

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	浮泥堆積域における可航水深の推計および予測に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	坂田憲治
Author(English)	Kenji Sakata
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12755号, 授与年月日:2024年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:岩波 光保,高橋 章浩,千々和 伸浩,高木 泰士,中村 隆志,中川 康之
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12755号, Conferred date:2024/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

博士論文

浮泥堆積域における可航水深の
推計および予測に関する研究

令和6年2月

東京工業大学 環境・社会理工学院
土木・環境工学系 土木工学コース
坂田 憲治

浮泥堆積域における可航水深の 推計および予測に関する研究

目次

第1章 序論	1
1.1 本研究の背景	1
1.2 本研究の目的および概要	6
1.3 本論文の構成および各章の概要	7
第2章 既往の研究および本研究の対象	9
2.1 海外の浮泥堆積域における可航水深による水深管理	9
2.2 底泥密度 1, 200kg/m ³ の測定方法	11
2.3 浮泥の輸送特性	12
2.4 i-Construction における出来形管理の効率化	12
2.5 本研究の対象	13
第3章 浮泥堆積域における可航水深の簡便な推計手法の提案	15
3.1 アンケート調査による ICT 浚渫工における浮泥の影響がもたらす問題点の把握	15
3.1.1 アンケート調査の概要	15
3.1.2 アンケート調査結果	15
3.2 東京東航路周辺海域, 荻田港および名古屋港での現地観測	18
3.2.1 観測地点および測定項目	18
3.2.2 音響測深及びレッドによる測深結果の差	22
3.2.3 底泥密度 1, 200kg/m ³ 以下の底泥堆積厚の測定結果	28
3.2.4 各観測地点における底泥の土質性状	35
3.3 音響測深およびレッド測深による測深結果に及ぼす底泥密度の鉛直分布の影響	36
3.3.1 音響測深による測深結果に及ぼす底泥密度の鉛直分布の影響	36
3.3.2 レッド測深による測深結果に及ぼす底泥密度の鉛直分布の影響	39
3.4 浮泥堆積域におけるマルチビームおよびレッドによる可航水深の簡便な推計手法	40
3.4.1 浮泥堆積域におけるマルチビームおよびレッドによる可航水深の簡便な推計手法の提案	40
3.4.2 提案手法の妥当性検証	44

3.4.3	浮泥堆積域におけるマルチビームおよびレッドによる可航水深の簡便な推計手法の適用	45
3.5	本章のまとめ	48
第4章	浮泥堆積域における浚渫後の可航水深の簡便な予測手法の提案	49
4.1	名古屋港，荻田港および東京西航路周辺海域での現地観測	49
4.1.1	ICT 浚渫工の工事実施区域を対象とした観測地点および測定項目	49
4.1.2	音響測深およびレッド測深による測深結果と施工計画水深の比較	54
4.1.3	SS 濃度結果とマルチビームによる測深結果の関係	56
4.1.4	浚渫前後の底泥密度調査結果の比較	59
4.1.5	各観測地点における底泥の土質性状	66
4.2	浚渫後の底泥密度の鉛直分布に及ぼす浚渫前の底泥密度および浚渫後の浮泥の沈降堆積の影響	67
4.2.1	浚渫後の底泥密度の鉛直分布に及ぼす浚渫前の底泥密度の影響	67
4.2.2	浚渫後の浮泥の沈降堆積に伴う底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 位置	70
4.3	浮泥堆積域における浚渫後の可航水深の簡便な予測手法	76
4.3.1	マルチビームによる浚渫後の水深の効率的な計測手法の提案	76
4.3.2	浮泥堆積域における浚渫後の可航水深の簡便な予測手法の提案	76
4.4	本章のまとめ	79
第5章	結論	80
5.1	結論	80
5.2	今後の課題および留意事項	82
	謝辞	83
	参考文献	85
付録 A	本研究で用いた密度計，レッドおよび柱状採泥器	88
付録 B	採取試料の土質試験方法および SS 濃度の測定方法	94
付録 C	停船観測時のマルチビーム測深による取得データ	96
付録 D	コーン貫入量と含水比のべき関数式を用いたレッド貫入量と底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 以下の底泥堆積厚の関係式の導入	97

第1章 序論

1.1 本研究の背景

我が国では人口減少が進んでおり，建設業においても就業者数が1997年をピークに減少している．また，建設業就業者を年齢別にみると，55歳以上が全体の3割以上，29歳以下が全体の1割以上を占め（2022年時点），全産業に比べて高齢化も進行しており，次世代への技術承継が課題となっている^{1-1), 1-2)}．

そこで，国土交通省では，ICTの全面的な活用などの施策を建設現場に導入することによって，調査・測量，設計，施工・検査，維持管理・更新までのあらゆる建設生産システム全体の生産性の向上を図り，もって魅力ある建設現場を目指す取り組みであるi-Constructionを2015年から進めている¹⁻³⁾．港湾分野においても，2016年から「港湾におけるICT導入検討委員会」¹⁻⁴⁾を設置し，港湾事業を対象とする建設プロセスにおいて，ICTを活用した情報の3次元化を進めるための検討を行うとともに，ICTの活用に向けて必要な基準類の整備などを実施している．なお，本検討委員会は，2020年から「港湾におけるi-Construction推進委員会」¹⁻⁵⁾に名称を変更し，引き続き各種検討を行っている．

この港湾事業における検討の1つとして，2016年度にマルチビームを用いた深淺測量マニュアル（浚渫工編）（以下「深淺測量マニュアル」という．）¹⁻⁶⁾を整備し，2017年度よりICT浚渫工（港湾）（以下「ICT浚渫工」という．）を実施している．ICT浚渫工はマルチビーム（**図-1.1.1**）を用いた深淺測量（以下「マルチビーム測深」という．）で取得した3次元データを活用することで，浚渫工の生産性の向上を図るものである．**図-1.1.2**はICT浚渫工の測量から検査までのプロセスを示す．

マルチビーム測深に関する測深性能および測深精度は，深淺測量マニュアルにおいて，**表-1.1.1**および**図-1.1.3**のとおり規定されている．ただし，マルチビーム機器自体の基本性能（周波数など）は具体的には規定されていない．しかし，実際のICT浚渫工の現場では，多くの場合，高解像度かつノイズの少なさなどの理由から周波数400kHzのマルチビームが用いられている．



図-1.1.1 マルチビーム機器（左写真）とマルチビーム測深時の様子（右写真）

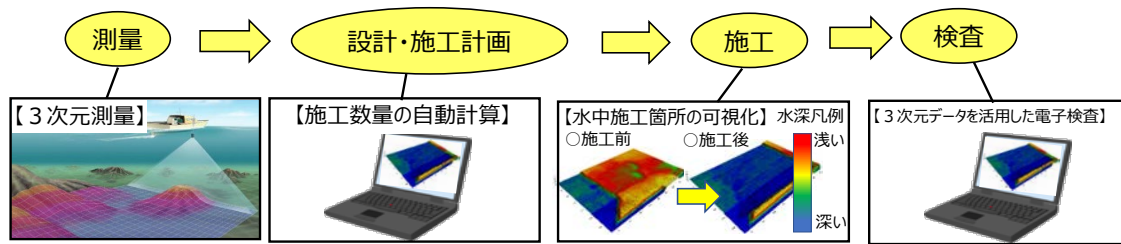


図-1.1.2 ICT浚渫工（港湾）のプロセス

表-1.1.1 マルチビーム測深に関する測深性能と測深精度¹⁻⁶⁾

2023年5月改定版	
測深性能 (取得点密度)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 1.0 m 平面格子に 3 点以上 ・ 達成率 99%以上
測深精度	<ul style="list-style-type: none"> ・ 2002 年度海上保安庁告示第 102 号で定められたとおりとする。

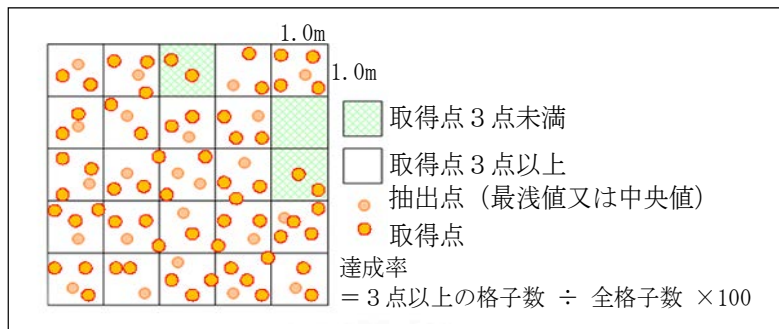


図-1.1.3 取得点密度の考え方¹⁻⁶⁾

砂や礫が堆積する海域で音響測深を実施した場合、音波の反射面（以下「観測海底面」という。）は周波数によらずほぼ一致し、船舶の航行に必要な水深もこれらの結果を基に評価されることになる。一方、浮泥が堆積する海域（以下「浮泥堆積域」という。）では、船舶航行への堆積物の障害（船底への抵抗など）の程度を考慮して、船舶にとって航行可能な水深（以下「可航水深」という。）が定義される場合がある¹⁻⁷⁾。このような定義を導入する背景として、浮泥堆積域で音響測深を実施した場合には、センサの周波数が高いほど底泥の湿润密度（以下「底泥密度」という。）の鉛直分布に依存して、底泥密度の低い浮泥層上面で音波の反射が生じうするため、可航水深よりも浅い位置が観測海底面と判断されるためである。音響測深による観測海底面と可航水深における海底面の位置関係を図-1.1.4に示す。

この現象は周波数が高いほど浮泥層の影響を受けやすいことを考慮すると、ICT浚渫工の導入に伴い、測定機器が従前のシングルビーム（200 kHz）から 400 kHz を主体とするマル

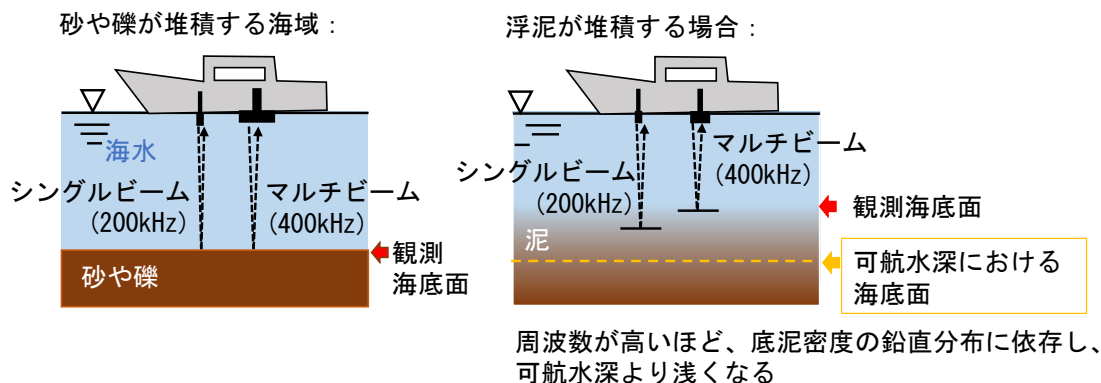


図-1.1.4 音響測深による観測海底面と可航水深における海底面

チビームに一般的に移行したことに伴い、浮泥堆積域での観測海底面は今まで以上に可航水深による海底面と乖離することが懸念される。なお、可航水深の定義方法としては、船舶が航行する上で支障が生じる底泥密度を指標とする例が多くみられ、例えば、浮泥の堆積が著しいベルギーのゼーブルージュ港などでは、模型実験結果などから底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ が出現する水深と設定されている¹⁻⁸⁾。ここでは、海底付近に集積し浮遊状態から堆積状態の間にある流動性を有する高含水比泥のことを浮泥と呼ぶものとする。

現在、我が国では水路業務法施行令¹⁻⁹⁾および海上保安庁告示¹⁻¹⁰⁾に基づき、航路や泊地の水深は最低水面から観測海底面までの鉛直距離とされている。そのため、測量および維持管理の段階で上述のような浮泥堆積の影響により観測海底面が可航水深よりも浅い位置で観測された場合、可航水深の概念を適用すると航行上の支障がすぐに出るとは限らない状況においても、設計水深を確保するための浚渫を実施する必要がある。土砂処分場の確保などの問題から、必要以上の浚渫が実施困難になると、船舶の入出港が満潮時前後の時間帯のみに限られてしまうなど、浮泥が堆積する一部海域においては港湾の利用を通じた経済活動にも大きな影響を及ぼしかねない。

また、測量および維持管理の段階に限らず、施工段階においても浚渫後の完成検査に用いるマルチビームによる出来形測量結果が設計水深より僅かでも浅く観測された場合、浚渫工の出来形管理基準¹⁻¹¹⁾では、出来形測量結果が設計値より浅くなることは一切許容されていないため、可航水深の概念を適用すると航行上の支障がすぐに出るとは限らない状況においても、設計水深を確保するように再度浚渫を行う必要がある。図-1.1.5は、この再度浚渫が必要と判断される場合における出来形測量結果、設計水深および可航水深の位置関係を示す。施工計画時の想定を上回る土量の浚渫が必要となった場合、土砂処分場を確保できないために浚渫が実施できないケースがある。あるいは再浚渫のために工期の延長を余儀なくされると、船舶の入出港が引き続き制限されるなど、浮泥が堆積する一部海域においては港湾の利用を通じた経済活動にも大きな影響を及ぼしかねない。

このため、浮泥堆積が生じやすい航路や泊地の効率的な利用のためには、可航水深の概念を取り入れた合理的な水深管理を実施し、施工時も可航水深の概念を取り入れて出来形を管理していくことが望ましいと考える。図-1.1.6は可航水深の概念を取り入れた合理的な水深管理を実施することで船舶の入出港時の潮待ちが解消するイメージを示している。

現在、可航水深として、例えば底泥密度が $1,200 \text{ kg/m}^3$ となる水深（以下「底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 位置」という。）を測定するためには、底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 以下の底泥の堆積分布は時空間的な非定常性が大きいいため、個々の海域で密度計による物性値測定を実施する必要があり、作業コストや手間が増大する。測量および維持管理の段階に、限られた予算や人手の下、可航水深の概念を取り入れた合理的な水深管理を効率的に実施していくためには、密度計などを新たに用いることなく、より簡便な方法により底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 位置の把握を可能とすることが求められる。作業の効率化のため、周波数 15kHz などの低周波の音波探査による測深結果を可航水深として使用する事例など¹⁻⁸⁾はある。しかし、底泥密度の鉛直分布は現場や測定時期に応じて異なり、低周波の音波探査による測深結果が任意の底泥密度位置を捉えているとは限らず、底泥密度の鉛直分布との明確な対応関係はこれまで確

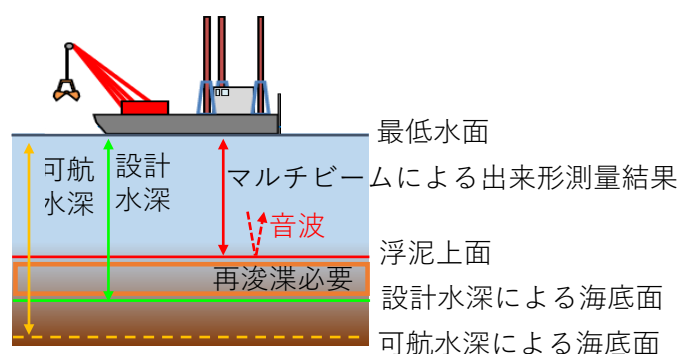


図-1.1.5 可航水深の概念を適用すると航行上の支障がすぐに出るとは限らない状況において再度浚渫が必要となるケース

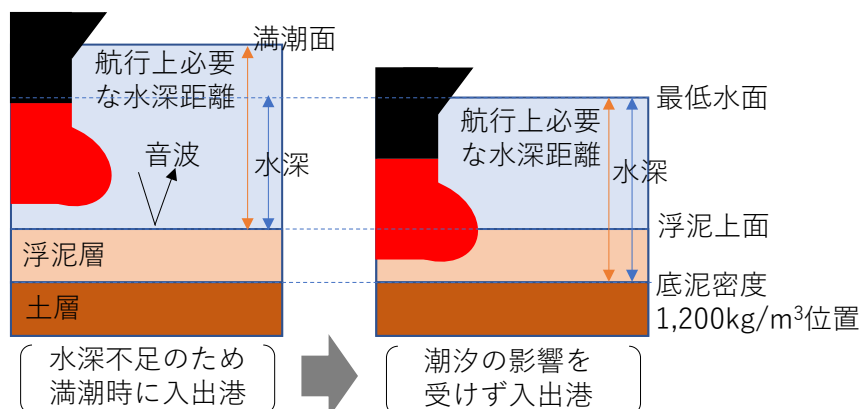


図-1.1.6 可航水深の概念を取り入れた水深管理による潮待ち解消イメージ

認できていない^{1-8), 1-12), 1-13)}. 一方, 底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 以下の底泥の鉛直分布の変化に伴う各観測海底面の相対的な位置関係を把握することができれば, 音響測深などによる測深結果に, 浮泥の堆積状態を示す情報を付加することにより, 浮泥堆積域における底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 位置が推計可能となる. しかし, 底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 以下の底泥の鉛直分布の変化に伴う各観測海底面等の相対的な位置関係を詳細に調べた例はみられない.

また, 施工段階において, 限られた工事期間や予算の下, 可航水深の概念を取り入れて出来形を効率的に管理していくためには, 密度計による物性値測定を浚渫区域全域で行うのではなく, 測定対象箇所を限定して迅速に実施可能とすることが求められる. 図-1.1.7 は, 浚渫後に生じるマルチビームによる出来形測量結果, 設計水深および可航水深の位置関係ならびに効率的な出来形の管理イメージを示す. マルチビームによる出来形測量結果は Case I ~ Case III のいずれの場合も可航水深より浅くなり, 図-1.1.7 に示すとおり, Case I の場合, マルチビーム測深結果を用いて可航水深が設計水深より深くなることを判断できる. Case II および Case III の場合, 可航水深の概念を取り入れた場合の再浚渫の必要性を考慮すると, 可航水深が設計水深よりも深くなる Case III の場合のみで密度計による物性値測定を実施することが出来形の管理の効率化につながる. 浚渫に伴う底泥密度の鉛直分布の出現特性を把握することができれば, 浚渫後のマルチビームによる測深結果に, 浚渫前の底泥密度の測定結果などから浚渫後の浮泥の堆積状況を推測する情報を付加することにより, 浚渫後の底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 位置が予測可能となる. しかし, 浚渫に伴って底泥密度の鉛直分布がどのように変化するかを詳細に調べた例はみられない.

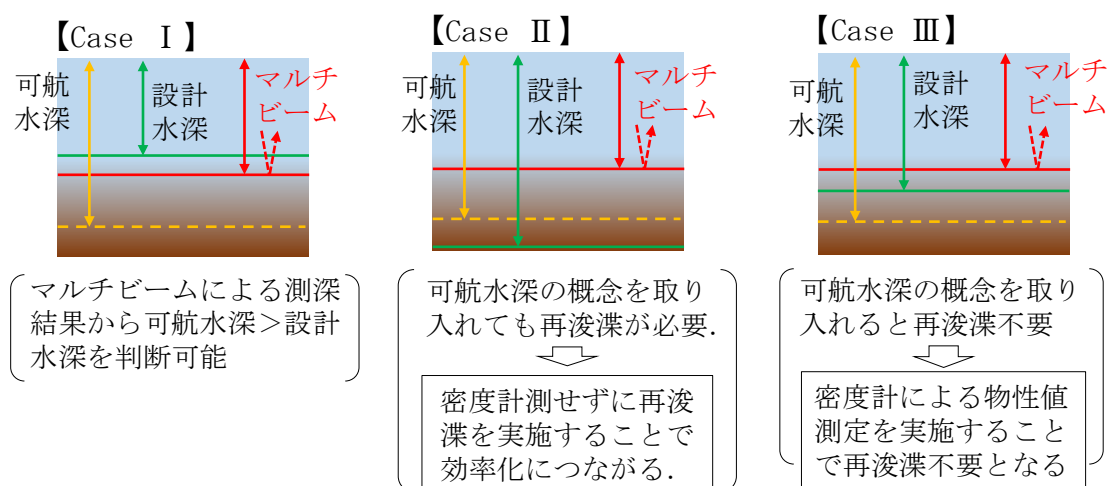


図-1.1.7 浚渫後に生じるマルチビームによる出来形測量結果, 設計水深および可航水深の位置関係ならびに効率的な出来形の管理イメージ

1.2 本研究の目的および概要

本研究は、浮泥堆積域において、底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 以下の底泥の鉛直分布の変化に伴う各観測海底面の相対的な位置関係を評価した上で、可航水深の概念を取り入れた場合の実務的な可航水深の推計方法を提案することを目的とする。また、浚渫に伴う底泥密度の鉛直分布の出現特性を評価した上で、可航水深の概念を取り入れた場合の浚渫後の実務的な可航水深の予測方法を提案することを目的とする。

上記の研究目的を達成するために、本研究ではまず、ICT 浚渫工における浮泥の影響がもたらす問題点を具体的に把握するため、施工者を対象にアンケート調査を実施する。次に国内の複数の港湾域を対象とした現地観測を通じて、音響測深やレッドによる測深結果と底泥密度の鉛直分布との対応関係の実態を評価する。その上で現在 ICT 浚渫工の深浅測量で一般的に用いられ、面的なデータ取得が可能な周波数 400 kHz のマルチビームおよびレッドによる測深結果から、可航水深の実務的な基準値として多くの海外港湾で採用されている底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 位置を比較的簡便に推計可能な手法を提案する。

また、国内のグラブ浚渫による複数の浚渫工事海域を対象とした現地観測を通じて、浚渫後の迅速な測深を可能とするため、浚渫工事海域で濁りの発生量を把握するために一般的に測定される、浮遊物質の濃度（以下「SS 濃度」という。）の鉛直分布とマルチビームによる測深結果との対応関係を評価する。そして、浚渫に伴う底泥密度の鉛直分布の出現特性を評価する。その上で、浚渫前のマルチビームおよびレッドによる測深結果または底泥密度測定結果ならびに浚渫後のマルチビーム測深結果から、浚渫後の底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 位置を比較的簡便に予測する手法を提案する。

現地観測を通じて取得する各測定データには誤差やばらつきがあり、それら測定データの不確かさを検討することは測定データを適切に解釈する上で非常に重要である。一方、現状取得する測定データを用いて効率的な手法を提案していくことも実務において有効となりうる考え方を提示するという観点で重要であると考え。そこで、本研究は測定データに誤差などが含まれることや、対象とする浮泥の鉛直分布の測定方法が必ずしも汎用的に確立されていない状況であることを理解した上で、現状取得する各測定データを最大限活用して、底泥の堆積状況に関する情報を捉えることを試み、効率的に可航水深を推計する方法、考え方を提案するものである。

1.3 本論文の構成および各章の概要

本論文は、1～5 章の全 5 章から構成される。本論文の構成を図-1.3.1 に示す。

第 1 章「序章」では、本研究の背景、本研究の目的および概要ならびに本論文の構成および各章の概要を述べている。

第 2 章「既往の研究および本研究の対象」では、海外の浮泥堆積域における可航水深による水深管理、底泥密度の測定方法、浮泥の輸送特性および i-Construction における出来形管理の効率化についてとりまとめている。海外の浮泥堆積域における可航水深による水深管理では、ベルギーのゼーブルージュ港など浮泥が著しく堆積する各国港湾において、船舶航行への堆積物の障害の程度を考慮して可航水深が定義されている現状についてとりまとめている。底泥密度の測定方法では、海外の浮泥堆積域における可航水深の測定方法などについてとりまとめている。浮泥の輸送特性では、浮泥が台風や高波浪などの外力によって巻上げや移流が生じることをとりまとめている。i-Construction における出来形管理の効率化では、我が国の i-Construction における出来形管理の効率化の取組みについてとりまとめている。最後に本研究の対象範囲について述べている。

第 3 章「浮泥堆積域における可航水深の簡便な推計手法の提案」では、まず ICT 浚渫工における浮泥の影響がもたらす具体的な問題点を把握するため、施工者を対象にアンケート調査を実施している。次に、音響測深およびレッドによる測深結果と底泥密度の鉛直分布との対応関係などを把握するため、観測直前に台風や浚渫工事などのイベント的な外力による堆積物の擾乱が生じていない環境を観測対象として、現地観測を実施している。現地観測を通じて、従来の周波数 200 kHz と ICT 浚渫工の深浅測量で一般的に用いられている周波数 400 kHz の音響測深による測深結果の具体的な差を把握している。また、音響測深やレッドによる測深結果と底泥密度の鉛直分布との対応関係の実態を評価している。その上で、マルチビームおよびレッドによる測深結果から、船舶の航行を許容するとされる底泥密度として多くの海外港湾で採用されている底泥密度 1,200 kg/m³ 位置を、比較的簡便に推計可能な手法を提案している。

第 4 章「浮泥堆積域における浚渫後の可航水深の簡便な予測手法の提案」では、浚渫に伴って変化する海水中の SS 濃度の鉛直分布と音響測深による測深結果の対応関係などを把握するため、ICT 浚渫工の施工現場で多数使用されているグラブ浚渫船による浚渫が行われている区域を観測対象として、現地観測を実施している。現地観測を通じて、SS 濃度の鉛直分布とマルチビームによる測深結果との対応関係を調査している。また、浚渫に伴う底泥密度の鉛直分布の出現特性を調査している。その上で、第 3 章の提案手法も活用して、浚渫前のマルチビームとレッドによる測深結果または底泥密度の測定結果ならびに浚渫後の

マルチビーム測深結果から、浚渫後の底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 位置を比較的簡便に予測可能な手法を提案している。

第 5 章「結論」では、本研究によって得られた結論と今後の課題を述べている。

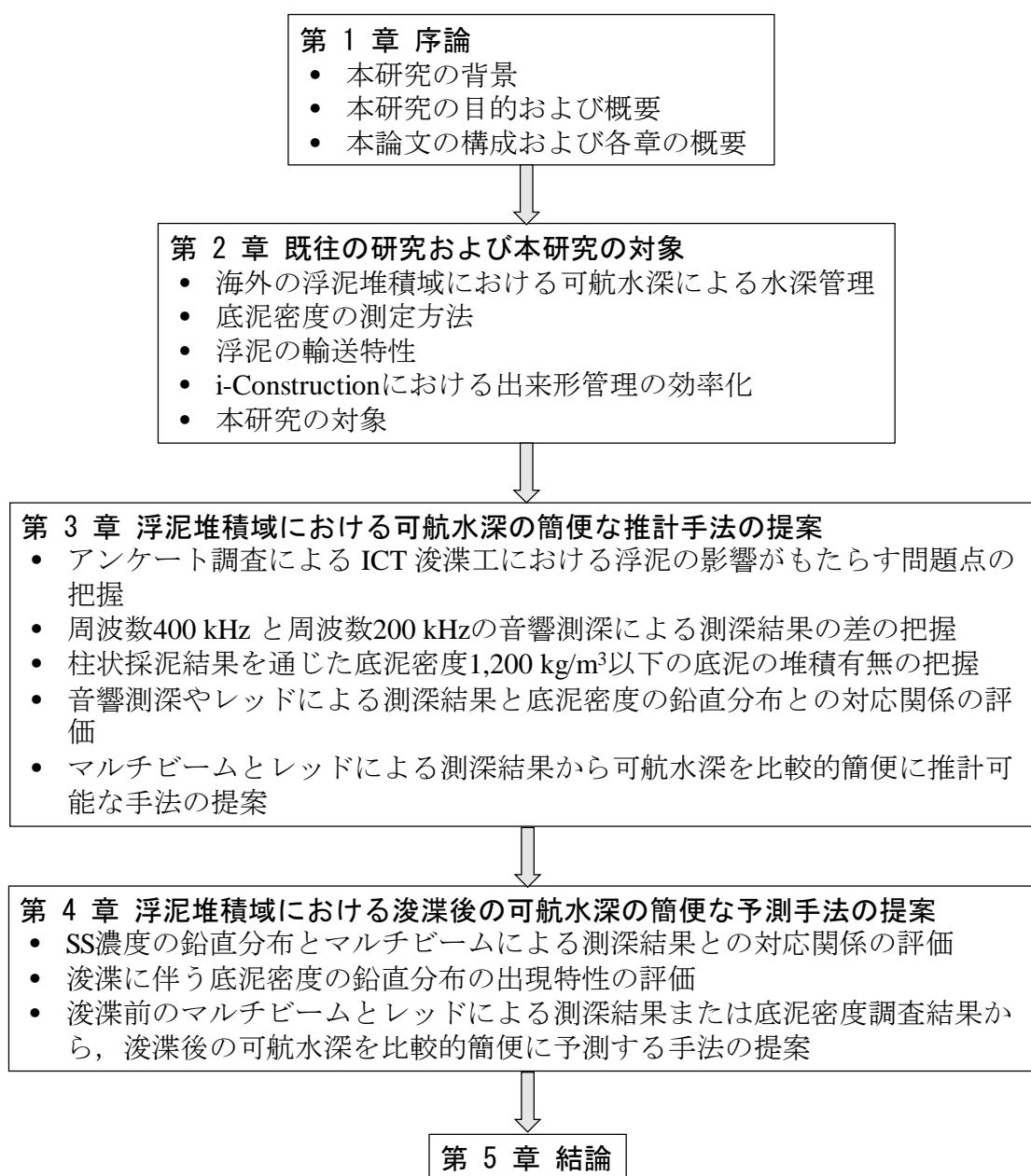


図-1.3.1 本論文の構成

第2章 既往の研究および本研究の対象

2.1 海外の浮泥堆積域における可航水深による水深管理

ベルギーのゼーブルージュ港などでは浮泥の堆積が3～4 mの厚さでみられ²⁻¹⁾、これら浮泥が著しく堆積する各国の港湾においては、少しでも効率的に航路や泊地の水深を管理していくため、可航水深の基準が表-2.1.1のとおり規定されている。浮泥堆積域における船舶の操船性能は、浮泥のレオロジー特性（流動状態における抵抗力）に影響を受けるとされているが、この特性は浮泥の底泥密度に加え、粘度、粒子の大きさや形、粒子間力など、浮泥を構成する個々の粒子の物性を含めた多くのパラメーターに左右され、非常に複雑かつ測定技術も未だ確立されていない。そのため、可航水深の実務的な基準としては、比較的把握が容易な底泥密度の値が多くの港湾で採用されている。

たとえば、ベルギーのゼーブルージュ港では、2001～2004年に模型実験および操船シミュレーションの結果から、可航水深を底泥密度1,200 kg/m³が出現する水深と定めている²⁻⁴⁾。設定に際しては、表-2.1.2に示す底泥密度および余裕水深の条件下における船舶の挙動を実験水槽（88 m×7 m×0.6 m）での模型実験より把握し、さらに操船シミュレータを用いて、ゼーブルージュ港の現場条件（潮流、風、航行軌道）を仮想し、船舶の接岸時や離岸時

表-2.1.1 海外の浮泥堆積域における可航水深の基準^{2-1), 2-2), 2-3)より作成}

国	港湾	可航水深を定める指標と基準値
ベルギー	ゼーブルージュ港	底泥密度 1,200 kg/m ³
オランダ	ロッテルダム港, イムマイデン港	
フランス	ナント・サン・ナゼール港, ボルドー港, ダンケルク港	
英国	ブリストル港, エイボンマス港	
ベネズエラ	マラカイボ港	
中国	天津港	
インド	コーチ港	
タイ	バンコク港	
ドイツ	航路	
	エムデン港	降伏応力 100 Pa
中国	連雲港	底泥密度 1,250 ～1,300 kg/m ³

における浮泥の操船性能への影響をパイロット（15人）へのアンケート調査により評価した。その結果、船底が底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 以上の底泥層に接触した状態では船舶が制御不能となるため、操船は許容できないと判定された。図-2.1.1はそのアンケート調査での船舶の操作性評価結果を示す。なお、図-2.1.1内の余裕水深について、0%：船底が底泥上面に接触している状態、+ %：船底が底泥層に接触していない状態、- %：船底が底泥層に侵入している状態を意味する。同港では、それ以前（1985年以降）には、可航水深の底泥密度は $1,150 \text{ kg/m}^3$ とされていたが²⁻¹⁾、上記評価結果から底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ に改められた。なお、同港での船舶入出港時の運用においては、底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ を可航水深による海底面とする定義に加え、底泥層に船底が接触する場合には、2隻以上のタグボートによる曳航を行い、船底の底泥層への侵入深さが、海面から船底までの鉛直距離である喫水深の7%以内とすることも、附則事項として定められており²⁻¹⁾、底泥の鉛直分布も考慮している。

表-2.1.2 ゼーブルージュ港の模型実験における設定条件²⁻⁴⁾より作成

項目	設定条件
底泥条件	底泥密度(kg/m^3) : 1,100, 1,150, 1,180, 1,200, 1,210, 1,250, 1,260.
	底泥層厚(m) : 0.75, 1.5, 3.0 .
余裕水深	船底～浮泥上面間(%) : -12, -7, -1, +4, +9, +10, +15,
船舶モデル	6,000 TEU コンテナ運搬船(垂線間長= 289.8 m, 型幅 = 40.25 m, 満水喫水 = 13.50 m), 縮尺 1/75.
船速	後進 2 knot ~ 前進 10 knot.

※上記項目の設定条件を組み合わせることでテストを実施。

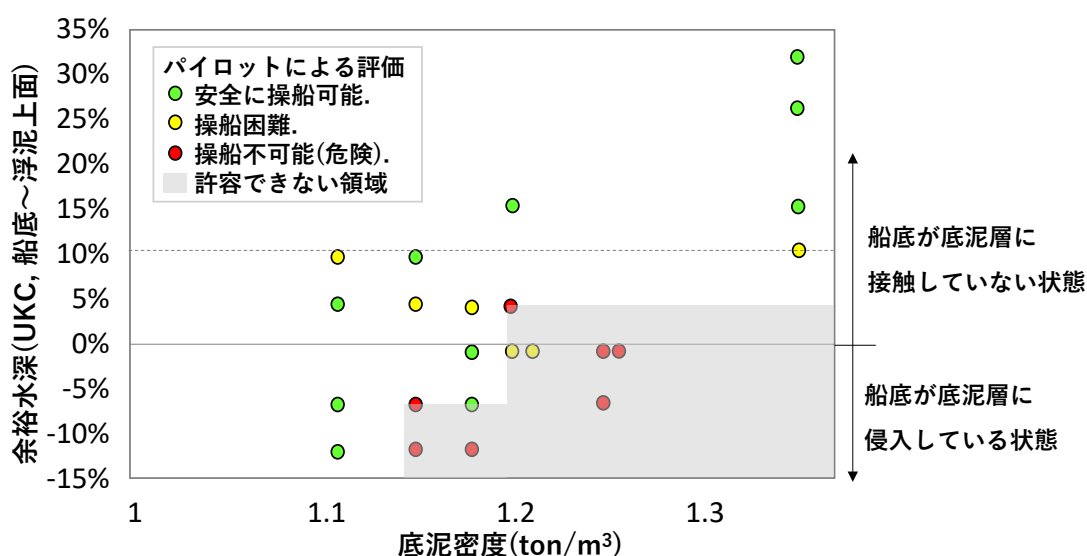


図-2.1.1 ゼーブルージュ港における船舶の操作性評価²⁻⁴⁾より作成

集積する浮泥のレオロジー特性や底泥密度の鉛直分布は、対象海域における浮泥の流入特性に応じて異なるため、可航水深の基準も個々の港湾の状況に応じて、表-2.1.1 に示すように設定される。底泥密度を指標としている港湾においては、一部の例外はあるものの、1,200 kg/m³を基準値として採用している港湾が多いことがわかる。前述のとおり、我が国の水路測量規則では、海底面の底泥特性によらず、音響測深による観測海底面を航路や泊地の海底と定義している。可航水深による水深管理を実施するためには対象海域に応じた可航水深の基準を検討する必要があるが、仮に、我が国でも浮泥の堆積が著しく、観測海底面と可航水深による海底面との乖離が生じる可能性のある海域においては、上記のような海外事例と同様に、例えば底泥密度 1,200 kg/m³を基準とする可航水深による海底面の定義方法が採用されれば、船舶の航行制限や維持浚渫の増大などの障害を軽減でき、施設の利用や維持の観点でより合理的な水深管理が可能になると考える。

2.2 底泥密度1,200 kg/m³位置の測定方法

可航水深、例えば底泥密度1,200 kg/m³位置を測定するため、ガンマ線による測定器や音叉による密度計など^{2-1), 2-3)}、密度測定に特化した専用の機器が存在する。浮泥が堆積する各国の港湾では、表-2.1.2に示すようにそれら密度測定に特化した専用の機器を用いて底泥密度1,200 kg/m³位置を一般的に測定している。ガンマ線による測定は放射能を用いるため防護対策を行う必要がある。ベルギーのゼーブブルージュ港の浚渫工事では、ドラグサクション浚渫船の配管途中に設けられたガンマ線による測定器を用いて浚渫土の底泥密度をリアルタイムで測定し、基準値以下の低密度の浚渫土は海域に再度排出している²⁻⁵⁾。また、ベルギーの一部港湾では作業の効率化のため、周波数33 kHzの音響測深による測深結果を、あるいはドイツのエムデン港では周波数15 kHzの音響測深による測深結果を可航水深として使用している²⁻¹⁾、底泥密度の鉛直分布は現場や測深時期に応じて異なるため、必ずしもそれら低周波数の音波探査による測深結果が任意の底泥密度位置を捉えているとは限らない。

表-2.1.2 底泥密度 1,200 kg/m³ 位置の測定方法例 ^{2-1), 2-3)}より作成

国	港湾	底泥密度 1,200 kg/m ³ 位置の測定方法
ベルギー	ゼーブブルージュ港	ガンマ線による測定器
オランダ	ロッテルダム港, イムマイデン港	ガンマ線による測定器
フランス	ナント・サン・ナゼール港, ボルドー港, ダンケルク港	ガンマ線による測定器 (防護対策軽減のため、エックス線による測定実験が進められている)

我が国でも浮泥層判定装置²⁻⁶⁾として、異なる周波数（25 kHz, 71 kHz, 250 kHz）の音波を用いることにより浮泥層を含めた底泥の堆積状況の判別を目的とした装置が開発されているものの、必ずしも底泥密度 1,200 kg/m³ 以下の底泥層の識別を可能とするものではない。さらに、水路測量業務準則施行細則に、浮泥層の調査方法²⁻⁷⁾が記載されており、この調査方法は音響測深とレッドによる測深結果の差を浮泥層の厚さとして定義しているが底泥密度 1,200 kg/m³ 位置については言及されていない。

維持管理段階も含めて生産性の向上を目指すICT浚渫工を推進していく中で、浮泥集積の影響にも配慮しつつ、航路や泊地の水深管理をより効率的に実施していくためには、既存の密度計による物性値測定のような作業を別途行うことによる作業負荷を極力増大させることなく、底泥密度の堆積状況に関する情報が得られることが望ましい。

2.3 浮泥の輸送特性

海底表層に堆積する高含水比の底泥は台風や高波浪などの外力によって海底から巻き上がり、また水平方向に流れることが知られている。それら外力による底質環境の時空間的な変化の把握は航路や泊地の埋没対策や水質変化の変動を把握する上で重要であるため、これまで現地観測およびシミュレーションなどを通じて、多数の研究がなされている。例えば中川ら^{2-8), 2-9)}は現地観測を通じて、高波浪による底泥攪乱による濁度上昇や大潮期における底泥の巻き上げの把握などを実施している。外力の大きさや流入する堆積物の土質性状に応じて底質環境は非常に複雑に変化し、底泥密度1,200 kg/m³位置も時空間的な非正常性が著しく大きくなる。

浚渫および埋立などの海上工事によって底質環境が攪乱され、工事実施海域の海水中に濁りが生じることが知られている。汚濁発生などの環境負荷の低減を目的とし、濁りの影響を予測する手引き²⁻¹⁰⁾や濁りの発生を低減させる技術開発²⁻¹¹⁾などが多数なされている。しかし、これまで浚渫工事に伴って底泥密度の鉛直分布がどのように変化するかを詳細に調べた例はみられない。

2.4 i-Constructionにおける出来形管理の効率化

現在、道路や河川分野の掘削工や盛土工では、3次元マシンガイダンスまたはマシンコントロール機能を搭載した ICT バックホウなどによる施工履歴データを用いた出来形管理を実施している²⁻¹²⁾。施工中に出来形を把握することで、出来形の管理と修正施工の迅速化といった工事の効率化が図られている。港湾分野でも、海上地盤改良工や防波堤の土台である基礎捨石の均し作業で施工履歴データを用いた出来形管理に向けた検討^{2-13), 2-14)}が進められている。ICT 浚渫工でもマルチビームによる出来形の管理などの迅速化を図るため、例えば、深層学習によりノイズを自動処理するプログラム²⁻¹⁵⁾や、膨大な点群データをクラウドシステム上で AI を活用して自動処理するシステム²⁻¹⁶⁾などが開発されている。また、海上保安庁は、統計的にノイズを処理する CUBE 処理 (Combined Uncertainty and Bathymetric

Estimator の略) を 2022 年度より水路測量に導入し²⁻⁷⁾、ノイズ処理時間の短縮に貢献している。しかし、ICT 浚渫工におけるこれらの手法はいずれも浚渫完了後に取得された点群データのノイズ処理の効率化を目的として構築されており、浚渫後の底泥密度 1,200 kg/m³ 位置を測定するものではない。

施工段階も含めて生産性の向上を目指す ICT 浚渫工を推進していく中で、限られた工事期間の下、浮泥集積の影響にも配慮しつつ航路や泊地の出来形を効率的に判断していくためには、既存の密度計による物性値測定のような作業を別途行うことによる作業負荷を極力増大させることなく、浚渫後の底泥密度の堆積状況に関する情報が得られることが望ましい。

2.5 本研究の対象

以上に示した既往の研究に関するレビューなどを踏まえて、ここでは本研究の対象範囲を明確にする。

本研究は、多くの海外事例と同様に我が国の浮泥堆積域でも底泥密度 1,200 kg/m³ を基準とする可航水深による海底面の定義方法が採用された場合において、底泥密度 1,200 kg/m³ 位置の実務的な推計方法および浚渫後の底泥密度 1,200 kg/m³ 位置の実務的な予測方法を提案することを目的としている。浮泥堆積域における可航水深による海底面の定義方法そのものについては本研究の対象外とする。

次に本研究の対象海域は、浮泥堆積域で観測時に浚渫工事を除く台風や高波浪などのイベント的な外力が生じていない環境とする。台風や高波浪などのイベント的な外力が生じている環境では、外力の大きさや外力で流入する堆積物の土質性状に応じて、底質環境は非常に複雑に変化する。そのため、本研究の対象外とし今後の課題とする。

さらに、音響測深による測深結果と底泥密度の鉛直分布との対応関係の実態を評価する際、音響測深の周波数の種類は、ICT 浚渫工の深浅測量で一般的に用いられている 400kHz、ICT 浚渫工以前に用いられていた 200kHz および地層探査に用いられる 10kHz とする。その他の周波数は港湾事業では一般的に用いられておらず、本研究は実務的な推計方法の提案を目的としているため、本研究の対象外とする。

最後に、本研究の対象工事における適用船種はグラブ浚渫とする。表-2.5.1 は浚渫工事における土質別の標準適用船種、図-2.5.1 は ICT 浚渫工における適用船種の活用実績を示す。図表に示すとおり、グラブ浚渫工が土質別によらず適用性が高く、ICT 浚渫工の 90% 以上の施工現場で現在使用されている。

表-2.5.1 浚渫工事における土質別の標準適用船種 ²⁻¹⁷⁾より作成

		標準適用船種		
		グラブ浚渫	ポンプ浚渫	バックホウ浚渫
普通土砂	粘土質系	○	○	○
	砂質系	○	○	○
	礫混り	○		○
	岩盤	○		

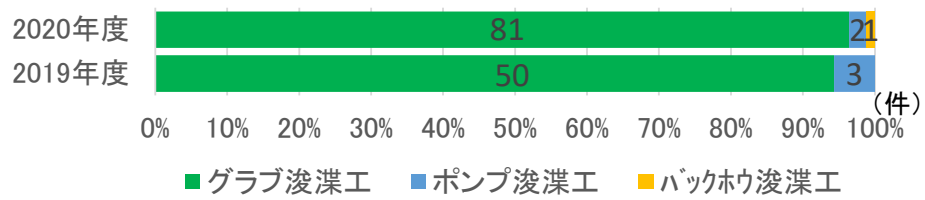


図-2.5.1 ICT 浚渫工における適用船種の活用実績 (国土交通省港湾局調べ)

第3章 浮泥堆積域における可航水深の簡便な推計手法の提案

3.1 アンケート調査によるICT 浚渫工における浮泥の影響がもたらす問題点の把握

3.1.1 アンケート調査の概要

浮泥は前述のとおり、周波数の高い音波を浮泥上面で反射することや外力による巻上げや水平移流といった輸送特性を有することが知られている。本研究では、ICT浚渫工におけるそれら浮泥の影響がもたらす問題点をアンケート調査から具体的に把握することとした。2019年2月に2018年度ICT浚渫工試行工事における施工者を対象に、メールでアンケート調査票を配布し、ICT浚渫工試行工事における浮泥の有無、浮泥による工事への影響、浮泥の具体的な確認方法、ICT浚渫工試行工事以外の過去工事も含めた浮泥の影響がもたらす問題点について質問を実施した。ICT浚渫工試行工事中、回答があった34件について分析した。

3.1.2 アンケート調査結果

(1) ICT浚渫工試行工事における浮泥の有無および浮泥の確認方法について

図-3.1.1は、2018年度ICT浚渫工試行工事における浮泥の有無の質問に対するアンケート回答結果を示す。浮泥が確認されているのは、34件中4件であり、また4件で浮泥が工事に大きく影響したという回答が得られている。14件で浮泥の有無は不明である旨の回答が得られているが、これは浮泥がほとんど存在しない海域で確認作業を行っていない場合などが考えられる。また、図-3.1.2は、浮泥の確認方法に対する回答結果（複数回答可）を示す。浮泥の具体的な確認方法は、マルチビームとレッドによる測深結果の比較や潜水土による潜水目視、またその他意見として浚渫土砂の性状（ヘドロ状）から判断している事例や、測深結果と過去の測深実績との比較から判断している事例などが挙げられている。水路測量業務準則施行細則³⁾において、浮泥の調査方法は音響測深機およびレッドを用いて、またはその他の方法により行うものとしてされており、今回調査ではその他の方法により調査されている事例が多い結果となっている。

(2) ICT浚渫工における浮泥の影響がもたらす問題点

浮泥の影響がもたらす具体的な問題点について、ICT浚渫工試行工事以前の過去工事も含めて確認すると、表-3.1.1および表-3.1.2に示すとおり、測量作業と施工作业の各段階における複数の意見が挙げられている。まず、測量作業においては、浮泥の影響により浚渫後の測深作業自体および測深結果の解析に時間を要する旨の意見が挙げられている。この問題点は、浚渫後に生じる海水中の濁りおよび音響測深のビームが浮泥上面で反射する特性に起因するものである。

また、施工作业においては、余掘りや石材の追加投入などの追加工事を余儀なくされた旨の意見とともに、低速による曳航や施工区域外からの浮泥の流込みにより水深確保が困難であった旨の意見が挙げられている。浮泥の反射特性とともに、浮泥の輸送特性の巻上げお

よび水平移流に起因するものである。

ICT 浚渫工の導入に伴い、測定機器が従前のシングルビーム（200 kHz）から 400 kHz を主体とするマルチビームに一般的に移行したことで浮泥堆積域での測深結果が浅く観測されることにより、これらの問題点はより一層生じることが懸念される。ICT 浚渫工における生産性の向上を推進するため、浮泥の船舶航行や浚渫土量への影響を考慮した、より効率的な水深管理の必要性が確認された。なお、アンケートにおける浮泥の捉え方の統一性が必ずしも確保されているわけではなく、その程度を客観的に比較可能な評価方法を提示していくことも、本問題の対応における課題の一つである。

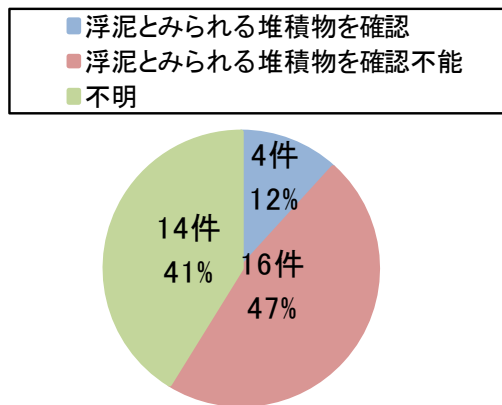


図-3.1.1 2018年度ICT浚渫工試行工事における浮泥の有無

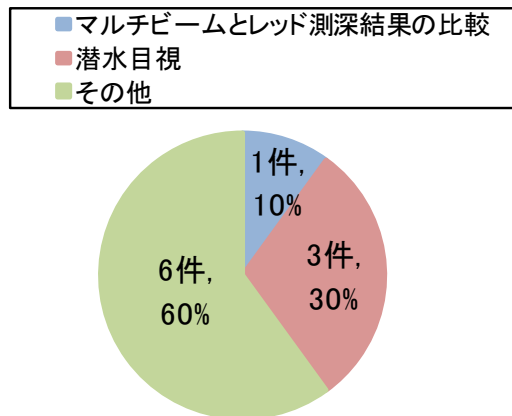


図-3.1.2 浮泥の確認方法（複数回答可）

表-3.1.1 測量作業における浮泥の影響がもたらす問題点

浮泥の影響がもたらす具体的な問題点	
1	・ 工事完了直後の測深は困難なため、浮泥が沈静化するまで時間が必要である。
2	・ 海底面の判定が困難なため、測深結果の解析に影響が出る。

表-3.1.2 施工作业における浮泥の影響がもたらす問題点

浮泥の影響がもたらす具体的な問題点	
1	・ 掘残しと判断されないよう、余掘りを行った。
2	・ 浚渫区域周辺の水深が 10 cm~20 cm 高くなっていたため、掘りに行くことになった。
3	・ 浚渫土砂の運搬時に、浮泥が舞い上がらないよう低速で曳航した。
4	・ 施工区域内を掘削しても、区域外から浮泥が流れ込み、水深の確保が困難な事例があった。

3.2 東京東航路周辺海域、荻田港および名古屋港での現地観測

3.2.1 観測地点および測定項目

音響測深などによる測深結果と底泥密度の鉛直分布との対応関係を評価するため、東京東航路周辺海域（図-3.2.1、観測日：2018年11月5日～7日）、荻田港（図-3.2.2、観測日：2020年1月22日～25日）および名古屋港（図-3.2.3、観測日：2021年1月25日、26日）において、船舶を航行させながら観測する（以下「航走観測」という.）とともに、船舶を停止させた状態で観測した（以下「停船観測」という.）。

対象海域の選定に際しては、これまでの既往知見^{3-2), 3-3)}などから浮泥が一定程度堆積していることが想定される海域を抽出し、観測直前に台風や浚渫工事などのイベント的な外力による堆積物の擾乱が生じていない環境を観測対象とした。東京東航路周辺海域および名古屋港はともに墨田川または庄内川などの河川から土砂の流入がある海域である。荻田港についても南側に長峽川の河口部があり港湾へ土砂の流入が考えられる海域である。底泥密度が $1,200 \text{ kg/m}^3$ に至るまでの底泥表層の鉛直分布の変化に伴う各観測海底面の相対的な位置関係の変化について、評価を行うこととした。

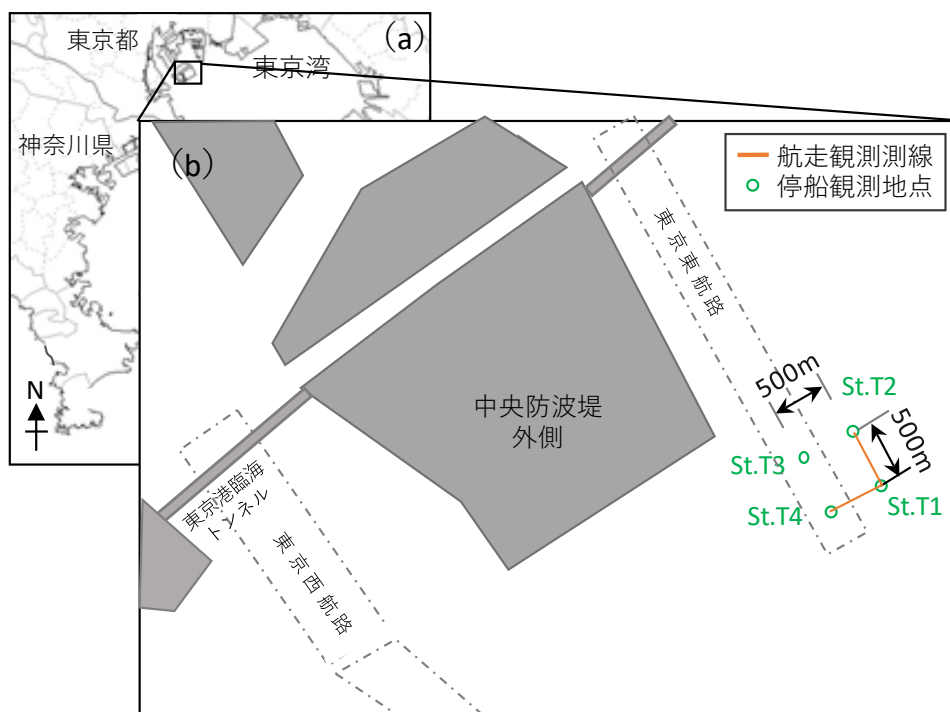


図-3.2.1 東京湾における観測対象海域（(a)東京湾内での観測海域、(b)観測地点）

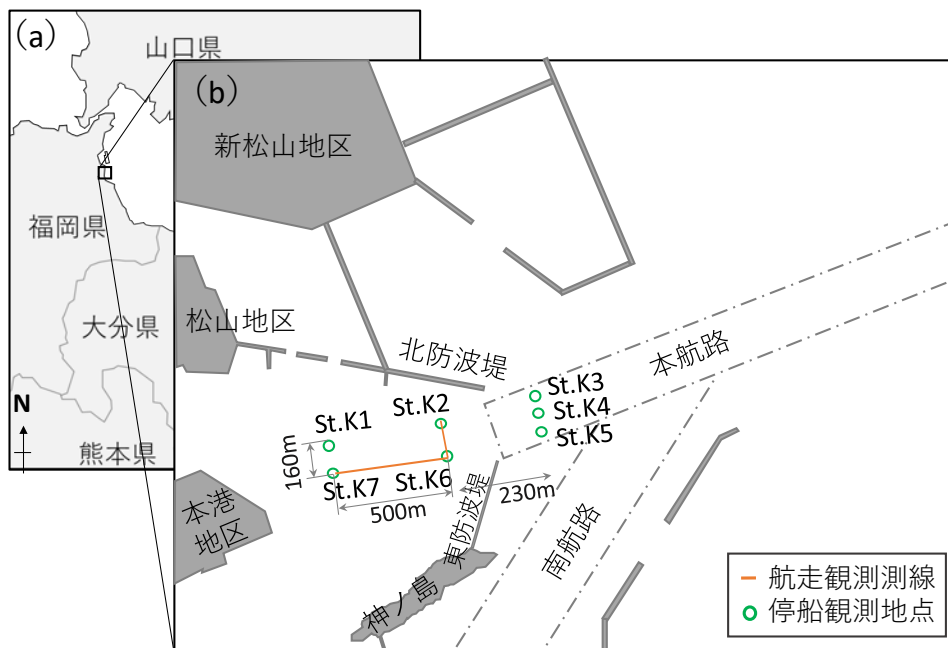


図-3.2.2 苅田港における観測対象海域 ((a)苅田港の位置, (b)観測地点)

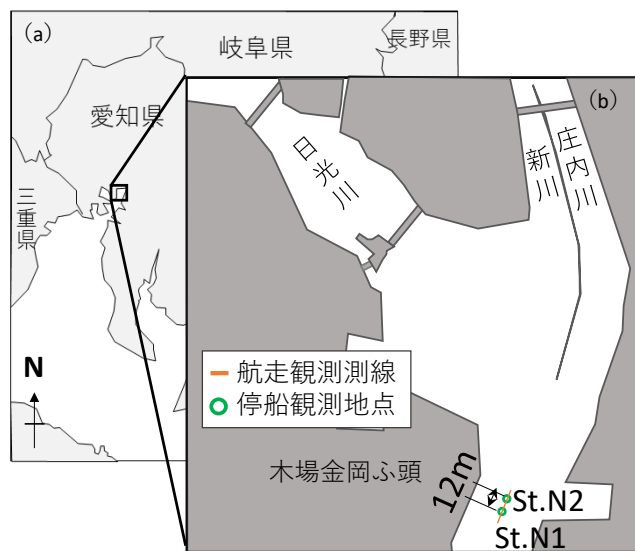


図-3.2.3 名古屋港における観測対象海域 ((a)名古屋港の位置, (b)観測地点)

航走観測では、マルチビーム（**図-1.1.1**，周波数：400 kHz，R2SONIC 社製 Sonic2024）およびシングルビーム（**図-3.2.4**，千本電機製，周波数 200 kHz の PDR-1300 および周波数 10 kHz の SH-20）による音響測深を実施した。音響測深時には，音響ビームの干渉を防ぐため，同時観測は実施せず，シングルビーム測深を実施した後にマルチビーム測深を実施した。なお，測定位置の水平位置は，深浅測量マニュアルの測定誤差内のため，同位置とみなした。また，マルチビームの周波数は，底泥密度 1,200 kg/m³ 位置と観測海底面の相対的な位置関係の把握および今後の実務的な運用を考慮し，現在，深浅測量で使用されることの多い周波数 400 kHz を設定し，測深データは，測深直下の値を使用した。測深結果の潮位補正に必要な潮位データは，東京港波浪観測所の潮位観測データ，全国港湾海洋波浪情報網であるリアルタイムナウファスの荻田港の潮位データおよびリアルタイム験潮データの名古屋港の潮位データを使用した。データ収録処理ソフトウェア（Xylem 社製 HYPACK）を用いて潮位補正を実施した。近年グリーンレーザーなどが効率的な測深手法として注目されているが，堆積分布を測定するものではなく，既存知見³⁻⁴⁾より透明度が確保できない海域での使用には適していないことから今回対象としないこととした。

また，停船観測では音響測深の他，現地式密度計による底泥密度の鉛直分布測定およびレッド（**図-3.2.4**，底面反力³⁻¹⁾：0.0239 kg/cm²）による測深を行った。**図-3.2.5**は停船観測のイメージを示す。底泥密度の鉛直分布測定では，底泥の浮遊状態から堆積状態に至るまでの連続的な密度分布を水深データとともに測定可能である現地式密度計（**図-3.2.4**，Hydramotion 社製 MudBug）を使用した。この密度計は，振動子センサの振動数変化から周辺媒体の密度を推計するもので，密度と水深を約 1 秒間隔で同時に測定・記録することが可能である。また，密度の測定範囲は 800 ～1,600 kg/m³，測定精度は 1 %である。付録 A に現地式密度計の測定原理を示す。この密度計を船上から海底付近まで徐々に降下させ，密度計の自重ではそれ以上沈降不可な地点までの密度を測定し，堆積物表層での密度分布データを活用した。

音響測深による測深結果と底泥密度 1,200 kg/m³ 位置との対応関係の評価においては，周

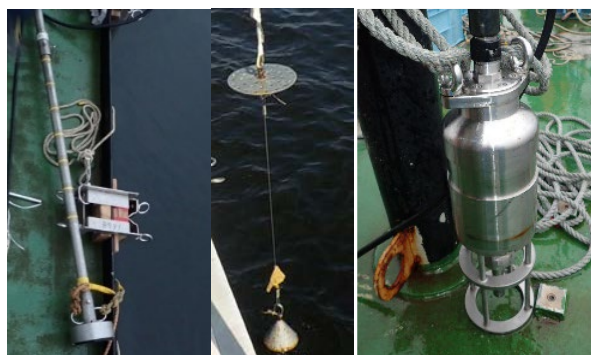


図-3.2.4 シングルビーム（左），レッド（中央），現地式密度計（右）

波数 200kHz の観測海底面と浮泥層の上面がおおよそ一致すること³⁻⁵⁾および周波数が高いほど底泥密度の低い浮泥層上面で音波の反射が生じることから、海水密度 1,024 kg/m³ から密度が上昇を開始する浮泥層の上面と、周波数 400 kHz の観測海底面が一致するものと仮定し、底泥密度 1,200 kg/m³ 位置は現地式密度計によって測定された当該密度前後の 2 点間での内挿（直線）補間により求めた。

レッドによる測深では、測深時に海流によって索が流され測定誤差が生じる可能性を抑えるため、レッドから 1.0 m 離れた索の位置に円盤状の金属製の反射板（直径：20 cm）を設置した。海水面から反射板までの鉛直距離を音響測深で測定し、その測深結果に 1.0 m を加算することでレッドによる測深結果を求めた。なお、この測深方法は水路測量業務準則施行細則³⁻¹⁾に記載されている方法であり、1.0 m の鉛直距離は反射板が浮泥層内へ没しないよう考慮して設定した。付録 A にレッドの諸元および形状を示す。

さらに、底泥の土質性状を把握するため、重力型自由落下式コアサンプラー（図-3.2.6、内径：7.6 cm、長さ：100 cm、株式会社離合社製）による柱状採泥も併せて実施した。なお、採取試料は、底泥表層の土質性状を詳細に把握するため、1 層目：1.0cm 厚（試料毎の表層の起伏を考慮し、実際には 0.5 cm～2.5 cm 厚）、2 層目以降：5 cm 厚にてスライスし、底泥密度、粒度特性、含水比の土質試験に供した。付録 B に土質試験の具体的な情報を示す。

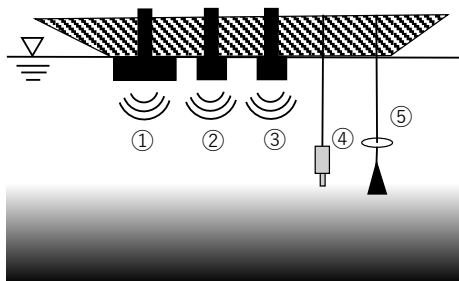


図-3.2.5 停船観測のイメージ（①マルチビーム測深（400 kHz）、②③シングルビーム測深（10 kHz、200 kHz）、④現地式密度計、⑤レッド測深）

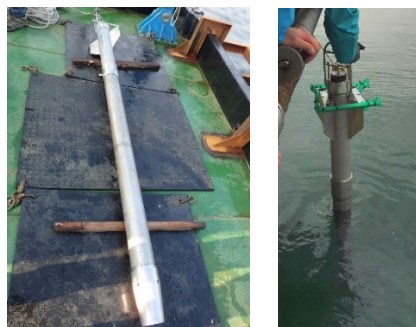


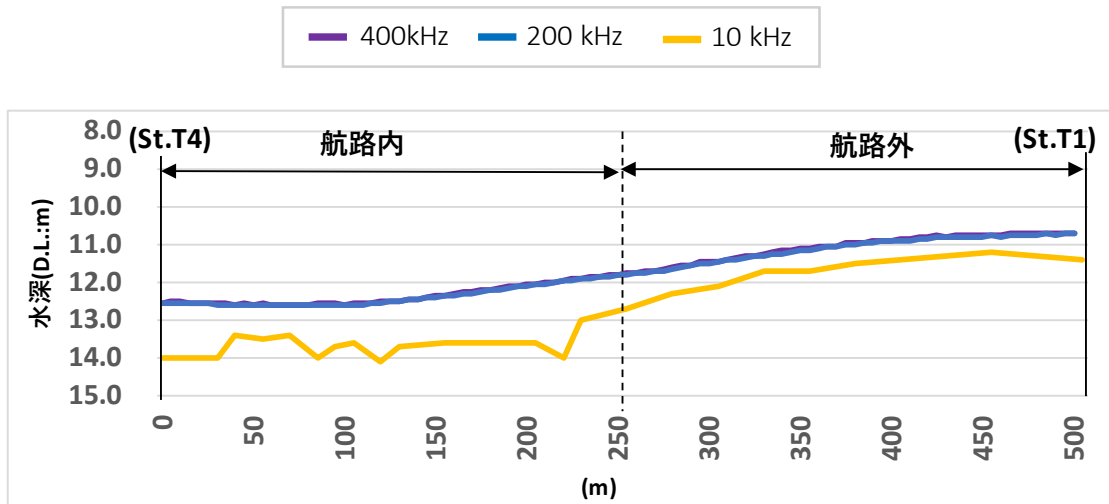
図-3.2.6 重力型自由落下式コアサンプラー（左）、コアサンプラー上部の反射板（右）

3.2.2 音響測深およびレッド測深による測深結果の差

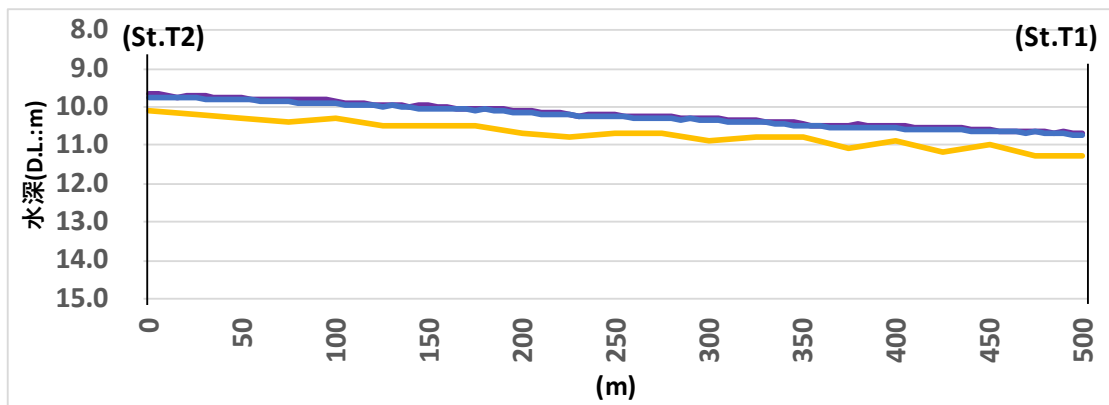
(1) 航走観測結果

図-3.2.7～図-3.2.9 は東京東航路周辺海域， 荻田港および名古屋港の航走観測による深浅測量結果を示す。既往観測結果^{3-6), 3-7)}と同様に，音響測深の周波数が高くなるほど，測深結果が浅く測定される結果となっている。東京東航路周辺海域で St.T1～St.T4 間を航走観測した際の各測深結果の具体的な差は，図-3.2.7 (a) に示すように周波数 200 kHz と 400 kHz では 10 cm 程度，10 kHz と 200 kHz では航路外で 50 cm 程度，航路内で 100 cm 程度である。周波数 10 kHz と 200 kHz の測深結果の差が，航路外より航路内の方が大きくなっているのは，航路内の海底で過去に原地盤の浚渫がなされ，その後底泥が再堆積し，今回の 10 kHz の音響ビームが再堆積層を通過し，原地盤付近まで到達しているためなどの理由が考えられる。一方，東京東航路周辺海域の St.T1～St.T2 間の航走観測では，図-3.2.7 (b) に示すように観測地点による周波数 10 kHz と 200 kHz の測深結果の差の違いは St.T1～St.T4 間の航走観測結果と異なりほとんど生じていない。この測線は終始航路外であり，浚渫による原地盤の高低差が生じていないため，違いが生じていないことなどが理由として考えられる。

図-3.2.8に示すように荻田港でSt.K6～St.K7間およびSt.K2～St.K6間を航走観測した際の周波数10 kHzと200 kHzの測深結果の差の違いはいずれも60 cm程度であり，観測地点による違いはほとんど生じていない。同様に，名古屋港でSt.N1～St.N2間を航走観測した際の周波数10 kHzと200 kHzの測深結果の差の違いは図-3.2.9に示すようにいずれも50 cm程度であり，観測地点による違いはほとんど生じていない。ただし，名古屋港の周波数200 kHzと400 kHzの測深結果は，東京東航路周辺海域および荻田港に比べて，比較的細かな起伏が生じている。

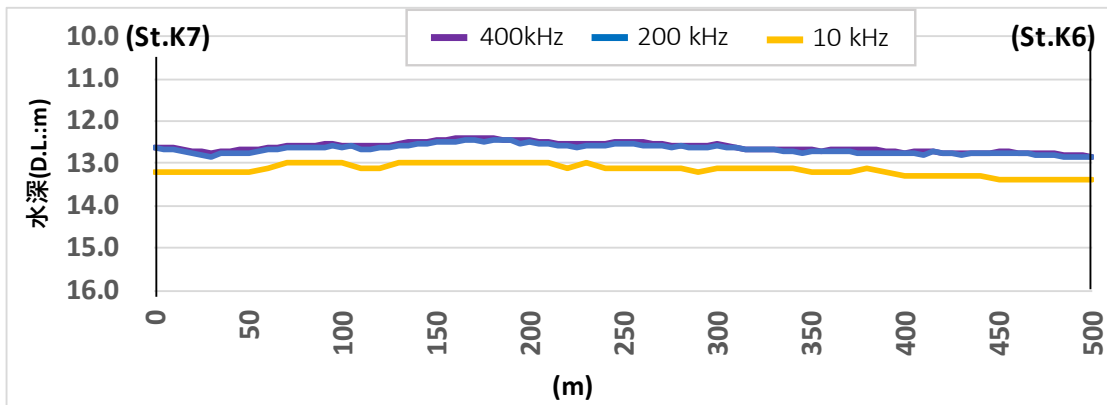


(a) 測線 St.T1~St.T4 (St.T4 : 0 m 地点, St.T1 : 500 m 地点)

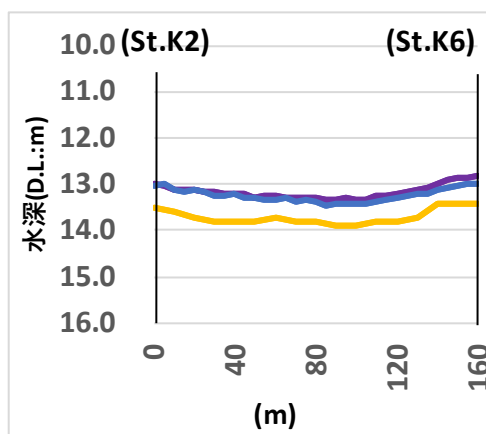


(b) 測線 St.T1~St.T2 (St.T2 : 0 m 地点, St.T1 : 500 m 地点)

図-3.2.7 東京東航路周辺海域における航走観測結果



(a) 測線 St.K6~St.K7 (St.K7 : 0 m 地点, St.K6 : 500 m 地点)



(b) 測線 St.K2~St.K6 (St.K2 : 0 m 地点, St.K6 : 160 m 地点)

図-3.2.8 荻田港における航走観測結果

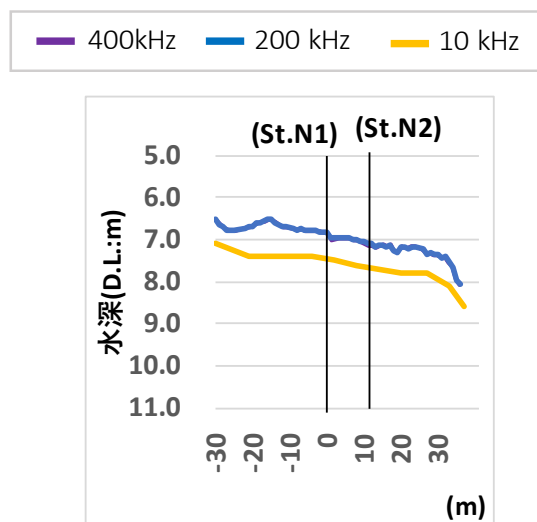


図-3.2.9 名古屋港における航走観測結果 (St.N1 : 0 m 地点, St.N2 : 12 m 地点)

(2) 停船観測結果

図-3.2.10～図-3.2.13は東京東航路周辺海域，荻田港および名古屋港の停船観測による深淺測量結果を示す．航走観測結果と同様に，音響測深の周波数が高くなるほど，測深結果が浅く測定される結果となっている．周波数が高いほど，音響ビームが伝搬していく過程で減衰しやすく，密度勾配に鋭敏となり伝搬可能距離が短くなるためである．ただし，周波数 200 kHz と 400 kHz の測深結果の具体的な差は，いずれの観測地点も 0.1 m 未満である．また，レッドによる測深結果はいずれの観測地点においても周波数 200 kHz の測深結果より深く測定され，10 kHz の測深結果より浅く測定されている．付録 C にマルチビーム測深で数秒～数十秒間かけて実際に取得したデータ例を示す．波浪などの影響で平均値±0.05 m 程度のバラツキが生じている．

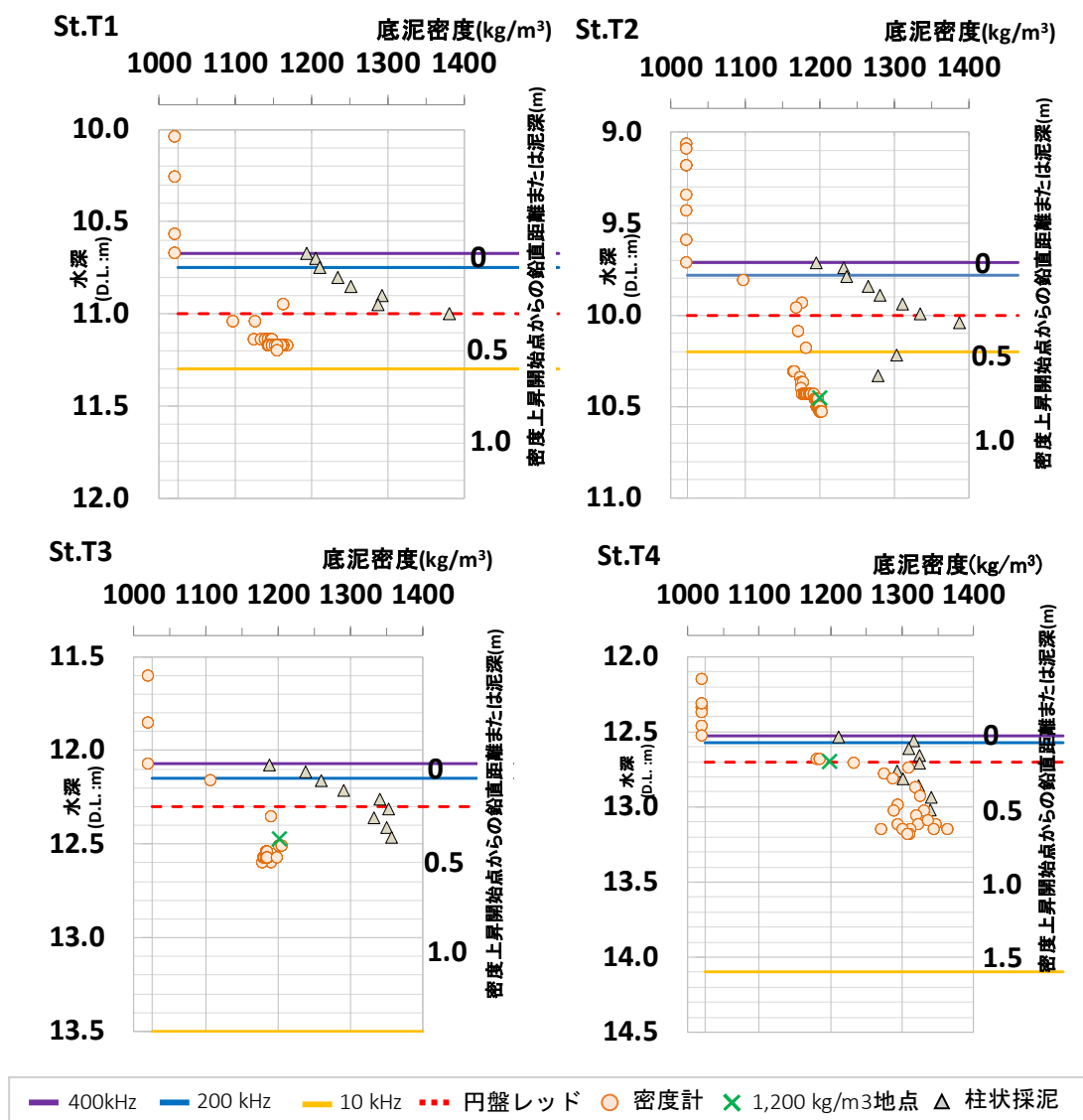


図-3.2.10 東京東航路周辺海域における深淺測量結果 (St.T1～St.T4)

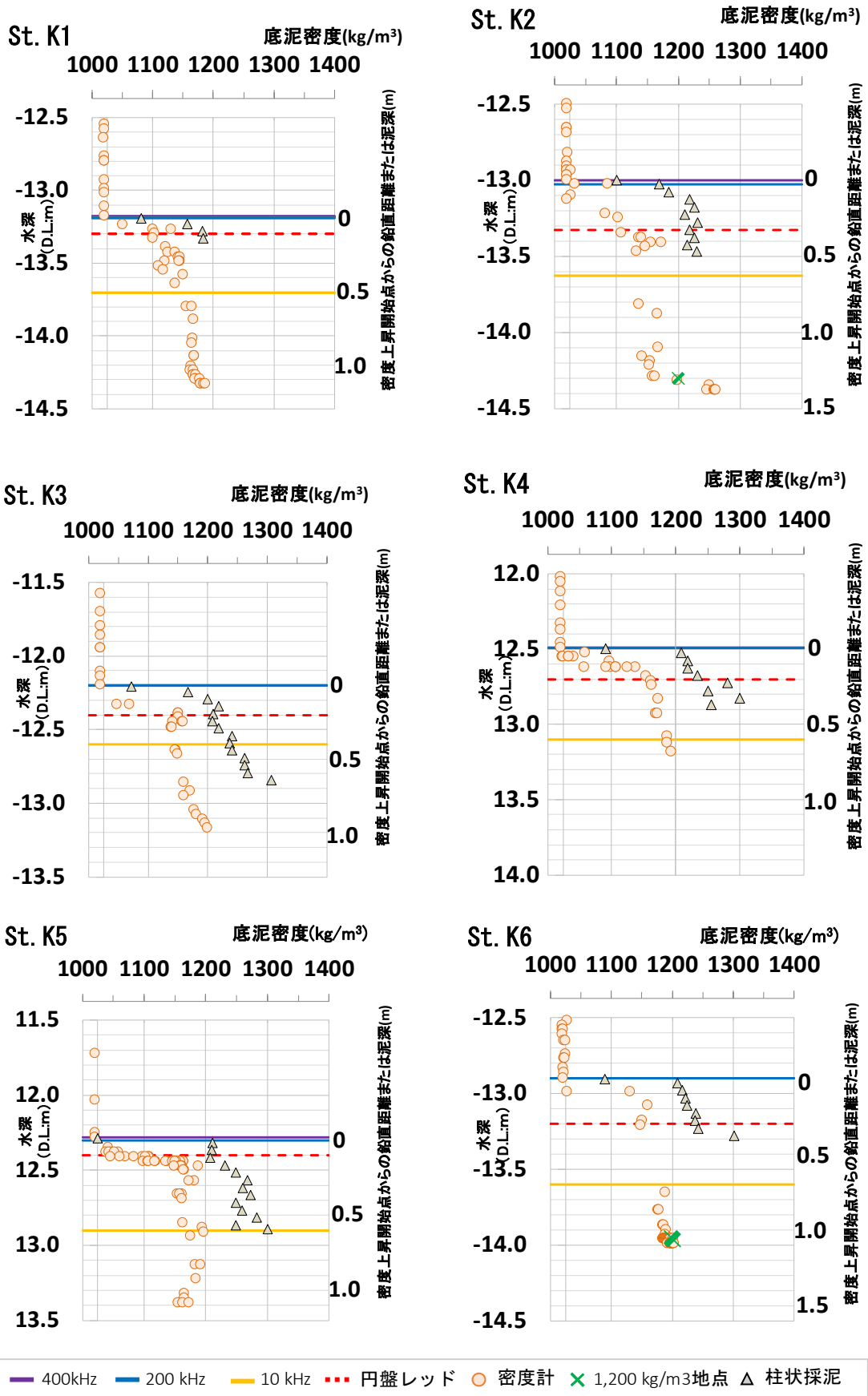
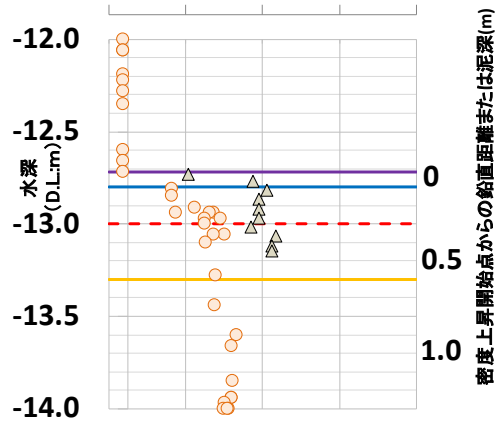


図-3.2.11 荻田港における深浅測量結果 (St.K1~St.K6)

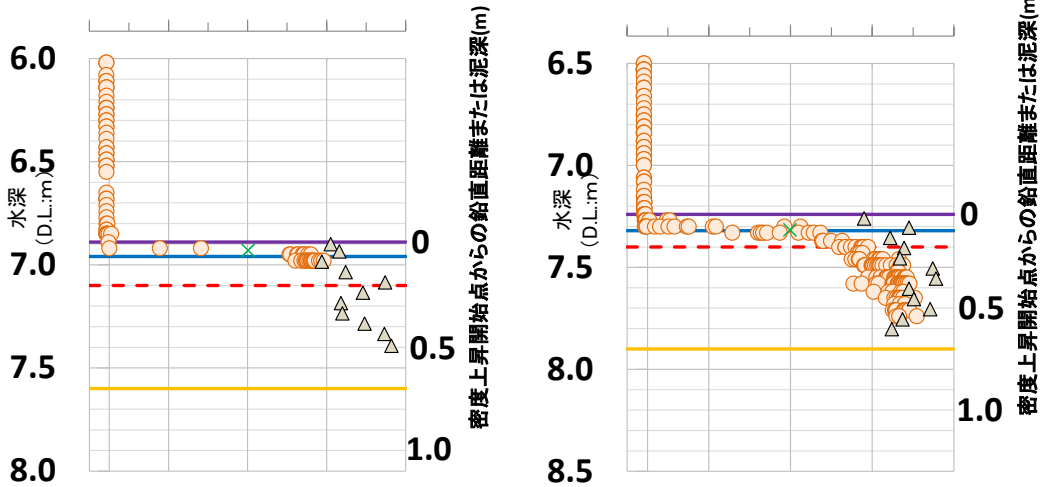
St. K7 底泥密度(kg/m³)
1000 1100 1200 1300 1400



— 400kHz — 200 kHz — 10 kHz - - - 円盤レッド ○ 密度計 × 1,200 kg/m³地点 △ 柱状採泥

図-3.2.12 荻田港における深浅測量結果 (St.K7)

St. N1 底泥密度(kg/m³) St. N2 底泥密度(kg/m³)
1000 1100 1200 1300 1400 1000 1100 1200 1300 1400



— 400kHz — 200 kHz — 10 kHz - - - 円盤レッド ○ 密度計 × 1,200 kg/m³地点 △ 柱状採泥

図-3.2.13 名古屋港における深浅測量結果 (St.N1,N2)

3.2.3 底泥密度1,200 kg/m³以下の底泥堆積厚の測定結果

3.2.2(2)の図-3.2.10～図-3.2.13に、底泥密度が海水密度から上昇を開始する点(以下「密度上昇開始点」という。)と周波数400 kHzの測深結果が一致するものと仮定し、現地式密度計による底泥密度の測定結果を密度上昇開始点からの鉛直距離に着目して示す。併せて、柱状採泥による測定結果も底泥試料の1層目が密度上昇開始点に一致すると仮定し、底泥密度に関する鉛直分布を同図に示す。表-3.2.1は底泥密度の測定結果をもとに周波数400 kHzのマルチビームによる測深結果と底泥密度1,200 kg/m³位置の差を示す。表-3.2.1に示すようにマルチビームによる測深結果と底泥密度1,200 kg/m³位置の差は、東京東航路周辺海域では、最大0.79 m、最小0.16 m(平均0.46 m)、荻田港では、最大1.34 m、最小1.06 m(平均1.19 m)、名古屋港では、0.06 mおよび0.05 mである。なお、東京東航路周辺海域の調査結果のうちSt.T1地点と、荻田港の調査結果のうちSt.K2とSt.K6以外の地点では、調査時の波浪による動揺の影響など、現地オペレーションの都合により、現地式密度計が底泥密度1,200 kg/m³以上の圧密層までのセンサの貫入に至っていない。

表-3.2.1 マルチビームによる測深結果と底泥密度1,200 kg/m³位置の差

鉛直距離						
東京東航路周辺海域				名古屋港		
St. T1	St. T2	St. T3	St. T4	St. N1	St. N2	
0.53 ^{*1}	0.79	0.44	0.16	0.05	0.06	
鉛直距離						
荻田港						
St. K1	St. K2	St. K3	St. K4	St. K5	St. K6	St. K7
1.34 ^{*1}	1.32	1.22 ^{*1}	1.19 ^{*1}	1.13 ^{*1}	1.06	1.31 ^{*1}

※1 圧密層まで密度計の貫入が至らなかった地点における今回把握できた鉛直距離。実際の鉛直距離は当該値以上となる。

周波数10 kHzの測深結果について、東京東航路周辺海域での停船観測結果は航走観測結果と同様に航路内のSt.T3およびSt.T4地点では、航路外のSt.T1およびSt.T2地点と比べ200 kHzの測深結果との差が大きくなっている。航路内で過去に原地盤の浚渫がなされ、10 kHzの音響ビームは再堆積層を通過し、原地盤付近まで到達しているためなどの理由が考えられる。また、周波数10 kHzの測深結果と底泥密度の対応関係について、東京東航路周辺海域のSt.T2では底泥密度1,200 kg/m³未満、航路内のSt.T3およびSt.T4では底泥密度1,200 kg/m³または1,300 kg/m³以上、荻田港ではいずれの地点でも底泥密度1,200 kg/m³未満、名古屋港では底泥密度1,300 kg/m³以上の位置で周波数10 kHzの測深結果が測定されている。既往知見³⁻⁵⁾でも示されているように低周波の音波探査による測深結果と底泥密度の鉛直分

布との対応関係の評価することは難しく、低周波の音波探査による測深結果を画一的に可航水深の評価に用いることの困難さを改めて確認することができる。

次に、現地式密度計による底泥密度の測定結果と柱状採泥による土質試験結果（底泥密度）を比較するため、現地式密度計による測定結果を、密度上昇開始点以降の底泥密度の増分（ $\Delta\rho$ ）に着目して図-3.2.14～図-3.2.16に示す。併せて、柱状採泥による測定結果も底泥試料の1層目が密度上昇開始点に一致すると仮定し、底泥密度の増分に関する鉛直分布を同図に示す。なお、図-3.2.14～図-3.2.16に示す現地式密度計の結果においては、同じ水深帯で測定された複数の密度測定値に対しては（例えば、図-3.2.11におけるSt.K1地点の水深14.33 m）、それらの平均値により図示する。図-3.2.14に示すように東京東航路周辺海域における底泥密度の測定結果と土質試験結果（水深距離0.2m未満）は相対的に類似した底泥の密度勾配を示し、ともにSt.T1, St.T2, St.T3, St.T4の順に密度勾配は大きくなっている。図-3.2.15に示すように荻田港における両測定結果も、St.K4やSt.K5地点の密度勾配が比較的大きく、St.K7地点の密度勾配が比較的小さい結果となっている。柱状採泥による測定結果は、現地式密度計による測定結果より高い値を示しており、今回用いた重力型自由落下式コアサンプラーでは底泥密度が低い底泥を採取する場合には採取試料の短縮が生じてしまうことが考えられる。付録Aに採泥した際の底泥表面とコアサンプラーの位置関係を示す。底泥試料の短縮が生じたとしても鉛直分布傾向は類似しており、柱状採泥による測定結果は、現地の底泥密度の鉛直分布を把握するためには十分有用な情報を含んでいることを示している。図-3.2.17～図-3.2.19は現地式密度計の測定結果において同じ水深帯で測定された複数の底泥密度の測定値の標準偏差を示す。荻田港のSt.K6、名古屋港のSt.N1およびSt.N2の底泥表層付近の測定値を除き、底泥密度測定値の標準偏差は0～20 kg/m³の範囲に分布している。荻田港および名古屋港の底泥表層付近での底泥密度測定値の標準偏差は比較的高い値を示している。これは底泥表層付近では密度上昇が大きく、海流などの影響で比較の変動しやすいためと考えられる。

そこで、上記の相対的關係を更に具体的に把握するため、両測定結果それぞれにおける底泥密度1,200 kg/m³、1,300 kg/m³以下の底泥堆積厚を比較分析した。表-3.2.2は、現地式密度計による密度上昇開始点から底泥密度1,200 kg/m³位置までの鉛直距離、柱状採泥表層から底泥密度1,200 kg/m³および1,300 kg/m³位置までの泥深を示す。なお柱状採泥の分析結果においては、この密度前後の2点の値から直線補完して各密度の指標値に相当する深さを求めた。表-3.2.2に示すように柱状採泥による測定結果において底泥密度1,200 kg/m³以下の泥深が0.1 m未満とほとんど検出されなくとも、底泥密度1,300 kg/m³以下の泥深が0.2 m程度検出される場合には、現地式密度計による測定結果において、底泥密度1,200 kg/m³以下の底泥が0.4 m以上堆積していることが確認される。逆に柱状採泥による測定結果における底泥密度1,300 kg/m³以下の泥深がほとんど検出されない地点（St.T4, St.N1, St.N2）では、現地式密度計による測定結果でも底泥密度1,200 kg/m³以下の底泥がほとんど確認されていない。

本研究で対象とすべき比較的密度の低い底泥の堆積状況に注目すると、上述のとおり柱状採泥および現地式密度計のいずれにおいても、相対的に低密度の測定結果が得られているものの、絶対値の評価においては両者に乖離が生じ、柱状採泥による測定結果において底泥密度が高くなる傾向がみられる。

この点については、たとえば熊本港や新潟港の航路を対象に実施されている既往調査の事例^{3-8),3-9)}においても、底泥表層付近の底泥密度の緩やかな上昇が現地式密度計でとらえられた場合に、重力式コアサンプラーによる試料分析の結果は、やはり相対的に底泥密度が高くなる傾向にあり、測定方法の違いによる結果の整合性に関する検討や検証は別途必要と考えられる。上述のとおり重力式コアサンプラーの特性上、本研究の目的において重要となる、流動性の高い浮泥層を含めた底泥表層の鉛直分布構造が十分にとらえきれていない可能性も考えられる。一方、現地式密度計は測定値の精度検証など詳細な課題は残されるものの、海水層から底泥層内にいたる連続的な密度分布の特徴について、観測地点間で差異を含めて把握できていることから、今回は、効率的に可航水深を推計する方法を提案するための基本情報として密度計による測定結果を用いることとした。

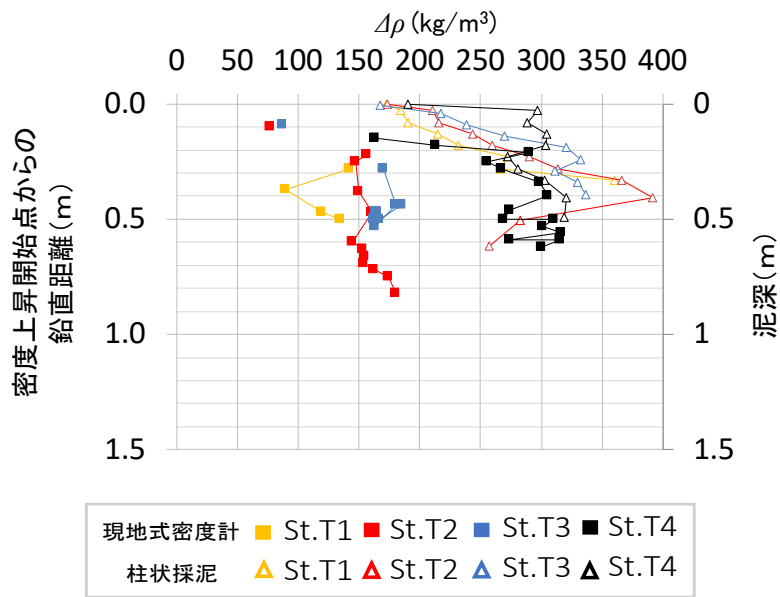
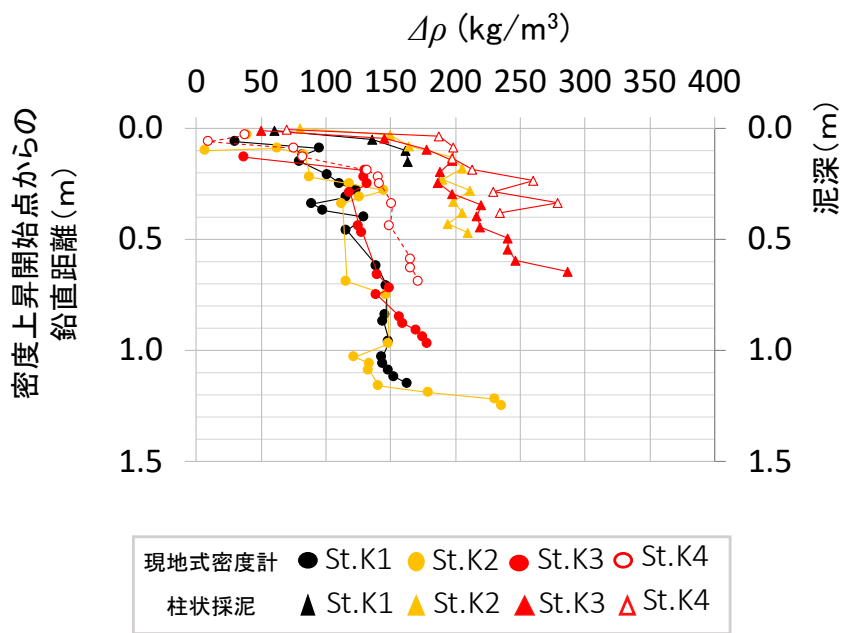
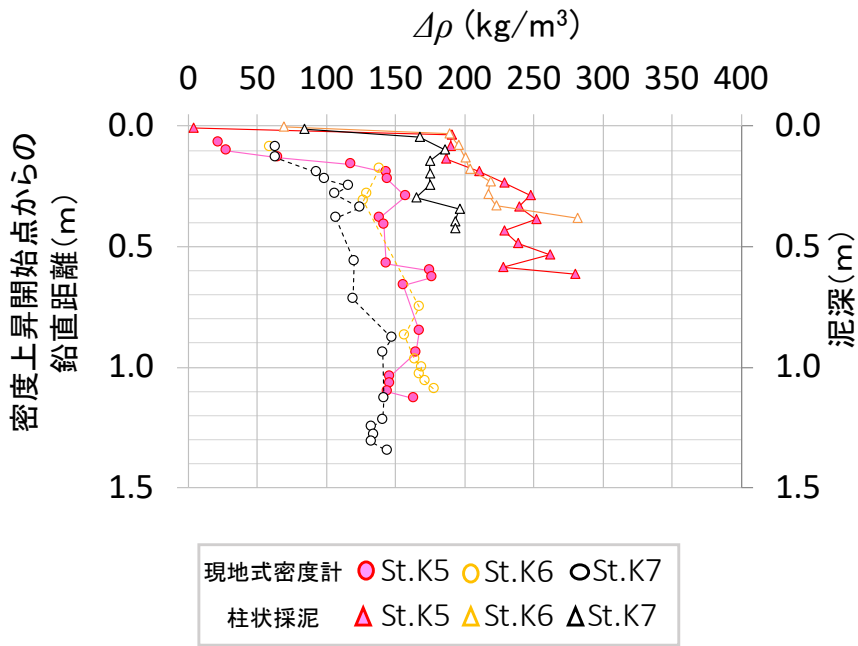


図-3.2.14 東京東航路周辺海域における底泥密度の増分



(a) St.K1~St.K4

図-3.2.15 荻田港における底泥密度の増分



(b) St.K5~St.7

図-3.2.15 荻田港における底泥密度の増分

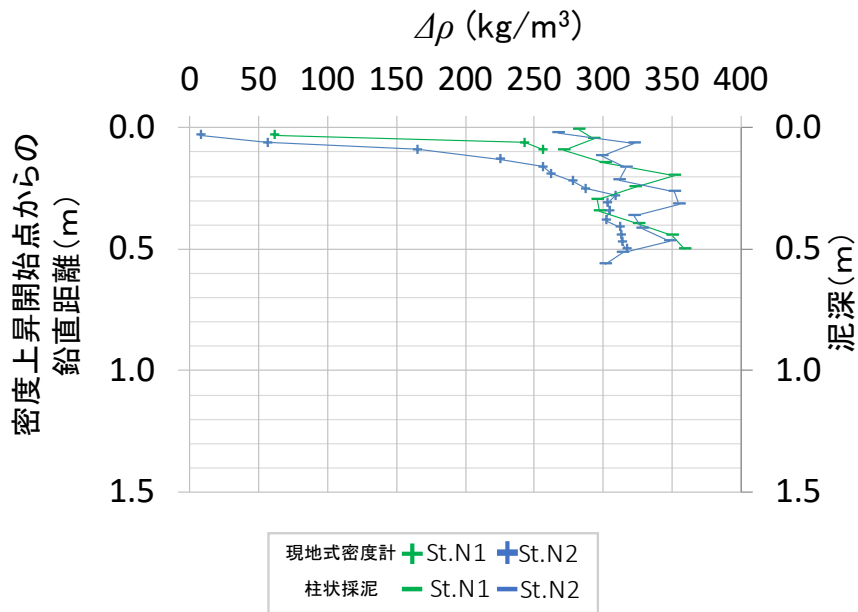


図-3.2.16 名古屋港における底泥密度の増分

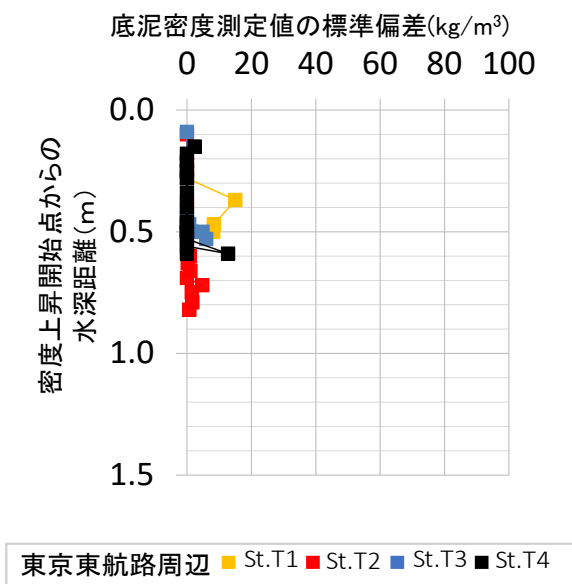


図-3.2.17 東京東航路周辺海域における底泥密度測定値の標準偏差

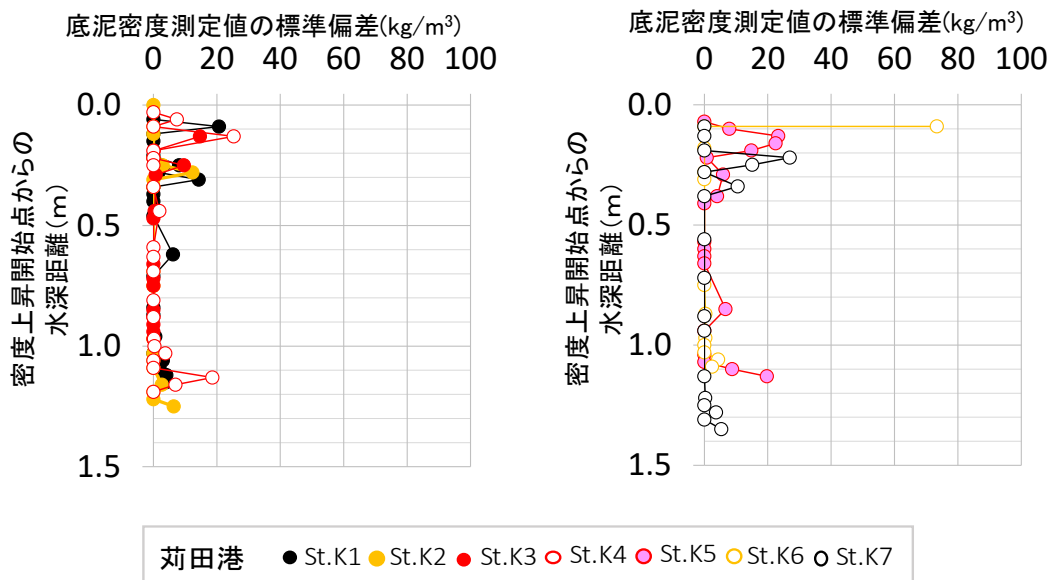


図-3.2.18 苅田港における底泥密度測定値の標準偏差

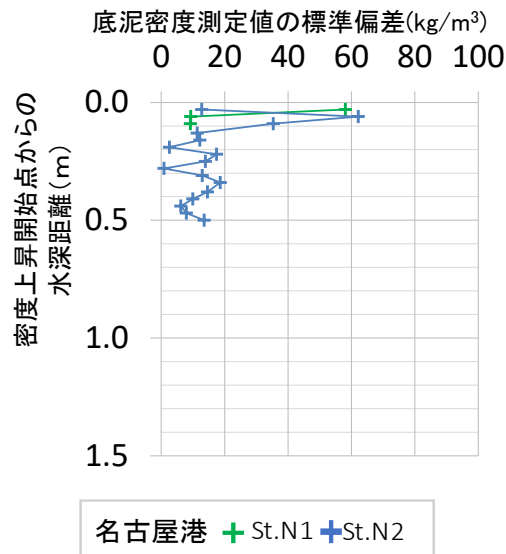


図-3.2.19 名古屋港における底泥密度測定値の標準偏差

表-3.2.2 底泥の密度上昇開始点（または柱状採泥表層）～各底泥密度位置の鉛直距離（または採取試料の泥深）

	底泥密度 (kg/m ³)	鉛直距離または泥深(m)					
		東京東航路周辺海域				名古屋港	
		St.T1	St.T2	St.T3	St.T4	St.N1	St.N2
密度計	1,200	0.53 ^{※1}	0.79	0.44	0.16	0.05	0.06
柱状	1,200	0.02	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00
採泥	1,300	0.29	0.21	0.15	0.03	0.00	0.03

	底泥密度 (kg/m ³)	鉛直距離または泥深(m)						
		荊田港						
		St.K1	St.K2	St.K3	St.K4	St.K5	St.K6	St.K7
密度計	1,200	1.34 ^{※1}	1.32	1.22 ^{※1}	1.19 ^{※1}	1.13 ^{※1}	1.06	1.31 ^{※2}
柱状	1,200	0.19 ^{※2}	0.10	0.10	0.03	0.03	0.03	0.08
採泥	1,300	0.19 ^{※2}	0.47 ^{※2}	0.64	0.34	0.61	0.38	0.42 ^{※2}

※1 圧密層まで密度計の貫入が至らなかった地点における今回把握できた鉛直距離. 実際の鉛直距離は当該値以上となる.

※2 採取試料(長さ)の関係から, 今回把握できた泥深. 実際の泥深は当該値以上となる.

3.2.4 各観測地点における底泥の土質性状

底泥表層の土質性状の概況を示すため、各観測地点で採取した底泥試料の1層目（試料毎の表層の起伏を考慮し、泥深0.5 cm～2.5 cmの厚さ）を対象として得られた粒度特性、含水比の土質試験結果を表-3.2.3に示す。粒度特性について、St.K1～St.K3地点では砂分の割合が20%を超えているが、他地点ではシルト・粘土分の合計が90%を超える泥質物が堆積している。また、含水比については、東京東航路周辺海域と荻田港の観測地点では200%以上の値を示しており、特に荻田港の観測地点においては350%を超える高い値を示している。一方で名古屋港の含水比はいずれも150%程度の値を示している。

表-3.2.3 観測地点の堆積物表層（1層目）の性状

		東京東航路周辺海域				名古屋港		
		St.T1	St.T2	St.T3	St.T4	St.N1	St.N2	
粒度特性	中央粒径 (μm)	9.7	9.5	9.5	9.8	9.1	8.8	
	砂分 (%)	2.0	2.9	2.3	6.0	1.2	1.4	
	シルト分 (%)	65.7	64.4	64.9	62.5	65.9	65.7	
	粘土分 (%)	32.3	32.7	32.8	31.5	32.9	32.9	
含水比 (%)		327.4	360.1	242.3	288.7	151.2	154.7	
湿潤密度 (kg/m ³)		1,168	1,154	1,219	1,188	1,324	1,319	
		荻田港						
		St.K1	St.K2	St.K3	St.K4	St.K5	St.K6	St.K7
粒度特性	中央粒径 (μm)	26.2	18.4	16.9	10.4	9.2	10.0	10.2
	砂分 (%)	30.6	26.3	21.6	2.0	3.0	4.4	7.3
	シルト分 (%)	45.8	49.3	52.4	65.5	64.4	63.2	61.8
	粘土分 (%)	23.6	24.4	26.0	32.5	32.6	32.4	30.9
含水比 (%)		327.4	435.9	608.5	391.5	368.3	484.6	508.7
湿潤密度 (kg/m ³)		1,168	1,130	1,095	1,143	1,151	1,118	1,112

なお、含水比はJIS A1203（土の含水比試験）を実施し、各値を算出。湿潤密度は土粒子の乾燥質量を2,600 kg/m³と仮定し、含水比をもとに各値を算出。

3.3 音響測深およびレッド測深による測深結果に及ぼす底泥密度の鉛直分布の影響

3.3.1 音響測深による測深結果に及ぼす底泥密度の鉛直分布の影響

底泥密度の鉛直分布の変化に依存して、音響測深による測深結果が相対的にどのように変化するか評価するため、まず、底泥密度の鉛直分布の実測値に対して、既存文献³⁻¹⁰⁾、³⁻¹¹⁾で底泥濃度分布の近似に用いられている関数を準用して式(3.3.1)による近似を試みた。

$$\rho(z) = \rho_0 + \Delta\rho \cdot (-z/D)^{0.25} \quad (3.3.1)$$

ここに、 ρ_0 ：表層密度、 $\Delta\rho$ ：任意の泥深（ D ）における表層密度からの増分であり、**図-3.3.1**に示すような底泥密度の鉛直分布形状を定める定数を意味する。**図-3.3.2**における実線が式(3.3.1)を用いた現地式密度計による東京東航路周辺海域での測定結果（**図-3.2.14**）に対する近似結果を示している。また、密度上昇開始点からレッド停止位置までの鉛直距離も同図に示した。その上で、ここでは特に、底泥表層付近での堆積構造の特徴を考慮し、泥深0.1 mにおける底泥密度の表層からの増分（ $\rho(0.1) - \rho_0$ ）が各手法による測深結果の差に及ぼす影響を評価した。

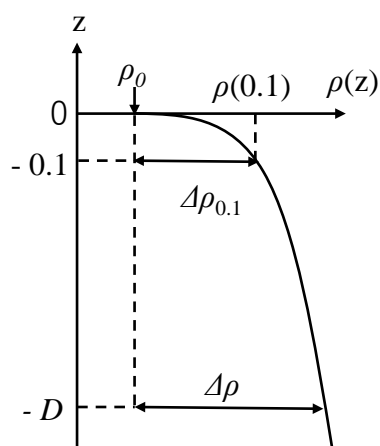


図-3.3.1 底泥層内の底泥密度鉛直分布の近似

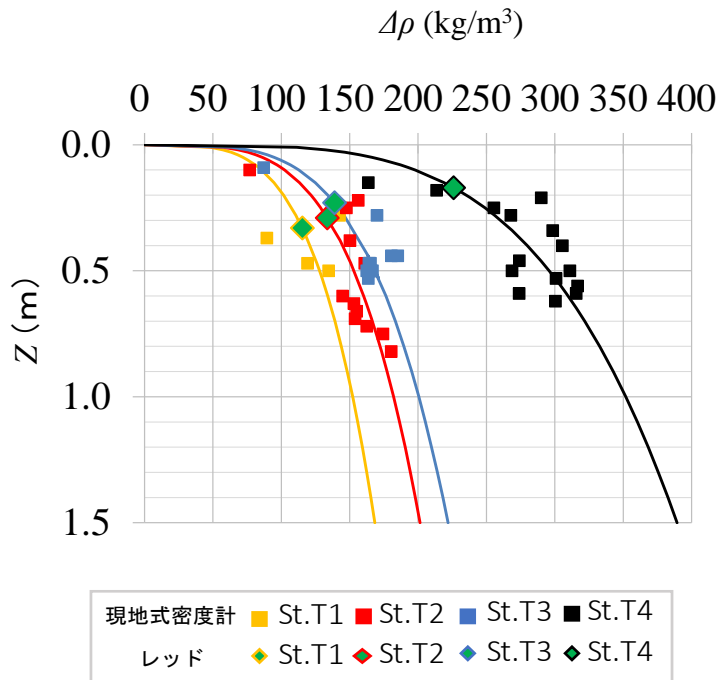
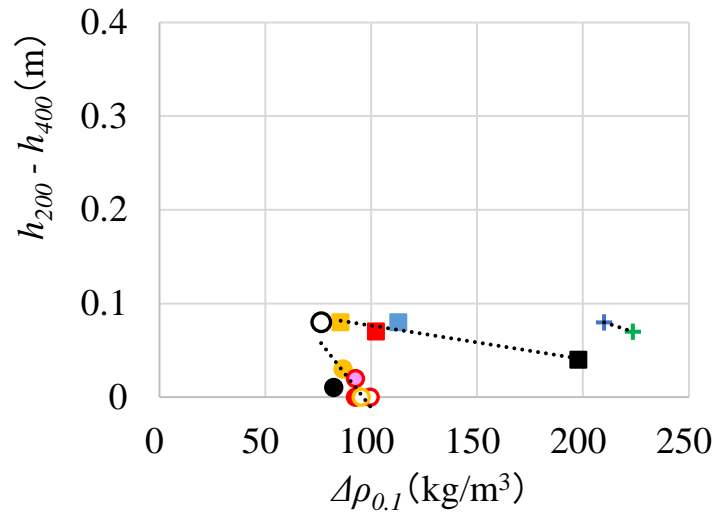


図-3.3.2 東京東航路周辺海域における底泥層内の底泥密度の増分（実線：式(3.3.1)）

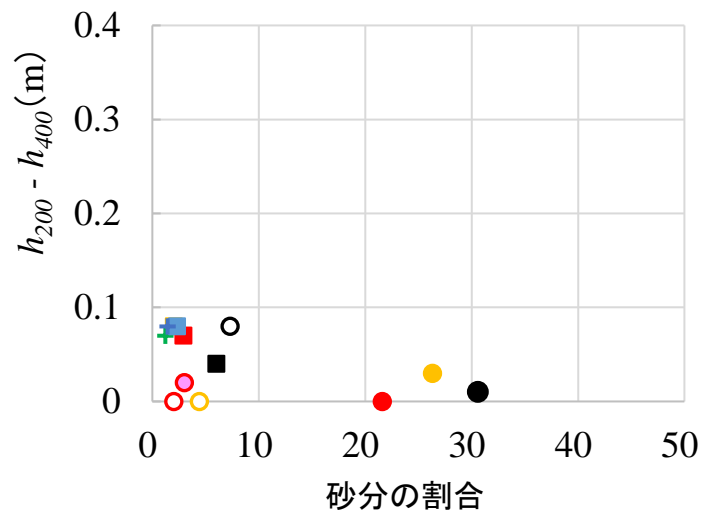
まず、図-3.3.3は底泥密度の増分（ $\Delta\rho_{0.1} = \rho(0.1) - \rho_0$ ）と周波数 400 kHz および 200 kHz による測深結果の差（ $h_{200} - h_{400}$ ）との関係について示す。周波数 400 kHz および 200 kHz による測深結果の差は、高々 10 cm 以内に収まっているが、観測海域毎の測深結果に着目すると、それぞれ $\Delta\rho_{0.1}$ が大きいほど周波数の違いによる測深結果の差は減少する傾向がみられる。すなわち、底泥表層における密度勾配が大きくなる（浮泥層の厚さが小さくなる）ほど、周波数の違いによる測深結果の差が小さくなることが確認できる。観測海域毎の違いは、測深結果の差が単に $\Delta\rho_{0.1}$ のみならず水深や底泥密度（絶対値）など、減衰や反射などの音響特性に關与する他の要因が、海域ごとに異なるために生じていると思われる。

一方、図-3.3.4は堆積物表層における砂分の割合を指標にして、同様な比較をしたものであり、砂分の割合が高い（浮泥集積の影響が小さい）ほど、周波数の違いによる測深結果の差は小さくなる傾向がみてとれる。



東京東航路周辺 ■ St.T1 ■ St.T2 ■ St.T3 ■ St.T4
 荻田港 ● St.K1 ● St.K2 ● St.K3 ○ St.K4 ○ St.K5 ○ St.K6 ○ St.K7
 名古屋港 + St.N1 + St.N2

図-3.3.3 周波数 400 kHz および 200 kHz による測深結果の差 ($h_{200}-h_{400}$) と底泥密度の増分 ($\Delta\rho_{0.1} = \rho(0.1)-\rho_0$)



東京東航路周辺 ■ St.T1 ■ St.T2 ■ St.T3 ■ St.T4
 荻田港 ● St.K1 ● St.K2 ● St.K3 ○ St.K4 ○ St.K5 ○ St.K6 ○ St.K7
 名古屋港 + St.N1 + St.N2

図-3.3.4 周波数 400 kHz および 200 kHz による測深結果の差 ($h_{200}-h_{400}$) と砂分の割合

3.3.2 レッド測深による測深結果に及ぼす底泥密度の鉛直分布の影響

3.3.1と同様に、底泥密度の増分($\Delta\rho_{0.1}$)と周波数400kHzとレッドによる測深結果の差、すなわち密度上昇開始点以深でのレッドの貫入量(以下「レッド貫入量」という。)($d_{Lead} = h_{Lead} - h_{400}$)の関係について評価した。

図-3.3.5はレッド貫入量と底泥密度の増分の関係を示す。図-3.3.5に示すように底泥密度の増分が100 kg/m³から200 kg/m³へ大きくなるに伴い、レッド貫入量はばらつきはあるものの、下限値は同程度であるが上限値は0.33 mから0.21 mへと減少する傾向がみられる。すなわち、堆積物表層の密度増分が小さい場合には、レッド貫入量が大きくなることを意味している。これは底質の液性限界値などを測定するフォールコーン試験で、コーン貫入量が含水比の減少に伴って小さくなること³⁻¹²⁾、³⁻¹³⁾に類似した関係性を示している。関田ら³⁻¹⁴⁾が実施した杭式アンカーやパイプ模型の水中落下実験によると落下高7 m以上の場合、それぞれの落下速度は約6 m/sまたは4 m/sと一定速度となることが報告されている。この実験結果を参考にし、本研究の対象海域の水深が約7~13 mであることから、レッド貫入量に及ぼすレッドの落下速度の影響は観測地点による違いは生じていないとみなす。また、航路および泊地の水深は海域によって大きく異なるわけではない。そのため、今後現地観測する際もレッドの落下速度は観測地点によって大きな違いが生じることはなく同程度になると考える。

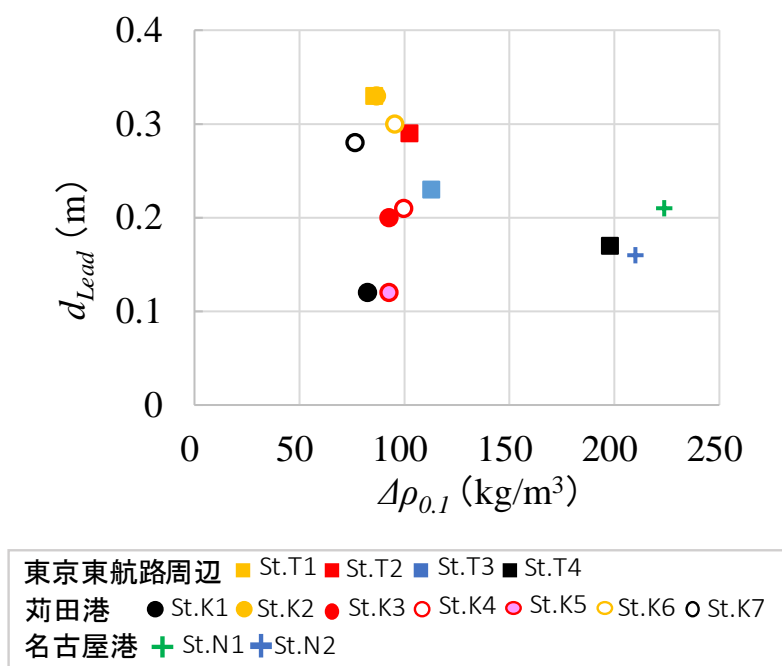


図-3.3.5 レッド貫入量 ($d_{Lead} = h_{Lead} - h_{400}$) と底泥密度の増分 ($\Delta\rho_{0.1} = \rho(0.1) - \rho_0$)

3.4 浮泥堆積域におけるマルチビームおよびレッドによる可航水深の簡便な推計手法

3.4.1 浮泥堆積域におけるマルチビームおよびレッドによる可航水深の簡便な推計手法の提案

3.3.2の結果から、レッド貫入量 ($d_{Lead} = h_{Lead} - h_{400}$) は底泥密度の増分に応じて変化することがわかった。佐野ら³⁻¹²⁾や甲本³⁻¹³⁾が有明粘土などの複数の粘土に対して実施したフォールコーン試験の結果によると、コーン貫入量と含水比の関係はべき関数式(3.4.1)で表されるという結果が報告されている。この式を積分を用いた式に変換し直すと式(3.4.2)のとおりとなる。

$$w = 10^n \cdot p^m \quad (3.4.1)$$

$$10^{-n} = \int_0^p \frac{1}{w} \cdot m \cdot z^{m-1} dz \quad (3.4.2)$$

ここに、 w : 含水比 (%)、 p : コーン貫入量 (mm)、 n, m : 土の種類に応じた定数を意味する。ただし、土の物理的指標 (例えば、液性限界値) に応じた定数の設定までは至っていない。コーン貫入量とレッド貫入量が、自由落下する物体の貫入量という観点での類似性を有することから、上記式(3.4.2)を準用し、レッド貫入量と底泥密度の増分がべき関数で表されると仮定すると次式のとおりとなる。

$$\gamma = \int_0^{d_{Lead}} (\rho(z) - \rho_0) \cdot 0.62 \cdot z^{0.62-1} dz \quad (3.4.3)$$

ここに、 $\rho(z) - \rho_0$: 底泥密度の増分 (kg/m^3)、 d_{Lead} : レッド貫入量 (m)、 γ : 定数、0.62 : 観測地点毎に算出される γ のバラツキが最小となる場合のべき指数 m (観測地点毎に算出される γ の変動係数が最小となる場合の値を算出した) を意味する。表-3.4.1 は式(3.4.3)における観測地点毎の γ 値を示す。表-3.4.1 に示すようにレッド停止位置のばらつきなどが影響し、 γ 値は $16.5 \sim 72.9 \text{ kg/m}^{2.38}$ と幅があり、中央値 $41.3 \text{ kg/m}^{2.38}$ であった。この中央値と 3.3.1 の式(3.3.1)を用いて、上記式(3.4.3)を表記し直すと次式のとおりとなる。

$$41.3 = \int_0^{d_{Lead}} \Delta\rho \cdot (-z/D)^{0.25} \cdot 0.62 \cdot z^{0.62-1} dz \quad (3.4.4)$$

ここに、 $\Delta\rho$: 任意の泥深 (D) における表層密度からの増分を意味する。

一方、周波数 400 kHz による測深結果と底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 位置の差、すなわち底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 以下の底泥堆積厚を $d_{1,200}$ とし、当該値を式(3.3.1)を用いて表すと次式のとおりとなる。

表-3.4.1 式(3.4.3)における観測地点毎の γ 値

菟田港						
St.K1	St.K2	St.K3	St.K4	St.K5	St.K6	St.K7
16.5	41.9	28.9	32.5	18.5	42.3	32.0
東京東航路周辺海域				名古屋港		
St.T1	St.T2	St.T3	St.T4	St.N1	St.N2	
41.3	44.2	39.8	53.7	72.9	54.0	

りとなる。

$$\rho(d_{1,200}) - \rho_0 = \Delta\rho \cdot (-d_{1,200}/D)^{0.25} \quad (3.4.5)$$

ここに、 $\rho(d_{1,200})$: 1,200 kg/m³, ρ_0 : 表層密度を意味する。レッド貫入量 (d_{Lead}) と底泥密度 1,200 kg/m³ 以下の底泥堆積厚 ($d_{1,200}$) の関係性を上記式(3.4.4), (3.4.5)を用いて表すと次式のとおりとなる。付録 D に式(3.4.1)から式(3.4.6)を算出する展開式を詳細に記載する。

$$d_{1,200} = 92.8 \cdot d_{Lead}^{3.48} \quad (3.4.6)$$

レッド貫入量と底泥密度 1,200 kg/m³ 以下の底泥堆積厚の関係を、実測値および式(3.4.6)を用いて図-3.4.1 に示す。実測値データは、レッド貫入量 (d_{Lead}) の増加に伴い、底泥密度 1,200 kg/m³ 以下の底泥堆積厚 ($d_{1,200}$) も増加し、式(3.4.6)と同様の増加傾向を示すことがわかった。

このことから、レッド貫入量、すなわち周波数 400 kHz のマルチビームによる観測海底面およびレッド停止位置を現地で測定すれば、式(3.4.6)を用いて、底泥密度 1,200 kg/m³ 位置が推計可能であると言える。実測値データは、底泥密度 1,200 kg/m³ 位置が観測された観測地点のデータ (St.T2~St.T4, St.K2, St.K6, St.N1, St.N2) を用いている。St. N1 と St. N2 のレッド貫入量の差は、土質性状の違いなどが影響している可能性が考えられる。図-3.4.2 は名古屋港における柱状採泥試料の含水比の鉛直分布を示す。St. N1 および St. N2 の底泥表層 (柱状採泥試料の 1 層目) の土質性状は表-3.2.3 および図-3.4.2 に示すとおり類似している。しかし、柱状採泥試料の 2 層目以降では図-3.4.2 に示すとおり St.N2 の方が含水比が低くなっている。底泥密度 1,200 kg/m³ 位置より深い水深位置での含水比の違いが影響し、レッド貫入量は St. N2 よりも St. N1 の方が大きくなっていると思われる。

図-3.4.3 は浮泥堆積域におけるマルチビームおよびレッドによる可航水深の簡便な推計手法を活用した効率的な水深管理の流れを示す。まず、マルチビームによる音響測量 (h_{400}) と共にレッドによる測深 (h_{Lead}) を実施する。次に、可航水深における海底面の基準とし

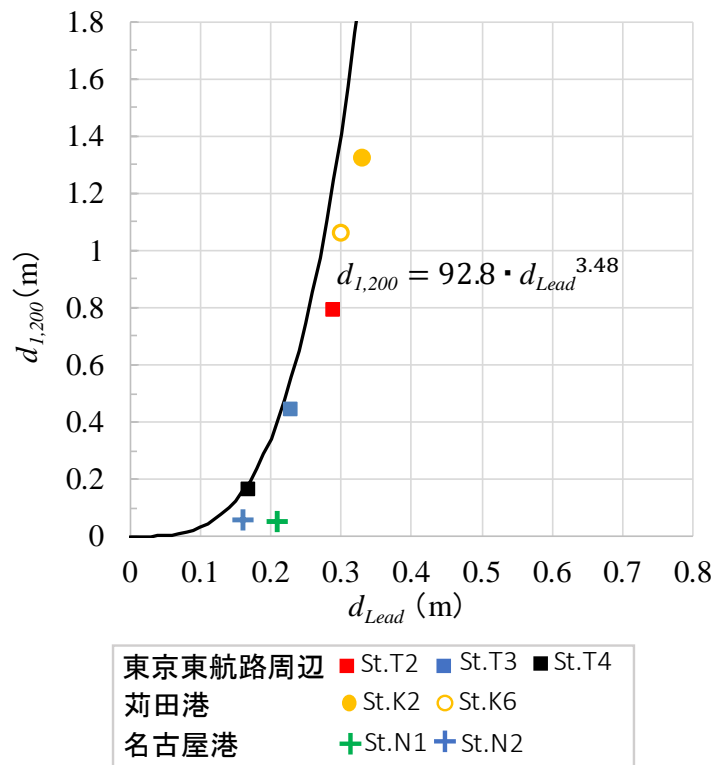


図-3.4.1 レッドの貫入量 (d_{Lead}) と底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 以下の底泥堆積厚 ($d_{1,200}$) の関係

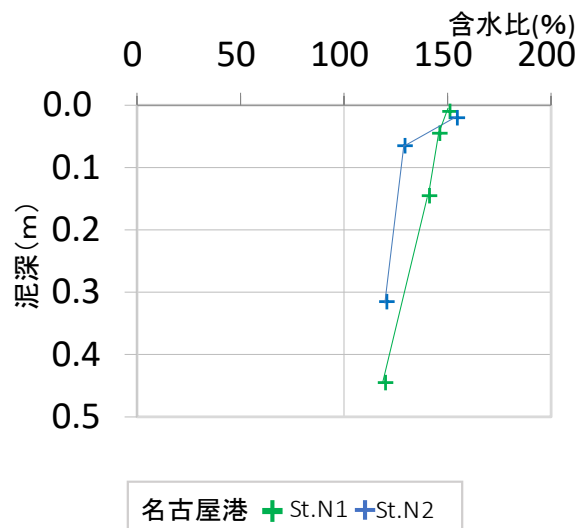


図-3.4.2 名古屋港における柱状採泥試料の含水比の鉛直分布

て底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ が採用されている場合、式(3.4.6)を用いて、底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 以下の底泥堆積厚 ($d_{1,200}$) を推計する。そして、マルチビームによる測深結果 (h_{400}) に底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 以下の底泥堆積厚 ($d_{1,200}$) を加算することで、底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 位置 ($h_{\rho(1200)}$) を推計することができる。この推計結果を設計水深 (h_d) と比較して浚渫の必要性を判断することが可能となる。ただし、本提案手法は、例えば浚渫後に泥が再堆積した海域など、周波数 400 kHz のマルチビームによる観測海底面から底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 位置までの間に泥層が存在する環境を前提としている。砂層や岩盤層がある場合、レッドの貫入はそれら層の上面で終了する。そのため、式(3.4.6)を用いて底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 位置を推計するには海底のおおよその土質性状を把握する必要がある。

また、図-3.4.1 に示すようにレッド貫入量が 0.2 m より大きくなる場合、実測値データと式(3.4.6)による底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 以下の底泥堆積厚 ($d_{1,200}$) は乖離が大きくなる。レッド貫入量が 0.2 m 以上となる場合、底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 以下の底泥堆積厚 ($d_{1,200}$) は 0.4 m 以上となると判断し、底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 以下の底泥が堆積する判断の目安に活用することが適切であると考えられる。さらに、本研究で用いたレッドは、付録 A に示すように浮泥層調査³⁻¹⁾のための比較的軽いレッドではあるが、一定の重量を有する物体である。レッドの停止位置が底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ よりも浅くなることを考えると、対象海域の底泥の物性を調査し可航水深を定める底泥密度の基準値を別途検討する必要がある。

本提案手法を活用して可航水深を推計することで、船舶の航行制限や維持浚渫の増大などの障害を大幅に軽減することができるようになる。荇田港の港湾計画書(令和3年1月)で図-3.2.2 に示す本航路の計画水深は 13.0 m とされている。本航路内に位置する St.K3, St.K4 および St.K5 のマルチビームの測深結果は図-3.2.11 に示すように $12.2 \sim 12.5 \text{ m}$ であり、この計画水深より浅くなっている。一方で、これら観測地点の水深 13.0 m の密度計に

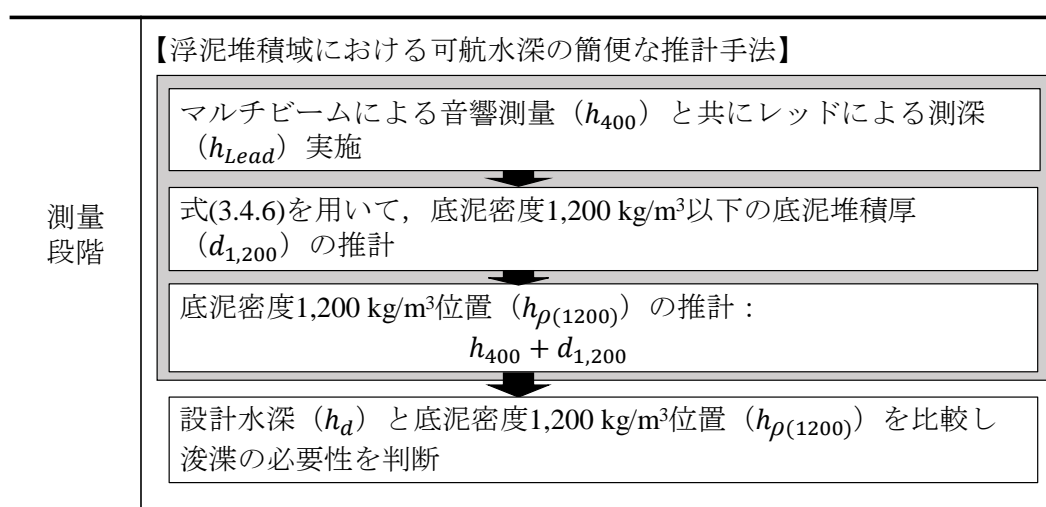


図-3.4.3 浮泥堆積域におけるマルチビームおよびレッドによる可航水深の簡便な推計手法を活用した効率的な水深管理の流れ

よる測定結果はいずれも底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 以下となっている。仮に本航路全域の水深 13.0 m の底泥密度が St.K3 などと同様に底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 以下である場合、可航水深による水深管理を実施すると計画水深を確保するための浚渫工事自体が不要となる。

3.4.2 提案手法の妥当性検証

3.4.1 で提案した推計手法が、底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 以外の密度位置でも活用可能であり、一定の妥当性を有していることを評価するため、底泥密度 $1,150 \text{ kg/m}^3$ の場合のレッドの貫入量 (d_{Lead}) と底泥密度 $1,150 \text{ kg/m}^3$ 以下の底泥堆積厚の関係を図-3.4.4 に示す。なお、底泥密度 $1,150 \text{ kg/m}^3$ はゼーブブルージュ港で可航水深による海底面として以前定義されていた値である。すると、3.4.1 の場合と同様に、実測値データは St.K1 地点を除いて、レッド貫入量の増加に伴い、底泥密度 $1,150 \text{ kg/m}^3$ 以下の底泥堆積厚も増加し、底泥密度 $1,150 \text{ kg/m}^3$ の場合の算出式 ($d_{1,200} = 25.2 \cdot d_{Lead}^{3.48}$) と同様の増加傾向を示すことがわかった。つまり、レッド貫入量、すなわち周波数 400 kHz のマルチビームによる観測海底面およびレッド停止位置を現地で測定すれば各底泥密度に対応した算定式を用い、各底泥密度位置を推計できることが示された。St.K1 地点は表-3.2.3 に示すとおり、堆積物表層の中央粒径が $26.2 \mu\text{m}$ であり、東京東航路周辺海域や名古屋港の他地点の中央粒径と比較して約 3 倍大きく、また砂分の割合も 30 %を超えている。

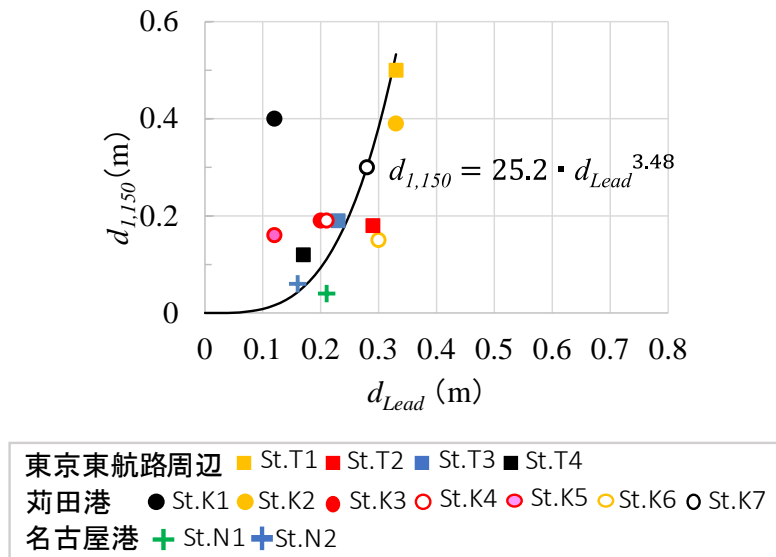


図-3.4.4 レッドの貫入量 (d_{Lead}) と底泥密度 $1,150 \text{ kg/m}^3$ 以下の底泥堆積厚 ($d_{1,150}$) の関係

3.4.3 浮泥堆積域におけるマルチビームおよびレッドによる可航水深の簡便な推計手法の適用

(1) 可航水深の簡便な推計手法の適用可能な海域

3.4.1 で提案した推計手法が、いずれの海域で適用可能か評価するため、本研究対象海域と他の浮泥堆積域の土質性状を既存文献と本現地観測での柱状採泥結果を用いて比較した。具体的には、既存文献^{3-8), 3-9), 3-15)}と本現地観測での柱状採泥結果から把握可能な含水比と含泥率（シルトと粘土の割合）の鉛直分布を比較した。

本現地観測対象海域の土質性状を図-3.4.5～図-3.4.7 に示す。底泥表層の土質性状は3.2.4 でも示したように、東京東航路周辺海域および荻田港の観測地点では含水比 200%以上の値を示しており、名古屋港の観測地点では含水比 150%程度の値を示している。図-3.4.5～図-3.4.7 に示すように、底泥の泥深が大きくなるに伴い、東京東航路周辺海域と荻田港の観測地点の含水比は小さくなるが、泥深 0.3m 付近でも 150%以上である。また、含泥率は荻田港の一部観測地点の底泥表層を除き、いずれの観測地点でも 90%以上の値を示している。

次に既存文献で調査されている熊本港、新潟港および東京湾羽田沖の土質性状を図-3.4.8 に示す。底泥表層の含水比は本現地観測対象海域の東京東航路周辺海域および荻田港と同様に 200%以上の値を示している。また、底泥の泥深 0.3m 付近でも 150%～200%の値を示している。さらに、含泥率は本現地観測対象海域と同様にいずれの観測地点でも 90%以上の値を示している。

本現地観測と既存文献の対象海域における含水比と含泥率の鉛直分布は類似した傾向を示している。この類似する傾向から、3.4.1 で提案した推計手法は本現地観測対象海域である東京東航路周辺海域、荻田港および名古屋港の他、熊本港、新潟港および東京湾羽田沖の浮泥堆積域でも活用できる可能性を十分有すると考える。

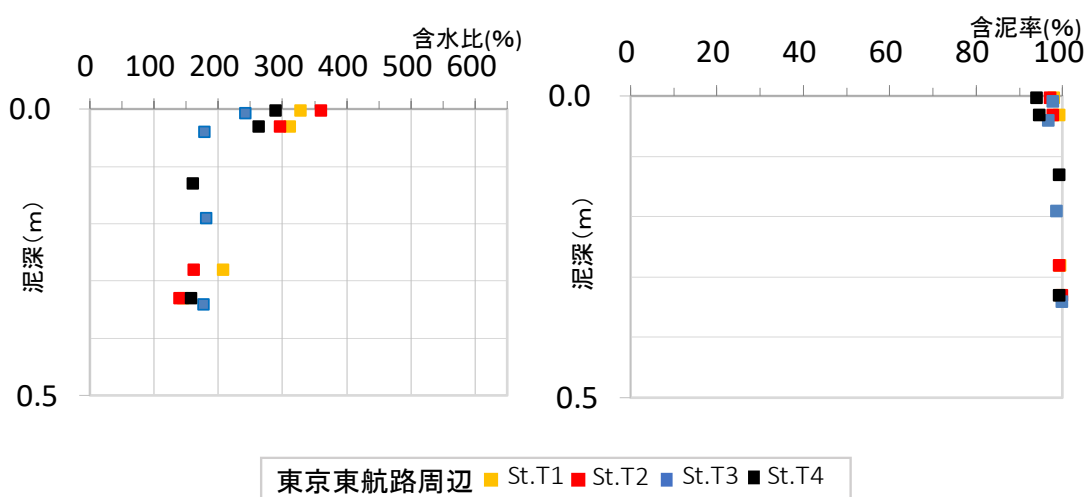


図-3.4.5 東京東航路周辺海域における含水比および含泥率

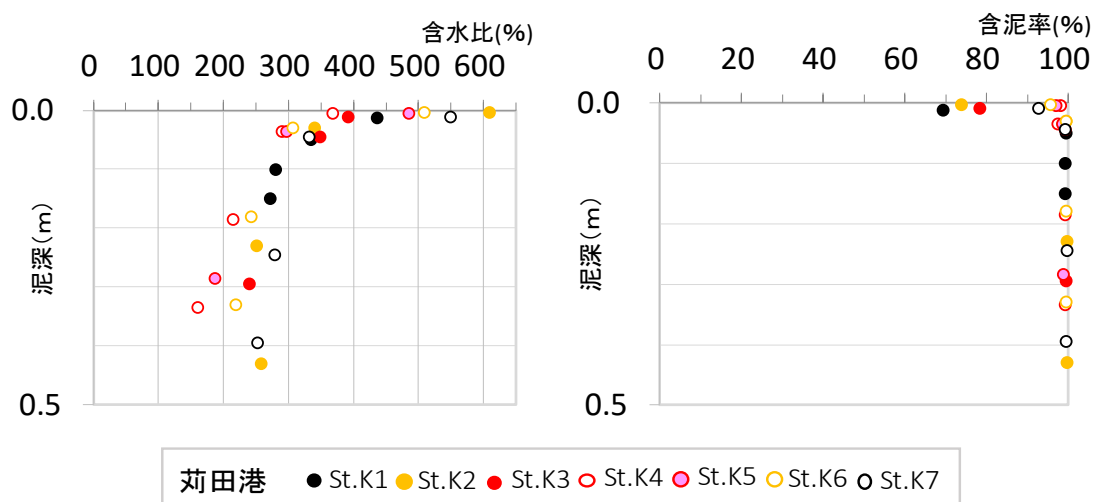


図-3.4.6 荻田港における含水比および含泥率



図-3.4.7 名古屋港における含水比および含泥率

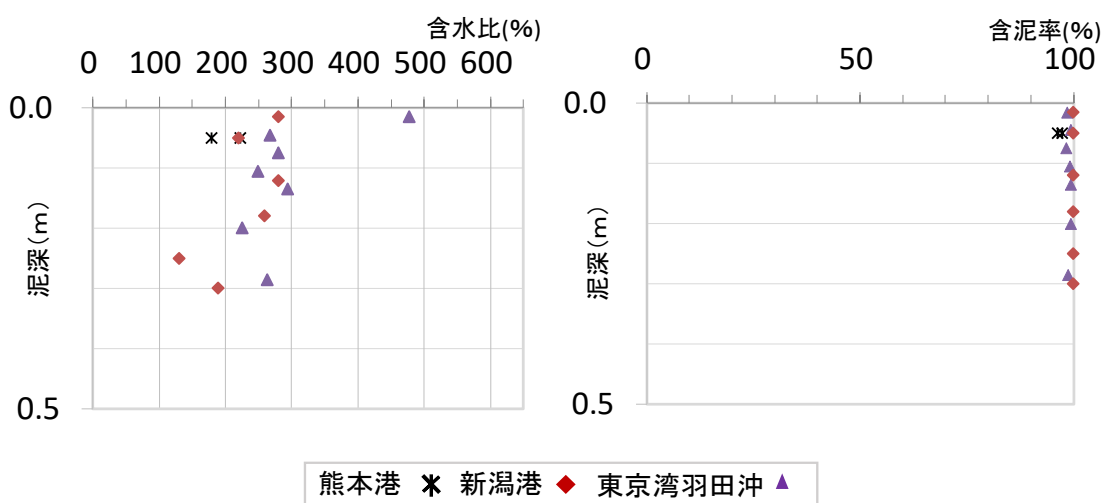


図-3.4.8 熊本港，新潟港および東京湾羽田沖の含水比および含泥率³⁻⁸⁾，³⁻⁹⁾，³⁻¹⁵⁾より作成

(2) 可航水深の簡便な推計手法の測定距離間隔

3.4.1 で提案した推計手法を実際に活用する際どれくらいの測定距離間隔で実施すればよいか把握するため、底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 位置が観測された観測地点のデータ (St.T2~St.T4, St.K2, St.K6, St.N1, St.N2) のマルチビーム測深結果および底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 位置を用いて評価した。まず、マルチビーム測深結果が同一の場合として、荇田港の観測地点のうち、St.K2 地点と St.K6 地点 (両地点間の距離 160 m) に着目すると、両地点のマルチビーム測深結果の差は 0.1 m 以下 (St.K2 13.0 m, St.K6 12.9 m) にも関わらず、両地点の底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 位置の差は 0.3 m 以上 (St.K2 14.3 m, St.K6 14.0 m) 生じている。すなわち、現在の我が国における水深管理に基づくと両地点の水深はおおよそ同水深と評価されるが、可航水深による水深管理を行った場合には両地点の水深差は 0.3 m 以上生じることを示している。このことから、マルチビーム測深結果が同一であったとしても、150m 程度の測定間隔で可航水深の簡便な推計手法を少なくとも実施する必要があると考える。

次にマルチビーム測深結果が同一ではなく、海底面が平坦ではない区域においては、観測地点毎の底泥堆積分布が異なる可能性が考えられる。そのため、上記のマルチビーム測深結果が同一の場合の測定間隔よりもさらに細かな測定距離間隔で可航水深の簡便な推計を実施する必要があると考える。

(3) 可航水深の簡便な推計手法の測定頻度

底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 以下の底泥の堆積分布は時空間的な非定常性が大きく、航路および泊地の定期点検診断などでマルチビーム測深結果に変化がみられる場合には、底泥の鉛直分布や底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 位置も変化が生じている可能性が考えられる。そのため、マルチビーム測深結果の変化が確認された場合には可航水深の簡便な推計を実施し、底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 位置を推計することがよいと考える。

3.5 本章のまとめ

東京東航路周辺海域，荻田港および名古屋港における現地観測結果から，下記のことがわかった．

- ・ 周波数 400 kHz のマルチビームによる測深結果と底泥密度 1,200 kg/m³ 位置の差について，東京東航路周辺海域では最大 0.79 m，最小 0.16 m（平均 0.46 m），荻田港では最大 1.32 m，最小 1.06 m（平均 1.19 m），名古屋港では 0.06 m および 0.05 m の差が生じている．
- ・ 周波数 400 kHz と 200 kHz による測深結果の差はいずれの観測地点でも 0.1 m 未満であり，底泥密度の増分が大きくなるに伴い，減少する傾向がみられる．
- ・ 周波数 400 kHz のマルチビームとレッドによる測深結果の差は，底泥密度の増分が大きくなるに伴い，減少する傾向がみられる．

また，これらの分析結果から，周波数 400 kHz のマルチビームとレッドによる測深結果を用いて，底泥密度 1,200 kg/m³ 位置を簡便に推計する手法を提案した．本提案手法を活用すれば，密度測定を別途行わずに，現在 ICT 浚渫工の深浅測量で一般的に用いられている周波数 400 kHz のマルチビームとレッドを用いて，より簡便に底泥密度 1,200 kg/m³ 位置が推計可能となる．またガンマ線による測定時に必要な防護対策も不要となる．そのため，底泥の堆積が著しく，頻繁に点検診断を実施している海域など，より効率的な水深管理を必要とする海域では，本提案手法はより有効であると考ええる．

ただし，限られた測定データや前提条件を基にした検討に留まることから，定量的な推定精度の検証を拡充する必要がある．台風による波浪外力による底泥の巻上げや浚渫などにより底泥が攪乱されている状況においては，観測対象とした底泥表層の堆積構造とは異なる可能性がある．また，レッドによる測深方法に関して，本研究では測定誤差を抑制するため反射板を設置したレッドを用いている．反射板を設置せずにレッド測深した場合，索が海流で流されることで測定誤差が生じうる．さらに，レッドの形状や重量が本研究で用いたものと異なる場合や測定対象とする海域の水深が浅い場合，レッドの貫入量が本研究で用いたレッドによる場合と異なることがある．本提案手法を活用するにあたって，観測方法や観測条件に留意する必要がある．また，さらに効率的な水深管理が可能となるよう，低周波数の音波の活用を含めて複数の周波数を用いた音響測深による可航水深の測定も検討していく必要がある．

第4章 浮泥堆積域における浚渫後の可航水深の予測手法の提案

4.1 名古屋港、荇田港および東京西航路周辺海域での現地観測

4.1.1 ICT浚渫工の工事实施区域を対象とした観測地点および測定項目

浚渫工事中の海水中のSS濃度の鉛直分布と音響測深による測深結果の対応関係や、浚渫工事に伴う底泥密度の鉛直分布の出現特性を把握するため、名古屋港（図-4.1.1、観測日：2021年1月25日～28日、2月1日）、荇田港（図-4.1.2、観測日：2022年1月11日～13日）および東京西航路周辺海域（図-4.1.3、観測日：2022年10月23日～26日）において現地観測を実施した。

対象海域の選定に際しては、第3章の知見などから浮泥が一定程度堆積していることが想定される海域を抽出し、ICT浚渫工の施工現場で使用されることが多いグラブ浚渫船による浚渫が行われている区域を観測対象とした。今回の施工現場では、浚渫時の濁りを通常のグラブに比べて半分以下に抑制できる密閉型グラブ⁴⁾がいずれの施工現場においても使用されている。グラブ容量は12～27 m³で日本に存在する密閉型グラブの平均値10.6 m³（図-4.1.4、現有作業船一覧⁴⁾より算出）より大きいものであった。なお、密閉型グラブの使用は、例えば荇田港の浚渫工事では工事の特記仕様書内で施工条件として記載されている。

また、海象や浚渫工事の進捗状況の観測作業への影響を考慮し、約50m四方の範囲を観測エリアとし、このエリア内で観測を実施した。まず、浚渫前の底泥密度の鉛直分布を把握するため、観測エリア内で浚渫が行われる前日に観測対象海域でそれぞれ1回深浅測量などを行った。浚渫後の観測は、名古屋港および荇田港では初期浚渫後（荒掘り）に、初期浚渫と仕上げ浚渫を同日中に行っている東京西航路周辺海域では仕上げ浚渫後に実施した。初期

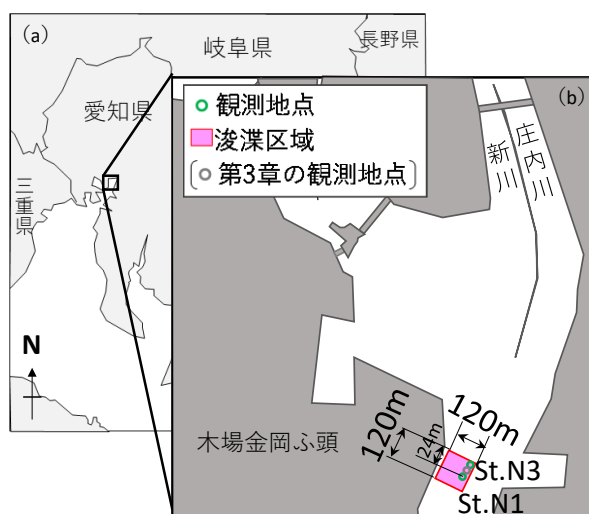


図-4.1.1 名古屋港における観測対象海域 ((a)名古屋港の位置, (b)観測地点)

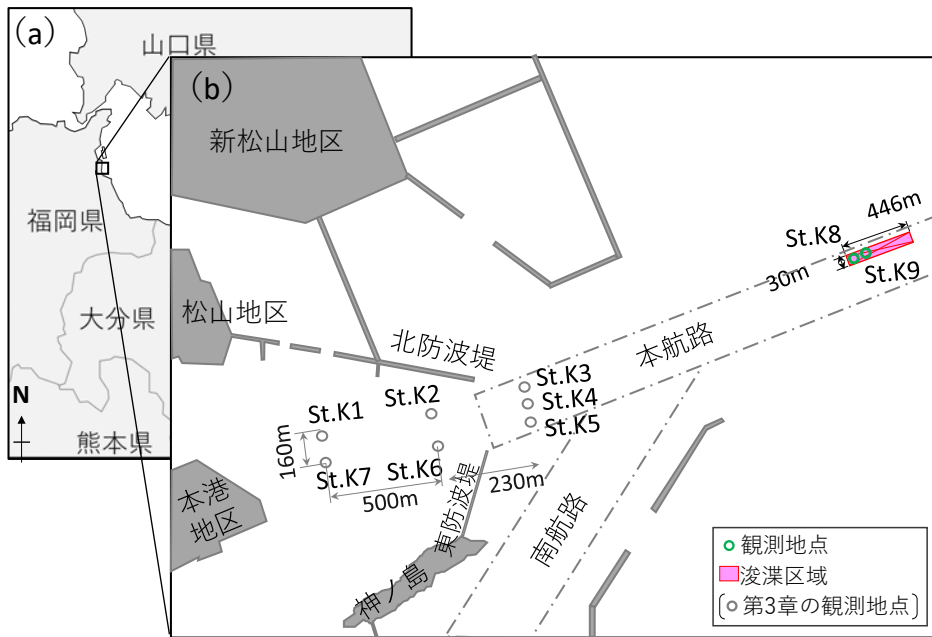


図-4.1.2 荇田港における観測対象海域 ((a)荇田港の位置, (b)観測地点)

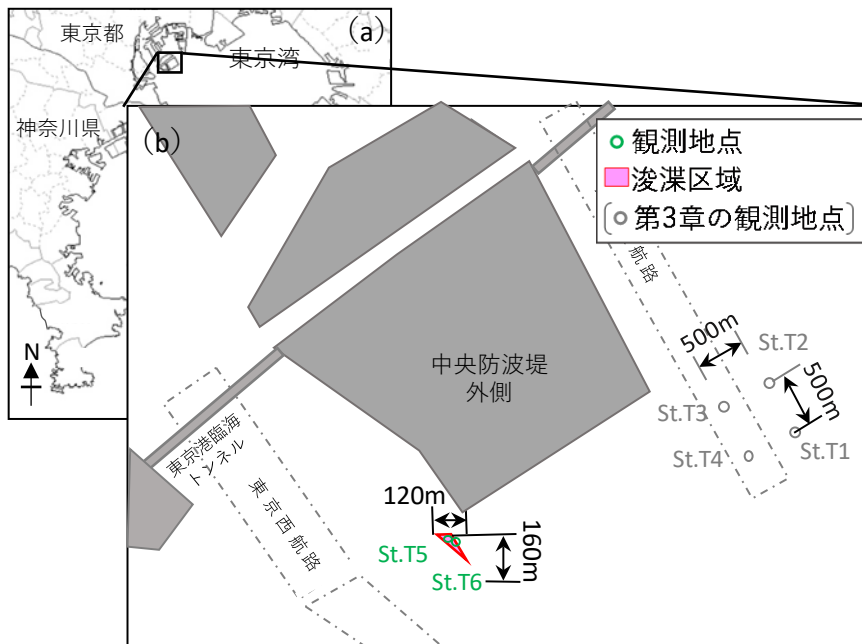


図-4.1.3 東京湾における観測対象海域 ((a)東京湾内での観測海域, (b)観測地点)

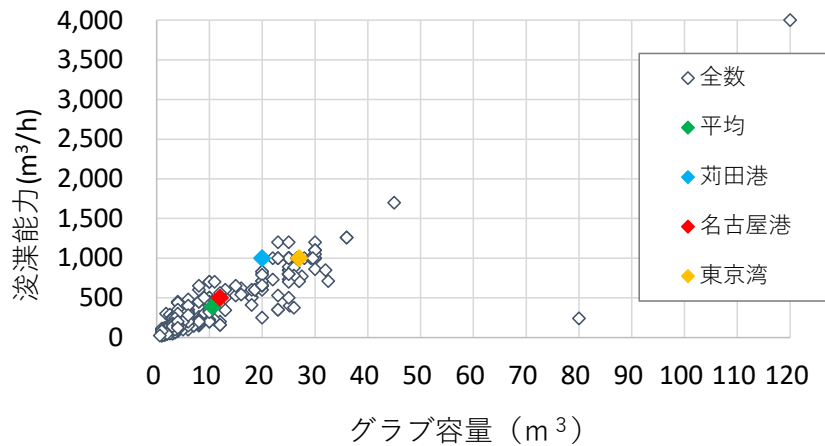


図-4.1.4 観測対象海域におけるグラブ浚渫船のグラブ容量⁴⁻²⁾より作成

浚渫後または仕上げ浚渫後の観測は、浚渫工事の進捗状況や海象条件を考慮して、現場で安全かつ安定した観測が可能な時期を選択し、各時期1回ずつ実施した。なお、浚渫工事の一般的な掘削順序は、初期浚渫にて掘り下げ、仕上げ浚渫にて掘削に伴う海底面の凹凸が少なくなるように施工する。

深浅測量では、マルチビーム（周波数：400 kHz，R2SONIC社製 Sonic2024）およびシングルビーム（周波数：200 kHz，千本電機製 PDR-1300）による音響測深ならびにレッド（底面反力⁴⁻³⁾：0.0239 kg/cm²）による測深を実施した。マルチビームの測深データは、第3章と同様に測深直下の値を基本的に使用した。ただし、浚渫直後の測深データは、浚渫船が観測地点の海面上に停船中であるため、マルチビームのスワス角を120°に広げることで取得した値を使用した。図-4.1.5は浚渫直後にマルチビーム測深する際の測量船と浚渫箇所的位置関係を示す。

底泥密度測定では第3章と同様に現地式密度計⁴⁻⁴⁾（Hydramotion社製 MudBug）による底泥密度の鉛直分布測定を行った。船上から海底付近まで徐々に降下させ、密度計の自重ではそれ以上沈降不可な地点までの密度を測定し、堆積物表層での密度分布データを活用した。底泥密度 1,200 kg/m³位置は現地式密度計によって測定された密度が 1,200 kg/m³を横切る上下の内挿（直線）補間により求めた。

SS濃度測定では、多項目水質計（図-4.1.6，JFEアドバンテック株式会社製AAQ-RINKO）による濁度計測の結果から、後述するキャリブレーションを通じて、その鉛直分布を求めるものとした。この水質計は、懸濁粒子によって散乱する光の強度を測定するもので、濁度と水深を約0.2秒間隔で測定・記録することが可能である。また、濁度の測定範囲は0～1,000FTU、測定精度は0.3FTUである。底泥密度測定と同様に船上から海底付近まで徐々に降下させながら濁度を測定し、海水面から堆積物表層までの濁度の鉛直分布データを活用した。測定された濁度（FTU：ホルマジン濁度）をSS濃度へ換算するため、水試料も併せて採取した。採水試料のSS濃度分析結果と同一試料に対する濁度計測結果の相関関係から回帰直線を求め

ることにより、濁度値をSS濃度へ換算した。また、観測地点の周辺で浚渫が行われていた場合など、周辺からの移流の影響を把握するため、電磁流速計（図-4.1.6, JFEアドバンテック株式会社製AEM213-D）による流速測定を海底面上0.5 mの水深で行った。

さらに、底泥の土質性状を把握するため重力型自由落下式コアサンプラー（内径：7.6 cm, 長さ：100 cm, または内径：11 cm, 長さ：50 cm, 株式会社離合社製）による柱状採泥も実施した。なお、苅田港および東京西航路周辺海域では、測定時点の間隔が最短 30 分であることなどを考慮して取扱いが比較的容易な長さ 50 cm のコアサンプラー（図-4.1.6）を用いた。採取試料は、底泥表層の土質性状を詳細に把握するため、1 層目：1.0 cm 厚（試料毎の表層の起伏を考慮し、実際には 0.5 cm～2.5 cm 厚）、2 層目以降：5 cm 厚にてスライスし、底泥密度、粒度特性、含水比の土質試験に供した。各測定項目を実施した観測地点の一覧を表-4.1.1 に示す。

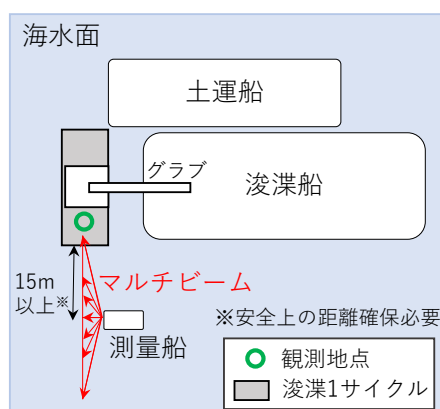


図-4.1.5 浚渫直後にマルチビーム測深する際の測量船と浚渫箇所的位置関係



図-4.1.6 多項目水質計（左）、電磁流速計（中央）、コアサンプラー（右）

表-4.1.1 測定を実施した観測時点毎の観測地点の一覧

観測時点	対象 海域	測定を実施した観測地点					
		深浅測量			SS 濃度	底泥 密度	柱状 採泥
		MB	SB	Lead			
浚渫前	名古屋	St.N1, St.N3	St.N1, St.N3	St.N1	St.N1, St.N3	St.N1, St.N3	St.N1, St.N3
	荇田	St.K8, St.K9	St.K8, St.K9	St.K8, St.K9	St.K8, St.K9	St.K8, St.K9	St.K8, St.K9
	東京	St.T5, St.T6	St.T5, St.T6	St.T5, St.T6	St.T5, St.T6	St.T5, St.T6	St.T5, St.T6
浚渫直後	荇田	St.K8	—				
	東京	St.A, St.B	—				
1 時間後	名古屋	St.N1, St.N3	St.N3	St.N1, St.N3	St.N1, St.N3	St.N1, St.N3	—
	荇田	St.K8	St.K8	St.K8	St.K8	St.K8	St.K8
2 時間後	東京	St.T5	St.T5	St.T5	St.T5	St.T5	St.T5
2.5 時間後	荇田	St.K9	St.K9	St.K9	St.K9	St.K9	St.K9
3 時間後	荇田	St.K9	St.K9	St.K9	St.K9	St.K9	St.K9
3.5 時間後	荇田	St.K9	St.K9	St.K9	St.K9	St.K9	St.K9
24 時間後	名古屋	St.N1, St.N3	St.N1, St.N3	St.N1, St.N3	St.N1, St.N3	St.N1, St.N3	St.N1, St.N3
	東京	St.T5	—	St.T5	St.T5	St.T5	St.T5
28 時間後	名古屋	St.N1, St.N3	St.N1, St.N3	St.N1, St.N3	St.N1, St.N3	—	—
5 日後	名古屋	St.N1, St.N3	St.N3	St.N1, St.N3	St.N1, St.N3	St.N1, St.N3	—
7 日後	東京	St.T6	St.T6	St.T6	St.T6	St.T6	St.T6

MB：マルチビーム測深，SB：シングルビーム測深，Lead：レッド測深，

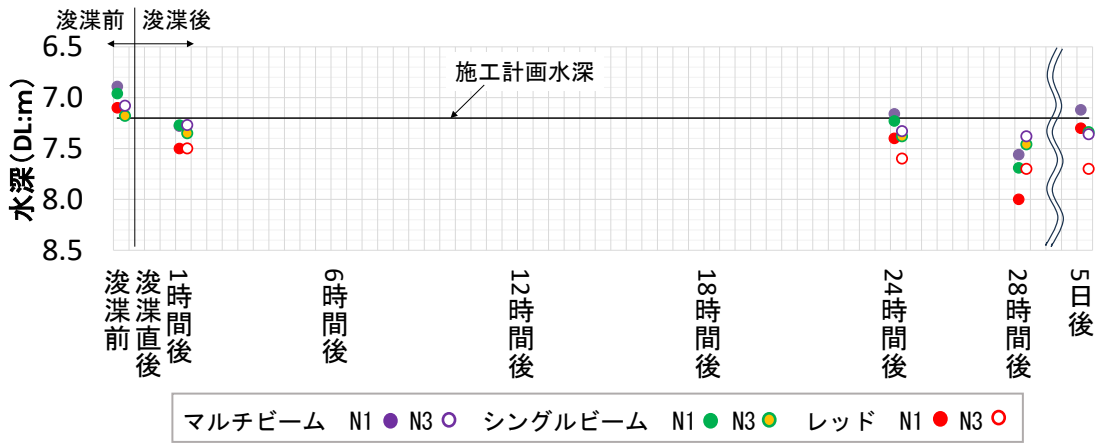
—：未実施，データ不良を意味する。

4.1.2 音響測深およびレッド測深による測深結果と施工計画水深の比較

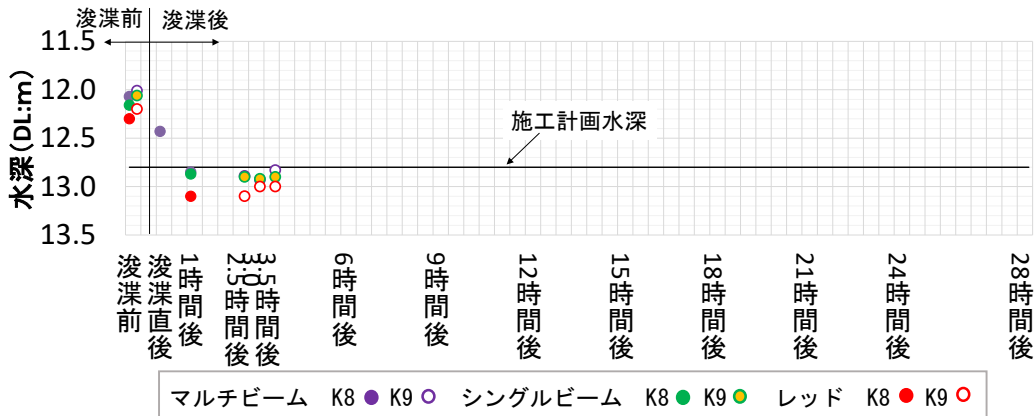
浚渫前後の音響測深およびレッドによる測深結果と施工計画水深との関係を図-4.1.7に示す。施工計画水深は施工時に浚渫の目標とする水深を意味し、施工誤差などを考慮して通常、仕上げ浚渫時は工事の特記仕様書で定められる設計水深よりも深く設定される。東京西航路周辺海域における施工計画水深は、底面余掘厚の基準値^{4,5)}などを考慮して、設計水深よりも0.5 m深く設定されている。図-4.1.7 (a) および (b) に示す名古屋港および荻田港の施工計画水深は、仕上げ浚渫時ではなく荒掘り時の水深である。

浚渫前に周波数400 kHzのマルチビームで測深された結果は、図-4.1.7に示すように施工計画水深より浅くなっている。浚渫直後のマルチビームによる測深結果は、図-4.1.7 (b) および (c) に示すように浚渫直後時点の荻田港のSt. K8地点および東京西航路周辺海域のSt. T5地点の結果ともに浚渫後にもかかわらず施工計画水深より0.37 m, 2.72 m浅くなっている。すなわち、浚渫直後は、水中の濁りの影響を受け、マルチビームによる測深結果は施工計画水深より浅く測定される場合があることを示している。第3章のアンケート調査(表-3.1.1)で工事完了直後の測深は困難である旨の意見が挙げられており、この測深結果はこの意見を定量的に示すものである。一方、東京西航路周辺海域のSt. T6地点で浚渫直後にマルチビームで測定された測深結果では、施工計画水深より深く測定されている。しかしながら、St. T6地点からわずか1 m離れた地点での測深結果は8.67 mであり、St. K8やSt. T5地点と同様に施工計画水深より浅い結果となっている。これらの違いは、浚渫直後においては、水中での高濃度な濁り水塊の形成など、空間的な非一様性が生じているためと考えられる。

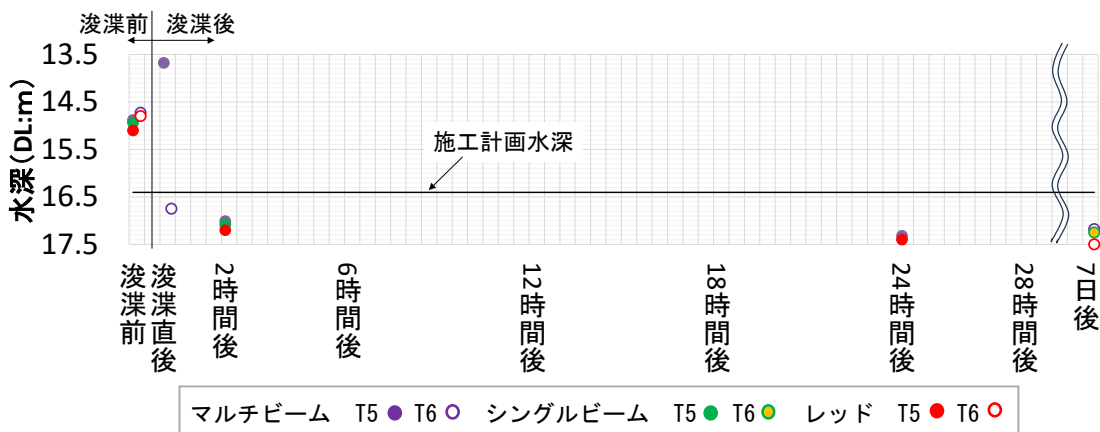
浚渫後1,2時間経過した時点以降になると、マルチビームによる測深結果はいずれも施工計画水深とおおよそ一致あるいは深い結果になっている。水中の濁りの影響を受けることなく、マルチビーム測深が実施できていることを示している。なお、浚渫後1,2時間経過した時点以降の各測深結果の差は、浚渫後の底泥の堆積沈降などが影響しているものと思われる。周波数200 kHzのシングルビームと周波数400 kHzのマルチビームによる測深結果の差はこれまでの知見と同様に0.1 m程度であり、これに対し、浚渫中の水深管理に用いられることが多いレッドによる測深結果はいずれもマルチビームによる測深結果より深くなる傾向にある。



(a) 名古屋港



(b) 荻田港



(c) 東京西航路周辺海域

図-4.1.7 名古屋港，荻田港および東京西航路周辺海域における深浅測量結果

4.1.3 SS濃度結果とマルチビームによる測深結果の関係

図-4.1.8 は水試料の濁度測定値と SS 濃度の相関関係を示す。図-4.1.8 に示す相関関係から回帰直線式である検量線を求めた。この検量線を用いて多項目水質計で測定された濁度の鉛直分布を SS 濃度の鉛直分布へ換算した。

浚渫後の濁りの鉛直分布とマルチビームによる測深結果との対応関係を調べるため、浚渫後の濁りが特に顕著に測定された名古屋港における濁度値から換算された SS 濃度の鉛直分布を図-4.1.9 に示す。まず図-4.1.9 に示すように、名古屋港の St.N1 では、マルチビームによる測深結果より浅い水深帯において、浚渫後 1 時間経過時点では最大 358 mg/l となる

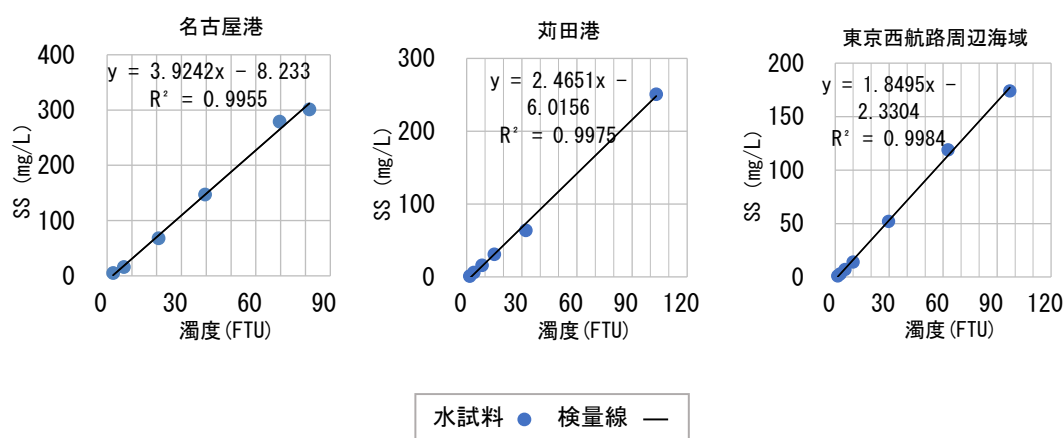


図-4.1.8 水試料の濁度測定値と SS 濃度の相関関係

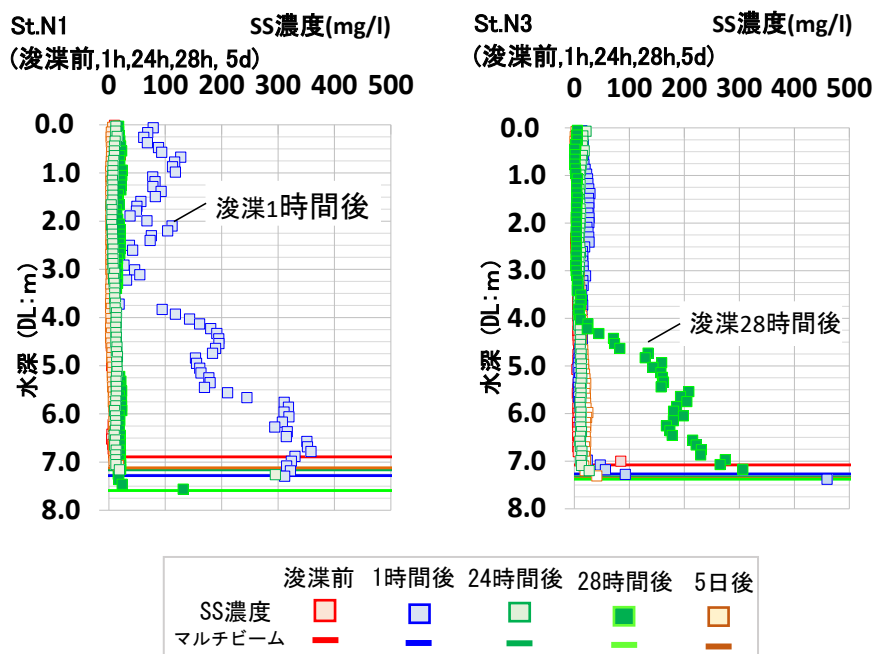


図-4.1.9 名古屋港における SS 濃度測定結果

濁度の上昇がみられる。一方、St.N3 地点では、浚渫後 28 時間経過時点の水深 4~7 m の範囲で濁度の上昇がみられ、底面近傍では 300mg/l 近くまで上昇している。しかしながら、この程度の濁度上昇であればマルチビーム測深への影響は小さく、SS 濃度が 350 mg/l 程度以下であれば、マルチビームの測定によって濁水中を海底面と識別されるようなことはないことがわかる。なお、St.N1 地点の上記 SS 濃度はマルチビームによる測深結果 (7.28 m) より約 0.5 m 浅い位置で測定されており、多項目水質計 (全長約 0.3 m) が海底に着底することで生じる底泥攪乱の影響を受けていないことが確認されている。

名古屋港の浚渫後 28 時間経過時点の St.N3 地点での SS 濃度は、浚渫後 24 時間経過時点の St.N3 地点では海水中の SS 濃度の鉛直分布に変化がほとんどみられないにもかかわらず上昇している。図-4.1.10 は、浚渫後 28 時間経過時点の St.N3 地点の SS 濃度を測定した際に浚渫工事が行われていた区域および St.N3 地点の海底面付近 (海底面上 0.5 m) の流向を示す。図-4.1.10 に示すとおり、St.N3 地点の西側で後工程の浚渫が行われており、この浚渫で攪乱された濁りが St.N3 に流れ込んできたため、浚渫後 28 時間経過時点の St.N3 地点の SS 濃度が上昇した 1 つの要因と考えられる。なお、浚渫後 24 時間経過時点の St.N3 地点の SS 濃度を測定した際 (1 月 28 日午前) には、浚渫工事は行われていなかった。

荇田港および東京西航路周辺海域における SS 濃度測定結果を図-4.1.11 および図-4.1.12 に示す。荇田港の観測地点では、水深が深くなるに伴って海水中の SS 濃度が大きくなる傾向を示している。一方で、東京西航路周辺海域の観測地点では、いずれの時点でも SS 濃度の鉛直分布の変化はほとんどみられない。各観測時点における海底面付近 (海底面上 0.5 m) の流速は名古屋港では 2.9~10.7 cm/s、荇田港では 5.5~12.4 cm/s、東京西航路周辺海域では 1.8~8.6 cm/s である。海底流速が数 cm/s オーダーでは底泥の巻き上げが生じないことが報告されている⁴⁾⁶⁾。この報告を参考にすると、底泥付近のこれらの流れがマルチビーム測深結果に及ぼす影響はほとんどないと思われる。

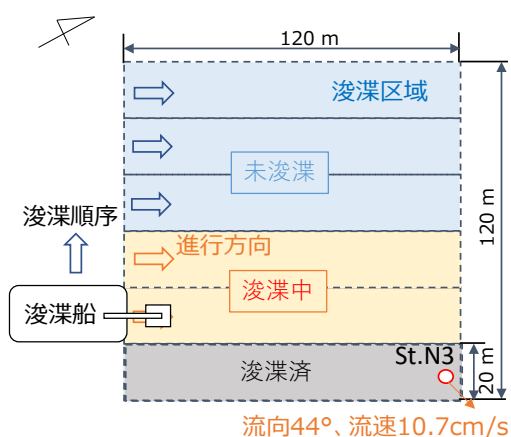


図-4.1.10 浚渫後 28 時間経過時点の St.N3 地点の SS 濃度を測定した際に浚渫工事が行われていた区域および St.N3 地点の海底面付近 (海底面上 0.5 m) の流向

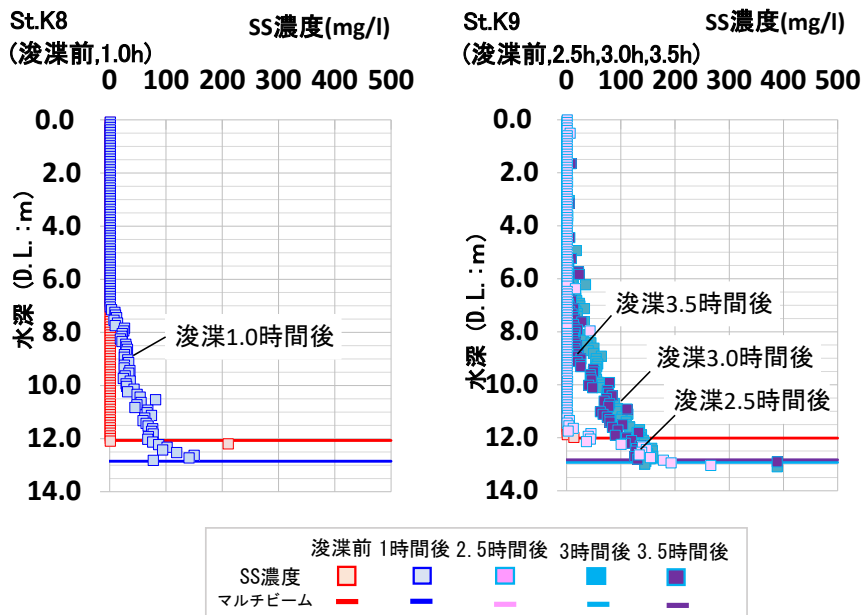


図-4.1.11 荻田港における SS 濃度測定結果

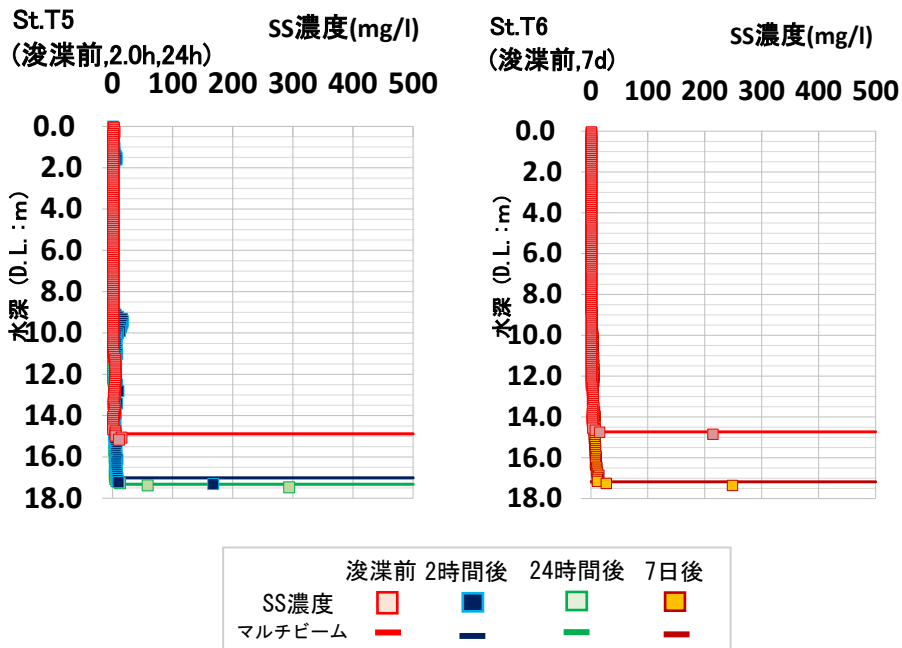


図-4.1.12 東京西航路周辺海域における SS 濃度測定結果

本観測海域で発生した濁りの程度については、例えば既存文献⁴⁻¹⁾における浚渫後のSS濃度測定事例によれば70 mg/l程度であり、本観測海域のSS濃度測定結果と比較すると、本観測海域のSS濃度測定結果の方が比較的大きなSS濃度(350 mg/l)であった。

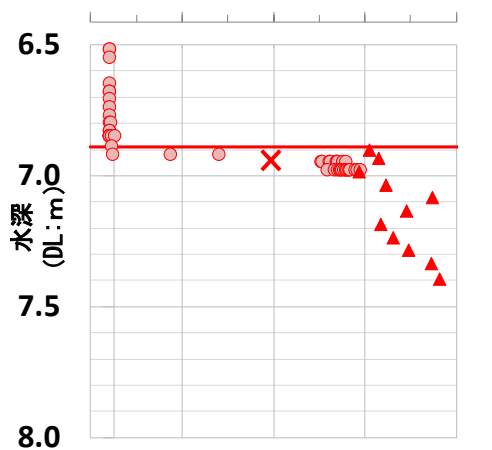
4.1.4 浚渫前後の底泥密度測定結果の比較

底泥密度を測定することによって、浚渫の前後で底泥密度の鉛直分布、特に底泥密度1,200 kg/m³位置がどのように変化するか調査するため、現地式密度計による底泥密度測定結果を図-4.1.13～図-4.1.17に示す。併せて、柱状採泥による測定結果も泥深0 m地点がマルチビームによる観測海底面、すなわち密度上昇開始点に一致すると仮定した上で同図に示す。表-4.1.2は図-4.1.13～図-4.1.17の現地式密度計による測定結果のうち、密度上昇開始点から底泥密度1,200 kg/m³位置までの鉛直距離を示す。併せて、柱状採泥結果における底泥密度1,200 kg/m³以下の底泥堆積厚も同表に示す。

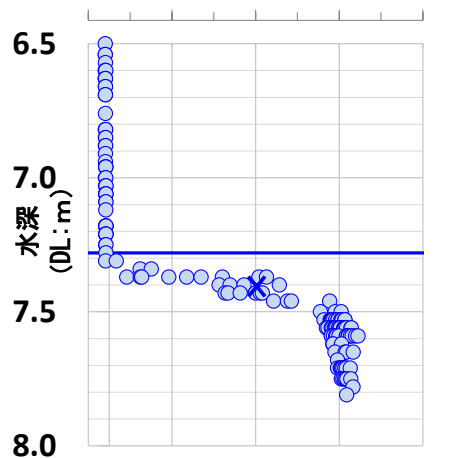
図-4.1.13～図-4.1.17および表-4.1.2より、浚渫前における密度上昇開始点から底泥密度1,200 kg/m³位置までの鉛直距離は名古屋港では0.05 mおよび0.03 m、荻田港では0.19 mおよび0.33 m、東京西航路周辺海域では0.16 mおよび0.36 mである。一方で、浚渫後のこの鉛直距離をみてみると、名古屋港では最大0.14 m、最小0.02 m(平均0.1 m)、荻田港では最大0.36 m、最小0.15 m(平均0.25 m)、東京西航路周辺海域では、最大0.44 m、最小0.18 m(平均0.29 m)である。いずれの浚渫後の観測地点でも底泥密度1,200 kg/m³以下の底泥は浚渫によって消失することはなく引き続き存在していることを示している。St.K8地点やSt.T5地点では浚渫後1,2時間経過時で底泥密度1,200 kg/m³以下の底泥が存在している。海底表面の底質に大きな流れなどの外乱が作用すると、底泥が攪乱、巻き上げられ、再堆積することがこれまで多数調査、例えば⁴⁻⁷⁾、⁴⁻⁸⁾などを通じて確認されている。浚渫後の底泥密度1,200 kg/m³以下の底泥は、掘削時のグラブ操作に伴う底泥の攪乱により、巻き上げられた土砂の再堆積により生じたものと考えられる。荻田港のSt.K9の柱状採泥による底泥密度測定結果でも、表-4.1.2(b)に示すように浚渫後に底泥密度1,200 kg/m³以下の底泥の堆積をわずかではあるが確認することができる。

第3章と同様の重力型自由落下式コアサンプラーを用いて採泥した名古屋港の浚渫前時点の測定結果は、図-4.1.13および図-4.1.14に示すように第3章と同様に現地式密度計による測定結果より高く、底泥密度1,300 kg/m³以上の値を示している。一方で荻田港および東京西航路周辺海域の浚渫前時点の柱状採泥による測定結果は、図-4.1.15～図-4.1.17に示すように底泥密度1,125～1,250 kg/m³であり、現地式密度計による測定結果と比較的類似した底泥密度範囲を示している。付録Aに第4章で用いた重力型自由落下式コアサンプラーを示す。このコアサンプラーは試料を圧縮したり壊したりせずに採取することが比較的可能であるために、現地式密度計による測定結果と類似した底泥密度範囲を採取できたものとする。

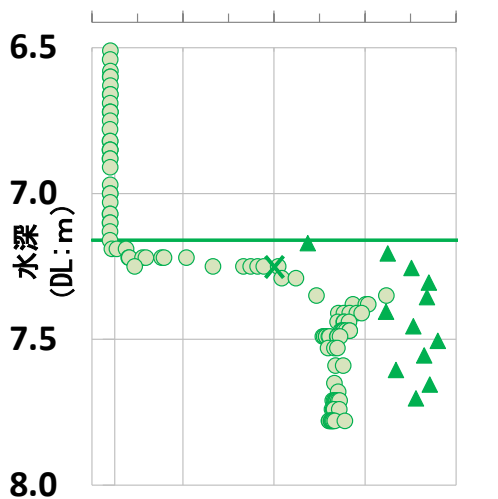
St.N1 底泥密度(kg/m³)
(浚渫前)



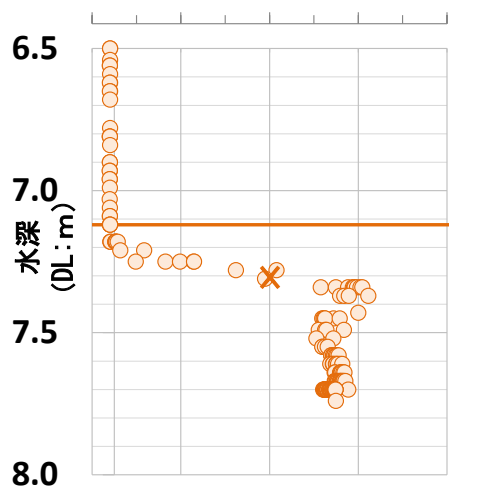
St.N1 底泥密度(kg/m³)
(1h)



St.N1 底泥密度(kg/m³)
(24h)



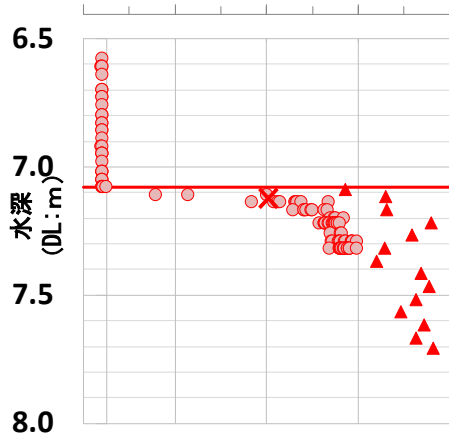
St.N1 底泥密度(kg/m³)
(5d)



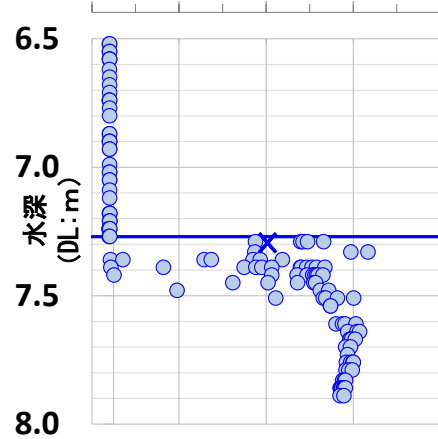
	浚渫前	1時間後	24時間後	5日後
密度計	○	○	○	○
柱状採泥	▲		▲	
マルチビーム	—	—	—	—
底泥密度 1,200 kg/m ³ 地点	×	×	×	×

図-4.1.13 名古屋港 St.N1 における浚渫前後の底泥密度測定結果

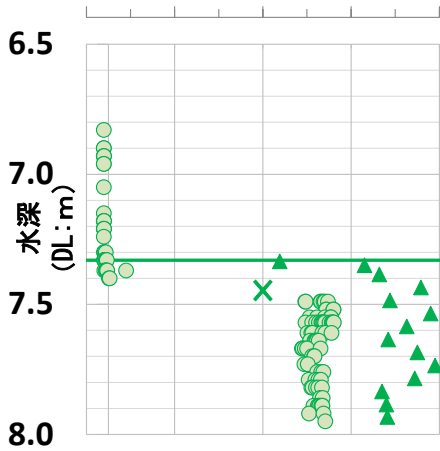
St.N3 底泥密度(kg/m³)
(浚渫前)
1000 1100 1200 1300 1400



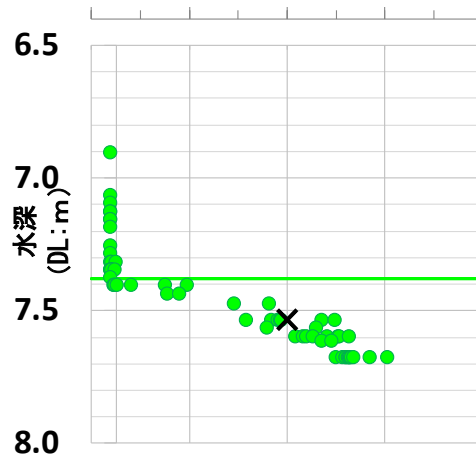
St.N3 底泥密度(kg/m³)
(1h)
1000 1100 1200 1300 1400



St.N3 底泥密度(kg/m³)
(24h)
1000 1100 1200 1300 1400



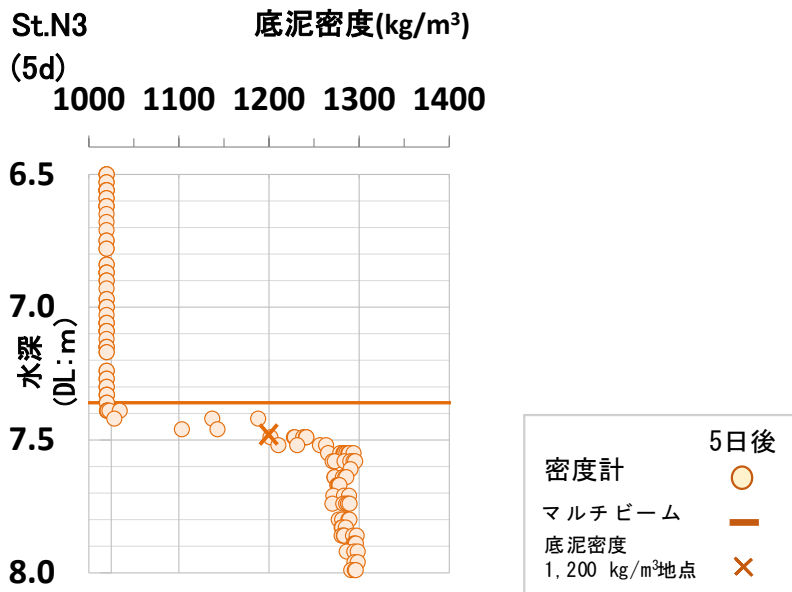
St.N3 底泥密度(kg/m³)
(28h)
1000 1100 1200 1300 1400



	浚渫前	1時間後	24時間後	28時間後
密度計	○	○	○	●
柱状採泥	▲		▲	
マルチビーム	—	—	—	—
底泥密度 1,200 kg/m ³ 地点	×	×	×	×

(a) 名古屋港 St.N3 の浚渫前、浚渫後 1 時間、24 時間及び 28 時間経過時点

図-4.1.14 名古屋港 St.N3 における浚渫前後の底泥密度測定結果



(b) 名古屋港の浚渫後5日経過時点

図-4.1.14 名古屋港 St.N3 における浚渫前後の底泥密度測定結果

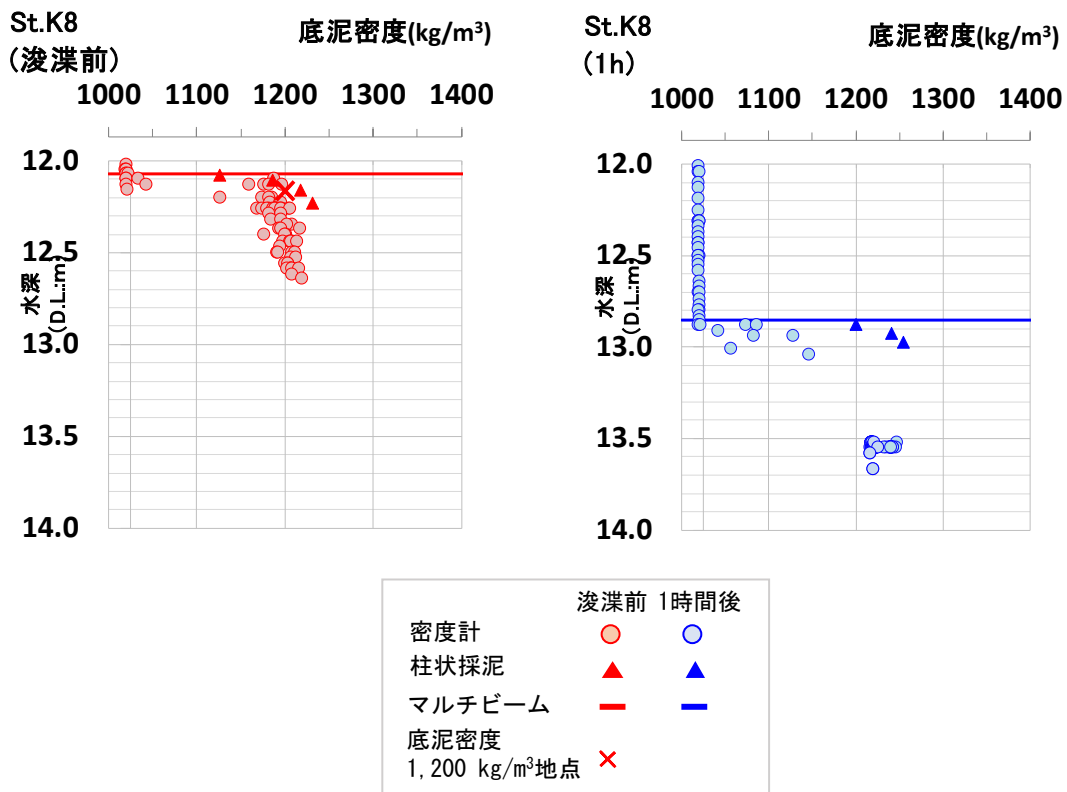


図-4.1.15 荻田港 St.K8 における浚渫前 (左) と浚渫後 (右) の底泥密度測定結果

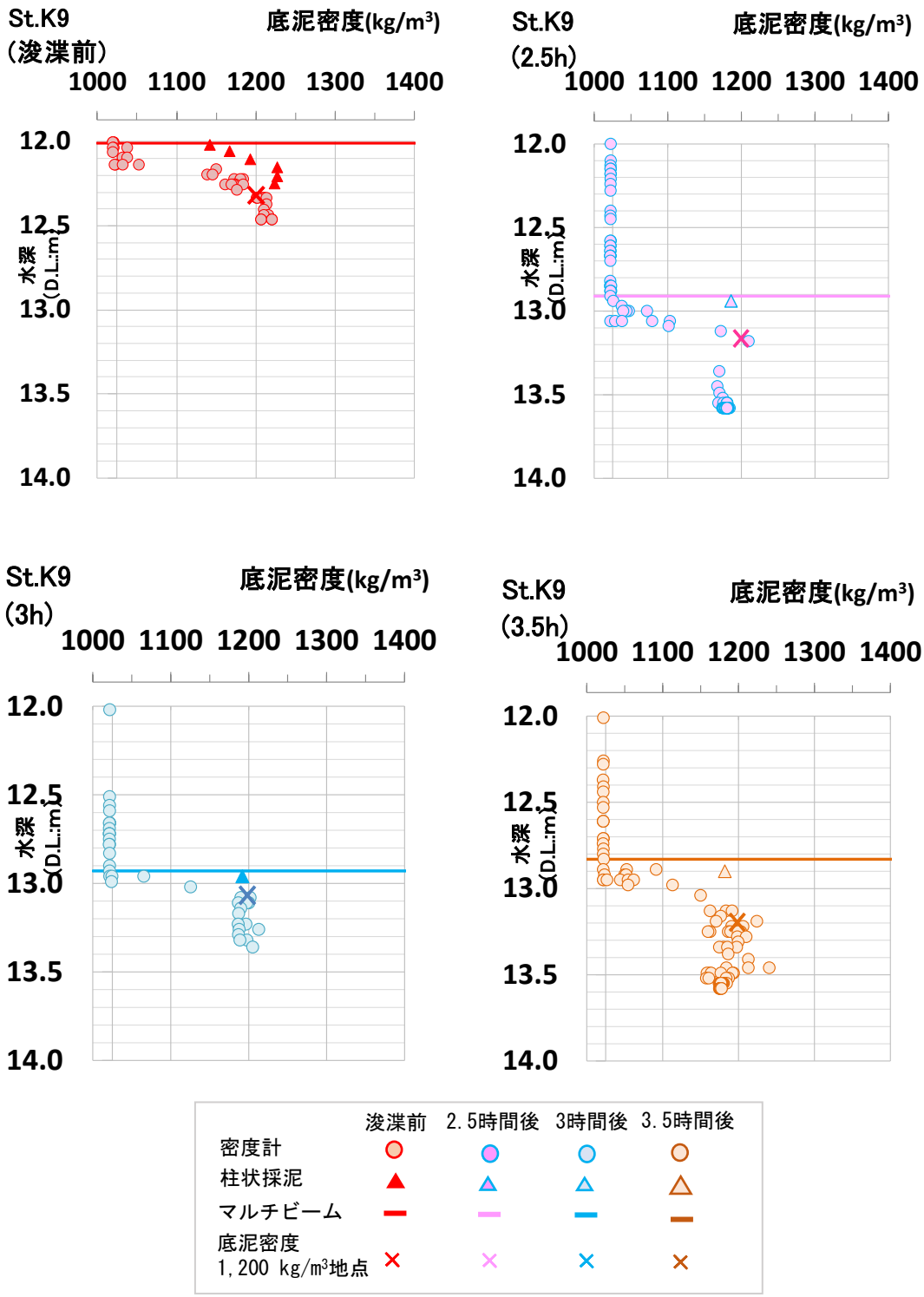
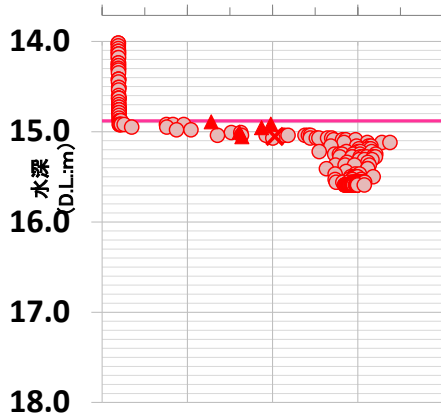
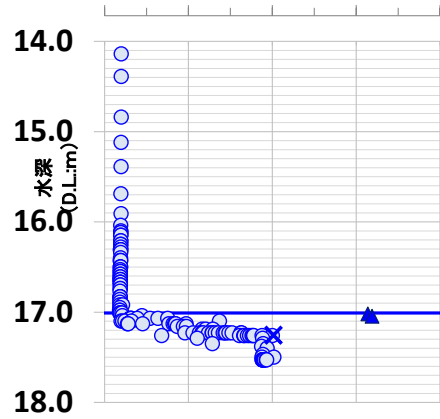


図-4.1.16 荻田港 St. K9 における浚渫前後の底泥密度測定結果

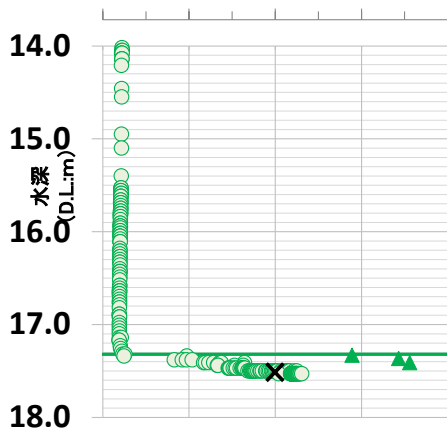
St.T5 底泥密度(kg/m³)
(浚渫前)
1000 1100 1200 1300 1400



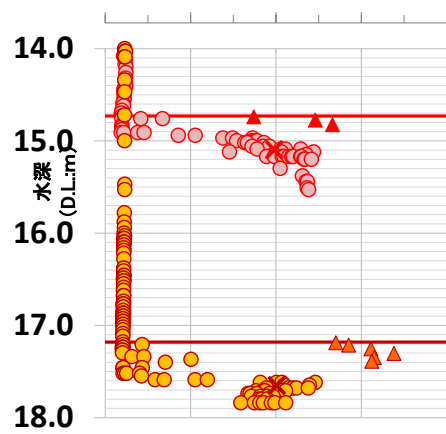
St.T5 底泥密度(kg/m³)
(2h)
1000 1100 1200 1300 1400



St.T5 底泥密度(kg/m³)
(24h)
1000 1100 1200 1300 1400



St. T6 底泥密度(kg/m³)
(浚渫前,7d)
1000 1100 1200 1300 1400



	浚渫前	2時間後	24時間後	7日後
密度計	○	○	○	○
柱状採泥	▲	▲	▲	▲
マルチビーム	—	—	—	—
底泥密度 1,200 kg/m ³ 地点	×	×	×	×

図-4.1.17 東京西航路周辺海域における浚渫前後の底泥密度測定結果

表-4.1.2 底泥の密度上昇開始点（または柱状採泥表層）～底泥密度 1,200 kg/m³ 位置の鉛直距離（または採取試料の泥深）

(a) 名古屋港

	鉛直距離または泥深 (m)									
	St.N1					St.N3				
経過時間	浚渫前	1 時間後	24 時間後	5 日後	浚渫前	1 時間後	24 時間後	28 時間後	5 日後	
密度計	0.05	0.09	0.09	0.13	0.03	0.02	0.14	0.16	0.13	
柱状採泥	0.00	-	0.00	-	0.00	-	0.00	-	-	

(b) 荻田港

	鉛直距離または泥深 (m)						
	St.K8			St.K9			
経過時間	浚渫前	1 時間後	浚渫前	2.5 時間後	3 時間後	3.5 時間後	
密度計	0.19	0.19 ^{※1}	0.33	0.25	0.15	0.36	
柱状採泥	0.06	0.03	0.11	0.03	0.03	0.02	

※1：図-4.1.15 に示すとおり，底泥密度 1,200 kg/m³ 位置前後の観測データに欠損（水深 13.1～13.5 m）があり，ここでは底泥の密度上昇開始点～底泥密度 1,200 kg/m³ 以下で観測された水深までの鉛直距離を記す。

(c) 東京西航路周辺海域

	鉛直距離または泥深 (m)				
	St.T5			St.T6	
経過時間	浚渫前	2 時間後	24 時間後	浚渫前	7 日後
密度計	0.16	0.25	0.18	0.36	0.44
柱状採泥	0.18	0.00	0.00	0.02	0.00

4.1.5 各観測地点における底泥の土質性状

底泥表層の土質性状の概況を示すため、表-4.1.3 に各観測地点および各観測時点で採取した底泥試料の1層目（試料毎の表層の起伏を考慮し、泥深0.5 cm～2.5 cmの厚さ）を対象として得られた粒度特性、含水比の土質試験結果を示す。粒度特性について、いずれの地点でもシルト・粘土分の合計が90%を超える泥質物が浚渫前後ともに存在している。含水比については、表-4.1.3 (a) に示すように名古屋港の浚渫前では150%程度であるが、浚渫後では200%以上であり浚渫前より高い値を示している。これは、表-4.1.2 で示すように浚渫後1時間経過時点から底泥密度1,200 kg/m³以下の底泥が存在することから、掘削で底泥が攪乱され、含水比の高い底泥が掘削後の底泥表層に生じたためと考える。表-4.1.3 (b) および (c) に示すように荻田港および東京西航路周辺海域の浚渫後の観測地点でも同様に含水比は200%以上であり、荻田港では270%以上の値を示している。荻田港および東京西航路

表-4.1.3 堆積物表層（1層目）の性状

(a) 名古屋港

観測時点		St.N1		St.N3	
		浚渫前	24時間後	浚渫前	24時間後
粒度特性	中央粒径 (μm)	9.1	8.4	9.5	8.9
	砂分 (%)	1.2	0.7	1.0	1.0
	シルト分 (%)	65.9	66.2	66.0	65.9
	粘土分 (%)	32.9	33.1	33.0	33.1
含水比 (%)		151.2	202.0	163.3	218.0
湿潤密度 (kg/m ³)		1,324	1,256	1,305	1,240

なお、含水比はJISA1203（土の含水比試験）を実施し、各値を算出。湿潤密度は土粒子の乾燥重量を2,600 kg/m³と仮定し、含水比をもとに各値を算出。

(b) 荻田港

観測時点		St.K8		St.K9			
		浚渫前	1時間後	浚渫前	2.5時間後	3時間後	3.5時間後
粒度特性	中央粒径 (μm)	9.1	8.4	8.4	8.5	8.5	8.0
	砂分 (%)	0.8	0.1	0.3	0.2	0.3	0.2
	シルト分 (%)	66.2	66.6	66.4	66.2	66.8	66.2
	粘土分 (%)	33.0	33.3	33.3	33.6	32.9	33.6
含水比 (%)		284.3	271.3	277.0	270.0	292.9	277.8
湿潤密度 (kg/m ³)		1,191	1,199	1,195	1,199	1,186	1,195

(c) 東京西航路周辺海域

観測時点		St.T5		St.T6	
		浚渫前	24 時間後	浚渫前	7 日後
粒度特性	中央粒径 (μm)	9.2	9.5	9.6	8.4
	砂分 (%)	2.9	1.2	1.6	0.6
	シルト分 (%)	64.3	66.2	66.2	65.8
	粘土分 (%)	32.8	32.6	32.2	33.6
含水比 (%)		348.1	202.1	345.9	212.6
湿潤密度 (kg/m^3)		1,159	1,256	1,160	1,245

周辺海域の浚渫後の含水比が浚渫前と比較して高くなっていないのは、浚渫前の底泥密度の鉛直分布や底泥表層からの浚渫深さの違いなども影響していると考えられる。

4.2 浚渫後の底泥密度の鉛直分布に及ぼす浚渫前の底泥密度および浚渫後の浮泥の沈降堆積の影響

4.2.1 浚渫後の底泥密度の鉛直分布に及ぼす浚渫前の底泥密度の影響

4.1.4の結果から、底泥密度 $1,200 \text{ kg}/\text{m}^3$ 位置よりも深い水深まで浚渫した場合、浚渫後に底泥密度 $1,200 \text{ kg}/\text{m}^3$ 以下の底泥が引き続き存在していることがわかった。そこで、浚渫前の底泥密度の違いに応じて、浚渫後の底泥密度の鉛直分布の変化の特徴を調べるため、まず浚渫前の施工計画水深の海底面（以下「施工計画水深」という。）における底泥密度の実測値がない場合（St.K9地点など）における底泥密度の鉛直分布が、既存文献⁴⁹⁾で底泥濃度分布の近似に用いられている関数を準用して表されると仮定し、式(4.2.1)による近似を試みた。

$$\rho(z) = \rho_0 + \Delta\rho \cdot (-z/D)^{0.25} \quad (4.2.1)$$

ここに、 ρ_0 ：表層密度（海水層の密度（ $1,024 \text{ kg}/\text{m}^3$ ）とする）、 z ：泥深、 $\Delta\rho$ ：任意の泥深（ D ）における表層密度からの増分を意味する。図-4.2.1における赤色の実線が式(4.2.1)を用いた現地式密度計による荻田港の St.K9 地点の浚渫前時点での測定結果（図-4.1.16）に対する近似結果を示しており、実線と測定結果の誤差が最小となるよう近似式中のパラメータ D および $\Delta\rho$ をそれぞれ設定した。なお、図-4.2.1に示す現地式密度計の結果は、同じ水深帯で測定された複数の密度測定値に対しては、それらの平均値により図示している。その上で、ここでは、特に浚渫後の底泥密度 $1,200 \text{ kg}/\text{m}^3$ 以下の底泥の堆積状況を把握するため、浚渫前の施工計画水深 h_c における海底面の底泥密度 $\rho(h_c)$ が、浚渫後の底泥密度 $1,200 \text{ kg}/\text{m}^3$ 以下の底泥の堆積厚 Δh に及ぼす影響を検討した。図-4.2.2 は、浚渫前の施工計画水深位置

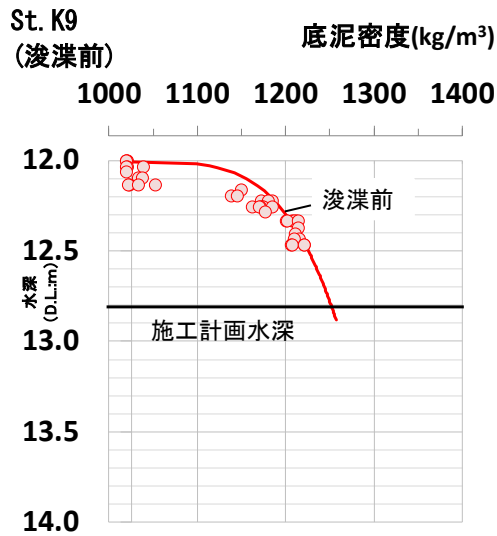


図-4.2.1 荻田港 St.K9 地点の浚渫前時点での底泥密度分布（実線：式(4.2.1)）

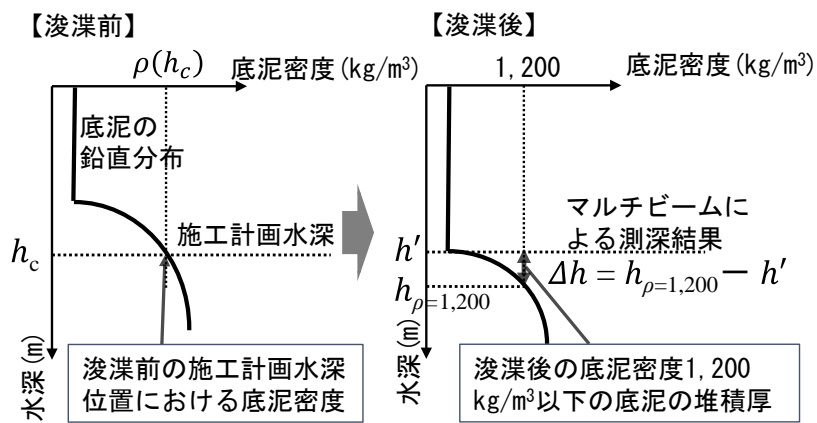


図-4.2.2 浚渫前の施工計画水深位置における底泥密度 ($\rho(h_c)$) と浚渫後の密度上昇開始点から底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ までの鉛直距離 (Δh) のイメージ

h_c における底泥密度 $\rho(h_c)$ と、浚渫後の底泥密度が上昇開始する点 h' と底泥密度が $1,200 \text{ kg/m}^3$ となる水深 $h_{\rho(1,200)}$ の差から求めた底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 以下の底泥堆積厚 Δh の定義を示している。

浚渫前の施工計画水深位置における底泥密度 $\rho(h_c)$ と浚渫後の底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 以下の底泥堆積厚 Δh の関係を図-4.2.3に示す。ここで、実測値データはSt.N1, St.N3, St.K9, St.T5 およびSt.T6のデータを用いており、底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 位置が不明瞭であった苅田港のSt.K8を除いている。図-4.2.3に示すように、浚渫前の施工計画水深位置における底泥密度 $\rho(h_c)$ が小さい地点ほど、浚渫後の底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 以下の底泥堆積厚 Δh はばらつきはあるものの、同じ港域では相対的に増加する傾向がみられる。すなわち、浚渫前の施工計画水深位置における底泥密度 $\rho(h_c)$ が小さい場合には、浚渫後の底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 以下の底泥の堆積厚が大きくなることを意味している。浚渫前の施工計画水深における底泥密度が小さくなるほど、掘削時の底泥攪乱の影響によって、巻き上げ量が多くなり、底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 以下の底泥が浚渫後に存在しやすくなると考える。

図-4.2.3に示すように、名古屋港のSt.N3地点で密度上昇開始点から底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ までの鉛直距離が 0.02 m となり、同地点の他結果と比べて小さくなる測定結果がある。これは、浚渫後1時間経過した時点の測定結果であり、図-4.1.14に示すように密度上昇開始点で急激な密度上昇がみられる。この密度上昇が密度上昇開始点から底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ までの鉛直距離が小さくなる要因となっている。また名古屋港の両地点のデータはともに東京湾のSt.T5地点と比較して、浚渫前の施工計画水深位置における底泥密度 $\rho(h_c)$ が小さいにもかかわらず、浚渫後の底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 以下の底泥堆積厚 Δh が小さくなっている。これは浚渫後の底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 以下の底泥の堆積厚が浚渫前の施工水深における海底面の底泥密度のみならず、浚渫に用いるグラブバケットの容量や浚渫回数など、掘削時の底泥の攪乱に影響を与える可能性がある他の要因が、工事ごとに異なるために生じていると思われる。グラブ容量は、図-4.1.4に示すように名古屋港、苅田港、東京湾の順に大きくなっている。観測時点までの浚渫回数は、名古屋港と苅田港では 1 回（初期浚渫）、東京西航路周辺海域では2 回（初期浚渫と仕上げ浚渫）である。ただし、浚渫後の底泥密度の鉛直分布に及ぼすそれら要因の影響を評価するためには、底泥密度の鉛直分布が同一の観測環境下で浚渫後の底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 以下の底泥の堆積厚とそれら要因との対応関係を評価する必要があり、今後の課題である。苅田港の底泥堆積厚 Δh が、浚渫前の施工計画水深位置における底泥密度 $\rho(h_c)$ が同一にもかかわらず $0.15 \sim 0.36 \text{ m}$ の範囲でばらつくのは、浚渫数時間後では、水中での高濃度な濁り水塊の形成など、空間的な非一様性が生じているためと考えられる。名古屋港および東京湾の測定結果において、浚渫数時間後の測定値（St.N1の 0.09 、St.N3の 0.02 、St.T5の 0.25 ）を除くと、浚渫前の施工計画水深位置における底泥密度 $\rho(h_c)$ が小さい地点ほど、浚渫後の底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 以下の底泥堆積厚 Δh が相対的に増加する傾向はより明確にみられる。

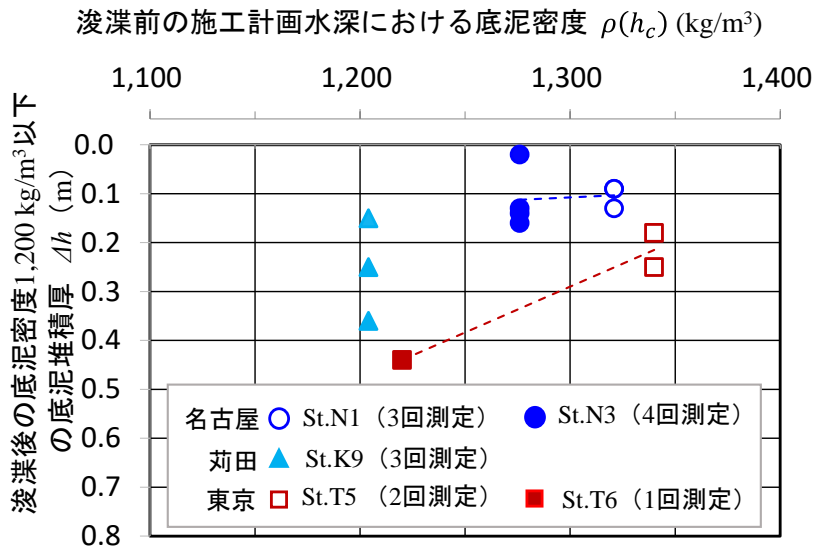


図-4.2.3 浚渫前の施工計画水深位置における底泥密度 ($\rho(h_c)$) と浚渫後の底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 以下の底泥の堆積厚 (Δh) の関係

4.2.2 浚渫後の浮泥の沈降堆積に伴う底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 位置

浚渫後の底泥密度の鉛直分布は、浚渫後の浮泥の沈降堆積過程に依存して変化するものと考えられる。図-4.2.4 は浚渫後の浮泥の沈降堆積に伴い底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 以下の底泥堆積厚が経時的に変化する過程を示す。浚渫後の浮泥の沈降堆積に伴う底泥密度分布の経時的な変化を想定することにより、浮泥沈降が進行した時点における底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 位置の推定方法について検討した。ここでは、時間 t における浚渫後の底泥密度が海水密度から上昇開始する水深を底泥界面 $h'(t)$ とし、底泥密度が $1,200 \text{ kg/m}^3$ となる水深を $h_{\rho=1,200}(t)$ とする。このとき底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 以下の浮泥層厚 $\Delta h(t)$ は、 $\Delta h(t) = h_{\rho=1,200}(t) - h'(t)$ である。

底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 以上の底泥の圧密過程を報告する既往知見は複数あるが、底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 以下の底泥の沈降過程を報告する既往知見は限られている。浚渫後の観測時点における底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 以下の浮泥層厚 $\Delta h(t)$ の情報を用いて、浮泥沈降が終了した時点 t_f で底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ となる水深を推定するため、K.BEEN ら⁴⁾¹⁰⁾が発表している円筒容器を用いた浮泥沈降実験の結果を用いる。K.BEEN らは、河口泥を原料とする初期密度 $1,140 \text{ kg/m}^3$ の懸濁液を用い、直径 10.2 cm 、高さ 200 cm の円筒容器を用いた沈降実験を行った。この実験では、試料を鉛直方向に十分攪拌した状態から、底泥粒子が沈降する過程を追跡し、X線を用いて密度分布の経時変化を計測している。K.BEEN らの実験結果から、図-4.2.5 に示すように底泥界面の容器底面からの高さ H_1 、底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 位置の高さ H_2 を読み取り、経過時点 t ごとの値を表-4.2.1 に示した。表-4.2.1 に示すように、浮泥の沈降が進行するとともに底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 以下の浮泥層厚は減少し、底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 位置が上昇するが、沈降が終了した 35 日後には浮泥層厚はほぼ 0 となっている。図-4.2.6 は 5

日経過時点の底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 以下の浮泥層厚の例を示す。沈降が進行している各時間の底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 位置と沈降がほぼ終了する 35 日における底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 位置の高さの差 $H_2(35) - H_2(t)$ をここでは残存上昇高さと呼ぶことにする。表-4.2.2 では各時間における残存上昇高さを求め、同時間の底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 以下の浮泥層厚との比である残存上昇高さ比 r を求めている。図-4.2.7 は浮泥沈降終了時点の底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 位置が 5 日経過時点の底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 以下の浮泥層内で上昇するイメージを示す。表-4.2.2 に示すように各時間の r の値は $0.41 \sim 0.45$ の狭い範囲にある。このことは沈降が終了していないときでも底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 位置と底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 以下の浮泥層厚がわかれば、浮泥層厚に r を（例えば平均 0.43 を）乗じることで、浮泥沈降がほぼ収束しつつある段階の底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 位置をおおよそ推定できることを意味する。

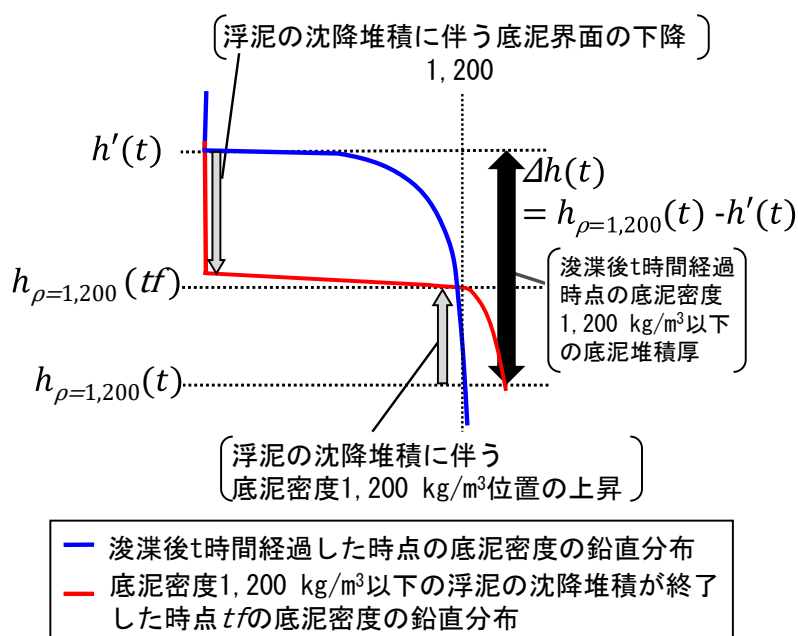


図-4.2.4 浚渫後の浮泥の沈降堆積に伴う底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 以下の底泥堆積厚の経時変化過程

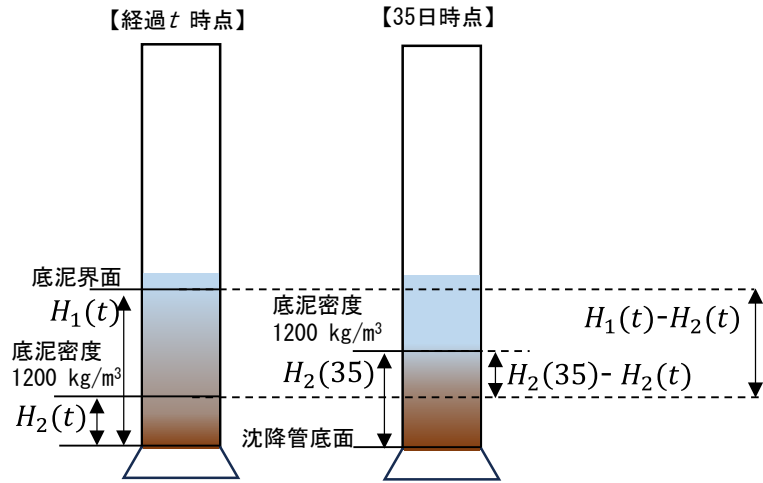


図-4.2.5 底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 位置の経過時点 t における残存上昇高さ ($H_2(35) - H_2(t)$) および底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 以下の浮泥層厚 ($H_1(t) - H_2(t)$)

表-4.2.1 浮泥沈降実験における底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 以下の浮泥層厚の経時変化
(初期密度 $1,140 \text{ kg/cm}^3$) 4-10より作成

経過時点 t (日)	0	1	4	5*	7	35
沈降円筒底面から底泥界面までの高さ $H_1(t)$ (cm)	64.3	60.0	50.0	48.1*	44.0	28.0
沈降円筒底面から底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 位置までの高さ $H_2(t)$ (cm)	0.0	3.0	9.0	11.2*	16.0	27.5
底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 以下の浮泥層厚 $H_1(t) - H_2(t)$ (cm)	64.3	57.0	41.0	36.9	28.0	0.5
初期浮泥層厚で正規化した浮泥層厚 $\{H_1(t) - H_2(t)\} / \{H_1(0) - H_2(0)\}$	1	0.89	0.64	0.57	0.44	0.00

※ 既往実験で未観測の経過時間の値はこの経過時間前後の 2 時点での内挿（直線）補間により求めた。

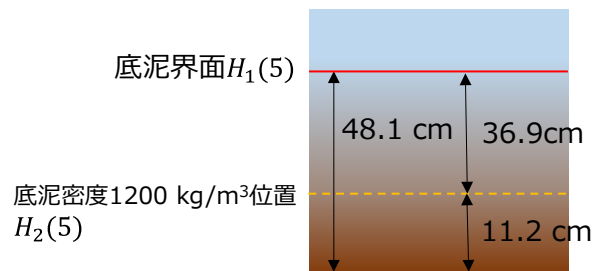


図-4.2.6 底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 以下の浮泥層厚例 (5 日経過時点) 4-10より作成

表-4.2.2 各時点における底泥密度 1,200kg/m³位置の残存上昇高さと浮泥層厚の関係
4-10)より作成

経過時点 t (日)	0	1	4	5	7	35
35 日後の底泥密度 1,200 kg/m ³ 位置の高さ $H_2(35)$ と各時間の $H_2(t)$ の差 (残存上昇高さ) $H_2(35) - H_2(t)$ (cm)	27.5	24.5	18.5	16.3	11.5	0
各時間における底泥密度 1,200 kg/m ³ 以下の浮泥層厚に対する残存上昇高さの比 r , $\{H_2(35) - H_2(t)\} / \{H_1(t) - H_2(t)\}$ ※	0.43	0.43	0.45	0.44	0.41	0

※ 35 日後の底泥密度 1,200 kg/m³ 位置の高さ $H_2(35)$ と各時間の $H_2(t)$ の差を表-4.2.1 の底泥密度 1,200 kg/m³ 以下の浮泥堆積厚で除算して算出.

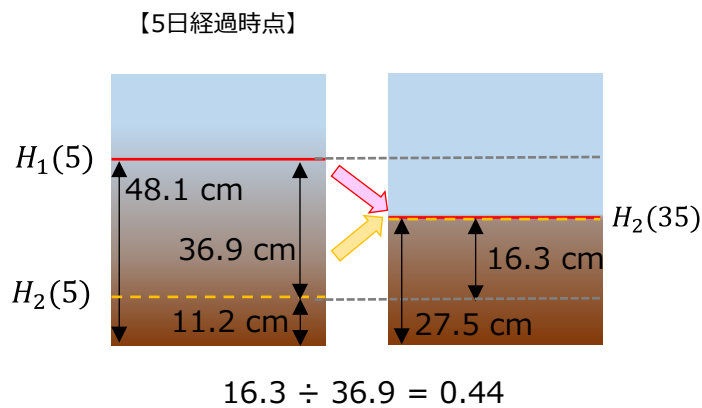


図-4.2.7 浮泥沈降終了時点の底泥密度 1,200 kg/m³ 位置が 5 日経過時点の底泥密度 1,200 kg/m³ 以下の浮泥層内で上昇するイメージ 4-10)より作成

これらを参考に、ICT 浚渫工現場での実際の活用を想定して、浚渫後の底泥密度の鉛直分布の変化を推定するため、名古屋港および東京西航路周辺海域の観測結果を用いて以下の検討を行った。まず、浚渫後 5 日経過後の測定結果の少なさを補うために両海域の測定値から浚渫後 5 日経過した時点の底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 以下の浮泥堆積厚を算定したものが図-4.2.8 となる。例えば、浚渫後 24 時間経過した時点の St.T5 地点の浮泥層厚を浚渫後 5 日経過した時点に変換するには、表-4.2.1 における両時点の底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 以下の浮泥層厚の比率 ($0.57/0.89$) を浚渫後 24 時間経過した時点の浮泥層厚に乗じることにより、 0.12 m と算定される。浚渫後 5 日以上経過した時点の浮泥層厚 (St. T6 地点における浚渫 7 日後の測定値) は、時間を遡って変換することはせずに測定値そのものを浚渫後 5 日経過した時点の値とした。

さらに、表-4.2.2 の結果より底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 地点の残存上昇高さ比 r を用いると、浮泥層厚のうち r を乗じた分は底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 地点の上昇となるので沈降による高さ減少分は浮泥層厚 $\times (1 - r)$ となる。この値をここでは見込み沈降量と呼ぶことにする。なお、 r としては表-4.2.2 の結果より $r = 0.43$ (平均値) を用いることとした。これにより、観測点ごとの浚渫 5 日後時点での浮泥層厚から求まる底泥界面の見込み沈降量について、浚渫前の施工計画水深の底泥密度で整理したものが図-4.2.9 である。たとえば、浚渫前の施工計画水深の底泥密度が $1,300 \text{ kg/m}^3$ を超える場合には、浚渫 5 日後の浮泥層厚の測定値ないし推定値が名古屋港(St.K8)で 13 cm (実測)、東京西航路周辺海域(St.T5)の 12 cm (推定値) に対して、上述の考え方にに基づき見込み沈降量を求めると、浮泥層厚の 57% となることから、それぞれ 7.4 cm ($13 \text{ cm} \times 0.57$) および 6.8 cm ($12 \text{ cm} \times 0.57$) となり極めて小さい。一方、浚渫前の施工計画水深位置における底泥密度が $1,220 \text{ kg/m}^3$ 程度の比較的高含水比のケース(東京港, St. T6)においては、浚渫 7 日後の浮泥層厚の観測値 44 cm を基に、上記と同様な換算係数 ($r = 0.43$) を用いれば、底泥界面の見込み沈降量は 25 cm ($44 \text{ cm} \times 0.57$) となることがわかる。

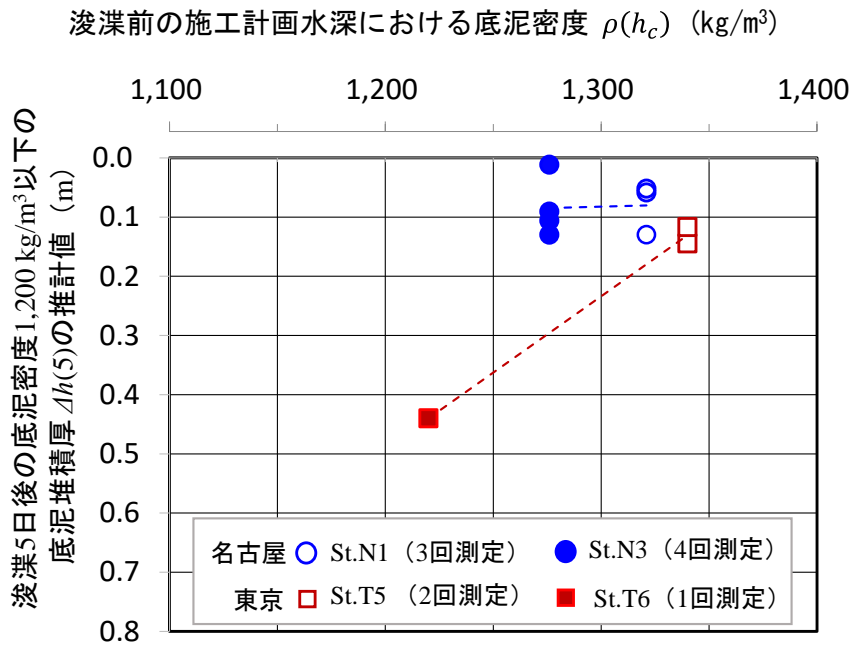


図-4.2.8 浚渫後5日経過した時点の底泥密度1,200 kg/m³以下の底泥の堆積厚 $\Delta h(5)$ の推定結果

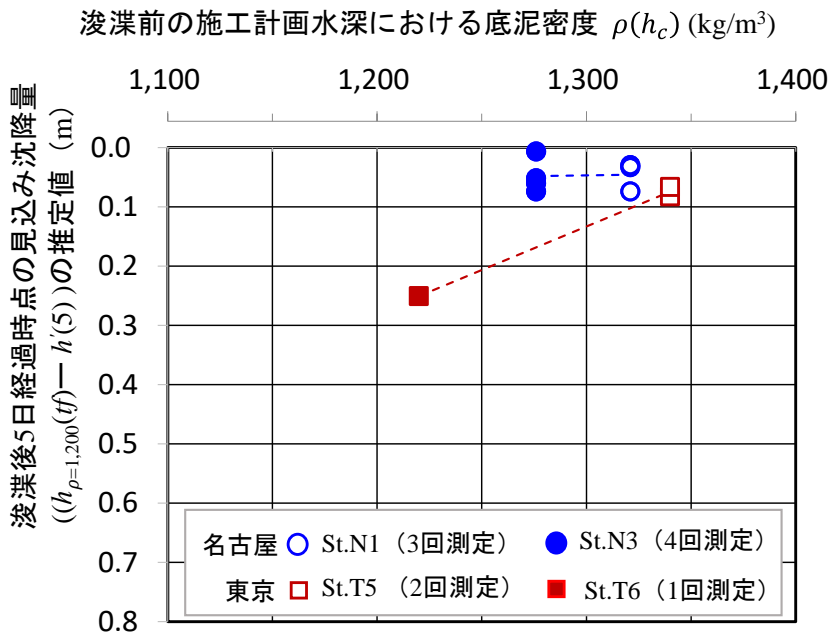


図-4.2.9 浚渫後5日経過した時点での浮泥層厚から求まる底泥界面の見込み沈降量の推定結果

4.3 浮泥堆積域における浚渫後の可航水深の簡便な予測手法

4.3.1 マルチビームによる浚渫後の水深の効率的な測深手法の提案

4.1.3の結果から、海水中のSS濃度が350 mg/l以下の濁りの状態であれば、マルチビーム測深において濁水層中の水深帯のいずれかが海底面と識別されることはないことがわかった。このことから、これまで浚渫後の施工水深の測定時期を経験的に判断していたが、濁りの定量的データに基づいて判断することが可能になると考える。具体的には、施工計画時に実施する濁り拡散の予測結果や施工時に浚渫範囲周辺の濁りを定期的に測定する水質調査結果などから、浚渫後にSS濃度が350 mg/l程度以下となる経過時間を把握し、その結果をもとにマルチビーム測深を行えば、浚渫後速やかに水深を把握することが可能になると考える。ただし、既往文献⁴⁴⁾で浮泥の密度領域に相当するSS濃度は数百～数千 mg/lと広範囲になることが示されており、マルチビーム測定に影響が出始めるSS濃度値を特定するには、更なる現地調査等による検討が必要である。

今回の観測対象とした施工現場では、浚渫後数時間経過した時点でSS濃度が350 mg/l程度以下となり、マルチビームによる測深結果が濁りに反射して浅く測定されることはなくなっている。仮に施工対象とする浚渫区域が今回対象とした現場と同様の施工および海象条件であった場合、浚渫船が前進しながら浚渫する際には浚渫船の押し船にマルチビームを艀装し、押し船が浚渫箇所を通過する浚渫後数時間経過した段階で測深すれば、別途測量船で後日測定することなく、施工管理水深を効率的に測定することが可能になると考える。なお、浚渫後に押し船が浚渫箇所を通過するまでにかかる時間は、浚渫船の平均船長50 m⁺_{2)より算出}および施工時の浚渫船の前進速度15～25 m/hを用いて算定すると2～3時間程度の場合が多いと考えられる。

4.3.2 浮泥堆積域における浚渫後の可航水深の簡便な予測手法の提案

4.2の結果から、浚渫後の底泥密度1,200 kg/m³以下の底泥堆積厚は浚渫前の施工計画水深位置の底泥密度に応じて変化することがわかった。ここで、浚渫前の底泥密度1,200 kg/m³が出現する水深は、マルチビームとレッドによる測深結果から、第3章で提案した関数を用いて次式のとおり推計することができる。

$$d_{1,200} = 92.8 \cdot d_{Lead}^{3.48} \quad (4.3.1)$$

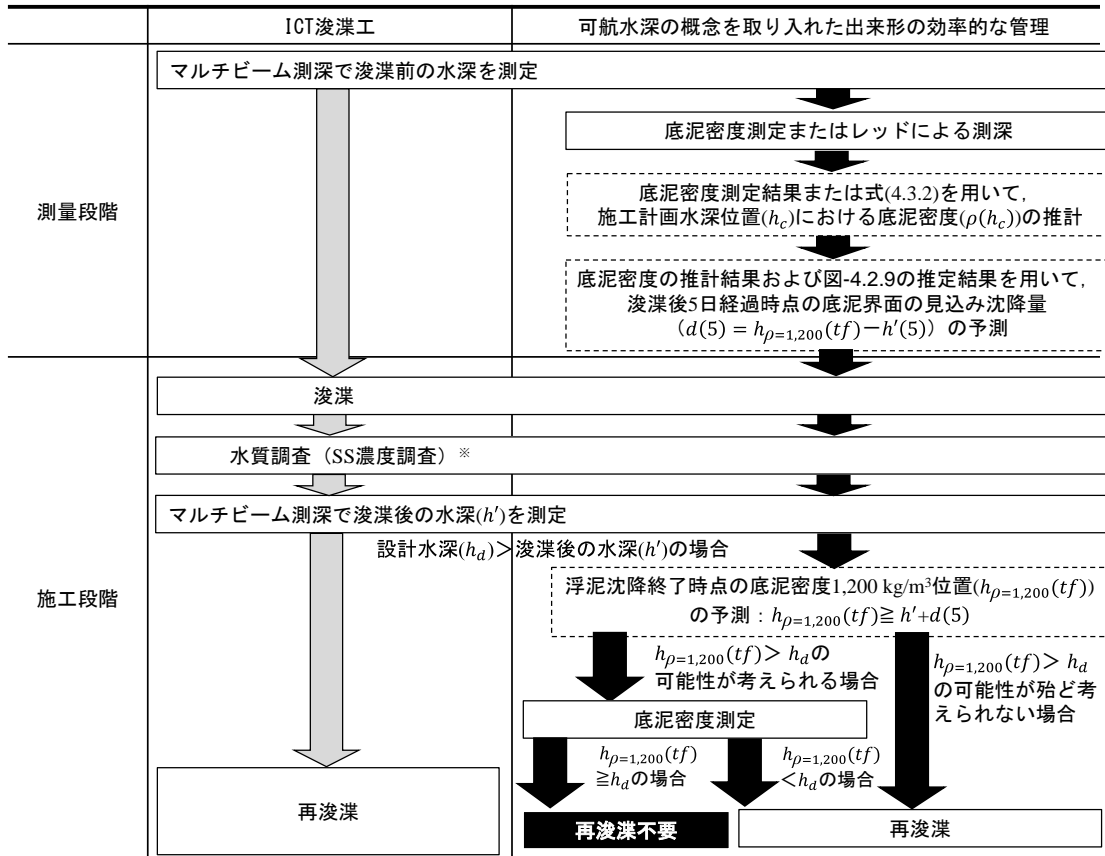
ここに、 $d_{1,200}$ ：底泥密度1,200 kg/m³以下の底泥堆積厚、 d_{Lead} ：密度上昇開始点以深でのレッドの貫入量を意味する。式(4.2.1)の D を $d_{1,200}$ とし、式(4.2.1)を用いて式(4.3.1)を表記し直すと、浚渫前の施工計画水深位置における底泥密度($\rho(h_c)$)は、次式のとおりとなる。

$$\rho(h_c) = \rho_0 + (1,200 - \rho_0) \cdot (-(h_c - h_{400}) / (92.8 \cdot d_{Lead}^{3.48}))^{0.25} \quad (4.3.2)$$

ここに、 h_c ：浚渫前の施工計画水深、 ρ_0 ：表層密度、 h_{400} ：浚渫前の周波数400 kHzのマルチビームによる測深結果を意味する。上式により、浚渫前のマルチビームとレッドによる測深結果から、浚渫前の施工計画水深位置における底泥密度を推計可能となる。

そこで、これらの関係式を用いて、浮泥堆積域における浚渫後の可航水深、すなわち底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 相当となる鉛直位置を簡便に予測する手法を提案する。ここでは、実際にマルチビームで施工管理する事例（週 1 回実施）を参考に、ICT 浚渫工の現場での活用を想定し、浚渫後 5 日経過した時点までにマルチビームによる測深を行うと仮定して提案する。浚渫数日経過後も浚渫直後同様に依然としてマルチビーム測深への濁りの影響が著しい場合などは、出来形の管理の効率化に向けた別途検討が必要である。図-4.2.10 は再浚渫が必要となる場合の ICT 浚渫工において、測量および施工段階の中に本提案手法を活用した可航水深の概念を取り入れた際の、出来形の効率的な管理の流れを示す。

まず、測量段階でマルチビームによる測深を実施するとともに、底泥密度測定またはレッドによる測深を実施する。次にこの底泥密度測定結果またはマルチビームとレッドによる測深結果から式(4.3.2)を用いて、浚渫前の施工計画水深位置における底泥密度 $\rho(h_c)$ を推計する。この底泥密度の推計結果および図-4.2.9 の推定結果を用いて、浚渫後 5 日経過時点の浮泥層厚に対する底泥界面の見込み沈降量 $d(5)$ を推定する。そして、浚渫後の浮泥沈降終了時点の底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 位置 $h_{\rho=1,200}(tf)$ を浚渫後のマルチビームによる測深結果 h' と浚渫 5 日後の底泥界面の見込み沈降量 $d(5)$ の合算値として $h' + d(5)$ により見積もることができる。これにより、浚渫後のマルチビームによる測深結果 h' と設計水深 h_d を比較してマルチビーム測深結果の方が浅く測定された場合でも、 $h_{\rho=1,200}(tf)$ が設計水深 h_d より深くなれば再浚渫は不要であり、 $h_{\rho=1,200}(tf)$ が設計水深 h_d より浅くなる場合にのみ、再浚渫の必要有無を判断するなど、施工段階における浚渫土量の軽減や再浚渫の実施判断の迅速化に本指標を活用することができる。



実線囲み：浚渫海域での作業，点線囲み：机上作業を表す。
 ※浚渫工事の環境監視として，浚渫作業日に水質調査が行われる。

図-4.2.10 再浚渫が必要となる場合の ICT 浚渫工の測量および施工段階の流れ並びに本提案手法を活用した可航水深の概念を取り入れた出来形の効率的な管理の流れ

4.4 本章のまとめ

名古屋港, 荻田港および東京西航路周辺海域における現地観測結果から, 下記のことがわかった.

- ・ 今回調査した範囲で, 浚渫直後にマルチビームで測定した結果, 施工計画水深より 0.37 m, 2.72 m 浅く測定された事例があった. しかし, いずれの場合も浚渫後 1,2 時間経過すると施工計画水深よりも深く測定されており, 浅く測定された原因は浚渫直後の浮泥の影響と考えられる.
- ・ 今回調査した範囲で, 浚渫によって海水中に濁りが生じて SS 濃度が 350 mg/l 程度以下であれば, マルチビームの測定によって濁水中を海底面と識別されるようなことはなかった. この結果より SS 濃度が 350 mg/l 程度以下は正確なマルチビーム測定のための目安となると考えられる.
- ・ 浚渫後の底泥密度 1,200 kg/m³ 以下の底泥堆積厚は, 浚渫前の施工計画水深位置における底泥密度が小さくなるに伴い, 増加する傾向がみられる.

また, 上記分析結果から, 浮泥堆積域における浚渫後の可航水深の簡便な予測手法を提案した. 本提案手法を活用すれば, 現在 ICT 浚渫工の深浅測量で一般的に用いられている周波数 400 kHz のマルチビーム測深とレッド測深, あるいは底泥密度測定を浚渫前に実施することで, 浚渫後の底泥密度 1,200 kg/m³ が出現する水深を予測することができる. これにより, 特に可航水深の概念を取り入れた場合の, 浮泥の集積が顕著な水域における, より効率的な出来形の管理や浚渫土砂量の軽減への方策として本提案手法は有効であると考えられる.

ただし, 限られた測定データや前提条件を基にした検討に留まることから, 予測精度, 底泥密度の取得精度の向上などを図る必要がある. 高波浪擾乱による海底泥の巻上げとそれらの再沈降など, より高濃度の濁りの影響による堆積環境においては, 今回の観測対象とした平常時の状況とは異なる. また, 浚渫後の底泥密度の鉛直分布の変化を推計するために用いた K.BEEN らの実験は河口泥を用いた沈降実験であり, 浚渫海域ごとに底泥物性が異なる可能性や塩分にも影響を受けるとされる粒子の凝集 (フロクキュレーション) の効果など, 浚渫後の底泥の沈降特性が実験条件とは必ずしも一致するとは限らないため, その点に留意する必要がある, 今後の課題の一つと考える.

第5章 結論

5.1 結論

本研究は、浮泥堆積域において、まず、底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 以下の底泥の鉛直分布の変化に伴う各観測海底面の相対的な位置関係を評価した上で、可航水深の概念を取り入れた場合の実務的な可航水深の推計方法を提案することを目的としている。

また、浚渫に伴う底泥密度の鉛直分布の出現特性を評価した上で、可航水深の概念を取り入れた場合の浚渫後の実務的な可航水深の予測方法を提案することを目的とする。

本研究で得られた知見について、本論文の章ごとに述べる。

第1章「序章」では、本研究の背景、本研究の目的および概要ならびに本論文の構成および各章の概要を述べた。

第2章「既往の研究および本研究の対象」では、海外の浮泥堆積域における可航水深による水深管理、底泥密度の測定方法および i-Construction における出来形管理の効率化についてとりまとめた。海外の浮泥堆積域における可航水深による水深管理では、ベルギーのゼーブルージュ港など浮泥が著しく堆積する各国港湾において、船舶航行への堆積物の障害の程度を考慮して可航水深が定義されている現状についてとりまとめた。底泥密度の測定方法では、可航水深の測定方法についてとりまとめた。i-Construction における出来形確認の効率化では、我が国の i-Construction における出来形管理の効率化などの取組みについてとりまとめた。最後に、本研究の対象範囲を明確にした。

第3章「浮泥堆積域における可航水深の簡便な推計手法の提案」では、東京東航路周辺海域、荇田港および名古屋港における現地観測結果から、下記のことがわかった。

- ・ 周波数 400 kHz のマルチビームによる測深結果と底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 位置の差について、東京東航路周辺海域では最大 0.79 m 、最小 0.16 m （平均 0.46 m ）、荇田港では最大 1.32 m 、最小 1.06 m （平均 1.19 m ）、名古屋港では 0.06 m および 0.05 m の差が生じている。
- ・ 周波数 400 kHz と 200 kHz による測深結果の差はいずれの観測地点でも 0.1 m 未満であり、底泥密度の増分が大きくなるに伴い、減少する傾向がみられる。
- ・ 周波数 400 kHz のマルチビームとレッドによる測深結果の差は、底泥密度の増分が大きくなるに伴い、減少する傾向がみられる。

また、これらの分析結果から、周波数 400 kHz のマルチビームおよびレッドによる測深結果を用いて、底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 位置を簡便に推計する手法を提案した。

第 4 章「浮泥堆積域における浚渫後の可航水深の簡便な予測手法の提案」では、名古屋港、荻田港および東京西航路周辺海域における現地観測結果から、下記のことがわかった。

- ・ 今回調査した範囲で、浚渫直後にマルチビームで測定した結果は、施工計画水深より 0.37 m, 2.72 m 浅く測定された事例があった。しかし、いずれの場合も浚渫後 1,2 時間経過すると施工計画水深よりも深く測定されており、浅く測定された原因は浚渫直後の浮泥の影響と考えられる。
- ・ 今回調査した範囲では、海水中の SS 濃度が 350 mg/l 程度以下であれば、マルチビームの測定によって濁水中を海底面と識別されるようなことはなかった。この結果より SS 濃度が 350 mg/l 程度以下は正確なマルチビーム測定のための目安となると考えられる。
- ・ 浚渫後の底泥密度 1,200 kg/m³ 以下の底泥堆積厚は、浚渫前の施工計画水深位置における底泥密度が小さくなるに伴い、増加する傾向がみられる。

また、これらの分析結果を用いて、浮泥堆積域における浚渫後の底泥密度 1,200 kg/m³ 位置の簡便な予測手法を提案した。

5.2 今後の課題および留意事項

第3章において、周波数400 kHzのマルチビームおよびレッドによる測深結果を用いて、底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 位置を簡便に推計する手法を提案した。ただし、限られた測定データや前提条件を基にした検討に留まっている。今後、密度計による測定値をはじめとする各測定データのばらつきや誤差の検討および蓄積などを実施し、推計精度の検証を実施する必要がある。土質の多様さに左右される複雑な現象を対象とする中、各測定データの不確かさを検討することは測定データを適切に解釈する上で非常に重要であり、可航水深の概念を取り入れた効率的な水深管理を実際の現場で進めていくため、必要不可欠な事項である。また、反射板を設置しないでレッド測深を行う場合、本研究の測定結果と異なり測定誤差が大きく生じる可能性がある。レッドの形状や重量が本研究で用いたものと異なる場合や測定対象とする水深が浅い場合、レッドの貫入量が本研究で用いたレッドによる場合と異なることがある。台風による波浪外力による底泥の巻上げや浚渫などにより底泥が攪乱されている状況においては観測対象とした底泥表層の堆積構造とは異なる可能性がある。本提案手法を活用するにあたって、観測方法や観測条件に留意する必要がある。また、さらに効率的な水深管理が可能となるよう、低周波数の音波の活用を含めて複数の周波数を用いた音響測深による可航水深の測定も検討していく必要がある。周波数10 kHzの測深結果と底泥密度の鉛直分布の対応関係も測定データの蓄積などを通じて、例えば対象海域に応じた関係性などに着目した上で検討していく必要があると考える。

第4章において、浚渫後の底泥密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 位置の簡便な予測手法を提案した。ただし、上記同様に限られた測定データや前提条件を基にした検討に留まっている。予測精度の向上などを図る必要がある。高波浪擾乱による海底泥の巻上げとそれらの再沈降など、より高濃度の濁りの影響による堆積環境では、今回の観測対象とした平常時の状況とは異なる。また、浚渫後の底泥密度の鉛直分布の変化の推計に用いたK.BEENらの実験は河口泥を用いた沈降実験であり、浚渫海域ごとに底泥物性が異なる可能性や塩分にも影響を受けるとされる粒子の凝集の効果など、浚渫後の底泥の沈降特性が実験条件とは必ずしも一致するとは限らないため、その点に留意する必要がある。今後の課題の一つと考える。

可航水深の概念を取り入れた合理的な水深管理および可航水深の概念を取り入れて出来形の管理を実施していくためには、可航水深による海底面の定義方法をまず我が国で採用する必要がある。本提案手法により可航水深を簡便に推計することが可能となった。そのため、可航水深の概念を取り入れた水深管理を実施していく際の作業コストや手間の増大といった運用面での課題を大きく改善することができる。今後、可航水深による海底面の定義方法の採用および本提案手法の社会実装に向けて、我が国の水深を定義する法令を所管する海上保安庁などの関係機関とともに引き続き上記課題を含めて検討していく必要がある。可航水深の概念を取り入れた合理的な水深管理を実施することで浚渫頻度の軽減などによる航路や泊地の維持管理の効率化に資するが、関係者への影響も十分考慮した上で可航水深の基準値の設定および運用を丁寧に実施していく必要があると考える。

謝辞

本論文は、東京工業大学 岩波光保教授のご指導の下、東京工業大学環境・社会理工学院 土木・環境工学系 土木工学コースの在籍期間に実施した研究成果を取りまとめたものです。ここに至るまで、多くの方々からのご助言とご協力を賜りました。

指導教員である東京工業大学教授 岩波光保先生および国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所港湾空港技術研究所 中川康之特別研究主幹(沿岸海洋担当)には、研究の全般にわたりまして、常に高い見地からの御指導、御鞭撻を賜りました。心より感謝の意を表します。御二人の研究に対する真摯な姿勢を参考に、今後も精進してまいる所存です。引き続きご指導を戴けますと幸いです。

東京工業大学教授 高橋章浩先生、高木泰士先生、東京工業大学准教授 千々和伸浩先生および中村隆志先生には、審査員を務めて頂き、御専門とされている立場から貴重なご意見を戴くとともに学位論文の取りまとめ方などをご指導戴きました。厚く御礼申し上げます。

国土技術政策総合研究所 諸星一信元副所長、藤井敦元港湾研究部長、井山繁元港湾研究部港湾施工システム・保全研究室長には、本研究に取り組む機会を与えて頂くとともに、多くの貴重なご助言を戴きました。厚く御礼申し上げます。

国土技術政策総合研究所 水上純一元副所長、坂克人元副所長、高野誠紀元副所長、永井一浩副所長、渡部富博元港湾研究部長、丹生清輝元港湾研究部長、酒井浩二元港湾研究部長、小澤敬二港湾情報化支援センター長、櫻井義夫元港湾研究部港湾施工システム・保全研究室長、辰巳大介港湾情報化支援センター港湾業務情報化研究室長には、国土技術政策総合研究所の業務と並行して本研究を進める中で様々なご助言を戴きました。御礼申し上げます。

2018年度 ICT 浚渫工試行工事における施工者の皆様には、アンケート調査にご協力を戴きました。国土交通省九州地方整備局苅田港湾事務所、中部地方整備局名古屋港湾事務所および関東地方整備局東京港湾事務所の皆様には、本研究の現地観測を行うにあたり現場関係者との調整など多大なるご協力を戴きました。港湾空港技術研究所沿岸環境研究領域沿岸土砂管理研究グループの皆様には、現地式密度計の使用のご協力を戴きました。心より御礼申し上げます。

一般財団法人港湾空港総合技術センター小黒章二氏、三洋テクノマリン(株) 繁原俊弘氏をはじめ(一財)港湾空港総合技術センターおよび三洋テクノマリン(株)の皆様には、現地観測における現場調整、測定データ取得および試料分析にご協力戴きました。心から御礼

申し上げます。

東京工業大学環境・社会理工学院土木・環境工学系社会基盤マネジメント研究室（岩波研究室）および次世代インフラ研究室（千々和研究室）の皆様には，研究室内ゼミでの筆者発表へのご質問およびご助言を多数戴き，本研究を進める中で貴重な視点や考えを取り入れることができました。心より感謝の意を表します。

京都大学経営管理大学院特定教授 赤倉康寛先生には，筆者が論文執筆に注力できるようご配慮を戴きました。御礼申し上げます。今後ご指導ご鞭撻のほどよろしくお願い申し上げます。

最後に，永年にわたり筆者を励まし支えてくれた妻 明美と，いつも笑顔で筆者を応援してくれた二人の子供達 華果（5歳）と大晟（1歳）に，謝意を表して本論文の謝辞といたします。

令和6年2月

参考文献

第 1 章

- 1-1) 国土交通省不動産・建設経済局：中央建設業審議会（令和 3 年 10 月 15 日開催）配布資料 1, p. 5, 2021.
- 1-2) 総務省統計局：労働力調査，基本集計，第 II-2-1 表，年齢階級，産業別就業者数，2021，2022.
- 1-3) 国土交通省大臣官房技術調査課：i-Construction 委員会第 1 回資料，設置の趣旨，2015.
- 1-4) 国土交通省港湾局：港湾における ICT 導入検討委員会第 1 回資料，設置目的，2021.
- 1-5) 国土交通省港湾局：港湾における i-Construction 推進委員会第 1 回資料，p. 9, 2020.
- 1-6) 国土交通省港湾局：マルチビームを用いた深淺測量マニュアル（浚渫工編）（令和 5 年 4 月改定版），2023.
- 1-7) PIANC: NAVIGATION IN MUDDY AREAS, PERMANENT TECHNICAL COMMITTEE II, REPORT OF WORKING GROUP 3-a), 1983.
- 1-8) PIANC: Harbor Approach Channels Design Guidelines, PIANC report no.121, pp. 229-231, 2014.
- 1-9) 海上保安庁：水路業務法施行令，2001.
- 1-10) 海上保安庁：水路測量における測定又は調査の方法に関する告示 一部改訂，2009.
- 1-11) 国土交通省港湾局：港湾工事共通仕様書（令和 5 年 3 月改定版），2023.
- 1-12) PIANC: Minimising harbour siltation, PIANC Report No.102, 75, p. 56, 2008.
- 1-13) 中川康之，有路隆一，松阪省一，諸星一信，八木宏，灘岡和夫，古殿太郎，大野幸正，島崎哲也：多摩川河口沿岸域における底泥の堆積分布特性の把握に関する現地調査，海岸工学論文集，第 54 巻，pp. 1081-1085, 2007.

第 2 章

- 2-1) PIANC: Harbor Approach Channels Design Guidelines, PIANC report no.121, pp. 229-231, 2014.
- 2-2) PIANC: Approach channels –A Guide for Design. Final Report of the Joint Working Group PIANC–IAPH in cooperation with IMPA and IALA Supplement to PIANC Bulletin 95, p. 45, 1997.
- 2-3) McAnally, W. H., A. Teeter, D. Schoellhamer, C. Friedrichs, D. Hamilton, E. Hayter, P. Shrestha, Hugo Rodriguez, A. Sheremet and R. Kirby (ASCE Task Committee on management of fluid mud): Management of Fluid Mud in Estuaries, Bays, and Lakes. II: Measurement, Modeling, and Management, Journal of Hydraulic Engineering, Vol.133, No.1, pp.23-38, 2007.
- 2-4) Vantorre, M., Laforce, E. and Delefortrie, G.: A novel methodology for revision of the nautical bottom, VLIZ Special Publication, 2006.
- 2-5) 中川康之：航路・泊地の浮泥埋没に対する維持管理の効率化に関する研究，（一財）港湾空港総合技術センター 平成 30 年度 研究開発助成 成果報告，第 23-6 号，pp. 8-9, 2018.

- 2-6) 山縣延文, 原田卓三, 北島正明, 土屋明, 賀谷彰夫, 猿渡了己: 浮泥層判定装置の開発, 海洋開発論文集, 第 18 巻, pp. 569-574, 2002.
- 2-7) 海上保安庁: 水路測量業務準則施行細則 (令和 4 年 3 月一部改正), 2022.
- 2-8) 中川康之, 有路隆一: 台風来襲時の東京湾羽田沖における底泥移動現象, 港湾空港技術研究所報告, 第 49 巻, 第 2 号, pp. 107-123, 2010.
- 2-9) 中川康之, 篠澤巧, 高嶋紀子, 渡邊理之, 清水雄太: 河口港における底泥堆積特性の把握に関する現地調査, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.71, No.2, I_571-I_576, 2015.
- 2-10) 国土交通省港湾局: 港湾工事における濁り影響予測の手引き, 2004.
- 2-11) 佐藤昌宏, 車田佳範, 守屋典昭, 上原大摩, 滝上英孝, 酒井伸一: 環境浚渫工法の汚濁発生調査事例と水質モニタリング手法の提案, 海洋開発論文集, 第 20 巻, pp. 1127-1132, 2004.
- 2-12) 国土交通省: 施工履歴データを用いた出来形管理の監督・検査要領 (土工編) (案) (令和 4 年 3 月), 2022.
- 2-13) 小嶋一弘, 辰巳大介, 小川雅史: ICT 海上地盤改良工 (床掘工) の出来形管理への施工履歴データ適用に関する検討, 国土技術政策総合研究所資料, No. 1199, 2022.
- 2-14) 小嶋一弘, 辰巳大介, 川上司, 小川雅史: 機械均しの施工履歴データを活用した基礎捨石均し出来形管理の効率化に関する検討, 国土技術政策総合研究所資料, No. 1240, 2023.
- 2-15) 辰巳大介, 小川雅史: ICT 浚渫工におけるマルチビーム測深データを対象とした深層学習によるノイズ処理の検討, 国土技術政策総合研究所資料, No. 1211, 2022.
- 2-16) 国土交通省港湾局: 港湾における i-Construction 推進委員会第 5 回資料, p.23, 2022.
- 2-17) 国土交通省港湾局: 令和 5 年度港湾請負工事積算基準, 2023.

第 3 章

- 3-1) 海上保安庁: 水路測量業務準則施行細則 (令和 4 年 3 月一部改正), 2022.
- 3-2) 森洋, 林健次, 宇都宮好博, 大西健二: 東京湾の海底面判読に関する一考察, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 69, No. 2, pp. I_1156-I_1161, 2013.
- 3-3) 国土交通省九州地方整備局苅田港湾事務所: 平成 29 年度苅田港埋没対策検討業務報告書, 2017.
- 3-4) 国土地理院: 航空レーザ測深機を用いた公共測量マニュアル (案), p. 42, 2019.
- 3-5) 中川康之, 有路隆一, 松阪省一, 諸星一信, 八木宏, 灘岡和夫, 古殿太郎, 大野幸正, 島崎哲也: 多摩川河口沿岸域における底泥の堆積分布特性の把握に関する現地調査, 海岸工学論文集, 第 54 巻, pp. 1081-1085, 2007.
- 3-6) 木原純孝: 音響測深機に関する研究—4 周波音測機による室内及び現地実験について—, 港湾技研資料, No. 45, 1968.
- 3-7) 五十嵐学, 佐々木淳: 東京湾奥部の浮泥堆積層厚の空間分布特性, 海岸工学論文集, 第

51 卷, pp. 981-985, 2004.

- 3-8) 中川康之, 渡邊和重, 谷川晴一, 黒田祐一: 海底面近傍における底泥密度の鉛直分布特性の把握, 海岸工学論文集, 第 51 卷, pp. 986-990, 2004.
- 3-9) 中川康之, 篠澤巧, 高嶋紀子, 渡邊理之, 清水雄太: 河口港における底泥堆積特性の把握に関する現地調査, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.71, No.2, I_571-I_576, 2015.
- 3-10) Foda, M. A., Hunt, J. R. and Chou, H.-T.: A nonlinear model for the fluidization of marine mud by waves, *Journal of Geographical Research*, Vol. 98, No. C4, pp. 7039-7047, 1993.
- 3-11) 中川康之: 高含水比底泥の挙動解明とモデル化, 港湾空港技術研究所報告, Vol. 52, No. 3, pp. 35-50, 2013.
- 3-12) 佐野侷房, 川口貴之, 岩渕祐一: フォールコーン貫入量による非排水せん断強さの推定, 第 37 回地盤工学研究発表会, pp. 201-201, 2002.
- 3-13) 甲本達也: 粘性土の塑性限界の測定におけるフォールコーン試験の適用性, 土壤物理学会誌「土壌の物理性」, 第 62 号, pp. 63-67, 1991.
- 3-14) 関田欣治, 吉成岳彦, 大村優太, 矢後清和: 杭式アンカーの海中落下挙動と海底地盤への貫入に関する実験及び解析, 海洋開発論文集, 第 21 卷, pp. 939-944, 2005.
- 3-15) 中川康之, 有路隆一: 台風来襲時の東京湾羽田沖における底泥移動現象, 港湾空港技術研究所報告, 第 49 卷, 第 2 号, pp. 107-123, 2010.

第 4 章

- 4-1) 国土交通省港湾局: 港湾工事における濁り影響予測の手引き, 2004.
- 4-2) 一般社団法人日本作業船協会: 現有作業船一覧 2019 年版, 2019.
- 4-3) 海上保安庁: 水路測量業務準則施行細則 (令和 4 年 3 月一部改正), 2022.
- 4-4) 中川康之, 渡邊和重, 谷川晴一, 黒田祐一: 海底面近傍における底泥密度の鉛直分布特性の把握, 海岸工学論文集, 第 51 卷, pp. 986-990, 2004.
- 4-5) 国土交通省港湾局: 令和 5 年度港湾請負工事積算基準, 2023.
- 4-6) 日比野忠史, 村上和男, 松本英雄: 底泥内での間隙水の動きと浮泥層の形成機構, 海岸工学論文集, 第 52 卷, pp.961-965, 2005.
- 4-7) 鶴谷広一, 江口秀二, 佐々木豊喜: 波と流れによる底泥の巻き上げ限界, 港湾技研資料, No. 674, pp. 1-13, 1990.
- 4-8) 中野晋, 鶴谷広一: 底泥床上の底面せん断応力と底泥運動, 海岸工学論文集, 第 35 卷, pp. 342-346, 1988.
- 4-9) Foda, M. A., Hunt, J. R. and Chou, H.-T.: A nonlinear model for the fluidization of marine mud by waves, *Journal of Geographical Research*, Vol. 98, No. C4, pp. 7039-7047, 1993.
- 4-10) K. BEEN and G. C. SILLST: Self-weight consolidation of soft soils: an experimental and theoretical study, *Geotechnique* 31, No. 4, pp. 519-535, 1981.

付録A 本研究で用いた密度計，レッドおよび柱状採泥器

(1) 現地式密度計(Hydramotion 社製 MudBug)

本研究で用いた現地式密度計 Hydramotion 社 MudBug^{A-1),A-2)}は，ステンレス製の測定器を水中に降ろすことで底泥密度，温度および圧力(水深)を測定・記録することが可能である．センサ部は底泥密度センサ (Hydramotion XL/4 発振子)，温度センサ (four-wire Pt100 PRT) および圧力センサ (ゲージ圧) とインターフェース機器が統合された装置となっている．振動子センサの振動数変化から周辺媒体の密度を算定する．また水深は圧力の測定値から次式のとおり算定される．

$$d = \frac{100,000P}{D_s \cdot g} + pos \quad (A.1)$$

ここに， d : 水深 (m)， P : 圧力 (bar)， D_s : 海水密度 (kg/m^3)， pos : オフセット位置 (圧力センサと密度センサ間の距離)， g : 9.806 m/s^2 を意味する．**図-A.1** は MudBug のセンサ部と PC 接続のイメージを示す．PC の USB 接続を通じて電力供給される．**表-A.1** は MudBug の測定範囲および測定精度を示す．ガンマ線による測定器と異なり放射線を取り扱う危険性がない．また，現地でのキャリブレーションは不要とされている^{A-2),A-3)}．

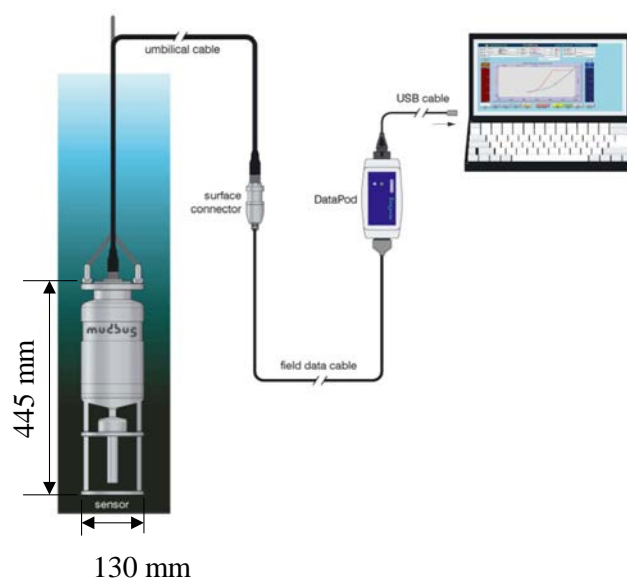


図-A.1 MudBug の測定器と PC 接続イメージ^{A-1)}

表-A.1 MudBug の測定範囲および測定精度 A-1)より作成

項目	測定範囲	測定精度
底泥密度	800 ~ 1,600 kg/m ³	1%
温度	-50 ~ 150 °C	±0.2 °C
水深	0 ~ 90 m	0.1 m

参考文献

A-1)Hydramotion 社 : Hydramotion 社 HP (http://muddensity.com/Hydrography_density.html) .

A-2)Hydramotion 社 : MudBug MB400 User manual.

A-3)S. Manson, N. Pinnington : Deployment of Mudbugs, Measure analysis 32 in the framework of the Interreg IVB project TIDE, 2012.

(2) レッドの諸元および形状

本研究で用いたレッドの諸元および形状を表-A.2 および図-A.2 に示す。このレッドは、水路測量業務準則施行細則^{A-4)}で浮泥層調査を実施する際に用いるよう規定されているものである。一方で、深浅測量で用いるレッドは重量 2.0kg 以上とすることのみ規定されている^{A-4)}。図-A.3 に本研究で用いたレッド以外のレッド例を示す。複数の測量会社にヒアリングしたところ、深浅測量では図-A.3 に示す長方体に類似した形状のレッドを用いることが多いようであった。レッドの形状や重量に応じて、浮泥堆積域ではレッドによる測深結果に差異が生じることが考えられる。そのため、第 3 章で提案したマルチビームおよびレッドによる可航水深の簡便な推計を実施する際には、その点に留意する必要がある。

表-A.2 本研究で用いたレッドの諸元^{A-4)}より作成

項目	各種情報
形状	円錐形
底面積	113 cm ²
重量	2.7 kg

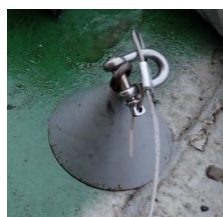


図-A.2 本研究で用いたレッド



全長: 235 mm
重量: 3.2kg

全長: 245 mm
重量: 5.2kg

図-A.3 本研究で用いたレッド以外のレッド例^{A-5)}より作成

参考文献

A-4)海上保安庁：水路測量業務準則施行細則（令和 4 年 3 月一部改正），2022.

A-5)株式会社三商：研究実験用ガラス製品・機器総合カタログ，p368，2024.

(3) 柱状採泥器

表-A.3 は第 3 章で用いた重力型自由落下式コアサンプラーの諸元を示す。図-A.4 は菟田港の St.K5 地点で採泥した際の底泥表面とコアサンプラーの位置関係を示す。貫入時のコアサンプラーの位置はコアサンプラー上部に設置した反射板を音響測深で測定した。図-A.4 に示すように、海上に引き上げた後の分画前の採取試料長 61.5 m, 反射板の測定水深が海底面上 20 cm であることから採取試料の短縮が生じていることが確認される。他地点でも同様に採取試料の短縮が確認される。図-A.5 は採取試料の脱落を防ぐためにコア下面部に設置したコアキャッチャーを示す。貫入時のコアキャッチャーによる抵抗や引き上げ時に採取

表-A.3 第 3 章で用いた重力型自由落下式コアサンプラーの諸元 A-6)より作成

項目	材質	大きさまたは重量
採泥管	ステンレス鋼管	外径 9 cm × 長さ 100 cm
内管	アクリル管	内径 7.6 cm × 長さ 100 cm
寸法	-	20 cm×20 cm × 全長 210 cm
重量	-	約 90 kg (本体 30 kg, 重錘 60 kg)

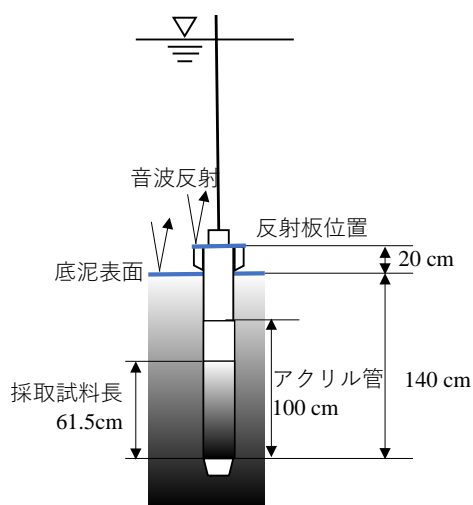


図-A.4 採泥した際の底泥表面とコアサンプラーの位置関係 (菟田港 St.K5)

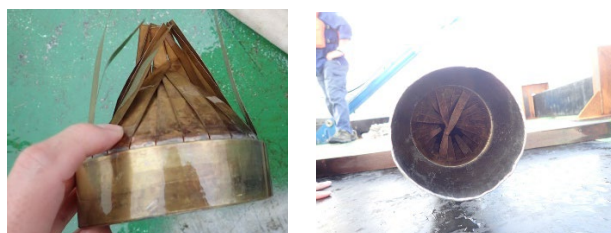


図-A.5 コアキャッチャー (左), コアサンプラーに設置したコアキャッチャー (右)

試料の脱落などが生じたため、採取試料の短縮が起こった可能性が考えられる。

表-A.4 は第 4 章で用いた重力型自由落下式コアサンプラーの諸元を示す。このコアサンプラーは広島県環境センターが考案した不攪乱柱状採泥器（HR 型）である。第 3 章で用いたコアサンプラーと異なり、採泥時に採泥管（アクリル製）の内側にコアキャッチャーなどの障害物がない。貫入が止まった時点でコアサンプラー上部のフックがはずれ、引き上げの際にコア下面部が閉塞し採取試料の脱落を防ぐ仕組みになっている。図-A.6 は不攪乱柱状採泥器の下面部が閉塞するイメージ、図-A.7 はコアサンプラーの下部を示す。図-A.8 は苅田港の St.K9 地点で採泥した際の底泥表面とコアサンプラーの位置関係を示す。図-A.8 に示すように、海上に引き上げた後の分画前の採取試料長 25.5 m、反射板が海底面下に沈んでいたことから、採取試料の短縮が第 3 章で用いた重力型自由落下式コアサンプラーの場合と比較すると少量ではあるが生じていることが確認される。

表-A.4 第 4 章で用いた重力型自由落下式コアサンプラー（不攪乱柱状採泥器）の諸元 A-6)より作成

項目	材質	大きさまたは重量
採泥管	アクリル管	内径 11 cm × 長さ 50 cm
寸法	-	17 cm×17 cm × 全長 160 cm
重量	-	約 15 kg（本体 5 kg, 重錘 5 g×2 個）

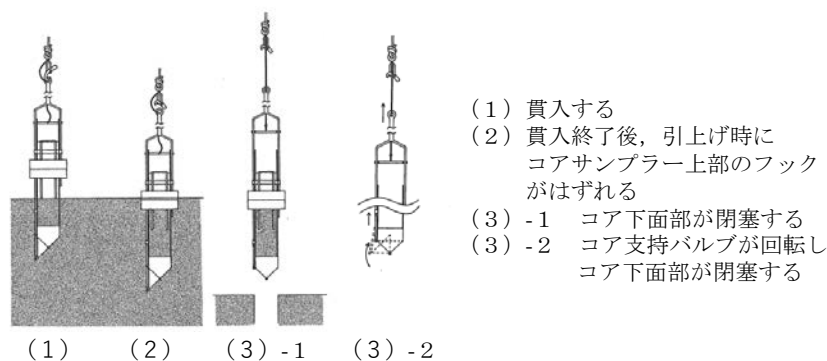


図-A.6 不攪乱柱状採泥器の下面部が閉塞するイメージ A-7)より作成



図-A.7 不攪乱柱状採泥器の下部

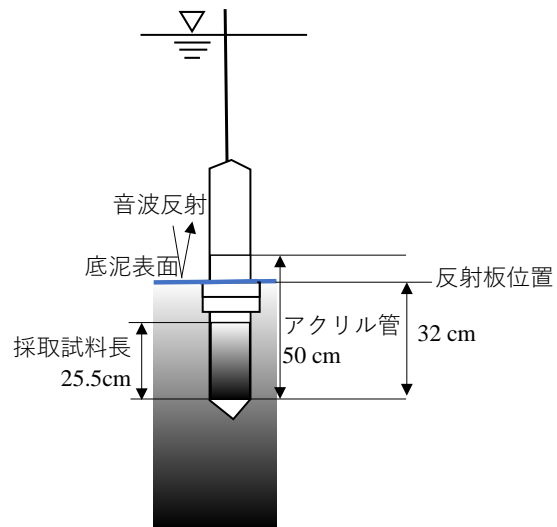


図-A.8 採泥した際の底泥表面とコアサンプラーの位置関係（荻田港 St.K9）

参考文献

A-6)株式会社離合社：採泥器カタログ (https://www.rigo.co.jp/wp/wp-content/uploads/2019/03/リストNo.33%E3%80%80採泥器_vol134.pdf).

A-7)井澤博文，清木徹，伊達悦二：大口径パイプを用いた簡易不攪乱柱状採泥器の試作，水質汚濁研究，第13巻，第5号，pp.320-323，1990.

付録 B 採取試料の土質試験方法および SS 濃度の測定方法

重力型自由落下式コアサンプラーで採取した試料は、1層目：1.0cm厚（試料毎の表層の起伏を考慮し、実際には0.5 cm～2.5 cm厚）、2層目以降：5 cm厚にてスライスし、含水比、粒度特性、底泥密度の土質試験に供した。表-B.1は、採取後からスライスするまでの経過日時を示す。荻田港および名古屋港では、可能な限り採取後速やかにスライスを実施するようにした。表-B.2は、土質試験の分析方法を示す。含泥率は、粒度特性で算出したシルト分と粘土分の割合を合算して求めた。

表-B.1 採取後からスライスするまでの経過日時

対象海域	採取からスライス実施までの経過日数
東京東航路周辺海域	9日後
荻田港	当日，1日後
名古屋港	1日後，3日後

表-B.2 土質試験の分析方法

分析項目	分析方法
含水比	JIS A1203（土の含水比試験方法）
粒度特性	JIS Z 8825（粒子径解析-レーザ回折・散乱法）
底泥密度	土粒子の乾燥質量を 2,600 kg/m ³ と仮定し、含水比をもとに各値を算出。

SS 濃度測定では、多項目水質計による濁度の鉛直分布測定を行った。表-B.3は、多項目水質計の測定範囲および測定精度を示す。測定された濁度（FTU：ホルマジン濁度）を SS 濃度へ換算するため、別途採取した水試料の濁度測定値と SS 濃度の相関関係から回帰直線式である検量線を求め、多項目水質計で測定された濁度の鉛直分布を SS 濃度の鉛直分布へ換算した。表-B.4は、水試料の SS 濃度を測定する方法を示す。

表-B.3 多項目水質計の測定範囲および測定精度 B-1)より作成

測定項目	測定範囲	測定精度
水深	0～100 m	±0.3%FS
水温	-3～45℃	±0.01℃
塩分	2～42	-
DO	0～200 %	±2%FS
pH	0～14 pH	±0.2 pH
濁度	0～1,000 FTU（ホルマジン濁度）	±0.3 FTU

表-B.4 水試料の SS 濃度の測定方法

測定項目	測定方法
SS 濃度	環境庁告示 59 号付録 9 ^{B-2)}

参考文献

B-1) JFE アドバンテック株式会社：海洋・河川事業部製品カタログ (<https://www.jfe-advantech.co.jp/assets/img/products/ocean-index/JC-Ocean-10A.pdf>) .

B-2) 環境省：環境庁告示第 59 号，1971.

付録C 停船観測時のマルチビーム測深による取得データ

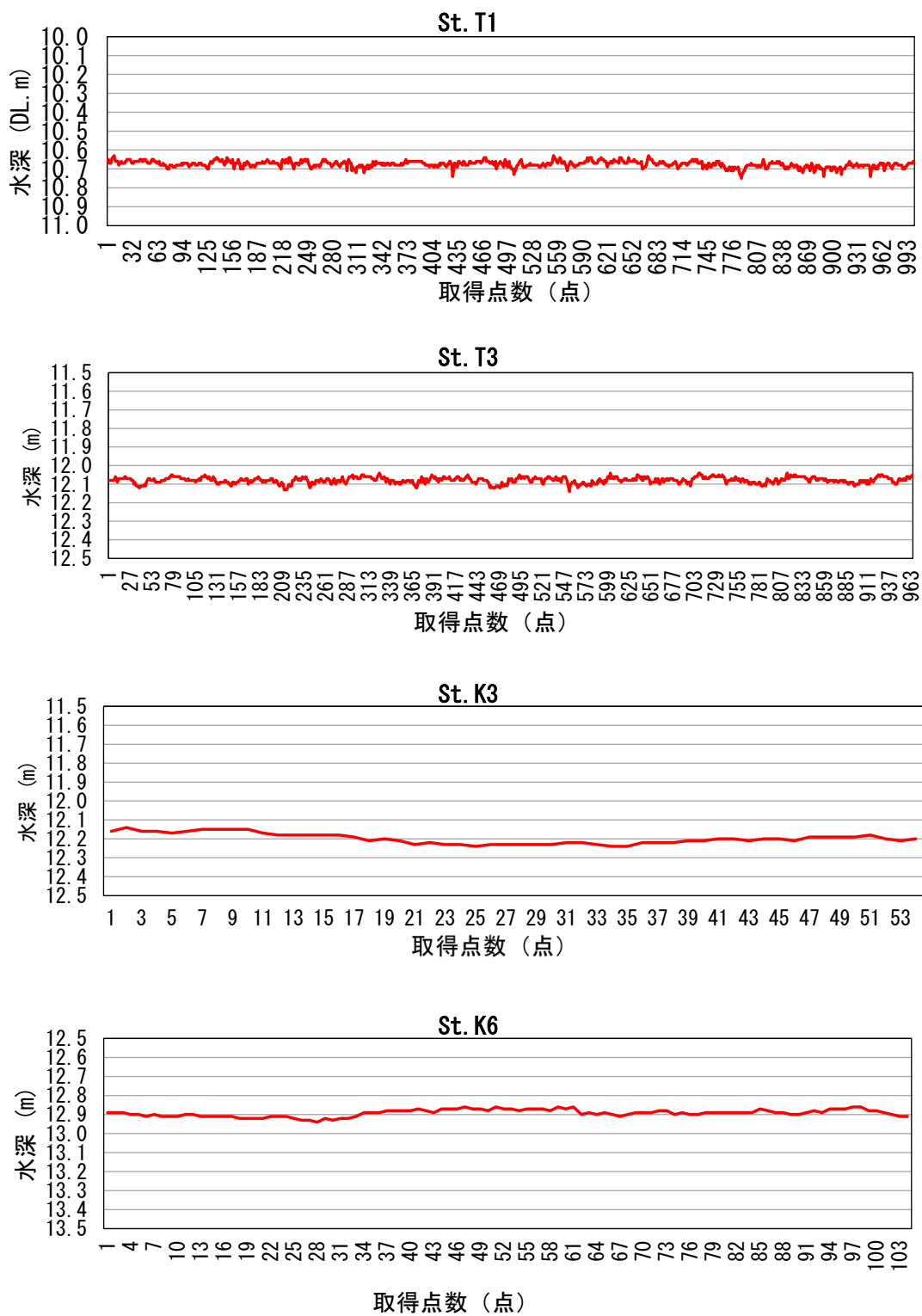


図-C.1 停船観測時のマルチビーム測量による取得データ例
(St.T1, St.T3, St.K3, St.K6)

付録 D コーン貫入量と含水比のべき関数式を用いたレッド貫入量と底泥密度 1, 200 kg/m³ 以下の底泥堆積厚の関係式の導入

コーン貫入量と含水比の関係はべき関数式(3.4.1)で表されるという結果が報告されている。この式を積分を用いた式に変換し直すと式(3.4.2)のとおりとなる。

$$w = 10^n \cdot p^m \quad (3.4.1)$$

$$\Leftrightarrow 10^{-n} = \frac{1}{w} \cdot p^m$$

$$\Leftrightarrow 10^{-n} = \int_0^p \frac{1}{w} \cdot m \cdot z^{m-1} dz \quad (3.4.2)$$

ここに、 w : 含水比 (%)、 p : コーン貫入量 (mm)、 n, m : 土の種類に応じた定数を意味する。コーン貫入量とレッド貫入量が、自由落下する物体の貫入量という観点での類似性を有することから、上記式(3.4.2)を準用し、レッド貫入量と底泥密度の増分がべき関数で表されると仮定すると次式のとおりとなる。

$$10^{-n} = \int_0^{d_{Lead}} (\rho(z) - \rho_0) \cdot m \cdot z^{m-1} dz$$

ここに、 $\rho(z) - \rho_0$: 底泥密度の増分 (kg/m³)、 d_{Lead} : レッド貫入量 (m) を意味する。この式を 3.3.1 の式(3.3.1)を用いて、変換し直すと次式のとおりとなる。

$$10^{-n} = \int_0^{d_{Lead}} (\Delta\rho \cdot \left(-\frac{Z}{D}\right)^{0.25}) \cdot m \cdot z^{m-1} dz$$

ここに、 $\Delta\rho$: 任意の泥深 (D) における表層密度からの増分 (kg/m³) を意味する。3.3.1 で底泥密度の鉛直分布の実測値を近似した際に観測地点毎に算出した $\Delta\rho$ および D を用い、観測地点毎に算出される 10^{-n} の変動係数が最小となる場合の m (無次元) を算出すると 0.62 であった。定数である 10^{-n} を γ (kg/m^{2.38}) と表記し、上記式を表記しなおすと次式のとおりとなる。

$$\gamma = \int_0^{d_{Lead}} (\Delta\rho \cdot \left(-\frac{Z}{D}\right)^{0.25}) \cdot 0.62 \cdot z^{0.62-1} dz \quad (3.4.3)$$

$$\Leftrightarrow \gamma = \int_0^{d_{Lead}} (\rho(z) - \rho_0) \cdot 0.62 \cdot z^{0.62-1} dz$$

表-3.4.1 は式(3.4.3)における観測地点毎の γ 値を示す。表-3.4.1 に示すようにレッド停止位置のばらつきなどが影響し、 γ 値は 16.5~72.9 kg/m^{2.38} と幅があり、中央値 41.3 kg/m^{2.38} であった。

表-3.4.1 式(3.4.3)における観測地点毎の γ 値

荊田港						
St.K1	St.K2	St.K3	St.K4	St.K5	St.K6	St.K7
16.5	41.9	28.9	32.5	18.5	42.3	32.0
東京東航路周辺海域				名古屋港		
St.T1	St.T2	St.T3	St.T4	St.N1	St.N2	
41.3	44.2	39.8	53.7	72.9	54.0	

この中央値と 3.3.1 の式(3.3.1)を用いて、上記式(3.4.3)を表記し直すと次式のとおりとなる。

$$41.3 = \int_0^{d_{Lead}} \Delta\rho \cdot \left(-\frac{Z}{D}\right)^{0.25} \cdot 0.62 \cdot z^{0.62-1} dz \quad (3.4.4)$$

$$\Leftrightarrow 41.3 = \Delta\rho \cdot 0.62 \cdot \left(-\frac{1}{D}\right)^{0.25} \cdot \int_0^{d_{Lead}} z^{0.62-1+0.25} dz$$

$$\Leftrightarrow 41.3 = \Delta\rho \cdot 0.62 \cdot \left(-\frac{1}{D}\right)^{0.25} \cdot \frac{1}{0.62 + 0.25} \cdot d_{Lead}^{0.62+0.25}$$

$$\Leftrightarrow 41.3 \cdot \frac{0.62 + 0.25}{0.62} \cdot \frac{1}{d_{Lead}^{0.62+0.25}} = \Delta\rho \cdot \left(-\frac{1}{D}\right)^{0.25}$$

$$\left[\begin{array}{l} \text{上記式の各項の単位は下記の通りである。} \\ \text{左辺：} 41.3 \text{ [kg/m}^{2.38}\text{]}, \frac{0.62+0.25}{0.62} \text{ [無次元]}, \frac{1}{d_{Lead}^{0.62+0.25}} \text{ [1/m}^{0.62+0.25}\text{]}. \\ \text{右辺：} \Delta\rho \text{ [kg/m}^3\text{]}, \left(-\frac{1}{D}\right)^{0.25} \text{ [1/m}^{0.25}\text{]}. \end{array} \right]$$

一方、周波数 400 kHz による測深結果と底泥密度 1,200 kg/m³ 位置の差、すなわち底泥密度 1,200 kg/m³ 以下の底泥堆積厚を $d_{1,200}$ とし、当該値を式(3.3.1)を用いて表すと次式のとおり

りとなる.

$$\rho(d_{1,200}) - \rho_0 = \Delta\rho \cdot \left(-\frac{d_{1,200}}{D}\right)^{0.25} \quad (3.4.5)$$

$$\Leftrightarrow \rho(d_{1,200}) - \rho_0 = d_{1,200}^{0.25} \cdot \Delta\rho \cdot \left(-\frac{1}{D}\right)^{0.25}$$

$$\Leftrightarrow d_{1,200}^{0.25} = (\rho(d_{1,200}) - \rho_0) / \left(\Delta\rho \cdot \left(-\frac{1}{D}\right)^{0.25}\right)$$

$$\left[\begin{array}{l} \text{上記式の各項の単位は下記の通りである.} \\ \text{左辺 : } d_{1,200}^{0.25} \text{ [m}^{0.25}\text{].} \\ \text{右辺 : } \rho(d_{1,200}) - \rho_0 \text{ [kg/m}^3\text{]}, \Delta\rho \text{ [kg/m}^3\text{]}, \left(-\frac{1}{D}\right)^{0.25} \text{ [1/m}^{0.25}\text{].} \end{array} \right]$$

ここに, $\rho(d_{1,200})$: 1,200 kg/m³, ρ_0 : 表層密度を意味する. 今回表層密度は密度計による実測値平均から 1,020 kg/m³とした. しかし, 今後密度計の測定値の誤差を含めて検討していく必要がある. 式(3.4.5)に式(3.4.4)から導かれる $\Delta\rho \cdot (-1/D)^{0.25}$ を代入することでレッド貫入量 (d_{Lead}) と底泥密度 1,200 kg/m³以下の底泥堆積厚 ($d_{1,200}$) の関係性は次式のとおりとなる.

$$d_{1,200}^{0.25} = (\rho(d_{1,200}) - \rho_0) / \left(41.3 \cdot \frac{0.62 + 0.25}{0.62} \cdot \frac{1}{d_{Lead}^{0.62+0.25}}\right)$$

$$\Leftrightarrow d_{1,200} = (\rho(d_{1,200}) - \rho_0)^4 \cdot \left(\frac{0.62}{41.3 \cdot (0.62 + 0.25)}\right)^4 \cdot (d_{Lead}^{0.62+0.25})^4$$

$$\Leftrightarrow d_{1,200} = 92.8 \cdot d_{Lead}^{3.48} \quad (3.4.6)$$

$$\left[\begin{array}{l} \text{上記式の各項の単位は下記の通りである.} \\ \text{左辺 : } d_{1,200} \text{ [m].} \\ \text{右辺 : } 92.8 \text{ [1/m}^{2.48}\text{]}, d_{Lead}^{3.48} \text{ [m}^{3.48}\text{].} \end{array} \right]$$