平成２２年度有明海講座

地盤工学における干潟･海岸地形の諸問題への取り組み

～全国から有明海沿岸低平地域にかけての事例の紹介～

佐賀大学低平地沿岸海域研究センター

日野　剛徳

平成２３年2月9日

アバンセ　第3研修室

地盤工学における干潟・海岸地形の諸問題への取り組み ～全国から有明海沿岸低平地域にかけての事例の紹介～

佐賀大学低平地沿岸海域研究センター
日野　剛徳

1.　はじめに

NPO 法人有明海再生機構からの依頼を受けて，去る平成 23 年 2 月 9 日（水）の 14:30 から講演に臨んだ．講演内容はテープ起こしの後，記録に残されるという．このままでは恥ずかしい思いがあるのを始め，講演不備のしょく罪や説明不足を補う目的も兼ねて，自らの記録執筆を願い出た．本稿ではなおも筆者の主観や内容の不確かさをぬぐい去れない点がある．あらかじめお断りさせていただくことで，責を塞ぎたい．

当日の講演で準備したのは，次の 5 つの内容である．本稿ではこの順に従い，以後の記述に臨みたい．

1)過去 5 年間の地盤工学研究発表会（(社) 地盤工学会）における干潟・海岸地形の諸問題への取り組み

2)全国的な動向を眺めてきて感じる有明海の干潟（潮間帯）および海底地盤（潮下帯以深）における未解明の課題

3)有明海における海岸線の変遷と沿岸低平地の形成

4)浮泥・底泥の安定処理特性と直送安定処理プロセスに基づくコストの試算

5)浮泥・底泥の有効利用における問題点

2.　過去 5 年間の地盤工学研究発表会（(社) 地盤工学会）における干潟・海岸地形の諸問題への取り組み

地盤工学会では全国各地に会場を移しながら，活発な研究発表会が繰り広げられている[1)]．毎年 1,000 を超す講演論文が収められた CD-ROM[2)~6)]の内，過去 5 年分のものを利用し，全国の干潟・海岸地形における諸問題への取り組みについて調べてみた．

当初はキーワード検索など CD-ROM に常備の機能による検索を試みたが，作業の過程で見逃しの多さに気づいた．仕方がないので自らタイトルや目的・結論の文章などを読むスタイルに切り替え，視点の幅を広げた．途中，他の内容への興味の発散やタイムリミットを迎えてしまい，必ずしも満足な検索結果であるとは限らなくなってきた．このような前置きながら，各年の検索結果を集計したのが**表-2.1～2.5** である．

表-2.1 に示すように，平成 18（2006）年度・鹿児島市の開催では，「調査・分類」，「地盤材料」，「地盤挙動」および「地盤環境」の各分類において，干潟・海岸地形に関連する内容の発表が認められる．専門セッションとしてのクローズアップは図られておらず，それぞれの研究目的に応じて同表のような分類が生じたものと考えられる．**表-2.2** に示すように，平成 19（2007）年度・名古屋市の開催では，「地盤環境」の分類において「沿岸環境」という専門セッションが設けられた．**表-2.3**，**2.4** の平成 20（2008）年度・広島市および平成 21（2009）年度・横浜市での開催に示されるように，「沿岸環境」という専門セッションはその後，「地盤環境」の分類における「自然環境・生態系・温暖化対策」のように対象範囲の広がった名称に変遷し，関連研究の議論がなされている．**表-2.5** に示すように，平成 22（2010）年度・愛媛市の開催では，地盤工

表-2.1　第 41 回地盤工学研究発表会（鹿児島市）における関連研究の動向 [2)]

第41回地盤工学研究発表会(2006年　於　鹿児島市)

大目次	中目次	小目次	キーワード	論文番号	著者	タイトル	ページ
調査・分類		物理探査	密度検層, 超音波探査, コーン貫入試験	67	梅崎ら	RI 密度検層による有明海の底質環境調査	133-134
			底質環境, 密度検層, コーン貫入試験	68	梅崎ら	RI 密度検層による諏訪湖の底質環境調査	135-136
			現地調査, 物理探査, 海底土	69	今村ら	携行式超音波探査装置を用いた有明海湾奥部の浮泥底泥層厚の分布について	137-138
地盤材料	粘性土	物理・化学的性質	ミミズ, 圧密, 生物作用	115	佐野ら	ミミズによる粘性土の圧密	229-230
		サクション・飽和度	干潟, 地盤, 現地調査	431	宮田ら	砂質干潟の地盤調査～その1: 土質および地形特性	861-862
			干潟, 地盤, 強度	432	加藤ら	砂質干潟の地盤調査～その2: 強度特性～	863-864
	圧密沈下	沈下挙動	人工干潟, 自重圧密, 水平ドレーン	457	上田ら	潮間帯における粘性土地盤の圧密挙動に関する実験的研究	913-914
			人工干潟, 自重圧密, 水平ドレーン	458	熊谷ら	潮間帯における粘性土地盤の圧密挙動に関する一考察	915-916
地盤挙動	地盤改良	固化改良・遠心実験他	地盤改良, シリカ, 石灰	522	日野ら	諫早湾干拓・調整池の石灰系地盤改良工事に伴うシリカの広域調査とその溶出・固定特性	1043-1044
			シリカ, 浮泥・底泥, 石灰改良	523	田中ら	有明海湾奥部の浮泥・底泥におけるシリカの分析とその溶出・固定特性	1045-1046
地盤環境	調査技術・処理技術	堆積物質の特性及び処理技術	酸化反応の促進, 細粒分の堆積抑制, 発泡ガラス材	1167	田中ら	有明海湾奥部干潟域における底質改善技術の効果とその持続性について	2333-2334
			干潟, 土砂環境, 堆積構造	1168	渡部ら	生態地盤環境の性能設計に向けて～Part1：干潟地盤の堆積構造～	2335-2336
			サクション, 生物, 動的	1169	佐々ら	生態地盤環境の性能設計に向けて～Part 2: 干潟底生生物の適合土砂環境場～	2337-2338

表-2.2　第 42 回地盤工学研究発表会（名古屋市）における関連研究の発表の動向 [3)]

第42回地盤工学研究発表会(2007年　於　名古屋市)

大目次	中目次	小目次	キーワード	論文番号	著者	タイトル	ページ
地盤材料	改良土・軽量土	現場への適用(1)	海成粘土, 地盤改良, 盛土	308	日野ら	浚渫改良土による盛土材料の一軸圧縮・コーン指数・締固め特性	615-616
		リサイクル材、他	カキ殻, 消石灰, 一軸圧縮試験	341	重松ら	カキ殻消石灰の安定材としての適用性	681-682
		気泡混合処理土、他	軽量土, 劣化, 針貫入試験	348	渡部ら	暴露環境における気泡混合処理土の強度特性（その4）—水中での劣化と沈下量(1 年経過)—	695-696
			軽量土, 浸透, X線CTスキャナ	349	菊池ら	暴露環境における気泡混合処理土の強度特性（その5）—X 線CT スキャナによる浸透速度—	697-698
地盤挙動		地盤改良（排水工法）	脱水, 真空圧, 含水比	464	梅崎ら	袋詰真空脱水法による高含水比土の脱水減容化の検討	927-928
地盤環境		濁水・堆積物　改良・評価	栄養塩, 廃棄物, 吸着覆土材	1075	井田ら	閉鎖性水域の環境改善を目的とした吸着覆土材作製に適した材料の選定	2143-2144
			ヘドロ, 曝気, 浄化	1076	星ら	曝気による都市河川・堀川のヘドロの室内浄化実験	2145-2146
			ヘドロ, 圧密, 堆積	1077	久米ら	都市河川・堀川のヘドロの圧密特性および堆積挙動に関する一考察	2147-2148
			ヘドロ, RIコーン, 密度	1078	足立ら	RI コーンを用いた都市河川・堀川のヘドロの堆積特性の調査	2149-2150
		沿岸環境	thermal properties, tidal mud, water content	1081	Moqsudら	Some Factors Affecting the Thermal Properties of the Mud of the Ariake Sea, Japan	2155-2156
			有明海, 干潟域, 物理化学的特性	1082	下田ら	海苔養殖で使用する酸処理剤が有明海干潟域の底質特性に及ぼす影響	2157-2158
			底質, 物理化学的性質, 底生生物	1083	末次ら	有明海湾奥部干潟域における底質改善技術による生物生息環境の改善効果	2159-2160
			閉鎖性水域, 重金属類	1084	伊藤ら	佐鳴湖堆積物の重金属含有量について	2161-2162
			リモートセンシング, 干潟, 微地形	1085	渡部ら	生態地盤工学の展開 Part 1：干潟微地形の時空間評価に向けて	2163-2164
			砂質土, せん断強さ, 底生生物	1086	佐々ら	生態地盤工学の展開Part 2: アサリの潜砂限界強度について	2165-2166
			燃料電池, 浚渫土, ヘドロ	1087	宮島ら	浚渫土のバイオ燃料電池への活用に関する基礎的研究～100円グッズで試みる次世代エネルギー～	2167-2168

表-2.3　第 43 回地盤工学研究発表会（広島市）における関連研究の動向 [4)]

第43回地盤工学研究発表会(2008年　於　広島市)

大目次	中目次	小目次	キーワード	論文番号	著者	タイトル	ページ
地盤材料	リサイクル材料	汚泥・泥土・流動化処理土	浚渫土, 脱水, 施工システム	257	杉本ら	袋詰脱水処理工法におけるポンプ充填方式による施工（その3 浚渫土の有効利用）	513-514
	改良土・軽量土	土質安定処理	土質安定処理, 海水, 溶脱	347	原ら	海水浸漬下における石灰処理土の強度特性	693-694
			土質安定処理, 土の構造, 軟弱地盤	351	山北ら	固化～破砕プロセスを考慮した浚渫改良土の一軸圧縮・コーン指数・締固め特性について	701-702
			土質安定処理, 土の構造, 軟弱地盤	352	田口ら	有明海北岸低平地における安定処理土の微視的土構造の評価	703-704
地盤挙動		地盤改良(1)	浚渫土, 脱水, 真空圧	450	梅崎ら	マルチドレーン真空脱水法による高含水比浚渫土の脱水実験（その5）	899-900
			底泥, 浄化, ゼオライト	451	梅崎ら	マルチドレーン真空脱水法による閉鎖性水域底泥の脱水・浄化システム	901-902
地盤環境		調査・試験技術	酸化マグネシウム, 土質安定処理, 溶出試験	1032	三浦ら	有明海北岸低平地における浮泥・底泥の安定処理に伴う酸化マグネシウムの適用	2063-2064
		自然環境・生態系・温暖化	採餌活動, サクション, 生物多様性	1079	佐々ら	鳥と地盤と底生生物の関係における水際土砂環境の重要性	2157-2158
			漂着ゴミ, 重金属類, 海岸汚染	1080	山口	海浜地盤汚染(1)～漂着ゴミと重金属類～	2159-2160
			干潟, 堆積環境, サクション	1081	渡部ら	カナダ・フレーザー川河口の広大な干潟の堆積環境	2161-2162
			干潟, 生物生息環境, 底質改善	1082	末次ら	覆砂耕耘した干潟底泥における生物棲息環境の経時変化	2163-2164
		地盤振動・堆積地盤	ヘドロ, 流動, ゲル	1104	星ら	名古屋都市河川・堀川のヘドロの流動特性	2207-2208
			ヘドロ, 沈降, 堆積	1105	小森ら	名古屋都市河川・堀川のヘドロの沈降・堆積過程に及ぼす塩分濃度の影響	2209-2210
DS-8		廃棄物の地盤工学的利用と環境リスク	ホタテ貝殻, 建設残土, 有効利用	1117	菊地ら	ホタテ貝殻の地盤改良剤としての有効利用	2233-2234

表-2.4　第 44 回地盤工学研究発表会（横浜市）における関連研究の動向 [5)]

第44回地盤工学研究発表会(2009年　於　横浜市)

大目次	中目次	小目次	キーワード	論文番号	著者	タイトル	ページ
DS-9		DS-9 地盤工学におけるリスクマネージメント	土地保全, 裁判, 豪雨	18	大久保	裁判における地盤専門家の役割	35-36
			地盤, リスク, セカンドオピニオン	23	太田	地盤に関するセカンドオピニオンの必要性	45-46
地盤材料		砂質土・動的性質(2)	藻場, 砂質土, 液状化	174	松井ら	波浪による地盤表層の間隙水圧応答がアマモ場再生に及ぼす影響に関する研究	347-348
		土質安定処理(浚渫土)	浚渫土, フミン酸, 一軸圧縮強さ	280	小林ら	フミン酸を用いた低強度セメント改良土の創生に関する基礎的検討	559-560
			土質安定処理, 締固め, 三軸試験	281	山北ら	固化～破砕プロセスを考慮した安定処理土の実務的力学評価法と三軸圧縮特性の比較	561-562
		土質安定処理(石灰・PS灰・その他)	ホタテ貝殻, 八戸ローム, リサイクル	289	苫米地ら	ホタテ貝殻を用いた八戸ロームの改良効果に与える改良材の粒径の影響	577-578
			微生物, 固化, バイオグラウト	291	杉本ら	微生物を利用した砂供試体固化の試行実験	581-582
		土質安定処理(物理化学的変化)	粘土, 一軸圧縮試験, 地盤改良	292	佐野ら	砂分混合した脱水固化処理土の強度特性	583-584
			機械脱水処理土, 圧縮試験, 透水試験	293	梶原ら	機械脱水処理した浚渫粘土土塊群の圧縮・透水試験	585-586
			一軸圧縮強さ, 浚渫土, 土質安定処理	295	中野ら	浚渫土砂の各種固化材による改良効果に関する実験的研究	589-590
			浚渫土, 土質安定処理, 力学挙動	296	中野ら	室内試験による浚渫土砂改良土の圧縮・せん断挙動の把握	591-592
			Dredged soil, Elasto-plasticity, Mechanical behavior	297	Nakano ら	An elasto-plastic interpretation of mechanical behavior of treated soils of the dredged soil	593-594
		固化処理(物理化学変化)	土質安定処理, 土の構造, 軟弱地盤	310	田口ら	2段階処理施工パターンにおけるハイブリット式安定処理土の強度・間隙構造・溶出特性	619-620
			土質安定処理, 海水, 力学特性	311	水城ら	海水に浸漬した石灰処理土の力学特性に及ぼす石灰添加量と含水比の影響	621-622
			土質安定処理, 海水, 溶脱	312	原ら	石灰処理土のカルシウム溶出特性に及ぼす海水中の塩分の影響	623-624
地盤挙動		長期沈下を考える	沈下, 二次圧密	432	塚元ら	有明粘土の長期圧密特性について	863-864
地盤環境		自然環境・生態系・温暖化対策(3)	潜砂, せん断強さ, 二枚貝	909	佐々ら	生態地盤学の展開Ⅰ:アサリの潜砂性能の系統的解明～稚貝から成貝まで～	1817-1818
			支持力, 二枚貝, 潜砂挙動	910	酒井ら	生態地盤学の展開Ⅱ:アサリとシオフキの潜砂挙動の違いとその支持力的解釈	1819-1820
			住み分け, 生態地盤学, 生物多様性	911	佐々ら	生態地盤学の展開Ⅲ:多種多様な干潟底生生物の住活動性能と適合・限界場の相互関係	1821-1822
			干潟, 環境改善, 大気圧密工法	912	保田ら	覆砂耕耘した干潟底質の大気圧密工法による分級抑	1823-1824
			干潟, 生物生息環境, 底質調査	913	末次ら	有明海湾奥干潟域における底質特性の長期定点観	1825-1826
			砂州, 堆積, 物理探査	914	渡部ら	濤沸湖における湖口周辺砂州の表面波探査結果に基づく堆積形成史の復元	1827-1828
		調査・試験技術	Ariake Sea, sulfur cycle, thermal properties	950	Moqsud ら	Sulfur cycle in the Ariake Sea by considering thermal properties of tidal mud	1899-1900

表-2.5　第 45 回地盤工学研究発表会（愛媛市）における関連研究の発表の動向 [6)]

第45回地盤工学研究発表会(2010年　於　愛媛市)

大目次	中目次	小目次	キーワード	論文番号	著者	タイトル	ページ
一般		基準・一般・展望など		3	安原	地盤工学はIPCCに貢献できるか？	5-6
調査・分類		ボーリング・サンプリング	地質学, 海成粘土, 弾性波探査	26	井上ら	ボーリングデータ(KIX18-1) および音波探査データからみた関西国際空港周辺の堆積構造	51-52
地盤材料	粘性土	(繰り返し特性　他)	浚渫粘性土, 遠心力模型実験, 覆砂工	103	鶴ヶ崎	浚渫粘性土上への覆砂工に関する遠心模型実験	205-206
	リサイクル材料	(強度・変形2)	ホタテ貝殻, リサイクル, 改良材	249	苫米地ら	ホタテ貝殻地盤改良材を用いた実証実験	497-498
		土質安定処理(新しい材料・技術)	粉砕カキ殻, 脱水ケーキ, 締固め特性	277	在原ら	粉砕カキ殻混合土の締固め特性	553-554
		セメント改良土(物理・化学的性質)	土質安定処理, 海水, 含水比	304	原ら	石灰処理土の含水比に及ぼす海水の影響	607-608
			基準, 基礎, 分類	305	視上ら	地盤環境を考慮した化学的安定処理土の一軸圧縮	609-610
地盤挙動		地盤への繰り返し載荷	波浪, 洗掘, 海底地盤	429	森政ら	海底地盤の不安定化に及ぼす水圧変動と流速の相乗効果の線形波浪解析による検討	857-858
			波浪, 洗掘, 海底地盤	430	大部ら	海底地盤の不安定化に及ぼす水圧変動と流速の相乗効果の非線形波浪解析による検討	859-860
			波浪, 海底地盤, 液状化	431	加舎ら	波浪による海底地盤の液状化挙動の数値解析	861-862
地盤環境		温暖化・ヒートアイランド・植生基盤	地球温暖化, 圧密, 堤防	992	小峯ら	一次元圧密特性の観点からの地球温暖化／海面上昇による河川堤防や高水敷・河岸を想定した土質材料に及ぼす影響の簡易評価	1983-1984
		リサイクル材	製紙スラッジ灰, 土質安定処理, 消臭	1000	望月ら	PS灰改良材による環境に配慮した漁港内底泥の有効活用方法とその検討	1999-2000
			含水比, 土質安定処理, 浚渫土	1002	池田ら	高含水比浚渫土を対象とした低環境負荷型再資源化技術の適用性	2003-2004
		環境モニタリング	漂着ゴミ, 有害物質, 湿地・海岸	1007	岡山ら	漂着ゴミと有害物質～西表島の海岸線～	2013-2014
			漂着ゴミ, マングローブ湿地, 西表島	1008	山口ら	沖縄西表島マングローブ湿地の漂着ゴミ汚染	2015-2016
			沿岸域, 汚染調査, ポリスチレン	1009	塩野谷ら	海ごみ・プラスチック由来の沿岸域汚染に関する調査研究—東京湾三番瀬における調査・分析—	2017-2018
			沿岸域, 汚染調査, ポリスチレン	1010	佐藤ら	海ごみ・プラスチック由来の沿岸域汚染に関する調査研究—フィリピンルソン島における調査・分析—	2019-2020
		干潟・海岸地形	最適住活動, パッチ, 生態地盤学	1015	佐々ら	巣穴底生生物の土砂環境選択行動とパッチ形成の実	2029-2030
			魚類, 生態地盤学, 餌資源生物	1016	佐々ら	水産有用魚類の餌資源生物分布に果たすサクションの役割	2031-2032
			コーン貫入試験, 細粒分, 人工干潟	1017	松井ら	人工干潟の地盤調査における軽量動的コーン貫入試験の適用性	2033-2034
			人工干潟, 浚渫粘土, 港湾	1018	川崎ら	浚渫粘土圧入方式による人工干潟造成に関する研	2035-2036
			人工干潟, せん断波速度, 多チャンネル型表面波探査	1019	渡部ら	多チャンネル型表面波探査による人工干潟の安全性評価手法の提案	2037-2038
			干潟, 底生生物, 地盤改良	1020	保田ら	覆砂耕耘した泥質干潟の大気圧密による生物生息環境の改善効果	2039-2040

学会においてもついに「干潟・海岸地形」という専門セッションが姿を現した.

学会の全国大会は，速報性に時流も加わるので必ずしも正しい解釈とは限らないが，干潟・海岸地形の諸問題への取り組みは地盤工学会においても重要な位置を占めるようになってきているといえる.

3.　全国的な動向を眺めてきて感じる有明海の干潟（潮間帯）および海底地盤（潮下帯以深）における未解明の課題

筆者は**表-2.2** に示す「沿岸環境」および**表-2.5** に示す「干潟・海岸地形」セッションの座長を拝命し，今日の有明海問題への取り組みに必要と考えられる 2 編の興味深い発表に接することができた．これらを引用しつつ，有明海の干潟（潮間帯）および海底地盤（潮下帯以深）における未解明の課題としての記述にチャレンジしてみたい.

図-3.1 は，佐々らによる巣穴底生生物の土砂環境選択行動とパッチ形成の実証に関する講演論文 [7]を抜粋したものである．この研究目的は，生物がいかに生息場所を選択し，個体群（パッチ）を形成するかは生態保全・管理上の基本的課題として論が始まる．一般的には，主に生物の食活動の源である餌の分布や捕食生物の存在によって決まるとされるが，最適採餌モデルによる予測は実際の底棲生物の分布との間でかい離があることが知られているという．そこで，従来見過ごされてきた住活動場に関する著者らの近年の知見に基づき，提案する最適住活動モデルと連携した各種の生態地盤実験と現地調査が実施され，巣穴底生生物の土砂環境選択行動とパッチ形成過程を詳しく検証するのである．研究手法として，新たに開発した干潟生態土砂環境再現水槽を用いたコメツキガニの土砂環境選択・パッチ形成実験ならびに土砂環境探知能力の検証実験，および現地土砂環境動態を考慮した最適住活動モデルの構築と土砂環境／パッチ形成の実態調査が一体的に行われた．得られた知見として，コメツキガニは巣穴発達のための最適･限界サクション場を探知する“生物センサ”を有し，地表サクションの空間勾配に基づき住活動に適した場を自ら選択して巣穴活動を行うことが世界で初めて明らかにされた．また，生物個体群（パッチ）の分布について，実験・現地調査結果の双方において提案する最適住活動モデルによる予測と見事に整合する形で現れることが示された.

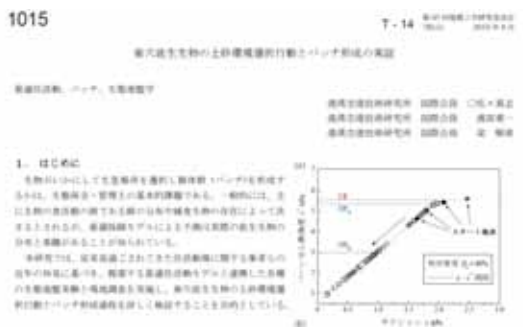


図-3.1　佐々らによる講演論文 [7]

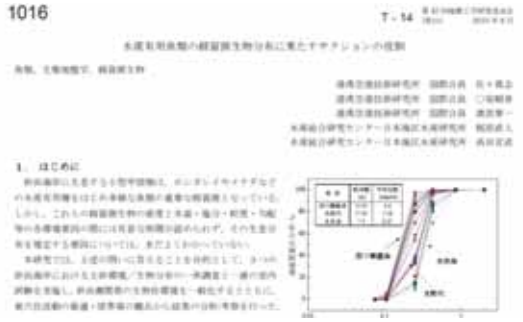


図-3.2　梁らによる講演論文 [8]

図-3.2 は，梁（やん）らによる水産有用魚類の餌資源生物分布に果たすサクションの役割に関する講演論文 [8]を抜粋したものである．この研究目的は，砂浜海岸に生息する小型甲殻類はホシガレイやメナダなどの水産有用種を始め多様な魚類の重要な餌資源となっているとして論が始まる．しかし，これらの餌資源生物の密度と水温・塩分・粒度・勾配等の各環境要因の間には有意な相関が認められず，その生息分布を規定する要因についてはいまだよくわかっていないという．そこで，3 つの砂浜海岸における土砂環境／生物分布の一体調査と一連の室内試験が実施され，砂浜潮

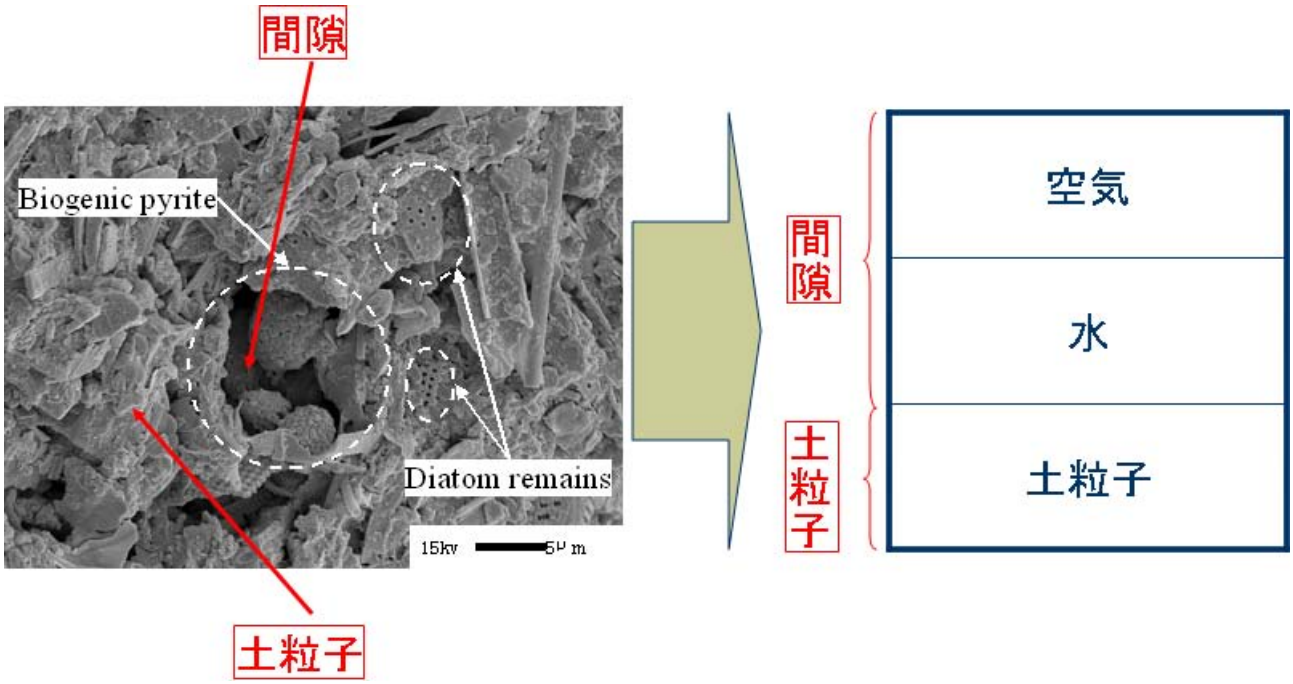


図-3.3　土の 3 相によるモデル化
（左図は有明粘土の電子顕微鏡観察結果，倍率は 3,000 倍）

間帯の生物住環境が一般化されるとともに，巣穴住活動の最適・限界場の観点から結果の分析／考察を行うのである．得られた知見として，砂浜潮間帯の飽和・不飽和，緩密，硬さ軟らかさ等の多様な生物住環境の発現をサクションが支配していること，さらに，優占 3 種の小型甲殻類の生息限界域と高密度域の分布が巣穴住活動の最適・限界場を担うサクションによって統一的に規定できることが初めて明らかにされた．

上記 2 編の講演論文に共通するキーワードは，「底棲生物の住環境」であることにお気づきだろうか．筆者が今日の有明海問題への取り組みに関し何か物足りなさを感じるのは，その点である．前述の 2 編の研究内容に学び，筆者の経験も踏まえ今日の有明海問題に立ち返ると，次の 2 つの課題の事例に突き当たる．まず，アサリの豊漁・不漁は単なる砂層地盤の存在による賜物か．次に，アゲマキやタイラギの豊漁・不漁は酸化還元環境や酸揮発性硫化物（AVS）の高低のみで説明できるか．

前述 2 編の研究内容によれば，アサリの豊漁・不漁に関する答えは否であろう．

アサリの好む住環境としての砂層地盤の存在があるはずであり，アサリの漁業関係者はそのことを経験的に熟知している．このことは，諫早湾開門に伴う水底下の浮泥・底泥の挙動の変化に関する地盤工学的調査（平成 22（2010）年度～平成 24（2012）年度・有明海における環境変化の解明と予測プロジェクト[9]）のために地元説明に向かった際，かなり強烈なプレッシャーのもとで教えられた．この定量化を図れ，砂層地盤を形成することができるのは地盤工学関係者に他ならず，ここに出番の一つが求められているように思う（**表-2.5** 参照）．

図-3.3 に示すように，一般に土は土粒子等の固相ならびに間隙中の水による液相および空気による気相の 3 相によりモデル化される．間隙の部分がすべて水で満たされている場合を飽和状態，空気が存在する場合を不飽和状態という．次に，サクションとは，大気圧より低い土中水の土の内部に向けて生じる圧力のことをいう．土中水は土粒子の吸着力，毛管力，土中水に溶解している物質などによって，不飽和状態では通常大気圧より低い圧力

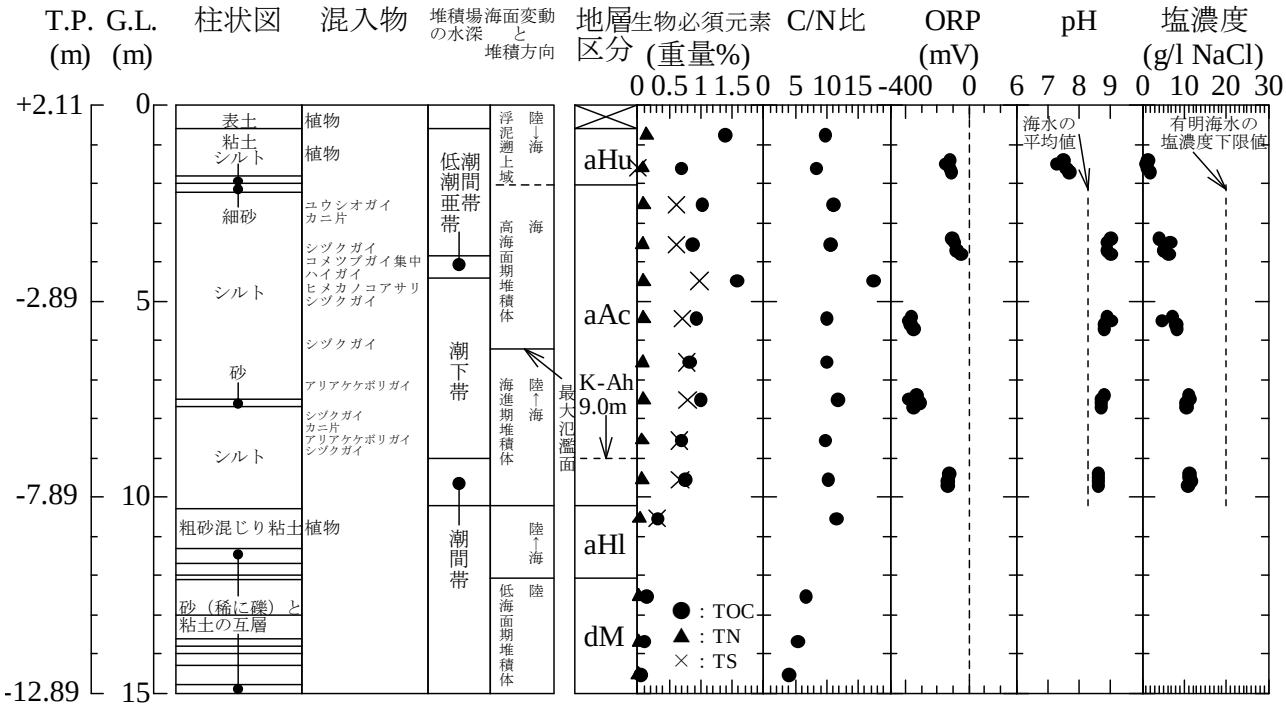


図-3.4　有明海沿岸道路（佐賀福富道路）における地層の基準ボーリング結果（嘉瀬コア）[10)]

状態にあり, この内向きの圧力のことをいう. 泥団子や砂場の遊びで城が形成できるのは, 砂の緩密性とともにサクションがコントロールされていることによる.

次に，アゲマキやタイラギの豊漁・不漁に関する答えについても否であろう.

図-3.4 に, 有明海沿岸道路（佐賀福富道路）の嘉瀬南インターチェンジ付近における地層の基準ボーリング結果を示す（以後，嘉瀬コアと呼ぶ）[10)]. 今日の有明海湾奥部における反時計回りに代表される潮流および 6m 以上の干満差は, 8,000 年前から生じていたことが明らかにされている [11)]. **図-3.4** 中の有明粘土層（aA_c）は，このような有明海の海象および縄文海進によって堆積した地層である．第四紀学および地球化学の発展により，どのような有明海の水深環境で有明粘土層が堆積のプロセスを経たかまで詳しく解析することが可能である．地層に含まれる貝殻の種類の判別や生物必須元素の分析などが裏付けに用いられる.

嘉瀬コアにおける貝殻の種類によれば，過去の有明海に生息していた貝にはむしろ還元環境を好むものが認められる．アゲマキやタイラギの検出は決して多くない．また，生物必須元素における全硫黄（TS）の鉛直分布によれば，過去から今日にかけてほぼ不変の硫黄量の状況にある．つまり，有明海の底棲生物にとって，有明海の底質環境は古来苛酷な環境にあったといえる．このような状況において，なぜアゲマキやタイラギは豊漁の時期を迎えることができたのか．このような逆の視点による議論が取り上げられることはない.

図-3.5 に, 土の構造の基本モデル [12)] を示す. この図に示される各モデルは，**図-3.6** のモデル [13)] における一つの凝集体中の拡大図と考えていただきたい．**図-3.7** に，斜面安定解析と土粒子の配向性の関係 [12)] を示す．完全配向構造が卓越するような地盤のすべり面において得られる A～D の土試料に力学試験を適用した際の強度の関係は，A＞B＞C≒（＜）D となる．つまり，A ほど強度が強く表れるとい

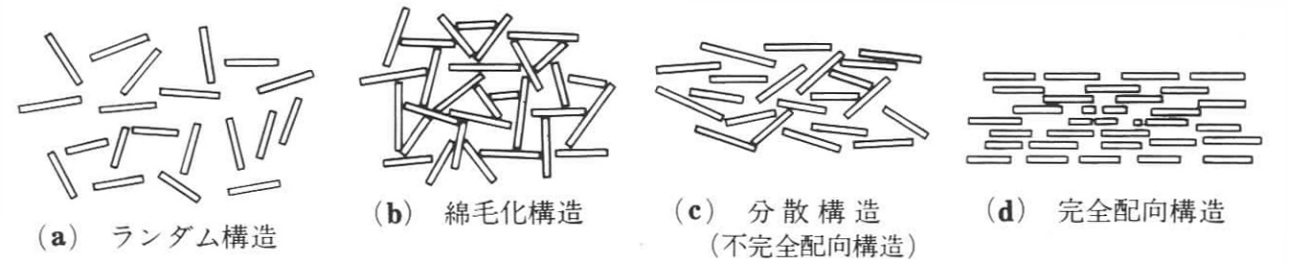


図-3.5　土の構造の基本モデル [12)]

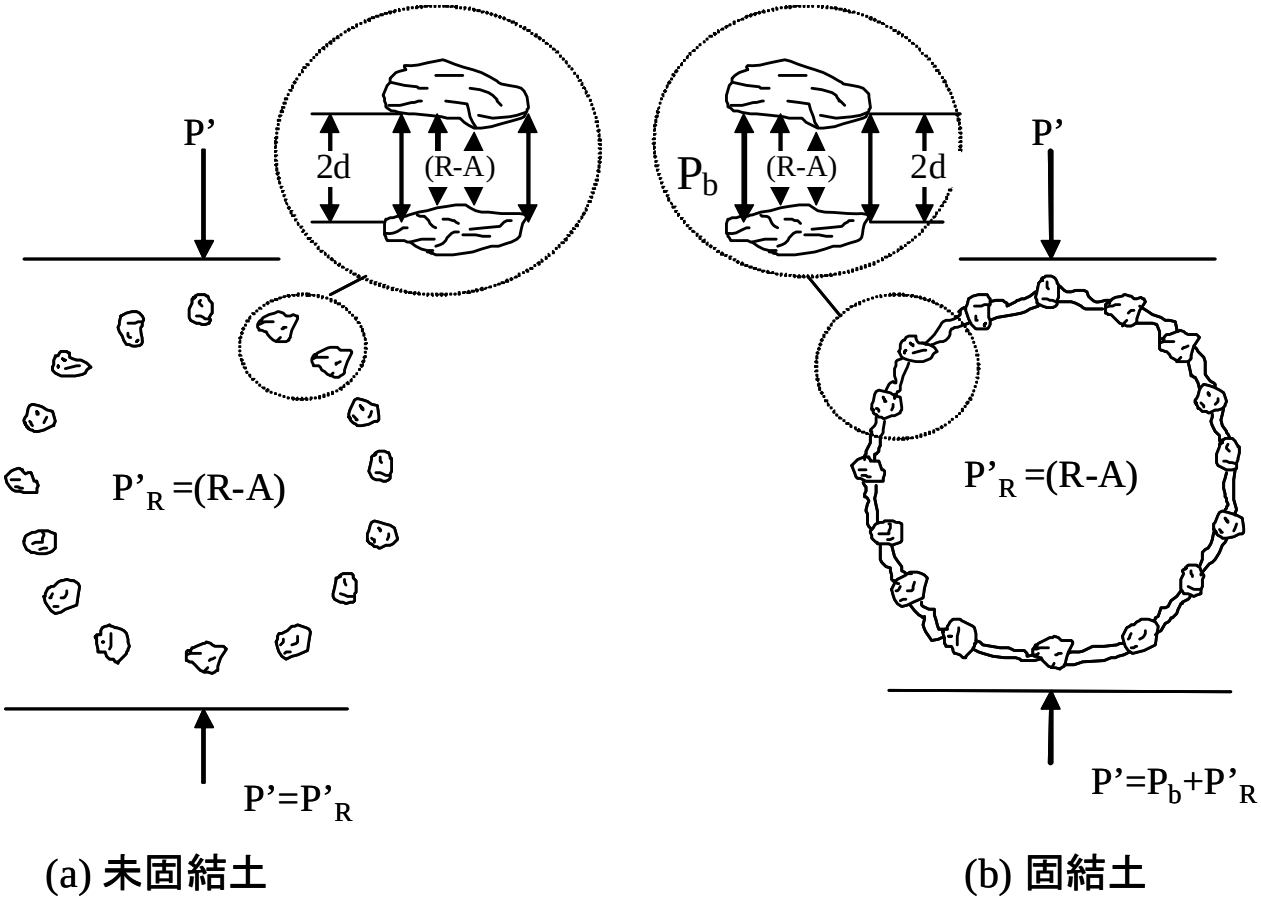


図-3.6　Nagaraj による土構造のモデル [13)]

える．

有明海問題のクローズアップの折，有明海底では粘性が卓越する泥分の堆積が増し，他方で有明海の透明度は上昇している知見が示された．推定したメカニズムの一つは，浮泥の凝集形態の変化と沈降堆積状況の変化であり，**図-3.8** に示す有明海をイメージした．この仮説が正しければ，アゲマキやタイラギ等の底棲生物にとっては住環境場にまるでふたをされたかのような状況に陥り，呼吸や採餌はままならないことになる．

上記の仮説を裏付けるには，巨視的には**図**

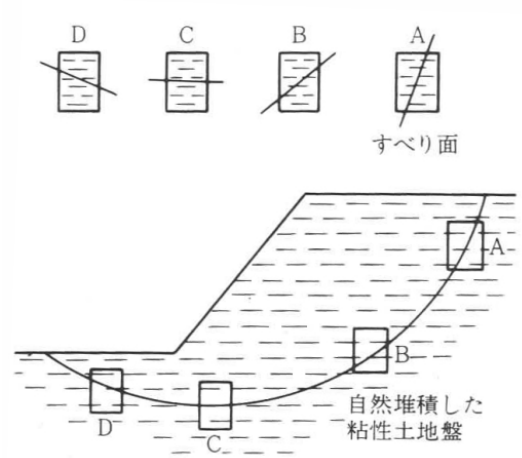


図-3.7　斜面安定解析と土粒子の配向性 [12)]

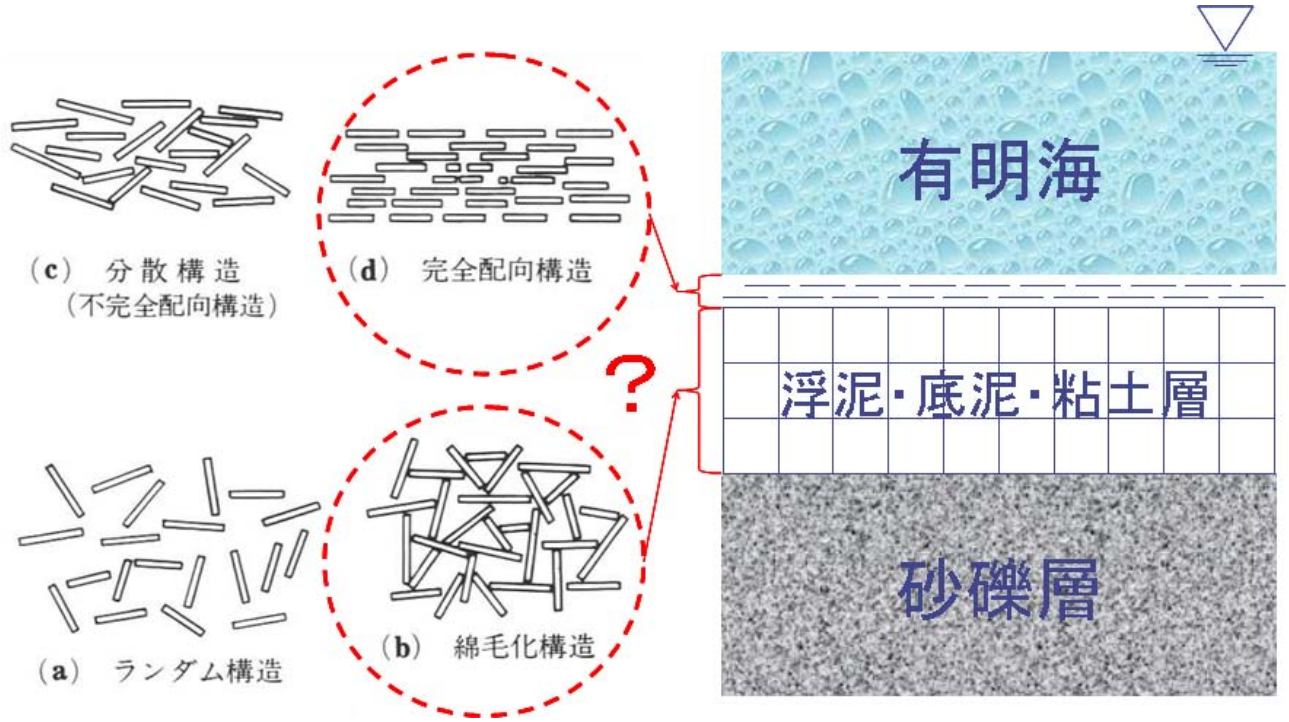


図-3.8　有明海の干潟（潮間帯）および海底地盤（潮下帯以深）における土構造の一推定

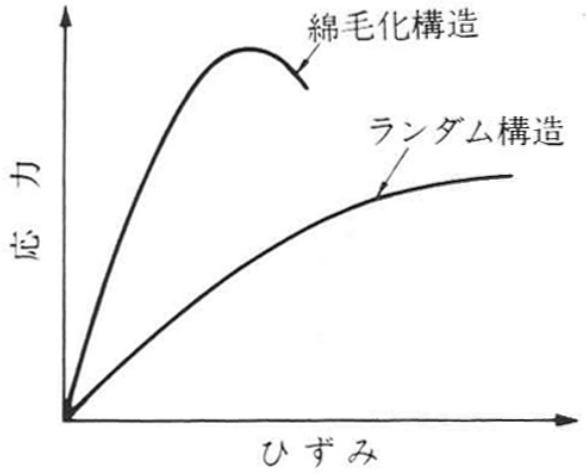


図-3.9　応力－ひずみ曲線に及ぼす土構造の影響[12)]

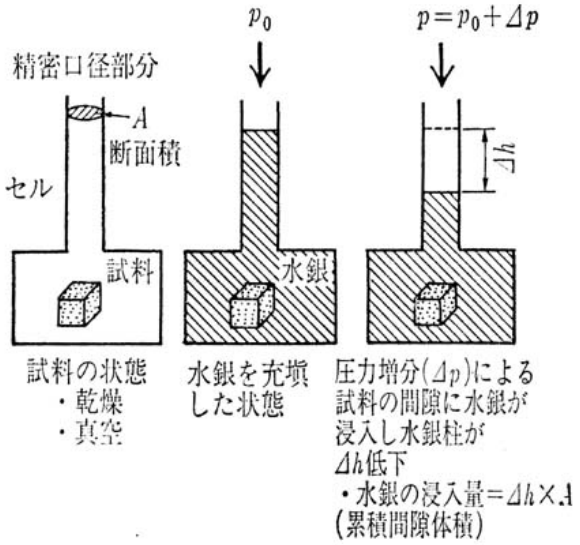


図-3.10　水銀圧入型ポロシメーターを用いた累積間隙容積の計測[14)]

-3.9[12)]に示す力学的異方性の観点による検討，微視的には**図-3.3**に示した電子顕微鏡観察や**図-3.10**[14)]に示す水銀圧入型ポロシメーターなどによる検討の組み合わせにより，明らかにすることができると考えている．

上記のような有明海の底棲生物における住環境の視点による仮説と立証方法は，筆者の旧所属組織が有明海研究の機会を得た折に提案したことがあった．“適用すべきは工学的手法であり，理学的手法は無用です”と断られたのを機会に“陸に上がる決心”をし，佐賀県政による有明海沿岸道路建設プロジェクトへの関与に集中してきた．ところが，所属組織の拡充改組とともに，これまではいわばラ

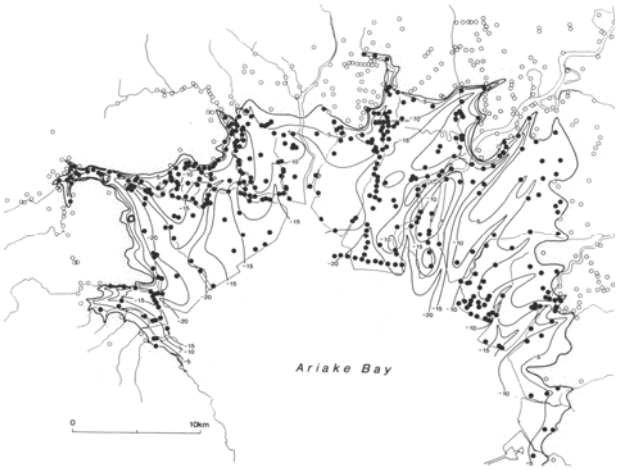


図-4.1　有明海沿岸低平地域における
ボーリングの実施位置 [15)]

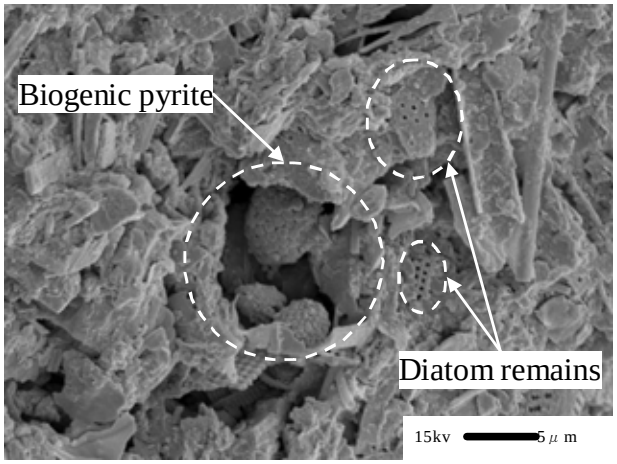


写真-4.1　有明粘土の電子顕微鏡観察
（3,000 倍）と生物起源パイライト

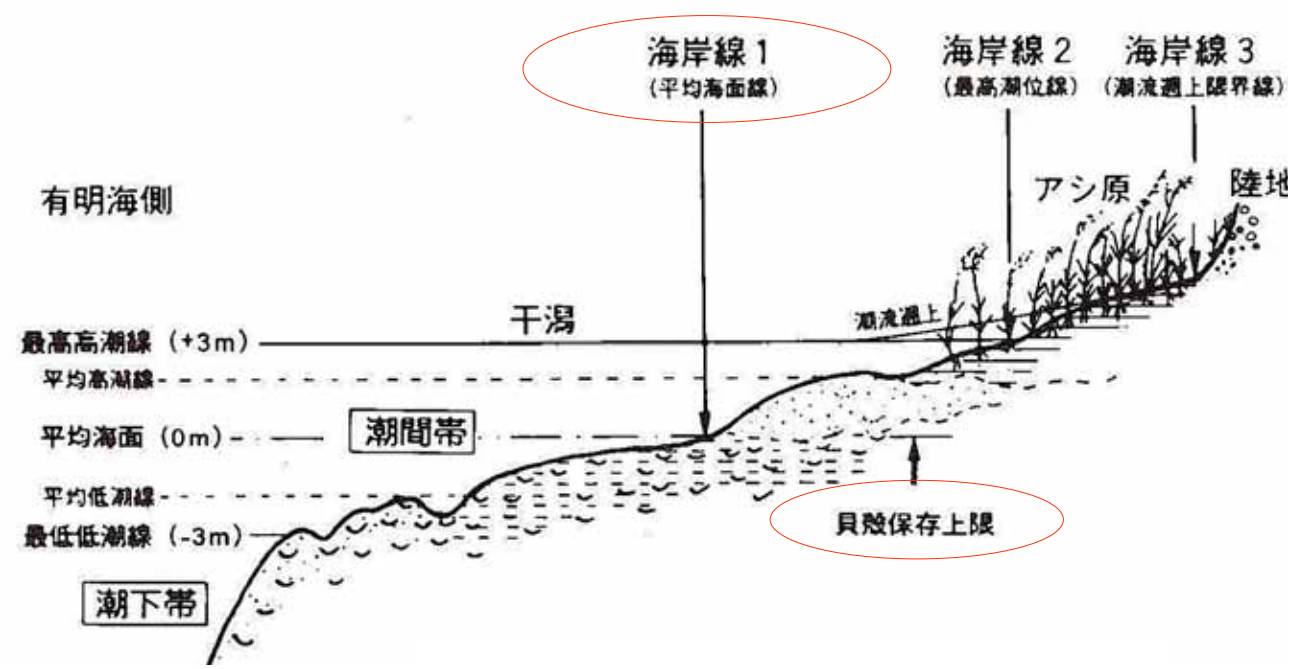


図-4.2　有明海における 3 種類の海岸線 [11)]

イバル関係と見ていた新たな仲間に前述した仮説と立証方法が深く理解されていることを知り，今日の有明海研究プロジェクト [9)]の末席に参画することになった．身内と思っていた存在による低評価，ライバルと思っていた存在による高評価，なる複雑系の人間社会を楽しんでいるところである．

以上のような有明海の底棲生物における住環境の評価に関する重要性は，筆者の属する研究グループの一人の山西博幸准教授がいち早く指摘していた．山西准教授は「有明海生態系シミュレーター構想」を掲げ，今日まで尽力しているが，いまだ実現に至っていない．さもすると，シミュレーター構想の過小評価ばかりか彼の研究スタンスにまで批判を浴びせられることもある．誇れ，先見の明ある研究者であることに疑いの余地はない．

4.　有明海における海岸線の変遷と沿岸低平地の形成

有明海における海岸線の変遷と沿岸低平地の形成に関する研究は，筆者の博士学位論文から今日までの一連の研究を通じた師である

九州大学大学院理学研究院・下山正一博士によるものである[11),15)]．この貴重な成果をお借りし，本稿で改めて説明に臨みたい．

図-4.1 に，有明海沿岸低平地域における過去の地盤調査ボーリングの実施位置を示す．有明海沿岸低平地域には軟弱粘土層が表層から厚く堆積しているが，貝殻を含む粘土層（●印）と含まない粘土層（○印）がまるでオセロゲームのように“ある境”をもとに分布している．この“境”が意味するものは何なのか．

粘土層が貝殻を含む場合と含まない場合のメカニズムについて考える．貝殻の組成は，炭酸カルシウム（$CaCO_3$）の結晶をタンパク質がつなぐことで作られている．**図-4.2** に，有明海における 3 種類の海岸線を示す．有明海のように干潮時には干潟が露呈し，満潮時には堤防にまで海水が押し寄せる地域での海岸線のイメージは難しい．また，大潮等により潮位差も変化する．下山は，一つの干潮・満潮サイクルの中で海水が必ず支配する範囲の限界を海岸線 1 と定め，この海岸線を境に陸側と海側に堆積する粘土を前述の軟弱粘土層における堆積当初の環境のものと見なした．

海岸線 1 より陸側の範囲について，この範囲は現在の河川域における“ガタ土”の堆積範囲のイメージである．ここに堆積する粘土の中には，**写真-4.1** に示す生物起源パイライト（写真中では Biogenic pyrite と表示）と呼ばれる硫化物などが含まれる．生物起源の場合は FeS_2 の化学式で表されるパイライトは嫌気性環境（還元環境）での生成物であり，この物質は好気性環境（酸化環境）にさらされると酸化鉄（Fe_2O_3）と硫酸（H_2SO_4）に変化する．また，海岸線 1 より右側の範囲では大潮のときなど海水の及ぶ頻度はわずかとなり，環境水中の海水組成分は希釈され，カルシウムイオン（Ca^{2+}）や炭酸水素イオン（$(HCO_3)^-$）が少なくなる．カルシウムイオンや炭酸水素イオンが豊富な環境水，つまり海水環境による保存環境を好む貝殻にとっては，ただでさえ必要な構成成分が周りで少なくなる上に，硫酸の生成による酸性化の影響まで受けることになり，ただちに溶解してしまうのである．

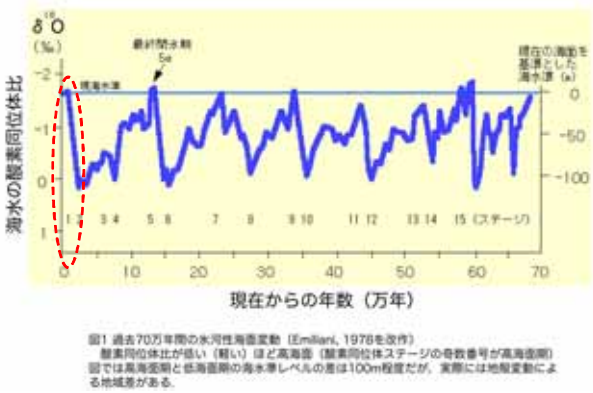


図-4.3　過去 70 万年間の氷河性海面変動[16)]

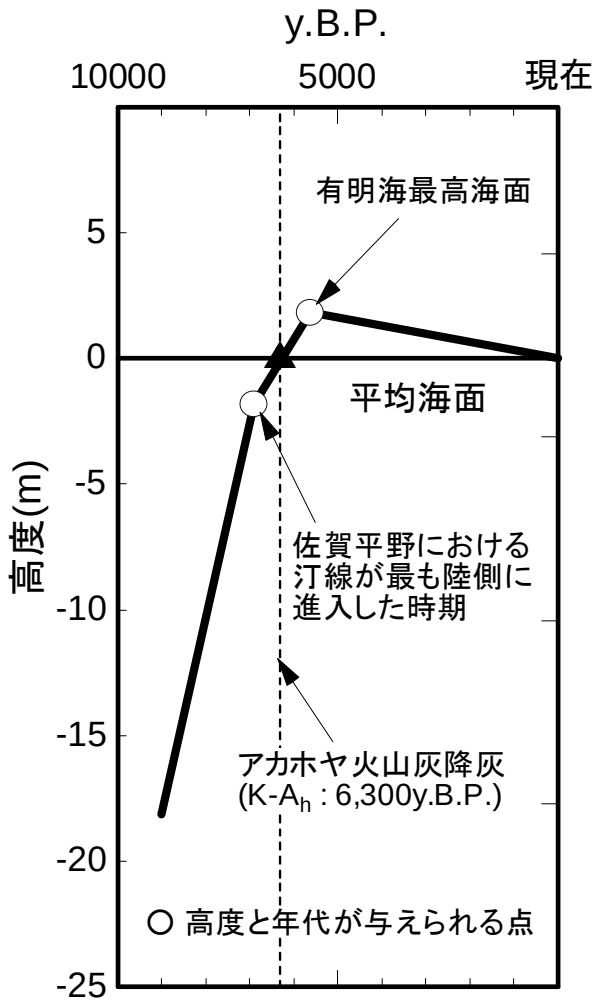


図-4.4　有明海の海面変動[17)]

他方，海岸線 1 より海側の範囲はまさに現在の干潟や有明海の海底地盤のイメージである．干潟もまた，上述した酸化環境にさらさ

図-4.5　約 6,000 年前の有明海の海岸線 [15)]

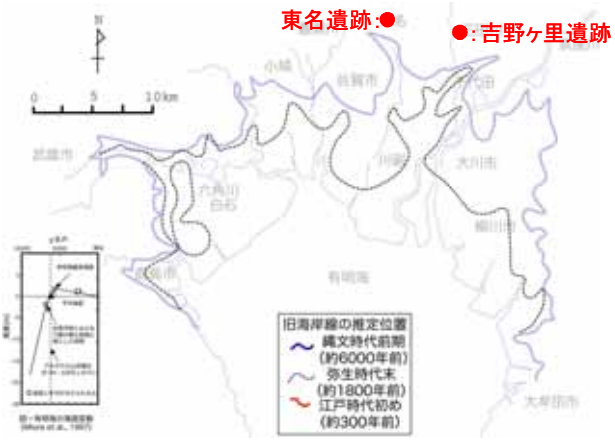


図-4.6　約 1,800 年前の有明海の海岸線 [15)]

写真-4.2　佐賀県武雄市大日（六角川河口から約 30km の地点）における泥の堆積状況 [11)]

図-4.7　約 6,000 年前の海岸線から約 1,800 年前の海岸線の変遷の再説明

れることになるが，6 時間後には必ず有明海水が押し寄せる．干潟の状態のときに生成されたかもしれない硫酸は弱アルカリ性（pH≒8.3）の海水によって中和されるし，貝殻が必要とする構成成分も申し分なく周りにある．貝殻は，居心地よく粘土中に埋没していくことになる．

図-4.3 は，過去 70 万年間の氷河性海面変動 [16)]を示したものである．過去 70 万年の間に 7 回の海面の上昇・下降サイクルが認められる．図のもっとも左に認められる急激な海面の上昇は縄文時代に生じたことが明らかにされており，縄文海進と呼ばれている．海進とは，海面の上昇に伴い海岸線が陸側に進行することをいう．海退とは，海面の下降に伴い海岸線が海側に後退することをいう．**図-4.4** は，1 万年前から現在にかけての有明海の海面変動 [17)]を示したものである．この海面変動は**図-4.3** に付した赤枠破線の海面変動と時期を同じくするものであり，有明海においても海面が約 20m 上昇し，今日に至っているのがわかる．

図-4.1 に認められた“境”は，つまりは過去に有明海がもっとも陸側に進行した範囲とみなされる．この現象が陸域の軟弱粘土層の形で痕跡を残し，今日に至っているのである．縄文海進期には，平均すると 1 年間に 2cm 海面が上昇していたという．仮に海岸付近の土地の平均勾配を 1/1,500 とすると，毎年 30m も海が陸側に進行する試算になる．縄文時代の人々は，海岸付近での定住は難しかったに違いない [18)]．東名遺跡 [19)]のさらなる研究の進展が待ち望まれるというものである．

下山は貝殻の解析のみならず，火山灰分析

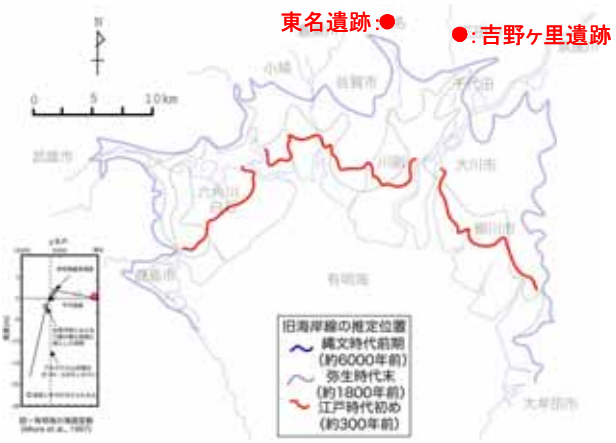


図-4.8　約 300 年前の有明海の海岸線 [15)]

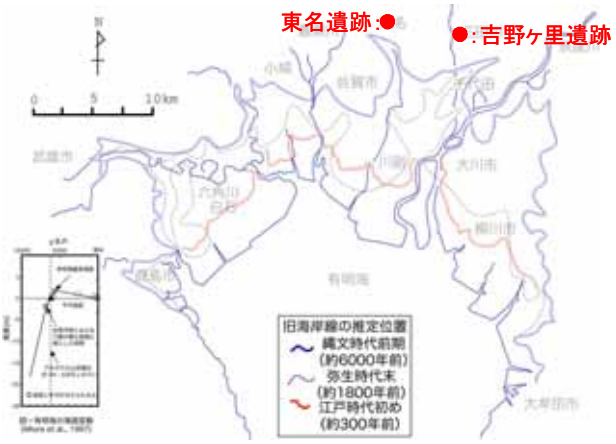


図-4.9　現在の有明海の海岸線 [15)]

等の第四紀学をふんだんに駆使するとともに，遺跡の立地位置との間の関係などについても丁寧に調べ上げ，**図-4.5** に示す約 6,000 年前の有明海の海岸線を復元した．さらに，約 3,200 年間の時代変化とともに，**図-4.6** に示す約 1,800 年前の海岸線のように次々と海岸線を復元する．

ここで，約 6,000 年前の海岸線から約 1,800 年前の海岸線の変遷について，有明海沿岸低平地域ならではのさらなるメカニズムの理解が必要になる．

写真-4.2 は，佐賀県武雄市大日（六角川河口から約 30km の地点）における泥の堆積状況である．この泥には海成の珪藻遺骸が多く含まれていることなどから，一度有明海に注いだ泥が再び逆流して当地に戻ってきていることの証となる．この現象は，有明海湾奥部における反時計回りに代表される潮流および 6m 以上の干満差と河川との間で繰り広げられる壮大なドラマであり，**第 3 章**でもふれたように 8,000 年前から生じていたことが明らかにされている．今日の河川域におけるガタ土の堆積も同じメカニズムである．昔の河川域は，今日のように河川堤防で守られていたわけではない．平常時は河川べりに堆積するガタ土は，洪水時にはまるで土石流のように周辺を襲い，埋め尽くしていったであろう．

図-4.7 を用い，改めて約 6,000 年前の海岸線から約 1,800 年前の海岸線の変遷について説明する．筑紫平野は通常の扇状地や三角州の形成メカニズムとは異なり，土粒子が一度は河川を通じて有明海に注ぎ，再びの河川の遡上の後しかるべき場所にとどまり，氾濫時には後背地から海側にかけて辺り一帯を埋め尽くすとの 1 サイクル余分に形成メカニズムを考えなければならない点でややこしい．約 1,800 年前の海岸線の結果は上記のようなメカニズムで海側に後退した海岸線であり，今日の地質学・地盤工学における「蓮池層上部」という地層の完成でもある．

図-4.8，**4.9** はそれぞれ，300 年前および現在の海岸線である．300 年前から現在の海岸線の変遷は干拓による海岸線の後退であり，この行為は 300 年以上前からも関わっているという．

佐賀は田舎として揶揄されることが少なくない．こうした平野の形成史一つをとっても，古来高度な人の手による技術が組み込まれていることをもっと誇るべきであるし，大学の講義を始め小中高生を対象とした講演で誇りまくっている．また，有明海沿岸低平地（正式名称は筑紫平野）は我が国最大の平野でありながら，高校以下の教科書での採用に至らないのは前述までのメカニズムの複雑さにあるという．ところが，平成 23 年度大学入試センター試験では，地理 B の問題で有明海沿岸

低平地域のことが初めて採用された[20]．全国的な注目度の高さの証左といえる．かつては筆者の研究室のホームページ[21]に掲載している海岸線の変遷メカニズムが河合塾 2007 年センター試験 K-パック（大学入試センター試験模試）に採用されたこともこっそり盛り込み，今後の自慢話に拍車をかけたいと思っている．

成富兵庫茂安の功績を称えるさが水ものがたり館では，以上に説明してきた海岸線の変遷メカニズムは採用されていない．佐賀低平地における治水・利水システムの一師に仰ぐ岸原信義元佐賀大学低平地防災研究センター長の教え[22]によれば，成富兵庫茂安の功績の素晴らしさは，今日のように土木技術が発達していない環境ですでに有明海の海象と河川との間の相互作用を熟知した治水・利水システムを構築した点にあると理解している．この理解が正しければ，以上の海岸線の変遷メカニズムはなおさら成富兵庫茂安の功績を後押しすると思うのだが．

5．浮泥・底泥の安定処理特性と直送安定処理プロセスに基づくコストの試算[23]

有明海問題は生態系のことばかりではない．

図-5.1 に示すように，佐賀県に面する有明海には 31 箇所（平成 15 年度研究時の集計）の港湾・漁港施設があり，**写真-5.1** に示すように浮泥・底泥による施設の埋没問題に苦しめられている．**表-5.1** に示すように，平成 3 年度から 15 年度の 13 年間にわたる浚渫土量の合計は約 56 万 m^3, 10t 級ダンプトラック（最大積載量 $5m^3$）約 11 万台分に相当し，浚渫に要する費用の合計は約 12 億円に及ぶ．こうして浚渫を行っても効果は持続せず，いたちごっこの繰返しを余儀なくされる現状にあり，打つ手がない．

かつて浚渫された浮泥・底泥は有明海湾央部に投棄されていた時代もあったらしいが，

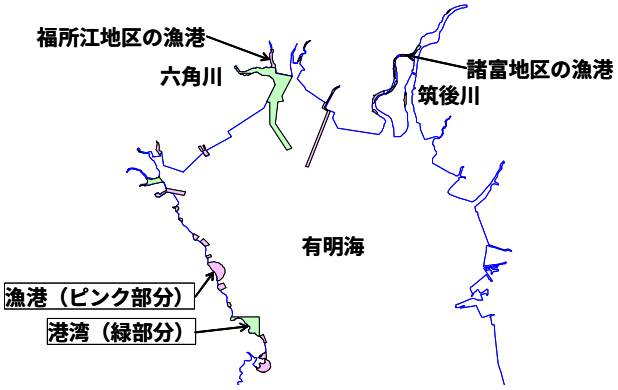


図-5.1　佐賀県に面する有明海における港湾・漁港の分布（平成 15 年度研究時）

写真-5.1　筑後川・早津江川における浮泥・底泥の堆積状況

ロンドン条約の 1996 年議定書の提示，しかる後の国内における 2002 年の廃棄物処理法施行令の改正と 2007 年までの猶予期間の終了に合わせ，その後は控えられているようである．しかも，ひとたび浮泥・底泥に浚渫行為等の人の手が及べば産業廃棄物と化す可能性もあるため，八方ふさがり極まりない．最近，夏季の有明海の満潮時に何かの機会で諸富地区の漁港を訪問した折，特殊な船が漁港に接岸し，スクリュー流のようなものを用いて浮泥・底泥を域外に追い出す光景を見たことがある．

上記のような浮泥・底泥を何とか有効利用できないか考えていた折，佐賀県内の有明海沿岸道路建設プロジェクト[24]への関わりに出会った．有明海沿岸道路は低平地域を横断するため，九州自動車道や長崎自動車道のような切土範囲のない道路構造となる．しかも，コストの観点から盛土主体の構造を余儀なく

表-5.1　佐賀県に面する有明海沿岸域における過去 13 年間の浚渫費用
（平成 3 年度～平成 15 年度）

（単位　数量：m^3　工事費：千円）

漁港名	事業主体		平成3	平成4	平成5	平成6	平成7	平成8	平成9	平成10	平成11	平成12	平成13	平成14	平成15	合計
寺井津	諸富町	数　量	2,900	2,630	2,700		3,703	2,513	1,949	2,420	3,200	2,520			2,450	26,985
		工事費	5,152	5,156	5,161		8,403	6,078	5,964	6,019	9,000	6,000			6,000	62,933
戸ヶ里（三軒屋地区）	川副町	数　量				2,947	7,512	3,634	3,265	3,810	3,450			5,415		30,033
		工事費				5,110	14,403	9,006	8,106	9,908	9,000			9,900		65,433
戸ヶ里（早津江地区）	川副町	数　量		943	1,141	811	1,552	462	736							5,645
		工事費		4,053	5,106	5,108	11,706	3,607	4,206							33,786
戸ヶ里（大託間地区）	川副町	数　量														0
		工事費														0
戸ヶ里（戸ヶ里地区）	川副町	数　量	2,715	2,626	2,587	2,916	7,359	4,038	3,102	3,810	3,800			5,372		38,325
		工事費	5,109	5,109	5,107	5,109	14,406	9,002	8,106	9,908	9,000			9,900		80,756
広江	川副町	数　量	3,245	3,620	3,389	3,374	7,396	4,786	3,660	4,501	4,000			5,353		43,324
		工事費	5,103	5,104	5,104	5,107	14,406	9,001	8,107	9,908	9,000			9,900		80,740
広江	東与賀町	数　量	2,667	3,690	3,541	2,979	5,802	5,485	4,298	4,981	4,000			5,943		43,386
		工事費	5,108	5,103	5,102	5,104	9,902	9,000	8,106	10,112	9,000			9,900		76,437
竹崎	太良町	数　量									1,370					1,370
		工事費									9,000					9,000
小規模計		数　量	11,527	13,509	13,358	13,027	33,324	20,918	17,010	19,522	19,820	2,520	0	22,083	2,450	189,068
		工事費	20,472	24,525	25,580	25,538	73,226	45,694	42,595	45,855	54,000	6,000	0	39,600	6,000	409,085
戸ヶ里	川副町	数　量				8,796	16,585					38,200	19,037	8,094	17,500	108,212
		工事費				38,077	61,800					84,000	44,000	17,000	35,000	279,877
広江	川副町	数　量				39,179					6,600	47,400	24,398	23,001	12,500	153,078
		工事費				65,302					15,000	85,800	49,000	37,200	28,000	280,302
寺井津	諸富町	数　量	2,900	2,630	2,700								13,650		2,450	24,330
		工事費	5,152	5,156	5,161								37,950		6,000	59,419
千歳	千代田町	数　量													7,200	7,200
		工事費													17,000	17,000
福所江	佐賀県	数　量					1,062		2,502				4,447			8,011
		工事費					5,150		9,135				10,235			24,520
佐嘉	佐賀市	数　量					10,091						23,500			33,591
		工事費					23,381						49,657			73,038
浜	鹿島市	数　量				36,810										36,810
		工事費				42,230										42,230
道越	太良町	数　量										1,557				1,557
		工事費										18,100				18,100
公共計		数　量	2,900	2,630	2,700	84,785	27,738	0	2,502	0	6,600	87,157	85,032	31,095	39,650	372,789
		工事費	5,152	5,156	5,161	145,609	90,331	0	9,135	0	15,000	187,900	190,842	54,200	86,000	794,486
合　計		数　量	14,427	16,139	16,058	97,812	61,062	20,918	19,512	19,522	26,420	89,677	85,032	53,178	42,100	561,857
		工事費	25,624	29,681	30,741	171,147	163,557	45,694	51,730	45,855	69,000	193,900	190,842	93,800	92,000	1,203,571

される．盛土のほとんどを外部から調達しなければならなくなる．地球温暖化問題が叫ばれている今日，淡水の涵養源となる山地を切り崩しての良質土の入手も困難を極めることになろう．こちらもまた，多くの課題を抱えている状況にあることを知った．

佐賀県に面する有明海は 31 ヵ所の港湾・漁港施設があり，総面積は約 1 千 800 万 m^2。この総面積に対して深さ 1m の浚渫を行った場合，約 1 千 800 万 m^3 の浚渫土量が生じる。例えば有明海沿岸道路が幅 18.5m, 高さ 5.5m, 1:1.8 勾配の盛土の想定のもとで建設され続ける場合，約 55km 分の盛土量を補える試算になる．港湾・漁港域の浮泥・底泥を浚渫し，有明海沿岸道路で有効利用できれば一挙両得ではないか．このような単純なひらめきが，本研究の着想の経緯である．

佐賀市諸富地区および小城市福所江地区（**図-5.1** 参照：ともに市町村合併後の地区として呼んでいる）に位置する漁港を対象に，**図-5.2**，**5.3** に示す浮泥・底泥の基本的特性を把握した．これらの結果から，まず両地区はともに有明海に近いにも関わらず，塩濃度はさほど高くないことを知った．酸化還元電位の計測から顕著な嫌気（還元）的性質にあるのを知ったとき，前述した夏季のスクリュー流のようなものによる浮泥・底泥の域外への追い出し行為が正しい理解であれば，有明海の溶存酸素特性に及ぼす影響のことが気になった．

浮泥・底泥の有効利用に際しては，石灰やセメントの配合による利用の事例が少なくない．次に，**図-5.4**，**5.5** に示す両地区の改良特性について検討した．その結果，諸富地区

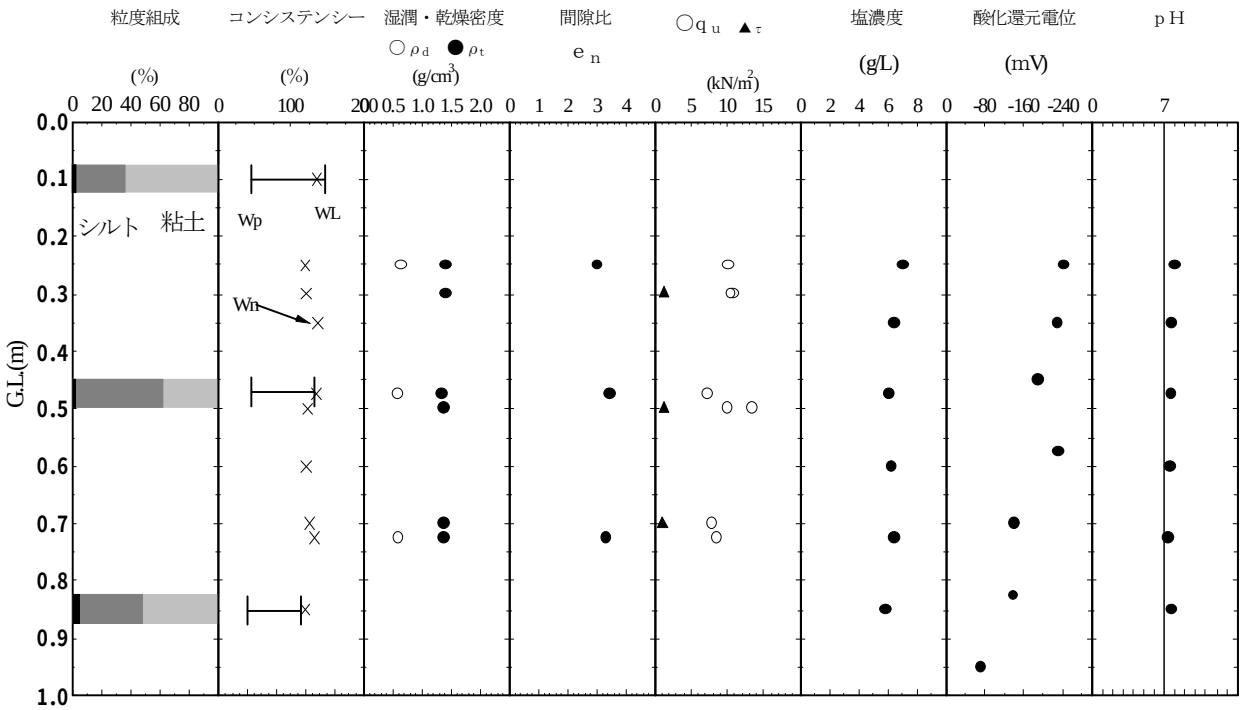


図-5.2　諸富地区の漁港における浚渫土の性質

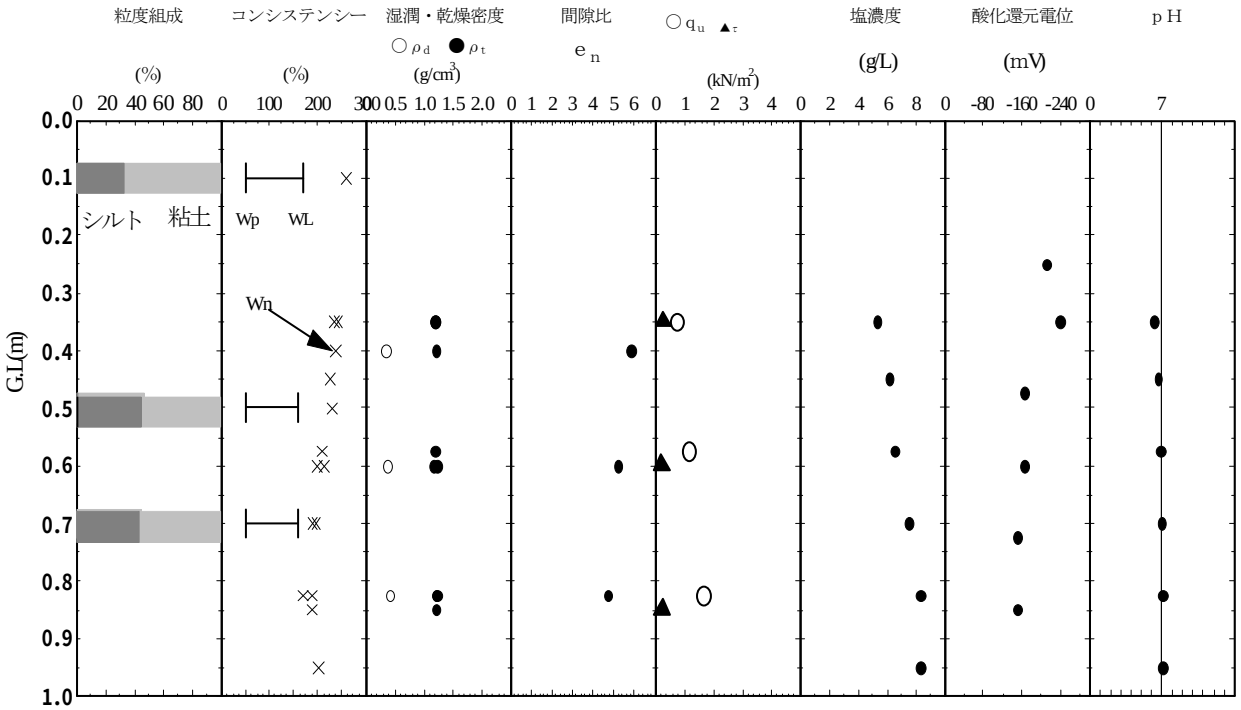


図-5.3　福所江地区の漁港における浚渫土の性質

の浮泥･底泥は改良材の選択性が顕著なこと，福所江地区の場合はあまり改良材の種類を問わないことがわかった．諸富地区で顕著な強度発現をもたらしたのは，生石灰と石こうの 2 成分からなる改良材である．これは，有機質を顕著に含む土の改良のために開発されたものである．このことから，諸富地区における浮泥・底泥は，有機質を多く含んでいることが推定される．

有明海における浮泥・底泥は，ときに第二

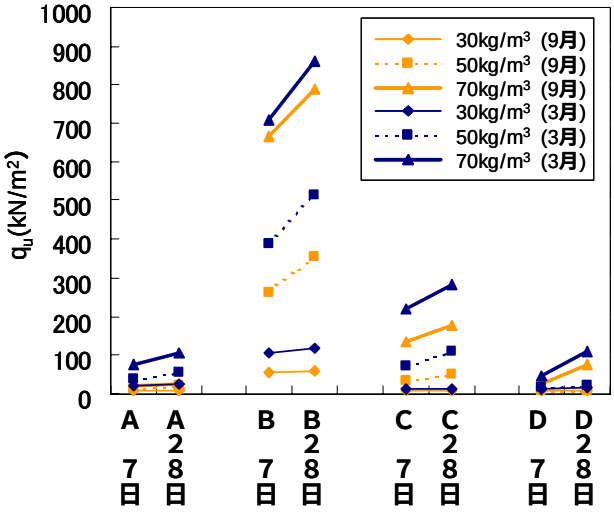


図-5.4　諸富地区の漁港における浮泥・底泥の安定処理特性

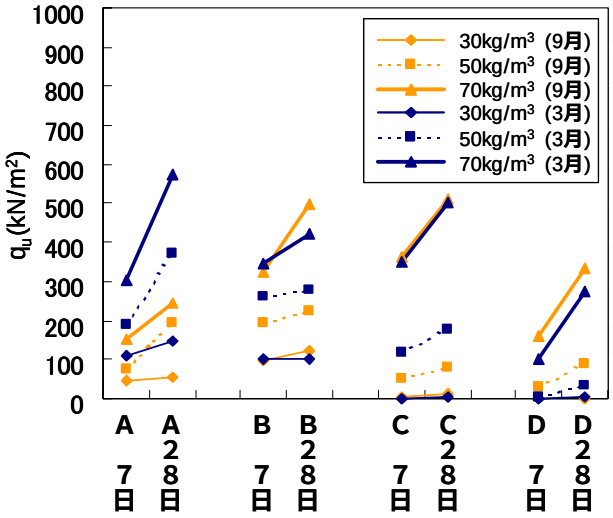


図-5.5　福所江地区の漁港における浮泥・底泥の安定処理特性

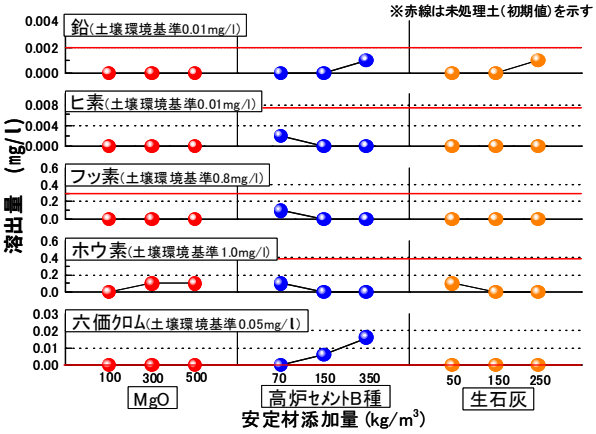


図-5.6　改良後 2 時間の溶出抑制結果

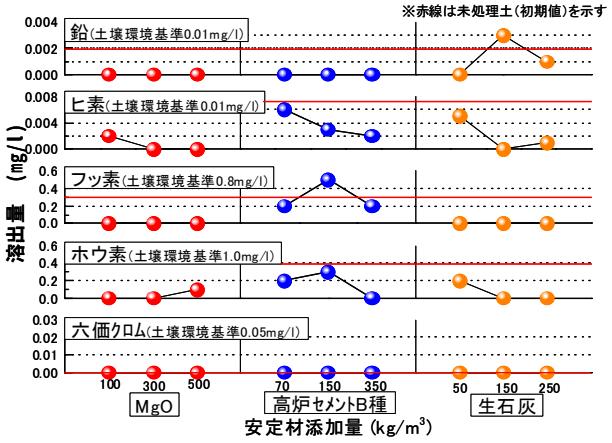


図-5.7　7 日養生後の溶出抑制結果

種特定有害物質中のヒ素，フッ素およびホウ素が基準値を超す値が得られる場合がある．浮泥・底泥の堆積環境は有明海であり，海水中にはヒ素，フッ素およびホウ素が不可避的に含まれている．これらは浮泥・底泥の堆積の過程で濃縮されるようであり，自然由来によるもので人為的なものではないと考えている．**図-5.6**，**5.7** に示すように，所定の溶出抑制効果は既に確認している．今後はさらに硫酸添加溶出試験法・消石灰添加溶出試験法による溶出試験[25]などを適用し，長期的な溶出抑制効果について確かめる必要がある．

以上のように，いわば大学関係者の得意とする範囲の研究成果を着々とあげていた折に，最初の研究の壁に突き当たることになる．研究の委託担当者から“何んとなく使えることはわかってきましたが，ところで 1m^3 あたりどれくらいの材料コストになるのでしょうか？いくらよい材料でも，コストが高ければ事業実施者は手を出せないんですよ．おのずと研究も止まることになりますね．”といわれた．まっとうな指摘だと思った．急ぎ研究室に戻り，普段お世話になっている技術者・科学者の方々に片っ端から連絡するが，いずれの答えもコストの算出は容易ではないという．**図-5.8** に，浚渫泥を改良して盛土施工するまでのプロセスを示す．同図に示すように，浚渫現場から盛土施工箇所の間には大きくくくっても 3 通りのプロセスがあり，さらに改良方法，改良材（図中では固化材）の種類や量，仮置き用地の種類，仮置き期間，運搬距離がコストの変数として一層複雑にさせる．この

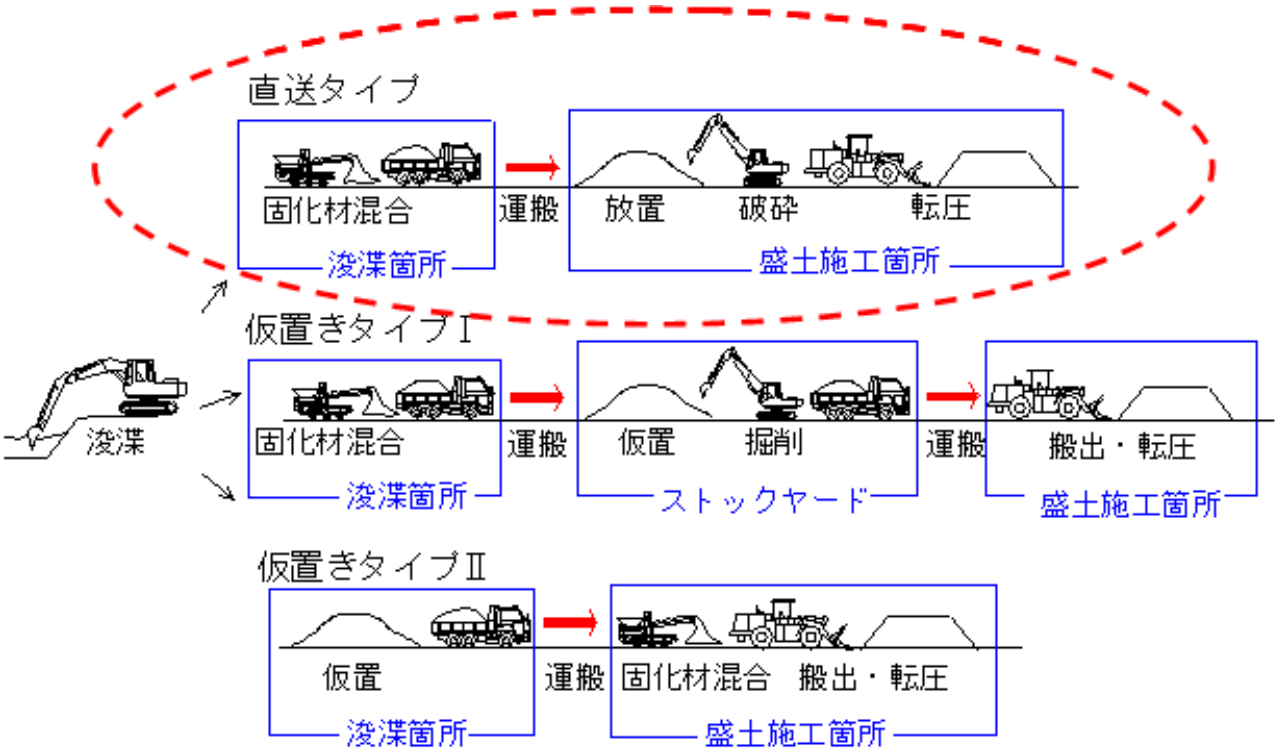


図-5.8　浚渫泥を改良して盛土施工するまでのプロセス

ように困り果てた中で，同図の赤枠破線で示すように浚渫後直ちに改良，盛土施工箇所までの材料の運搬，盛土施工，からなる直送施工パターンであればコストを試算できないこともないとの回答が得られた．直ちにコスト性と施工性をベースとし，これに前述までのような基礎的検討を重ねる研究手法に改め，実用化を目指し続けることにした．

図-5.9 に，佐賀市に流れる本庄江流域における浮泥・底泥の調査地点を示す．上述の直送施工パターンの観点から浚渫可能な地点を踏査し簡易測量を重ねていき，**図-5.10** に示す土量計算法を用いて浚渫土量を試算した．得られた結果は 62,000m^3 であった．次に，**図-5.11** に示すように改良方法，改良材（図中では固化材）の種類や量，仮置き用地の種類，仮置き期間，運搬距離の各条件の絞り込みを行い，直送施工パターンにおける材料コストを試算した．結果は**表-5.2** に示すようであり，条件によっては¥2,000/m^3～¥4,000/m^3 程度の価格を示す購入土との間で競える価格が得られることがわかり，研究委託担当者の興味を

図-5.9　本庄江流域における浮泥・底泥の調査地点

何とか引きもどすことができた．

以上のように，浚渫土の有効利用に際するコスト性の検討一つをとってもかなりの労力と時間を費やすことになった．参考にできるマニュアルの存在がなかったことが理由である．今回のようなコスト性の視点による研究は価値があると考え，平成 19（2007）年度の

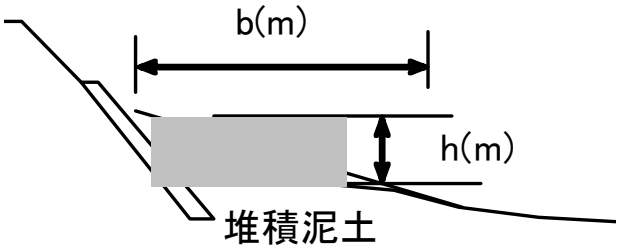


図-5.10　推定土量計算の模式図

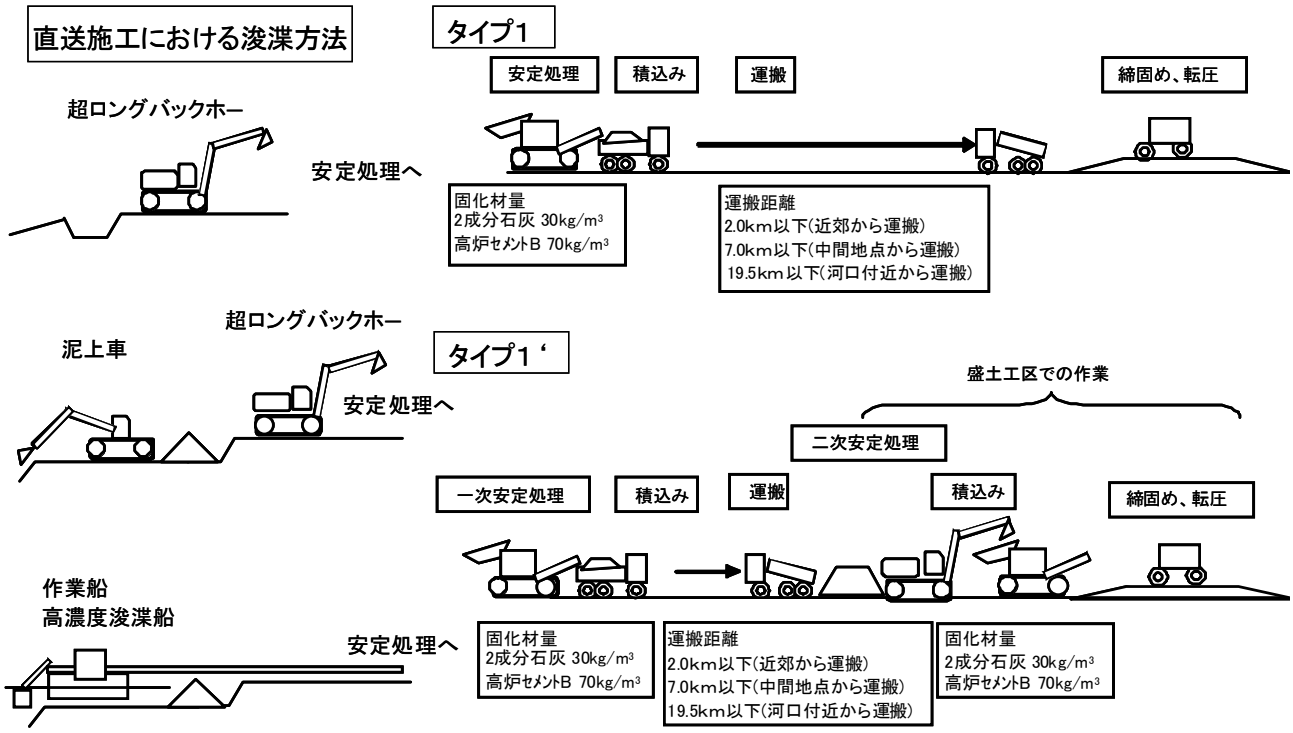


図-5.11　直送施工パターンによる盛土の施工

表-5.2　直送施工パターンにおける材料コストしての試算結果（労務費は含まず）

浚渫方法	浚渫費 (円/m³)	安定処理費 (円/m³)		積込み運搬費 (円/m³)		敷均し･転圧費 (円/m³)	合計 (円/m³) t.1	合計 (円/m³) t.1'
①超ﾛﾝｸﾞﾊﾞｯｸﾎｰ	700	t.1　2成分石灰(30kg/m³)	2,300	2.0km以下	700	100	3,800	6,300
		t.1' 2成分石灰(30kg/m³)		7.5km以下	1,300		4,400	6,900
		一次、二次の2回	4,800	19.5km以下	2,300		5,400	7,900
		t.1 高炉ｾﾒﾝﾄB(70kg/m³)	2,100	2.0km以下	700		3,600	6,000
		t.1' 高炉ｾﾒﾝﾄB(70kg/m³)		7.5km以下	1,300		4,200	6,600
		一次、二次の2回	4,500	19.5km以下	2,300		5,200	7,600
②泥上車+超ﾛﾝｸﾞﾊﾞｯｸﾎｰ	1,600	t.1　2成分石灰(30kg/m³)	2,300	2.0km以下	700		4,700	7,200
		t.1' 2成分石灰(30kg/m³)		7.5km以下	1,300		5,300	7,800
		一次、二次の2回	4,800	19.5km以下	2,300		6,300	8,800
		t.1 高炉ｾﾒﾝﾄB(70kg/m³)	2,100	2.0km以下	700		4,500	6,900
		t.1' 高炉ｾﾒﾝﾄB(70kg/m³)		7.5km以下	1,300		5,100	7,500
		一次、二次の2回	4,500	19.5km以下	2,300		6,100	8,500
③高濃度浚渫船	21,300	t.1　2成分石灰(30kg/m³)	1,400	2.0km以下	700		23,500	25,100
		t.1' 2成分石灰(30kg/m³)		7.5km以下	1,300		24,100	25,700
		一次、二次の2回	3,000	19.5km以下	2,300		25,100	26,700
		t.1 高炉ｾﾒﾝﾄB(70kg/m³)	1,200	2.0km以下	700		23,300	24,800
		t.1' 高炉ｾﾒﾝﾄB(70kg/m³)		7.5km以下	1,300		23,900	25,400
		一次、二次の2回	2,700	19.5km以下	2,300		24,900	26,400

※t.1：タイプ1，t.1'：タイプ1'．※各浚渫方法における最高を赤，最低を青で示す．

土木学会年次学術講演会（全国大会）における専門部門への公表に打って出た．得られた反応は冷ややかであり，どうやら場違いであったらしい．土木関係者の研究テーマにそぐわないのなら，いっそ経済学の分野ではどうだろう．筆者の経済学に関する知識は素人同然なので，専門家への相談が必要である．

購入土の価格は¥2,000/m^3～¥4,000/m^3 程度と廉価であることを前述した．購入土とは，山地を切り崩すことで得られる良質土のことである．地球温暖化問題が叫ばれている今日，淡水の涵養源となる山地を切り崩しての良質土の入手は困難を極める可能性についても前述した．このように考えれば，購入土の価格は評価額が低すぎるように思うのは筆者だけだろうか．我が国の国土が外国人に購入され続けており，いずれ問題化することが予測されている．購入土に関する問題提起から国土保全へと関心の発散は止まらない．

6.　浮泥・底泥の有効利用における問題点

浮泥・底泥の有効利用における問題点は，前章の検討のみで必ずしも未来側に転じたわけではない．次の研究の壁が待ち構えていた．

図-6.1 は，浮泥・底泥改良後の乾燥密度と締固めエネルギーの関係である．同図の考え方は，改良土を盛土に利用するために締固めた場合，一定以上の締固め効果を与えてもそれ以上は締固まらないことを示している．つまり，改良土による盛土は土構造物としての荷重は軽いことを示している．このような性質は現在も活かされていて，「軽量盛土」としての施工実績を積み重ねている．このような土構造物の微視的な土構造をイメージすると，**図-3.3** に示した土の間隙部分が多く残存する形である．いわば，トムとジェリーのアニメに出てくる穴だらけのチーズのようにである．軽量がゆえに下層の軟弱地盤対策が軽減されるのが取り柄であるが，最近このような土の

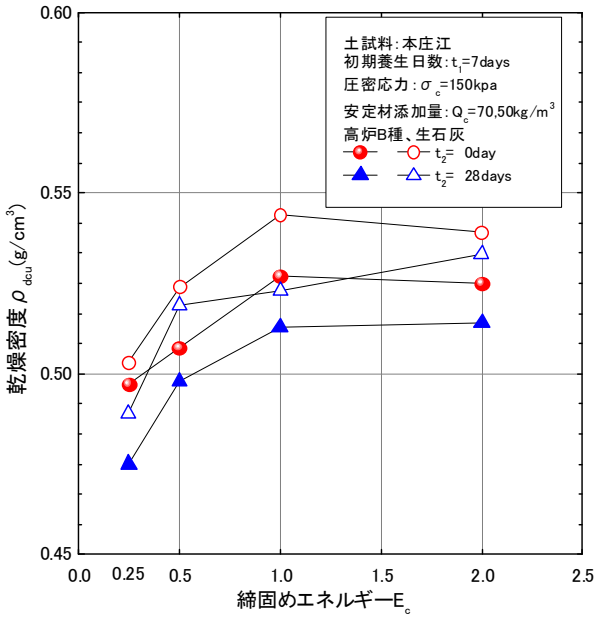


図-6.1　乾燥密度と締固めエネルギーの関係

材料特性の長期強度安定性に関して疑問視されている．

六角川の河川堤防では堤体の一部から漏水が確認された．調査の結果，堤体をなしていたのは改良土層であり，泥ねい化していたとのことであった．このメカニズムについて研究がすすめられているが [26]，筆者は次から述べるメカニズムに注目している．**図-6.2** に示すように，もし改良土にムラがある場合，**図-6.3** に示すように未改良部には生物起源パイライト（FeS_2）などの硫化物が残存している可能性がある．生物起源パイライトの性質については**第 4 章**で詳しく述べている．この生物起源パイライトが酸素を含む表流水に触れると，**図-6.4** に示すように硫酸を生成する．浮泥・底泥に石灰やセメントを配合し強度発現させるためには，**図-6.5** の上図に示すようにアルカリ環境が必要である．見かけ上は改良に成功したと考えられる浮泥・底泥が実は改良ムラを有し，これに表流水が浸透して未改良部中の生物起源パイライトが酸化されて硫酸を生じせしめたとする．すると，**図-6.5** の下図に示すようにせっかくアルカリ環境中で強度発現していた改良土は中性化することとなり，強度低下するとの考え方である．こ

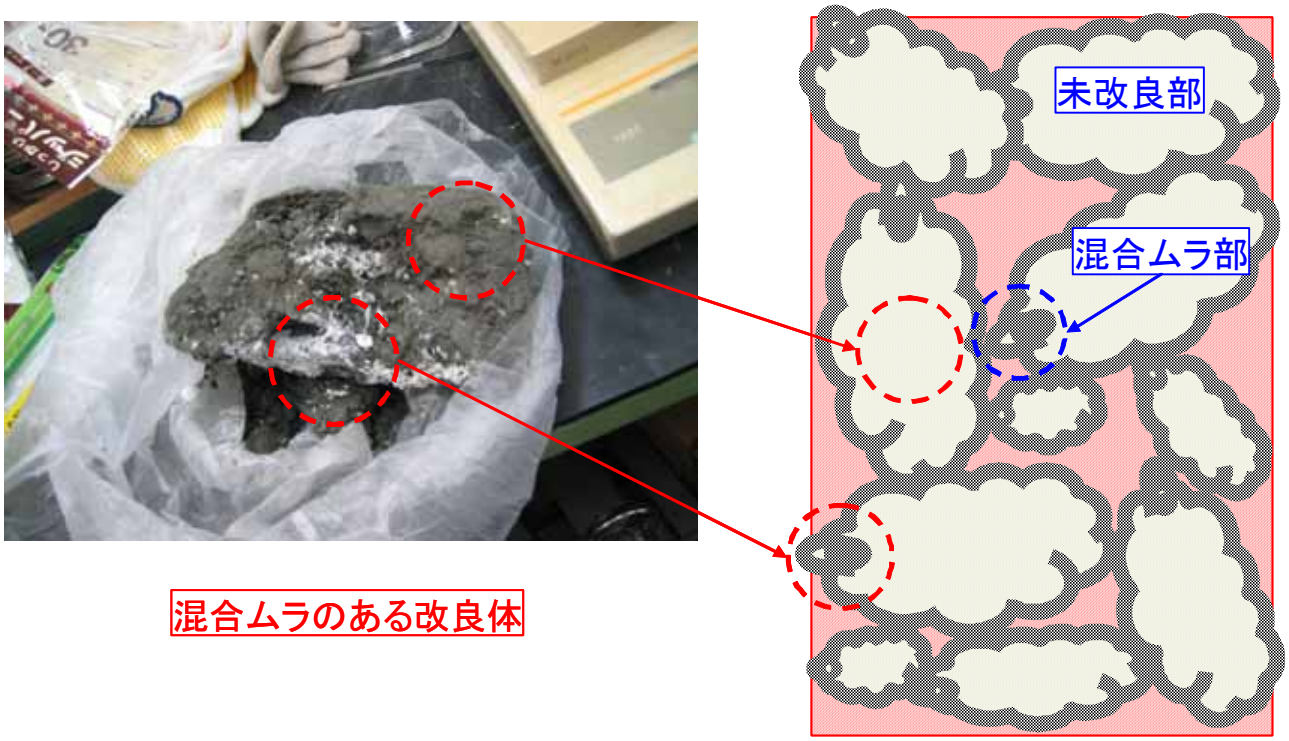


図-6.2　改良ムラのある改良体とその模式図

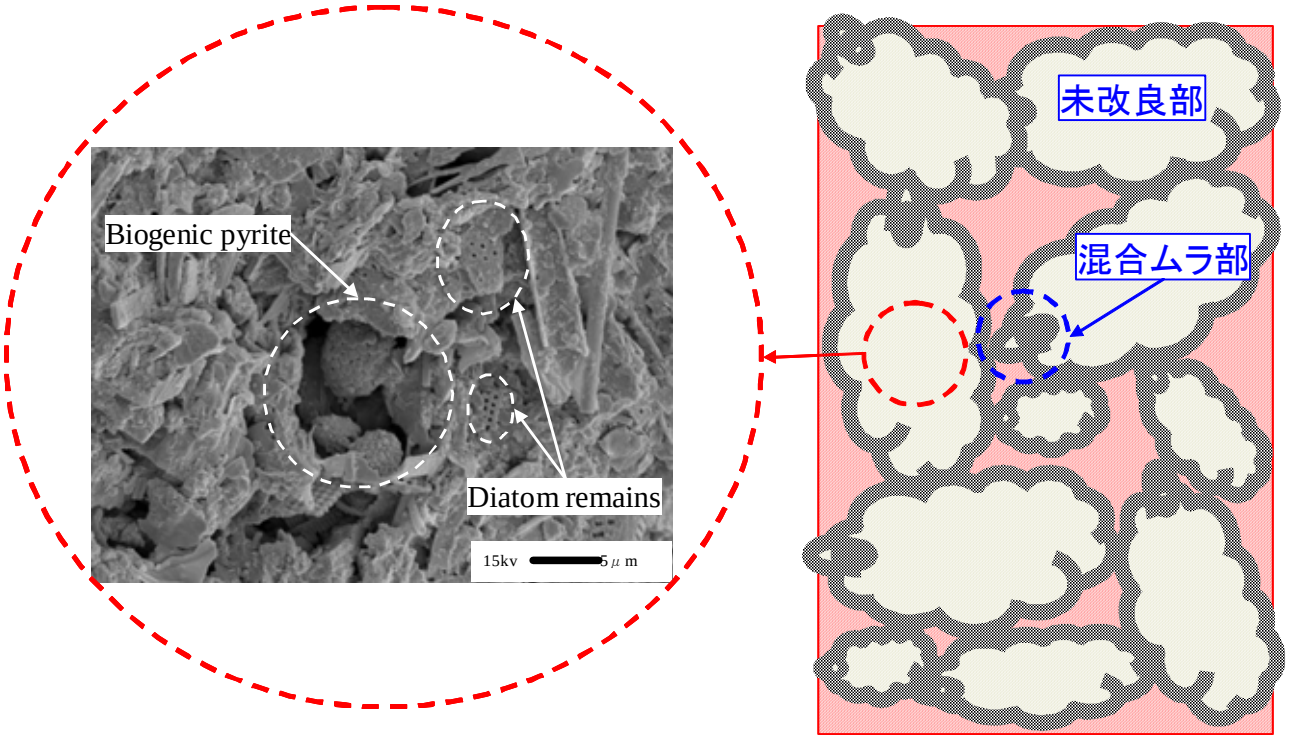


図-6.3　未改良部における生物起源パイライト（FeS_2）残存の可能性

の考え方にはなお研究が必要であり，現時点では不正確さを有することをお断りしておく．いずれにせよ，現時点での対策法はやみくもに石灰やセメントの配合量を下げないとともに，**写真-6.1**[19]に示すようにしっかりとした混合に努めるほかない．この対策の欠点は，**第 5 章**で述べたようにコストが増加することである．最終的には，今後は石灰やセメントの使用はあきらめざるを得なくなるかもしれない．こうなってくると，有明海沿岸低平地

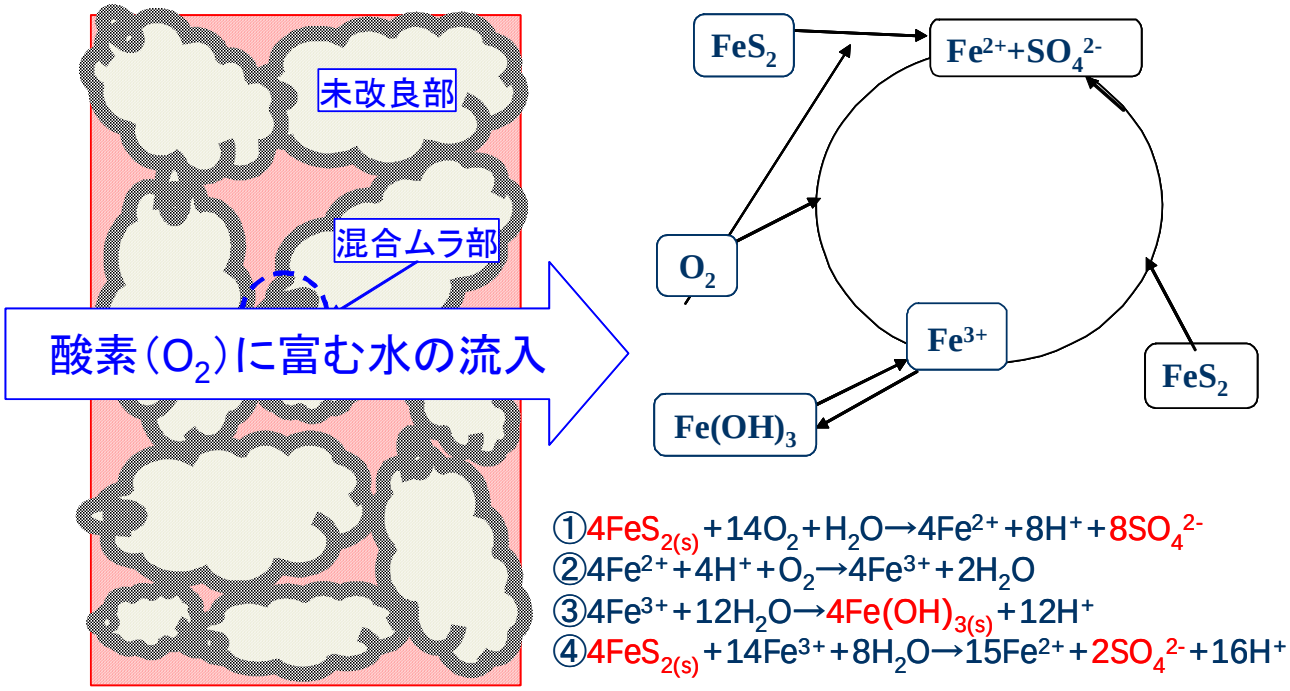


図-6.4　未改良部における生物起源パイライトによる酸化鉄と硫酸生成の可能性

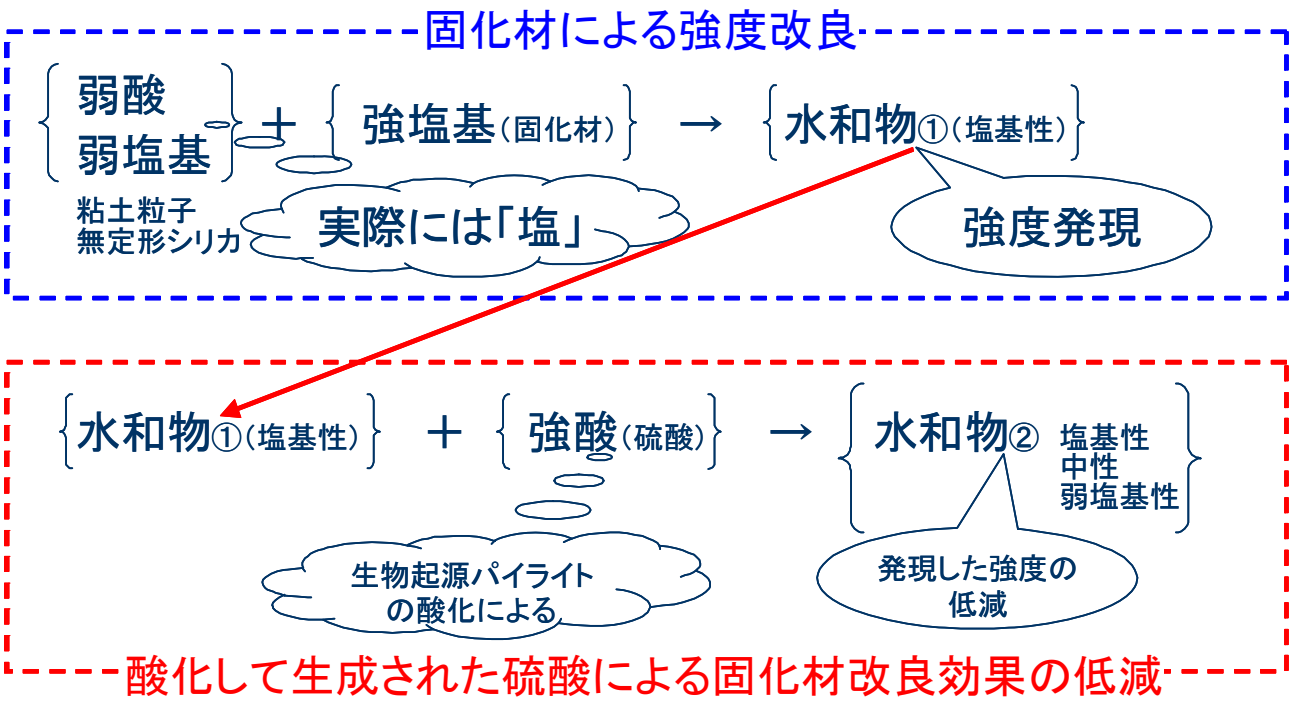


図-6.5　石灰・セメント系固化による改良体の長期強度変化に関する模式図

域における浮泥・底泥の浚渫を始めクリーク保全，泥質河床の掘削，陸域で生じる建設発生泥などの対応に抜本的な見直しを余儀なくされることになり，社会的混乱は必定であろう．

佐賀県神埼市を縦断する城原川は，ダムの建設か河床再構築・堤防強化かで議論が揺れていると理解している．もし後者の有力視が高まれば，時期を異にせず堤防材料の確保と河床浚渫土の適切な処理について検討を始めないと，前述のように既往の技術は必ずしも後者の方針を支えない可能性がある．場合によっては第 3 の選択肢[27]が正解を示すことになるかもしれない．

写真-6.1　東名遺跡の保存対策に用いられた改良土の 2 段階混合の様子

有明海では平成 12 年末～13 年初頭における深刻な海苔色落ち被害の発生を契機に有明海研究が進められている．当時はとりわけ諫早湾の締切および干拓事業に主因論が集中していたと思う．このような中，平成 15 年度には有明海の赤潮や謎の浮遊物の大量発生が認められた．この原因として，諫早干拓造成地における石灰系改良材による地盤改良が原因に指摘された．

対応に迫られた石灰関係者から聞かされた見解は次のようなものであった．諫早干拓造成地における海成の浮泥・底泥・粘土地盤に対して石灰系改良材を用いた地盤改良を行うと，土中からアルカリ分が溶出する．溶出したアルカリ分が調整池内に流れ込んで珪藻類の資源となり，調整池内で大量の珪藻が増産されることになる．大量増産された珪藻類は，調整池の開門に伴って有明海へ放流される．有明海に放流された珪藻類はその後赤潮と化し，海苔を始めとする水産資源養殖場に遡上し先に栄養塩類を消化してしまい，被害をもたらす．

上記の見解は何か腑に落ちない．アルカリ分がカルシウムイオンのことであれば，**第 4 章**で述べたように，一般に海水中のカルシウムイオンは過飽和の状態にあるため，影響が考えにくいからである．石灰関係者は，石灰使用後にはカルシウムイオンの溶出抑制効果があることや pH は上昇しないことを挙げて事態の収拾を図ろうとしたが，双方の見解は平行線をたどり，万策付き果てての技術相談

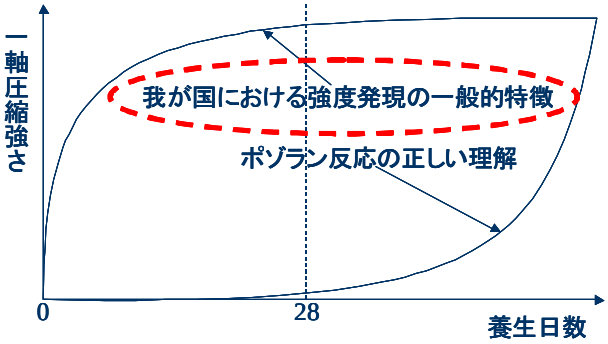


図-6.6　粘土に生石灰を配合した場合の強度発現特性

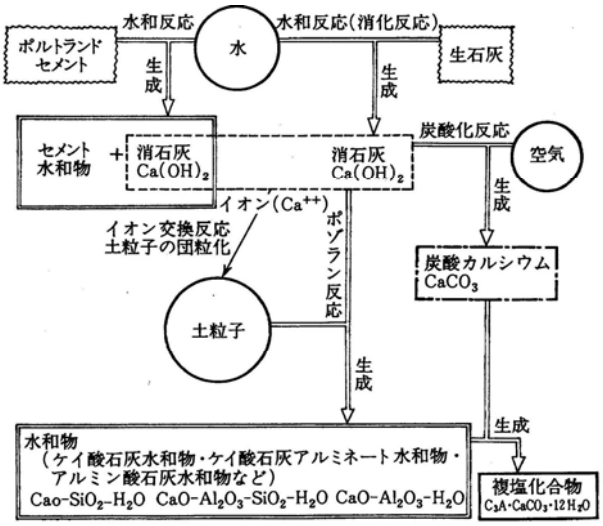


図-6.7　セメントおよび石灰と土との基本的な反応の一覧 [29)]

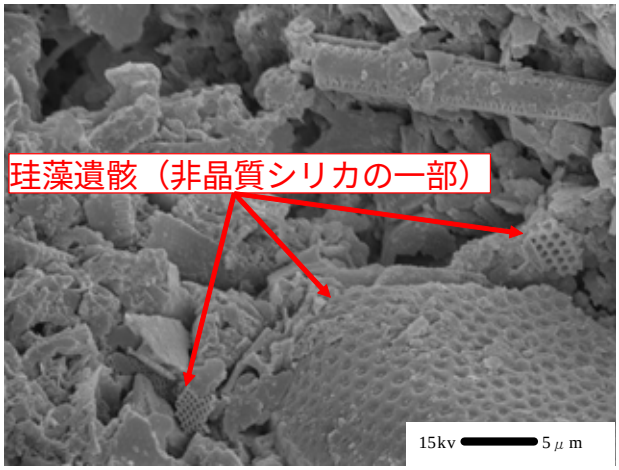
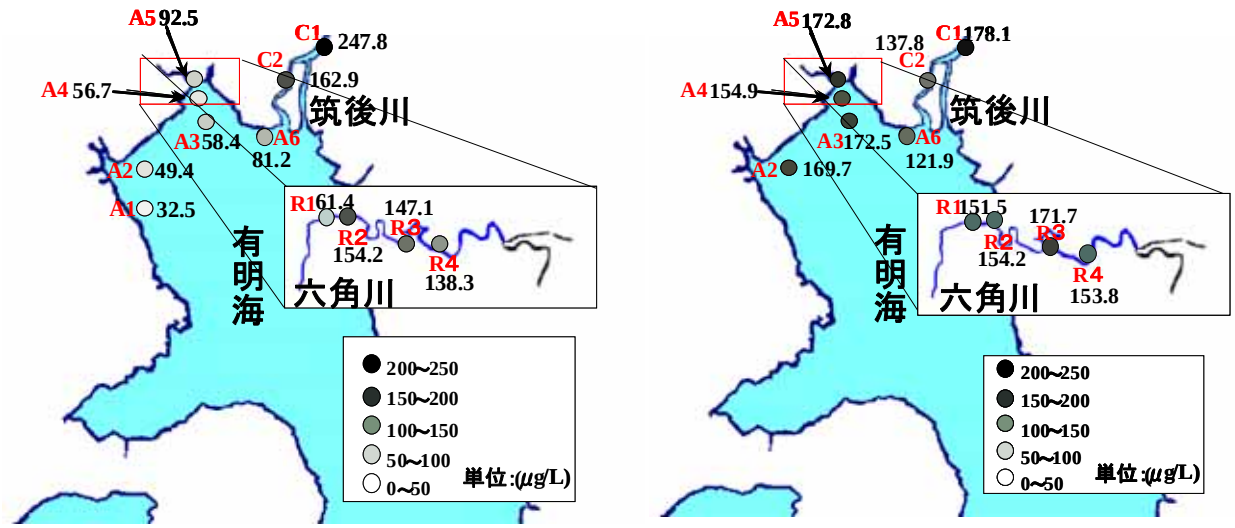


写真-6.2　浮泥・底泥・粘土中に含まれる珪藻遺骸（非晶質シリカの一部）



有明海・主要河川における溶存シリカの濃度分布

浮泥・底泥中間隙水における溶存シリカの濃度分布

図-6.8　有明海沿岸低平地域における溶存シリカの広域調査結果

となった．

数回の技術相談を経ていく中で，漁業関係者は沿岸域で使用されるコンクリートを問題視することに話題が触れた．この話題をきっかけに，平行線をたどる理由がひも解けたように思う．つまり，漁業関係者は諫早干拓造成地における海成の浮泥・底泥・粘土地盤に対して石灰系改良材を用いた地盤改良を行うことで，土中からシリカ（Si）が溶出する懸念を示したのではないか．この理解が正しいとすれば，これらの物質は珪藻等の骨格の主成分になるからである．

しかし，なおも腑に落ちない．**図-6.6** に示すように，有明海沿岸低平地域における海成の浮泥・底泥・粘土地盤に対して石灰を用いた地盤改良を行う場合，丁寧な使用のもとで効果が発揮される場合は早期の強度発現特性を示す．このメカニズムは**図-6.7** のように説明され，粘土中のシリカ水和物が強度発現に寄与する．

有明海沿岸低平地域に堆積する海成の浮泥・底泥・粘土地盤には，大量の貝殻や**写真-6.2** に示す珪藻遺骸・火山ガラス（非晶質シリカと呼ぶ）が含まれる．貝殻は，海水のようなカルシウムイオン過飽和かつ弱アルカリ性の環境での保存環境を好み（**第 4 章**参照），逆に非晶質シリカは酸性環境での保存環境を好む．つまり，相反する保存環境を好む物質が海成の浮泥・底泥・粘土地盤には含まれている．これらの泥類が塩分溶脱に代表される 2 次的な環境の変化をもたらされると，含有貝殻の溶解が生じ，アルカリ性が高まる．次に非晶質シリカの溶解が始まって，泥類中の pH 環境の平衡性が保たれる．これらの輪廻は堆積年代を重ねる海成粘土地盤ほど繰り返されている可能性がある．**図-6.8** は，有明海沿岸域における表流水および浮泥・底泥中の溶存シリカの広域調査を行った結果である．同図に示されるように，浮泥・底泥中の溶存シリカは表流水の 2～3 倍の量にある．

前述したように，石灰を用いた地盤改良を行う場合，丁寧な使用のもとで効果が発揮される場合は早期の強度発現特性を示す．諫早干拓造成地においては**写真-6.3～6.6** に示すように，改良ムラもなく丁寧な撹拌状況にあり，早期の強度発現も認められた．このことは，海成の浮泥・底泥・粘土地盤中に高い濃度で含有される溶存シリカが改良後にその場

写真-6.3　諫早干拓における地盤改良の状況（撹拌前の状況）

写真-6.4　諫早干拓における地盤改良の状況（撹拌状況）

写真-6.5　諫早干拓における地盤改良の状況（改良 28 日目以降の開削現場の状況）

写真-6.6　諫早干拓における地盤改良の状況（開削断面）

に固定されることの証左と考えられ，技術相談の折に強度特性を示すだけで問題は解決するとアドバイスした．ところが，ならばシリカの溶出特性を具体的に示さないと相手は納得しないという．地盤工学と地球化学の分野による共同研究体制を組織し，**写真-6.3～6.6** に示す現地踏査，**図-6.8** に示す溶存シリカの広域調査を手掛けるとともに，溶存シリカの溶出特性の検討や他の栄養塩類の広域調査を 3 年の月日のもとで取り組んだ．溶存シリカの溶出特性の観点から，石灰の配合による改良体からのシリカの溶出は，未配合の場合に比べ 1/350 の溶出量に抑えることを明らかにした．また，他の栄養塩類の広域調査の結果からは，**図-6.9** に示すように，潮受け堤防の内外で栄養塩類のアンバランス化が生じ，石灰による地盤改良行為とは無関係に潮受け堤防内の溶存シリカが高濃度化している関係を見出した[28]．これらの結果から，最終的には諫早干拓造成現場における石灰系改良材による地盤改良が有明海の赤潮問題に及ぼす影響はないと結論付けたが，この頃には庶民の関心はすでにどこ吹く風であった．なお，謎の浮遊物の大量発生の原因についてはついにわからずじまいであった．

今日までの有明海問題への取り組みにおいて，窒素，リン等の栄養塩類については盛んに議論されるが，前述してきたシリカの特性についてはなぜか取り上げられることがない．有明海沿岸低平地域の流域環境においてはシリカの高濃度性は当たり前に捉えられており，その調査の必要性を説いても一笑に付され相

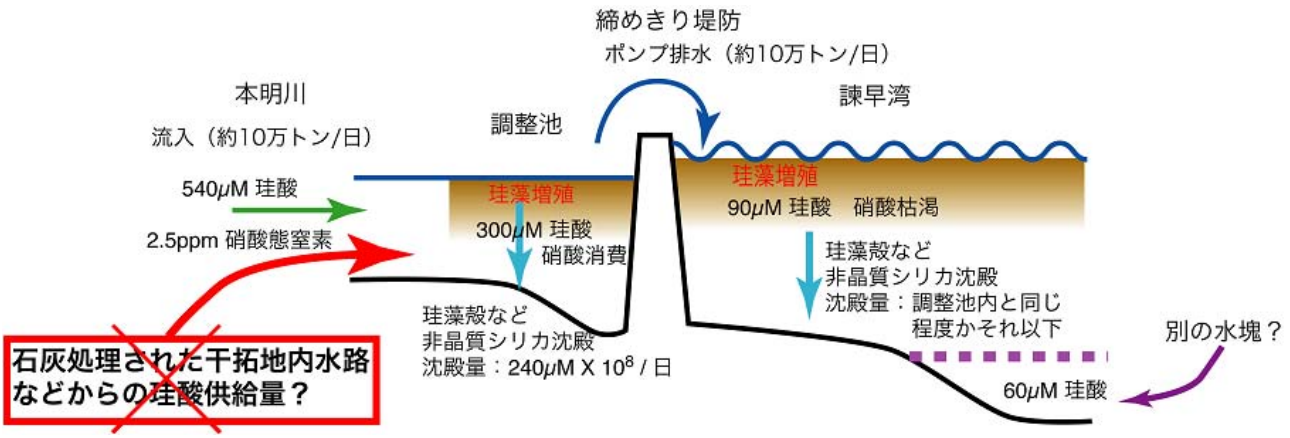


図-6.9　諫早湾潮受け堤防を中心とした内外の溶存シリカおよび栄養塩類の物質循環に関する調査結果の事例 [28)]

手にされなかったことがある．ところが，最近ではシリカが注目される傾向にある．それ見たことかとそっとつぶやいてみる．

7.　おわりに

新潮社から出版され，平成 19 年（2007 年）には 5 刷を重ねた塩野七生（しおの　ななみ）氏の著書「海の都の物語～ヴェネツィア共和国の一千年～」上・下巻 [30),31)]を購入し，大学の教養教育講義の資料の一部に用いている．この本は，確か筆者の学部在籍中か大学院在籍中の頃に母親から単行本版で与えられ，「お前も佐賀の地で勉強しているならこの本ぐらい読め」，と紹介されたのが出会いであった．何を！と対抗心をむき出しにし，長らく本棚に放置させてしまい，数ヶ月か数年を経て初めて読み，そして衝撃に駆られた．

塩野氏の著書では，「水の行政官」について紹介される．「水の行政官」に就任する者は非常に重要な仕事の責任者とされたので，就任したばかりの行政官は元首（ドージェ）に連れられて民衆の前に立たされ，一種独特の儀式を済まさねばならなかった．元首（ドージェ）は集まった国民に向かい，「この者の功績を褒め讃えよ．それにふさわしい報酬を与えよ．しかし，この責任重い地位にふさわしくないとなったら，絞首刑に処せ！」．こんな物騒な就任式をしなくてもよくなったのは，ヴェネツィア共和国が崩壊してからである．おかげで，それから 200 年も経たないというのに現在のヴェネツィアはしばしば水浸しになる．塩野氏は続ける．潟（ラグーナ）を回ってみて，初めて私には，「水の行政官」にとって，そして全ヴェネツィア人にとっても至上命令であった，ラグーナ・ヴィーヴァ，「生きている潟（ラグーナ）」の重要性が理解できたような気がする．海水は，流れていなければならない．いったんそれが澱みはじめるや，腐敗物がそこに沈殿し，伝染病発生の源になる．建国当時は，リアルトよりも経済の中心と言われるほど繁栄したトルチェッロの島が，まもなく衰退し，現代では建国当時のヴェネツィアを見たいと思ったらトルチェッロへ行け，と言われるほどにさびれ果ててしまったのも，マラリアのためであった．ラグーナ・モルター死んだ潟（ラグーナ）は恐ろしい，と．

今日の有明海沿岸低平地域に何か通じるものを感じるのは筆者だけだろうか．有明海沿岸低平地域は今も変わらぬ“低平地”であり続けていることに変わりない．社会資本整備の充実の結果，どうも我々はそのことを忘れかけていやしまいかとの不安に駆られる．

また，何も遠くヨーロッパまで求めずとも，同じ思想を持った佐賀の先人のことが思い浮

かばないだろうか.

最後に，今日の有明海沿岸低平地域における諸問題について，今では早くから筆者以上の先見の明を持っていたと考えられる母親の存在が恐ろしい.

参考文献：

1) 公益社団法人地盤工学会：http://www.jiban.or.jp/

2)地盤工学会 : 第 41 回地盤工学研究発表会平成 18 年度発表講演集, CD-ROM, 鹿児島市, 2006.

3)地盤工学会 : 第 42 回地盤工学研究発表会平成 19 年度発表講演集, CD-ROM, 名古屋市, 2007.

4)地盤工学会 : 第 43 回地盤工学研究発表会平成 20 年度発表講演集，CD-ROM，広島市, 2008.

5)地盤工学会 : 第 44 回地盤工学研究発表会平成 21 年度発表講演集，CD-ROM，横浜市, 2009.

6)地盤工学会 : 第 45 回地盤工学研究発表会平成 22 年度発表講演集，CD-ROM，愛媛市, 2010.

7)佐々真志，渡部要一，梁順普：巣穴底生生物の土砂環境選択行動とパッチ形成の実証, 第 45 回地盤工学研究発表会平成 22 年度発表講演集，CD-ROM，pp.2029-2030，2010.

8)佐々真志，梁順普，渡部要一，梶原直人，高田宣武：水産有用魚類の餌資源生物分布に果たすサクションの役割, 第 45 回地盤工学研究発表会平成 22 年度発表講演集, CD-ROM, pp.2031-2032，2010.

9)佐賀大学低平地沿岸海域研究センター：http://www.ilt.saga-u.ac.jp/

10)日野剛徳，伊賀屋豊，下山正一，柴錦春：九州・沖縄の特殊土の紹介①～有明粘土～, 地盤工学会誌，Vol.58，No.6，pp.6-9，2010.

11)下山正一 : 有明海北岸低平地の成因と海岸線の変遷，特集　有明海の自然と文化，文明のクロスロード MuseumKyushu，博物館等建設推進九州会議，第 14 巻，第 2 号，通巻第 52 号，pp.9-21，1996.

12)嘉門雅史，浅川美利 : 土木学会編新体系土木工学，16，土の力学（Ｉ）～土の分類・物理化学的性質～，技報堂出版，271p，1988.

13)Nagaraj, T. S., Srinivasa Murthy, B. R. and Vatsala, A. : Analysis and prediction of soil behaviour, Wiley Eastern Limited, pp.181-207, 1994.

14)山口晴幸，池永均 : 土構造評価への水銀圧入型ポロシメーター装置の利用，土と基礎, Vol.41，No.4，pp.15-20，1993.

15)下山正一, 松本直久, 湯村弘志, 竹村恵二, 岩尾雄四郎，三浦哲彦，陶野郁雄：有明海北岸低地の第四系，九州大学理学部研究報告, 地球惑星科学, 第 18 巻, 第 2 号, pp.103-129, 1994.

16)Emiliani, C., : The cause of the ice ages, Earth and Planetary and Science Letters, 37, pp.349-352, 1978.

17)Shimoyama, S. and Nishida, I. : Environmental changes during tha last 10,000 years in north Kyushu, West Japan with special reference to shoreline movements, Rekihaku Journal, Vol.81, pp.249-266, 1999.

18)陶野郁雄：沖積層の堆積環境と第四紀学, 土と基礎，Vol.43，No.10，Ser.No.453，pp.1-2, 1995.

19)国土交通省九州地方整備局佐賀河川総合開発工事事務所：佐賀導水事業巨勢川調整池・東名遺跡の保存対策，130p，2007.

20)ナガセ : 大学入試センター試験・解答速報 2011 ・予備校の東進，http://www.toshin.com/center/?sem=toshin_g_41

21)日野研究室 : 低平地沿岸海域地盤のふしぎ～日野研究室～，http://www.ilt.saga-u.ac.jp/~hn_lab/

22)岸原信義, 田中秀子, 大坪常雄, 野中保馬, 池田幸太郎，黒岩政秋：佐賀平野における流

域地水の一環としての祇園川瀬替に関する研究，低平地研究，No.16，pp.7-12，2007.
23)日野剛徳，田口岳志：浮泥・底泥の安定処理特性と直送安定処理プロセスに基づくコストの試算, 低平地研究, No.18, pp.31-38, 2009.
24)佐賀県有明海沿岸道路整備事務所：みちしるべ, 佐賀県有明海沿岸道路広報誌, 佐賀県, Vol.1，2p，2007.
25)土壌環境センター：GEPC 技術標準・重金属等不溶化処理土壌の pH 変化に対する安定性の相対的評価方法，4p，2008.
26)原弘行，林重徳，末次大輔，水城正博：海水環境下における石灰処理土の性状変化に関する基礎的検討，土木学会論文集Ｃ，Vol.66, No.1，pp.21-30，2010.
27)岸原信義，岩山博，田中秀子，黒岩政秋：佐賀平野における流域治水の一環としての城原川瀬替に関する研究(1)～城原川上流部における霞堤の機能について～，低平地研究, No.17，pp.5-10，2008.
28)山中寿朗：珪藻赤潮の発生機構に関する調査，NPO 法人有明海再生機構平成 17 年度成果発表会講演録，NPO 法人有明海再生機構, pp.21-24，2006.
29)地盤工学会：入門シリーズ 20　環境地盤工学入門，p.207，1999.
30)塩野七生：海の都の物語～ヴェネツィア共和国の一千年～，上，新潮社，414p，2001.
31)塩野七生：海の都の物語～ヴェネツィア共和国の一千年～，下，新潮社，453p，2001.

講演者略歴

日野　剛徳（ひの　たけのり）

佐賀大学低平地沿岸海域研究センター　准教授
工学博士。
専門分野
　地盤の堆積環境　地盤調査法
　粘性土の物理化学的性質　粘性土の微視的土構造
　粘性土の地盤工学的性質　地盤の化学的安定処理工法
　地盤情報データベースシステム、等