

港湾技研資料

TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF LAND, INFRASTRUCTURE AND TRANSPORT, JAPAN

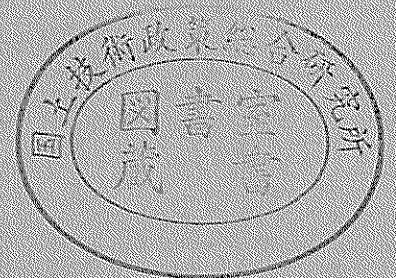
No. 1002 June 2001

干潟底泥の強度特性と環境要因との関係

—コーン貫入試験を用いた調査—

奥	宮	英	治
桑	江	朝	呂
萩	本	幸	将
小	沼		晋
三	好	英	一
野	村	宗	弘
中	村	由	行

国土交通省港湾技術研究所



目 次

要 旨	3
1. まえがき	4
2. 底質強度の測定方法	4
2.1 調査方法の選定	4
2.2 ポータブルコーン貫入試験の方法	5
3. 自然干潟(盤洲干潟)における調査	6
3.1 盤洲干潟の概要及び調査方法	6
3.2 コーン貫入試験結果	6
3.3 コーン貫入抵抗値 q_c に及ぼす諸要因	8
4. 造成干潟(西浦干潟)における調査	9
4.1 西浦干潟の概要及び調査方法	9
4.2 調査結果及び考察	10
5. 干潟実験施設を用いた実験	12
5.1 実験施設及び実験の概要	12
5.2 実験方法	13
5.3 実験結果及び考察	14
5.4 底質強度が生物に与える影響	16
6. 各干潟環境による土の強度定数への影響	16
7. 結論	17
8. あとがき	18
謝辞	18
参考文献	18
付録A 盤洲干潟の海象・気象データ	20
付録B 西浦干潟におけるコーン貫入試験全データ	22

**Relationships between Sedimentary Strength and Environmental Factors
in Intertidal Flats
- Experiments by Using Cone Penetration Tests -**

**Eiji OKUMIYA ^{*1}
Tomohiro KUWAE ^{*2}
Yukimasa HAGIMOTO ^{*3}
Susumu KONUMA ^{*2}
Eiichi MIYOSHI ^{*4}
Munehiro NOMURA ^{*2}
Yoshiyuki NAKAMURA ^{*5}**

Synopsis

Sediment characteristics are key factors influencing the nature of tidal flat ecosystems. Although sedimentary strength would be one of the important sedimentological properties for the colonization of benthic communities, little is yet known of it.

We conducted field experiments in a natural tidal flat (Banzu) in Tokyo Bay, Japan, and a constructed tidal flat (Nishiura) in Mikawa Bay, Japan, to obtain the data of sedimentary strength (cone resistance) by the Cone Penetration Test (CPT) and to investigate relationships between the cone resistance and other physical parameters including granulometry and topography. We also collected the data of the cone resistance and macrofaunal densities from the Intertidal Flat Experimental Facility (IFEFF) in the Port and Harbour Research Institute to examine the influence of macrofauna on the cone resistance of the IFEFF sediments.

For the natural intertidal sediments, spatial variability in the cone resistance values was large although temporal variability in those was small. The cone resistance values for the natural intertidal sediments correlated with elevation or silt/clay content. For the created tidal flat, the cone resistance values increased over time due to the sediment compaction by external forces. The strength in the created tidal flat was also stimulated with the fall of the interstitial water table accompanied by topographical changes. The results of the data from the IFEFF showed that not only physical factors but also biological factors affect sedimentary strength. Bioturbation by infauna would avoid the sediment compaction by external forces.

Key Words: Tidal flat ecosystems, Sediment characteristics, CPT, Cone penetration resistance

*1 Trainee of Environment Purification Laboratory, Marine Environment Division (Chuo Fukken Consultants)

*2 Member of Environment Purification Laboratory, Marine Environment Division

*3 Former Member of Environment Purification Laboratory (Hakata Port and Airport Construction Office, Kyusyu Regional Bureau, Ministry of Land, Infrastructure and Transport)

*4 Senior Reserch Engineer, Marine Environmental Division

*5 Chief of Environment Purification Laboratory, Marine Environment Division
3-1-1, Nagase Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-468-44-5019 Fax : +81-468-44-6243 e-mail:kuwae@ipc.phri.go.jp

干潟底泥の強度特性と環境要因との関係

－コーン貫入試験を用いた調査－

奥 宮 英 治 *1
桑 江 朝比呂 *2
萩 本 幸 将 *3
小 沼 晋 *2
三 好 英 一 *4
野 村 宗 弘 *2
中 村 由 行 *5

要 旨

干潟における底質特性は、干潟の生態系にとって重要な環境要素のひとつである。底泥の硬さも、底生生物の生息を考えるうえで重要であると考えられる。しかし底泥の強度特性や、それに及ぼす環境要因について言及した研究例は極めて少ない。そこで、本研究では干潟底泥の強度特性に関する基礎的な知見を得ることを目的として、比較的容易に試験実施が可能であるポータブルコーン貫入試験を用いて、干潟の表層付近における底質強度の調査を実施した。調査は自然干潟である盤洲干潟、造成干潟である西浦干潟で行った。さらに干潟実験生態系である干潟実験施設を用いて、底生生物が底質強度に及ぼす影響も検討した。

盤洲干潟においては、経時的な底泥の強度変化が小さいことが分かった。また、底質強度は岸沖方向に大きくなる傾向がみられ、底質強度と底質に作用する水圧等の外力や粒度分布との間に相関がみられた。大きな地形変化が進行する造成後間もない西浦干潟においては、底泥が硬質化する傾向が確認された。干潟実験施設の実験水槽に人為的に生物を投入した際の底泥の強度に対する影響を調べた結果、コメツキガニのように底質に巣穴を掘る生物の活動によって、干潟の底質が軟質な状態で維持されることが確認された。

キーワード：干潟生態系、底質環境、底質硬度、貫入抵抗

*1 海洋環境部海水浄化研究室研修生（中央復建コンサルタンツ株式会社）
*2 海洋環境部海水浄化研究室長
*3 前海水浄化研究室（現九州地方整備局博多港湾空港工事事務所）
*4 海洋環境部主任研究官
*5 海洋環境部海水浄化研究室長
〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1 国土交通省港湾技術研究所
電話：0468-44-5019 Fax：0468-44-6243 e-mail:kuwac@ipc.phri.go.jp

1. まえがき

近年、環境の保全や生態系を育む環境創造などに対する社会的要請が高まっている。多様な自然が存在し、人間の諸活動の盛んな空間である沿岸域においても同様に、特に内湾の干潟や浅場などの水環境の保全や創造と豊かな生態系を育む海域環境との調和が強くと求められている。こうした要請に応えて、運輸省(現国土交通省)港湾局では平成6年3月に自然との共生を目指した港湾環境政策として「環境と共生する港湾<エコポート>」政策(運輸省港湾局1994)を策定した。また、ミチゲーションの概念(例えば水環境創造研究会 1997)の普及により、沿岸部の浅場や干潟の保全や創造は、今後ますます盛んになると考えられる。

沿岸の干潟は、自然との共生における最も重要な視点のひとつに位置づけられ、その機能や造成技術に関する研究が盛んに行われている。そのなかで干潟の底質環境は、底生生物の生息や生態系にとって重要な環境要因であるとの知見が示されており、これまでに、粒度分布、有機物量、酸素還元電位などの底質環境と底生生物の分布との間に関連性が見いだされている(栗原, 1988; 古川ら, 1999)。一方、干潟の底泥の硬さも、底生生物の生息を考えるうえで重要な環境要素のひとつであると考えられる。阿久津ら(1995)は、北海道に造成されたアサリの養殖場において、干潟底泥の硬さについてコーン貫入試験を用いた調査を行い、底泥の硬さ(硬度)とアサリの生息密度との関係調べ、よく締まった硬質な底質を有する地域ではアサリが生息しにくいとの知見を示している。また、上月ら(2000)もコーン貫入試験による貫入抵抗値を用いて、最干潮時からの比高やシルト含有率と関連づけて、スナガニ類の生息場の環境を示し、その棲み分けについて報告している。Meadowsら(1998)は干潟の表面付近の底泥の硬さを室内土質試験によって調べ、生息するベントスによる底質強度や粒度分布の差異を報告している。しかし、いずれの研究も干潟の底泥の硬さと、そこに生息する生物との関連性は示しているものの、底質の強度特性そのものやそれに及ぼす影響要因については言及がなされていない。地盤工学の分野で、非常に緩い状態で堆積した土の力学的特性に対する研究例(半沢, 1974)がみられるが、多様な底生生物が生息する干潟の底質のような土に対する力学挙動を調べたものはみられない。干潟の底質強度に影響を及ぼす要因としては、波浪や潮汐による繰り返し荷重、底質の粒子形状、粒度組成や鉱物組成、干潮時の地下水位や含水状態、さらには底生生物によるバイオターベーション等が考えられる。しかし、これらについて実際に調査を行い、底質強度との関連を示した研究例は殆どみられず、干潟底泥の強度

特性については未だ不明な点が多いといえる。そこで、本研究では干潟の表面付近における底質強度と、それに及ぼす影響要因に関する基礎的知見を得ることを目的として、現地調査および干潟実験施設を用いた実験を行い、各種要因について検討を行った。調査及び実験では比較的簡易に試験を行うことができるポータブルコーン貫入試験を用いた。現地調査は千葉県木更津市沖に広がる自然干潟である盤洲干潟、愛知県蒲郡市地先に造成された西浦干潟でそれぞれ実施した。また、生物活動が底質強度に及ぼす影響を調べるために港湾技術研究所が所有する干潟実験施設を用いた実験を行った。

本論文ではまず第2章でポータブルコーン貫入試験の試験方法と、同試験の試験誤差を調べるために実施した事前調査結果について述べる。第3章では自然干潟における底泥の強度特性について、千葉県木更津市沖の盤洲干潟における調査結果と、盤洲干潟の底質強度に及ぼす影響要因について検討を行う。第4章では造成干潟における調査事例として、平成11年6月に愛知県蒲郡市地先に造成された西浦干潟における調査結果を報告する。第5章では底生生物の生息が干潟の底質強度に及ぼす影響について、干潟実験施設を用いた実験から検討を行う。また、第6章では各調査・実験結果から、干潟の各環境要因が土の強度定数に対して、具体的にどのように働いたのかについて考察を行う。そして、第7章で研究で得られた主要な結論を述べる。

2. 底質強度の測定方法

2.1 調査方法の選定

底質の強度特性を調べる方法は、底質を乱さない状態でサンプリングし、その試料を実験室に持ち帰って試験を行う室内試験と、直接干潟上で試験を行う原位置試験の二通りが考えられる。しかし、調査対象の底質が砂質土である場合は、サンプリングや輸送の際に試料を乱す可能性が高いため、室内試験の実施は困難である。原位置試験は原位置ベーンせん断試験や孔内水平載荷試験等のように、土の強度を直接測定する方法と、簡易貫入試験やコーン貫入試験等のように、土の締めまり具合や固さの相対値を調べるサウンディングに分けられる。本研究では、これらの試験方法の中から、干出時間が限られる広い干潟内で効率的な調査を行うことが可能であることを選定条件とし、ポータブルコーン貫入試験(以下、単にコーン貫入試験と称す)を用いることとした。本試験は人力でコーンを連続的に貫入させた際の貫入抵抗値(q_c 値)から、簡易的に軟弱地盤中の土層構成や軟弱層厚を確認することに用いられる。試験方法は非常に簡易であるため、短時間で調査を行うことが可能

であり、また試験者の熟練を要しない。適用地盤は軟弱地盤であれば、砂質土・粘性土・腐植土など幅広い。さらに、試験装置は軽量かつコンパクトであるため、広い干潟での調査には非常に便利である。試験対象土が粘性土の場合は、試験結果と一軸圧縮強度との相関が示されており、具体的に土の強度定数を推定することも可能である。一方、試験対象土が砂質土の場合は、土の縮まり具合を示す指標にはなるが、直接土の強度定数やせん断強度を知ることは出来ない。しかしながら、本試験から得られる q_c 値は底質の相対的な縮まり具合や硬さを示すものであるため、底質の強度特性の基礎的なデータは得られるものと考えられる。

2.2 ポータブルコーン貫入試験の方法

試験装置は、図-1に示すように、先端コーン、ロッド、貫入用ハンドル及び、測定装置(環状ばね型力計及びダイヤ

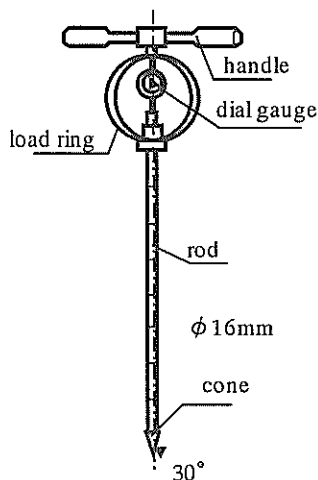


図-1 ポータブルコーン貫入試験器



写真-1 コーン貫入試験状況

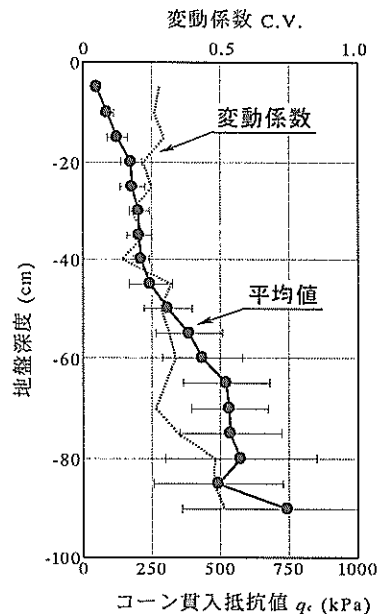


図-2 予備試験によるコーン貫入抵抗の平均値(実線)及び変動係数(点線)と地盤深度の関係(エラーバーは標準偏差を示す)

ルゲージ)からなる。試験方法は地盤工学会基準(社団法人地盤工学会 1995)に基づき、人力により1cm/sの貫入速度で連続的に先端コーンを底質に貫入させ、5cm貫入ごとに測定装置の読み値を記録した。調査深度は地盤深度の浅い部分に的を絞って、干潟の表層1m付近まで行うものとした。試験の状況写真を写真-1に示す。

本研究では、コーン貫入試験を干潟で実施した際に現れる試験結果のばらつきを評価するために、千葉県木更津市に位置する自然干潟(盤洲干潟)において予備試験を実施した(盤洲干潟については次章で紹介する)。予備試験は干潟上の同一地点において10回のコーン貫入試験を行った。図-2に予備試験結果を示す。図中の実線は10回の試験値の平均値を示し、エラーバーは標準偏差を示している。また、点線はデータのばらつきを無次元量として表す変動係数(標準偏差/平均値)を示す。これによると、地盤深度40cm程度以浅においては変動係数が概ね0.25以下となるが、それ以深においては変動係数は漸増し、ばらつきの程度が大きくなる傾向がある。本試験は試験方法や試験器の構造が非常に単純であり、試験者の熟練度を要さないため、試験自体の誤差は比較的小さいものと考えられる。従って、試験結果に生じるばらつきの原因は、干潟の底質のばらつき、すなわち底質中に存在する貝殻片や底生生物の存在などによる地盤が不均一さであると考えられる。このように干潟の底泥の硬さには多少のばらつきがあ

ることを考慮して、本研究では1回の調査につき、各測点で3回のコーン貫入試験を実施し、そこで得られたコーン貫入抵抗値 q_c の平均値を用いることとした。本試験により得られたコーン貫入抵抗値 q_c は、地盤の硬さや締め具合を示す指標となる。本研究では、この q_c 値を底質の強度として評価することにする。

3. 自然干潟(盤洲干潟)における調査

3.1 盤洲干潟の概要及び調査方法

自然干潟における調査は、千葉県木更津市地先に位置する盤洲干潟において実施した。盤洲干潟及び観測点の位置を図-3に示す。盤洲干潟は東京湾内湾に発達した前浜干潟である。底質は粒子径が均一な細砂により構成されている。干潟の勾配はおよそ1/1600である。盤洲干潟における過去の地形変化の観測結果によると、同地点の地形は小規模な変動を繰り返しながらも、長期的に見ると安定しており、平成10年頃からは堆積傾向にあるとの報告が古川ら(2000)によってなされている。

本研究では現地調査を行うにあたって、小櫃川から続く湊筋と江川漁港から沖合に伸びたクリークに挟まれた領域に6カ所の定点を設置した(図-3)。そして各定点の近傍で1999年6月から定期的にポータブルコーン貫入試験を実施した。また、底質の粒度試験及び水準測量による地盤高の

表-1 盤洲干潟における調査日と調査項目

調査日	調査内容
1999/06/02	コーン貫入試験, 水準測量
1999/09/09	コーン貫入試験, 水準測量
2000/02/22	コーン貫入試験, 水準測量
2000/06/22	コーン貫入試験
2000/07/31	コーン貫入試験
2000/08/30	コーン貫入試験
2000/09/28	コーン貫入試験, 粒度試験
2000/10/12	コーン貫入試験
2000/11/14	コーン貫入試験
2001/01/25	コーン貫入試験

測定も実施している。表-1にこれらの現地調査日を示す。なお、参考までに、盤洲干潟の海象、気象の基礎的データとして、2000年8月28日～9月12日と2000年10月10日～10月25日にSt.1, 3地点で観測された潮位、水温、塩分、流向・流速及び、アメダスに基づく木更津市の風速・風向データを巻末付録に添付した。

3.2 コーン貫入試験結果

図-4に盤洲干潟の各定点におけるコーン貫入試験結果として、各地盤深度におけるコーン貫入抵抗値(以下 q_c 値と称す。)を示す。また、図-5には図-4の試験結果を地表面下30cmまで拡大したものを示す。両図は、各定点毎に観測日をインデックスとしてプロットしており、ここから q_c 値の経時的な変化を読みとることができる。これによると、GL-50cm程度以浅では、一部を除いて q_c 値は各定点ともにほぼ同様の値を示している。このことから、盤洲干潟における地表面付近の底質強度は変動が少なく、経時的にほぼ安定しているものと判断できる。これは自然干潟である盤洲干潟が、底質に作用する波浪や潮汐等の外力に対して、力学的に安定状態に達しているためであると考えられる。一方、GL-50cm程度以深については、第2章の事前調査で示したように、各調査時の q_c 値にばらつきが大きくなる。

次に、各定点における底質強度の差に着目する。図-6に各定点ごとに全調査の試験結果を平均したものを示している。これにより、まず q_c 値は全ての定点で、調査深度の範囲内では深度方向に対して緩やかに増加する傾向があることが分かる。また、各定点の同一深度における q_c 値を比較すると、GL-50cm程度以浅においてはLINE-A, LINE-Bと

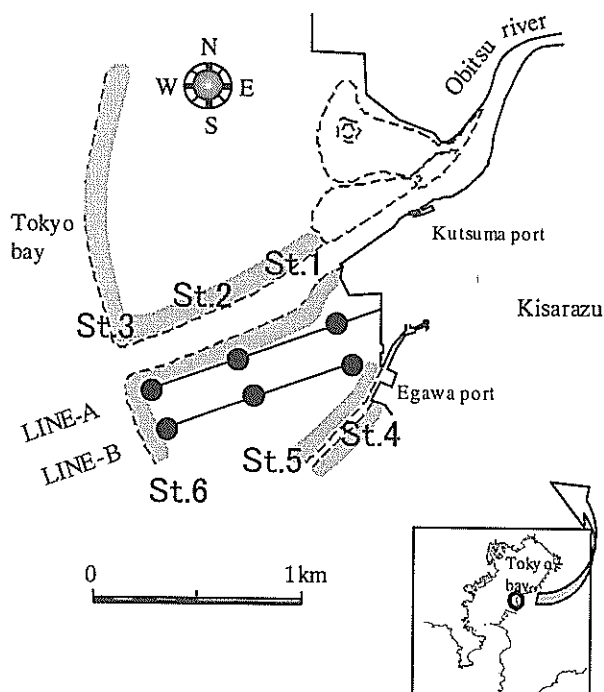


図-3 盤洲干潟の位置及び観測点の配置

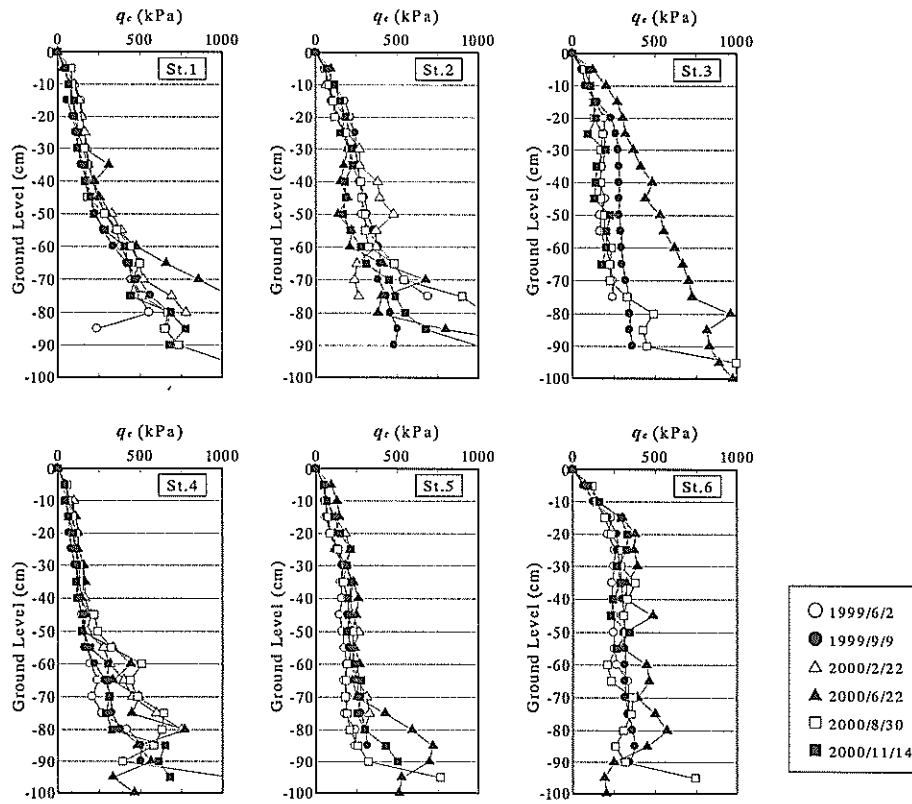


図-4 盤洲干潟の各定点における地盤深度GLとコーン貫入抵抗 q_c の関係 (GL 0 ~ -100cm)

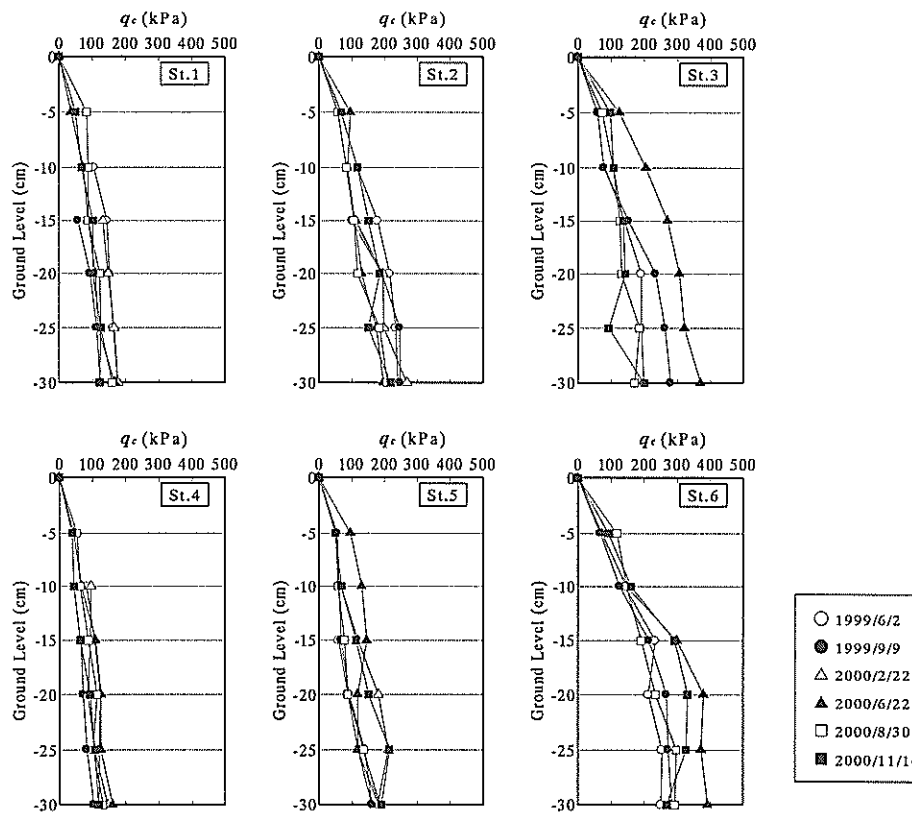


図-5 盤洲干潟の各定点における地盤深度GLとコーン貫入抵抗 q_c の関係 (GL 0 ~ -30cm)

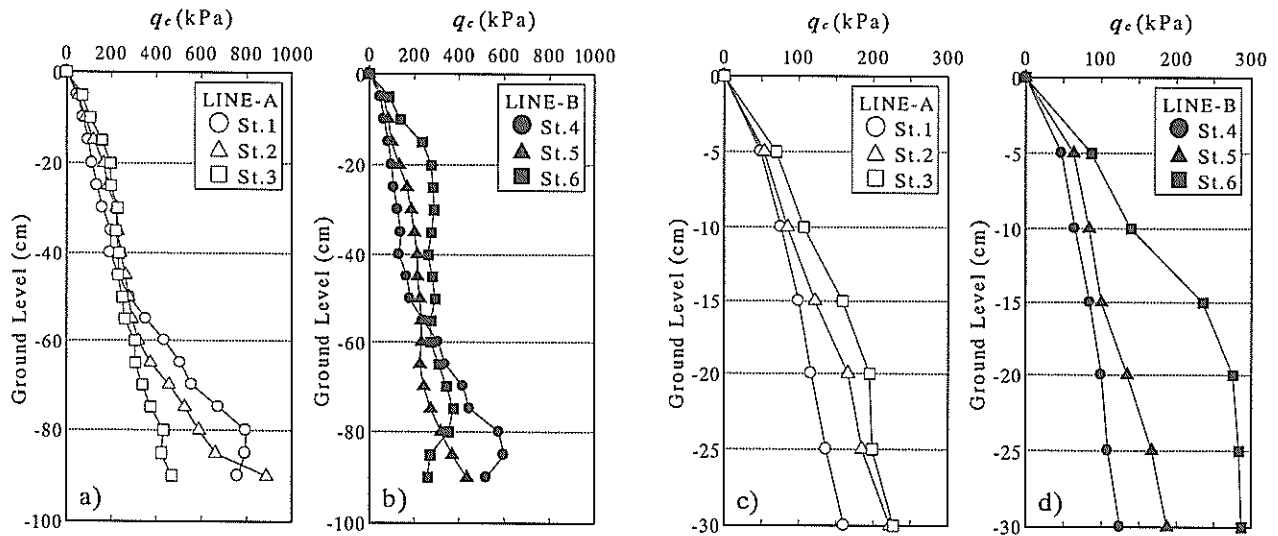


図-6 盤洲干潟の各定点における地盤深度GLとコーン貫入抵抗 q_c の平均値の関係
 a):LINE-A (GL 0～-100cm), b):LINE-B (GL 0～-100cm), c):LINE-A (GL 0～-30cm), d):LINE-B (GL 0～-30cm)
 (エラーバーは省略)

もに q_c 値は沖側になるにつれて増大する傾向がみられる。地盤深度が比較的浅い部分においては、底質強度が経時的に安定している。一方、GL-50cm付近では、各定点の q_c 値は概ね200～300kPaを示し、各定点間の差は殆どなくなる。また、GL-50cm以深については、岸側の q_c 値が沖側と比べて大きめの値を示す傾向がみられた。

3.3 コーン貫入抵抗値 q_c に及ぼす諸要因

本調査で得られた q_c 値は、底質強度を示すひとつの指標であると解釈できる。底質強度は、外力による土の締め固め効果や拘束圧(土被り圧)の大きさ、土粒子の形状や粒度・鉱物組成、地下水位や土の含水状態、底生生物によるバイオターベーション等によって決まると考えられる。ここでは、各観測点の地盤高と粒度組成に関する測定データをもとに、 q_c 値とこれらの要因との関係について考察を行う。

干潟底質に作用する主な外力として、波浪や潮汐による繰り返し荷重の載荷が挙げられる。図-7は平成9年から平成12年の間に定期的に海水浄化研究室が盤洲干潟の定点St.1-St.4の各地点において観測を行った際に得られた全データから、満潮時の水深と同時刻の有義波高及び風速を三次元的にプロットして平面的に表したものである。なお、ここで示す風速は木更津市のアメダスのデータを使用している。これによると盤洲干潟における有義波高は、風速および水深が大きいために高くなる傾向にある。調査を行った範囲内の風速は、同一日であれば全域でほぼ一定で

あると考えることができるので、有義波高は各観測点における水深、すなわち地盤高に依存するものと考えられる。図-8はコーン貫入試験実施時の地盤高と泥深20cmにおけるコーン貫入抵抗値をプロットしたものである。ここで図中に示しているデータは、水準測量とコーン貫入試験を同日に実施することが出来たもの(1999.6.2, 1999.9.9, 2000.2.22の観測結果)だけを表示している。また図中の地盤高は、古川ら(2000)による研究で設置された仮ベンチマークを基準とした標高を示している。図-8から、地盤高が低くなるにつれてコーン貫入抵抗が大きくなる傾向が読みとれる。これは、地盤高が低い地点ほど波浪や潮汐による荷重が大きいため、地盤高が高い地点に比べて底質が締め固められているためであると考えられる。しかし、St.4の q_c 値など、一部に他の地点よりも小さめの値を示す地点もみられるため、底質強度は波浪や潮汐以外の影響も受けているものと考えられる。

次に、底質の粒度分布に着目する。図-9および表-2は、平成12年9月に採取した底質の粒度試験結果を整理したものである。盤洲干潟の底質は細砂(粒径0.075-0.25mm)が80%以上を占め、平均粒径は概ね0.15-0.20mmで、各定点ともに類似した粒度組成を呈している。また、細粒分(シルト・クレイ)含有率F.C.は、St.1-St.5においては重量比で1-3%程度、St.4では9%程度の含有が確認され、岸沖方向に含有量が減少する傾向にある。これは、前述のように沖側の方が波高が高く、また流速が大きい(巻末付録A)ため、沖側の底質中の細粒分が流され、比較的穏やかな環

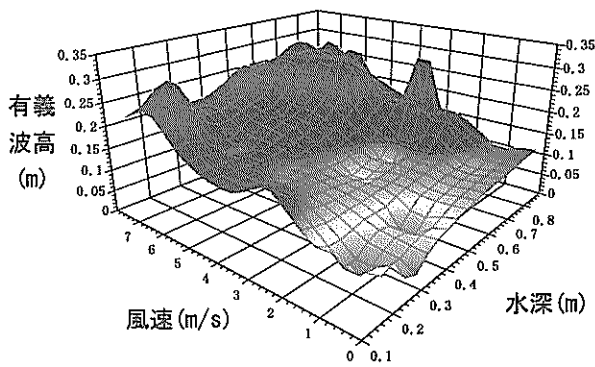


図-7 盤洲干潟における有義波高-風速-水深の関係

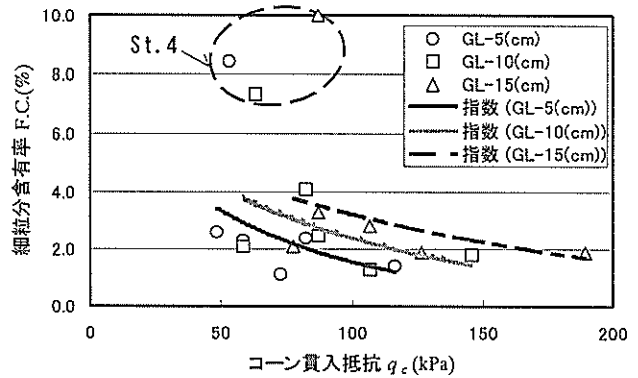


図-10 各地盤深度における細粒分含有率と q_c 値の関係

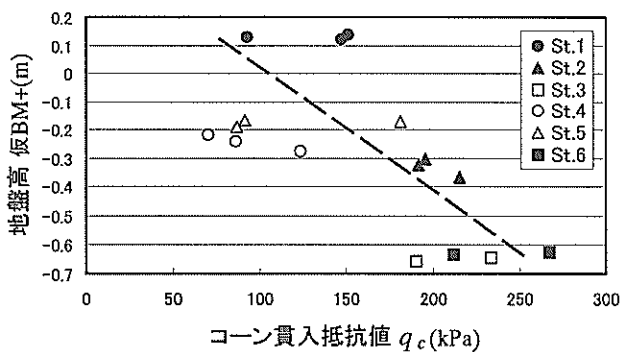


図-8 地盤高と q_c 値の関係

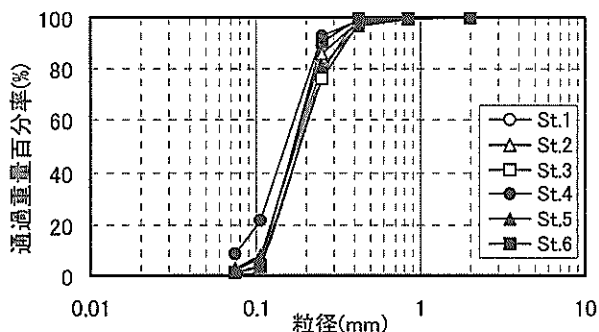


図-9 盤洲干潟における各定点の粒度分布 (GL 0-5cm)

表-2 盤洲干潟における各定点の細粒分含有率

深度 (cm)	St.1	St.2	St.3	St.4	St.5	St.6
0-5	2.4	2.3	1.1	8.4	2.6	1.4
5-10	2.5	4.1	1.3	7.3	2.1	1.8
10-20	3.3	2.8	1.9	11.1	2.1	1.9

単位 (%)

境である岸側に堆積しやすいためであると考えられる。なお、St.4は本研究における観測点の中では突出して細粒分を多く含有している。St.4付近は夏季から秋頃にかけて発生したアオサ等の海藻類が漂着する地域でもあり、本研究に用いた観測点の中でも特に静穏な地域である。そのため、St.4付近での細粒分の沈降・堆積量が特に多くなったものと考えられる。ここで、底質強度と細粒分含有率との関連をみるために、図-10にGL-5cm、-10cm、-15cmにおける細粒分含有率と、 q_c 値との関係を示す。これによると、細粒分の増加に伴って q_c 値が小さくなる傾向が読みとれる。これは細粒分が多く含まれていると、土粒子間の噛み合いが妨害されるためであると考えられる。ただし、細粒分含有率は波浪や流速の大きさと密接に関連しているため、前述の外力の差による影響も多分に含まれているものと考えられる。

以上において、波浪等による外力や底質の粒度分布による底質強度への影響を検討したが、St.4では図-8や図-10に示されるように、他の定点とは異なる底質強度特性がみられた。これについては第5章で述べる。

4. 造成干潟(西浦干潟)における調査

4.1 西浦干潟の概要及び調査方法

図-11に西浦干潟の位置図及び調査地点を示す。西浦干潟は愛知県蒲郡市西浦地区に浚渫土砂を用いて平成11年6月に造成された干潟である。干潟は三河湾に突き出した岬の付け根に位置している。造成された干潟の大きさは東西約300m、南北約200mである。干潟の北東岸から下地川が流入しており、干潟一帯で汽水域を形成している。

西浦造成干潟の竣工時の形状は、護岸から図-11に示すLine-5の沖合40~50m付近までは平坦に仕上げられ、更にはその沖合100mの区間で現地盤に擦り付けるように造成さ

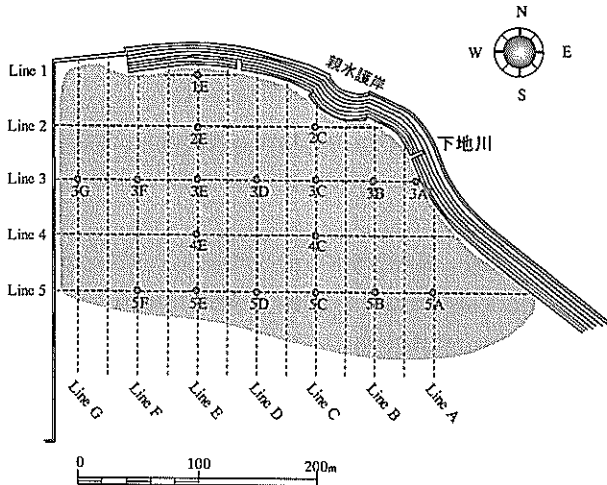
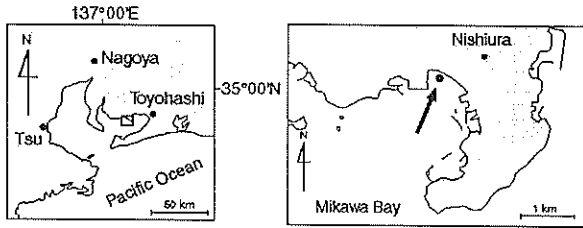


図-11 西浦干潟の位置及び観測点の配置

表-3 西浦干潟の調査日及び調査項目

調査日	調査内容
1999/10/26	コーン貫入試験, 水準測量
1999/11/24	コーン貫入試験, 水準測量
2000/01/22	コーン貫入試験, 水準測量, 粒度試験
2000/03/21	コーン貫入試験, 水準測量
2000/06/06	コーン貫入試験, 水準測量
2000/08/17	コーン貫入試験, 水準測量
2000/10/16	コーン貫入試験, 水準測量
2000/11/27	コーン貫入試験, 水準測量
2001/01/29	コーン貫入試験, 水準測量

れた。現地では古川ら(2000)により、平成11年10月から定期的に水準測量が行われ、地形変化の様子が観測されている。その結果、現地の地形は造成後時々刻々と変化しているとの報告がなされている。具体的には、Line-4付近に高低差約1mのバーが形成され、そのバーが岸方向に移動する様子が観測されている。また、バーの外側では浸食が起り、内側から護岸にかけては堆積が進んできている。このように、造成後ドラスティックな地形変化を続けてい

る西浦干潟の図-11中に示す測点において、ポータブルコーン貫入試験による底質強度の測定を行った。また、水準測量及び測点3C, 3E, 5Eにおいて粒度試験も実施した。表-3に調査日及び調査項目を示す。

4.2 調査結果及び考察

図-12に西浦干潟の測点3C, 3E, 及び5Cにおける粒度分布を、表-4に細粒分含有率および平均粒径を示す。西浦干潟の底質は細砂(粒径0.075-0.25mm)の割合が97%以上を占め、前述の盤洲干潟よりも多い。また、細粒分含有率は1%前後で、盤洲干潟と比較すると若干少なめである。図-12および表-4で各測点毎の粒度分布を比較すると、各測点ともほぼ同様の粒度分布を呈するが、沖側の5C地点の細粒分含有率が3C, 3E地点に比べて若干小さめの値を示す。

西浦干潟における調査結果のうち、図-13, 図-14に縦・横断の代表断面として、Line-C及びLine-3のコーン貫入抵抗値 q_c (上)と地形断面(下)の推移を示す。ここでは、図を読みとり易くするために、4回分の現地調査結果について表示している。全調査データについては、巻末付録Bに掲載している。また、ここで示す地盤高とは、本調査のために設けた仮ベンチマークを基準とした標高を表している。まず、本調査を開始した1999年10月26日における観測結果で岸沖方向の地形断面(図-13下)をみると、干潟の比較的沖側の測点4Cと5Cの間に標高が高い地域がみられる。これが前述の本干潟で確認されるバーである。このバーの沖側(5C)と岸側(2C, 3C, 4C)の q_c 値を比較すると、バーの沖側では内側と比べて大きな値を示していることが分かる。これは、バーの内側が比較的静穏であるのに対して、沖側は波浪の影響を直接受けるため、底質が締め固められたことによるものと考えられる。バーは時間の経過に伴って岸側に移動し、2000年8月17日、11月28日の観測時には、測点3C付近にバーの頂上が達している。その高さは干潟造成時に比べて約2mも高く、測点3Cは満潮時においても水没しなくなった。これに伴って測点3Cにおける q_c 値は他の観測点に比べて特に大きな値を示し、底泥がより硬質な状態になっている。これはこの地点の地盤高が高くなったことによって、地表面に対して地下水位が相対的に低下したことにより、土の有効土被り圧が上昇し、底質の強度が増加したことによるものであると考えられる。一方、調査期間中は常にバーの内側の比較的静穏な地域に位置していた測点2Cにおいても、地盤高はほぼ一定であったにもかかわらず q_c 値の増加傾向がみられた。また、東西断面Line-3の観測結果(図-14)においても、底質強度が増加する傾向がみられた。これは、バーの内側の静穏域にお

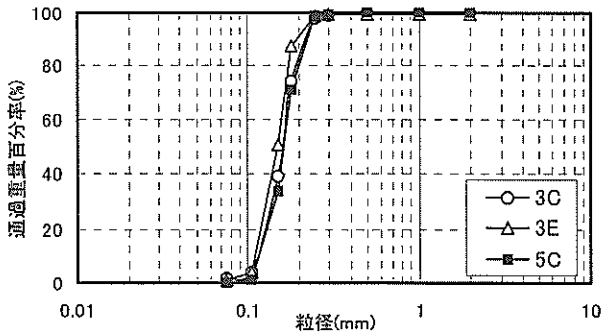


図-12 西浦干潟における各測点の粒度分布 (GL 0-5cm)

表-4 底質の細粒分含有率および平均粒径

深度 (cm)	細粒分含有率 F.C. (%)			平均粒径 D_{50} (mm)		
	3C	3E	5C	3C	3E	5C
0-5	1.6	0.9	0.2	0.16	0.15	0.16
5-10	1.6	1.0	0.4	0.16	0.16	0.16
10-20	0.7	0.5	0.9	0.16	0.16	0.16

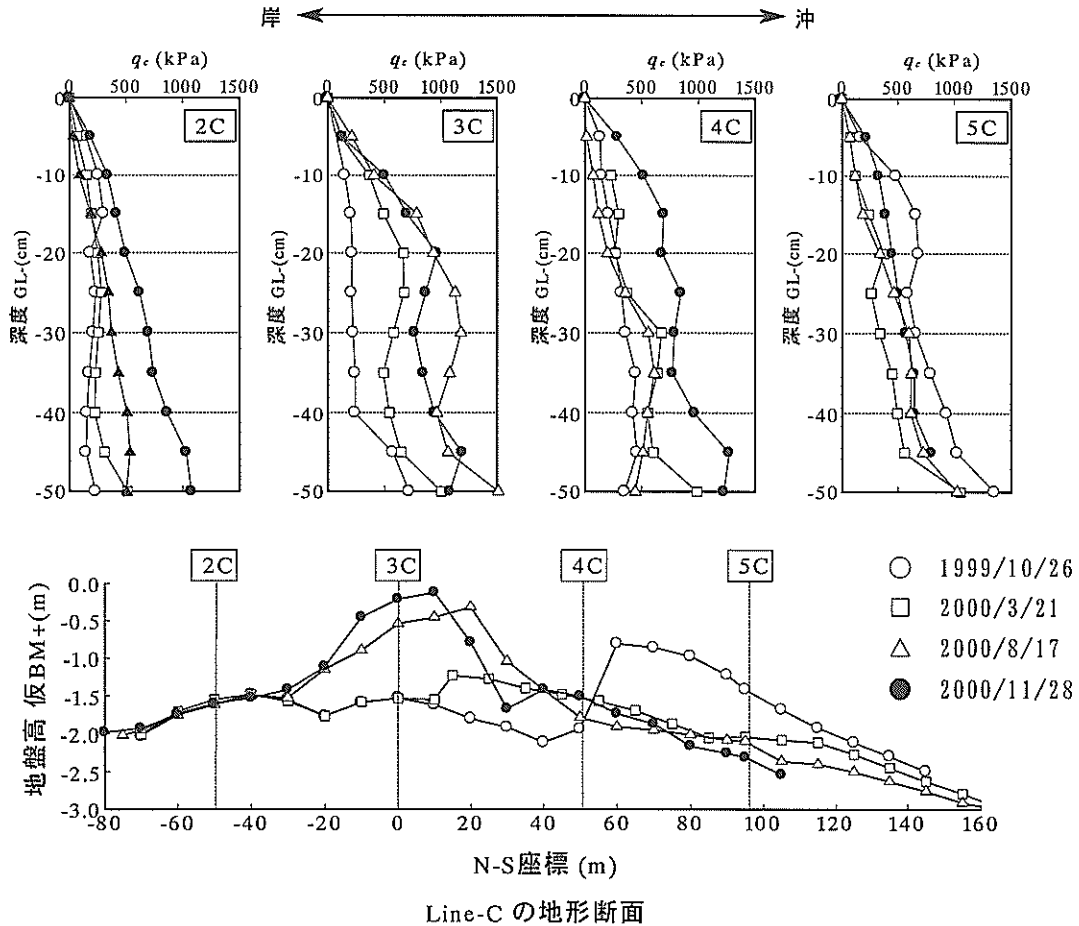


図-13 西浦干潟 (Line-C) におけるコーン貫入抵抗の平均値(上)と地形断面(下)の推移 (エラーバーは省略)

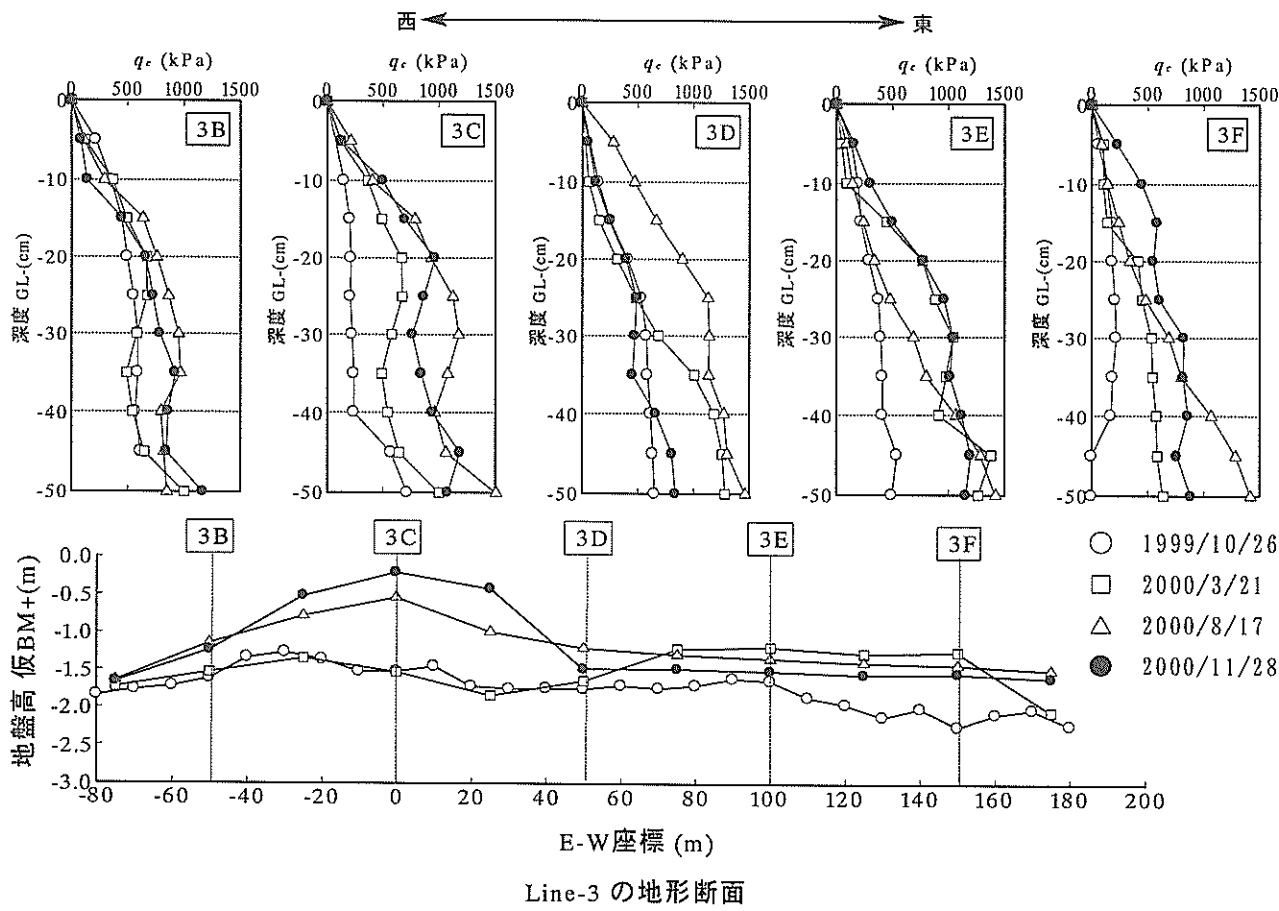


図-14 西浦干潟(Line-3)におけるコーン貫入抵抗の平均値(上)と地形断面(下)の推移 (エラーバーは省略)

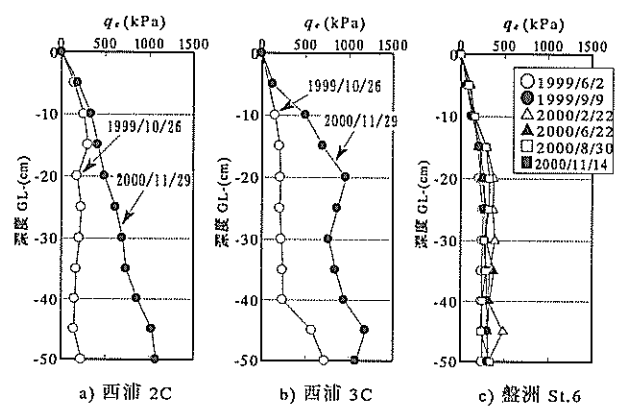


図-15 西浦干潟と盤洲干潟における q_c 値の比較

いても、波浪等の荷重が繰返し作用することによって、徐々に底泥が締め固められたことが原因であると考えられる。以上のように、西浦造成干潟では全体的に q_c 値が増加し、底泥が硬質化する傾向がみられた。

図-15は西浦干潟の2Cおよび3C地点(図-13に加筆)と、

盤洲干潟のSt.6(第3章 図-6に加筆)の q_c 値の比較を示す。これによると、西浦造成干潟の調査を開始した時点では、測点2C, 3C地点の底質強度は、盤洲干潟と比較的近い値を示していた。しかし、わずか一年ほどで西浦干潟の q_c 値は盤洲干潟の約2~3倍ほどまで大きくなった。これは西浦干潟は干潟としては若齢であり、様々な外的要因に対して安定となるような底質強度へ移行している段階にあるためであると考えられる。

5. 干潟実験施設を用いた実験

5.1 実験施設及び実験の概要

これまでに干潟の底質強度に影響を及ぼす物理的要因について述べてきた。しかし、干潟の底質強度を決定する要因には物理的作用だけでなく、干潟に生息する生物の活動による底質の攪乱等の影響もあると考えられる。そこで、本章ではメソスケールの実験生態系を用いた実験を行い、生物が生息することによる底質強度に及ぼす影響について検討を行う。

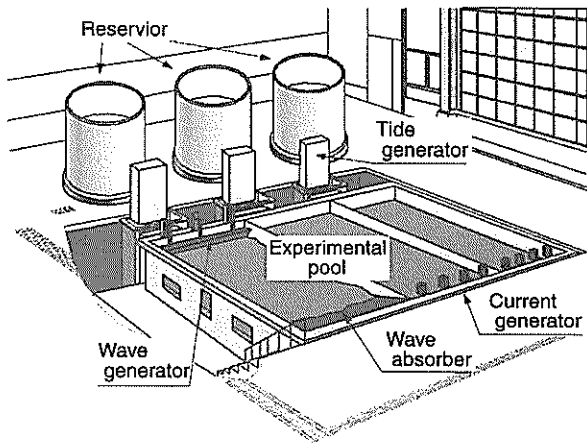


図-16 干潟実験施設の見取り図

本研究ではメソスケールの実験生態系として、国土交通省港湾技術研究所が所有する干潟実験施設を利用した。図-16にその見取り図を示す。本施設は自然光を取り入れるために屋根が全面ガラス張りとなっている。施設には長さ7m、幅3mの水槽が備えられており、盤洲干潟産の底泥が泥深50cmになるように投入されている。この底泥は投入前に天日で乾燥させているため、成体の底生生物は初期条件として含まれていない。実験水槽には海水を導入し、12時間30分で1潮汐が起きるように潮汐が与えられている。水槽中の海水は、週に1～3回の頻度で久里浜湾からポンプで汲み上げた無処理の海水と交換をしている。本実験施設では1994年12月の実験開始以来、人為的な生物投入無しに、実験生態系を創出することに成功している。実験水槽に加入したすべての生物は、久里浜湾の海水（例えば卵・孢子・幼生・種子など）由来である。その他、干潟水槽の制御条件・仕様・研究成果については、細川ら（1996）や桑江ら（1997, 2000a, 2000b）に述べられている。

5.2 実験方法

実験に際して、3つある干潟実験施設の実験水槽のうちのひとつ（水槽-3）を、幅1mごとに3つに区分して、それぞれPool-a, Pool-b, Pool-cとした。それぞれの水槽の底泥は、鍬を用いて人力で攪拌して軟弱な状態に仕上げ実験の初期状態とした。なお、本実験で用いた底泥は、これまで連続運転を行ってきた干潟実験施設の土砂を、そのまま流用している。従って、人力による底泥の攪乱後においても、各水槽には多少の底生生物が一様に生存している状態である。実験水槽の概要図及び実験水槽の作成状況をそれぞれ図-17, 写真-2に示した。底泥は図-18に示すように、泥深0～5cmの平均粒径 D_{50} は0.17mm、細粒分（シルト・

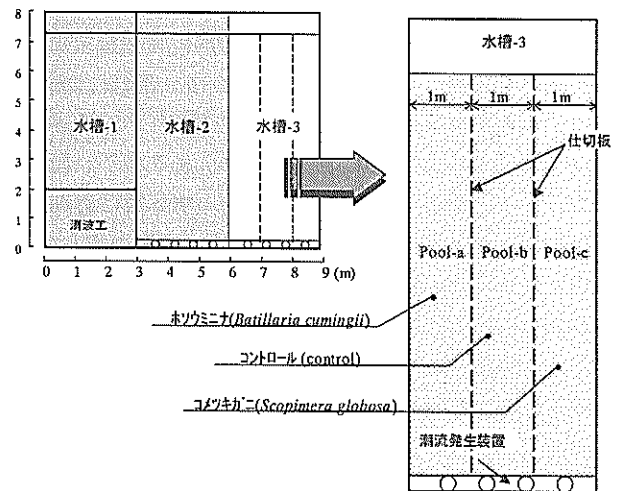


図-17 生物投入実験水槽の概要図

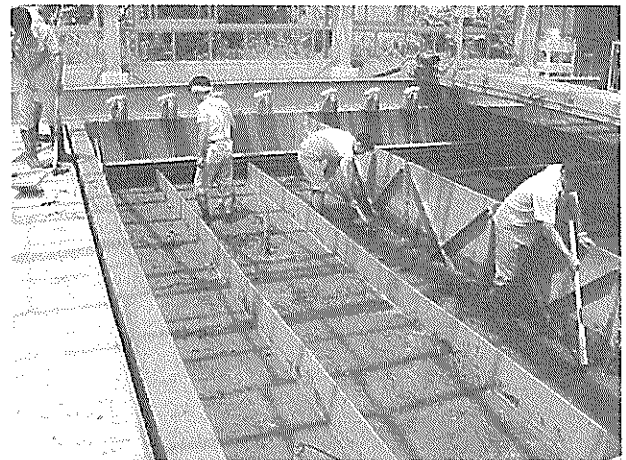


写真-2 実験水槽の作成状況
（水槽に仕切板を設けて底質を攪拌している様子）

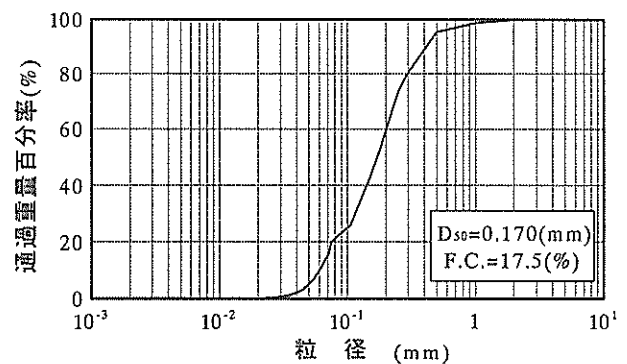


図-18 実験水槽の粒度分布

クレイ)含有率F.C.は17.5%であり、盤洲干潟や西浦干潟の粒度分布に比べて、細粒分が多くなっている。このようにして作成した各実験水槽に、盤洲干潟の高潮帯に生息する代表的な生物として、ホソウミニナ(*Batillaria cumingii*)とコメツキガニ(*Scopimera globosa*)を選定して、Pool-aにホソウミニナを、Pool-cにコメツキガニをそれぞれ投入した(写真-3, 写真-4)。投入した生物の個体数は盤洲干潟の岸付近における生息密度に近くなるように考慮して、ホソウミニナは500個体、コメツキガニは200個体とした。Pool-bは生物の投入を行わずに比較対象(コントロール)とした。生物投入後は約3ヶ月間にわたって、定期的に底泥の硬さの変化をコーン貫入試験で調べた。測定方法は第2章で述べた通りであるが、本実験では深度方向の測定ピッチを2.5cmとした。以上の実験に加えて、投入した生物以外に生息する生物相を確認するために、実験開始前、2ヶ月後及び5ヶ月後に、各水槽に生息するマクロベントス量の調査も実施した。マクロベントスの採取法は、泥深20cm

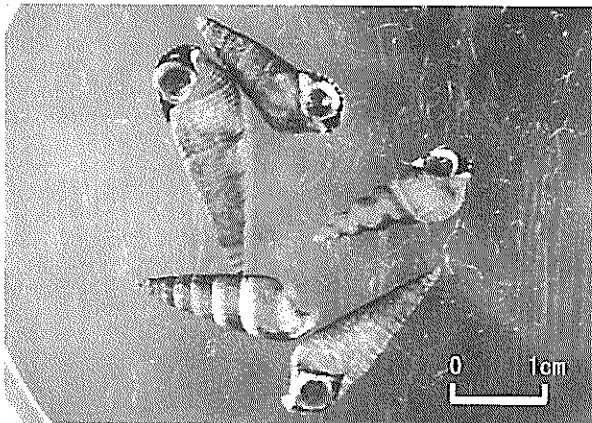


写真-3 ホソウミニナ(*Batillaria cumingii*)

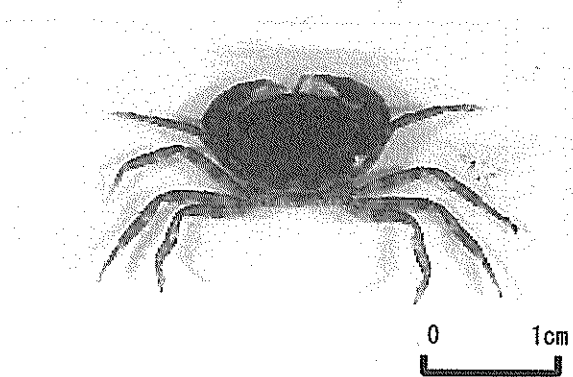


写真-4 コメツキガニ(*Scopimera globosa*)

までの底泥を内径8.6cmのアクリルパイプによって採取し、1mm目のふるいでふるい、残った試料を同定・計数した。

5.3 実験結果及び考察

図-19に各実験水槽におけるコーン貫入試験結果を、図-20に深度GL-5cm、-10cm、-15cmおよび-20cmにおけるコーン貫入抵抗値 q_c の経時変化を示す。これらの図によると、各水槽とも生物投入前(図中の●印)の貫入抵抗は、GL-10cmで約200kPa、GL-20cmで約400kPaと、同様の値を示している。生物を投入しなかったpool-b(コントロール)では、時間経過とともにGL-20cm程度までの範囲で底泥の硬質化がみられる。これは底泥の自重や潮汐荷重による底泥の圧密に伴う強度増加が主な原因であると考えられる。次に、pool-c(コメツキガニ投入水槽)をみると今回の実験期間内では強度増加はみられず、生物投入前の軟弱な状態が維持されていた。これは、コメツキガニが地表面下10cm程度まで盛んに巣穴を掘ることによるものと考えられ、このことは干潟の底質強度は、波浪等の物理的な作用だけでなく、そこに生息する底生生物の活動による影響も受けていることを示す。一方、pool-a(ホソウミニナ投入水槽)の試験結果をみると、実験開始後の24日間ほどはコントロール水槽と同様に表層の底泥は硬質化傾向を示す。これはホソウミニナが底泥に巣穴を掘る生息形態をとらないため、コントロール水槽と同様に底泥の圧密により強度増加が進行したことによるものと考えられる。しかし、実験開始から約30日後から底泥は軟質化する傾向がみられた。図-21に本実験と平行して実施した各実験水槽のマクロベントス調査結果のうち、人為的に投入した生物以外では最も優占的な生物種であるコケゴカイ(*Ceratonereis erythraeensis*) (写真-5)の総湿重量の推移を示す。これによると、pool-a(ホソウミニナ投入水槽)ではコケゴカイの総重量が他の水槽に比べて多く、実験開始から5ヶ月後には他の水槽のおよそ4倍の値を示した。pool-aでコケゴカイが増殖した詳しい原因は不明である。コケゴカイの際立った増殖が確認された時期は、底質に軟質化傾向がみられた後である。しかし、幼体のコケゴカイはこれよりも早期に発生していたものと考えられる。そして、このことに伴う底質環境の変化が底質の軟質化傾向に寄与したものと推察できる。以上のことから、本実験により、干潟の底質強度は物理的要因のみならず、バイオターベーション等の生物的要因の影響も受けるということが明らかになった。

第3章の盤洲干潟における調査結果のなかで、St.4における底質が他の定点に比べて軟質であり、外力や粒度分布以外の要因が影響している可能性があることを述べた。そ

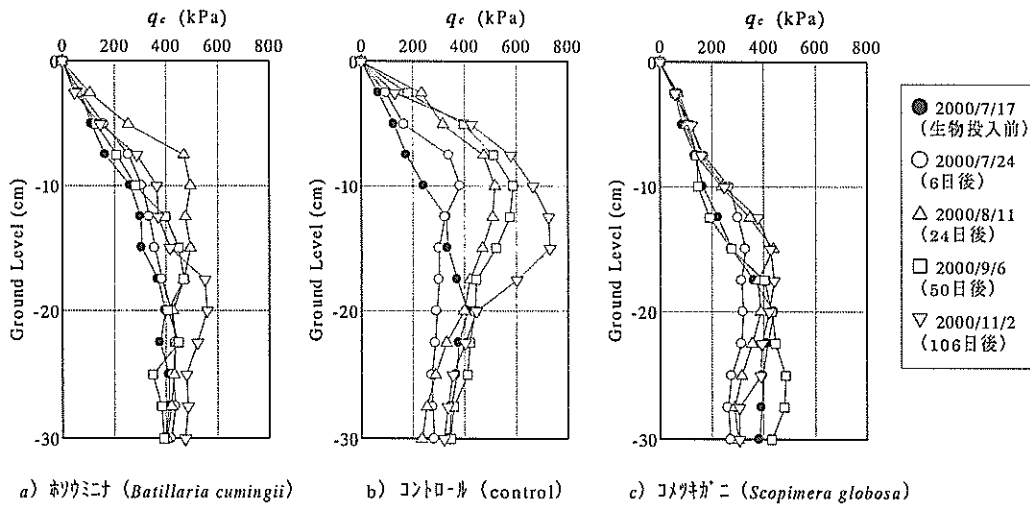


図-19 各実験水槽における q_c 値と地盤深度の関係

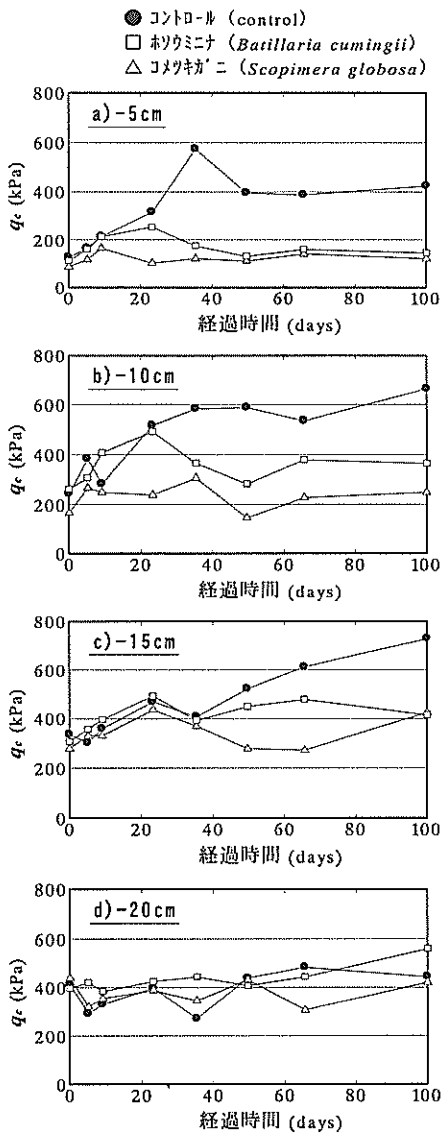


図-20 深度別底質強度の経時変化

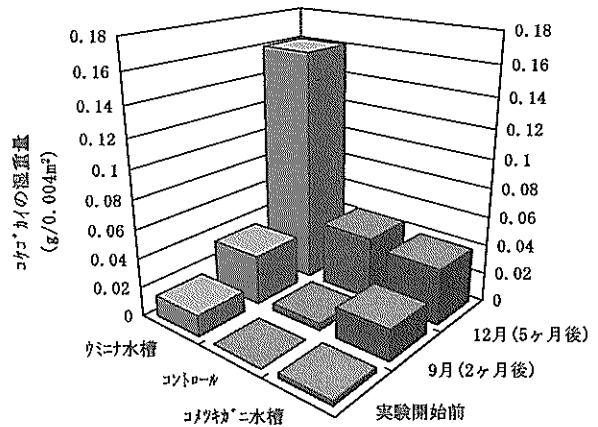


図-21 各水槽におけるコケゴカイの湿重量の経時変化

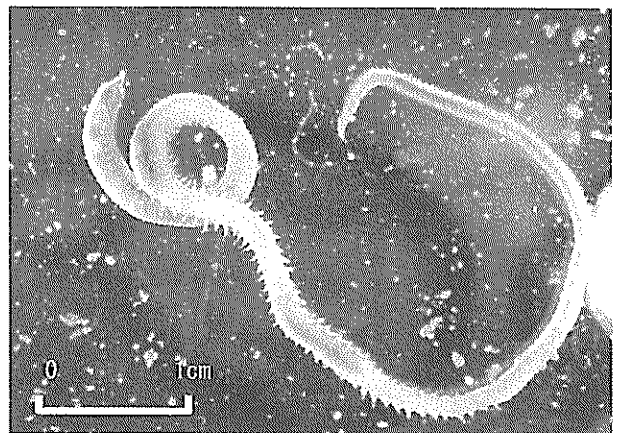


写真-5 コケゴカイ (*Ceratonereis erythraeensis*)

表-5 盤洲干潟における生物の生息孔数
(50cm×50cmの観測結果)

定点 No.	孔径 (mm)	1996			1997				1998
		7/30	9/11	11/21	2/13	7/23	9/18	11/12	2/26
St.1	0-5	13	0	4	5	19	22	21	6
	5-10	0	5	6	0	3	1	5	0
	10<	0	0	0	0	1	0	0	0
St.3	0-5	12	16	5	0	23	19	12	2
	5-10	14	10	2	0	3	1	3	0
	10<	0	0	0	0	0	0	0	0
St.4	0-5	10	6	18	4	14	26	23	1
	5-10	1	16	18	4	11	21	23	31
	10<	0	0	0	0	2	0	8	1

そのことに関連して、表-5に1996年から1998年の間に実施した現地観察の結果から、各定点の生物の生息孔数を示す。これにより、盤洲干潟のSt.4付近では、孔径5mm以上の巣穴を掘る比較的大型の底生生物が他の定点に比べて多く生息していること分かる。従って、盤洲干潟のSt.4の底質強度には、これらの生物によるバイオターベーションが底質強度に寄与していたものと考えられる。

5.4 底質強度が生物に与える影響

これまででは、底質強度が生物に与える影響について述べた。その中で生物の活動が底質強度に影響を及ぼすことが分かった。しかし、底質の硬さが逆に底生生物の分布に影響を及ぼすことも考えられる。図-22は盤洲干潟の各定点におけるアサリ及びシオフキの0.25m²あたりの分布数と

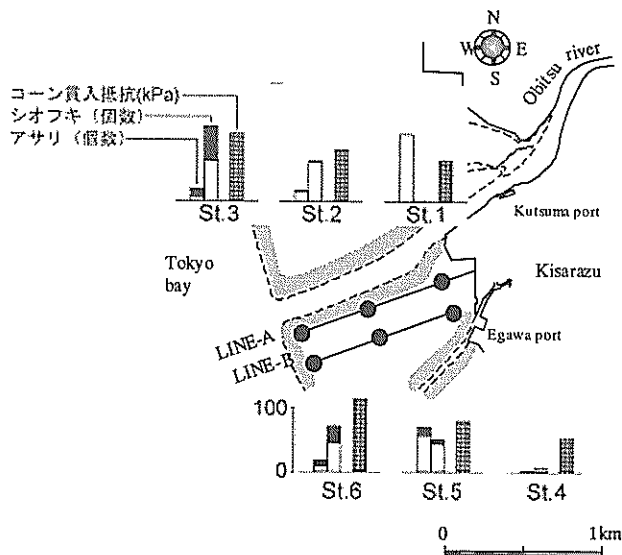


図-22 盤洲干潟での二枚貝の分布数と q_c 値

コーン貫入抵抗値の関係を示している。二枚貝の個数の黒い部分は殻長2cm以上であった個数を示す。また、コーン貫入抵抗値はGL-5cmと-10cmでの平均値である。この図から、盤洲干潟においてはコーン貫入抵抗値が大きい地点において殻長2cm以上の成貝が多く生息していることが分かる。まえがきで述べたが、阿久津ら(1995)は、北海道に造成されたアサリの養殖場において、干潟底泥の硬さをコーン貫入試験を用いて調査を行い、底泥の硬さ(硬度)とアサリの生息密度の関係を調べ、よく締まった硬質な底質を有する地域ではアサリが生息しにくいとの知見を示している。また上村ら(2000)は、コーン貫入抵抗値 q_c 値とスナガ二類の分布形態について、吉野川河口干潟において、ヤマトオサガニは q_c 値で100~200(kPa)、コメツキガニは200~300(kPa)の硬さの底質に多く分布しているとの観測結果を示している。二枚貝などの干潟に生息する生物には当然、干出時間や水温、塩分、餌量など様々な他の要因も影響を与えるため、図-22でみられた q_c 値と分布との関係は間接的なものである可能性が高い。しかし、二枚貝の分布を表現するパラメータとして、今後更なる検討を行うことは興味深い。

6. 各干潟環境による土の強度定数への影響

前章までに自然干潟、造成干潟における現地調査と、干潟実験施設を用いた実験について、結果および影響要因の考察を述べてきた。そのなかで干潟の底質強度は、多数の物理的・生物的要因に支配されていることを示した。各要因がどのようなメカニズムで底質の強度特性に寄与したのかを把握することによって、干潟の底質強度に対する理解をより深めることができるものと思われる。そこで、本章ではそれぞれの要因が、土のせん断強度を決定する土の強度定数に対して、どのような影響を及ぼしたのかについて考察を行い、干潟の底質強度が決定されるメカニズムの理解を試みる。

まず、底質強度を決定する力学的背景について考える。本研究で用いたポータブルコーン貫入試験は、インデックス試験として位置づけられるもので、直接底質の強度定数を測定することは出来ないものであることは第2章で述べた。コーン貫入試験におけるコーン貫入のメカニズムの解析手法は、Terzaghi(1943)の支持力理論を基本として様々な方法(Bishop, 1945; Yu, 1998; De Borst, 1982 など)が提案されている。しかし、ここでは現象を単純に理解するために、コーン貫入抵抗値への影響要因と、土のせん断強度との関係について考える。土のせん断強度は一般的にクーロンの破壊基準式を用いて下式のように表される。

$$\tau = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (1)$$

ここで、 τ :せん断強度、 c' :粘着力、 σ' :有効応力、 ϕ' :内部摩擦角を示す。添字の'は式(1)が有効応力表示であることを示している。粘着力 c' と内部摩擦角 ϕ' は、土のせん断強度を決定する重要なパラメータであり、強度定数と称される。粘着力 c' は界面作用や吸着水層、さらには化学的な固結作用(セメンテーション)に伴って生じる力で、粘性土のせん断抵抗はこれによって発揮される。この粘着力 c' は間隙比が小さいほど大きくなる。砂分(粒径0.075mm以上)が85%以上含まれる土の粘着力は無視できる。よって、盤洲干潟や西浦干潟の底質は $c'=0$ と考えることができる。内部摩擦角 ϕ' は粒子間の摩擦、粒子形状、粒度分布、ダイレイタンシー(せん断時の体積変化)特性などによって決まる。砂分が60%以下の土の内部摩擦角は $\phi'=0$ と考えて良く、本研究では取り扱っていないが、泥質干潟の底質はこれに相当する。また、砂分が60-85%の中間的なものについては、 c' 、 ϕ' の両要素を有していると考え(鈴木, 1988)。砂泥質干潟や港湾技術研究所の干潟実験施設の底質はこれに相当する。また、有効応力 σ' は、全応力(土被り圧を示す)から間隙水圧を差し引いたものである。以下にこれらのパラメータに対して、コーン貫入抵抗値 q_c に影響を及ぼした各種要因が、どのように寄与したのかについて考察を述べる。

(1) 外力の影響

盤洲干潟、西浦干潟、および干潟実験施設における調査によって、波浪や潮汐による荷重の繰り返し载荷といった外力による底質強度への影響が示された。これは、底質の締め具合に対して外力が支配的に作用したこと、すなわち外力が土のダイレイタンシー特性に大きな影響を及ぼした結果によるものである。よって、外力は式(1)中の内部摩擦角 ϕ' の増減に大きく寄与したものと考えられる。また、外力が作用して土が締め固められ、土の単位体積重量が増加すると、土被り圧の増加にも繋がるため式(1)中の σ' にも影響を及ぼす。

(2) 粒度分布の影響

盤洲干潟において、底質中の細粒分含有率が高くなるほど、底質強度が弱くなる傾向がみられた。底質中に細粒分が増えると、土粒子間のかみ合いを阻害するが、これは式(1)中の ϕ' への影響を意味している。

(3) 地形変化の影響

西浦干潟における調査では、外力による底質強度の増加

以外に、地形変化に伴う強度増加がみられた。地盤高が上昇すると、地下水位が地表面に対して相対的に低下する。底質中の地下水位が低下すると、土粒子に浮力が働かなくなるため、土の有効応力は増加し、式(1)中の σ' の増加につながる。

(4) 生物生息の影響

干潟実験施設を用いた実験によって、底生物による底質強度への影響が示された。本研究で示されたコメツキガニやコケゴカイによるバイオターベーションは、土のダイレイタンシー特性への影響及び、土の側方拘束圧の減少に寄与するものと考えられる。これらはそれぞれ、式(1)の ϕ' および σ' の低減に結びつくものと考えられる。一方、生物種によっては、粘液の吐出や排泄などによって、細粒分の増加や局部的な底質の硬化を引き起こすことがある。このような効果も土の強度定数 c' 、 ϕ' に影響を及ぼすものと考えられる。

7. 結論

本研究により得られた主要な結論を以下に示す。

- (1) ポータブルコーン貫入試験を用いることで、簡易的に干潟の底質強度を測定することが可能であり、また、その調査結果は物理的要因や生物的要因による底質強度への影響を反映するものであることが確認された。
- (2) 自然干潟である盤洲干潟において、底質強度の経時的な変化、および底質強度に及ぼす影響要因の検討を行い以下の知見を得た。
 - ① 盤洲干潟における底質強度は、経時的に安定しており、変化が少ない。
 - ② 各観測点の底質強度は、沖に向かって増加する傾向がみられた。
 - ③ 底質強度は地盤高との間に強い関連性がみられ、波浪や潮汐といった底質にかかる外力が大きい地点、すなわち地盤高が低い(水深が深い)地点ほど底質強度が大きくなる傾向がみられた。
 - ④ 底質強度は底質中の細粒分(シルト・クレイ)含有率と関連性があることが示された。
- (3) 造成干潟である西浦干潟について、底質強度の経時変化や干潟の地形変化との関連性について検討を行い以下の知見を得た。
 - ① 調査開始当初は沿岸に形成されたバーの沖側で大きい底質強度を示したが、静穏域であるバーの内側では、盤洲干潟に近い比較的小さな底質強度を呈していた。しかし、造成後約1年で、底質強度に約2~

Penetration testing, Vol.2, pp.457-462.

Meadows, P. S., Murray, J. M. H., Meadows, A. et al.(1998) :

Microscale biogeotechnical differences in intertidal sedimentary ecosystems. In: Black, K.S., Paterson, D. M. and Cramp, A. (eds) *Sedimentary Processes in the Intertidal Zone*. Geological Society, London, Special Publications, **139**, 349-366.

Terzaghi, K.(1943):Theoretical soil mechanics, John Wiley and Sons, Inc New York, p.118.

Yu, H. S, and Mitchell, J. K.(1998): Analysis of cone resistance: Review of methods, *J. of Geotech. and Geoenvironmental Engrg.*, Vol.124, No.2, pp.140-149.

付録A 盤洲干潟の海象・気象データ

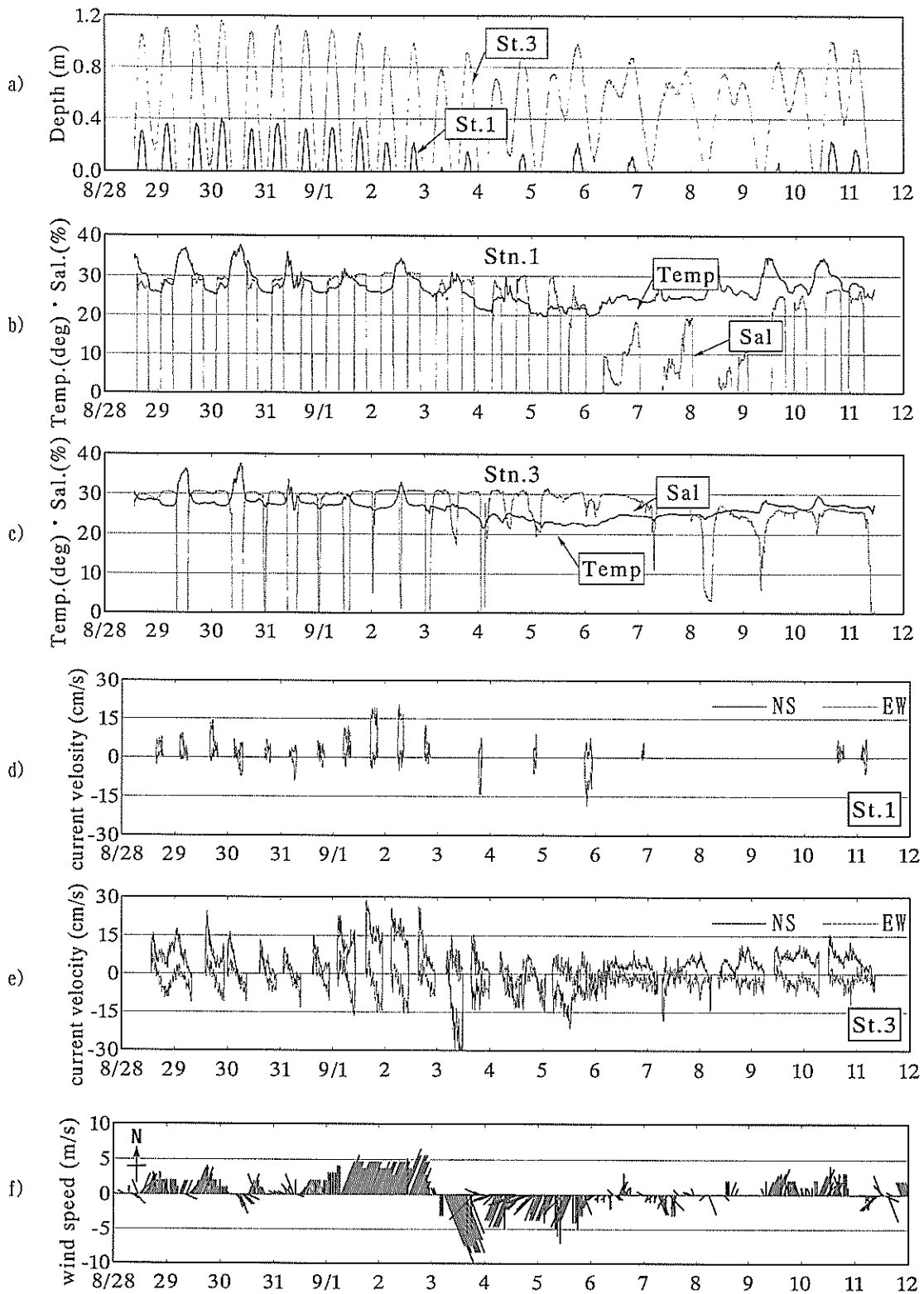


図-A.1 盤洲干潟における海象(St.1, St.3)・気象観測データ(2000/8/28-9/12)

a)水深, b)水温・塩分(St.1), c)水温・塩分(St.3), d)流向・流速(St.1), e)流向・流速(St.3), f)風速ベクトル
 風速ベクトル図は木更津市のアメダスデータを用いて作成している。

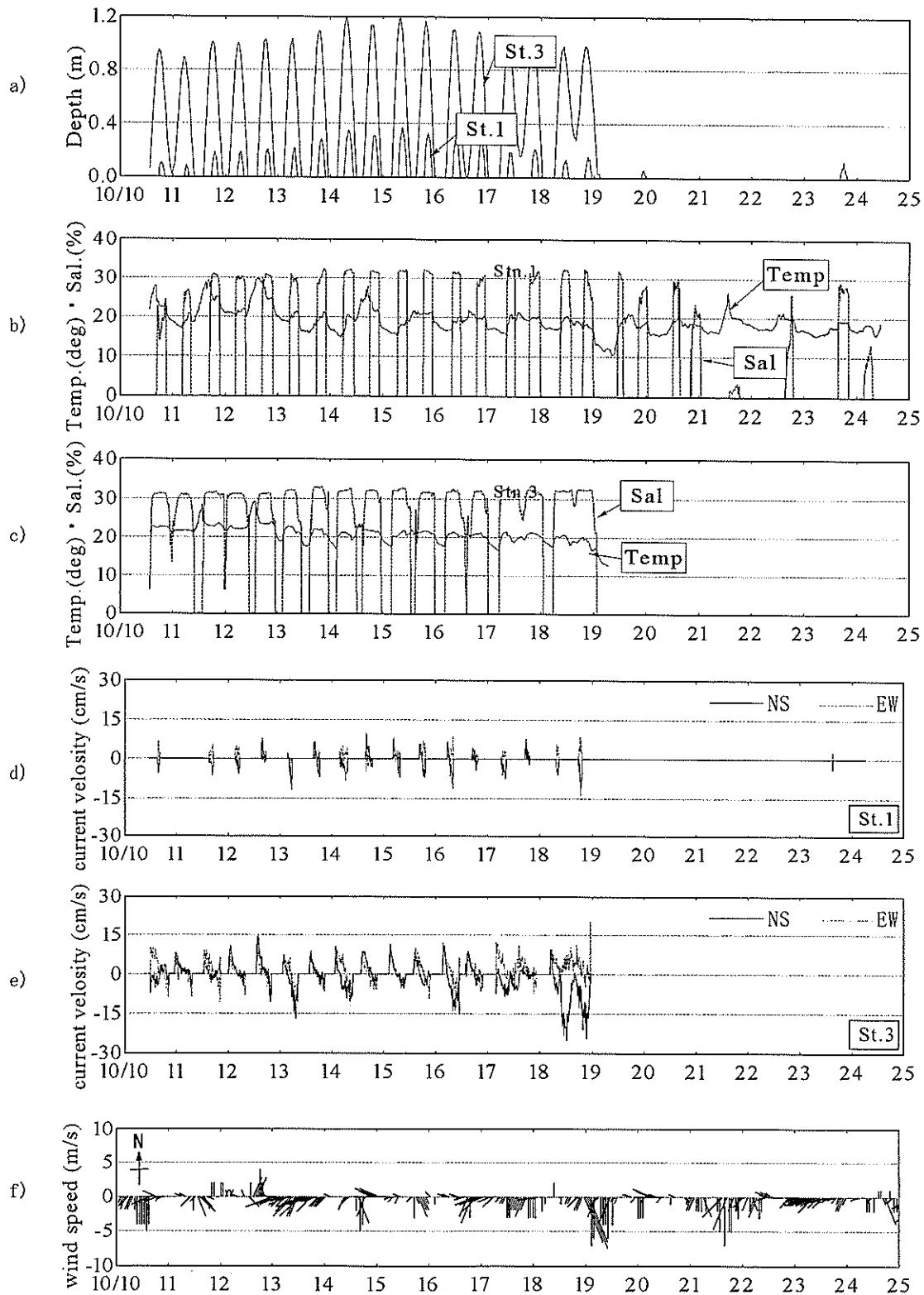


図-A.2 盤洲干潟における海象(St. 1, St. 3)・気象観測データ(2000/10/10-10/25)

a) 水深, b) 水温・塩分(St. 1), c) 水温・塩分(St. 3), d) 流向・流速(St. 1), e) 流向・流速(St. 3), f) 風速ベクトル
 風速ベクトル図は木更津市のアメダスデータを用いて作成している。

付録B 西浦干潟におけるコーン貫入試験全データ

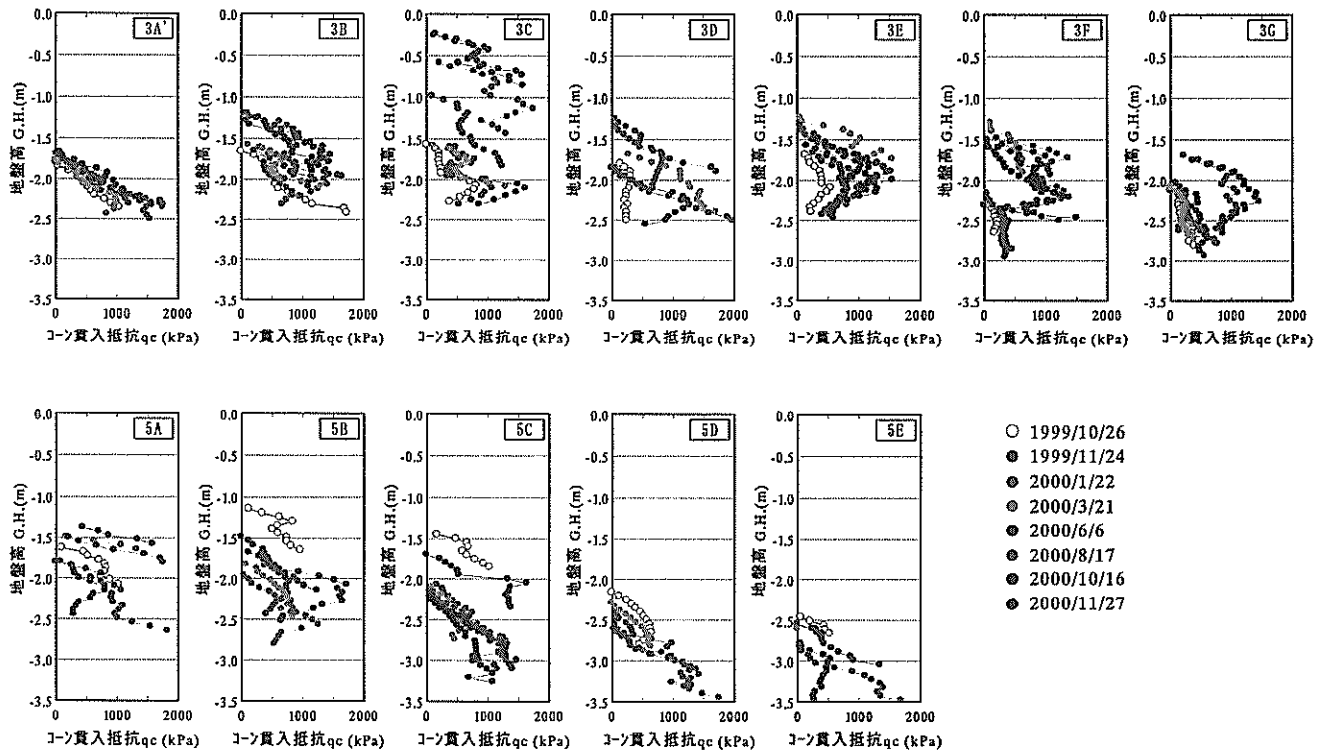


図-B.1 西浦干潟におけるコーン貫入試験結果の全データ (Line-3, Line-5)
縦軸は標高で整理しているため、地形変化に伴いプロットの初期高さが毎回異なる。

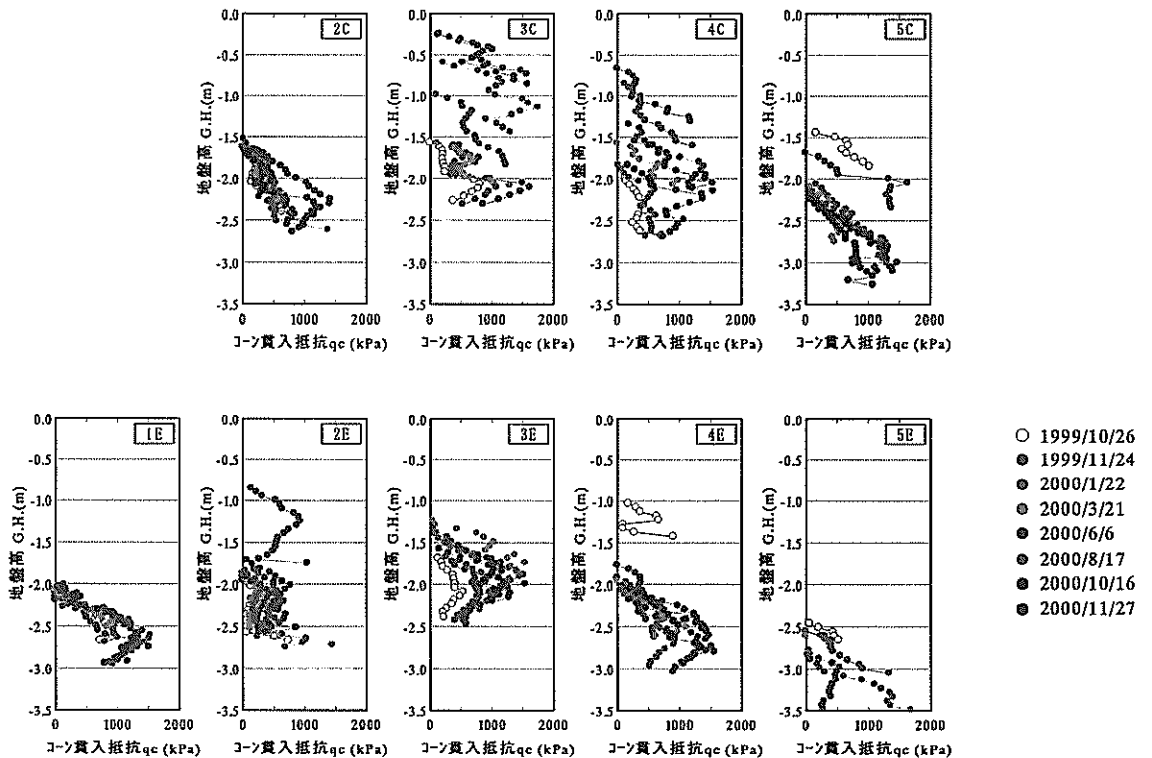


図-B.2 西浦干潟におけるコーン貫入試験結果の全データ (Line-C, Line-E)
縦軸は標高で整理しているため、地形変化に伴いプロットの初期高さが毎回異なる。

港湾技研資料 No.1002

2001. 6

編集兼発行人 国土交通省港湾技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 横浜ハイテクプリンティング株式会社

Copyright ©独立行政法人港湾空港技術研究所 2001

本報告書の転載・複写を希望される場合は、港湾空港技術研究所企画課へご連絡をお願いします。