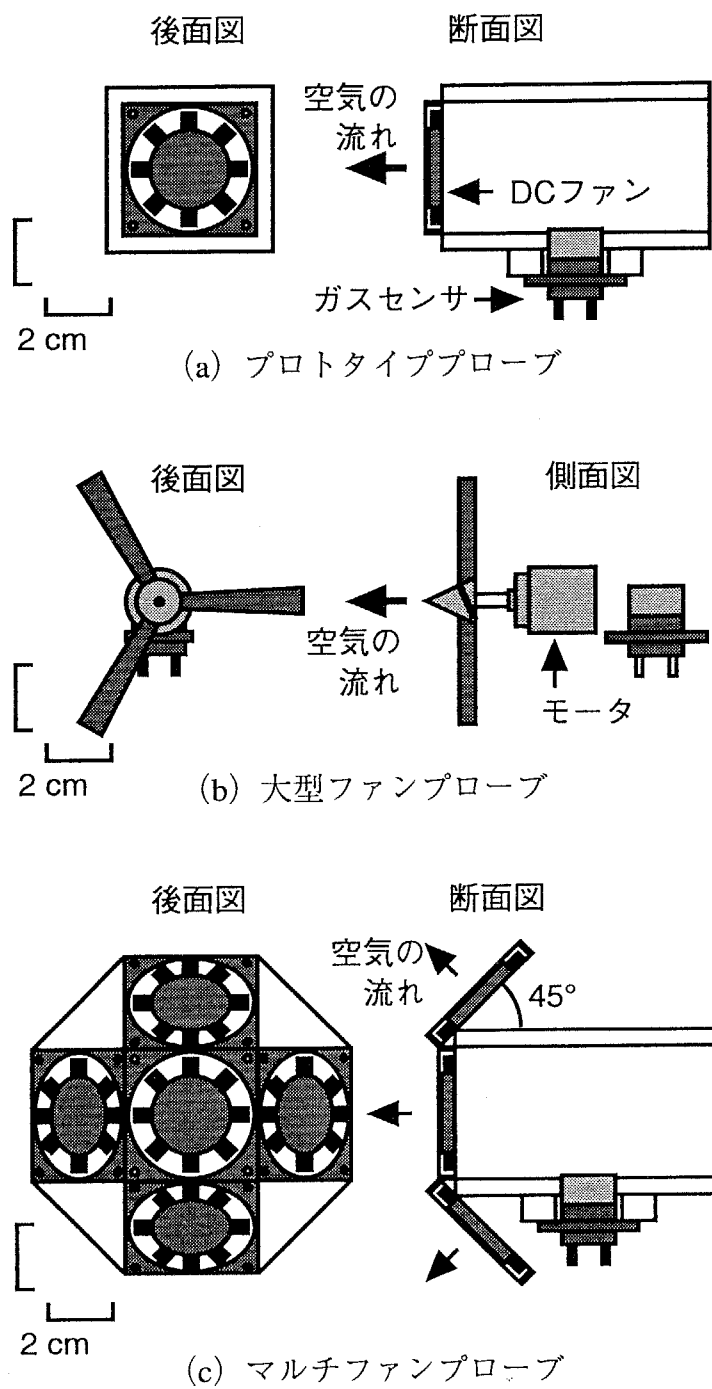


Fig. 6.6 3次元探知用能動サンプリング型プローブ

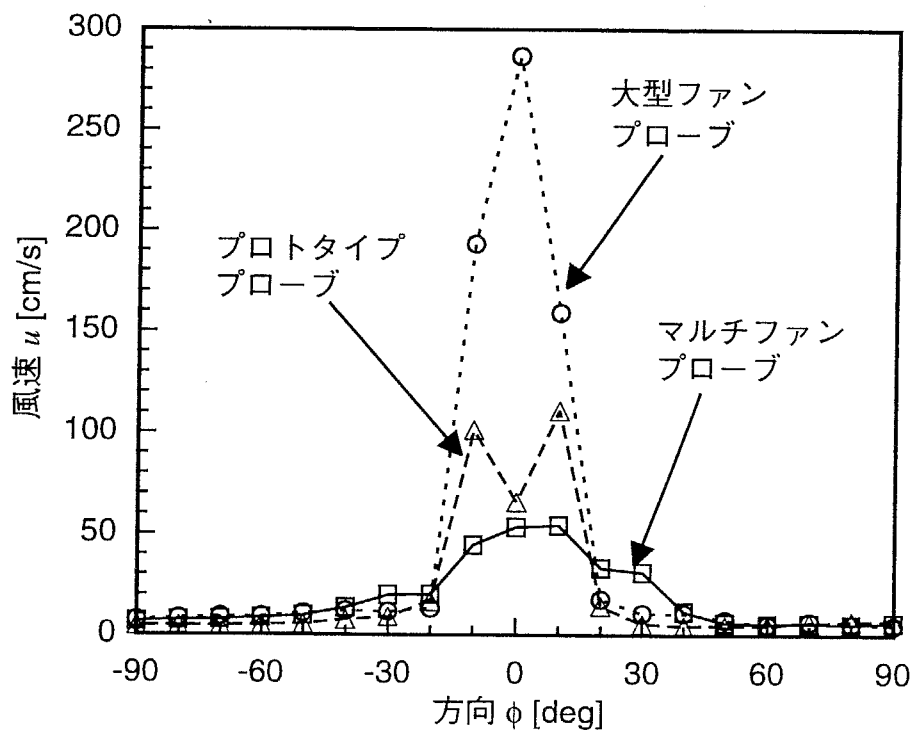
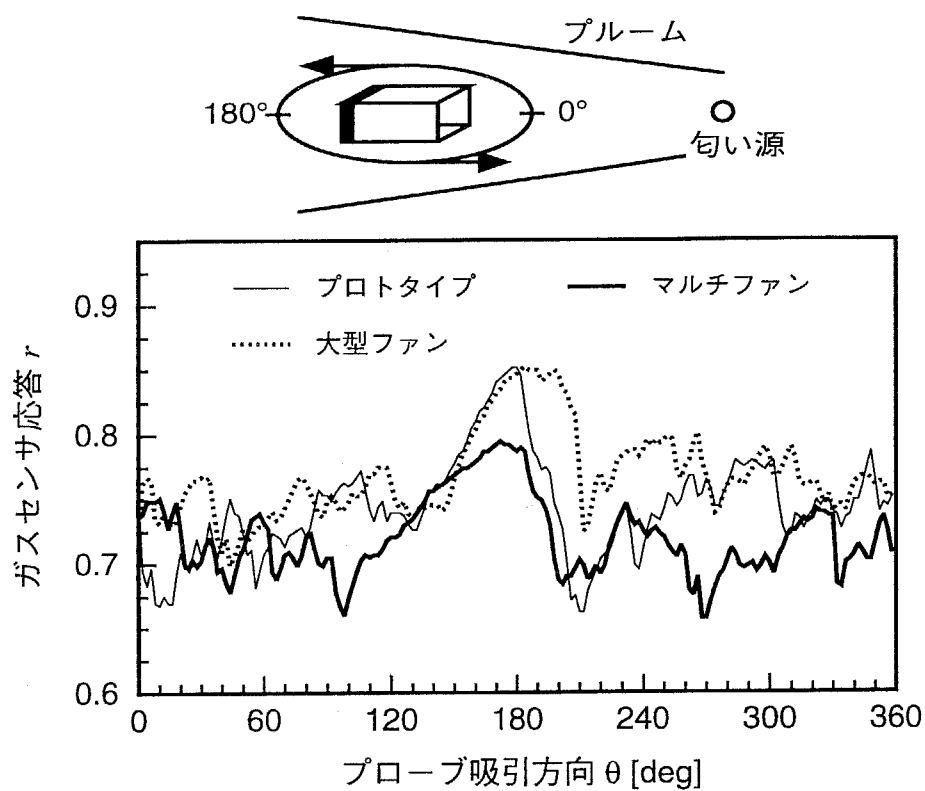
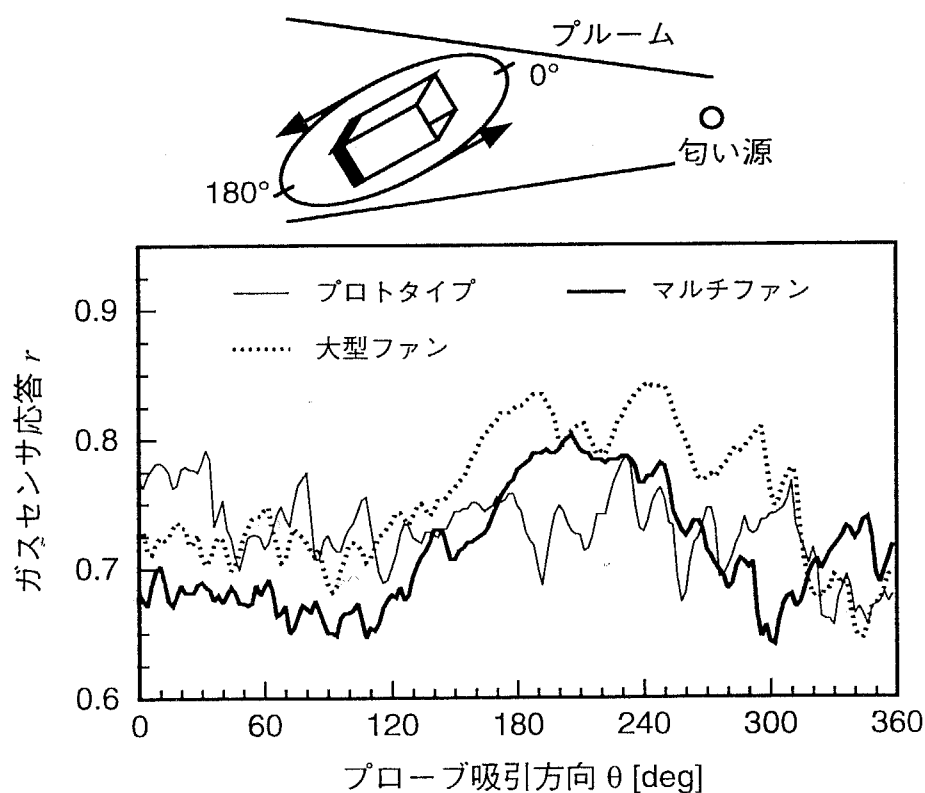


Fig. 6.7 ファンの風の指向性



(a) 匂い源を含む平面内でプローブを回転した場合



(b) 回転軸を傾けた場合

Fig. 6.8 3種類のプローブによるセンサ応答指向性の比較

を用いて可視化した写真である。風のはねかえりの問題を起こさないためには、大型ファンプローブよりも風の弱いマルチファンプローブの方が良いと言える。そこで、以降の実験にはマルチファンプローブを用いた。

6.4.2 匂い源探知実験の結果

ここでは、能動サンプリング型プローブを用いて3次元的な匂い源探知を試みる。実験は前章までと同様に Fig. 2.17 に示すクリーンルームで行ったが、匂い源の位置を変えた。Fig. 2.18 に示すように、クリーンルームの測定スペースでは左右の給気口から吹きだした風が中央付近でぶつかる。そこで、このように風がぶつかる地点に匂い源を置いた。

前章までと同様に匂い源からエタノール飽和蒸気を流量 75 ml/min で放出した場合のガス濃度分布を Fig. 6.10 に示す。図中に示すプルームの包絡線はガスセンサ応答の平均値が 0.8 となった等濃度線を表しており、ガスが上に広がっていることが分かる。このため匂い源付近では水平方向の濃度勾配が小さく、また二つの給気口からの風がぶつかるため風向が不安定である。したがって、第4章で述べた自走型システムはこれらの情報を利用するため、匂い源を探知することができなかった。この場合には3次元的な匂い源探知が必要であることが分かる。

一方、マルチファンプローブを用いて3次元的に匂い源探知を試みた結果を Fig. 6.11 に示す。まず、プローブを Fig. 6.10 中の点 C に設置した。この状態でプローブを水平方向と垂直方向に回転すると、Fig. 6.11 (a)、(b) のようなガスセンサ応答が得られた。ただし、プローブ回転速度は Fig. 6.8 と同じく $2^\circ/\text{s}$ とした。これらの図を見ると、プローブが垂直回転中の $0^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$ の時にガスセンサ応答が小さくなっており、この方向に高濃度のガスが存在することが分かる。この方向は Fig. 6.10 中のプルームの方向と一致する。

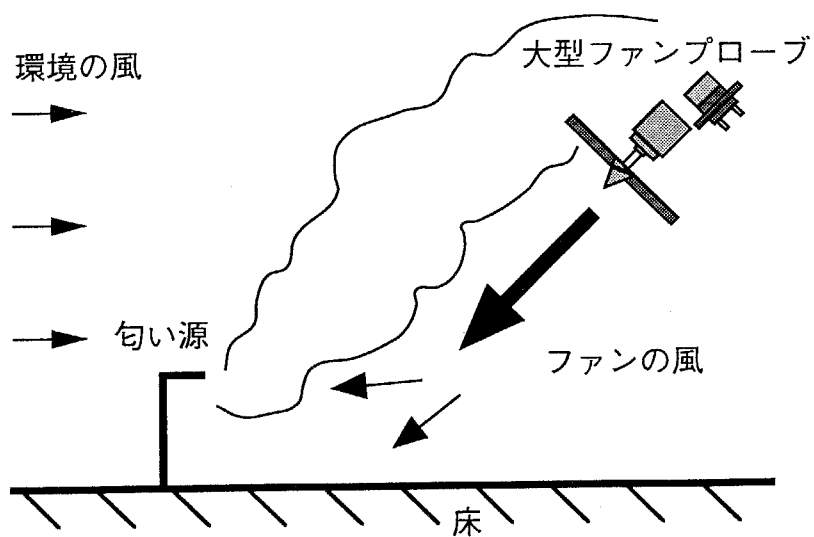
次に、プローブを得られた方向に移動した。Fig. 6.10 中の点 D でプローブを垂直に回転した際のガスセンサ応答を Fig. 6.11 (c) に示す。同図では、 $\varphi = 315^\circ$ 付近でガスセンサ応答が非常に小さくなっている。この方向は匂い源の方向と一致しており、この方向から高濃度のガスを吸引したことを示している。

以上のように、能動サンプリング型プローブを水平、垂直の2方向に回転すれば、3次元的な匂い源探知が可能である。このプローブを人間が手に持ち、得られた匂い源方向に向けて少しずつ動かせばよい。

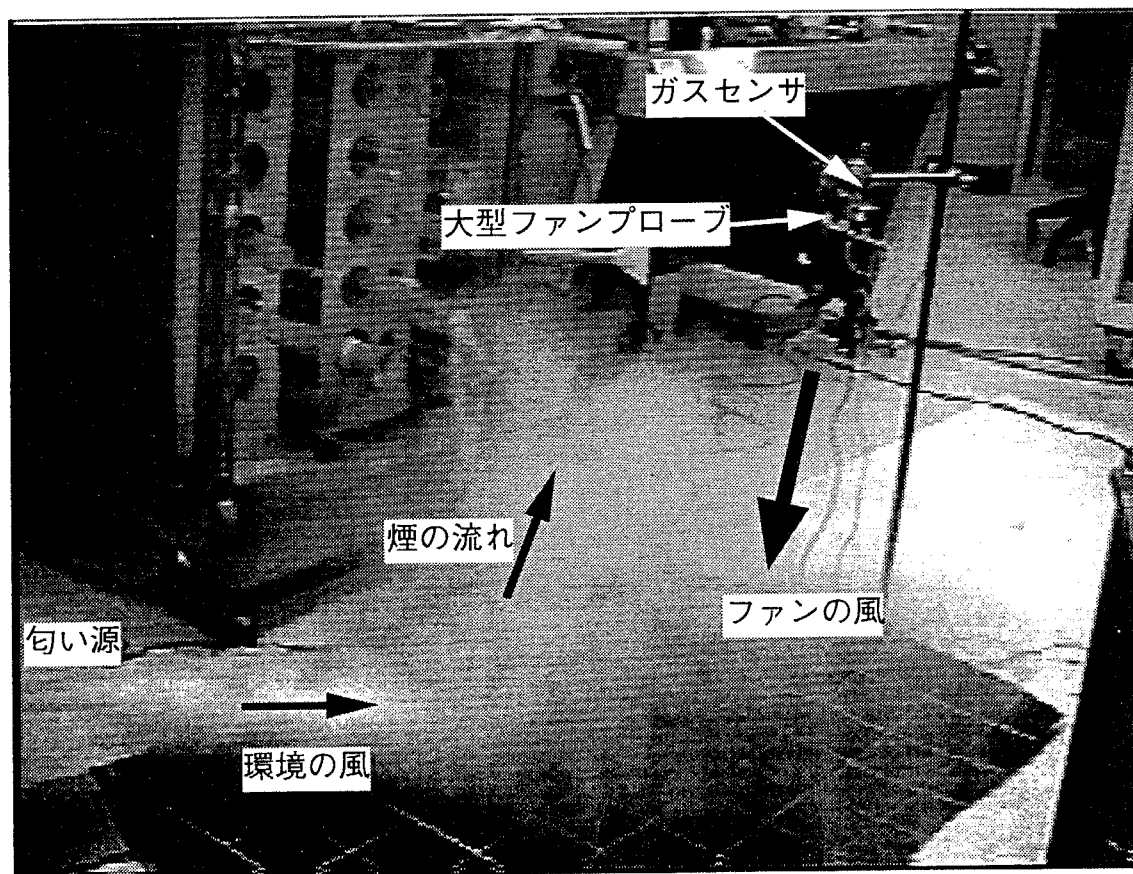
6.5 まとめ

本章では、カイコガの行動メカニズムを模倣して、能動サンプリング型匂い源探知システムを開発した。このシステムでは能動的に風を起こして環境に対して働きかけ、匂い源方向に対応するガスセンサ応答差を作り出す。このため、風速センサが不要となり、風が微弱な環境や風向が不安定な環境への適用が期待される。

また、能動サンプリング型プローブを3次元的に回転することにより、3次元的な匂い源方向の判定が可能なことを示した。現実の環境では匂いが3次元的に広がっており、2次



(a) 模式図



(b) 写真

Fig. 6.9 床面近くで強力な風を起こした場合

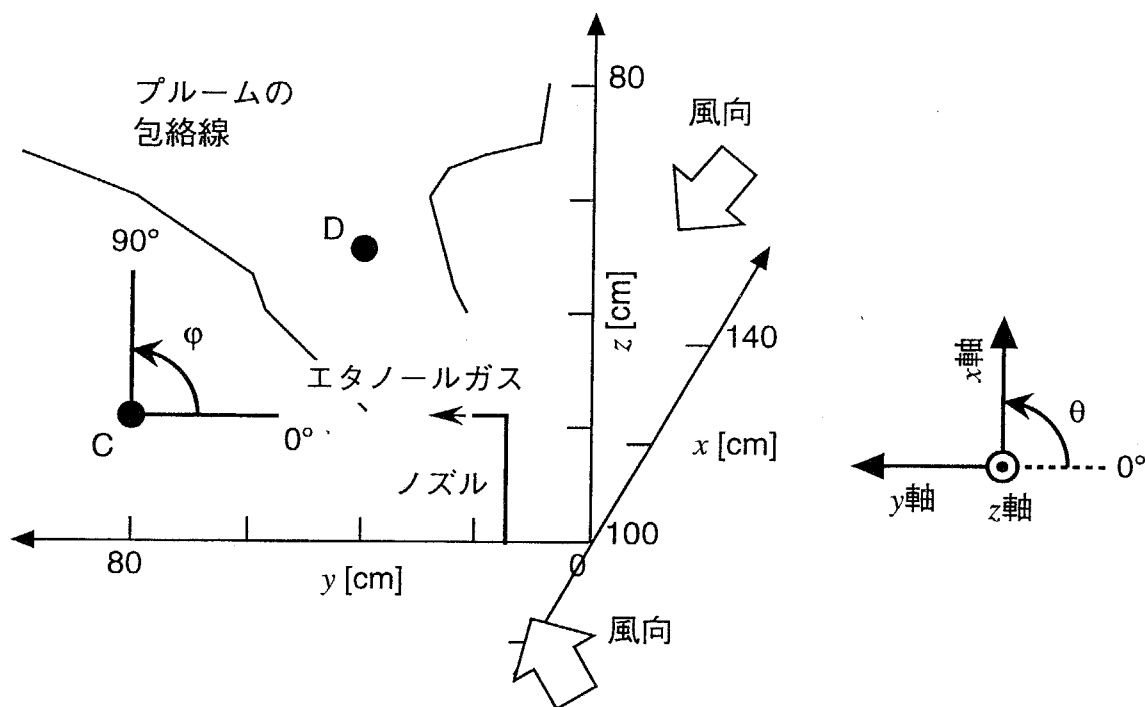
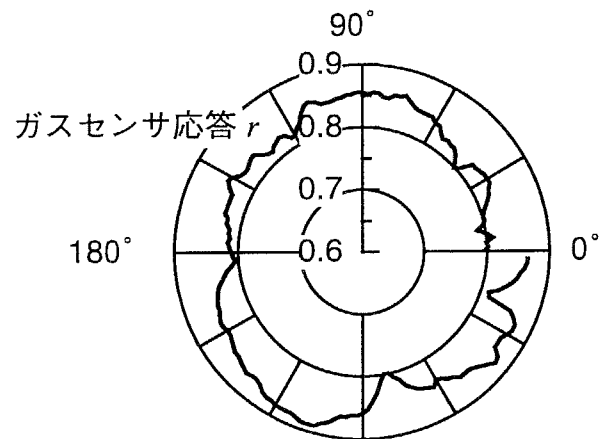


Fig. 6.10 3次元匂い源探知のための実験環境

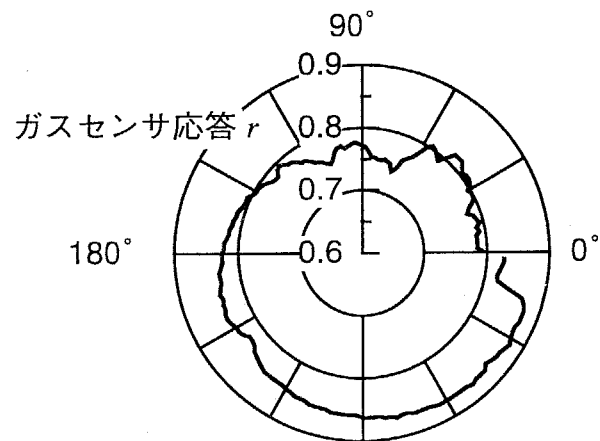
元探知システムが適用できない場合もある。本章では、こうした状況を能動サンプリング型プローブによる3次元匂い源探知によって解決できる可能性を示した。また、能動サンプリング型プローブは構造が簡単のため、プローブを人間が手に持って移動することも可能である。

一方、能動サンプリング型システムの欠点として、方向判定に長時間を要することが挙げられる。これは、匂い源の方向判定の度にプローブを360°回転しているためである。この問題の解決策として、匂い源方向を一度得た後はプローブをその方向の周辺のみ回転させ、効率よく方向判定を行う方法が考えられる。また、別の方法としてガスセンサの数を増やすことが考えられる。これにより一度に得られる情報が増えるので、単に匂い源方向判定法を改良するよりも一層の性能向上が期待できる。そこで、次章では能動サンプリング型システムに複数ガスセンサを用いたシステムの開発を述べる。



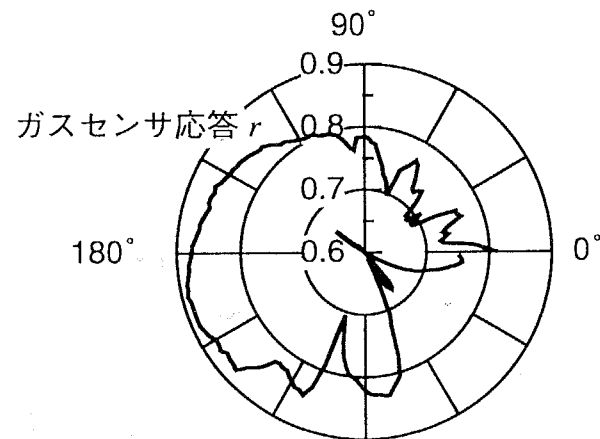
プローブ吸引方向 θ 270°

(a) 点Cにおける水平回転



プローブ吸引方向 ϕ 270°

(b) 点Cにおける垂直回転



プローブ吸引方向 ϕ 270°

(c) 点Dにおける垂直回転

Fig. 6.11 マルチファンプローブによる3次元匂い源探知

Chapter 7

匂い源探知コンパス

7.1 はじめに

前章では、カイコガの羽ばたきを模倣した能動サンプリング型システムについて述べた。このシステムでは風を起こす小型ファンとガスセンサ 1 個だけで匂い源探知が可能であるが、匂い源方向を得るためにはプローブを 360° 回転する必要がある。このため、方向判定に長時間を要するという欠点があった。

そこでこのプローブを改良し、「匂い源探知コンパス」と呼ぶべきシステムを開発した。カイコガは左右に 1 対の触角を持ち、片方の触角に強いフェロモン刺激を受けると、その方向へ体を回転する [55]。匂い源探知コンパスではこの行動メカニズムを模倣し、複数のガスセンサを用いた。センサ応答を比較しながら回転することによって、コンパスは匂い源の方向を方位磁針のように指し示す。

本章では、匂い源探知コンパスについて原理と予備的実験の結果を述べる。能動サンプリング型システムと同様に、匂い源探知コンパスも能動的に風を起こして複数センサ間に応答差を作り出す。そこで、初めに応答差の生じる原理について説明する。次に、カイコガのように 2 次元的に匂い源を探知するコンパスについて述べ、クリーンルームにおける匂い源探知結果を示す。最後に、3 次元匂い源探知コンパスへの拡張について述べ、本方法による 3 次元探知の可能性を示す。

7.2 匂い源探知コンパスの構造と原理

7.2.1 匂い源探知コンパスの構造

2 次元匂い源探知コンパスの構造を Fig. 7.1 に示す。このコンパスには、カイコガの触角に対応させて左右に 1 対の半導体ガスセンサを取り付けた。センサは前章までのシステムと同一の TGS822（フィガロ技研）を用い、左右のセンサ間の距離は 3.6 cm とした。

また、匂い源探知コンパスでは Fig. 7.1 に示すように、カイコガの翅の代わりにファンを使用した。ここでは、Fig. 6.6 (b) に示す大型ファンプローブと同じファン（RE140、マ

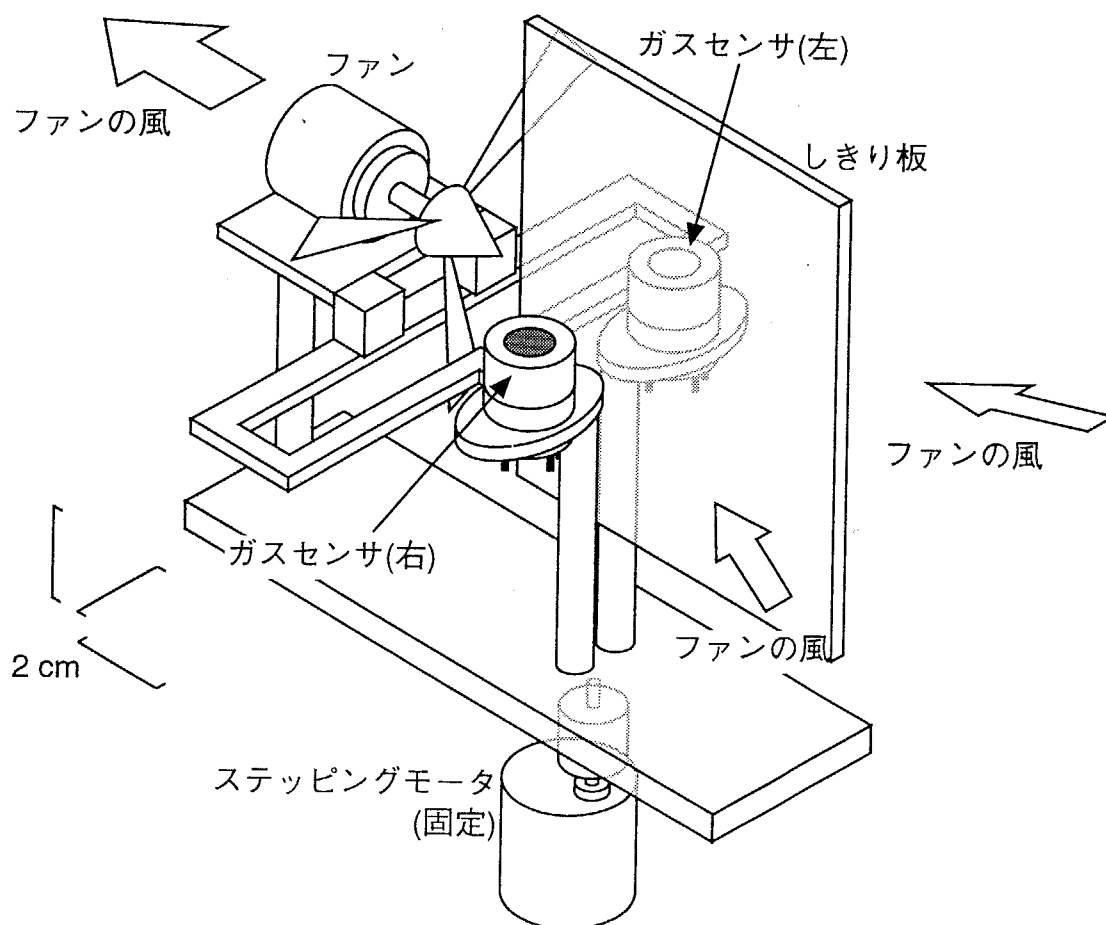


Fig. 7.1 2次元匂い源探知コンパス概略図

ブチモータ)を用いた。ファンを作動すると図中の矢印のような風が生じ、右から吸引した空気が右のセンサに、左の空気が左のセンサにあたる。このため、センサの応答を比較すれば、匂いが漂ってくる方向を判定することができる。

前節では大型ファンプロブの欠点として、ファンの強い風が Fig. 6.9 のように床や壁の近くからガスを巻き上げてしまうことを指摘した。このため同図ではファンの後方から上にガスが回り込んでしまい、プロブが匂い源と逆を向いているにも関わらず高濃度のガスが検出されてしまった。Fig. 7.1 の装置でも同様のガスの回り込みが生じるが、匂い源探知コンパスの場合には複数ガスセンサの応答差を用い、どの方向からガスが回り込んでいるかを判定できる。判定された方向に回転すれば大型ファンを用いた場合でもコンパスを匂い源方向に向けることができるため、マルチファンプロブのような複雑な構造を用いる必要はない。

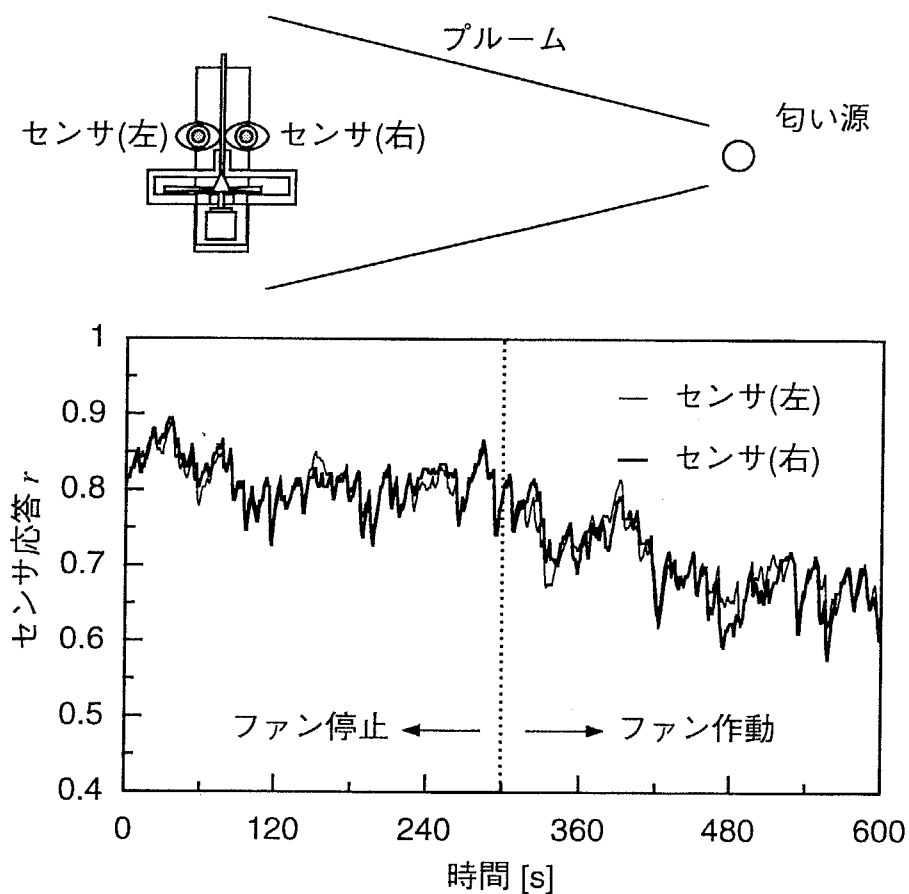
2 個のガスセンサ間のしきり板は、吸引される空気の流れを整え、気流を各々のセンサに分離して導くために用いる。ここでは、吸引ファンの直径よりもわずかに大きい高さ 10 cm のアクリル板を用い、気流の分離を良くするためにセンサから前方に長く板をのばした。長さは 8 cm としたが、十分なセンサ応答差を得るためにはこの程度の長さが必要であった。カイコガの羽ばたきによる風は整っているが、ファンの風はねじれながらファンに吸引されるため、このようなしきり板が必要となる。

初めに、ファンとしきり板の効果を確かめる実験をクリーンルームで行った。この結果を Fig. 7.2 に示す。匂い源から 90 cm 風下のプルーム中心部にコンパスを設置し、図中に示した方向に向けた。

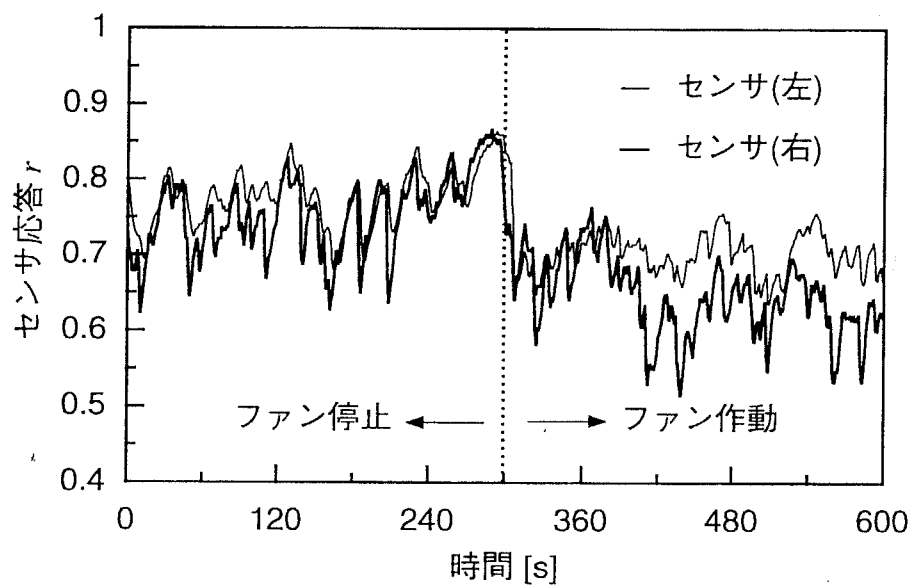
まず、ファンを停止し、しきり板を取り外して測定を行った。この場合、Fig. 7.2 (a) に示すように左右のセンサ応答にはほとんど差がなかった。これは、風と平行な方向の濃度勾配が小さいためである。センサ応答の変動は、風の乱れによりガス濃度分布が不規則に揺らいで生じたものである。また、Fig. 7.2 (a) に示すように、しきり板を取り外した場合にはファンを作動してもセンサ応答差は生じない。これは、ファンの回転に伴い、空気が渦を巻きながら吸引されるためである。この渦のために、右前方から吸引した空気が左右のセンサに均等に当たってしまい、応答差が生じない。したがって、センサの応答差を得るためには、しきり板を用いて風の流れを整えることが必要である。

次に、しきり板を取り付けて測定を行った結果を Fig. 7.2 (b) に示す。この場合、左側のセンサにガスが到達するのをしきり板が妨げる。このために、ファンを停止してもセンサ応答差が生じたが、その大きさは小さい。しかし、ファンを作動することにより、右から高濃度のガスを吸引し、大きな応答差が得られた。

したがって、ファンで起こした風にはセンサ応答差を拡大する効果があることが分かる。ガスセンサを 1 個しか用いていない能動サンプリング型プロブは、プロブを 1 回転しないと匂い源の方向を判定できなかった。これに対し、匂い源探知コンパスではセンサ応答差から匂い源が左右どちらにあるか瞬時に判定できる。次節では、この応答差の生じるメカニズムについて考察を進める。



(a) しきり板なし



(b) しきり板あり

Fig. 7.2 ファンとしきり板の効果

7.2.2 プルーム変形のモデル化

本節では、ガスセンサ間に生じる応答差をプルームの変形によって説明する。簡単のため、Fig. 7.3 (a) のようにコンパスがプルーム中心軸上に設置され、匂い源と直角方向を向いている場合を考える。この方向に注目するのは、これが最大応答差の得られる方向だからである。

プルームの形状は風の乱れのため複雑になり、不規則に変動する。しかし、濃度の時間平均値の分布は、第2章で述べたロバートのプルームモデルで近似することができる。Fig. 7.3 (b) のように匂い源を原点に座標系 (x, y, z) を考え、左から右へ一様な風 U が吹いていると仮定する。このとき、濃度の時間平均値 C_0 は式 (2.24) で与えられる。ここでは $z = 0$ の平面のみを考えるものとする、

$$C_0(x, y) = \frac{q}{4\pi K R} \exp \left[-\frac{U}{2K} (R - x) \right], R = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (7.1)$$

となる。

Fig. 7.3 (a) において匂い源からコンパスまでの距離を R_c とし、同図 (b) のようにセンサ間の距離を $2d$ とする。また、左右センサの位置における時間平均ガス濃度をそれぞれ C_l 、 C_r とする。このとき、式 (7.1) より

$$C_l/C_r = C_0(R_c - d, 0)/C_0(R_c + d, 0) = \frac{R_c + d}{R_c - d} \quad (7.2)$$

を得る。したがって、 $R_c \gg d$ のときにはほとんど応答差が得られない。

次に、ファンを作動して空気を引き寄せた場合を考える。ここでは、ファンの風が層流であり、ファンの幅の範囲内では下向きの風速 u が生じると仮定する。このとき、Fig. 7.3 (b) のようにファンの部分でプルームが引き寄せられて移動すると考えられる。このため、濃度勾配が比較的急峻な y 軸方向にセンサをずらして配置した場合と同等の濃度差が得られる。プルーム変形の角度 ϕ について $\tan \phi = u/U$ が成り立つと考えられるので、ファンの半径を $w = 4.2 \text{ cm}$ とすると、

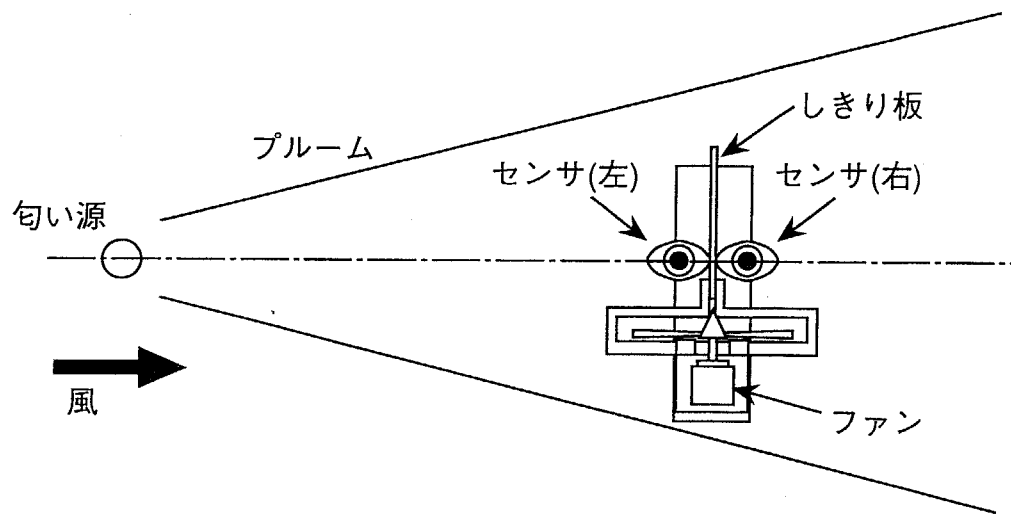
$$\begin{aligned} C_l/C_r &= C_0(R_c - d, (w - d) \tan \phi) / C_0(R_c + d, (w + d) \tan \phi) \\ &= C_0 \left(R_c - d, \frac{u(w - d)}{U} \right) / C_0 \left(R_c + d, \frac{u(w + d)}{U} \right) \end{aligned} \quad (7.3)$$

となる。ただし、センサの間隔は $2d = 3.6 \text{ cm}$ である。

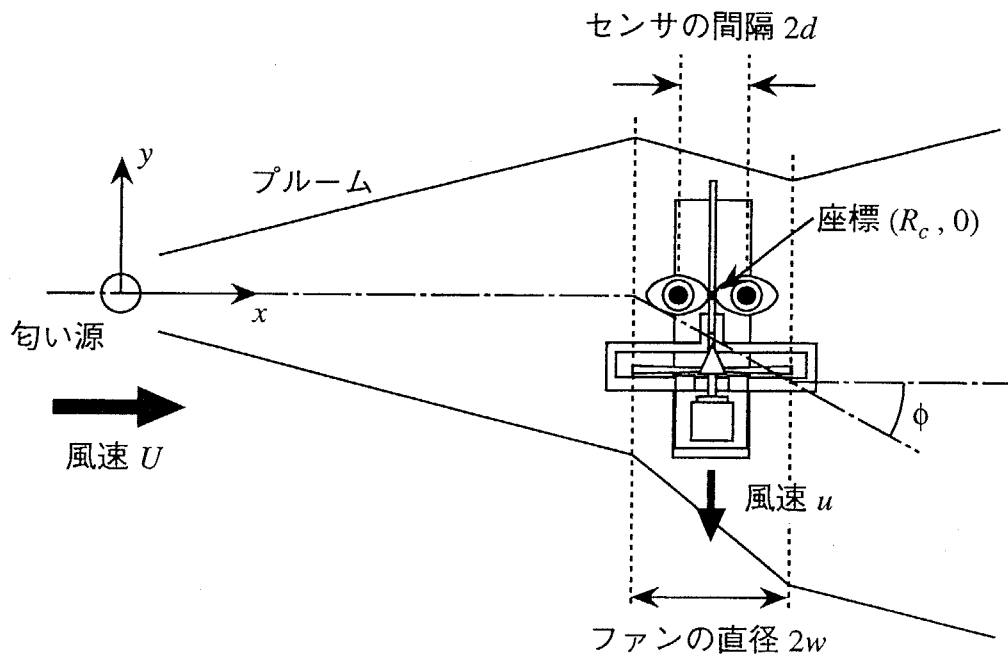
このように、匂い源探知コンパスの場合にはファンの風で能動的に濃度分布を変更することによって応答差を作り出す。なお、本章ではガスセンサの応答差 Δr を以下のように定義する。

$$\Delta r = r_r - r_l \quad (7.4)$$

ただし、 r_r は右のガスセンサ、 r_l は左のガスセンサの応答を表す。センサ応答はガス濃度の単調減少関数であるため、匂い源が Fig. 7.3 のようにコンパスの左側にある場合には $r_l < r_r$ となる。よって、このとき $\Delta r > 0$ となる。



(a) ファンを停止した場合



(b) ファンを作動した場合

Fig. 7.3 ファンの風によるプルームの変形

また、以上のモデルにはしきり板の効果が入っていないが、これは流れを整える役目を担っている。しきり板を挿入することで実際の系がモデルに近くなり、Fig. 7.3 に示すような理想状態に近いプルーム変形が生じる。

7.2.3 評価実験

初めに、Fig. 2.12 に示す風洞を用い、プルームの変形を確かめた。この結果を Fig. 7.4 に示す。同図では Fig. 2.12 の座標系における点 (32, 35) にコンパスを設置し、コンパス周辺のガス濃度分布を測定した。匂い源の場所やガス噴出量などの実験条件は Fig. 2.16 と等しい。また、風速計による風洞風速の実測値は 18.4 cm/s であった (HONFIELD PROBE MODEL QB、本田工業)。図中の点はガスセンサ応答の測定点を表し、各点における応答の 5 分間の平均値を用いて等高線を描いた。

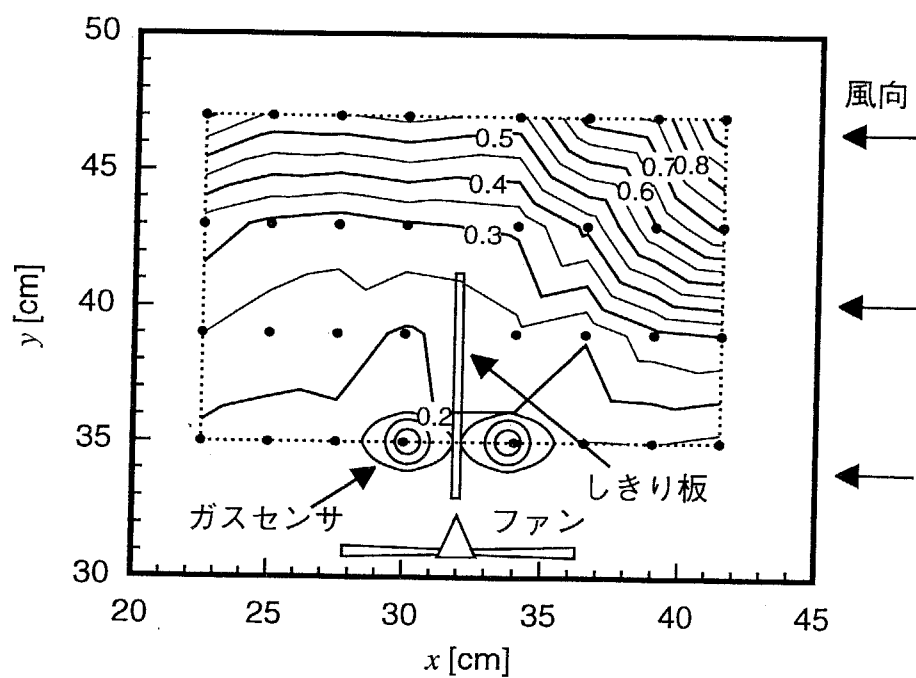
Fig. 7.4 (a) はファンを停止した際のガス濃度分布である。この場合、エタノールガスは風洞の風に運ばれ、右から左へ直線的に流れる。一方、Fig. 7.4 (b) はファンを電圧 0.6 V で作動したときの濃度分布を表す。同図では、ガスがファンに向けて上から下へ吸引されている。この結果、2 個のセンサの間に等高線がのびており、センサ応答差が生じたことが分かる。ファンの風速をファン後方 30 cm の地点で測定したところ、23.9 cm/s であった。このときプルームの曲がる角度は、 $\phi = 52.4^\circ$ となる。Fig. 7.4 (b) 中の矢印はこの角度を表しており、等高線の角度とほぼ一致している。エタノールガスがしきり板を避けて回り込んでいる傾向はあるものの、プルーム変形をほぼ Fig. 7.3 に示すファンの吸引効果で説明できることが分かる。

しかし、Fig. 7.4 (b) では、風洞の幅が狭いためファンの後方に排出した風が壁に当たり、戻ってきてしまっている。これによりプルームの形が崩れ、ファンによる吸引以前に $x = 41.5$ 付近ですでに濃度分布が変化している。ファンの風上側にあるこの場所は本来ファンの影響が小さく、同図 (a) と同様にガス濃度が低いはずであるが、風が戻ってくる影響で濃度が高くなった。このため、実際のセンサ応答は式 (7.3) とあまり一致しなかった。

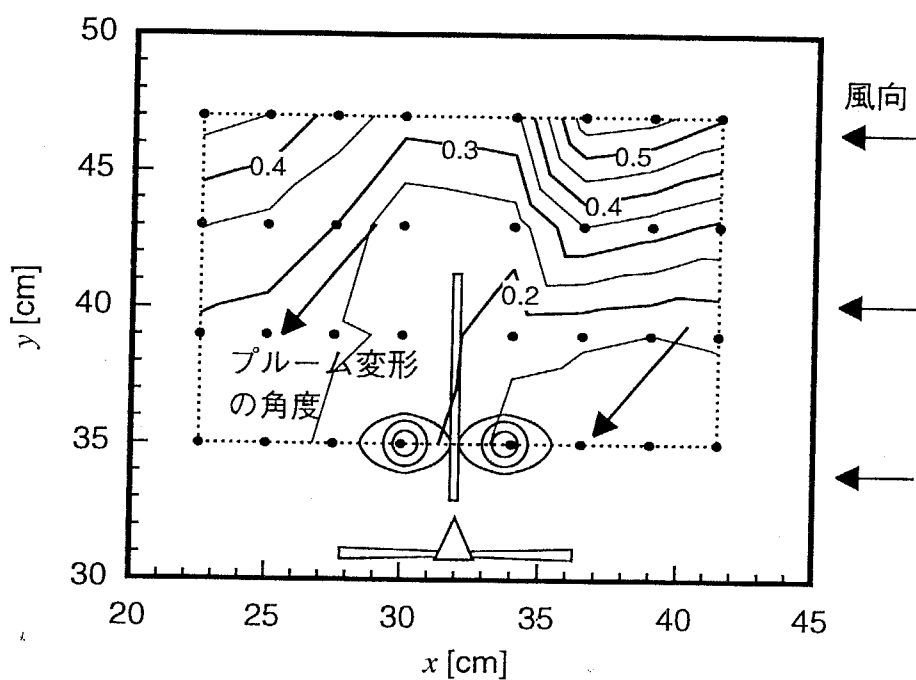
そこで、プルーム変形モデルを確かめる実験をクリーンルームで行った。コンパスを Fig. 2.20 に示す座標系で点 (180, 50) に設置した際のガスセンサ応答を Fig. 7.5 に示す。コンパスの設置高さは床面から 12 cm とした。この設置位置は Fig. 2.20 におけるプルーム中心軸上にあたり、匂い源からの距離は 50 cm である。また、Fig. 7.5 測定時の環境風速は約 13 cm/s であった (HONFIELD PROBE MODEL QB、本田工業)。Fig. 7.5 はガスセンサ応答の 5 分間の平均値を示し、誤差棒はこの間の標準偏差を示す。コンパスの設置方向は Fig. 7.3 と同じであり、このとき Δr は正となる。

Fig. 7.5 に示すように、ファンを停止して吸引風速を 0 とするとセンサ応答差はほとんど得られない。ファンの風速を増すにつれて得られるセンサ応答差も大きくなる。これはプルームの変形が大きくなることによって説明できる。しかし、ファンの風速を 107.9 cm/s 以上にすると、センサ応答差が減少し始めた。この理由は後述する。

先述のモデルでは、ファンでプルームを吸引することを、センサを前方にずらして配置することと等価であると考えた。Fig. 7.5 には、ガスセンサを Fig. 7.3 中の y 軸方向に実際にずらした場合の測定結果も示した。センサを置く座標は式 (7.3) により求め、Fig. 7.3



(a) ファンを停止した場合



(b) ファンを作動した場合

Fig. 7.4 ファンの吸引効果

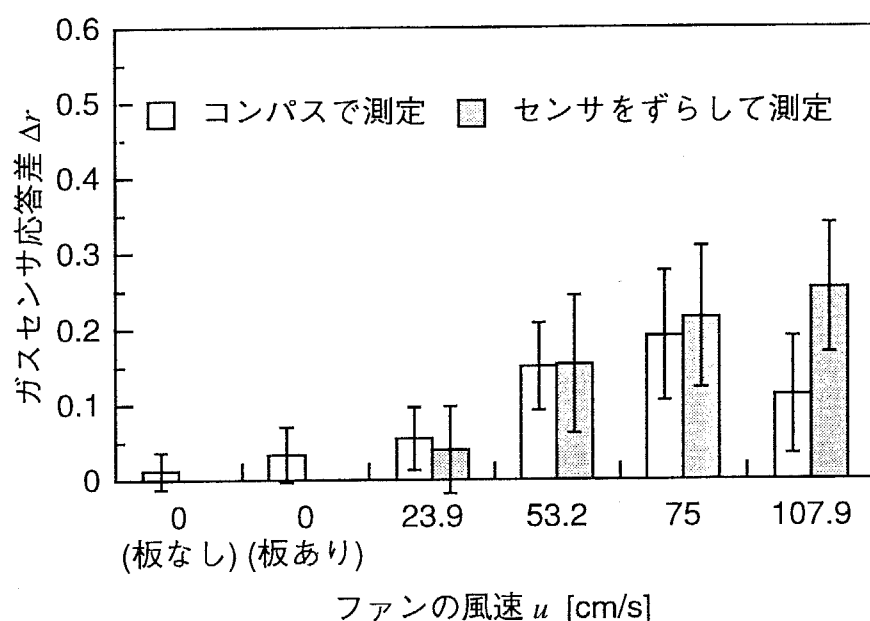


Fig. 7.5 ファンの風量によるセンサ応答差の変化 (匂い源から風下 0.5 m)

の座標系で左のセンサは $(R_c - d, (w - d) \tan \phi)$ 、右のセンサは $(R_c + d, (w + d) \tan \phi)$ とした。このときのセンサの x 軸からの移動距離を Table 7.1 に示す。Fig. 7.5 に示すように、センサをずらして配置した場合の応答差はコンパスによって得られる応答差にほぼ等しい。

しかし、ファンの風速が大きい 107.9 cm/s の場合には両者の値が大きく異なる。これは、ファンの吸引効果に限界があるためと考えられる。Table 7.1 では、 $u = 107.9$ cm/s のときには右のガスセンサを 52.9 cm 前方にずらした場合と等価なセンサ応答差が得られるとしている。しかし、実際にはファンの風が届く範囲に限界があり、52.9 cm 前方から空気を吸引することはできない。

Table 7.1 ガスセンサの移動距離

ファンの電圧 [V]	ファンの風速 u [cm/s]	移動距離 [cm]	
		センサ (左) $(w - d) \tan \phi$	センサ (右) $(w + d) \tan \phi$
0.60	23.9	4.5	11.2
0.75	53.2	10.3	25.7
1.00	75.0	14.8	37.2
1.50	107.9	21.2	52.9

Table 7.2 ファンの吸引効果がおおよそ限界距離

ファンの電圧 [V]	吸引風速 u [cm/s]	限界距離 [cm]
0.60	23.9	14
0.75	53.2	19
1.00	75.0	21
1.50	107.9	26

そこで、煙によりセンサ周辺の流れを可視化し、ファンによる吸引効果がおおよそ限界の距離を求めた。クリーンルームにコンパスを設置し、火をつけた線香をコンパスの前で動かして吸引の限界距離を観察した結果を Table 7.2 に示す。限界距離は肉眼で観察したので、おおよそその値である。この表と Table 7.1 を比較すると、 $u \geq 53.2$ s cm/s のときにはモデルから求めたセンサの移動距離がファンによる吸引限界を越えていることが分かる。

この点を考慮した測定結果を Fig. 7.6 に示す。同図では、センサの等価移動距離が吸引限界を越えても、センサを吸引限界距離までしか移動しないものとした。具体的には、 $u \geq 53.2$ cm/s の場合に右のセンサの移動距離を吸引限界距離に置き換えた。このように吸引限界を考慮すると、全ての風速に対してコンパスの応答差とセンサをずらした場合の応答差が良く一致した。

また、Fig. 7.5 ではファンの風速を大きくしすぎると、センサ応答差が減少する結果となった。これも、ファンの吸引限界により説明される。ファンの風速を大きくすると、右側のセンサの等価移動距離が先に吸引限界に達する。このときの風速以上にファンの風速を増すと、左のセンサの等価移動距離も吸引限界に近付き、左右センサの移動距離の差は縮まる。このために、センサ応答差が減少する。

匂い源から離れた Fig. 2.20 中の点 (100, 60) で同様の測定を行った結果を Fig. 7.7 に示す。この場合にも、コンパスの応答差とセンサをずらした際の応答差が良く一致している。したがって、ファンの作動によって得られる応答差をプルームの変形によって説明できることが確かめられた。

これを利用すれば、コンパスによって得られる応答差を予測することができる。第2章で述べたように、匂い源付近のプルーム形状はロバートのプルームモデルで近似することができる。そこで、ファンの吸引によって生じるセンサ応答差を式 (7.3) に従ってロバートのプルームモデルから計算した。この結果を Fig. 7.8 に示す。同図のように、モデルから計算した応答差は実測値と良く一致した。

したがって、コンパスを使用する環境の乱流拡散係数やガス放出量などのおおよその値が分かれば、得られるセンサ応答差を見積もることができる。これを利用すれば、環境に応じた最適なコンパスの大きさを求めることができる。式 (7.3) は、 d と w が大きくなればそれだけ大きな応答差が得られることを示している。しかし、環境をなるべく乱さないようにするには w は小さい方が望ましいので、必要最小限の応答差が得られるように w を最小化するのがよい。

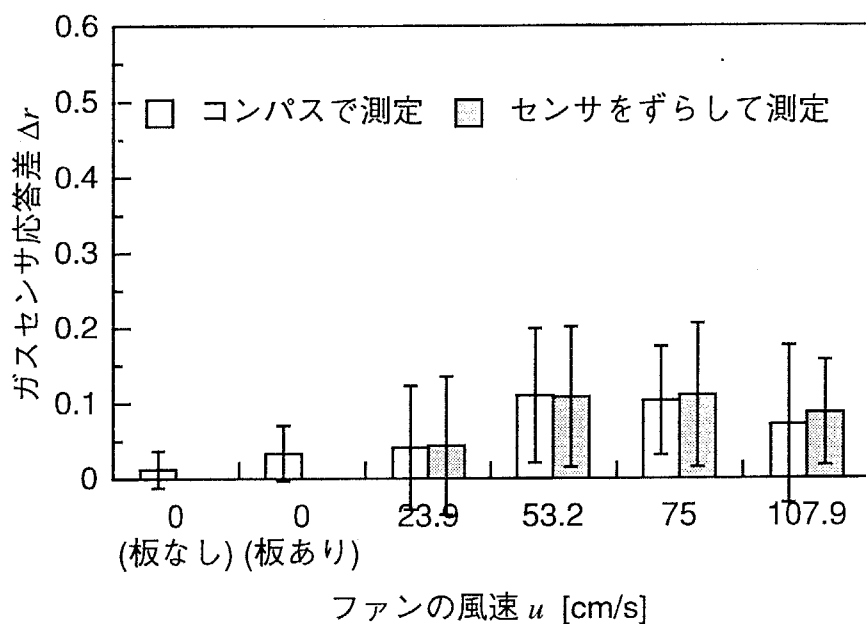


Fig. 7.6 吸引限界を考慮したモデルによるセンサ応答差 (匂い源から風下 0.5 m)

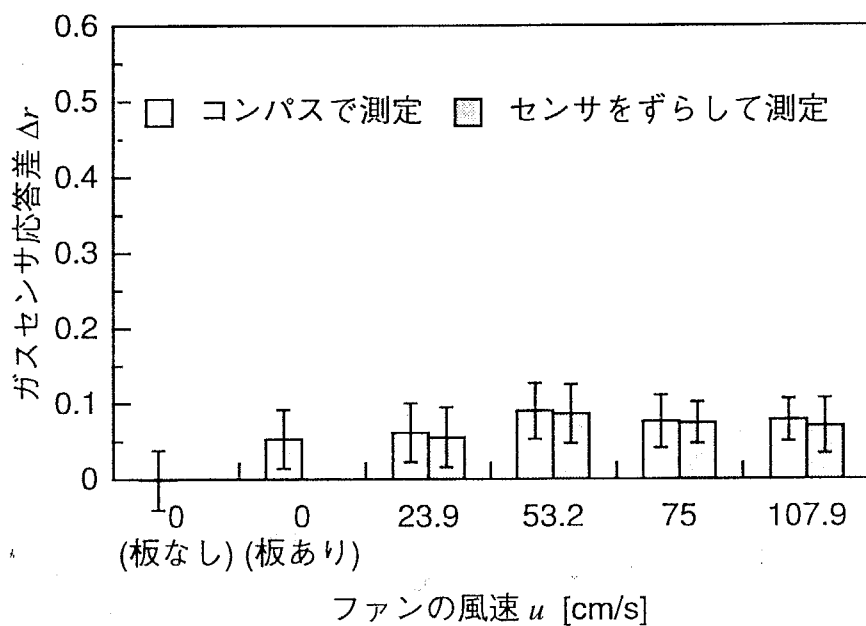


Fig. 7.7 匂い源から遠い点におけるセンサ応答差

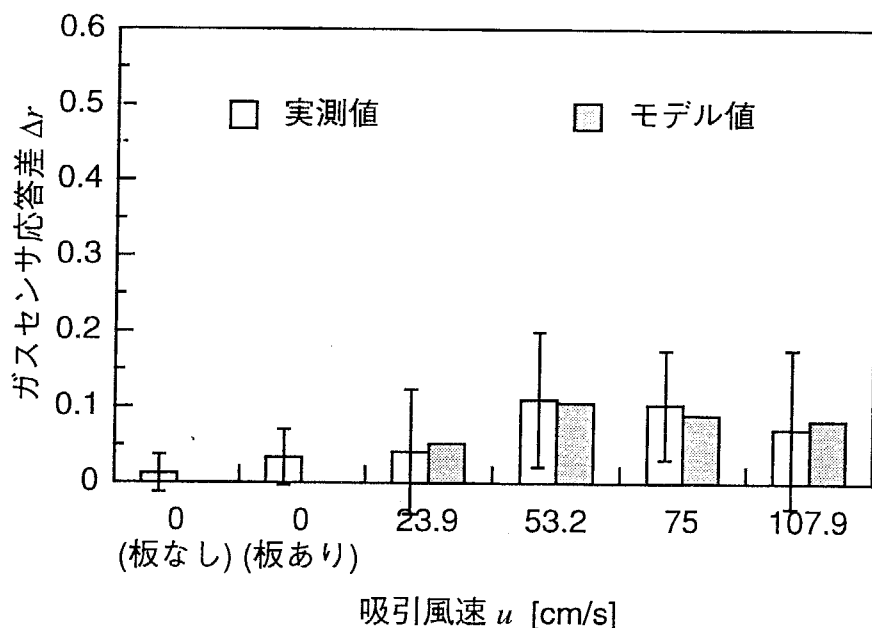


Fig. 7.8 ロバートのプルームモデルによる応答差の予測 (匂い源から風下 0.5 m)

そこで、クリーンルーム環境において匂い源から 1 m 風下の地点で得られるセンサ応答差をロバートのプルームモデルから計算した。センサ応答のドリフトなどを考慮すると、確実に応答差を検出するためには $\Delta r = 0.05$ 程度の差が必要であると考えられる。環境を乱さないという観点からはファンの風速を最小の $u = 23.9$ cm/s とするのが良いが、匂い源から 0.5 m しか離れていない地点においてさえ Fig. 7.8 のように十分な応答差が得られていない。そこで、 $u = 53.2$ cm/s とした。Fig. 7.1 と相似な形のコンパスを考え、 $d/w = \text{一定}$ としてファンの半径 w を変えたときのセンサ応答差を Fig. 7.9 に示す。ファンの大きさを変えたときに吸引限界距離がどのように変化するかは不明なので、同図では吸引限界を考慮せずに計算を行った。Fig. 7.9 では $w = 3$ cm のときに $\Delta r > 0.05$ となった。しかし、この値は吸引限界を考慮していない計算値であり、実際に得られる応答差はこの値よりも小さくなる可能性がある。したがって、この地点で探知を行うためには $w \geq 4$ cm が必要であり、Fig. 7.1 に示すコンパス ($w = 4.2$ cm) は最小の大きさであると言える。なお、ここではプルーム内について考えたが、プルーム外で得られるセンサ応答差も同様に考えることができる。

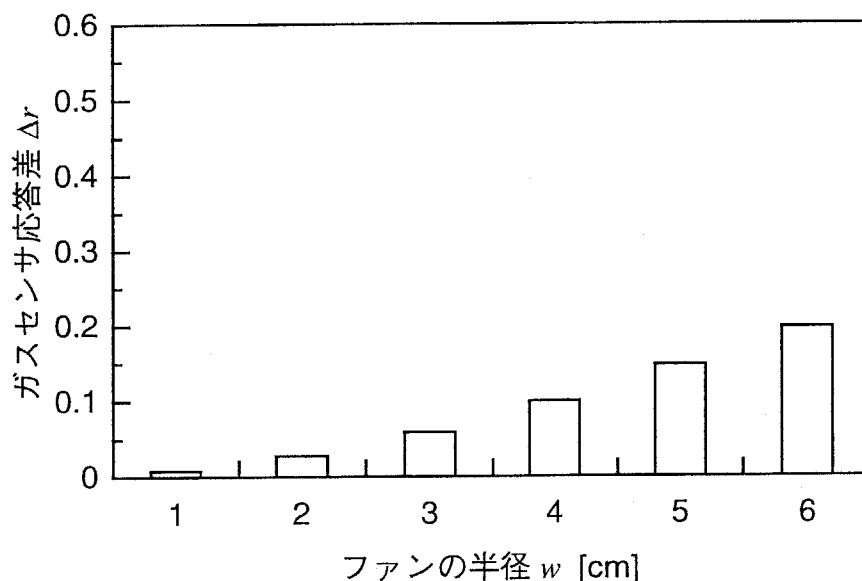


Fig. 7.9 ファンの大きさによるセンサ応答差の変化（匂い源から風下 1 m）

7.3 匂い源探知実験の結果

7.3.1 2次元コンパスによる匂い源探知実験

Fig. 7.1 に示すコンパスを用いて、クリーンルームで匂い源探知実験を行った。以下ではファンの風速を Table 7.1 における最大値の 107.9 cm/s に設定した。初めに、Fig. 7.2 と同一の地点でコンパスを 360° 回転し、センサ応答差を測定した。この結果を Fig. 7.10 に示す。同図ではコンパスが匂い源を向いたときの方向を $\theta = 0^\circ$ とし、左回りの角度を正とした。このように角度をとると、 $0^\circ < \theta < 180^\circ$ の時には匂い源がコンパスの右側に位置する。したがって、右のセンサ応答値 r_r が小さくなり、式 (7.4) によって定義される Δr は負となる。逆に、 $180^\circ < \theta < 360^\circ$ の時には $\Delta r > 0$ となる。

したがって、 $\Delta r < 0$ の時には右回り、 $\Delta r > 0$ の時には左回りにコンパスを回転すれば、 $\Delta r = 0$ かつ $d\Delta r/d\theta < 0$ となる $\theta = 0^\circ$ にコンパスの方向を向けることができる。匂い源と逆向きの $\theta = 180^\circ$ でも $\Delta r = 0$ となるが、この近傍では $d\Delta r/d\theta > 0$ となる。このため、コンパスは 180° の方向に停留せず、この方向から離れる向きに回転する。

しかし、回転速度を増すとセンサ応答に Fig. 7.10 のような遅れが生じ、センサ応答差を正しく検出できなくなる。そこで、以降の実験ではコンパスの回転速度を $2^\circ/\text{s}$ に固定した。クリーンルームにおいて匂い源の方向を $\Delta r = 0$ かつ $d\Delta r/d\theta < 0$ の条件の下に推定した結果を Fig. 7.11 に示す。第 2 章で述べたように、匂い源は床から高さ 23.5 cm の場所に設置される。図中のブルームの包絡線はこの高さにおいてガスセンサ応答の 5 分間の平均値が 0.8 となる等ガス濃度線を表す。しかし、匂い源付近では風が上から吹き下ろすため、ブルームは床面に近い高さ 12 cm 付近を 2 次的に広がる。

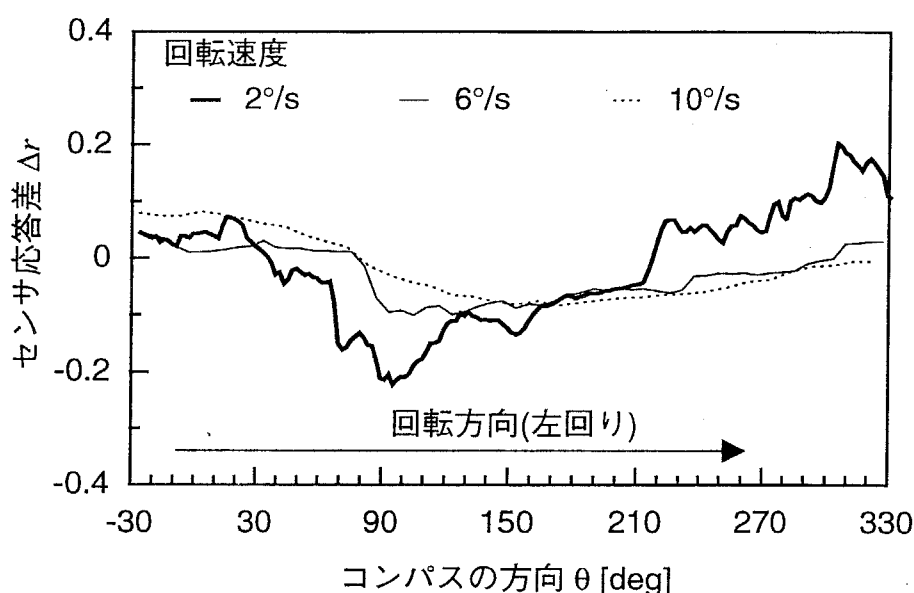


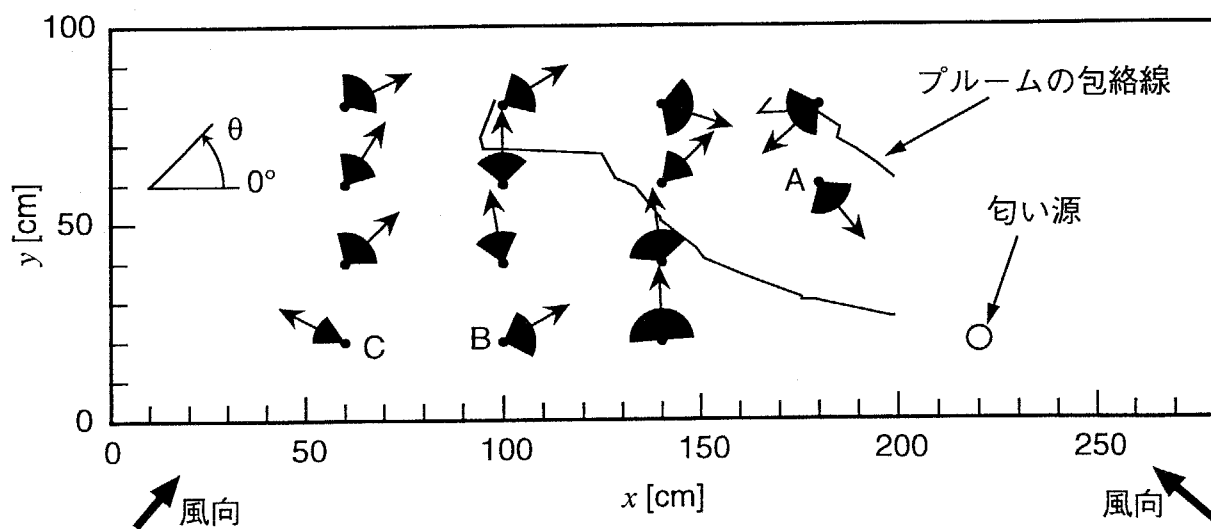
Fig. 7.10 センサ応答差の回転特性

Fig. 7.11 (a) ではこの高さ 12 cm にコンパスを置き、方向推定を行った。コンパスの回転方法は、毎秒ガスセンサ応答を測定し、濃度の高い方向へ $2^\circ/\text{s}$ で回転するものとした。そして、 x 軸の正方向を 0° として左回りに角度をとり、コンパスが指した方向 θ を 10 分間測定した。コンパスの初期方向は $\theta_0 = 180^\circ$ とした。Fig. 7.11 中の矢印は後半 5 分間における θ の平均値 θ_{av} を示し、扇形はその間の θ の最大変位を表す。矢印が示すように、プルーム外ではプルームに向かう方向、プルーム内では匂い源の方向が得られたが、その変動は比較的大きい。

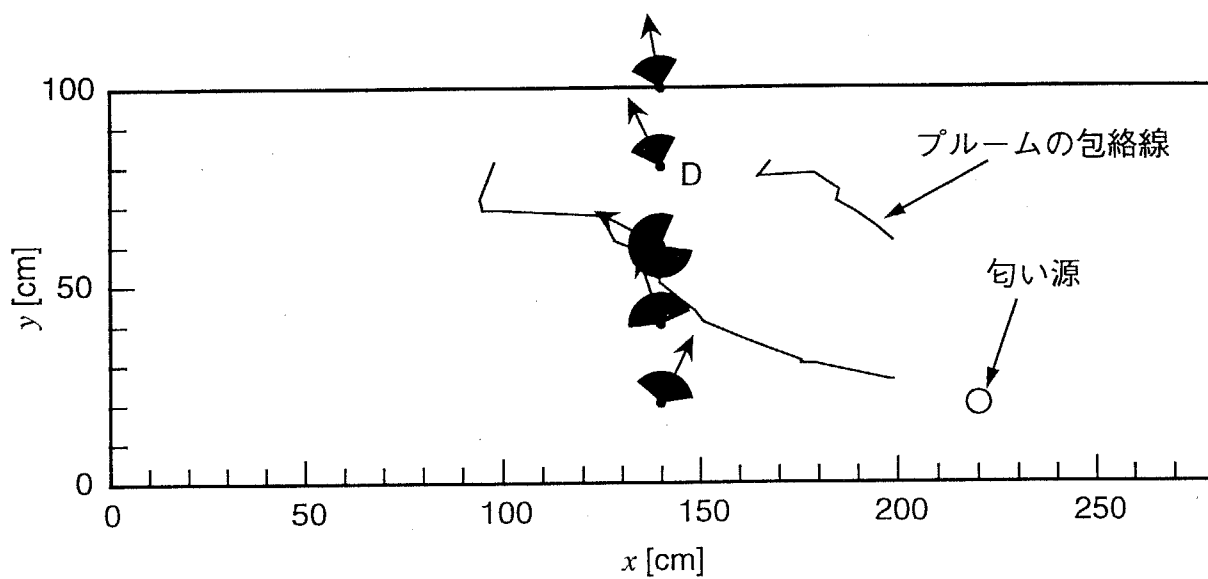
この原因は二つあり、一つはセンサ応答の遅れである。Fig. 7.10 に示すように、コンパスの回転速度を $2^\circ/\text{s}$ に落としても、 $\Delta r = 0$ となる角度が $\theta = 0^\circ$ よりも遅れる。この遅れのためにコンパスの方向が振動してしまうので、遅れを考慮した方向制御アルゴリズムの開発が望まれる。

二つめの原因は、風の乱れによるプルーム形状の変動である。このため、コンパスが匂い源の方向を向いてもセンサ応答差がゼロの周りに変動し、コンパスの方向が不規則に振動する。プルームが蛇行した場合には、コンパスが蛇行方向に回転するが、細かい変動に逐一对応してはコンパスの方向が不安定になってしまう。そこで、細かい変動分を取り除き、動作速度と方向安定性を両立するアルゴリズムの開発が望まれる。以上の 2 点を考慮したアルゴリズム開発については次章で述べる。

Fig. 7.11 (a) 中の点 A、B におけるガスセンサ応答とコンパスの動作を Fig. 7.12 に示す。点 A はプルーム内、点 B はプルーム外の点である。同図より、コンパスの方向 θ が数分で θ_{av} 近くに収束し、その後およそ $\pm 60^\circ$ の範囲で変動していることが分かる。収束に要した時間は Fig. 7.12 (a) で約 1 分、同図 (b) で約 3 分であり、点 B の場合の方が収



(a) コンパスの高さを12cmにした場合



(b) コンパスの高さを23.5cmにした場合

Fig. 7.11 匂い源の方向推定結果

束に長時間を要した。これは、点 B におけるガス濃度が低く、センサ応答差が小さいためである。Fig. 7.12 (b) では、センサ応答差が小さいために時刻 120 秒付近で方向判定を誤り、収束方向 θ_{av} から離れる向きにコンパスが回転してしまった。しかし、風の乱れにより時刻 150 秒付近で点 B までブルームが蛇行してきた結果、大きなセンサ応答のディップが観測された。このときのセンサ応答によりコンパスが正しい方向へ向き直っている。

このように、ガス濃度が低い場所では方向判定が困難になる。実際に、点 B よりも更にブルームから離れた点 C では、ガスがほとんど検出されなかったために匂い源方向が推定されなかった。コンパスを実際に使用する際には、センサ応答がない場合に方向判定不可能である旨を表示する必要がある。

さらに、Fig. 7.11 (b) の点 D のようにブルームと異なる高さにコンパスを置いた場合も匂い源方向の推定ができなかった。このような場合には、次節で述べる 3 次元匂い源探知コンパスが必要である。

7.3.2 3 次元コンパスによる匂い源探知実験

第 6 章で述べたように、現実環境では 3 次元的な匂い源探知が必要になることがある。前節の実験結果も 3 次元探知の必要性を示している。そこで、Fig. 7.1 のコンパスを発展させ、3 次元匂い源探知コンパスを製作した。その構造を Fig. 7.13 に示す。

3 次元コンパスでは、前後左右の方向判定を行うために 4 個のガスセンサを用いる。これをコンパクトに取り付けるため、Fig. 7.1 とはセンサの取付向きを変えた。第 2 章で述べたようにセンサ素子は防爆用の金網で保護されており、素子に直接気流が当たることはない。したがって、センサの向きを変えても応答はほとんど変化しない。Fig. 7.13 では隣接するセンサの間隔を 3 cm とし、また Fig. 7.1 と同じ大きさのしきり板を 2 枚取り付けた。このセンサ間隔は、ファンの幅内に 4 個のガスセンサが収まる範囲で最大となるように決めた。

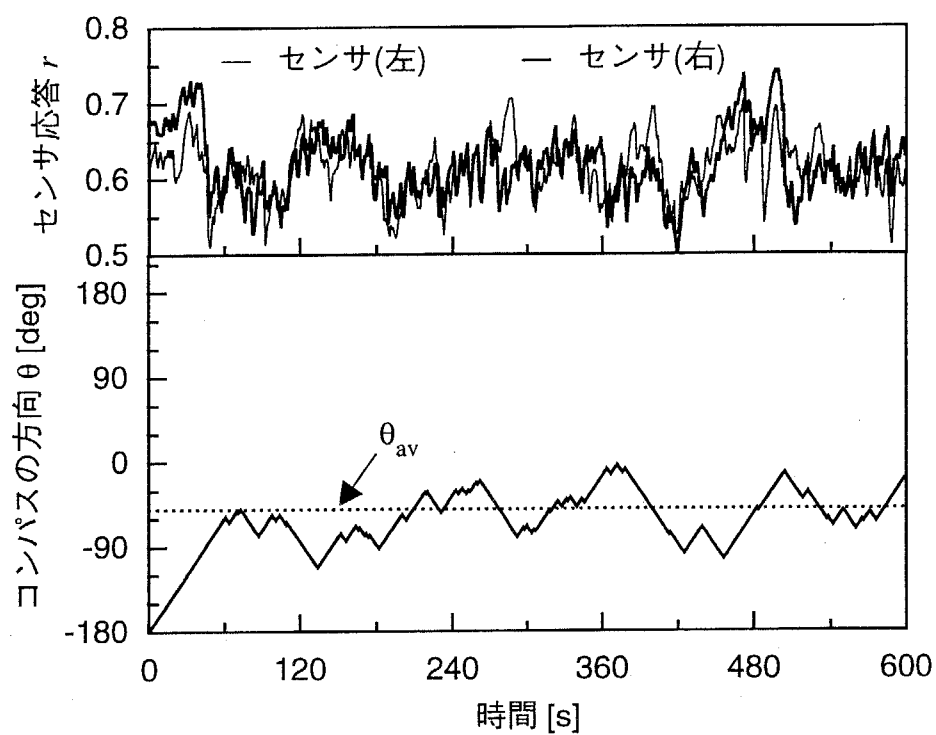
3 次元匂い源探知コンパスでは、第 4 章で説明した自走型匂い源探知システムと同様に 4 個のガスセンサの応答から濃度勾配を計算する。ここではコンパス先端に固定された座標系 (x_c, y_c) を Fig. 7.13 のようにとり、ガス濃度勾配ベクトル $\mathbf{g}$ を

$$\mathbf{g} = \begin{pmatrix} g_{xc} \\ g_{yc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_4 - r_2 \\ r_3 - r_1 \end{pmatrix} \quad (7.5)$$

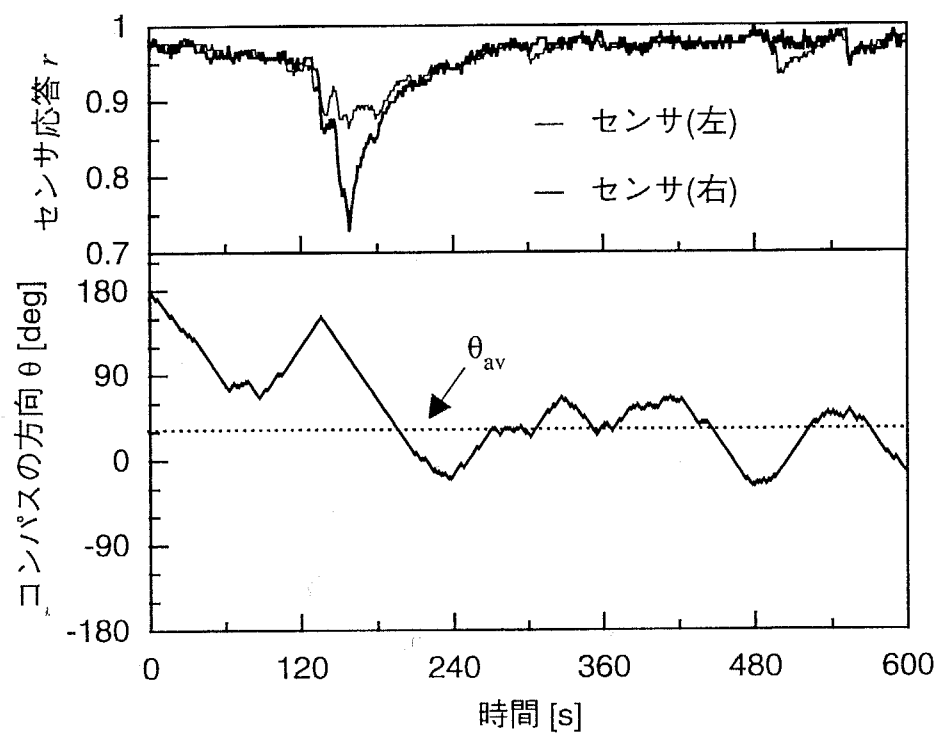
と定義する。ただし、 g_{xc} 、 g_{yc} はそれぞれ x_c 、 y_c 軸方向の濃度勾配を表す。また、 $r_i, i = 1, \dots, 4$ は Fig. 7.13 中のセンサ i の応答を表す。

匂い源の方向推定は、得られたガス濃度勾配の方向にコンパスを 3 次元的に回転することによって行う。まず、スタンドに固定されたモータ 1 によりコンパスとモータ 2 を一緒に仰角方向に回転する。さらにモータ 2 を回転することにより、コンパスを 3 次元の任意の方向に向けることができる。以下の実験では 1 秒ごとに $\mathbf{g}$ を測定し、その方向にコンパスを $2^\circ/\text{s}$ で回転することによって匂い源の方向判定を行った。

3 次元コンパスを用いた方向推定実験は、Fig. 6.10 に示す実験環境で行った。この環境は、匂い源位置を Fig. 7.11 の座標系で (100, 20) に移動したものである。この場所では Fig. 6.10



(a) プルーム内 (点A)



(b) プルーム外 (点B)

Fig. 7.12 匂い源探知コンパスの動作例

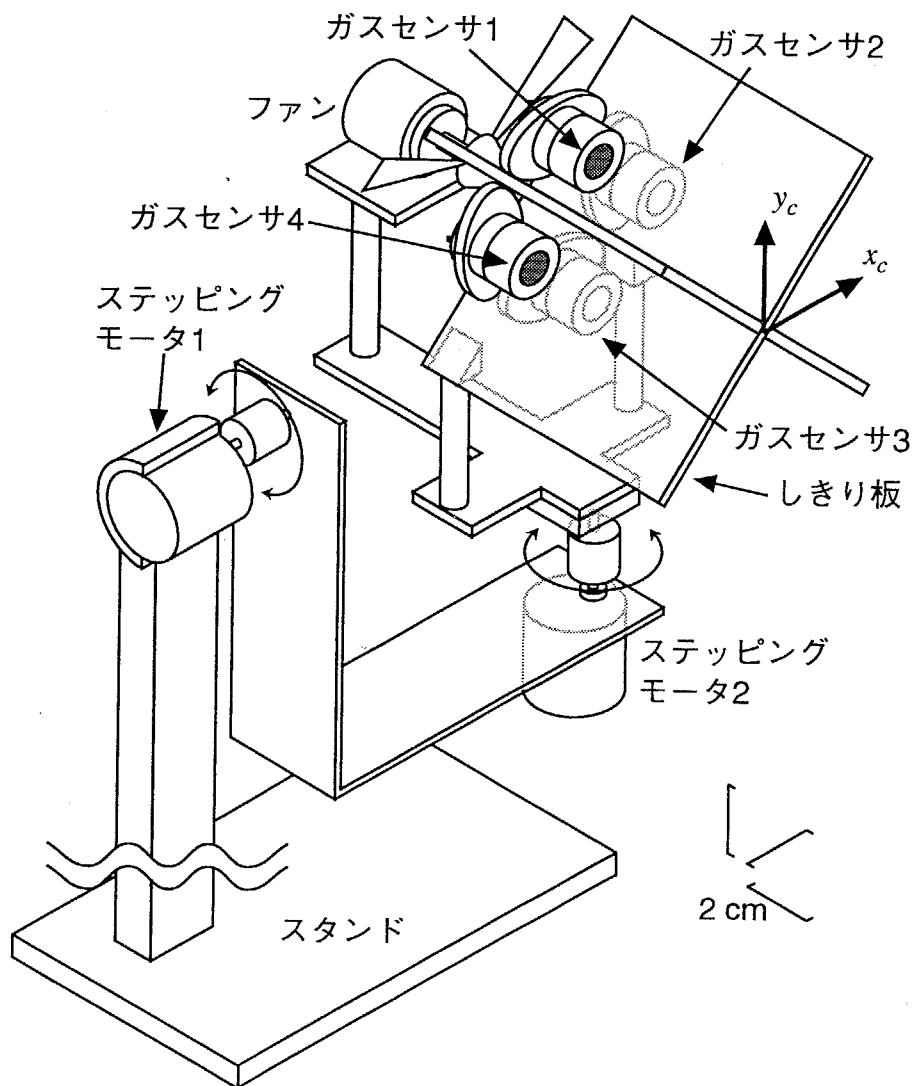


Fig. 7.13 3次元匂い源探知コンパス概略図

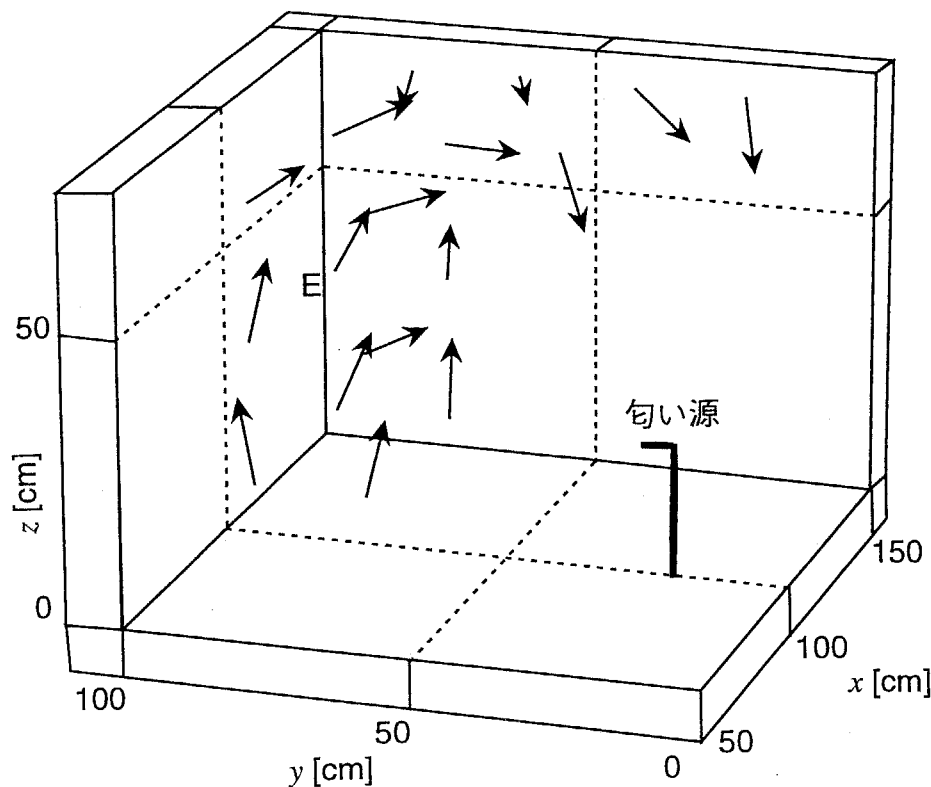


Fig. 7.14 3次元匂い源探知コンパスによる方向推定結果

に示すように二つの給気口からの風がぶつかり、噴出したガスは上方へ舞い上げられる。

この環境で3次元的にコンパスの位置を変え、匂い源方向の推定を行った結果を Fig. 7.14 に示す。図中で $x = 150$ と $y = 100$ に描かれている垂直な壁は座標系を表すものであり、実際に壁が存在するわけではない。図中の矢印は Fig. 7.11 と同様に測定の後半5分におけるコンパス方向の平均値を指し示している。コンパスの初期方向は、 x 軸の正の向きとした。

Fig. 7.14 の左隅に3次元コンパスを設置した場合は、上方に向かうベクトルが得られた。この方向は Fig. 6.10 に示すプルームの方向に一致する。この方向に従って移動すると、図の上部では匂い源に向けて下降する方向をコンパスが指し示した。したがって、コンパスを手を持ち、推定された方向に移動すれば匂い源を探知することができる。

コンパスの典型的な動作例として、Fig. 7.14 中の点 E におけるコンパスの動作とセンサ応答を Fig. 7.15 に示す。図中の $\Delta\theta$ は、コンパスの瞬間的な方向と、Fig. 7.14 に示した矢印の方向のなす角度を表す。同図では約4分でコンパスの方向が収束しており、方向の変動は2次元コンパスの場合と同じく $\pm 60^\circ$ であった。従来の能動サンプリング型プローブで3次元方向を得るためには、プローブを水平方向と垂直方向に2回転する必要があった。これに対し、3次元コンパスの場合には濃度勾配を検出して、匂い源の方向へ直接コンパスを回転する。このため、2次元の場合と同程度の時間で方向を推定することができた。

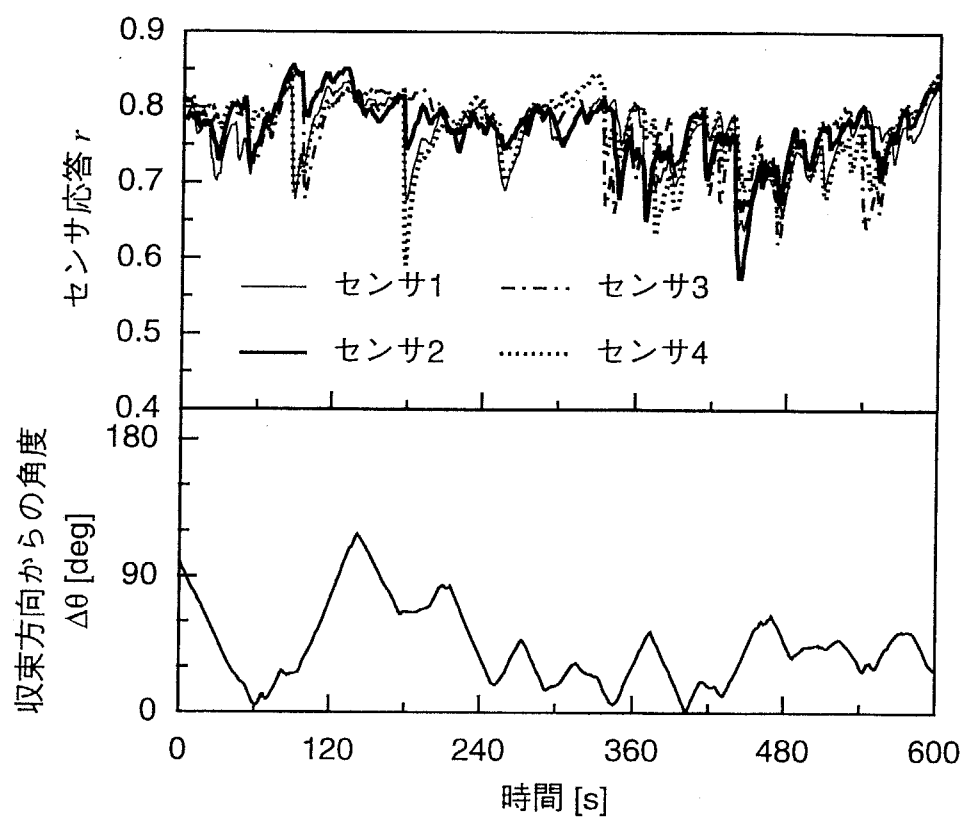


Fig. 7.15 3次元匂い源探知コンパスの動作例

しかし、コンパスを任意の姿勢に制御するためには3自由度が必要であるのに対し、Fig. 7.13に示すコンパスは2自由度しか持たず、ファンの軸周りの姿勢を制御することができない。このため、コンパスの方向を変えるとファンの軸周りのガスセンサの配置も回転してしまい、遅いセンサ応答が配置の変化に追従するのを待つ必要が生じる。したがって、素早く方向推定を行うために、3自由度のコンパスを製作することが望まれる。

また、Fig. 7.13に示すコンパスの構造には欠点がある。モータ1の角度を経度、モータ2を緯度と考えると、Fig. 7.13は地球儀を横に寝かせた格好とみなすことができる。この構造では、コンパスがモータ1の回転軸方向（同図の右または左、すなわち地球儀の北極または南極）付近を向くと、コンパスの方向をわずかに動かすためにモータ1を大きく回転しなければならない。例えば、北緯85°、東経30°の地点から同じ北緯で東経120°の地点まで移動するためには、北極点付近を通過する最短ルートをとればわずかな移動距離で済む。しかし、Fig. 7.13の構造では緯度を表すモータ1を90°回転する必要がある。効率を改善するためには、多関節ロボットアームのような構造が望ましいと考えられる。

7.4 まとめ

本章では、能動サンプリング型システムを発展させた匂い源探知コンパスについて述べた。匂い源探知コンパスでは、複数のガスセンサをしきり板で隔て、風を起こすファンの前に置く。このようにするとファンの風が環境内のガス濃度分布を変更し、匂い源方向に対応したセンサ応答差が得られる。匂い源探知コンパスはこの応答差を利用して匂い源の方向を指し示す。

2次元的に動作するコンパスと3次元コンパスの2種類を製作した結果、どちらのコンパスを用いた場合でも匂い源方向を正しく推定することができた。このコンパスを人間が手に持って移動するか、あるいは移動ロボットに取り付けることにより、匂い源を発見することができる。

能動サンプリング型システムではプローブを回転して匂い源方向を探る必要があったが、コンパスの場合にはセンサ応答差を利用して瞬時に匂い源の方向が分かる。このため、効率よく匂い源方向推定を行うことができる。この特長は、3次元的な方向判定の場合に特に有利に働く。

また、ファンの作動によって得られるセンサ応答差をブルーム変形モデルによって説明した。このモデルでは、ファンにより匂いを吸引すると、前方にセンサをずらした場合と等しいセンサ応答が得られると考える。複数センサを用いた場合は、センサによってずれる距離が異なるため応答差が生じる。

このモデルによってコンパスの性能限界が与えられる。ファンによる吸引には限界距離があるので、この限界距離の範囲内に十分な濃度勾配がないとセンサ間で応答差を検出できない。大型で強力なファンを用いれば吸引限界距離を延ばすことができるが、この場合は環境を大きく乱すことになり望ましくない。したがって、匂い源探知コンパスの適用は、匂い源に近く濃度勾配が比較的急な領域に限られる。この範囲で用いるならば、微風速環境にも対応できる、3次元探知が可能などの特長を持つ。これに対し、匂い源から遠い場

所では第4章で述べた風速センサを用いるシステムの方が有効であると考えられる。なぜならば、匂い源から遠くまでガスが拡散しているということは比較的強い風が存在を意味しているからである。ただし、コンパスに運動性を付加することにより、上記の弱点を克服できる可能性がある。

さらに匂い源探知コンパスの欠点として1回の方向判定に数分を必要とすることが挙げられる。これは、ガスセンサ応答の遅れのためにコンパスを高速に回転することができなかったからである。そこで、次章では動作速度向上のために行った、方向推定アルゴリズムの改良を説明する。

Chapter 8

匂い源探知コンパスの高速化

8.1 はじめに

本章では、匂い源探知コンパスの動作速度を改良するため、匂い源方向の推定アルゴリズムを改良する。前章で述べたように、匂い源探知コンパスの回転に対してガスセンサ応答の変化は大きく遅れる。このため、コンパスの回転を高速化して、素早く匂い源方向を指し示すことができなかった。

この問題を解決するためには、第5章で述べた自走型匂い源探知システムによる匂い源位置推定と同様の手法が有効であると考えられた。すなわち、匂い源方向などをパラメータとして匂い環境のモデルを作り、このモデルとセンサ応答のダイナミクスを組み合わせたセンサ応答モデルを構築する。そして、観測したセンサ応答の時系列データにモデルをカーブフィットすることで、パラメータ推定を行う。このように内部モデルを用いることにより、少ないデータから素早く匂い源方向の推定を行うことが可能になる。また、センサ応答の遅れを考慮して方向推定を行うため、コンパスを高速に回転することができる。

ここでは、回転の自由度が少なく制御が容易な2次元探知コンパスの動作速度向上を目指した。初めに、センサ応答モデルの構築について説明し、予備的実験の結果を示す。次に、実用的な動作速度を達成するために行ったコンパスの動作の改良について述べる。

8.2 高速方向推定アルゴリズム

8.2.1 センサ応答のモデル化

センサ応答モデルを構築するために、まず匂い環境モデルを作る。第5章では匂いの時間平均分布をロバートのブルームモデルで表し、環境内の座標 (x, y) におけるセンサ応答の定常値 $r_0(x, y)$ をモデル化した。そして、このモデルが同定されれば匂い源位置や時間平均濃度の分布などが得られることから、これを匂い環境モデルと呼んだ。

コンパスの場合には、回転によってセンサ応答差が変化することを方向推定に利用する。コンパスをある地点に据えた場合を考えると、センサ応答差の定常値 Δr_0 はコンパスの向

いている方向 θ のみに依存する。 Δr_0 の θ に対する依存性が分かれば匂い源方向が得られるので、匂い環境モデルを作るには $\Delta r_0(\theta)$ をモデル化すればよい。

ここでは、 $\Delta r_0(\theta)$ が周期 2π の周期関数となることに注目し、これをフーリエ級数展開する。Fig. 7.10 に示すように、コンパスを回転した際のセンサ応答変化波形は正弦波に近い形をしている。そこで、フーリエ級数のうち 1 次の項のみを用いて $\Delta r_0(\theta)$ を近似する。

$$\Delta r_0(\theta) = a \cos \theta + b \sin \theta + c \quad (8.1)$$

ただし、センサ応答差の取り方は式 (7.4) にならうものとする。また、 a 、 b 、 c はコンパスの設置場所によって決まる定数である。2 次元コンパスの左右のガスセンサ感度が正しく揃っていれば、 $c=0$ と仮定できる。そこで以下の議論では c を除き、

$$\Delta r_0(\theta) = a \cos \theta + b \sin \theta \quad (8.2)$$

を考える。上式が匂い源探知コンパスにおける匂い環境モデルとなる。

次に、センサ応答のダイナミクスを考える。 θ 方向を向いて定常状態にあったコンパスが、時刻 $t=0$ において瞬時に θ' 方向へ回転したとする。このとき、センサ応答差 $\Delta r(t)$ は $\Delta r_0(\theta)$ から $\Delta r_0(\theta')$ に向けて遅れをもって変化する。これを 1 次遅れ系で近似すれば、 $t \geq 0$ における $\Delta r(t)$ の変化は、

$$\Delta r(t) = \Delta r_0(\theta') + [\Delta r_0(\theta) - \Delta r_0(\theta')] \exp(-t/\tau) \quad (8.3)$$

となる。ただし、 τ はセンサ応答の時定数を表す。

この場合は θ と θ' を定数と考えられる。この点に注意すると、上式が次の微分方程式

$$\begin{aligned} \Delta \dot{r}(t) &= -\frac{1}{\tau} \Delta r(t) + \frac{1}{\tau} \Delta r_0(\theta') \\ &= -\frac{1}{\tau} \Delta r(t) + \frac{a}{\tau} \cos \theta' + \frac{b}{\tau} \sin \theta' \end{aligned} \quad (8.4)$$

の解であることが分かる。

そこで、センサ応答をモデル化した状態方程式を導くことができる。式 (8.4) を離散化すれば、次式の離散時間状態方程式を得る。

$$\mathbf{x}_{k+1} = F \mathbf{x}_k + G \mathbf{u}_k + \mathbf{w}_k \quad (8.5)$$

$$\mathbf{x}_k = (\Delta r_k), \mathbf{u}_k = (\cos \theta_{k+1}, \sin \theta_{k+1})^T$$

$$F \in R, G \in R^{1 \times 2}, \mathbf{w}_k \in R$$

ただし、 $\mathbf{x}_k$ と $\mathbf{u}_k$ はそれぞれ時刻 k における状態ベクトルと入力ベクトルを表し、この場合の状態ベクトルはセンサ応答そのものとなる。サンプリング時間は前章までと同じく 1 秒とした。 $\mathbf{w}_k$ はノイズ項であり、モデル化誤差やガス濃度分布の揺らぎによって生じる応答変動などを表す。

もし、センサ応答のダイナミクスが高次の系で表される場合には、状態ベクトル中に微分項を付け加えればよい。例えば、センサ応答を 2 次遅れ系で表すと、

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{k+1} &= F\mathbf{x}_k + G\mathbf{u}_k + \mathbf{w}_k \\ \mathbf{x}_k &= (\Delta r_k, \Delta \dot{r}_k)^T, \mathbf{u}_k = (\cos \theta_{k+1}, \sin \theta_{k+1})^T \\ F &\in R^{2 \times 2}, G \in R^{2 \times 2}, \mathbf{w}_k \in R^2 \end{aligned} \quad (8.6)$$

を得る。

本研究では、匂い源探知コンパスのセンサ応答モデルとして式 (8.5) または式 (8.6) を用いた。未知パラメータは行列 F と G であり、前者はセンサ応答の遅れを、後者は応答の角度依存性を表す。第 1 章で述べたように、実際の半導体ガスセンサの応答は 1 次遅れや 2 次遅れのような線形システムではない。しかし、後述する実験結果が示すように、線形システムで近似した場合でもほぼ満足な近似精度が得られた。

8.2.2 匂い源方向の推定法

匂い源方向を推定するためには、コンパスを回転しながらセンサ応答を観測し、得られた応答時系列にモデル式をカーブフィットすればよい。匂い源探知コンパスのセンサ応答モデル式は、式 (8.5) や式 (8.6) のように未知パラメータに関して線形である。このため、第 5 章のモデルに比べてパラメータをオンラインで推定することは容易である。ここではノイズ項 $\mathbf{w}_k$ をガウス白色雑音と仮定し、最小 2 乗法を適用する。

時刻 k までに観測したセンサ応答から未知パラメータの推定を行うことを考える。時刻 0 から k までの状態方程式を並べて整理すると、

$$X_k = M_k H + W_k \quad (8.7)$$

ただし、

$$X_k = \begin{pmatrix} \mathbf{x}_1^T \\ \mathbf{x}_2^T \\ \vdots \\ \mathbf{x}_k^T \end{pmatrix}, M_k = \begin{pmatrix} \mathbf{x}_0^T & \mathbf{u}_0^T \\ \mathbf{x}_1^T & \mathbf{u}_1^T \\ \vdots & \vdots \\ \mathbf{x}_{k-1}^T & \mathbf{u}_{k-1}^T \end{pmatrix}, H = \begin{pmatrix} F^T \\ G^T \end{pmatrix}, W_k = \begin{pmatrix} \mathbf{w}_0^T \\ \mathbf{w}_1^T \\ \vdots \\ \mathbf{w}_{k-1}^T \end{pmatrix}. \quad (8.8)$$

となる。上式より、時刻 k における行列 H の最小 2 乗推定値 $\hat{H}_k$ を直ちに求めることができ、

$$\hat{H}_k = (M_k^T M_k)^{-1} M_k^T X_k \quad (8.9)$$

となる。上式の逆行列が存在するためには、状態方程式として式 (8.5) を用いた場合で $k \geq 3$ 、式 (8.6) を用いた場合で $k \geq 4$ でなければならない。

第 5 章のシステムでは未知パラメータの数を減らすために、時定数を事前に与えた。これに対し、匂い源探知コンパスの場合には式 (8.9) を用いて応答遅れを表す F と応答の角

度依存性を表す G を同時に推定できる。半導体ガスセンサの応答速度は対象ガスによって変化するが、 F と G の同時推定によりオンラインでこれに対応することが可能となる。

式 (8.9) を用いたパラメータ推定では、 X_k と M_k の観測を長時間を行うほど正確な推定値が得られる。しかし、 k が大きくなるにつれて行列の大きさが増し、計算量が増える。この計算量を減らすためには、逐次最小 2 乗法が有効である [103]。まず、式 (8.9) 中の逆行列を

$$P_k = (M_k^T M_k)^{-1} \quad (8.10)$$

とおく。このとき、 $\hat{H}_k$ に関して次式の漸化式を得る。

$$\hat{H}_{k+1} = \hat{H}_k + P_k J^T (\mathbf{x}_{k+1}^T - J \hat{H}_k) / (J P_k J^T + 1) \quad (8.11)$$

$$P_{k+1} = P_k - P_k J^T J P_k / (J P_k J^T + 1) \quad (8.12)$$

ただし、

$$J = \begin{pmatrix} \mathbf{x}_k^T & \mathbf{u}_k^T \end{pmatrix} \quad (8.13)$$

したがって、一度、式 (8.9) により $\hat{H}_k$ を求めたら、その後はそれを初期値として式 (8.11) により推定値を $\hat{H}_{k+1}$ に更新すればよい。

以上のような方法で $H = \begin{pmatrix} F & G \end{pmatrix}^T$ が求まれば、匂い源方向の推定は容易である。状態方程式として式 (8.5) を用いた場合には、推定した F と G を用いて

$$\Delta r_{k+1} = F_{11} \Delta r_k + G_{11} \cos \theta_{k+1} + G_{12} \sin \theta_{k+1} \quad (8.14)$$

が得られる。 θ が一定のときの定常応答を考え、 $\Delta r_{k+1} = \Delta r_k = \Delta r_0$ とおいて整理すると、

$$\begin{aligned} \Delta r_0(\theta) &= \frac{1}{1 - F_{11}} (G_{11} \cos \theta + G_{12} \sin \theta) \\ &= C_0 \sin(\theta + \theta_0) \end{aligned} \quad (8.15)$$

となる。ただし、

$$C_0 = \sqrt{\frac{G_{11}^2 + G_{12}^2}{(1 - F_{11})^2}} \quad (8.16)$$

であり、 θ_0 は次式を満足する角度である。

$$\sin \theta_0 = \frac{G_{11}}{(1 - F_{11})C_0}, \cos \theta_0 = \frac{G_{12}}{(1 - F_{11})C_0} \quad (8.17)$$

第 7 章で述べたように、匂い源方向では $\Delta r_0 = 0$ 、 $d\Delta r_0/d\theta < 0$ となる。したがって、式 (8.15) から匂い源方向 θ_s を求めることができ、

$$\theta_s = \pi - \theta_0 \quad (8.18)$$

となる。

一方、式 (8.6) を状態方程式として用いた場合には、この式の第 1 行より、

$$\Delta r_{k+1} = F_{11}\Delta r_k + F_{12}\Delta \dot{r}_k + G_{11} \cos \theta_{k+1} + G_{12} \sin \theta_{k+1} \quad (8.19)$$

を得る。1 次遅れ近似の場合と同様に θ が一定の定常状態を考えると、 $\Delta r_{k+1} = \Delta r_k = \Delta r_0$ 、 $\Delta \dot{r}_k = 0$ を得るので、

$$\Delta r_0(\theta) = \frac{1}{1 - F_{11}} (G_{11} \cos \theta + G_{12} \sin \theta) \quad (8.20)$$

となる。上式は式 (8.15) と同一なので、1 次遅れ近似の場合と同様に匂い源方向を求めることができる。

8.2.3 予備実験結果

初めに、高速方向推定アルゴリズムの有効性を確かめる実験を行った。Fig. 7.12 (a) におけるコンパスの動作とセンサ応答を用いて匂い源方向の推定を行った結果を Fig. 8.1 に示す。同図には式 (8.18) によって求めた θ_s を示した。状態方程式には式 (8.5) と式 (8.6) の 2 通りを用いたが、ほぼ等しい推定結果を得た。そこで、以降の実験では式 (8.6) を状態方程式として用いた。

Fig. 8.1 では、第 7 章で述べた方向制御アルゴリズムに従い、左右のセンサ応答を比較しながら $2^\circ/\text{s}$ でコンパスを回転した。このため、コンパスの方向が匂い源方向に収束するまで約 1 分を必要とした。これに対し、推定された匂い源方向 θ_s は 30 秒程度でほぼ収束値近くに達している。

Fig. 8.2 は、クリーンルームにおいてコンパスをランダムに回転しながらセンサ応答を測定した結果を表す。コンパスの床面からの高さは 12 cm とし、設置場所は Fig. 7.11 (a) に示すプルームのほぼ中央に当たる点 (140, 60) とした。また、ファンの風速は第 7 章の実験と同じく 107.9 cm/s とした。Fig. 8.2 中のセンサ応答の予測値は以下のように計算した。まず逐次最小 2 乗法を用い、初めの 60 秒間のセンサ応答とコンパスの動きから式 (8.6) の行列 F と G を推定した。次に、時刻 0 におけるセンサ応答を初期値とし、式 (8.6) を用いてその後のセンサ応答の変化を予測した。同図のように、センサ応答の実測値と予測値は良く一致しており、1 秒当たりの平均 2 乗誤差は 0.022 であった。

しかし、まだ誤差があるので、その原因を調べるためにコンパスを匂い源方向に向けて静止させてセンサ応答を測定した。このとき、予測されるセンサ応答差は一定値ゼロとなる。しかし、実際には風の乱れによりガス濃度分布が揺らぎ、応答差の実測値は変動する。このとき、実測値と予測値の平均 2 乗誤差は 0.02 ~ 0.03 程度であった。この場合はコンパスを静止しているため、予測誤差にはセンサ応答ダイナミクスのモデル化誤差が含まれない。それにも関わらず、コンパスをランダムに回転した場合の予測誤差とはほぼ等しい値になった。このことから、センサ応答ダイナミクスのモデル化誤差は十分小さく、予測誤差は主に濃度分布の揺らぎによって生じたと考えられる。この揺らぎは式 (8.6) の $\mathbf{w}_k$ に含まれるため、推定された匂い源方向は揺らぎを平均化した方向となる。実際の半導体ガス

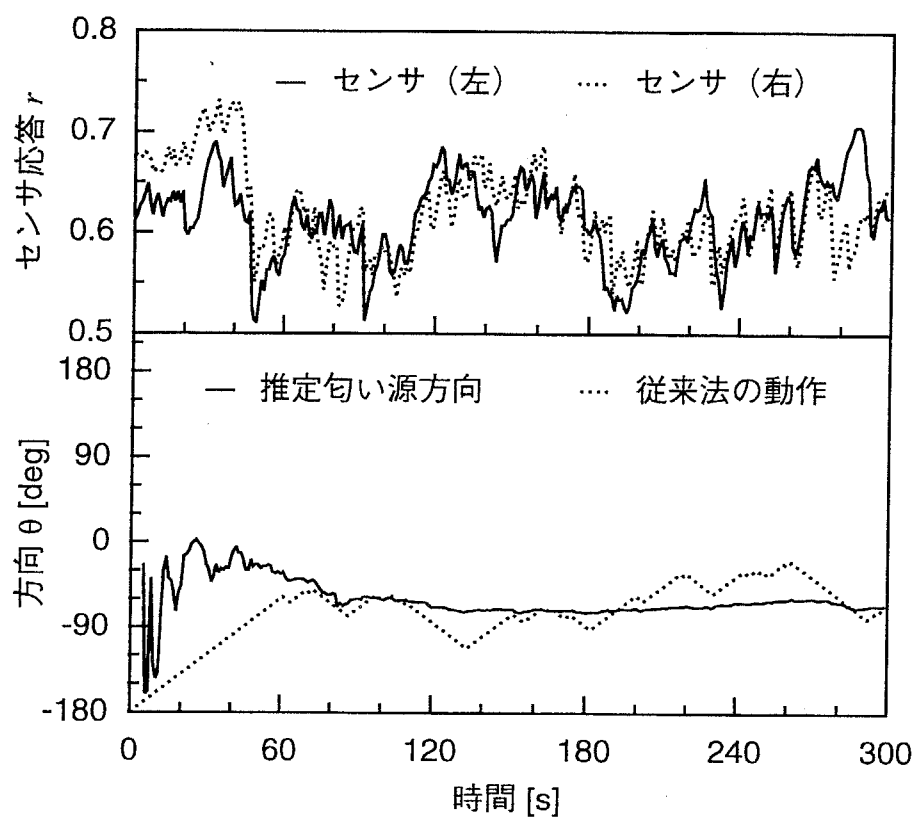


Fig. 8.1 従来法と高速推定法の比較

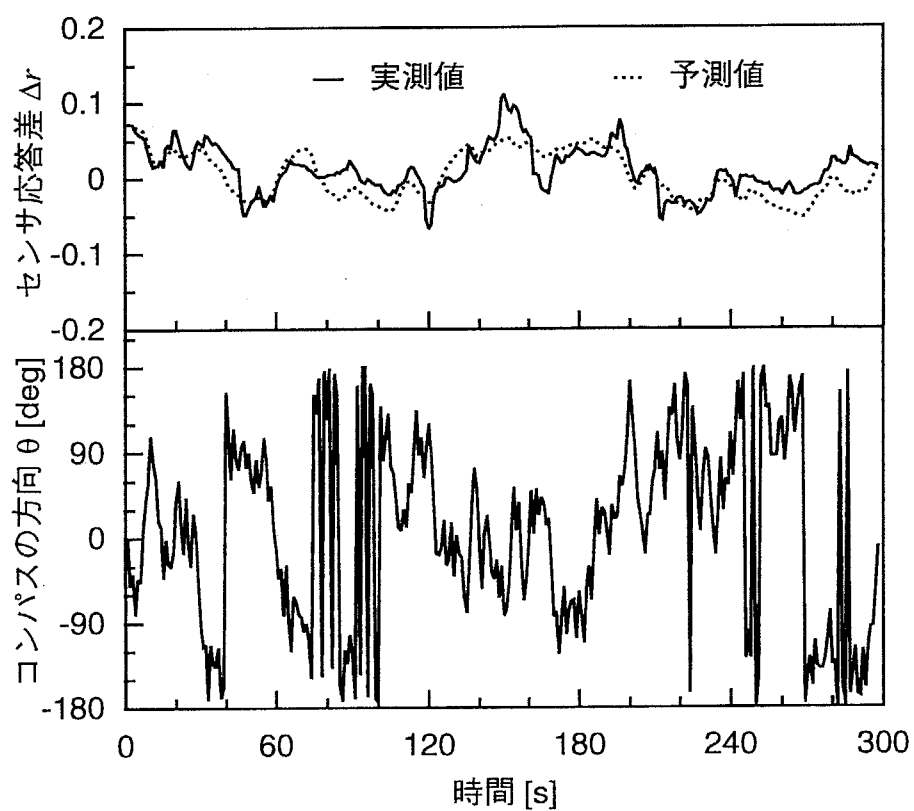


Fig. 8.2 状態方程式によるセンサ応答差の予測

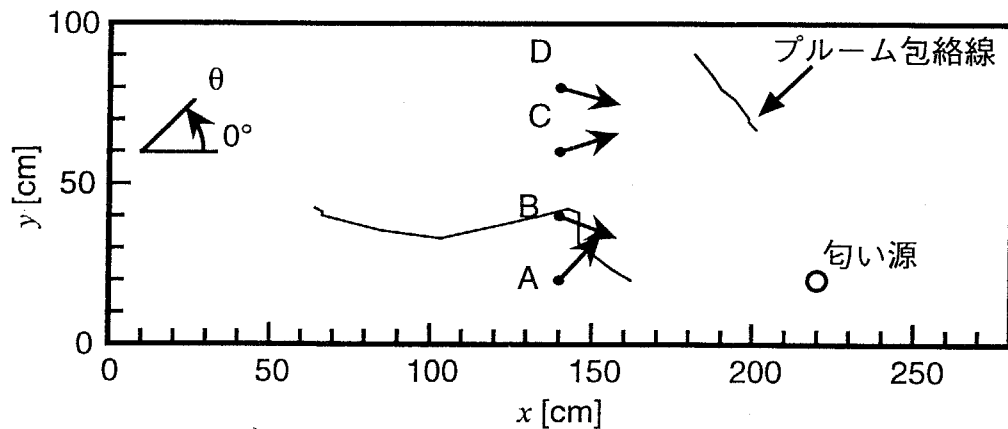


Fig. 8.3 高速推定アルゴリズムによる匂い源方向の推定結果

センサのダイナミクスは、応答と回復の時定数が異なるなど複雑である。しかし、この場合には二つのセンサ応答の差をとっているためにうまくモデル化できたと考えられる。

次に、上記の高速方向推定アルゴリズムを利用してコンパスの方向制御を試みた。方向制御方法は以下の通りである。

- (1) 式 (8.9) 中の逆行列が得られるまでの 4 秒間は、センサ応答差の符号に従ってコンパスを $60^\circ/\text{s}$ で回転する。
- (2) 5 秒目以降は推定された匂い源方向 θ_s にコンパスを向ける。 θ_s の更新には逐次最小 2 乗法を用いる。

コンパスを Fig. 8.3 中の点 A に設置した際のコンパスの動作を Fig. 8.4 (a) に示す。コンパスの初期方向は $\theta = 180^\circ$ とした。同図では 20 秒ほどでコンパスの方向が収束している。この後、コンパスを点 A から B、C、D と移動させた。各点において方向推定開始から 120 秒後に得られた匂い源の推定方向を Fig. 8.3 中に矢印で示した。図中のプルーム包絡線は、コンパスの設置高さにおいてガスセンサ応答の時間平均値が 0.7 となった等ガス濃度線を表す。同図の結果は前章で示したコンパス低速回転時の結果と同様であり、プルーム外ではプルームへ向かう方向、プルーム内では匂い源の方向が得られた。

また、点 A から B へ移動した際のコンパスの動作を Fig. 8.4 (b) に示す。同図では点 A から移動を始めると同時に匂い源方向の推定を開始し、その後 10 秒をかけてコンパスを点 B まで動かした。この場合には時刻 60 秒付近まで方向推定値が徐々に変化している。また、最後の 40 秒間で方向推定値が大きく変化した。このように方向の収束性が悪い場合があるのは、コンパスが匂い源方向を向くように制御しているためである。方向推定値が収束を始めると、コンパスの方向はほとんど動かなくなる。これは得られる情報を限定する結果となり、誤った方向を向いてしまっても方向修正が行われなくなる。また、コンパスの方向がほぼ近いデータから方向推定を行わなければならないので、解は不安定に

なる。そこで、推定方向の収束後もコンパスを動かし続けるようなアルゴリズムの改良が望まれた。

さらに、逐次最小 2 乗法では過去の観測データが全て蓄積される。このため、コンパスを移動した際にはこのデータを全て抹消する必要がある、使用の便が悪い。一定時間以上経過したデータを棄却し、常に最新のデータを用いて方向推定を行えば、コンパスの移動中も連続的に方向推定を行うことができると期待される。以上の問題点を踏まえて、次節に述べる改良を行った。

8.3 高速回転型匂い源探知コンパス

8.3.1 方向推定アルゴリズムの改良

前節で述べたように、コンパスを移動した後も常に正しい匂い源方向を示すようにするためには、過去のデータを棄却する必要がある。このような方法としては、忘却係数 λ を用いた指数重み付き逐次最小 2 乗法や矩形窓を用いた最小 2 乗法などがある [2, 56]。指数重み付き逐次最小 2 乗法では、 $0 < \lambda < 1$ となるように忘却係数 λ を設定する。そして、現時刻よりも i 個前のデータに対して λ^i の重みを乗じ、過去のデータの寄与を小さくする。一方の矩形窓を用いた方法では、現時刻から L 個前までのデータを切り出す矩形窓を用意し、常に最新の L 個のデータのみを推定に用いる。

本研究では後者の方法を用い、 $L = 30$ とした。 L が 30 より小さい場合は、方向推定値について十分な安定性、収束性は得られなかった。なお、指数重み付き逐次最小 2 乗法も試みたが、矩形窓を用いた場合とほぼ同じ結果となった。

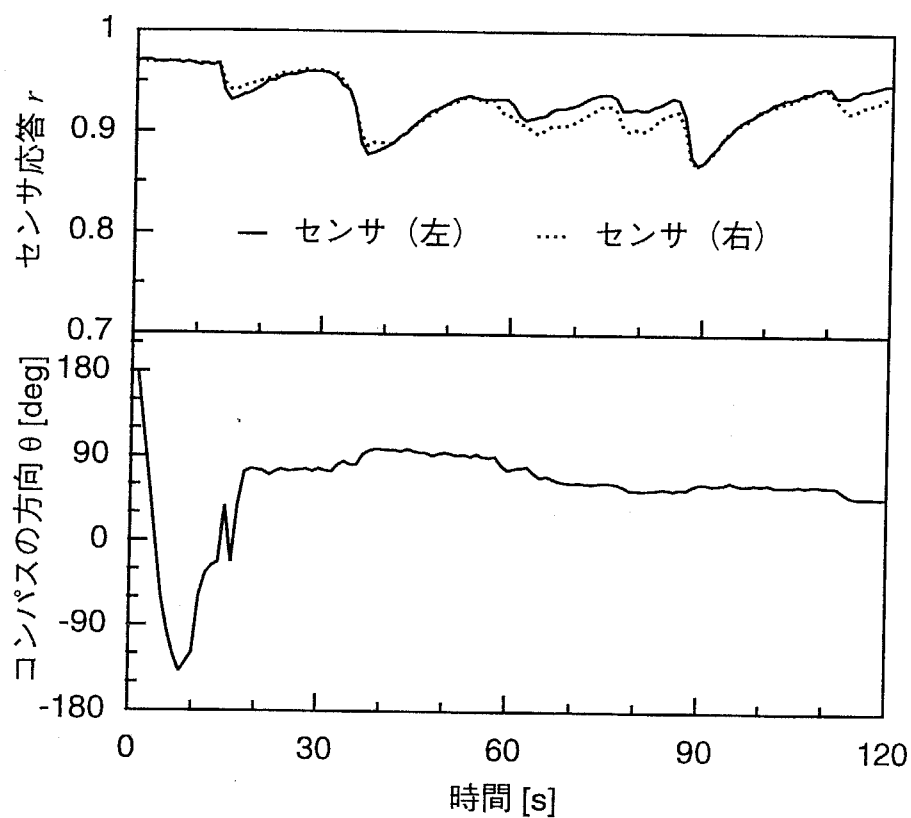
また、式 (8.6) では、コンパスを θ_{k+1} に向けた影響が r_{k+1} にすぐに現れることを期待している。しかし、現実にはセンサ応答の遅れが大きく、 r_{k+1} には直前のコンパスの回転の影響が十分には現れていないことが分かった。そこで、状態方程式の入力部分に無駄時間要素 d を加え、方程式を

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{k+1} &= F\mathbf{x}_k + G\mathbf{u}_k + \mathbf{w}_k \\ \mathbf{x}_k &= (\Delta r_k, \Delta \dot{r}_k)^T, \mathbf{u}_k = (\cos \theta_{k+1-d}, \sin \theta_{k+1-d})^T \\ F &\in R^{2 \times 2}, G \in R^{2 \times 2}, \mathbf{w}_k \in R^2 \end{aligned} \quad (8.21)$$

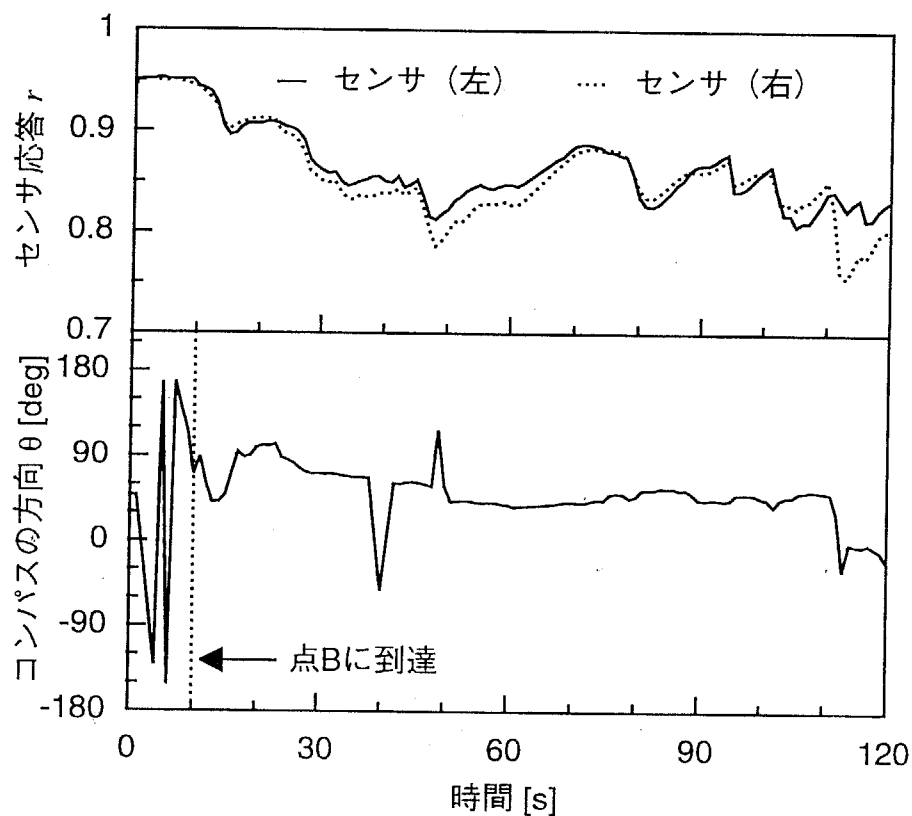
と変更した。無駄時間 d は実験的に求め、 $d = 1$ 秒とした。

この状態方程式を用いて、未知パラメータ F 、 G の最小 2 乗推定を行う。過去 30 秒間のデータを切り出す矩形窓を用いた最小 2 乗推定は、次式で表される。

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} F^T \\ G^T \end{pmatrix} &= (M_k^T M_k)^{-1} M_k^T X_k \\ X_k &= \begin{pmatrix} \mathbf{x}_{k-29}^T \\ \mathbf{x}_{k-28}^T \\ \vdots \\ \mathbf{x}_k^T \end{pmatrix}, M_k = \begin{pmatrix} \mathbf{x}_{k-30}^T & \mathbf{u}_{k-30} \\ \mathbf{x}_{k-29}^T & \mathbf{u}_{k-29} \\ \vdots & \vdots \\ \mathbf{x}_{k-1}^T & \mathbf{u}_{k-1} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (8.22)$$



(a) 点Aの場合



(b) 点AからBに移動した場合

Fig. 8.4 高速推定アルゴリズムによるコンパスの動作

上式で求めた F 、 G を用いて匂い源方向 θ_s を算出する方法は、前節と同じである。

さらに、方向推定中のコンパスの動かし方も変更した。前節ではコンパスの方向を推定された匂い源方向に向けていたが、推定方向が収束するにつれてコンパスの回転が小さくなり、得られる情報が制限されてしまう。そこで、常に多くの情報を集めるために、コンパスが高速で回転を続けるようにした。このような改良を行ったコンパスを高速回転型コンパスと呼ぶものとする。

8.3.2 ファンの風量の最適化

前節までの実験では、ファンの風速 u を最大値である 107.9 cm/s としていた。しかし、ファンの風速が大きすぎる場合には、環境を乱すことによる悪影響が出ることが分かった。

クリーンルームにおいて匂い源の風下 1 m の地点にコンパスを設置し、これを 2°/s で回転した際のセンサ応答を Fig. 8.5 に示す。同図では匂い源の方向を 0° とした。この図ではコンパスの回転速度を 2°/s と遅くしているにも関わらず、 $u = 107.9$ cm/s の時のセンサ応答変化は大きな遅れを見せている。これは、 u が大きいほどファンの風が環境の濃度分布を大きく変えるためである。第 7 章で述べたようにファンの吸引によってプルームが変形する。この状態でコンパスを回転すると、プルーム変形の方法も変わる。例えば、Fig. 8.6 (a) のようにコンパスを匂い源と逆方向に向けると、ファンの風によりガスが追い返されて濃度の低い空間ができる。この状態で同図 (b) のようにコンパスを急に回転しても、濃度の低い空間がしばらく残っており、正しいセンサ応答差は得られない。このようにファンの風速が大きくプルーム変形の度合いが大きい場合には、コンパスの回転にプルーム変形が追いつかない。この状態で匂い源方向の推定を試みると、方向推定値が不安定になってしまった。

一方、ファンの風速を 23.9 cm/s まで落とすと応答遅れの問題はほぼ解消される。しかし、この場合には得られるセンサ応答差が小さくなってしまう。このため、匂い源方向の推定値はやはり不安定になってしまった。

したがって、安定した方向推定値を得るためには、ファンの風速を最適値に調節する必要があることが分かる。このためには、第 7 章で述べたプルーム変形モデルを用い、得られるセンサ応答差を見積もることが有効である。すなわち、必要最小限の応答差が得られる程度にファンの風速を落とせばよい。センサ応答のドリフトや応答変動の大きさなどを考慮すると、応答差を確実に検出するためには 0.05 以上の差が望ましい。そこで、Fig. 7.8 よりファンの風速を 53.2 cm/s に変更した。

8.3.3 実験結果

初めに、ファンの風速を最適値 53.2 cm/s にした状態で、コンパスの動かし方による方向推定結果の違いを比較する。式 (8.22) では過去 30 秒間コンパスが静止してしまうと、式中の逆行列が存在しなくなってしまう。このため、前節のようにコンパスの方向を推定匂い源方向 θ_s に収束させるのではなく、常に動かし続けることが必要となる。

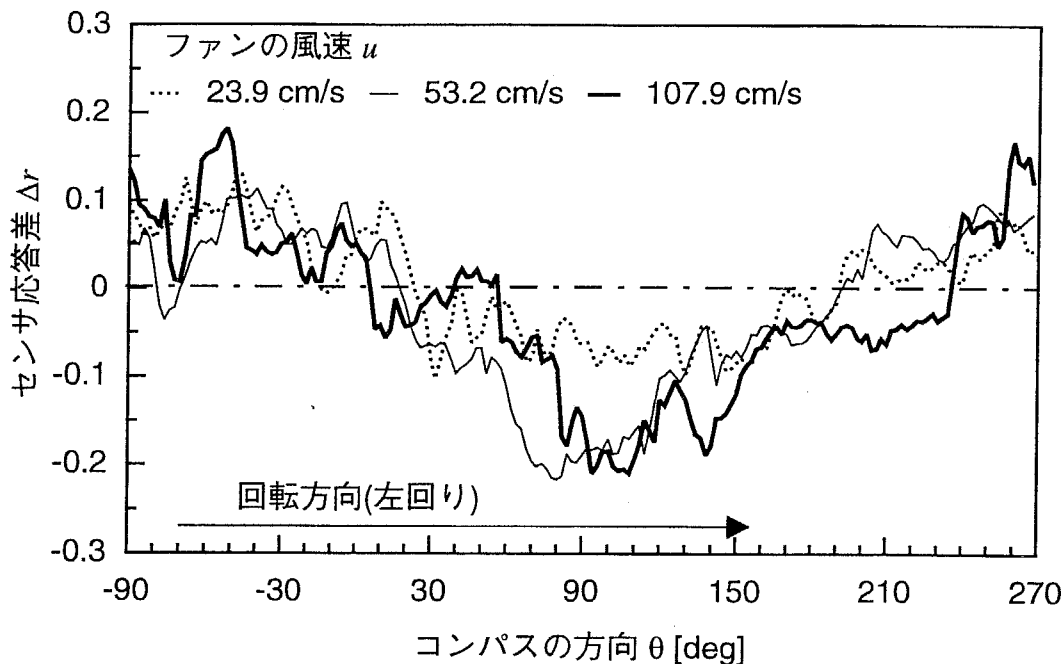


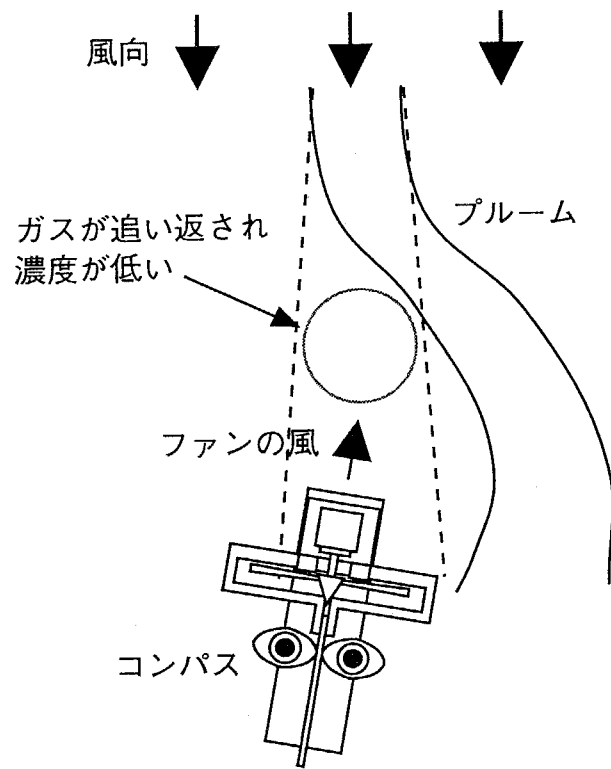
Fig. 8.5 ファンの風速によるセンサ応答動特性の変化

そこで、まずコンパスの方向を θ_s の周り $\pm 45^\circ$ の範囲で小さく動かし、方向推定を行った。この結果を Fig. 8.7 (a) に示す。コンパスの回転速度は $30^\circ/\text{s}$ とし、 $\theta_s - 45^\circ \rightarrow \theta_s - 15^\circ \rightarrow \theta_s + 15^\circ \rightarrow \theta_s + 45^\circ \rightarrow \theta_s + 15^\circ \rightarrow \theta_s - 15^\circ \rightarrow \theta_s - 45^\circ$ という動作をコンパスが繰り返すようにした。コンパスの設置場所は、Fig. 7.11 (a) の座標中の点 (140, 20) とした。この点はブルーム中心から大きく横に外れているため、通常はガス濃度が低い。しかし、風の乱れにより時折、高濃度のガスが検出される。このためセンサ応答の変動が大きく、匂い源方向の推定は困難である。Fig. 8.7 (a) では、センサ応答が変動する度に方向推定値が大きく変化してしまった。

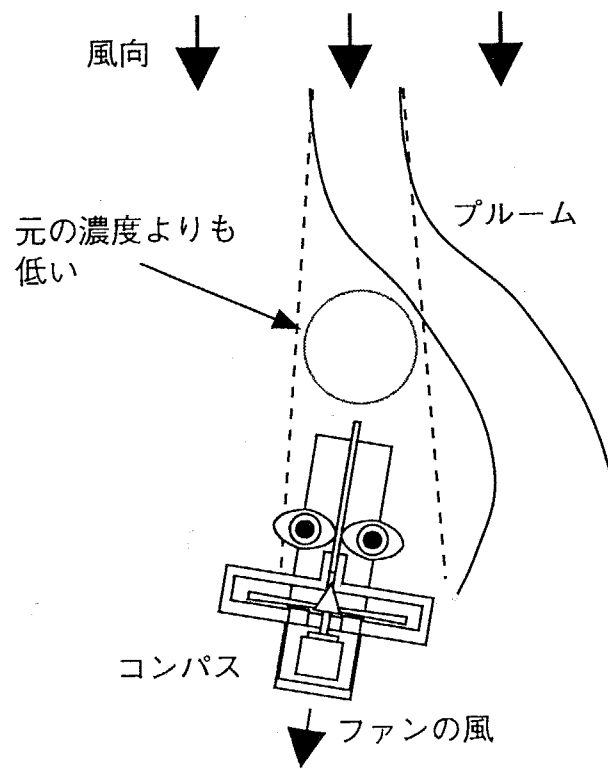
これに対し、コンパスを常に 360° 回転するようにして方向推定を行った結果を Fig. 8.7 (b) に示す。配線が絡まないように右に 360° 回転、左に 360° 回転という動作を繰り返すものとし、回転速度は $60^\circ/\text{s}$ とした。この場合は、コンパスを小さく動かした場合に比べて方向推定値の変動が小さい。推定値はほぼ $0^\circ \sim 90^\circ$ の範囲に収まっている。まだ推定値の変動が大きいように見えるが、Fig. 7.11 (a) に示すように、この範囲は匂い源の方向からブルーム中心軸の方向までの角度に対応する。したがって、この範囲内ならばどの方向へ動いてもブルームから遠ざかることはない。

このように、ガス濃度の変動が大きい場合には、コンパスを常に大きく動かした方が方向推定値が安定する。匂い源探知コンパスでは、コンパス回転時のセンサ応答に式 (8.2) の正弦波をカーブフィットして匂い源方向を推定する。このため、常に広い角度範囲のデータを集めた方が、方向推定精度は良い。

次に、ファンの風量が方向推定に与える影響を示す。ファンの風速を前節までと同じ 107.9



(a) コンパスを匂い源と逆向きに向けた場合



(b) コンパスを急に回転した場合

Fig. 8.6 コンパスの急な回転の影響

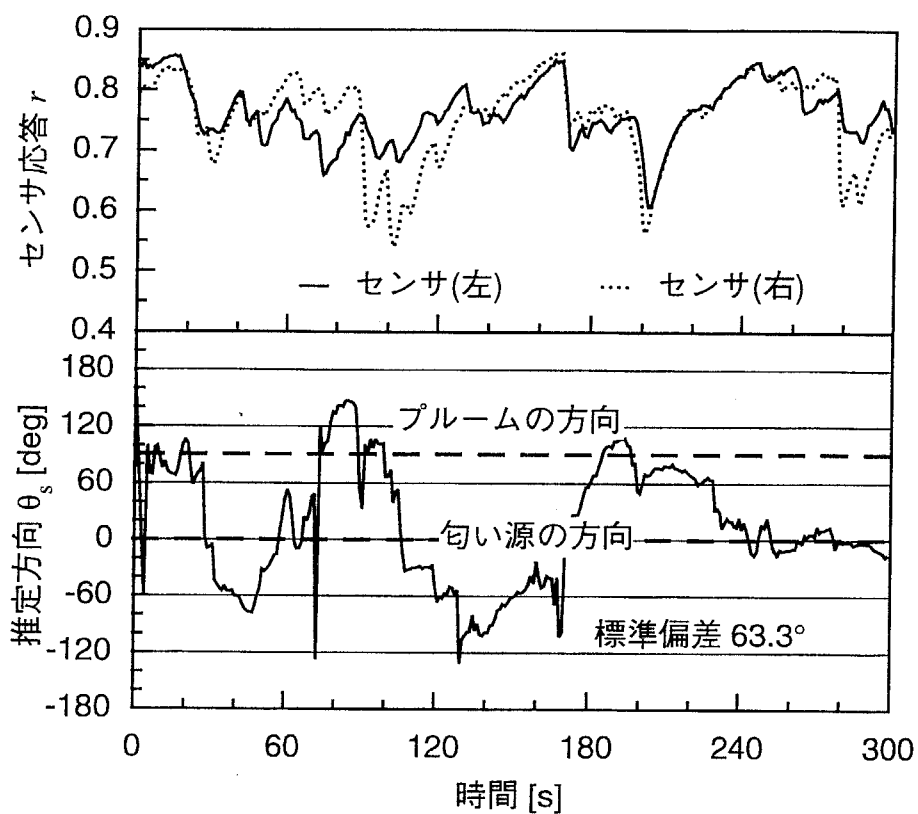
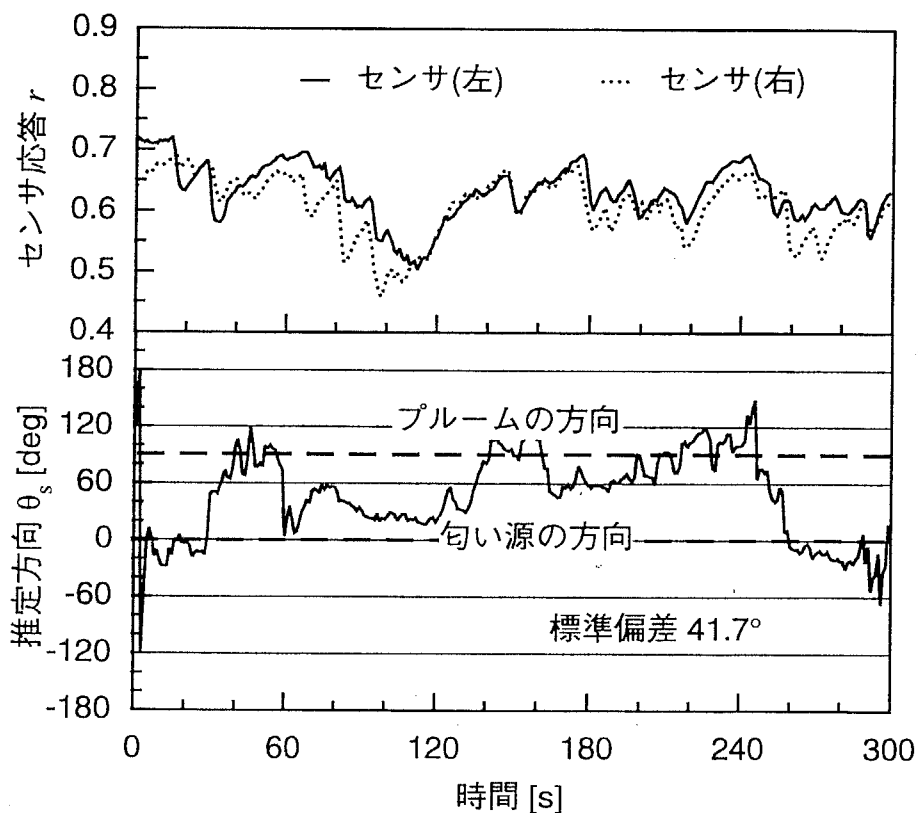
(a) 小さく動かした場合 ($\pm 45^\circ$)(b) 大きく動かした場合 ($\pm 360^\circ$)

Fig. 8.7 コンパスの動かし方の影響

cm/s とし、Fig. 7.11 (a) 中の点 (140, 80) (プルームの中心) にコンパスを設置した場合の方向推定結果を Fig. 8.8 (a) に示す。同図ではコンパスを常に 360° 回転する方法で方向推定を行った。プルームの中心軸上にあるこの地点では方向推定が容易であり、推定値の変動も小さい。しかし、先述のようにこの風速ではファンの風が環境を大きく乱してしまう。このため、80 ~ 110 秒付近や 220 秒付近のように匂い源方向から推定値が大きく外れることが時折見られた。

一方、Fig. 8.8 (b) はファンの風速を最適値 53.2 cm/s まで下げた場合の結果である。この図のように、ファンの風速を適切な値に落とすことにより、推定値の安定性は向上する。同図では、方向推定値が匂い源方向の周り $\pm 30^\circ$ の範囲にほぼ収まっている。

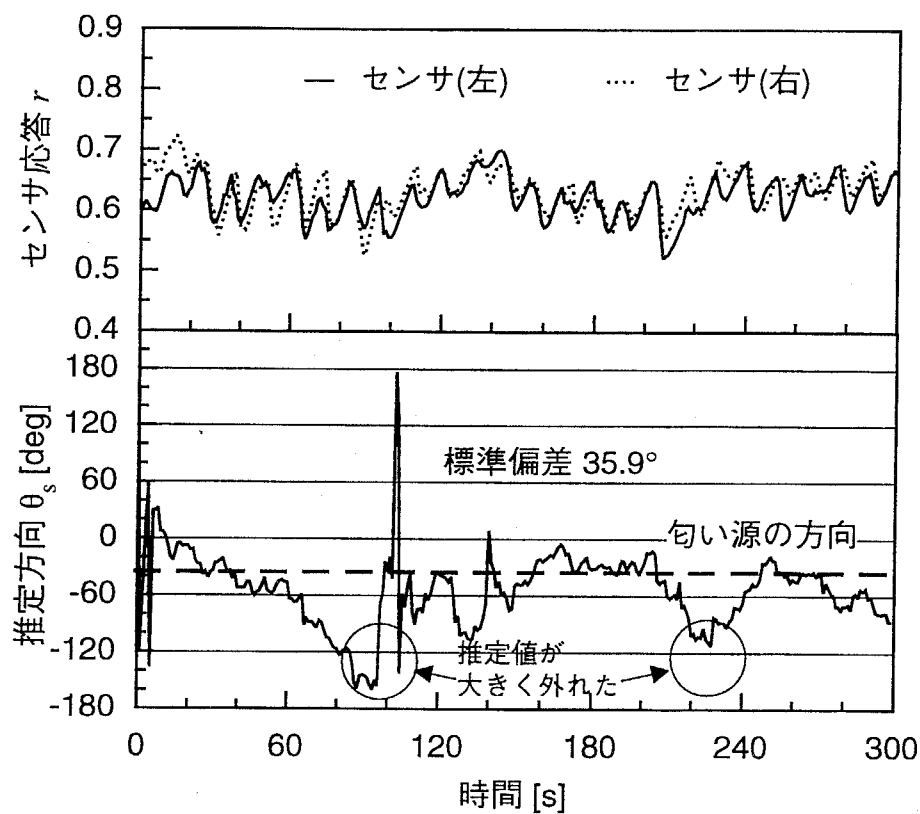
ファンの風速を変え、方向推定値の標準偏差を比較した結果を Fig. 8.9 に示す。同図では方向推定を 300 秒間行い、測定開始後 30 秒から 300 秒までの間に得られた方向推定値について 1 秒当たりの標準偏差を計算した。測定開始後 30 秒待つのは、方向推定値の収束を待つためである。図中の「プルーム内」は点 (140, 80) を意味し、「プルーム外」は点 (140, 20) を表す。同図のように、ファンの風速を大きくすると環境を乱す結果となり方向推定値の変動が大きくなる。逆に、風速が小さすぎると十分なセンサ応答差が得られず、やはり推定値の変動が大きくなる。したがって、環境に応じてファンの風速を最適な値に調節することが必要である。

Fig. 8.10 では、状態方程式 (8.21) に加えた無駄時間要素 d の影響を調べた。同図では Fig. 8.8 (b) のセンサ応答を用い、 d の値を変えて方向推定結果を比較した。無駄時間 $d = 1$ 秒の際の推定値は Fig. 8.8 (b) に示したものと同一である。Fig. 8.10 に示すように、 $d = 0$ 秒や $d \geq 3$ 秒とした場合の方向推定値は非常に不安定になる。無駄時間 $d = 1$ 秒としたときの方向推定値が最も安定しており、コンパスの回転の影響が 1 ~ 2 秒遅れてセンサ応答に現れていることが分かる。

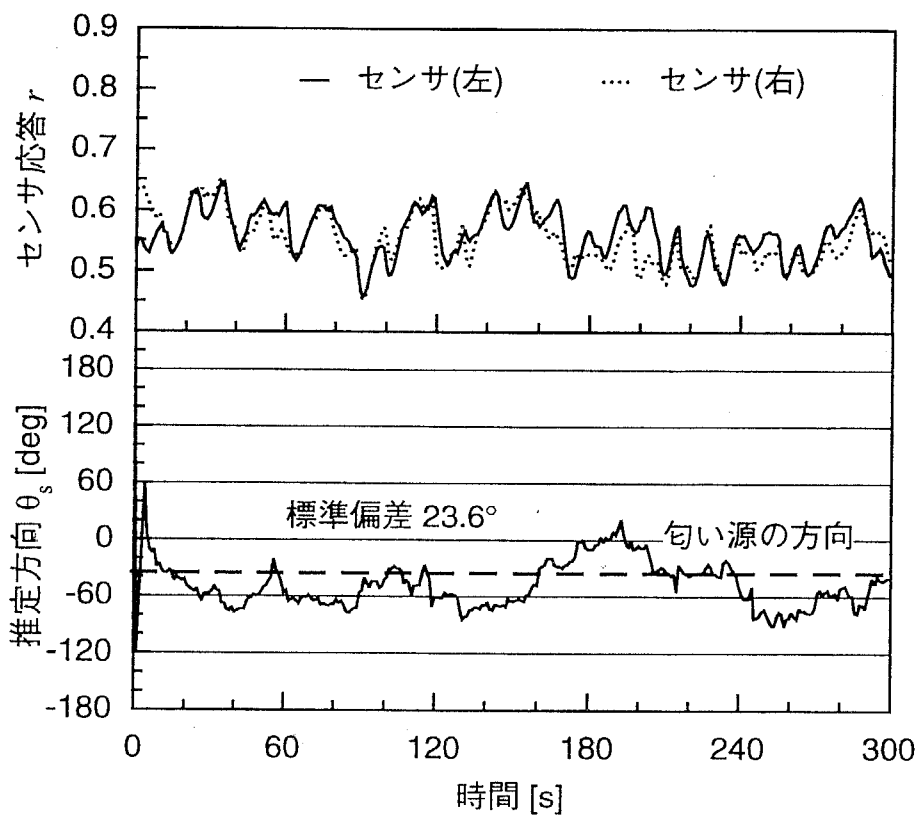
次に、方向推定に用いるデータ数の影響を Fig. 8.11 に示す。ここでは、上記の中で最も結果の良かった方向推定法を用いており、ファンの風速を最適値 53.2 cm/s、無駄時間を 1 秒としてコンパスを 360° 回転する方法を採用した。Fig. 8.11 では、まず点 (140, 40) にコンパスを設置し、時刻 300 秒においてコンパスを (180, 60) に移動した。同図のように、過去 30 秒のデータから方向推定を行った場合には、コンパスを移動してから 10 秒程度で方向推定値が変化する。一方、過去 60 秒のデータから推定した場合には、推定値の安定性は向上するものの、移動後の推定値の収束に 30 秒以上かかる。このため、人間がコンパスを手にとって匂い源を探索するには判定時間が長すぎる。人間を導くために最低限必要な仕様を判定時間 10 ~ 15 秒程度と考えると、推定に使用するデータ数は 30 秒が限度となる。

以上の実験では、過去のデータを棄却しながら方向推定を行うために、矩形窓を用いた最小 2 乗法を使用した。これと指数重み付き逐次最小 2 乗法による方向推定の比較を Fig. 8.12 に示す。同図では Fig. 8.11 に示すセンサ応答を用いて方向推定を行った。したがって、実験条件やコンパスの移動法は Fig. 8.11 と同じである。指数重み付き逐次最小 2 乗法では忘却係数 λ を用い、現時刻よりも i 個前のデータに対して λ^i の重みを乗じる。この計算を行うため、逐次最小 2 乗法における式 (8.11)、式 (8.12) を以下のように変更する。

$$\hat{H}_{k+1} = \hat{H}_k + P_k J^T (\mathbf{x}_{k+1}^T - J \hat{H}_k) / (J P_k J^T + \lambda) \quad (8.23)$$



(a) ファンの風速 107.9 cm/s



(b) ファンの風速 53.2 cm/s

Fig. 8.8 ファンの風速の影響

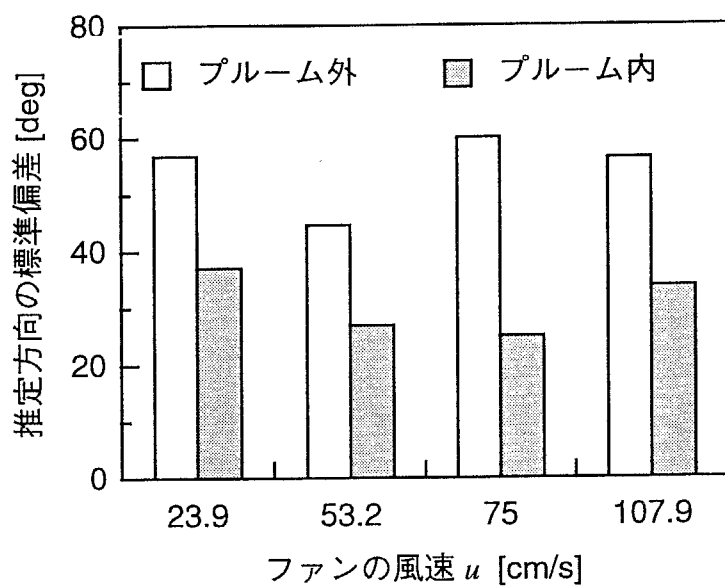
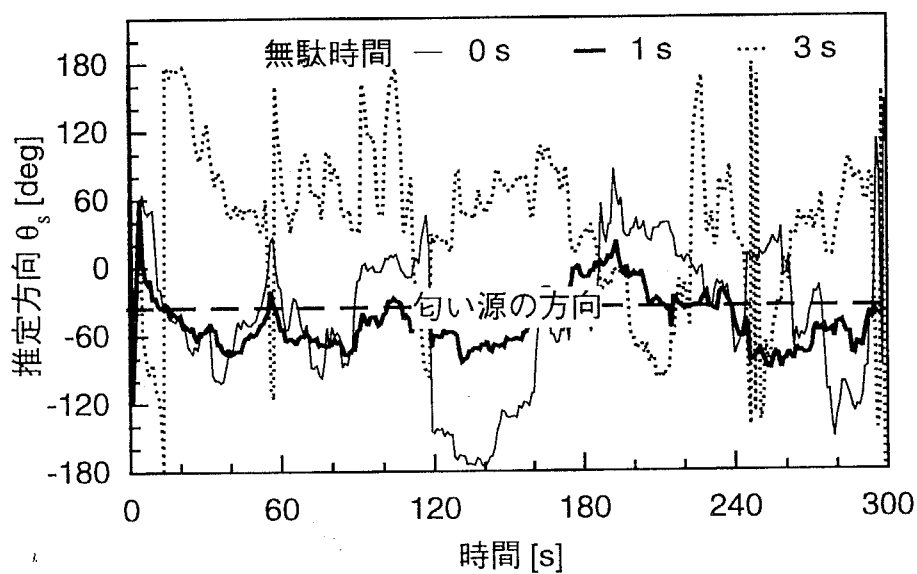


Fig. 8.9 ファンの風速による方向推定値の安定性の変化

Fig. 8.10 無駄時間要素の影響 (回転速度は $60^\circ/\text{s}$)

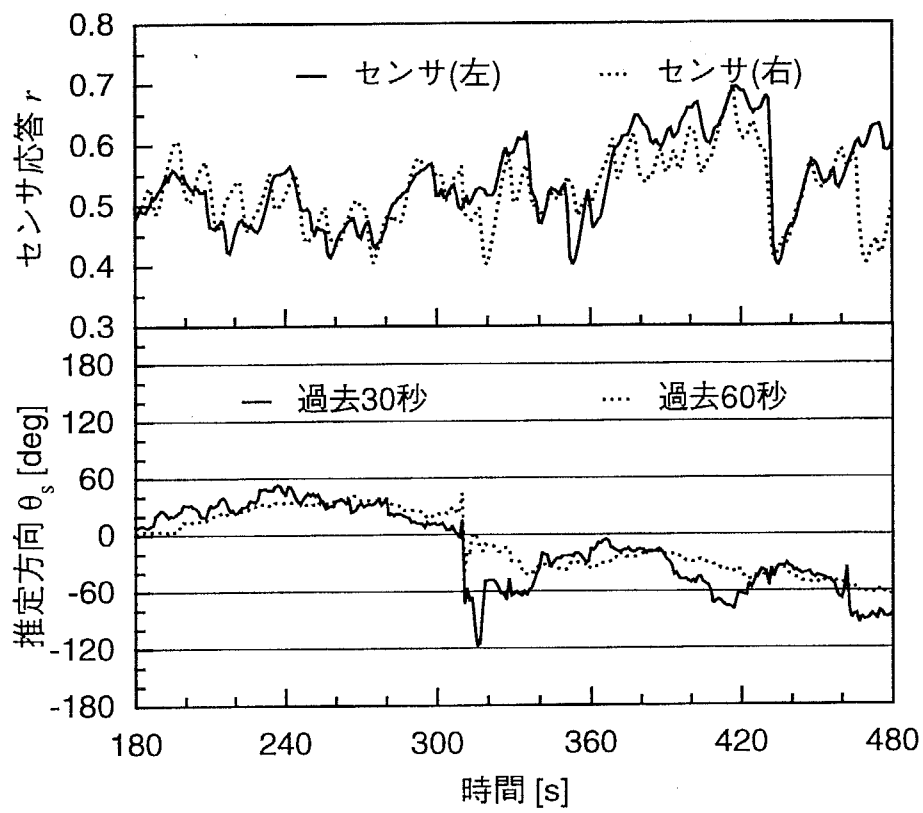


Fig. 8.11 コンパス移動時の方向推定

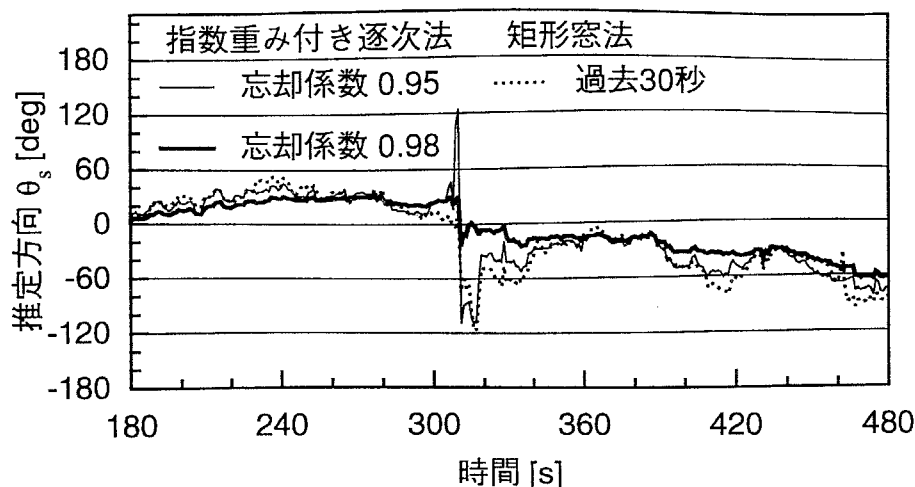


Fig. 8.12 指数重み付き逐次最小 2 乗法と矩形窓を用いた最小 2 乗法の比較

$$P_{k+1} = \frac{1}{\lambda} \left[P_k - P_k J^T J P_k / (J P_k J^T + \lambda) \right] \quad (8.24)$$

Fig. 8.12 を見ると、 $\lambda = 0.95$ としたときの方向推定値は矩形窓法で過去 30 秒のデータを用いた場合と良く似た動きをしている。忘却係数を 1 に近付けて $\lambda = 0.98$ とすれば、同図のように方向推定値が安定する。しかし、過去 60 秒のデータを用いた場合と同様に、時刻 300 秒でコンパスを移動してもすぐには方向推定値が変化しないという問題がある。このように、指数重み付き逐次最小 2 乗法を用いた場合も、矩形窓を用いた場合とほぼ同じ結果となった。

他の地点における方向推定結果をまとめて Fig. 8.13 に示す。同図では再び矩形窓法を用い、過去 30 秒のデータから方向推定を行った。図中の矢印は 5 分間の測定における方向推定値の平均値を示し、扇形は推定値の標準偏差を表す。また、プルームの包絡線は Fig. 8.3 と同様である。高速方向推定アルゴリズム導入前の Fig. 7.11 (a) では、方向推定値の標準偏差が $20^\circ \sim 30^\circ$ 程度であった。これに対し、Fig. 8.13 の匂い源から遠く離れた場所では、標準偏差が 50° に達するところもある。ガス濃度が低い場所では単純に 2 個のセンサ応答を比較するのみの方が精度が良い場合があり、今後、検討を要する。しかし、方向推定の所要時間は従来法（一定速度 $2^\circ/\text{s}$ でコンパスを回転）の 60 ～ 180 秒から 10 ～ 20 秒程度に短縮された。また、匂い源付近では従来と変わらない標準偏差 30° が実現されている。

以上、本節で検討した方向推定法の改良点について最も良い方法を Table 8.1 にまとめる。

8.4 まとめ

本章では、2 次元匂い源探知コンパスの動作速度向上法について述べた。

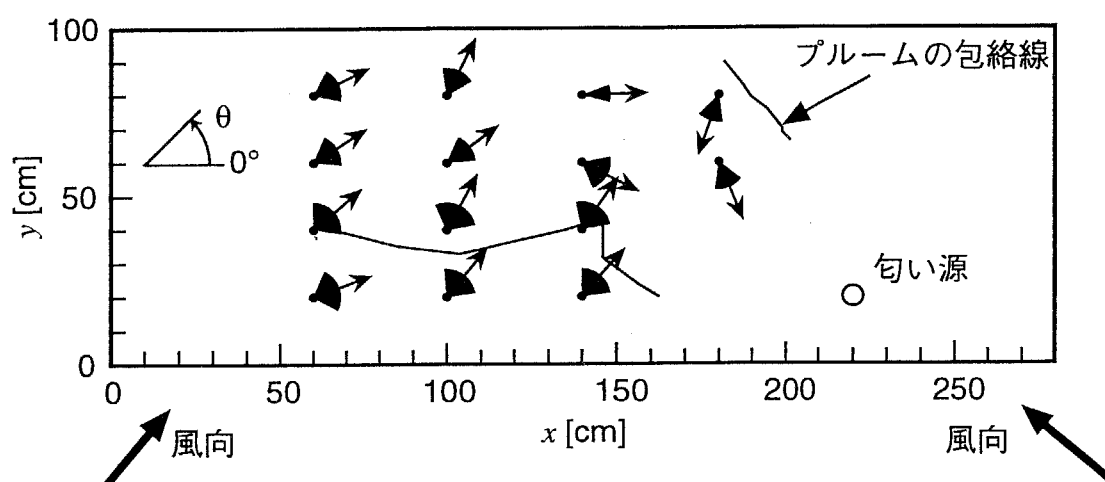


Fig. 8.13 匂い源の方向推定結果

Table 8.1 方向推定法についてのまとめ

コンパスの制御法	常に高速 (60°/s) で回転
必要なデータ数	過去 30 秒
ファンの風速	53.2 cm/s
入力無駄時間	1 秒

初めに、コンパス回転時のガスセンサ応答変化を状態方程式の形にモデル化した。このモデルを実際のセンサ応答にカーブフィットすることにより、センサ応答の遅れと角度依存性を同時に推定し、匂い源方向を求める。従来はセンサ応答変化の遅れによりコンパスの回転速度が $2^\circ/\text{s}$ 程度に制限されていたが、応答遅れを考慮した方向推定アルゴリズムにより回転速度を $60^\circ/\text{s}$ まで向上することができた。そこで、少ない時間でセンサ応答の角度依存性を把握するために、コンパスが常に高速で回転し続けるようなアルゴリズムに改良した。

また、ファンの風速を必要最小限のセンサ応答差が得られる程度に落とした。この結果、ファンの風が周囲の場を乱す影響を低減し、匂い源方向推定の安定性が向上した。コンパスを使用する環境についてガス放出速度や乱流拡散係数などのおおよその値が分かれば、第7章で述べたプルーム変形モデルを用いてセンサ応答差を見積もることができる。これに従って、ファンの風速を最適化すればよい。しかし、環境に関する情報が得られない場合も多いので、今後、環境に応じてファンの風速をオンラインで自動調節する機能を付加する。

本章で述べた高速方向推定アルゴリズムにより、方向判定時間は $10 \sim 20$ 秒まで短縮された。この結果、人間を匂いの発生源へ導くために実用的な動作速度になった。方向推定値の標準偏差は、プルーム中心部で 30° 、プルーム外で 45° 程度であった。プルーム外において方向推定値の変動がやや大きいのは、このような場所では風の乱れによるガス濃度分布の変動が大きいためである。方向推定値の変動がこの程度であれば、方向判定を繰り返しながら少しずつ移動することによって匂い源に向かうことができる。しかし、ガス濃度分布の変動がさらに大きい環境にコンパスを適用するためには、方向推定値の安定性を向上する工夫が必要である。このためには、コンパスを移動しながら方向推定を行い、異なる観測地点で得られた方向を統合して信頼性を向上することが有効であると考えられる。

また、第7章で述べたように、実際の環境では3次元コンパスでなければ対応できないような状況も多い。そこで、現在、3次元匂い源探知コンパスの高速化を検討している。

Chapter 9

結論

9.1 本研究で得られた成果

本研究では、匂いを辿って発生源を探知するシステムを種々開発し、その有効性を実験により確かめた。本研究で得られた成果を以下にまとめる。

- ガスセンサと風速センサを用いた自走型匂い源探知システムについて

1. 従来の匂い源探知システムが匂いの濃度勾配を辿って発生源へ向かおうとしていたのに対し、濃度情報に加えて風向情報を用いた匂い源探知システムを提案した。これらの情報に基づき、移動して匂い源を探索するシステムが匂い源探知に有効であることを示した。
2. 逆に、生物の匂い源探知行動に関する研究では、風上に移動すれば匂い源に向かうことができると単純に考えている場合が多い。しかし、場所によって風向の異なる環境では、この方法では匂い源探知ができないことが分かった。そこで、濃度勾配を辿って匂いのプルームを探索する動作と、発見したプルームを風上に辿る動作を状況に応じて切り替える適応型匂い源探知アルゴリズムを提案した。これによって、未知の現実環境にシステムが適応する事が可能になり、システムの匂い源探知能力が大きく向上した。
3. ガスが検出されなくなった場合に引き返して探知をやり直す機能や、プルームを見失った場合にこれを探索する機能を設けた結果、システムの信頼性が向上した。風や濃度分布の揺らぎのため、100%の正解率で方向判定を行うことは難しい。探索を繰り返し行い、これを補うことが有効である。
4. 移動中のシステムが観測したガスセンサの応答時系列を用い、遠方の匂い源位置を推定する方法を考案した。また、匂い源位置と同時に、環境内のガス濃度分布や匂い源からのガス放出量も予測可能である。これは、匂いの運ばれる伝達場の認識に他ならず、今後、匂い源探知システムの性能を飛躍的に高める可能性を秘めている。

- 能動サンプリング型匂い源探知システムについて

1. 羽ばたきにより匂いを採取するカイコガの行動を模倣し、人工匂い源探知システムに利用することを提案した。この能動的行為を通じて匂い源方向に対応したガスセンサ応答を引き出すことが可能となった。
2. この原理を応用し、匂い源探知コンパスを開発した。この装置はファンの前に複数のガスセンサを配置したものであり、ファンの吸引効果によって匂い源方向に対応した応答差が得られる。このコンパスを人間が手に持ち、判定された方向に従って移動すれば匂い源を探知することができる。
3. 匂い源探知コンパスのガスセンサ応答変化をモデル化し、遅れを考慮しながらセンサ応答差の方向依存性を推定する方法を考案した。これによって、コンパスの回転速度をセンサの応答速度以上に上げ、素早く方向推定を行うことが可能となった。この結果、1回の方向判定時間は10～20秒程度に短縮され、実用的な動作速度を得ることができた。
4. 3次元的な方向判定を行う匂い源探知コンパスを開発した。これによって、3次元的で複雑な風の流れを持つ環境における匂い源探知が可能となり、システムの探知能力が向上した。

現状で両者のシステムを比較すると、微風速環境下における探知能力では匂い源探知コンパスに軍配が上がる。また、このシステムは構造が簡単であり、状況に応じて場合分けをすることなく匂い源方向の判定が可能であるという長所をもつ。このため、匂い源の方向指示機として人間が手に持って使用する用途に適している。

しかし、ファンの吸引効果が及ぶ範囲内に予め十分な大きさの濃度勾配がなければ、センサに応答差が得られない。このため、匂い源から遠く離れた場所における探知能力では風速センサを用いた自走システムの方が勝る。したがって、将来的には両者を融合し、遠方では風速センサを用い、近距離ではコンパスを利用するシステムが有効であると考えられる。

9.2 今後の展望

本研究では、研究目標を「一定強度、一定風向の風が常に吹いている環境」における匂い源探知の達成に限定した。この範囲内では前節で述べたような成果を上げ、従来困難であった人工システムによる匂い源探知が可能となった。このような環境としては、クリーンルームや空調完備のビル環境などが考えられ、防災面において匂い源探知システムのニーズも高い。こうした環境であれば、現状のシステムも実用化のための最低限の性能を有している。

しかし、より一般的な環境に対応し、真に実用的なシステムを開発するための課題は多い。例えば、現実環境では多数の匂いが存在する中から対象の匂いを識別して探知を達成しなければならない。現在、微妙な匂いの識別に関しては、特性の異なる複数のセンサの

出力パターンを識別する方法が主流となっている。しかし、識別をセンサの定常応答で行っている場合がほとんどである。リアルタイムでガス種を識別し、その濃度を定量できるシステムは開発されていない。空気中を漂ってくる匂いのように濃度変動が大きい場合には、センサ応答の遅れが問題となる。応答の遅れはセンサごとに異なるため、過渡状態と定常状態では応答パターンが変化してしまう。しかし、本論文で述べた動特性のモデル化がこのような問題の解決の糸口となるのではないかと考えている。

また、前節で述べた2種類のシステムのどちらを用いた場合でも、風の乱れが非常に大きい環境における匂い源探知は困難である。こうした環境では、濃度情報と風向情報のどちらも信頼性は低くなると考えられる。この問題を克服するためには、得られる情報の量を増やすことが必要不可欠であると考えている。例えば、風速センサを用いたシステムと匂い源探知コンパスの融合が考えられる。この場合、風速センサによって判定した匂い源方向と、コンパスによって得た方向の冗長性を利用し、方向判定の確実性を高めることが期待される。また、コンパスに運動性を付加することによって、異なる場所で観測した匂い源方向を融合することも考えている。

本論文では、1台のシステムによる匂い源探知を考えたが、複数の匂い源探知ロボットを同時に作業に当て、協調させて匂い源を探索することも考えられる。これによって、複数の場所における濃度情報を一度に集めれば、本論文で述べた匂い源位置の予測を高速化できる。また、この協調動作実現のためには、匂いによるロボット間の通信も有効であろう。例えば、各ロボットからフェロモンの役割を果たす匂いを放出する。匂い源探索中にこのフェロモンを検出したならば、その地点の風上方向に別のロボットが存在することを意味する。このような状況では別の方向を探索するようにすれば、多数のロボットを環境内にくまなく分散させることが可能となる。

得られる情報量をさらに増やすためには、匂い源探知システムに小型のガスセンサアレイを搭載することが有望である。本論文で述べたように、センサ応答の信号処理によりガスセンサ応答の応答回復速度を向上する事が可能である。この手法を用いて、センサを密に並べた高速応答ガスセンサアレイを構築すれば、匂いの流れるイメージを捉えることができる。従来はある測定点における匂い源方向の判定を行ってきたが、センサアレイを用いた場合にはこれを面における測定に改良することになり、情報量の飛躍的な増加が期待できる。

以上のように、匂い源探知に関しては未開拓の領域が多く残されており、今後も発展が期待できる。その際のキーポイントは、本研究の手法と同様に、各種センサとアクチュエータを一つのロボットシステムに統合し、これらが単独の状態ではなし得なかった機能を実現することであろう。現在、ロボットの研究分野ではガス・匂いセンサはほとんど利用されていない。しかし、今後、匂い源探知を初めとする様々な用途に嗅覚を持つロボットシステムが活躍すると期待しており、その実現に向けて研究を進めていきたいと考えている。

謝辞

初めに、このような新分野を開拓する研究の機会を与えて下さり、また5年間にわたってご指導を頂いた森泉豊榮教授に深く感謝いたします。また、本研究を進めるにあたり、中本高道助教授には日頃の討論を通じて数多くの有益なご助言を頂いたことを感謝いたします。

筑波大学生物科学系の神崎亮平先生には、生物行動に関して数々の興味深いお話を教えていただきました。また、カイコガの行動観察実験に関しては実験方法を丁寧に教えていただいただけでなく、合成フェロモンまで提供して頂きました。ここに深謝いたします。

また、本学物性グループの阿部正紀教授、岩本光正教授、小長井誠教授、山田明助教授、直江正彦教授、中川茂樹助教授には、発表会における討論を通じて数多くの有益なご助言を頂きましたことを感謝いたします。また、山下幸彦助教授には、お忙しい中、貴重なご助言を頂きましたことをここに深謝いたします。森泉研究室助手の斉藤敦史さんには、公私両面にわたって大変お世話になりました。ここに御礼申し上げます。

本研究の一部は、以下の諸氏との共同で行いました。末次謹一郎君（現全日空）、香川幸彦君（現クボタ）、林勝己君（現北陸先端科学技術大学院大学修士2年）、山中高夫君（現本学修士1年）、高草木正彦君（現本学修士1年）小林豪人君（現本学修士1年）、以上の各氏に感謝いたします。

最後に、お世話になった森泉・中本研究室の諸先輩方、ならびに研究室の皆様にご心から感謝いたします。

発表文献

(1) 論文

1. H. Ishida, K. Suetsugu, T. Nakamoto and T. Moriizumi (1994) "Study of autonomous mobile sensing system for localization of odor source using gas sensors and anemometric sensors", *Sensors and Actuators A*, **45**, 153 - 157.
2. H. Ishida, K. Hayashi, M. Takakusaki, T. Nakamoto, T. Moriizumi and R. Kanzaki (1996) "Odour-source localization system mimicking behaviour of silkworm moth", *Sensors and Actuators A*, **51**, 225 - 230.
3. H. Ishida, Y. Kagawa, T. Nakamoto and T. Moriizumi (1996) "Odor-source localization in the clean room by an autonomous mobile sensing system", *Sensors and Actuators B*, **33**, 115 - 121.
4. 石田寛, 中本高道, 森泉豊榮 (1996) "におい源探知コンパスの研究", 電気学会論文誌 E, **116**, 10, 429 - 434.
5. T. Nakamoto, H. Ishida and T. Moriizumi (1996) "An odor compass for localizing an odor source", *Sensors and Actuators B*, accepted for publication.
6. 山中高夫, 石田寛, 中本高道, 森泉豊榮 (1996) "カルマンフィルタを用いたセンサ応答処理による匂い源探知システムの高速化", 電気学会論文誌 E, 投稿中.

(2) 国際会議論文

1. H. Ishida, Y. Kagawa, T. Nakamoto and T. Moriizumi (1995) "Odor-source localization in clean room by autonomous mobile sensing system", *Tech. Digest, Transducers'95 - Eurosensors IX*, Stockholm, Sweden, Vol. 1, pp. 783 - 786.
2. H. Ishida, K. Hayashi, M. Takakusaki, T. Nakamoto and T. Moriizumi (1996) "Odor-source localization system mimicking behavior of silkworm moth", *Proc. Int. Conf. on Microelectronics'96*, Bandung, Indonesia, pp. 146 - 150.

3. H. Ishida, M. Takakusaki, T. Nakamoto and T. Moriizumi (1996) "Odor compass mimicking behavior of silkworm moth", *Proc. 6th Int. Meeting on Chemical Sensors*, Gaithersburg, Maryland, OR-131.
4. H. Ishida, T. Nakamoto and T. Moriizumi (1996) "Study of odor compass", *Proc. IEEE/SICE/RSJ Int. Conf. on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*, Washington D.C., pp. 222 - 226.

(3) 研究会、シンポジウム

1. H. Ishida, K. Suetsugu, T. Nakamoto and T. Moriizumi (1994) "Study of autonomous mobile sensing system for localization of odor source using gas sensors and anemometric sensors", *Tech. Digest, The 12th Sensor Symposium*, 大阪, pp. 75 - 78.
2. 石田寛, 林勝己, 中本高道, 森泉豊榮, 神崎亮平 (1995) "カイコガの行動を模倣したにおい源探知システムの研究", 電子情報通信学会技術研究報告, 東京, OME95-7, pp. 35 - 40.
3. H. Ishida, T. Nakamoto and T. Moriizumi (1996) "Improvement of working speed in odor compass using control theory", *Tech. Digest, The 14th Sensor Symposium*, 川崎, pp. 223 - 226.
4. 山中高夫, 石田寛, 中本高道, 森泉豊榮 (1996) "カルマンフィルタを用いたセンサ応答処理による匂い源探知システムの高速化", 電子情報通信学会技術研究報告, 東京, CPM96-28, pp. 1 - 6.
5. 石田寛, 小林豪人, 中本高道, 森泉豊榮 (1996) "高速回転型匂い源探知コンパスの研究", 電気学会化学センサシステム研究会資料, CS-96-11, pp. 137 - 146.

(4) 口頭発表

1. 石田寛, 中本高道, 森泉豊榮 (1993) "複数ガスセンサを用いたにおい源探知システムの基礎的研究", 第40回応用物理学関係連合講演会予稿集, 東京, Vol. 1, p. 377.
2. 石田寛, 中本高道, 森泉豊榮 (1993) "複数ガスセンサを用いた移動型におい源探知システムの基礎的研究", 第32回計測自動制御学会学術講演会予稿集, 金沢, pp. 767 - 768.
3. 石田寛, 末次謹一郎, 中本高道, 森泉豊榮 (1994) "ガスセンサと風速センサを用いたにおい源方向判定プローブ", 第41回応用物理学関係連合講演会予稿集, 東京, Vol. 1, p. 345.

4. 末次謹一郎, 石田寛, 中本高道, 森泉豊榮 (1994) “自走型におい源探知システムの研究”, 第 41 回応用物理学関係連合講演会予稿集, 東京, Vol. 1, p. 346.
5. 石田寛, 末次謹一郎, 中本高道, 森泉豊榮 (1994) “ガスセンサと風速センサを用いた自走型におい源探知システムの研究”, 第 33 回計測自動制御学会学術講演会予稿集, 東京, pp. 609 - 610.
6. 石田寛, 林勝己, 中本高道, 森泉豊榮 (1994) “ガスセンサと風速センサを用いた自走型におい源探知システムの改良”, 第 55 回応用物理学学会学術講演会予稿集, 名古屋, Vol. 1, p. 325.
7. 石田寛, 香川幸彦, 中本高道, 森泉豊榮 (1995) “自走型におい源探知システムを用いたクリーンルーム内におい源探知”, 第 42 回応用物理学関係連合講演会予稿集, 平塚, Vol. 1, p. 364.
8. 林勝己, 石田寛, 中本高道 (1995) “カイコガの行動を模倣したにおい源探知システムの研究”, 第 42 回応用物理学関係連合講演会予稿集, 平塚, Vol. 1, p. 365.
9. 石田寛, 高草木将彦, 中本高道, 森泉豊榮 (1995) “能動サンプリング型におい源探知システムを用いたクリーンルーム内におい源探知”, 第 56 回応用物理学学会学術講演会予稿集, 金沢, Vol. 1, p. 328.
10. 石田寛, 中本高道, 森泉豊榮 (1996) “カイコガを模倣したにおい源探知コンパスの研究”, 平成 8 年電気学会全国大会論文集, 東京, Vol. 3, p. 260.
11. 山中高夫, 石田寛, 中本高道, 森泉豊榮 (1996) “カルマンフィルタを用いたセンサ応答処理による匂い源探知システムの高速化”, 平成 8 年電気学会全国大会論文集, 東京, Vol. 3, p. 135.
12. 石田寛, 中本高道, 森泉豊榮 (1996) “高速回転型におい源探知コンパス”, 第 57 回応用物理学学会学術講演会予稿集, 福岡, Vol. 1, p. 332.
13. T. Nakamoto, T. Yamanaka, H. Ishida and T. Moriizumi (1996) “Speed up of odor-source localization system using Kalman-filter sensor signal processing method”, *Meeting Abstracts of Electrochemical Society*, Vol. 96-2, p. 1163.

(5) 賞与

- 電気学会優秀論文発表賞, “カイコガを模倣したにおい源探知コンパスの研究”, 平成 8 年電気学会全国大会にて発表.

Bibliography

- [1] Abe, H., Yoshimura, T., Kanaya, S., Takahashi, Y., Miyashita, Y. and Sasaki, S. (1987) "Automated odor-sensing system based on plural semiconductor gas sensors and computerized pattern recognition techniques", *Anal. Chim. Acta*, **194**, 1 - 9.
- [2] 足立修一 (1993) ユーザのためのシステム同定理論, 計測自動制御学会.
- [3] Agosta, W. C. (1992) *Chemical Communication*, W. H. Freeman and Company, New York (木村武二訳, フェロモンの謎, 東京化学同人).
- [4] Aloimonos, J., Weiss, I. and Bandyopadhyay, A. (1987) "Active vision", *Proc. 1st Int. Conf. on Computer Vision*, London, England, pp. 35 - 54.
- [5] Amamoto, T., Yamaguchi, T., Matsuura, Y. and Kajiyama, Y. (1992) "Development of pulse drive semiconductor gas sensor", *Tech. Digest, The 4th Int. Meeting on Chemical Sensors*, Tokyo, Japan, pp. 666 - 667.
- [6] Arbas, E. A., Willis, M. A. and Kanzaki, R. (1993) "Organization of goal-oriented locomotion: pheromone-modulated flight behavior of moths", in Beer, R. D., Ritzmann, R. E. and McKenna, T. (eds.), *Biological Neural Networks in Invertebrate Neuroethology and Robotics*, Academic Press, San Diego, pp. 159 - 198.
- [7] 浅田稔 (1992) "センサフュージョン", 電子情報通信学会誌, **75**, 7, 763 - 769.
- [8] Baker, T. C. and Haynes, K. F. (1987) "Manoeuvres used by flying male oriental fruit moths to relocate a sex pheromone plume in an experimentally shifted wind-field", *Physiological Entomology*, **12**, 263 - 279.
- [9] Bardach, J. E., Todd, J. H. and Crickmer, R. (1967) "Orientation by taste in fish of the genus *Ictalurus*", *Science*, **155**, 1276 - 1278.
- [10] Bell, W. J. and Tobin, T. R. (1982) "Chemo-orientation", *Biol. Rev.*, **57**, 219 - 260.
- [11] Berg, H. C. and Brown D. A. (1972) "Chemotaxis in *Escherichia coli* analysed by three-dimensional tracking", *Nature*, **239**, 500 - 504.

- [12] Bolles, R. C. and Baker, H. H. (1985) "Epipolar-plane image analysis: a technique for analyzing motion sequences", *Proc. 3rd Workshop on Computer Vision: Representation and Control*, Bellaire, Michigan, pp. 168 - 178.
- [13] Boreham, B. W., Jones, C. D. and Griffiths, R. F. (1985) "Field evaluation of a new Langmuir-type probe for atmospheric dispersion studies using ions as a tracer", *J. Phys. E:Sci. Instrum.*, **18**, 218 - 223.
- [14] Bossert, W. H. and Wilson, E. O. (1963) "The analysis of olfactory communication among animals", *J. Theoret. Biol.*, **5**, 443 - 469.
- [15] Brooks, R. A. (1986) "A robust layered control system for a mobile robot", *IEEE J. of Robotics and Automation*, **2**, 1, 14 - 23.
- [16] Consi, T. R., Atema, J., Goudey, C. A., Cho, J. and Chrysostomidis, C. (1994) "AUV guidance with chemical signals", *Proc. 1994 Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology*, Cambridge, Massachusetts, pp. 450 - 455.
- [17] Consi, T. R., Grasso, F., Mountain, D. and Atema, J. (1995) "Explorations of turbulent odor plumes with an autonomous underwater robot", *Biol. Bull.*, **189**, 231 - 232.
- [18] David, C. T., Kennedy, J. S. and Ludlow, A. R. (1983) "Finding of a sex pheromone source by gypsy moths released in the field", *Nature*, **303**, 804 - 806.
- [19] Deveza, R., Thiel, D., Russell, A. and Mackay-Sim, A. (1994) "Odor sensing for robot guidance", *Int. J. Robotics Research*, **13**, 3, 232 - 239.
- [20] Dusenbery, D. B. (1989) "Efficiency and the role of adaptation in klinokinesis", *J. Theor. Biol.*, **136**, 281 - 293.
- [21] Dusenbery, D. B. (1989) "Optimal search direction for an animal flying or swimming in a wind or current", *J. Chem. Ecol.*, **15**, 11, 2511 - 2519.
- [22] Dusenbery, D. B. (1990) "Upwind searching for an odor plume is sometimes optimal", *J. Chem. Ecol.*, **16**, 6, 1971 - 1976.
- [23] Elfes, A. (1989) "Using occupancy grids for mobile robot perception and navigation", *Computer*, **22**, 6, 46 - 57.
- [24] Elfes, A. (1991) "Dynamic control of robot perception using stochastic spatial models", in Schmidt, G. (ed.), *Information Processing in Mobile Robots*, Springer-Verlag, New York, pp. 203 - 218.

- [25] Elfes, A. (1992) "Dynamic control of robot perception using multi-property inference grids", *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Nice, France, pp. 2561 - 2567.
- [26] Ema, K., Yokoyama, M., Nakamoto, T. and Moriizumi, T. (1989) "Odour-sensing system using a quartz-resonator sensor array and neural-network pattern recognition", *Sensors and Actuators*, **18**, 291 - 296.
- [27] Farkas, S. R. and Shorey, H. H. (1972) "Chemical trail-following by flying insects: a mechanism for orientation to a distant odor source", *Science*, **178**, 67 - 68.
- [28] Genovese, V., Dario, P., Magni, R. and Odetti, L. (1992) "Self organizing behavior and swarm intelligence in a pack of mobile miniature robots in search of pollutants", *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Raleigh, North Carolina, pp. 1575 - 1582.
- [29] Gifford, F. (1959) "Statistical properties of a fluctuating plume dispersion model", *Advances in Geophysics*, **6**, 117 - 137.
- [30] Hanna, S. R. (1984) "Concentration fluctuations in a smoke plume", *Atmos. Environ.*, **18**, 6, 1091 - 1106.
- [31] Hatfield, J. V., Neaves, P., Hicks, P. J., Persaud, K. and Travers, P. (1994) "Towards an integrated electronic nose using conducting polymer sensors", *Sensors and Actuators B*, **18**, 221 - 228.
- [32] Haynes, K. F. and Baker, T. C. (1989) "An analysis of anemotactic flight in female moths stimulated by host odour and comparison with the males' response to sex pheromone", *Physiological Entomology*, **14**, 279 - 289.
- [33] Hillis, W. D. (1982) "A high-resolution imaging touch sensor", *Int. J. Robotics Research*, **1**, 2, 33 - 44.
- [34] 日野幹雄 (1992) 流体力学, 朝倉書店.
- [35] 平中幸雄 (1989) "ガスセンサとにおいの可視化", 香料, **162**, 75 - 80.
- [36] Hiranaka, Y., Abe, T. and Murata, H. (1992) "Gas-dependent response in the temperature transient of SnO₂ gas sensors", *Sensors and Actuators B*, **9**, 177 - 182.
- [37] 平中幸雄, 山崎弘郎 (1988) "半導体ガスセンサアレイによるガス濃度分布の可視化", 電気学会センサ技術研究会資料, ST-88-4, pp. 33 - 42.

- [38] Hiranaka, Y. and Yamasaki, H. (1989) "Measurement of spatial distribution change of gas component by using a sensor array", *Tech. Digest, The 8th Sensor Symposium*, Tokyo, Japan, pp. 177 - 180.
- [39] 平岡正勝, 田中幹也 (1994) 新版 移動現象論, 朝倉書店.
- [40] Holmberg, M., Winqvist, F., Lundström, I., Gardner, J. W. and Hines, E. L. (1995) "Identification of paper quality using a hybrid electronic nose", *Sensors and Actuators B*, **27**, 246 - 249.
- [41] Ihokura, K. and Watson, J. (1994) *The Stannic Oxide Gas Sensor*, CRC Press, Florida.
- [42] 石田寛, 中本高道, 森泉豊榮 (1993) "複数ガスセンサを用いたにおい源探知システムの基礎的研究", 第40回応用物理学関係連合講演会予稿集, 東京, Vol. 1, p. 377.
- [43] 石田寛, 中本高道, 森泉豊榮 (1993) "複数ガスセンサを用いた移動型におい源探知システムの基礎的研究", 第32回計測自動制御学会学術講演会予稿集, 金沢, pp. 767 - 768.
- [44] Ishida, H., Suetsugu, K., Nakamoto, T. and Moriizumi, T. (1994) "Study of autonomous mobile sensing system for localization of odor source using gas sensors and anemometric sensors", *Sensors and Actuators A*, **45**, 153 - 157.
- [45] 石井抱, 石川正俊 (1996) "超高速ビジョンのための2値画像処理アルゴリズム", 電気学会センサシステム応用研究会資料, SSA-96-16, pp. 455 - 464.
- [46] 石川正俊 (1988) "並列処理を用いた能動的センサシステム", 計測自動制御学会論文集, **24**, 8, 860 - 866.
- [47] 石川正俊 (1993) "アクティブセンシングとロボットハンド", 日本ロボット学会誌, **11**, 7, 938 - 942.
- [48] 金子真 (1993) "触覚とロボットの行動", 日本ロボット学会誌, **11**, 8, 1171 - 1177.
- [49] 金子真 (1996) "アクティブセンシング", 計測と制御, **35**, 4, 274 - 277.
- [50] Kaneyasu, M., Ikegami, A., Arima, H. and Iwanaga, S. (1987) "Smell identification using a thick-film hybrid gas sensor", *IEEE Transactions on Components, Hybrids and Manufacturing Technology*, **10**, 2, 267 - 273.
- [51] 神崎亮平 (1995) "昆虫の脳における匂い情報処理と行動発現", 生物物理, **35**, 5, 193 - 198.

- [52] Kanzaki, R., Ariyoshi, T. and Fukuda, F. (1995) "Strategies for odor-searching behavior in a silkworm moth, *Bombyx mori*", in Burrows, M., Matheson, T., Newland, P. L. and Schuppe, H. (eds.), *Nervous Systems and Behavior, Proc. 4th Int. Cong. Neuroethology*, Georg Thieme, Stuttgart, p. 392.
- [53] Kanzaki, R. and Shibuya, T. (1992) "Olfactory processing pathways of the insect brain", *Zoological Science*, **9**, 241 - 264.
- [54] Kanzaki, R. and Shibuya, T. (1992) "Personal-computer-based processing technique for analyzing insect mating behavior in response to sex pheromone odor", *Sensors Mater.*, **4**, 1 - 9.
- [55] Kanzaki, R., Sugi, N. and Shibuya, T. (1992) "Self-generated zigzag turning of *Bombyx mori* males during pheromone-mediated upwind walking", *Zoological Science*, **9**, 515 - 527.
- [56] 片山徹 (1994) システム同定入門, 朝倉書店.
- [57] King, W. H. (1964) "Piezoelectric sorption detector", *Anal. Chem.*, **36**, 9, 1735 - 1739.
- [58] 気象ハンドブック編集委員会編 (1979) 気象ハンドブック, 朝倉書店.
- [59] 小宮山宏 (1995) 反応工学, 培風館.
- [60] Kriegman, D. J., Triendl, E. and Binford, T. O. (1987) "A mobile robot: sensing, planning and locomotion", *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Raleigh, North Carolina, pp. 402 - 408.
- [61] 窪田英樹 (1984) "室内気流と体感", *空気調和・衛生工学*, **58**, 3, 33 - 38.
- [62] 桑名芳彦, 下山勲, 三浦宏文 (1995) "昆虫の触角を用いた移動ロボットの方向制御", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'95 講演論文集, 川崎, Vol. A, pp. 564 - 567.
- [63] Kuwana, Y., Shimoyama, I. and Miura, H. (1995) "Steering control of a mobile robot using insect antennae", *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Pittsburgh, Pennsylvania, pp. 530 - 535.
- [64] 桑名芳彦, 下山勲, 三浦宏文 (1995) "カイコガの触角を用いたフェロモンセンサの製作と応用", 第13回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 川崎, pp. 1159 - 1160.
- [65] Li, W. and Feng, X. (1994) "Behavior fusion for robot navigation in uncertain environments using fuzzy logic", *Proc. IEEE Int. Conf. on Systems, Man and Cybernetics*, San Antonio, Texas, pp. 1790 - 1796.

- [66] Lundström, I., Erlandsson, R., Frykman, U., Hedborg, E., Spetz, A., Sundgren, H., Welin, S. and Winquist, F. (1991) "Artificial 'olfactory' images from a chemical sensor using a light-pulse technique", *Nature*, **352**, 47 – 50.
- [67] Lundström, K. I., Shivaraman, M. S. and Svensson, C. M. (1975) "A hydrogen-sensitive Pd-gate MOS transistor", *J. Appl. Phys.*, **46**, 9, 3876 – 3881.
- [68] Mafra-Neto, A. and Cardé, R. T. (1994) "Fine-scale structure of pheromone plumes modulates upwind orientation of flying moths", *Nature*, **369**, 142 – 144.
- [69] 松梨順三郎 (1991) 環境流体輸送, 日刊工業新聞社.
- [70] Matthies, L. and Elfes, A. (1988) "Integration of sonar and stereo range data using a grid-based representation", *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Philadelphia, Pennsylvania, pp. 727 – 733.
- [71] Moore, P. and Atema, J. (1988) "A model of a temporal filter in chemoreception to extract directional information from a turbulent odor plume", *Biol. Bull.*, **174**, 355 – 363.
- [72] Moore, P. A. and Atema, J. (1991) "Spatial information in the three-dimensional fine structure of an aquatic odor plume", *Biol. Bull.*, **181**, 408 – 418.
- [73] 森憲作 (1993) "嗅覚の工学的表現", 電子情報通信学会誌, **76**, 11, 1209 – 1215.
- [74] Murlis, J. (1986) "The structure of odour plumes", in Payne, T. L., Birch, M. C. and Kennedy, C. E. J. (eds.), *Mechanisms in Insect Olfaction*, Oxford University Press, Oxford, pp. 27 – 38.
- [75] Murlis, J., Elkinton, J. S. and Cardé, R. T. (1992) "Odor plumes and how insects use them", *Annu. Rev. Entomol.*, **37**, 505 – 532.
- [76] Murlis, J., Willis, M. A. and Cardé, R. T. (1990) "Odour signals: patterns in time and space", *Proc. 10th Int. Symp. Olfaction and Taste*, Oslo, Norway, pp. 6 – 17.
- [77] 中坊嘉宏, 石井抱, 石川正俊 (1996) "超並列・超高速ビジョンシステムを用いたビジュアルフィードバック", 電気学会センサシステム応用研究会資料, SSA-96-15, pp. 445 – 454.
- [78] Nakamoto, T., Fukuda, A. and Moriizumi, T. (1991) "Improvement of identification capability in an odor-sensing system", *Sensors and Actuators B*, **3**, 221 – 226.
- [79] Nakamoto, T., Matsushita, H. and Okazaki, N. (1995) "Improvement of optimization algorithm in active gas/odor sensing system", *Sensors and Actuators A*, **50**, 191 – 196.

- [80] Nakamoto, T., Utsumi, S., Yamashita, N., Moriizumi, T. and Sonoda, Y. (1994) "Active gas/odor sensing system using automatically controlled gas blender and numerical optimization technique", *Sensors and Actuators B*, **20**, 131 - 137.
- [81] 中野道雄監修, 西山清著 (1993) パソコンで解くカルマンフィルタ, 丸善株式会社.
- [82] Nakata, S., Nakamura, H. and Yoshikawa, K. (1992) "New strategy for the development of a gas sensor based on the dynamic characteristics: principle and preliminary experiment", *Sensors and Actuators B*, **8**, 187 - 189.
- [83] Natale, C. D., Davide, F. A. M., D'Amico, A., Nelli, P., Groppelli, S. and Sberveglieri, G. (1995) "Sensor array recognition of varieties of a same wine", *Tech. Digest, Transducers'95 - Eurosensors IX*, Stockholm, Sweden, Vol. 1, pp. 711 - 714.
- [84] Obara, Y. (1979) "*Bombyx mori* mating dance: an essential in locating the female", *Appl. Ent. Zool.*, **14**, 1, 130 - 132.
- [85] Okahata, Y. and Shimizu, O. (1987) "Olfactory reception on a multibilayer-coated piezoelectric crystal in a gas phase", *Langmuir*, **3**, 1171 - 1172.
- [86] Persaud, K. and Dodd, G. (1982) "Analysis of discrimination mechanisms in the mammalian olfactory system using a model nose", *Nature*, **299**, 352 - 355.
- [87] Ride, D. J. (1988) "A model for the observed intermittency of a meandering plume", *J. Hazard. Mater.*, **19**, 131 - 137.
- [88] Rozas, R., Morales, J. and Vega, D. (1991) "Artificial smell detection for robotic navigation", *Proc. 5th Int. Conf. on Advanced Robotics*, Pisa, Italy, pp. 1730 - 1733.
- [89] Russell, R. A. (1992) "Using tactile whiskers to measure surface contours", *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Nice, France, pp. 1295 - 1299.
- [90] Russell, R. A. (1995) "Laying and sensing odor markings as a strategy for assisting mobile robot navigation tasks", *IEEE Robotics & Automation Magazine*, **2**, 3, 3 - 9.
- [91] Russell, R. A., Thiel, D., Deveza, R. and Mackay-Sim, A. (1995) "A robotic system to locate hazardous chemical leaks", *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Nagoya, Japan, pp. 556 - 561.
- [92] Sauer, A. E., Karg, G., Koch, U. T., De Kramer, J. J. and Milli, R. (1992) "A portable EAG system for the measurement of pheromone concentrations in the field", *Chemical Senses*, **17**, 5, 543 - 553.

- [93] Sberveglieri, G., Faglia, G., Groppelli, S., Nelli, P. and Taroni, A. (1992) "A novel PVD technique for the preparation of SnO_2 thin films as $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ sensors", *Sensors and Actuators B*, **7**, 721 – 726.
- [94] Schmitt, B. C. and Ache, B. W. (1979) "Olfaction: responses of a decapod crustacean are enhanced by flicking", *Science*, **205**, 204 – 206.
- [95] Seiyama, T., Kato, A., Fujiishi, K. and Nagatani, M. (1962) "A new detector for gaseous components using semiconductive thin films", *Anal. Chem.*, **34**, 11, 1502 – 1503.
- [96] 清山哲郎, 塩川二郎, 鈴木周一, 笛木和雄編 (1982) 化学センサー, 講談社.
- [97] 下山勲, 神崎亮平 (1995) "人工神経による昆虫の行動の解明と制御", 立石科学技術振興財団助成研究成果集, **4**, 24 – 29.
- [98] 篠田裕之, 安藤繁 (1994) "超音波輻射触覚センサ", 第12回「センサの基礎と応用」シンポジウム講演概要集, 大阪, p. 21.
- [99] Shirai, Y. (1971) "Recognition of polyhedrons with a range finder", *Bulletin of the Electrotechnical Laboratory*, **35**, 3, 290 – 296.
- [100] Stella, E., Musio, F., Vasanelli, L. and Distanto, A. (1995) "Goal-oriented mobile robot navigation using an odour sensor", *Proc. 1995 Intelligent Vehicles Symposium*, Detroit, Michigan, pp. 147 – 151.
- [101] Stetter, J. R., Zaromb, S. and Findlay, M. W. (1984) "Monitoring of electrochemically inactive compounds by amperometric gas sensors", *Sensors and Actuators*, **6**, 269 – 288.
- [102] 高橋清, 佐々木昭夫編 (1994) アドバンスドセンサハンドブック, 培風館.
- [103] 田中正吾 (1994) 計測システム工学, 朝倉書店.
- [104] Tobin, T. R. (1981) "Pheromone orientation: role of internal control mechanisms", *Science*, **214**, 1147 – 1149.
- [105] 都甲潔, 宮城幸一郎 (1995) センサ工学, 培風館.
- [106] Tunstel, E. and Jamshidi, M. (1994) "Fuzzy logic and behavior control strategy for autonomous mobile robot mapping", *Proc. 3rd IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems*, Orlando, Florida, pp. 514 – 517.
- [107] Winquist, F., Sundgren, H. and Lundström, I. (1995) "A practical use of electronic noses: quality estimation of cod fillet bought over the counter", *Tech. Digest, Transducers'95 – Eurosensors IX*, Stockholm, Sweden, Vol. 1, pp. 695 – 698.

- [108] Wyatt, T. D. (1994) "Moth flights of fancy", *Nature*, **369**, 98 - 99.
- [109] 山香映三編著 (1986) ハイテクノロジー・センサ, 共立出版.
- [110] 山川進三, 明瀬貴久, 山口晃史 (1993) "光ファイバセンサアレイによるにおいの可視化", 第 32 回計測自動制御学会学術講演会予稿集, 金沢, pp. 761 - 762.
- [111] 山川進三, 越村賢一郎 (1994) "ローダミン B 色素膜光ファイバセンサアレイを使ったメタノールガス濃度分布の可視化", 第 33 回計測自動制御学会学術講演会予稿集, 東京, pp. 611 - 612.
- [112] 山中高夫 (1996) "カルマンフィルタを用いたセンサ応答処理による匂い源探知システムの高速化", 卒業論文, 東京工業大学工学部.
- [113] 山中高夫, 石田寛, 中本高道, 森泉豊榮 (1996) "カルマンフィルタを用いたセンサ応答処理による匂い源探知システムの高速化", 電子情報通信学会技術研究報告, **96**, 121, CPM96-28, 1 - 6.
- [114] 山崎弘郎, 石川正俊編著 (1992) センサフュージョン, コロナ社.
- [115] Yamazoe, N. (1991) "New approaches for improving semiconductor gas sensors", *Sensors and Actuators B*, **5**, 7 - 19.
- [116] 吉川研一監修, 中田聡, 福永勝則, 金田義亮共著 (1996) ダイナミックな現象を科学する, 産業図書.
- [117] Zigmond, S. H. (1974) "Mechanisms of sensing chemical gradients by polymorphonuclear leukocytes", *Nature*, **249**, 450 - 452.