

2014年1月16日

半閉鎖的水域での底質環境に関する水産学的考察

博士論文（遺稿）



鹿児島大学水産学部
(故) 日高正康



(著者近影)

主論文リスト

- 1) 日高 正康・西 隆一郎・東 政能：鹿児島湾，湾奥部の粒度組成の鉛直変化，海洋開発論文集，第24巻，pp. 657-662，2008年.
- 2) 日高正康・西 隆一郎・松永洋文・高瀬和博・伊藤 陽；屋久島南西海域の粒度組成について，海洋開発論文集，第26巻，pp. 345-350，2010年.
- 3) 日高正康・涌井邦浩・神山享一・鷹崎和義・西 隆一郎・山下 善・林健太郎；福島県松川浦の東日本大震災津波前後での底質・地形変化，土木学会論文集B3（海洋開発），Vol. 68, No. 2, I_186-I_191, 2012.
- 4) 日高 正康・東 政能・内山 正樹・福田 隆二・西 隆一郎；鹿児島湾内海底表層堆積物の特性，土木学会論文集B3（海洋開発），Vol. 68, No. 2, I_1127-I_1132），2012.
- 5) 日高正康・西 隆一郎・内山正樹・福田隆二：有明海および島原湾の海底堆積物の鉛直変化，土木学会論文集B3（海洋開発），Vol. 69, No. 2, I_898-I_903, 2013.
- 6) 日高正康・西 隆一郎・前田広人・内山正樹・福田隆二：池田湖の底質環境の経年変化，土木学会論文集B3（海洋開発），Vol. 69, No. 2, I_904-I909, 2013.

参考論文リスト

- 1) 西 隆一郎・池増隆弘・日高正康・マリオ デ レオン；サンゴ礁海岸における自然海浜と養浜海浜の底質特性，海洋開発論文集，第25 巻，pp. 261-266，2009 年.
- 2) ジュリアンティ マヌ・西 隆一郎・マリオ デ レオン・細谷一範・日高正康；冬季季節風下でのリーフカレント発生機構に関する現地調査，海洋開発論文集，第25 巻，pp. 261-266，2009 年.
- 3) 西 隆一郎・塩谷克典・稲留陽尉・日高正康；長めの浜の洋上ウバメガシ林内礫浜構造について，海洋開発論文集第26巻，pp. 357-362，2010.
- 4) 西 隆一郎・又野友之輔・山城 徹・日高正康・林健太郎・Tommy Jansen；インレットの安定な湖口断面積に関する研究，土木学会論文集B3（海洋開発），Vol. 67, No. 2, I_1057-I_1062，2011.

その他；

- 1) 涌井邦浩・神山享一・鷹崎和義・岩崎高資・西 隆一郎・日高正康・山下 善：「福島県松川浦の水産業復興および環境調査に関する共同研究」東日本大震災震災復興研究費報告書，50 p，2012年3月.
- 2) 日高正康；薩摩半島南西海域海底表層堆積物の粒度組成と鉱物組成，水産学部紀要 第42巻，p11-23，1993.
- 3) 日高正康；薩摩半島南岸沖の底質と底層流について，水産学部紀要，第46巻，p39-45，1997.
- 4) 藤枝，日高，東，小川；西之表市馬毛島南東海域底質の粒度組成変化，Nature of Kagoshima Vol. 38 p13-17 鹿児島県自然愛護協会，2012.

要 旨

海洋生態系や水産生物の生息環境を理解するためには、地形や水質に加えて、底質に関する調査と解析が必要である。そこで、本博士論文では、「**海域の閉鎖性、海域の人為的な改変、自然の外力による海域の大規模改変、底質環境の時間的な変化、海底面の嫌気環境化、地球温暖化が底質環境・水質環境に及ぼす影響**」などをキーワードに、国内の複数の海域で行った底質調査の結果について述べることにする。

2章では、屋久島は鹿児島県大隅半島最南端の佐多岬より南南西約 60km に位置する周囲約 130km の花崗岩で形成された島で、周辺海域はサバ、トビウオなどの好漁場となっている。屋久島西方沖海域の海況については、フィリピン東岸沖より沖縄舟状海盆に沿って東シナ海を北上し、トカラ列島付近で東へ転向する黒潮本流の一部が北向きに屋久島海峡から大隅海峡へと流れ込む際に通過する海域となっている。海底表層付近の底質の性状は、その水域の潮流や波浪などの流動特性や地形的要因によって決められ、そこに棲む生物の生息環境と密接に関係している。工学的には、海底に人工構造物を設置する場合の基礎的資料として底質の粒度組成の分析は重要な要素となる。加えて、水産学の観点からも海底の底質分布は漁場の環境特性指標や漁礁設計上必要な項目として重要である。本研究では、屋久島南西岸、栗生沖海域の底質サンプリングおよびデータ解析を行い、採取された試料の粒度特性等に基づいて海底環境を把握する。

3章では、仙台湾の南端部に位置する福島県相馬市にある松川浦は、南北に細長い海跡湖で太平洋と松川浦の水域を分けるように細長い砂州が延びている。この松川浦では、2011年3月11日の東日本大震災時に、砂州上で生じた津波の砕波および越流により、大規模な地形変化および海岸保全施設の被害が生じた。加えて、海中生態系の生息条件として重要な底質環境も松川浦全域で変化した可能性があった。さらに、松川浦の大規模な水深（海底地形）変化は、将来的に浦内の流況を変化させ、結果として津波前と異なる水質環境や生物生産環境を引き起こす可能性もあるので、松川浦で底質と水域地形の現地調査を行い、津波前の状況と比較することにした。

4章では、鎌田泰彦（1967）¹⁾ や近藤ほか（2003）²⁾ は、九州西岸の有明海および島原湾内の底質の粒度組成を求め、この海域の堆積環境は5つの堆積型に分けられることを明らかにした。その後、秋元ほか（2006）³⁾ は島原湾東部、熊本県白川沖の含泥率の鉛直分布より泥化が進行している海域の存在を明らかにした。本研究では、2002年4月に有明海および島原湾において柱状に採取した海底表層堆積物試料を分析し、底質の中央粒径、砂・シルト及び粘土の含有率の時空間的分布を求めて、諫早湾が開門される2002年以前の堆積環境の経年変化について考察した。なお本研究は、1997年4月14日に潮受け防波堤が閉鎖されたあと、2002年の4月24日の短期的に開門される前までの有明海および島原湾の底質状況に関する研究である。

5章では、鹿児島湾奥部は、鹿児島市と桜島を挟む水路幅約 3km の西桜島水道を通してのみ、外洋水との海水交換が可能な非常に閉鎖的な海域となっている。大隅半島に沿って流入する黒潮暖水舌の一部が達している可能性が高い（大木ら、2005）³⁾ とされる西桜島水道から湾奥北部に向かう海域で、表層より 3cm までの海底表層堆積物の底質サンプリングを 24 地点で行い、1cm ごとに中央粒径および粒度組成の空間分布を求める。また、試料の下層堆積物は上層のものより過去に堆積したものであるという仮説に基づき、算出した粒度組成の鉛直変化から、観測海域を支配する流れの強さの数十年スケールの変化も巨視的に読み取ることにする。鹿児島湾の堆積速度については、0.5~4.2 mm/年（大木、2000）⁴⁾ という報告があるが、閉鎖性が強いとされる調査海域では堆積速度も比較的早いことが推定されるため、本研究では約 10~20 年の時間経過における底質環境の変化を読み取ることにする。

6章では、鹿児島湾は九州南部に位置し、湾奥（始良カルデラ）、湾央（阿多カルデラ）および湾口で構成されている。湾口と湾央は水深 100m の水道で結ばれ、湾奥部は西桜島水道と呼ばれる水深 40m の狭い水道でのみ接続されていて、すり鉢状となっているため、非常に閉鎖的な海域となっている。湾内で盛んに行われている養殖業や河川から供給される生活排水等による排水に含まれるリンの影

響下による富栄養化や、近年では DO が悪化傾向にあることが報告されている。本研究では鹿児島湾全域で採取した海底表層堆積物試料について分析を行い、底質汚濁の化学的指標の一つである硫化物含量と有機物含量および粒度組成の分析結果から鹿児島湾内の海底表層堆積物の特性を明らかにする。

7章では、鹿児島県では深水層における低酸素化、無酸素化の拡大は湖底表層堆積物中の窒素やリンの溶出を助長し、さらなる富栄養化につながるという懸念から、定期的に池田湖の水質調査を実施している。しかしながら底質とくに湖底堆積物の化学分析についての報告は少ない。そこで本研究では年間（15 か月）を通じて採取した底泥試料を用いて、底質汚濁の化学的指標の一つである硫化物含量を基に、池田湖の底質の季節変化を水温躍層の形成過程の観点から明らかにすることにした。その結果、硫化物濃度は成層期の終わりに極大となり、逆に循環期には低下することがわかった。また、近年の温暖化の進行により湖水の上下混合の程度が弱まることによって、湖底の硫化物濃度の上昇を起こす可能性を示唆した。

8章では、2章から7章で得られた主要な結論をまとめて、本博士論文の結論とした。

Abstract

Sediment analysis is important to assess a physical environment which surrounds a marine ecosystem, and major fishes and sea shells in fishing industry. For instance, the finer the sediment, the milder the sea bottom slope. Thus, a tidal flat which is mild slope in general consists of finer sediment, and a gravel beach which is steep slope consists of coarse material. Sediment size changes an internal void ratio (internal space between sediments), and wave forces by changing beach slope, therefore, sediment size of sea bed governs ecosystem and water quality, too. In this dissertation, sediment characters in different water environments such as in open water off of Yakushima Island in Kagoshima Prefecture, nearly enclosed bay of Matsukawaura Inlet, semi-enclosed bay of Shimabarawan and Ariakekai, semi-enclosed bay of Kagoshimawan, and enclosed lake Ikeda were monitored to clarify artificial impact (reclamation and marine cultivation), natural impact (big tsunami) and impact of greenhouse effect.

In chapter 2, Yakushima Island is located in the south and about 60km off of Osumi peninsula, Kagoshima Pref. The sediments composition and the grain-size analysis of the sea bed deposit at offshore Kurio, southwest shore of Yakushima Island were conducted. Fifty five samples of bottom sediments were collected using a Smith-McIntyre grab sampler. Then grain-size distribution was analyzed by 11 types of sieve. The grain-size distribution shows the bi-modal peaks and little composition of 0.5mm sediments in this study area. Therefore, it seems that there are at least two transportation processes in the region. The finer distribution probably corresponds to a recent bottom current condition, but the coarser distribution which is mainly bio- and carbonate material would correspond to other unclassified process.

In chapter 3, the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake caused catastrophic damage along coastal area in Fukushima Prefecture, Japan on March 11, 2011. The big tsunami generated by the earthquake was as high as 14m and caused significant change in sediment and bathymetry in Matsukawaura inlet in Soma city, Fukushima. The Matsukawaura is scenic and important fishing area. Therefore, sediment samples were collected at 147 points and water depths were measured at 268 points as an emergency environmental assessment. In general, sediment becomes coarse in the most of area except northwest and southeast parts of the inlet. In addition, it is observed that large quantity of finer sediment in Matsukawaura were transported and deposited inland. Water depth became deeper and the most of tidal flat were lost.

In chapter 4, Kamata (1967), Kondo and others (2003) researched particle size composition of sea bottom substrates in the Ariake Sea and Shimabara Bay, which are located in the west part of Kyushu, Japan, and showed clearly that the depositional environment of this area is divided into five deposit types. Later, Akimoto and others (2006) clarified the existence of an area containing mud in the eastern Shimabara Bay and off the river mouth of the Shirakawa River, and analyzed the vertical distribution of the mud content. In our research, bottom sediment samples were extracted with a sediment sampler from both the Ariake Sea and Shimabara Bay in April 2002 for further analysis, and we determined the spatiotemporal distribution of their contents. Which was about 1 week before the opening of the gate of Isahaya bay dike, so in our study we are only considering the previous depositional environment of this area.

In chapter 5, Kagoshima Bay, which is located at the southern part of Kyushu Island, is composed of innermost (Aira caldera) and central (Ata caldera) basins. Innermost basin is connected by only one narrow channel, called Nishi Sakurajima Channel since an eruption of Mt. Sakurajima in 1914, that connected Mt. Sakurajima with Osumi Peninsula and closed Sakurajima-seto channel. In addition, expansion of Kagoshima Port makes the channel narrower. As a result, current system, which controls water quality in the bay, might be changed. Direct measurement of current system is difficult in the bay, therefore bottom sediment sampling is applied to estimate the current system. The bottom samples for this study were collected perpendicularly from 24 stations at the area of Nishi Sakurajima Channel to Off Hayato Santo. This study reveals that the current system in innermost basin is composed of three major current systems.

In chapter 6, Kagoshima Bay, which is located in the southern part of Kyushu Island in Japan, is composed of an innermost basin (Aira caldera), and central basin (Ata caldera) and bay mouth. The bay mouth and central basin are connected by a shallow channel (about 100m depth), while innermost basin is connected to the central one by only a narrow channel, called the "Nishi Sakurajima Suido" (West Sakurajima Waterway). We are concerned about the water quality within the bay, and how phosphorous and nitrogen from households, aquaculture farms, agricultural runoff and rivers may contribute to eutrophication

in the bay. Furthermore, the DO level in the inner basin has also decreased in recent years. In this research we examined sulfide content, organic matter content and particle size composition using submarine superficial deposit samples extracted from sampling stations throughout Kagoshima bay, which are some of the chemical indices of bottom sediments, and classified the sediment types.

In chapter 7, to monitor the depletion of dissolved oxygen in the hypolimnion of the lake and the inherent increase of nitrogen and phosphorus from the bottom sediment, the Kagoshima Prefectural Institute for Environmental Research and Public Health periodically conducts research to check the further progress of eutrophication in the lake. However, there are few reports about the chemical analysis of the bottom sediment. For this reason, the authors of this study have intended to clarify the seasonal changes in the sulfide concentration of the sediment, accompanied with the depletion of dissolved oxygen, which is one of the chemical indicators of sediment condition. Sulfide concentration had a maximum at the end of the stratification period, while it decreased during the circulation period. These results suggested the possibility of an increase in the sulfide concentration of the sediment, followed by poor vertical mixing of the water, which is a consequence of the advance of global warming in recent years.

謝 辞

本研究は、鹿児島大学水産学部、水産生物・海洋学分野の西 隆一郎教授のご指導によりまとめたものであります。平成 20 年に西 隆一郎先生のご指導で、初めて筆頭著者として土木学会海洋開発委員会に投稿したレフリー付き論文が受理され、学会発表も行うことができました。その後平成 22 年度に 1 編、平成 24 年度と平成 25 年度にそれぞれ 2 編が、土木学会論文集（海洋開発）で受理され、発表も行うことができました。西 隆一郎先生には、私が投稿した論文すべてについて、自らお忙しい中、時間を見つけて貴重なご意見、ご指導を賜りましたこと、大変感謝しております。

私が堆積物に興味を持ち始めたのは、鹿児島大学水産学部附属練習船かごしま丸に事務長として乗船した昭和 60 年以降ということになります。きっかけは、当時、かごしま丸の東川勢二船長がライフワークとしていた海底堆積物の研究の補佐として試料の採取、分析を手伝うようになったのがきっかけでした。乗船 2 年目には南シナ海南部において鹿児島大学水産学部とマレーシア農科大学との共同調査で、採取した底質試料の分析を行いました。東川勢二船長が東北大学に内地留学で行かれて以降、懇意とされていた鹿児島大学理学部の早坂祥三先生、大塚裕之先生、大木公彦先生に紹介していただきました。この 3 人の先生方は、南方海域調査航海で、かごしま丸にも何度も乗船されました。

東川船長の紹介で平成 4 年 5 月より 9 月末までの 5 か月間、九州大学地球惑星科学講座に内地留学しました。そこで岡田博有先生のご指導を受けることができました。留学中に九州南西海域（宇治群島）の粒度組成について研究を行うとともに、重鉍物分析の方法についてご助言・ご指導を受けることができました。

屋久島南西海域の粒度組成の分析では、試料採取について㈱三洋コンサルタント九州支店調査部の高瀬和博氏、伊藤陽氏および鹿児島県林務水産部漁港漁場課の松永洋文氏は調査海域の選定及び試料採取など、共著者として多大なるご協力をいただきました。

鹿児島湾における調査では、鹿児島大学水産学部附属練習船南星丸の内山正樹船長、福田隆二一等航海士には試料採取に関する助言や、共著者としてデータ解析等において多大なるご協力をいただきました。

福島県松川浦調査では福島県水産試験場相馬支場の涌井邦浩支場長、鷹崎和義氏、神山享一氏等支場職員の方々には、舟艇による試料採取などの現地調査は、津波以前の粒度分布資料を提供していただきました。また膨大な試料の粒度分析をともに行ってくれた水産生物・海洋学分野 4 年生（当時）の山下善氏、㈱アルファ水工コンサルタンツ東京本部の林健太郎氏、共著者として貴重なご助言、多くのご協力を賜りましたことに感謝いたしております。

池田湖調査では、鹿児島県環境保健センターの四反田昭二さん、実成隆志さん、清原拓二さん、および本学資源利用科学講座の前田広人先生と、当講座の学生さんに試料採取と水質調査にご協力をいただきました。前田広人先生には池田湖論文についてもご指導、ご助言をいただきました。ここに謝意を述べさせていただきます。

また大しけの中で行われた池田湖全域の海底地形調査では水産生物・海洋学分野の大学院生である鶴成悦久氏，技術職員の児玉正二氏に大変なご苦勞をおかけしました．鶴成氏には，データ分析まで行っていただきました．鶴成，児玉両氏に感謝の意を表したいと思います．

最後に私をいつも支えてくれた家族，とくに妻，千夏代に心から感謝の意を表したいと思います．

目次

- 第1章 序論
- 第2章 人為的影響のない海域（外洋）における粒度組成等の底質環境把握-1
- 第3章 短期的に人為的または自然災害の影響のある海域（内湾）における粒度組成等の底質-1
- 第4章 短期的に人為的または自然災害の影響のある海域（内湾）における粒度組成等の底質-2
- 第5章 長期的に人為的または自然災害の影響のある海域（内湾）における粒度組成等の底質-1
- 第6章 長期的に人為的影響のある水域（内湾，湖）における粒度組成や硫化物含量等を用いた底質環境把握-2
- 第7章 長期的に人為的影響のある水域（内湾，湖）における粒度組成や硫化物含量等を用いた底質環境把握-3
- 第8章 結論

博士論文完成への祝辞

編集後記

第1章 序論

一般的に海底の砂礫、シルト、粘土を総称して底質と(sediment)呼んでいる。流体運動による砂の動きは、流体の運動そのものよりも複雑な挙動を示す。そのために、ノーベル賞で有名なアインシュタイン博士の長男が、カリフォルニア工科大学で河川の砂の動き(流砂現象)に関する研究を開始した時に、父親のアインシュタイン博士から、そのような難しい問題は避けたほうがよいとアドバイスされたと言う逸話があるくらい、風や波、そして、流れによる砂の動き(飛砂・流砂・漂砂現象)は、多くの研究者を悩ます問題である。海底の砂の性質(底質)を表す代表的な指標として、外観、臭気、色調、化学的酸素要求量(COD)、硫化物(T-S)、強熱減量(IL)、全窒素(T-N)、全りん(T-P)、粒度分布(中央粒径を含む)等があるが、多くの場合には底質粒径に着目した考察が行われることが多い。一般的には、粒径がより細くなるほど底質に作用する外力(流体力)が小さいので、浅海域の水質維持・改善に必要な流れや波浪が小さいと、その浅海域の底質が細かく、水質も悪く、富栄養化などの問題が発生しやすいなどの問題が生じる場合もある。したがって、底質サイズと生物の生息状況や生物の種類は、関連性が高い。底質は水質よりも長い時間スケールで変化しやすいために、より長い時間スケールでの環境変化の指標ともなりえる。

例えば、鹿児島湾は始良カルデラ、阿多カルデラ内の地点で採取した底質の分析結果(表-1参照)を見ると、より閉鎖性の高い始良沖合の底質は、鹿児島湾の湾口に近い指宿川の底質よりも、好気性の生物の生息条件としては悪い環境になっていることが分かる。しかも、河川が生活雑排水や農業や畜産業起源の富栄養化物質を鹿児島湾内に流入させるだけでなく、養殖業起源の富栄養化物質も大量に湾内の海底に蓄積しやすい環境にあり、交換機能を持たない湾奥の底質環境は悪化する可能性が高いとも考えられる。湾奥のカルデラ縁辺部に位置する水深60m地点の始良沖合部ではサンプリング

表-1(a) 底質分析結果の例

海域	調査点	外観	臭気	色調	化学的酸素要求量	全硫化物	強熱減量	全窒素	全りん
					COD	T-S	IL	T-N	T-P
					(mg/g 乾泥)	(mg/g 乾泥)	(%)	(mg/kg 乾泥)	(mg/kg 乾泥)
始良	沖合部	砂質	腐敗臭	5GY2/1 オリーブ黒	4.7	0.23	4.3	465	191
始良	汀線部	砂質	無臭	5Y3/1 オリーブ黒	0.4	0.02	2.1	18.5	200
指宿	沖合部	砂質	無臭	5Y3/1 オリーブ黒	0.9	0.02	1.6	45.3	384
指宿	汀線部	砂質	無臭	7.5Y2/1 黒	0.1	0.02	0.7	78	274

表-1(b) 底質分析結果の例

海域	調査点	礫分	粗砂分	中砂分	細砂分	シルト分	粘土分	50%粒径
		(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(mm)
始良	沖合部	0	0	35	48	14	3	0.19
始良	汀線部	2	39	47	6	4	2	0.78
指宿	沖合部	2	16	63	11	6	2	0.507
指宿	汀線部	23	61	11	2	2	1	1.51

時に硫黄臭がし、かつ、嫌気性状態を示す黒色の底質であった事と対応し、同海域の汀線部底質と比較して、富栄養化状態が顕著に進行していることが分かる。近年、地元漁業者から、網を巻き上げ時に網に黒い異臭のする底泥が付着し、海老などの底生生物が採れなくなったとの指摘があり、この底質分析結果と対応している。なお、両海域ともに外力の小さな沖合部の底質粒径が、汀線部の値より小さい。一般的には、底質粒径の大きな海域は波や流れが強く、曝気作用や海水交換が良好なために、水質に関する問題が生じにくいと言える。

沿岸域の海底地形は人為的な改変を受ける場合がある。例えば、世界的に見ても火山活動が活発な桜島周辺には、防災対策として緊急避難港が多数あり、航路や泊地保持のために、海底面を浚渫して、特定の箇所海底面が深くなる場合がある。一部の海底面が深くなると、その箇所で流速が低下するために、結果として底質の細粒化および水質の悪化が生じる場合がある。そのような細粒化の例を、図-4に示す。図より明らかであるが、側線1, 2, 5, 6の水深4から6mの海域で底質粒径がその他の領域から推測される値よりも、小さくなっていった。これは、泊地および航路確保のために浚渫して水深が深くなった箇所(窪地)に、細かい粒径の底質が堆積したためと考えられる。このような海底面の細粒化は、甲殻類を含む底棲生物などの生息環境を悪化させる要因にもなる可能性がある。

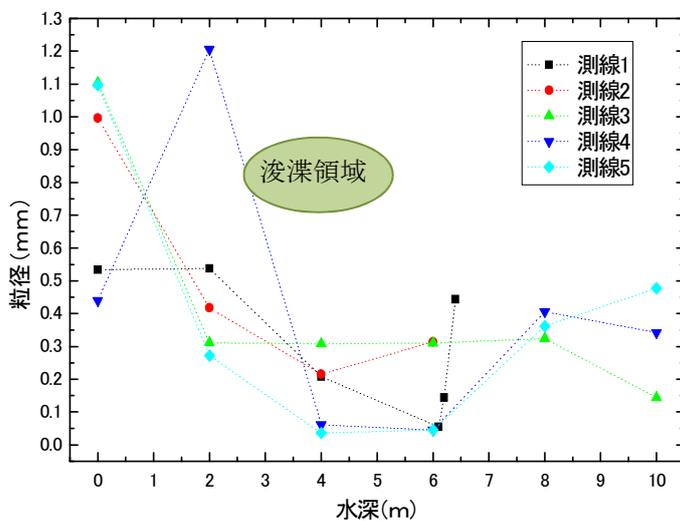


図-1 各測線の底質中央粒径の岸沖方向分布

沿岸域を構成する底質は、大陸プレートの主要成分である花崗岩が風化した砂のように地質活動・風化活動で形成されたものから、サンゴ礁内の炭酸カルシウム性底質の様に生物が作り出した底質、あるいは、ガラス破片やコンクリートがら等の廃棄物投棄起源の人為的な底質まで多岐にわたる。



図-2 沿岸域の海底を構成する底質の例

沿岸域の海底を構成する底質の種類が多様だけでなく、底質の大きさ（底質粒径）も粘土やシルトのように細かいものから、礫の様に大きなものまで多様である。図-3には東シナ海海底から採取した底質を攪拌して 240 分後の様子を示す。粒径の非常に細かなものは浮遊したままで、そして、粒径が細かなものと、粒径が砂程度の底質が分離してガラスシリンダーの中に堆積していることから、多様な粒径の底質が混合して海底面に堆積していたことが分かる。また、粒径の大小により底質の沈降速度が大きく異なることも分かる。



図-3 底質の分離状況

このように沿岸域を構成する底質は、粒径が細かな細粒成分から礫などの粗粒成分まで様々であり、その大きさは、海域の波浪や流れの強弱などを表す指標ともなる。底質に作用する流体力（波浪・流れ）が小さければ、泥干潟の様にシルトや粘土細粒砂等の様に粒径の小さな底質材料で構成され、外洋性の海岸の様に波や流れが大きな海域では中粒砂や礫などの様に粒径が比較的に大きな底質で構成される。また、底質粒径は海域の閉鎖性とも密接に関連する。それは、閉鎖性が高まるほど、流体力が小さくなる傾向があるので、結果として、細粒成分で構成される緩勾配の海底面になりやすく、反対に海域の閉鎖性が小さくなるほど流体力が高まり、粗粒成分の底質で構成される急勾配の海底面になりやすい傾向があることを示す。底質粒径は生物が生息する海域の水質・閉鎖性の指標となるだけでなく、上述したように海底勾配・海底地形（岸沖地形）の重要な指標ともなる。例えば、地球温暖化に伴う海水準上昇が沿岸域の砂質性海浜にどのような影響を及ぼすのか算定するのに用いられる平衡海浜断面形状（砂粒の粒径あるいは沈降速度に対応した海底地形の断面形状）のように、底質粒径が分かれば一義的に海底地形が理論的に計算で求まるという概念がある。例えば、東シナ海に面するある海岸の深淺図を図-4 に示す。図中で色付きの線が底質粒径に基づいた平衡海浜断面形状で、黒線が実測の海底地形である。なお、沖合の窪地は砂の浚渫跡であり、人為的な地形である。

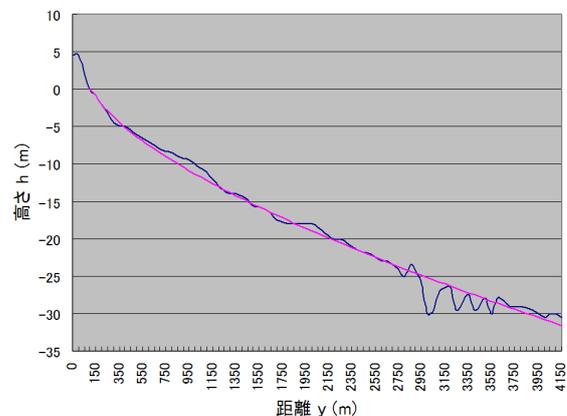


図-4 実際の海底地形と平衡海浜断面形状

例えば、浅海域の漁場などを何らかの要因で浚渫して海底に窪地が形成された場合に、その浚渫箇所（窪地）が自然の外力で元の地形に復元するための復元時間（影響時間）を予測することを考えるためには、以下の様な取り扱いも可能である。

海砂の採取に伴い図-5に示すような長方形断面の採取孔が海底に形成されたとする。このような採取孔は、海底面の砂に作用する流体力で移動し始める漂砂現象のために、時間とともに採取孔を埋め戻すこともある。ここでは、海底面の採取孔が時間の経過とともにどのように埋め戻されるかを、拡散型の方程式を解析的に解くことで誘導するものである。

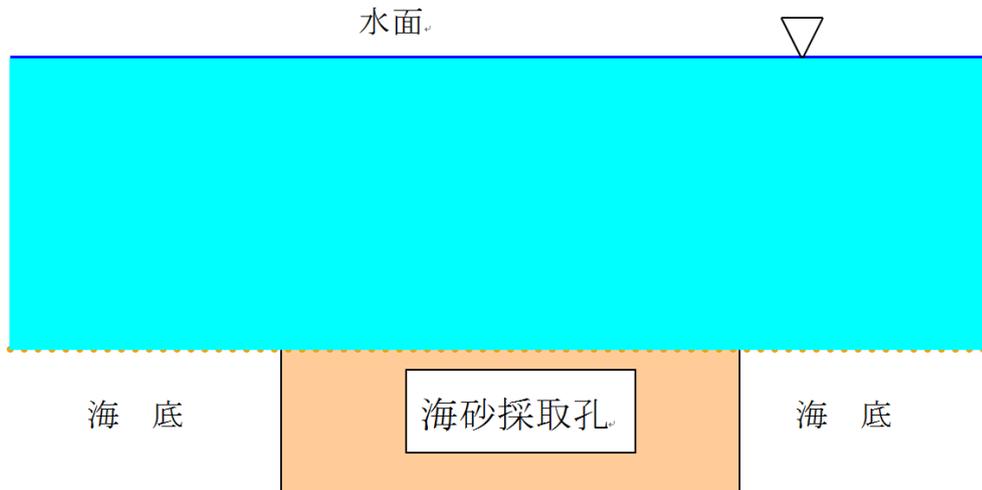


図-5 海砂採取孔および周辺海底の断面形状（採取孔は長方形断面と仮定する）

矩形断面を持つ採取孔の断面形状変化は、砂の拡散現象、つまり、この場合は局所地形勾配に依存すると考えられる。そこで、採取孔が埋め戻される時の漂砂量は次式のように推定されるものとする。

$$q(x) \approx G \frac{\partial h}{\partial x} \quad (1)$$

従って、採取孔の経時的な断面形状変化は以下のようなになる。

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial q}{\partial x} = G \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \quad (2)$$

上式の左辺と右辺に注目すると、 h つまり水深（断面形状）に関する拡散方程式であることが分かる。この解は、Dean (2002)が海浜に養浜した土砂がどのように移動するかを推定するために誘導した手法を参考にすると、次式のようなになる。

$$h(x,t) = \frac{h_D}{2} \left\{ \operatorname{erf} \left[\frac{l}{4\sqrt{Dt}} \left(\frac{2x}{l} + 1 \right) \right] - \operatorname{erf} \left[\frac{l}{4\sqrt{Dt}} \left(\frac{l}{2x} - 1 \right) \right] \right\} \quad (3)$$

ただし、 $\operatorname{erf}(x)$ は誤差関数で、以下に示す級数近似で表される。

$$\begin{aligned}
\text{erf}(x) &= \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-u^2} du \\
&= \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(x - \frac{x^3}{3 \cdot 1!} + \frac{x^5}{5 \cdot 2!} - \frac{x^7}{7 \cdot 3!} + \dots \right)
\end{aligned} \tag{4}$$

従って、矩形断面を持つ海砂採取孔が埋戻されている過程で、どれだけ埋め戻されずにクリアランスが残っているか見積もるには、もともと採取孔があった区間で水深を積分すればよい。したがって、採取孔のクリアランスは以下のように計算できる；

$$\begin{aligned}
V_{cl} &= \int_{-l/2}^{l/2} h(x,t) dx \\
&= \frac{2 \cdot h_D \sqrt{Dt}}{\sqrt{\pi}} \left(e^{-\left(\frac{l}{2\sqrt{Dt}}\right)^2} - 1 \right) + \text{erf}\left(\frac{l}{2\sqrt{Dt}}\right)
\end{aligned} \tag{5}$$

つまり、初期採取孔に対して、どれだけ埋め戻されずにクリアランスがあるかという割合 $R(t)$ は；

$$\begin{aligned}
R(t) &= \frac{V_{cl}}{l \cdot h_D} = \frac{1}{l \cdot h_D} \int_{-l/2}^{l/2} h(x,t) dx \\
&= \frac{1}{l \cdot h_D} \frac{h_D}{2} \int_{-l/2}^{l/2} \left\{ \text{erf}\left[\frac{l}{4\sqrt{Dt}} \left(\frac{2x}{l} + 1\right)\right] - \text{erf}\left[\frac{l}{4\sqrt{Dt}} \left(\frac{2x}{l} - 1\right)\right] \right\} dx \\
&= \frac{2\sqrt{Dt}}{l\sqrt{\pi}} \left(e^{-\left(\frac{l}{2\sqrt{Dt}}\right)^2} - 1 \right) + \text{erf}\left(\frac{l}{2\sqrt{Dt}}\right)
\end{aligned} \tag{6}$$

ただし、 D は海砂の拡散係数（ある種の擬似漂砂量係数）であり、水理実験や現地調査に基づく何らかの手法で確定しなければならない。本式からも分かるように、海砂の採取を行なった場合に、十分に深い水深で海砂の採取を行なえば、海底面の海砂（底質）に作用する流体力が低下するために係数 D が小さくなることが予想される。海砂採取が行なわれた直後の $R(t)$ の初期値は当然 1 であり、時間とともに減少することになる。この $R(t)$ が小さくなればなるほど、採取孔周辺の砂を引き寄せ採取孔の埋め戻しが進行すること、つまり、周辺海域への影響が大きくなることを意味する。加えて、 $R(t)$ が 1 のままで時間的に変化しなければ、採取孔の埋め戻しが全く生じなかったことになり、採取孔周辺の海底地形に変化を生じさせなかったことを意味する。なお、上式中の誤差関数の値を求めるには、数値積分を行なう必要がある。誤差関数の数値積分法に関しては、例えば、ウルフラムリサーチ社のホームページを参考にするとよい。（参照； <http://mathworld.wolfram.com/Erf.html>）；

$$\text{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n z^{2n+1}}{n! (2n+1)} \tag{7}$$

微分は；

$$\frac{d^n}{dz^n} \text{erf}(z) = (-1)^{n-1} \frac{2}{\sqrt{\pi}} H_{n-1}(z) e^{-z^2} \tag{8}$$

ただし、 H_n は Hermite の多項式である。例えば、一次の微分は；

$$\frac{d}{dz} \operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} e^{-z^2} \quad (9)$$

そして、積分は次式で求まる。

$$\int \operatorname{erf}(z) dz = z \cdot \operatorname{erf}(z) + \frac{e^{-z^2}}{\sqrt{\pi}} \quad (10)$$

このような取り扱いをすることで、死水域となりやすい海底の窪地が元に戻る時間（周辺環境への影響時間）見積もることが可能になるが、基本的に拡散係数つまり底質の大きさ（粒径）によってその回復時間が異なることに留意する必要がある。

底質粒径は様々な現象の指標となる。その一例として、底質を取り巻く水圏環境中の流れの強弱（流速）の指標ともなることが、下記の様な取り扱いに基づいて可能となっている。

海底面の底質（砂粒）の移動限界に関しては多くの研究がある。底質の移動限界の誘導は、一般的に、底質一粒に作用し動かそうとする外力と安定力の関係で説明される。砂粒を安定させようとする力に対して、波と流れにより生じる砂粒を動かそうとする力が大きくなると、海底面の砂粒が動く。これら二つの力の比は、シールズ数（1936）としてよく知られている。Madsen et al. (1976)によれば、限界シールズ数は "底質と流れの境界部分の一つの砂粒に働く安定力と移動させようとする力の比の限界値" として説明された。従って、海底面の砂粒一つに対するシールズ数は、以下のように表される；

$$\psi_c = \frac{\tau}{(s-1)\rho g d} \quad (11)$$

波によるせん断応力 τ は、次のように表される；

$$\tau = \frac{1}{2} \rho f_w u^2 \quad (12)$$

ただし、 ρ は水の密度、 f_w は摩擦係数、 u は水粒子の軌道速度の水平成分、 s は底質の比重である。よって、波作用下でのシールズ数は以下のように表すことができる；

$$\psi_c = \frac{\rho f_w}{2(s-1)\rho g d} \left(\frac{\pi H}{T \sinh kh} \cos \sigma t \right)^2 \quad (13)$$

ここで、 H と T はそれぞれ波高と周期であり、 $\sigma = 2\pi/T$ は角周波数である。浅海域における水平速度は完全な三角関数ではないために、最大水平速度は波の峰が通過する時に生じ、沖向きのより小さい水平速度は波の谷が通過する時に生じる。したがって、最大水平速度 u_m が底質運動の始まりを支配するので、次式で示すように限界シールズ数の中に取り込まれる；

$$u_m = \frac{\frac{1}{2} \rho f_w u_m^2}{(s-1)\rho g} \quad (14)$$

ここで、最大水平速度 u_m は線形波理論により次のように与えられる；

$$u_m = \frac{\pi H}{T \sinh kh} \quad (15)$$

もともと、シールズ数は境界レイノルズ数 $R_* = u_* d / \nu$ に対して描かれ、ここで、 u_* はせん断速度 $u_* = \sqrt{\tau / \rho}$ 、そして ν は流体の動粘性係数である。その後、シールズ数は、次式で定義する S_* に対してプロットされた(Madsen et al. 1976);

$$S_* = \frac{d}{4\nu} \sqrt{(s-1)gd} \quad (16)$$

底質移動開始に関する修正シールズ図が、Madsen et al. (1976)により示された。このような関係から、底質粒径が分かると、当該水域の代表的な限界流速を算定することが可能である。

底質は、流れ、水質、海底勾配、閉鎖性の指標となるだけでなく、底質で構成される海底面あるいはその上の水域を利用する水産生物の生息環境としても重要な指標となる。また、底質（粒度）を調べることは、漁場環境の特性、漁礁設計上の重要な項目である。底質を知ることは水産学的にも重要である。そこで、これまでに、鹿児島大学水産学部で得られた底質と水産生物および水圏環境に関する知見をまとめると、以下のようなものがある。

(i) 甬島周辺海域におけるキビナゴ漁業に関する研究 I : 荒人埼沖の産卵場における卵の着床について (肥後伸夫, 寺田和彦) (1984) 水産学部紀要第 34 巻 No. 1, p97-109

上甬島里村荒人埼沖、水深 13m において、キビナゴ産卵場を視認し、下述のような知見を得た。産卵場の底質は極粗粒砂、中央粒径 (mm) は 2mm 以下で、その海底面には波長約 60 cm の砂蓮が形成されていた。卵の着床状態は厚さ 5~8 mm の板状をなし、その粘着の度合いは強い。卵数は 104 粒/cm² 程度、卵径は平均 1mm である。なお階層への付着はかなり少ない。

(ii) 甬島におけるキビナゴの産卵場所調査 卒業研究 (池内 雅) 2009

上甬島里西岸沖に位置する西ノ浦海域において行った採泥調査において以下のような結果を得た。中央粒径値 (Md ϕ) と含泥率 (%) が示す等値線は似た傾向を示した。観測海域の中央部は水深 30m を超え、含泥率 (%) は、そのくぼみ付近で高い値を示し、それ以外の海域の含泥率 (%) は 0 であった。キビナゴの卵が採取された 2 点 (St. 6, 11) は、泥質を全く含まない粗粒砂であった。同様の底質は湾東部にも存在するが、この 2 点は、他の観測点と異なり、黒色の粗粒砂を含んでいる。

(iii) 出水沖のクルマエビ産卵場所について (肥後伸夫・本中野伸一) (1984) 水産学部紀要 第 33 巻 No. 1 p145-153

出水市沖合海域に 195 点の採泥点を設け、エクマンバージ採泥器により底質試料を採取し粒度組成を求めた。その結果、中央粒径値 (Md ϕ) は略 1~4 ϕ の値を示し、淘汰も良好であり、内湾的性格の強い底質分布となっている。底質は砂質とシルト質砂に概ね 2 分される。砂質部は干潟域、西部海域及び東部海域に夫々形成されている。シルト質砂部は沖合から干潟域にむかって舌状に南下し張り出している。中央粒径値の等値曲線図より平均卓越流の存在を検討すると、西部及び東部海域から夫々干潟域にむかう 2 つの卓越流の存在することが推定され、この流れが当海域におけるクルマエビ類の漁場形成に大きな影響を与えているものと考えられる。底生生物の生息場所である海底底質は、生物によって好みが変わり、微々たる粒度の変化であっても大きな影響を与えることが知られている (引

用)

(iv) 八代海南部海域のエビ類相について (肥後伸夫・符啓超) (1988) 水産学部紀要

八代海南部海域のエビ類相をあきらかにするために、1987年7月から1988年7月採捕を行なった。その結果は次のとおりである。10科26種4627個体のエビを採集した。このうち、クルマエビ族は2科11種、コエビ族7科14種、イセエビ族1科1種であった。26種のエビ類のうち、アカエビが最も多く、次にクルマエビ、エビジャコ、ヨシエビ、クマエビ、テッポウエビの順になっているが、そのほかのエビ類は少ない。今回あらたに採集したエビはタラバエビ科、ヨコシマエビ科、イセエビ科の3科12種である。エビの種類は有明海の42種よりは少ないが、15の共通種が認められた。クルマエビ族クルマエビ科のエビ類は八代海南部のほぼ全域に分布しているが、転換期のクルマエビは河口に近い沿岸域の干潟に多く分布する傾向がある。また、クルマエビの若エビは干潟に近い沖側、成エビは沿岸域に多く分布する。その他のエビ類は泥砂底質の中央海域及び西岸海域に多く分布する。コエビ族はテッポウエビを除き、ほとんど沿岸の浅海域や河口に近い干潟に多く分布する。

これらの知見からも分かるように、水産生物の生息環境を理解するためには、底質に関する調査と解析が今後ともに必要である。そこで、本博士論文では、「**海域の閉鎖性、海域の人為的な改変、自然の外力による海域の大規模改変、底質環境の時間的な変化、海底面の嫌気環境化、地球温暖化が底質環境・水質環境に及ぼす影響**」などをキーワードにして、国内の複数の海域を取り上げて調査を行った結果」について述べる。

2章では、屋久島は鹿児島県大隅半島最南端の佐多岬より南南西約60kmに位置する周囲約130kmの花崗岩で形成された島で、周辺海域はサバ、トビウオなどの好漁場となっている。屋久島西方沖海域の海況については、フィリピン東岸沖より沖縄舟状海盆に沿って東シナ海を北上し、トカラ列島付近で東へ転向する黒潮本流の一部が北向きに屋久島海峡から大隅海峡へと流れ込む際に通過する海域となっている。海底表層付近の底質の性状は、その水域の潮流や波浪などの流動特性や地形的要因によって決められ、そこに棲む生物の生息環境と密接に関係している。工学的には、海底に人工構造物を設置する場合の基礎的資料として底質の粒度組成の分析は重要な要素となる。加えて、水産学の観点からも海底の底質分布は漁場の環境特性指標や漁礁設計上必要な項目として重要である。本研究では、屋久島南西岸、栗生沖海域の底質サンプリングおよびデータ解析を行い、採取された試料の粒度特性等に基づいて海底環境を把握する。

3章では、仙台湾の南端部に位置する福島県相馬市にある松川浦は、南北に細長い海跡湖で太平洋と松川浦の水域を分けるように細長い砂州が延びている。この松川浦では、2011年3月11日の東日本大震災時に、砂州上で生じた津波の砕波および越流により、大規模な地形変化および海岸保全施設の被害が生じた。加えて、海中生態系の生息条件として重要な底質環境も松川浦全域で変化した可能性があった。さらに、松川浦の大規模な水深(海底地形)変化は、将来的に浦内の流況を変化させ、結果として津波前と異なる水質環境や生物生産環境を引き起こす可能性もあるので、松川浦で底質と水域地形の現地調査を行い、津波前の状況と比較することにした。

4章では、鎌田泰彦(1967)¹⁾や近藤ほか(2003)²⁾は、九州西岸の有明海および島原湾内の底質の粒度組成を求め、この海域の堆積環境は5つの堆積型に分けられることを明らかにした。その後、秋元ほか(2006)³⁾は島原湾東部、熊本県白川沖の含泥率の鉛直分布より泥化が進行している海域の存在を明らかにした。本研究では、2002年4月に有明海および島原湾において柱状に採取した海底表層堆積物試料を分析し、底質の中央粒径、砂・シルト及び粘土の含有率の時空間的分布を求めて、諫早湾が開門される2002年以前の堆積環境の経年変化について考察した。なお本研究は、1997年4月14日に潮受け防波堤が閉鎖されたあと、2002年の4月24日の短期的に開門される前までの有明

海および島原湾の底質状況に関する研究である。

5章では、鹿児島湾奥部は、鹿児島市と桜島を挟む水路幅約3kmの西桜島水道を通してのみ、外洋水との海水交換が可能な非常に閉鎖的な海域となっている。大隅半島に沿って流入する黒潮暖水舌の一部が達している可能性が高い(大木ら, 2005)3)とされる西桜島水道から湾奥北部に向かう海域で、表層より3cmまでの海底表層堆積物の底質サンプリングを24地点で行い、1cmごとに中央粒径および粒度組成の空間分布を求める。また、試料の下層堆積物は上層のものより過去に堆積したものであるという仮説に基づき、算出した粒度組成の鉛直変化から、観測海域を支配する流れの強さの数十年スケールの変化も巨視的に読み取ることにする。鹿児島湾の堆積速度については、0.5~4.2 mm/年(大木, 2000)4)という報告があるが、閉鎖性が強いとされる調査海域では堆積速度も比較的早いことが推定されるため、本研究では約10~20年の時間経過における底質環境の変化を読み取ることにする。

6章では、鹿児島湾は九州南部に位置し、湾奥(始良カルデラ)、湾央(阿多カルデラ)および湾口で構成されている。湾口と湾央は水深100mの水道で結ばれ、湾奥部は西桜島水道と呼ばれる水深40mの狭い水道でのみ接続されていて、すり鉢状となっているため、非常に閉鎖的な海域となっている。湾内で盛んに行われている養殖業や河川から供給される生活排水等による排水に含まれるリンの影響下による富栄養化や、近年ではDOが悪化傾向にあることが報告されている。本研究では鹿児島湾全域で採取した海底表層堆積物試料について分析を行い、底質汚濁の化学的指標の一つである硫化物含量と有機物含量および粒度組成の分析結果から鹿児島湾内の海底表層堆積物の特性を明らかにする。

7章では、鹿児島県では深水層における低酸素化、無酸素化の拡大は湖底表層堆積物中の窒素やリンの溶出を助長し、さらなる富栄養化につながるという懸念から、定期的に池田湖の水質調査を実施している。しかしながら底質とくに湖底堆積物の化学分析についての報告は少ない。そこで本研究では年間(15か月)を通じて採取した底泥試料を用いて、底質汚濁の化学的指標の一つである硫化物含量を基に、池田湖の底質の季節変化を水温躍層の形成過程の観点から明らかにすることにした。その結果、硫化物濃度は成層期の終わりに極大となり、逆に循環期には低下することがわかった。また、近年の温暖化の進行により湖水の上下混合の程度が弱まることによって、湖底の硫化物濃度の上昇を起こす可能性を示唆した。

そして、8章で、本博士論文の結論をまとめることにする。

2章 屋久島南西海域の粒度組成について -人為的影響のない海域（外洋）における粒度組成等の底質環境把握-

2.1. 序論

屋久島は鹿児島県大隅半島最南端の佐多岬より南南西約 60km に位置する周囲約 130km の花崗岩で形成された島で、周辺海域はサバ、トビウオなどの好漁場となっている。屋久島付近の海底地形図に描かれた等深線から、沿岸部の海底地形では、東岸域に比べて西岸域の等深線間隔が狭く、勾配が急であることを読み取ることができる¹⁾。屋久島南西部に位置する観測海域の栗生沖では、海岸線より水深 50m 付近までは約 8% 勾配、それ以深は少し緩やかな約 5% の勾配となっている。ほぼ円形を呈する島を取り巻く海岸の性状は、そのほとんどが岩礁性海岸となっているが、南西側の屋久島町栗生から黒崎の沿岸には、ウミガメが産卵のために上陸する砂浜海岸が発達し、その沖側の鳴瀬などの岩礁域にはサンゴ礁が発達している。また栗生川の河口域にはマングローブの生息する干潟が存在している。

調査海域の海況については、フィリピン東岸沖より沖縄舟状海盆に沿って東シナ海を北上し、トカラ列島付近で東へ転向する黒潮本流の一部が北向きに屋久島海峡から大隅海峡へと流れ込む際に通過する海域となっている。海底表層付近の底質の性状は、その水域の潮流や波浪などの流動特性や地形的要因によって決められ、そこに棲む生物の生息環境と密接に関係している。工学的には、海底に人工構造物を設置する場合の基礎的資料として底質の粒度組成の分析は重要な要素となる。加えて、水産学の観点からも海底の底質分布は漁場の環境特性指標や漁礁設計上必要な項目として重要である。

本研究では、屋久島南西岸、栗生沖海域の底質サンプリングおよびデータ解析を行い、採取された試料の粒度特性等に基づいて海底環境を把握する。

なお、本研究に用いた試料は、鹿児島県による鹿児島湾地区広域漁場整備事業の一環として行われた底質調査の際に採取されたものである。

2.2. 試料採取と処理

試料採取は平成 21 年 10 月 15 日および 16 日の両日にかけて小型舟艇を用いて行った。観測海域は、図-1 および表-1 に示すように、屋久島南西岸沖合約 2 km で、南北に約 4km、東西に約 0.75km にわたる方形の海域に定め、観測地点を 3 列各 5 点、計 15 地点とした。水深は 98m (St. 15) から 132m (St. 10) の範囲にあり、平均水深は 120m である。また描かれる等深線は図-1 に示すように、海岸線および観測海域の長尺方向と平行に描かれる特徴がある。

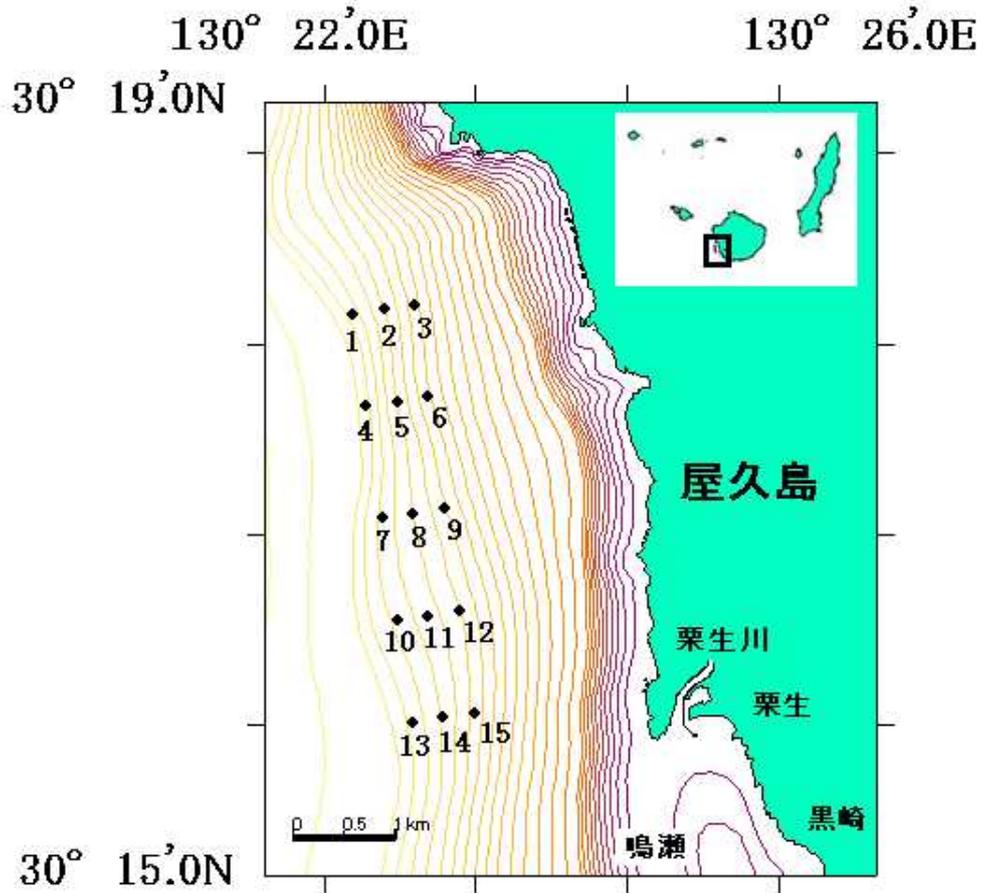


図-2.1 観測地点

表-2.1 観測地点の水深及び位置

観測地点	水深(m)	緯度(N)	経度(E)
1	129	30° -18.2′	130° -23.0′
2	124	30° -18.2′	130° -23.2′
3	114	30° -18.2′	130° -23.4′
4	129	30° -17.7′	130° -23.1′
5	117	30° -17.7′	130° -23.3′
6	109	30° -17.7′	130° -23.5′
7	130	30° -17.1′	130° -23.2′
8	124	30° -17.1′	130° -23.4′
9	117	30° -17.1′	130° -23.6′
10	132	30° -16.6′	130° -23.3′
11	119	30° -16.6′	130° -23.5′
12	102	30° -16.6′	130° -23.6′
13	130	30° -16.0′	130° -23.4′
14	117	30° -16.0′	130° -23.5′
15	98	30° -16.1′	130° -23.7′

試料採取にはスミス・マッキンタイヤ採泥器を用いた。採集した試料は船上でバケツよりスプーンを用いて採取し、試料ビンに入れて持ち帰った。

観測地点ごとにパレットに拵げ、室内にて自然乾燥させた。粒度分析は、目合長 0.03 mm から 8.00 mm まで、11 段階の篩を用いて篩分けによって行った。各篩で分けられた試料の重量を電子天秤でそれぞれ測定し、得られた粒径 (mm) ごとの重量に基づき重量百分率を求めた。各観測地点の粒径 (mm) ごとの重量百分率を表-1 に示す。各重量百分率より描いた粒径加積曲線より重要百分率が 50% の粒径にあたる中央粒径 (mm) ²⁾ を求めた。

2.3. データの解析方法と結果

図-2 は観測地点とグラフの位置が合致するように配置した観測地点ごとの粒度分布を示したものであり、図の右側が屋久島側 (陸側)、左側が沖側を示している。また表-2 に各観測地点の粒径ごとの重量百分率を (枠付数字 : 最頻値) を示す。図-2 および表-2 から明らかなように、全観測地点において粒径 0.50 mm の重量百分率が示す範囲は 0.1% (St. 4 および St. 15) から 1.2% (St. 1) となり、いずれの観測点でも隣接する 2 つの粒径 (0.25 mm および 0.71 mm) の重量百分率と比べ極端に小さい値を示し、非常に特徴的な結果となった。ほとんどの観測地点において、粒径 0.5 mm を境として、細粒側 (粒径 0.5 mm 未満) と粗粒側 (粒径 0.5 mm 以上) でそれぞれ最頻値 (最大重量%) を示し Bi-modal となった。各観測地点のヒストグラムは、最頻値を示す粒径 (mm)、およびその形状によって、以下に示すように大きく 3 つに分けることができる。

一つ目は、観測海域北側の St. 1, 2, 3, 5 および St. 10 の 5 つの観測地点で、粒径 0.5 mm よりも小さい粒径 (0.25 mm) に最頻値が存在している。二つ目は、粒径 0.71 mm に最頻値が存在する St. 6, 8, 9 および 11 の 4 つの観測地点である。三つ目は、粒径 0.71 mm よりも大きい粒径に最頻値を示した St. 4, 7, 12, 13, 14, 15 の 6 つの観測地点である。これらのうち St. 15 では他の観測地点と異なり、唯一粒径が 8 mm を超える非常に粗粒な堆積物が全体の重要百分率の半分以上を占めた。粒径 0.5 mm 未満の重量百分率は、4.1% (St. 4) から 37.6% (St. 5) の範囲となり、その平均値は 23.6% となった。したがって全体的にみると、本研究海域の粒度組成は、0.5 mm 以上の粒径 (mm) が卓越した底質であることが理解できる。

一般的に、底質の粒度組成を代表するパラメータとして中央粒径 (d_{50} : mm) が用いられるが、本研究で得られた結果のように、粒径 0.5 mm を境として明確に、その堆積環境が区分されると考えられる粒度組成を示す場合は、中央粒径 (mm) を基に行う解析だけでは十分ではないと考え、粒径が 0.5 mm 未満と 0.5 mm 以上の、それぞれの範囲における中央粒径 (mm) を求めて、それを基に解析を行った。これらを図-3 および図-4 に示す。粒径 0.5 mm 未満における中央粒径 (mm) は 0.14 mm から 0.17 mm の範囲となり、観測点全体でほとんど変化が見られないことが分かる。

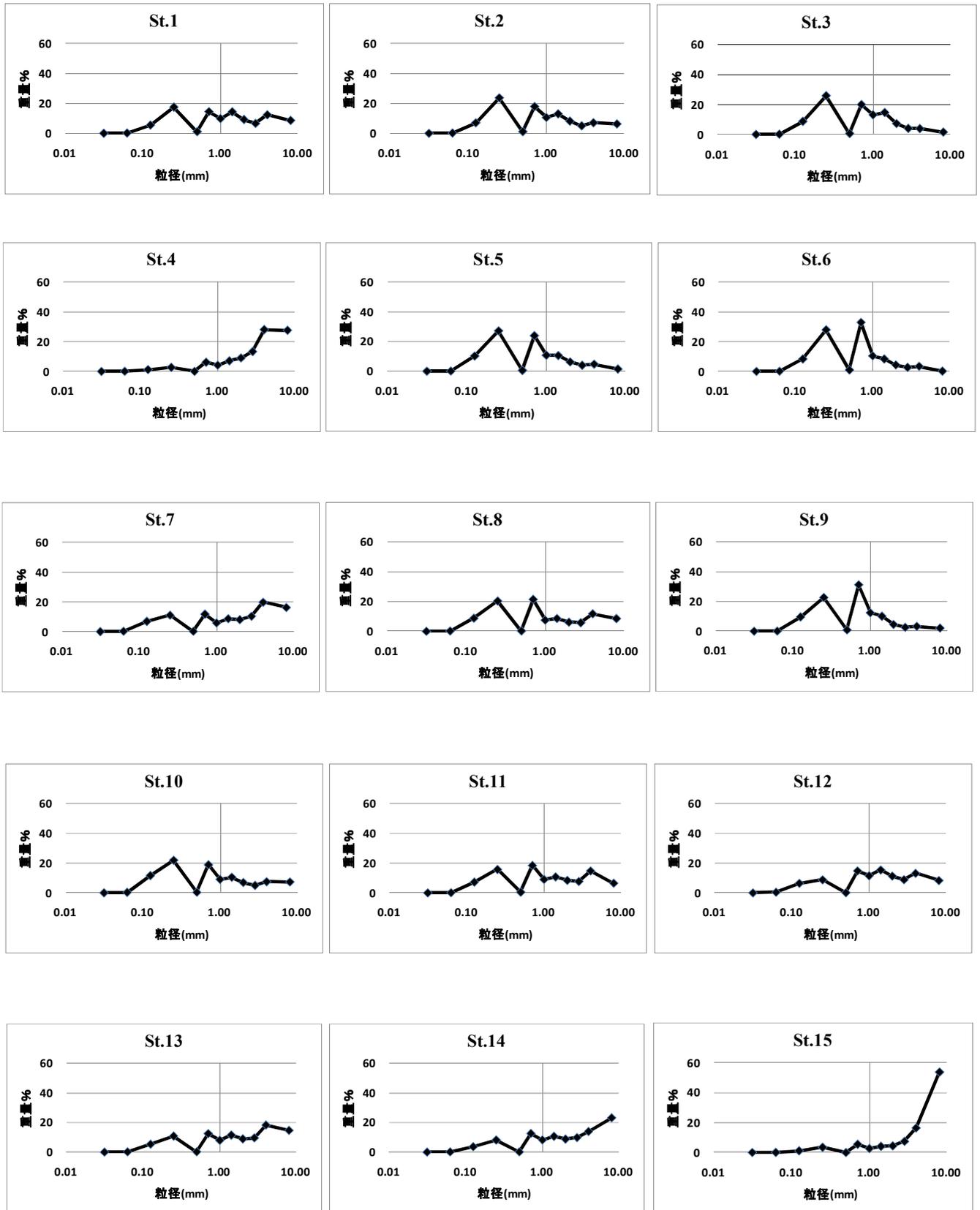


図-2 各観測地点の粒度分布

表-2.2 粒径 (mm) ごとの重量百分率

D(mm)	0.03	0.06	0.13	0.25	0.50	0.71	1.00	1.41	2.00	2.83	4.00	8.00	
観測地点	1	0.0	0.2	5.5	17.5	1.2	14.5	9.9	14.4	9.2	6.7	12.4	8.7
	2	0.0	0.2	7.0	23.7	1.1	17.9	10.6	13.0	8.1	5.0	7.0	6.3
	3	0.0	0.2	8.7	25.7	0.8	19.9	13.1	14.6	7.3	4.1	4.0	1.6
	4	0.0	0.1	1.3	2.7	0.1	6.2	4.2	7.1	9.1	13.4	28.1	27.7
	5	0.0	0.1	10.2	27.2	0.5	24.0	10.8	10.6	6.3	4.0	4.7	1.5
	6	0.0	0.2	8.4	28.0	1.0	32.9	10.5	8.4	4.4	2.7	3.4	0.2
	7	0.0	0.3	7.0	11.1	0.3	11.9	5.9	8.8	8.1	10.4	19.9	16.3
	8	0.0	0.3	8.8	20.4	0.3	21.5	7.6	8.7	6.1	5.8	11.8	8.6
	9	0.0	0.1	9.6	22.8	0.9	31.2	12.4	10.2	4.6	2.6	3.3	2.2
	10	0.1	0.4	11.7	21.9	0.4	18.9	9.1	10.5	7.0	5.1	7.5	7.4
	11	0.1	0.2	7.3	15.8	0.5	18.5	9.1	10.8	8.5	7.7	14.8	6.6
	12	0.0	0.5	6.5	8.9	0.2	14.8	11.6	15.5	11.4	9.0	13.2	8.4
	13	0.1	0.2	5.4	10.8	0.3	12.4	8.0	11.5	8.9	9.6	18.2	14.6
	14	0.0	0.2	3.7	8.2	0.2	12.7	8.3	10.7	8.8	9.9	14.0	23.2
	15	0.1	0.2	1.3	3.6	0.1	5.6	2.8	4.3	4.6	7.5	16.4	53.6

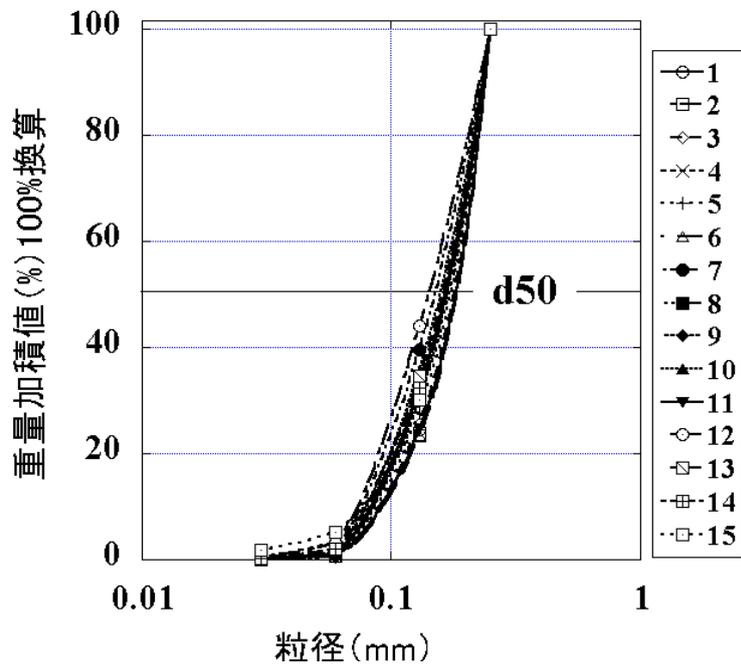


図-2.3 粒径 0.5 mm未満の 100%重量換算

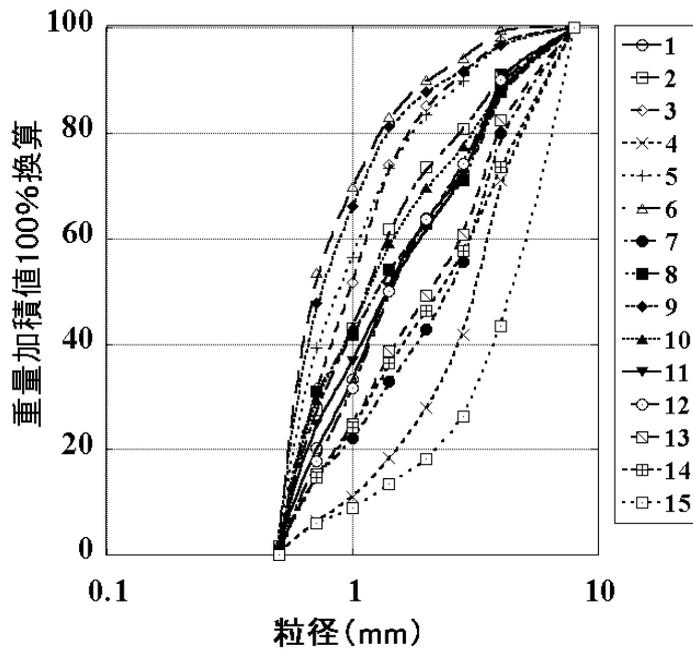


図-2.4 粒径 0.5 mm以上の 100%重量換算

これに対して粒径 0.5 mm以上における中央粒径(mm)は、0.70 mm (St. 6) から 4.40 mm (St. 15) という非常に広い範囲に及んだ。採取された堆積物の構成材料は、破碎の進んだ大型の二枚貝の殻、ウニの刺、サンゴ片といった、通常、比較的浅海域に生息している生物の遺骸、つまり炭酸カルシウム性の底質材料が主なものであった。また紅色を呈する、色鮮やかな固着性有孔虫も見られた。主な堆積材料を図-5 および図-6 に示す。



図-2.5 主な堆積材料



図-2.6 固着性有孔虫

2.4. 考察

外洋に面する屋久島周辺海域は、夏期における台風、冬期における北西の季節風など、季節による気象の影響を受けやすい。これらのうち観測海域である南西岸沖合は、夏期に接近する台風の影響が大きいと考えられる。加えて黒潮の主流域に近いことから、深さ数十m以浅の浅海域では波浪による強力なエネルギーの影響下に曝される機会が多く、加えて黒潮に伴う速い流れの影響も受けると推察される。陸源性堆積物の運搬経路として、河川は大きな役目を果たすが、観測地点との位置関係から考慮すると、その影響は少ないと考える。これらのことを踏まえて考察を行った。

本研究海域の粒度組成における最大の特徴は、粒径 0.5 mmを境に、Bi-modal な粒度分布を示し、かつ 0.5 mm成分 ($0.50 \text{ mm} \leq d_{50} < 0.71 \text{ mm}$) の底質が、全観測地点でほとんど見られないことである。粒度組成が2つ以上のピークを描くことはあり得るが、いずれの観測地点でも粒径 0.5 mm成分 (0.71 mm未満, 0.50 mm以上) が欠落していることは非常に珍しい現象である。このことは少なくとも2つ以上の異なる運搬および堆積過程を経た堆積物で観測地点の底質が構成されていることを示唆している。採取された堆積材料が、二枚貝、サンゴ片、ウニの刺、固着性有孔虫などであり、かつ観測海域の水深が、1点 (St. 15 : 98m) を除き 100m を超えることを考慮すると、このような深海域に生息しているとは考えにくい。

一般的に、これら本来浅海域に生息している生物の遺骸が、100m を超えるような深海域になぜ存在するのか、その主な理由として2つのことが推察される。一つは前述のように、特に夏期において接近する台風による強大な波の影響を受けて沿岸部に堆積している比較的比重の軽い生物遺骸などが巻き上がり、何らかの流れで沖合へと運搬されることによってもたらされたのではないかというも

のである。特に粗粒成分を構成する生物性材料（炭酸カルシウム性材料）に関しては、上述の浅海域から輸送されてきたものであるという解釈以外に、海水準が低下し、かつ現地周辺に黒潮が流れ、その影響を受けて海水温が十分高かった状況で生産されたものとも考えることも可能である。つまり約7万年まえに始まったとされる更新世最後のウルム氷期において、海水面が現在よりも約130m下がった時期に生息していた生物の名残ではないかとするものである。いずれにしても本研究海域の底質の粗粒成分は浅海域起源の生物遺骸で構成されていることは確かである。

図-3 および図-4 に示した粒径 0.5 mm未満とそれ以上の粒径に分けて描いた粒度分布から、研究海域の堆積物は2つ以上の異なる運搬過程を経たものであろうと推察されることを考慮し、加えて、粗粒成分（粒径 0.5 mm以上）の堆積物は、本研究海域の現在の底層付近の流れによってもたらされたものではないと仮定すると、細粒成分（粒径 0.5 mm未満）の堆積物が、本研究海域の底層付近の流れの状況を反映したものであると考えるのが妥当であろう。そのことは粒径 0.5 mm以上の中央粒径（mm）に比べて粒径 0.5 mm未満の中央粒径（mm）が 0.14 mmから 0.17 mm（細粒砂）という狭い範囲に示されることから明らかである。Inman(1949)による、粒径と限界摩擦速度³⁾を基に流れの強さを推察した結果、本研究海域の底層付近には 2.0 cm/s 程度の流れが存在することになる。今後は粒度分布解析に加えて、海底表層付近に潮流計を長期的に設置してデータを収集するなどの実測値との比較検討が必要を考える。

2.5. 結果

今回、調査を行った海域では、一般的な単一ピークの粒度分布とは異なる特異な結果が得られた。本研究の主な結果は以下のとおりである。

i) 表-1 に示されたように、いずれの観測点でも 0.50 mmの粒径の頻度（重量百分率）が極端に少ない値を示すため、粒度分布はこの 0.5 mmの粒径を境とする Bi-modal、または、それ以上のピークを持って描くことになった。このことは観測海域の底質が、少なくとも2つ以上の異なる運搬過程を経た堆積物により構成されていることを示唆している。

ii) 図-2 に示す全観測地点の粒度分布から分かるように、粒径 0.5 mmよりも細かい粒径において最頻値を示す観測地点は、そのほとんどが観測海域の北側観測点（St. 1~3, 5 及び 10）で占められた。これに対して、粒径 0.5 mmよりも大きい粒径に最頻値を有する観測地点は、観測海域の北部沖側の St. 4 と St. 7、そして観測海域南側の St. 13~15 の計 5 点となった。観測海域南側の St. 14 及び St. 15 で最頻値を示す粒径が 8.0 mmとなり、観測海域の中で最大となった。

iii) 図-5 および図-6 に示すように、代表的な堆積物の構成材料には、破碎した二枚貝の殻、ウニの刺、などの生物遺骸と色鮮やかな朱色を呈し、生体と考えられる固着性有孔虫や小石などを含み、全体的には浅海域に生息する材料で構成されていた。

参考文献

- 1) 海上保安庁 海底地形図 No. 6353
- 2) Folk, R. L. & Ward, W. C. Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters. *J. Sedimentary Petrology*, 27, 3-26. 1957.
- 3) Inman, D.L. Sorting of sediments in the light of fluid dynamics, *J. Sediments, Petrol.*, 19, 51-70, 1949.

3章 福島県松川浦の東日本大震災津波前後での底質・地形変化

-短期的に人為的または自然災害の影響のある海域（内湾）における粒度組成などの底質 No. 1-

3.1. まえがき

仙台湾の南部に位置する福島県相馬市鶴ノ尾岬周辺から茶屋ヶ岬を結ぶ砂質性海浜（砂州）背後の低地に水域面積 7.38km² の松川浦が存在する。内海的な特性を持つ松川浦は、福島県の重要な水産漁場かつ漁業基地であった。また、松川浦中央部には、宇多川・小泉川、浦南部には日下石川という河川が流入しており、陸域起源の栄養塩や底質の供給源となっており、アサリやノリの養殖場としても知られていた。この松川浦は、湖口付近から南北約 5 km、東西 1 km の水域と、湖口付近からすぐ西側に南北約 0.5 km、東西に約 1.5 km の水域が接続した形状の浅い水域で構成されている。人工的に開削された湖口付近では幅が約 100m、水深が約 5.5m と深く、南側および西側の湾奥部に向かい平均水深が 1m 程度と浅くなる。特に、宇多川、小泉川、日下石川河口の前面域と、湖口の浦内側に泥質と砂質の土砂が堆積し、大潮の干潮時には約 7 割が干出するような干潟領域であった。また、東北地方太平洋沖地震津波前は、鶴ノ尾岬側の大洲海岸の浜幅が狭く防潮林も発達しておらず、砂州の幅も狭かった。加えて、1947 年の米軍撮影空中写真や 1952 年の国土地理院撮影空中写真等を見ると砂州の標高（天端高さ）が低いために、高波浪来襲時に遡上波が砂州を越えて浦内側に越波・越流しやすい箇所であったことが判読できる。したがって東北地方太平洋沖地震津波により砂州が切れて新しく湖口となった大洲海岸の当該箇所は、海からの巨大外力に最も脆弱な場所であった。

松川浦は、図-1 に示されるように南北に細長い海跡湖で、太平洋と松川浦の水域を分けるように砂州が延びている。この砂州上には、砂浜、海岸保全施設、砂丘、そして、砂丘林が存在していた。しかし、2011 年 3 月 11 日の東日本大震災時に、砂州上で生じた津波の砕波および越流により、大規模な地形変化および海岸保全施設の被害が生じた。加えて、海中生態系の生息環境として重要な底質環境も松川浦全域で変化した可能性があった。さらに、松川浦の大規模な水深（海底地形）変化は、将来的に浦内の流況を変化させ、結果として津波前と異なる水質環境や生物生産環境を引き起こす可能性もあるので、松川浦で底質と、地形変化の現地調査を行い、津波前の状況と比較することにした。



図-1 松川浦の形状

3.2. 水産試験場相馬支場の被災状況

2011年3月11日午後2時46分に東北地方の沖合海底で地震が発生し、地震発生後約40分から60分で東日本沿岸域に超巨大な津波が来襲した（写真-1参照）。



写真-1 松川浦周辺の津波第一波の様子

この超巨大な津波により、写真-2 に示すように砂州の一部が切れて新しく湖口が形成された。そして、福島県では、2012年3月8日では、死者数1,993人、行方不明者数53人、放射線の影響による避難も含め避難者数30,777人（県外避難62,674人（2/23調べ））、住家被害235,061棟、被住家被害25,908棟の甚大な被災が発生した。



写真-2 大洲海岸の砂州が切れてできた新湖口

写真-3 津波の襲来中

写真-4 激流に翻弄される漁船(写真中央左側が鵜ノ尾岬, 右側が大洲海岸で, 大洲海岸の砂丘林を津波が越える直前の様子であり, 写真下部左側にある湖口から津波の激流が流入していることが分かる)

写真-5 流される車と漁船(奥側の大洲海岸上で津波が砕波・越流し, 下部左側にある湖口から流入する津波の激流に車と漁船が浮いている様子)

加えて、福島原発による深刻な放射能汚染問題も生じ、福島県沿岸での漁業が操業停止状態になった。また、松川浦と太平洋を隔てている砂州部分に、写真-6 に示すような津波の碎波が原因と思われる（洗掘）水路が形成されていることが空撮写真から分かっていたので、（洗掘）水路の形成状況を、磯部漁港周辺から北側に向かい調査した。



写真-6 松川浦大洲海岸護岸背後の洗掘（水路）と松林の被災

3.3. 松川浦の底質

底質環境は、アサリやカレイ等の水産有用種の生息環境や自然界の底棲生物の生息環境、そして、富栄養化物質の浄化等の重要な指標である。現地踏査から、松川浦内から大量の泥質成分土砂が津波の碎波等で巻き上がり浮遊状態になりながら押波で陸域側の圃場等へ大量に輸送・堆積することで、松川浦内の泥質土量が減少した可能性が考えられた。一方、大洲海岸の砂州が切れた周辺では大量の砂（中砂・細砂）が、松川浦内に大量に流入・堆積している状況も観察できていた。さらに、大洲海岸の砂州が津波により沿岸方向にえぐれて溝状の地形を形成することで、大量の砂が松川浦内に流入したものと推測された。そして、津波の引波時に一部の泥質土が松川浦内に滞留したり、津波後に圃場部分へ滞留した泥質土砂を含む海水が農業用排水門などを通じて松川浦内に流入すること等の現象が複合して、松川浦内の底質環境が大きく変化した可能性があった。そこで、できるだけ松川浦全域で底質サンプリングを行い、底質環境を把握することにした。

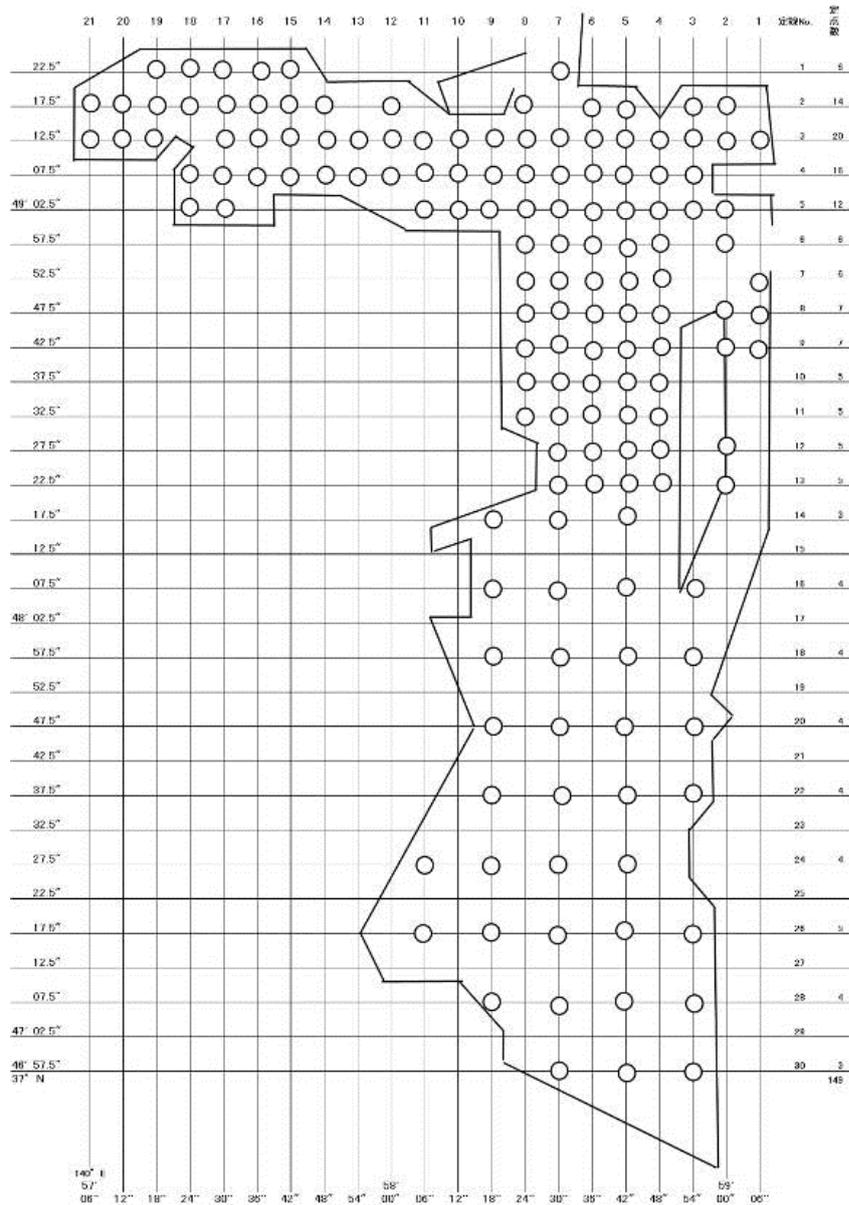


図-2 津波前の採泥地点図(1996年9月) 採泥地点数は149ヶ所

津波前の底質データとしては、水産試験場相馬支場により1996年9月25日と26日に松川浦内の149地点で底質採取が行われている。そして、ふるい分け法で粒度分析された粒度組成データの中から、本研究では主に含泥率に着目して検討した。なお、含泥率を使用する理由は、アサリ養殖場としての適合性を検討するためである。採泥地点は、北緯 $37^{\circ} 46' 57.5''$ から $37^{\circ} 49' 22.5''$ 、東経 $140^{\circ} 57' 6''$ から $140^{\circ} 59' 6''$ までの領域内で約150m間隔の格子線の交点上に配置してある(図-2)。なお、

本研究で用いる土質分類は、JIS基準に従い、粒径が $1/16\text{mm}$ 以下を泥とし、粒径が $1/16\text{mm}$ 以上 2mm 未満を砂、粒径が 2mm 以上は礫と分別する。また、含泥率とは分析した底質試料の中に泥がどれだけ入っているかを百分率で表したもので、一般的には含泥率が高くなるほど水質上の問題や、底棲

生物の生息環境の悪化を招くことが多い。

津波後の底質データは、2011年9月12日から15日にかけての4日間で、松川浦内の147地点でエクスマンバージ採泥器により底質サンプリングを行った。採泥地点は津波前に倣って設定した。なお、津波後の底質採取で得られたサンプルは、鹿児島大学水産学部に宅配し、その後、鹿児島大学フロンティアサイエンス研究推進センターで放射線量を測定し安全性を確認してから、鹿児島大学総合研究博物館のレーザ回折式粒度分布測定装置 SALD-3100(島津社)を用いて粒度分析を行い、粒径加積曲線を求めた。そして、この粒度組成データに基づいて、含泥率を計算した。

津波前149地点、津波後147地点の含泥率の観測データだけでは、浦中央部より南側の観測データ数が少ないために、空間的な底質分布を比較する時に若干の齟齬が生じる。従って、隣り合う2点間の平均値をデータ空白箇所の含泥率のデータとして補間することで浦北部と同様に緯度5"、経度6"間隔で含泥率のデータが配列されるように、データセットを作り直した。なお、データの補間後、津波前249地点、津波後255地点での含泥率データをもとに、松川浦の含泥率の空間分布図を作成した。そして、津波前後で含泥率がどのように変化したのか比較することにした。

含泥率の空間分布図(図-3)から、津波前の松川浦では、浦北西部・浦中央部・浦南西部で含泥率が50%以上と高くなっていたことが分かる。また、湾口部の浦北東部で含泥率10%以下と砂質性の底質環境であったことが分かる。そして、津波後の松川浦では、浦北部・浦中央部の一部・浦南西部・浦南東部で含泥率が40%以上となっていた。今回使用した分析方法の違いを考慮しても、浦北部・浦中央部の一部・浦南東部の海域では平均的に底泥率が減少つまり浦内の泥質成分が津波で松川浦外に流出したことが分かる。さらに、含泥率が高いのは津波前と同じ浦北西部・浦南西部であることも分かる。一方、浦中央部は含泥率10%以下の底質(砂質性の底質)が広がっていた。特に、透明度が改善された2012年3月時点での目視観察では、大洲海岸で砂州が津波により切れた時に大量の砂が前面海域に輸送・堆積しており、その海域では砂質性の底質環境になっていることも確認された。

津波前後での含泥率の変化を調べるために、津波後の含泥率から津波前の含泥率を引いて、含泥率の差の空間分布図を作成した(図-4)。その結果、浦北西部の一部・浦中央部・浦南東部の一部の含泥率が低下していることが分かった。特に、浦中央部では広い範囲で含泥率が津波前に比べて30%以上も低下しており、底質がかなり粗粒化していることが分かった。逆に、浦北部・浦南東部は含泥率が30%以上増加している領域があり、この領域では底質が細粒化つまり泥質化していることが分かった。

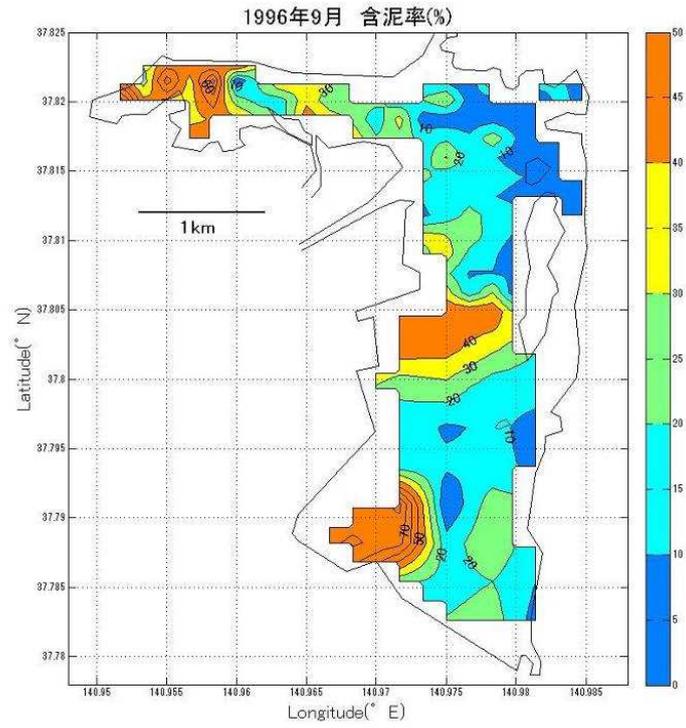


図-3 津波前の松川浦の含泥率分布図；1996年9月の含泥率分布図で色が青に近いほど含泥率は低下する。

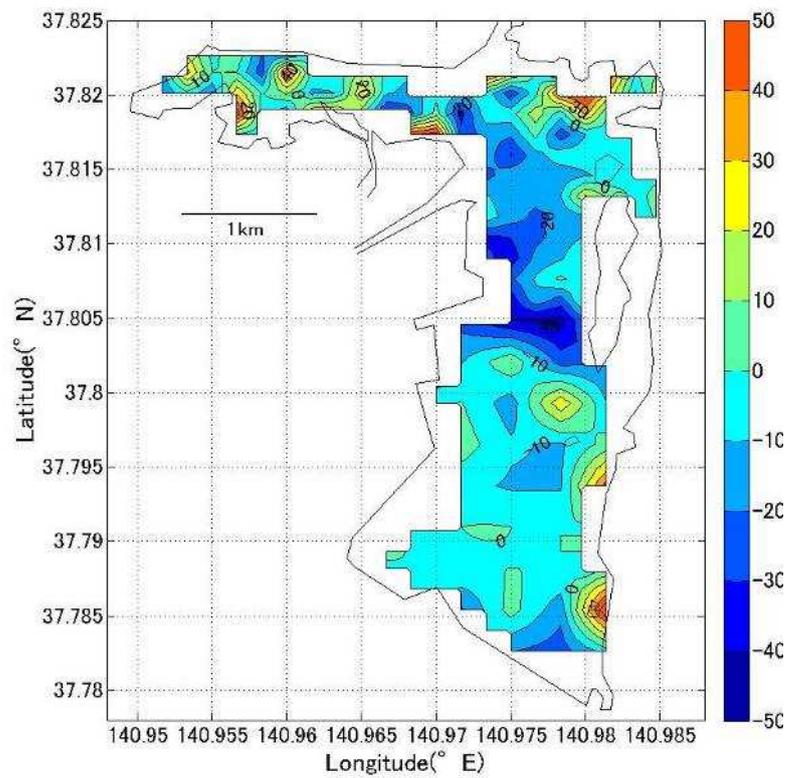


図-4 津波前後の松川浦の含泥率の差；色が赤に近いほど津波後に含泥率が増加，青に近いほど含泥率が低下している。

松川浦の重要水産物であるアサリに適した含泥率として、稚貝はより砂質の底質を好むとされる。具体的には濤部分を除いて含泥率 25%以下がアサリにとって適した底質環境と言われている(水産庁漁港漁場整備部, 2008)。そこで、松川浦で津波前にアサリ漁場とされていた海域で、津波後の含泥率図を重ねて、津波後もアサリ漁場として適する底質環境が存在しているか調べた(図-5)。

図-5 アサリ漁場と津波後の含泥率(%) ; ○で囲んだ場所が津波前のアサリ漁場を示す

その結果、松川浦の湾口部、中央部、南部の漁場は含泥率が 30%以下であるが、北西部のアサリ漁場では含泥率50%以上の海域があることも分かった。2011年10月には新湖口も閉じられたために、今後、松川浦内の流速は新湖口が開いていた時に比べて早くなることは予想しにくいので、結果としては、今後、自然状態では底質の細粒化が生じることがあっても、粗粒化が生じることはない。従って、北西部のアサリ漁場は人工的に底質改善を行う必要があると考えられる。また、この領域は同時に沈降した海底面を砂質土で嵩上げしなければ、潮干狩り場として使用することも困難と考えられる。

3.4. 松川浦の地形変化

津波前の水深データは、小菅(1972)が示した満潮時の松川浦の水深図を方眼紙上に写し、北緯 $37^{\circ} 46' 42.5''$ から $37^{\circ} 49' 27.5''$, 東経 $140^{\circ} 57' 6''$ から $140^{\circ} 59' 6''$ までの領域内で緯度 $2.5''$, 経度 $3''$ 間隔の格子線を引き、浦内で交点となった 1, 151 箇所の水深を読み取り津波前の水深データセットを作成した。そして、津波後の水深データは2011年10月6, 13, 14日の4日間に渡り松川浦内の268地点でシングルビーム型の測深器を2台用いて調査船かろうねの両舷側で同時に測深し、その平均値を測深データとした。生データには基準面をそろえる潮位補正が必要なために、国土地理院

の web で公開されている相馬港における推算潮位を用いて観測された 10 月 6, 13, 14 日期間の 30'' 潮位データを作成し、満潮時水面を基準面とした水深データに変換して解析に使用した。

現状では松川浦に隣接した相馬港の基準面が正式な基準面であるが、津波前の水深図として参照する小菅(1972 年)の水深図ではどの日時での満潮線を基準面に使用したのか明らかでなく、津波後に測深したデータでは、津波前に観測されたデータに基づく相馬港の基準面を仮に使用しているために、東北地方太平洋沖地震による地盤沈下に伴う潮位基準面のずれを考慮できていない問題が残るので、以下の検討は津波前後での地形変化に関しては定性的な議論、そして、同じ観測時期での空間的な地形の状況に関しては定量的な議論が可能なデータに基づいていることをまず理解する必要がある。

津波前の松川浦は漁船の水路として湾口部から北西部、湾中央部、中州沿いに人工的に掘削された場所を除き、満潮時でも水深が 1m 未満になっていた(図-6)。そして、湾奥部・北西部に向かうにつれて水深が浅くなっていること、浦東側(太平洋側)より浦西側(陸域側)の方で水深が浅いことも確認できる。しかし、津波後の満潮水深は浦北西部の湾奥部を除き、浦全体で水深が 1m 以上になっていることが分かる(図-7)。

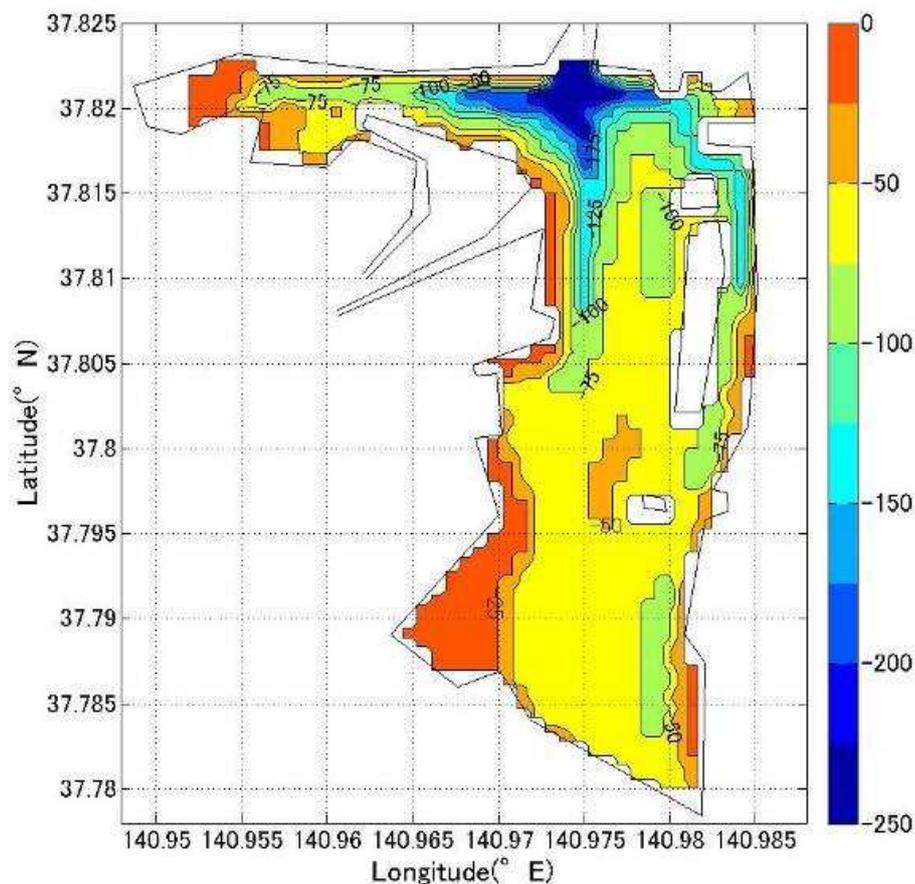


図-6. 津波前の松川浦の満潮時水深図；色が青に近いほど水深は深くなっている。

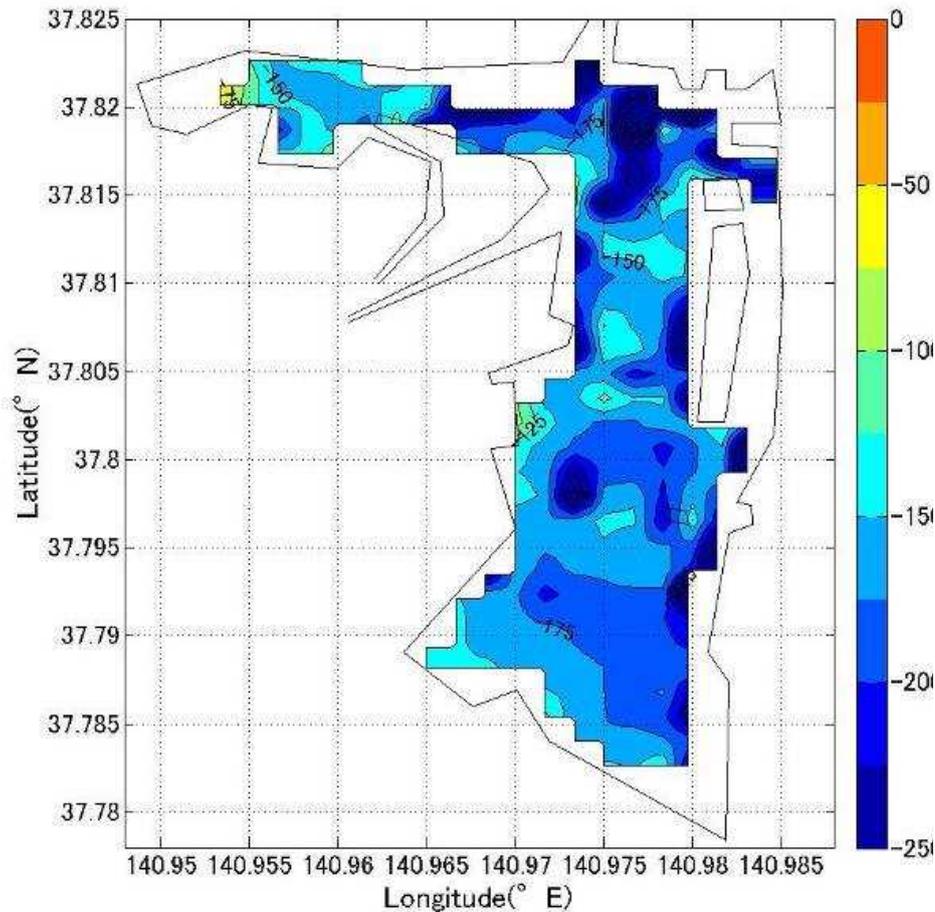


図-7 津波後の松川浦の満潮時水深図；色が青に近いほど水深は深くなっている。

3.5. あとがき

2011年3月11日に発生した大地震により、福島県松川浦周辺の地形、底質等の自然環境は激変した。自然環境だけでなく、漁港、上屋等の施設、漁船、水路などの水産業に必要なインフラにも甚大な被災が生じた。本報告は、福島県の水産業復興に少しでも役に立つ調査研究を行うことを目的に、福島県水産試験場相馬支場と鹿児島大学水産学部海洋環境グループ（西研究室）とで共同研究を行った内容に関してまとめたものである。2012年3月時点での本研究の主な結論は、以下のとおりである。

- ・底質組成は、津波により浦中央部で含泥率が減少、北部・南部海域で増加していた。津波前はアサリ漁場であった北西部海域の含泥率が特に増加しているために、自然条件での改善は困難と考えられるので、今後、人工的な底質改善が望まれる。
- ・水深は津波前に比べて浦全体で深くなっている。これは松川浦を含む地域の地盤が地震により低下し、加えて、細粒成分の堆積底質で構成される海底が津波で浸食されたためと考えられる。
- ・海岸の砂州上の海岸保全構造物および臨海道路に沿って、松川浦側に溝状の洗掘地形が形成されて

いる。溝状地形の詳細測量は出来なかったが、新しく開いた湖口付近では、溝状の地形の比高は周辺の海底と比べて約 1.8m 程度の深さがあった。

なお、本研究に基づく提言として以下のことを挙げる。

- ・アサリ漁場のうち、浦北西部の含泥率が増加した海域は 2012 年以降のアサリ漁獲量によっては、砂の投入および嵩上げなどの底質改善が必要である。
- ・水深変化の概要は把握できたが、新しく形成された水路（溝状地形）や海底の微地形、および瓦礫の堆積状況を把握するためには、マルチビームなどの詳細測深が必要である。

謝辞;本研究は、一部、一般社団法人国立大学協会平成 23 年度 震災復興・日本再生支援事業の経費支援を受けて実施したものである。ここに、謝意を表させていただくことにする。また、底質の粒度分析を行う前に、放射能汚染の有無の確認が求められ、鹿児島大学フロンティアサイエンス研究推進センターの協力で放射能検査を実施していただき、総ての底質サンプルの安全性を確認することができたので、紙面を借りて感謝させていただくことにする。

参考文献

小菅明男(1972)：福島県相馬市松川浦の水質と底質の珪藻遺骸について，地球科学，26 巻，6 号，pp. 243-255.

水産庁漁港漁場整備部(2008)：アサリに適する含泥率浅海化・干潟化による影響緩和のための一体的な基礎整備方策検討調査報告書，pp. 39-43.

4章 有明海および島原湾の海底堆積物の鉛直変化

-短期的に人為的または自然災害の影響のある海域（内湾）における粒度組成などの底質 No. 2-

4.1. まえがき

有明海西部に位置する諫早湾では1989年より干拓事業が開始され、1997年4月14日に潮受け防波堤が閉鎖された。また2002年の4月24日から5月20日の間、短期開門調査が行われ、現在は再び閉鎖された状態となっている。島原湾は日本有数の漁業、とくに海苔養殖地として知られる海域であるが、以前島原湾特産として有名であったタイラギ資源の枯渇や海苔不作の原因ではないかと言われている諫早湾干拓事業による漁業への影響が懸念されている。

本研究は、2002年4月から5月にかけて実施された諫早湾潮受け防波堤短期開門調査の直前に、有明海全域において計54点の柱状試料（2 cm～50 cm）を採取し、粒度組成等の分析を行って得られた底質データに基づいて、近年の海域環境の変化を考察するために底質の中央粒径（mm）、粒度分布、含泥率の時空間的な変化を定量的に求めて、当時の堆積環境の変化について検討した。

4.2. 調査海域および海況

有明海および島原湾は、九州北部の長崎、佐賀、福岡、熊本の4県に囲まれた総延長距離約96 kmで、面積1,700 km²の閉鎖的な内湾である。北北西から南南東に延びる湾奥部には有明海と称される干潮時に広大な干潟が出現する海域があり、また島原半島の北側には、水門が1997年に閉じられ農地転換事業が継続されている諫早湾がある。一般に有明海および諫早湾を含む島原半島東岸に広がる内湾を島原湾と呼び、この内湾と外海を結ぶ主たる水道は、天草下島と島原半島の間にある最狭部約5 kmの早崎瀬戸である。

海上保安庁刊行の九州沿岸水路誌4)に示される表層付近の潮流は、島原半島南端の口之津沖で東流最強時において5.4 kt (2.7 m/s)、西流最強時5.9 kt (3.0 m/s)である。平均的に潮流は西流（下げ潮）が東流（上げ潮）に比べて卓越し、とくに湾口付近で顕著である。流速は湾奥に向かうにつれ徐々に減少し、最奥部の住之江では西流および東流ともに最強時でも1.3 kt (0.7 m/s)程度である。また日本最大の潮位差を有する有明海は、春季および秋季にピークを持ち、最大の潮位差は6 mに達する。

一般に有明海は有明海（島原湾）南側より湾口、湾中央、湾奥と、大きく3つの海域に分けることができる。なお、本調査を行った有明海全域の海底地形および採泥地点を図-1に示す。



図-1 観測海域および観測点

海図を参考にすると調査海域の海底地形は、湾奥部および熊本県沿岸で水深 10 m 未満の広大な浅海域が広がっているのに対して、島原半島東岸沿いには水深 50 m の深水域が南北に連なっている。湾口部の湯島瀬戸には、湾内の最大水深である 154 m に達する舟状海盆が存在する。20 m の等深線は、島原半島側では島原市沖合に存在する岩礁域を除いて海岸線とほぼ平行である。そして、熊本側では沖合まで続く浅海域が存在することで、三角および長洲を結ぶ線に沿ってほぼ南北に 20 m 等深線が延びている。

湾中央部、熊本県側には緑川、白川および菊池川といった河川が存在している。一方、湾奥西部、島原半島側にはこのような大型河川は存在せず、雲仙普賢岳噴火の際に多量の火山性物質を島原湾に運んだ水無川を代表とするような小規模河川が点在している。なお、雲仙普賢岳は、1990 年 11 月より噴火活動を開始し、1995 年 3 月に収束するまでに多量の溶岩や火山灰を噴出した。噴出されたこれらの火山性物質は風の運搬作用や降雨による浸食作用および河川の運搬作用などにより、島原周辺海域で広範囲に堆積したと考えられる。

4.3. 調査方法と分析方法

(1) 試料採取

2002 年 4 月 17 日から 19 日の 3 日間、湯島瀬戸以北の島原湾全域で海底表層堆積物の採取を行った。試料採取には、鹿児島大学水産学部海洋環境情報科学研究センター東町ステーション（鹿児島県出水郡長島町）のあづま（総トン数 8.3 t）を使用した。

図-1 に示すように、採泥地点は緯度において北緯 $32^{\circ} - 37.5'$ と北緯 $33^{\circ} - 05.0'$ の間の海域で、緯線 $2.5'$ （約 4.6 km）ごとに 12 の測線を設け、その線に経度 $2.5'$ 間隔で測点を 54 点設定した。試料採取には、砂質海域と泥質海域では異なる機器を用いた。砂質海域ではスミス&マッキンタイヤー採泥器（200 mm×200 mm×100 mm）を使用し、スチロール製パイプ（内径 34 mm）をバケット内に差し込み、表層より最大 10 cm の柱状試料を採取した。また泥質海域ではコア・サンプラー（フレーガー式柱状採泥器）を使用し、海底表層から最大 50 cm の柱状試料を採取した。

両機器によって採取された試料は、表層より 2 cm を 1 層として、他層からの混入がないように十分配慮し、一部は船上で、残りは大学で切り分けて試料ビンに保管した。

全観測点 54 点のうち、2 層以上の試料を採取できたのは 40 点で、残りの 14 点は表層のみの試料採取となり、結果として全試料数は 482 となった。ただし一部の底質試料は、表層（0-1 cm）を他の分析用に用いたために 1 cm ずつずれて解析を行うことになった。図-2 は各観測点で得られた底質試料長を示す。試料長は 2 cm~50 cm の範囲で、底質試料長が長いほど海底面が軟らかいことを示す。なお各観測点の位置を船内設置の GPS 受信機で記録し、水深は音響測深儀で測定した。

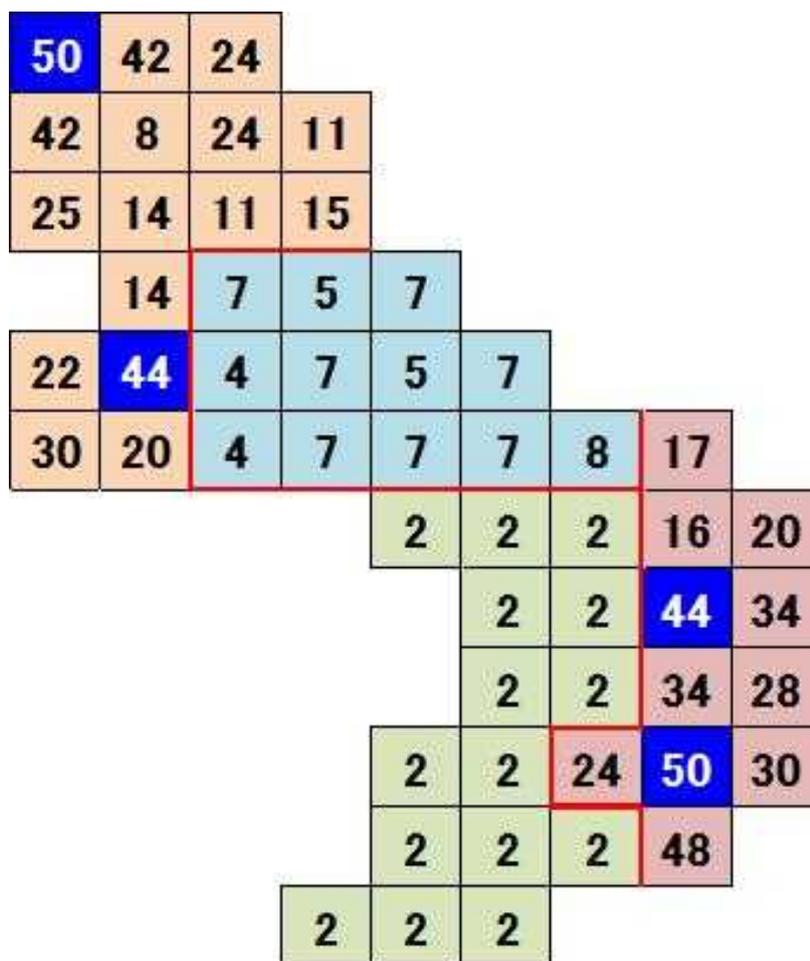


図-2 採取された底質試料長 (cm)

(2) 試料処理と解析方法

粒度分析は鹿児島大学総合研究博物館所有のレーザ回折式粒度分析装置 (SALD-3100: 島津製作所製) を用いて粒度分析を行った。得られた解析値を基に、中央粒径 (mm) および砂、シルト、粘土の各含有率を算出した。

4.4. 分析結果

採取できた試料の長さは、底質の軟らかさを知る手がかりとなる。試料の採取長を海底面の軟らかさを示す指標と考えると、隣り合う観測点で明らかに採取長が異なる海域が分類できるので図-3 に示すように、I~IVまでの4つに領域を区分することができた。

海域Ⅰ：表層 (表層から2 cm) のみ採取が可能であった島原湾西部および湾口部の観測点 (15 地点)

海域Ⅱ：16~50 cm の試料が採取できた島原湾東部の観測点 (11 地点)

海域Ⅲ：4~8 cm の試料が採取できた島原湾と有明海 (湾奥部) の接続海域にあたる観測点 (12 地点)

海域Ⅳ：11~50 cm の試料が採取できた湾奥部の観測点 (16 地点)

これらの海域ごとに、その底質の特徴を以下に述べる。海域ごとの平均試料長は、海域Ⅰで2.0 cm、海域Ⅱで31.4 cm、海域Ⅲで6.8 cm、海域Ⅳで24.8 cmであった。

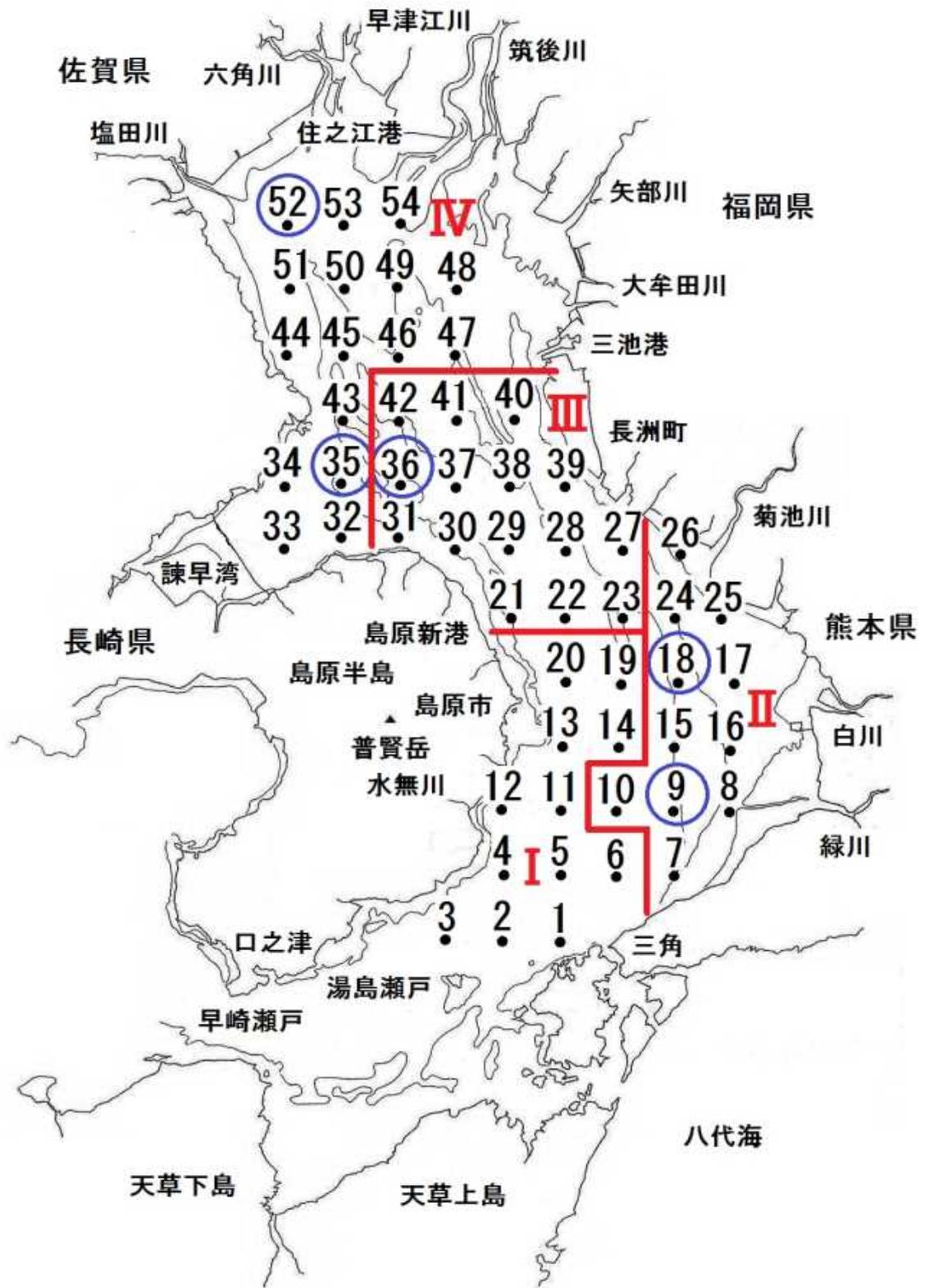


図-3 試料長による海域区分

(1) 海域Ⅰ

海域Ⅰはいずれも0-2 cm層のみ採取可能であった海域で、湾口部および湾中央西部が該当する。湾口部の4点(St. 1, 2, 3, 4)の中央粒径(mm)は0.916~1.304の範囲にあり、極粗粒砂で占められている。また湾中央西部の11点(St. 5, 6, 11, 12, 13, 14, 19, 20, 21, 22, 23)の中央粒径(mm)は0.604 mm(St. 5)~1.543(St. 20)の範囲となり、極粗粒砂から粗粒砂を示した。とくにSt. 20(中央粒径:1.543mm)で粒径が大きな値を示した。これらの観測点のうち、St. 12及びSt. 14のみ粘土が含んでいた。

(2) 海域Ⅱ

湾中央部(島原湾)東部に位置する11点(St. 7, 8, 9, 10, 15, 16, 17, 18, 24, 25, 26)が該当する。これらの粒度組成の鉛直変化傾向は、下層から上層に向かって、砂の含有率が増加する8点(St. 7, 8, 9, 15, 16, 18, 24, 25)、減少する1点(St. 17)、粒度組成が不規則に変化する1点(St. 26)に分けられる。St. 7は海底面下8 cm付近から、砂の含有率が徐々に増加し始め、表層付近では30~40%を占める結果となった。またSt. 8では海底面下14 cmから徐々に砂の含有率が増え始め、表層付近では50~60%となった。

(3) 海域Ⅲ

湾奥部と湾中央部の接続海域の12地点(St. 27~31およびSt. 36~42)のうち、St. 28では表層部でシルトおよび粘土の両方で含有率の上昇が確認できた。St. 29でもシルトの含有率が上昇した。St. 30の含砂率は下層(5-7 cm層)では75%であったのが、表層(0-2 cm層)では19%と激減している。これらの傾向はSt. 31でも顕著であり、シルトの含有率が激増した。St. 36, 37, 40, 41, 42の5点では、表層部において、下層では観測されていなかった大量の粘土を含んでいた。中でもSt. 37はほとんどシルトを含まないという特徴がみられた。

(4) 海域Ⅳ

島原半島北部に位置するSt. 32, 33, 34の中央粒径(mm)は、下層から上層まで0.01 mm前後の値を示し、粒度組成に変化がほとんど見られない。湾奥部の12点(St. 43~St. 54)のうち、筑後川河口域に近いSt. 46, 47, 48, 49, 54では、St. 49を除いて、層によって砂とシルトの割合の変動が大きい。湾奥北部のSt. 43, 50, 51, 52および53の5点では、下層に比べ表層付近でシルトおよび粘土の割合が増加する傾向にある。これに対してSt. 44, 45, 49の3点では上層で砂の割合が増加する傾向が見られる。

(5) 粒径差(mm)

図-4は表層と6-8 cm層または試料長がそれより短い場合は最下層との中央粒径(mm)の差を示したものである。表層の粒径が下層に比べて小さくなっている場合を上方細粒とし、表層の粒径が下層に比べて大きくなっている場合を上方粗粒とした。

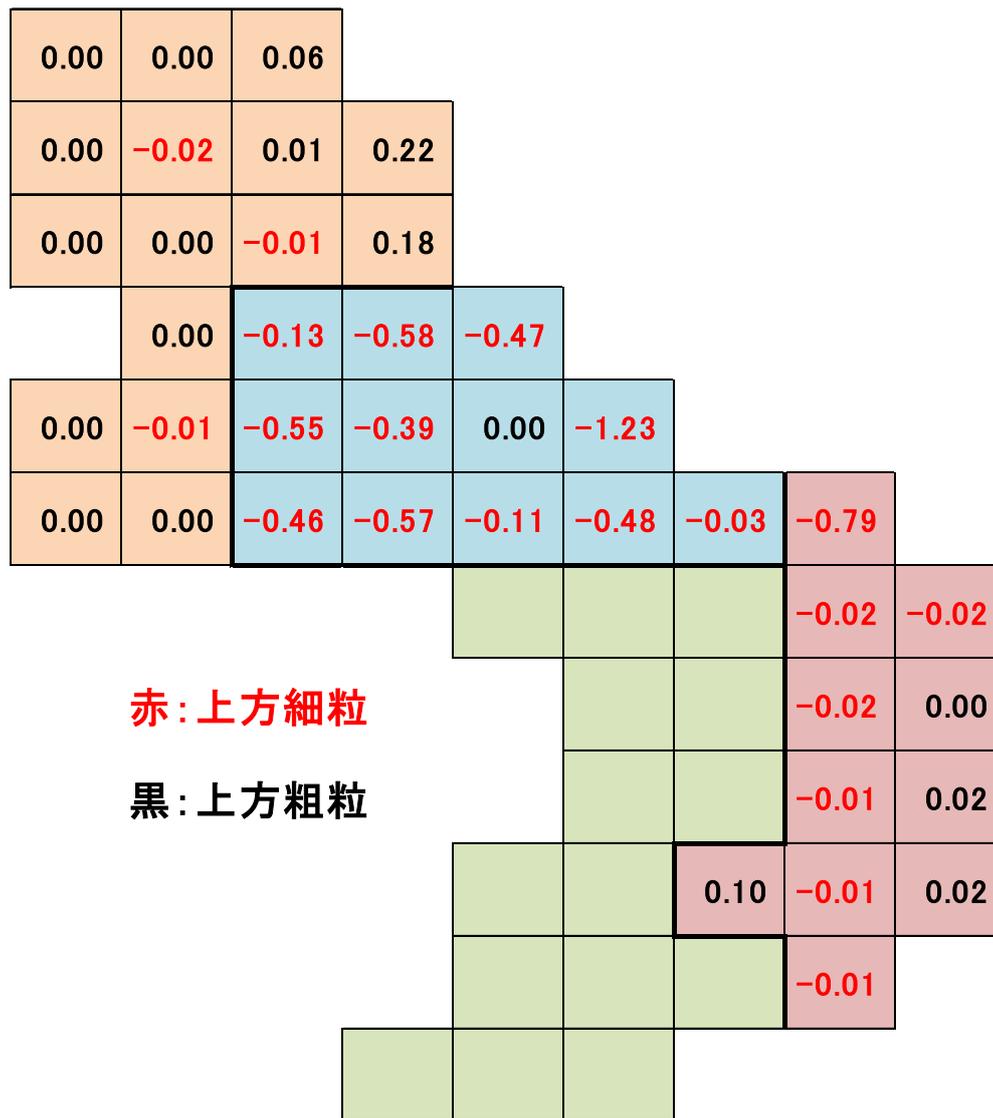


図-4 表層と下層（6-8 cmまたは最下層）の中央粒径（mm）の粒径差（単位：mm）

海域Ⅰについては表層のみの採取であったために、粒径差を求めることができなかったので空欄としてある。海域Ⅱ（島原湾東部）では、北部のSt. 26で顕著な上方細粒を示す以外はほとんど粒径差は見られなかった。海域Ⅲ（島原湾と有明海の接続海域）では、-1.23から0.00の範囲となり、ほとんどが上方細粒を示し、同じように上方細粒を示す海域Ⅱよりも大きな値を示した。海域Ⅳ（湾奥部）では、全体的に上方粗粒の傾向が見られた。

(6) 粒度分布の変化

図-5に海域Ⅲに該当する観測点（St. 30, 31, 36, 37, 41および42）の粒度組成（砂・シルト・粘土の含有率）を示す。

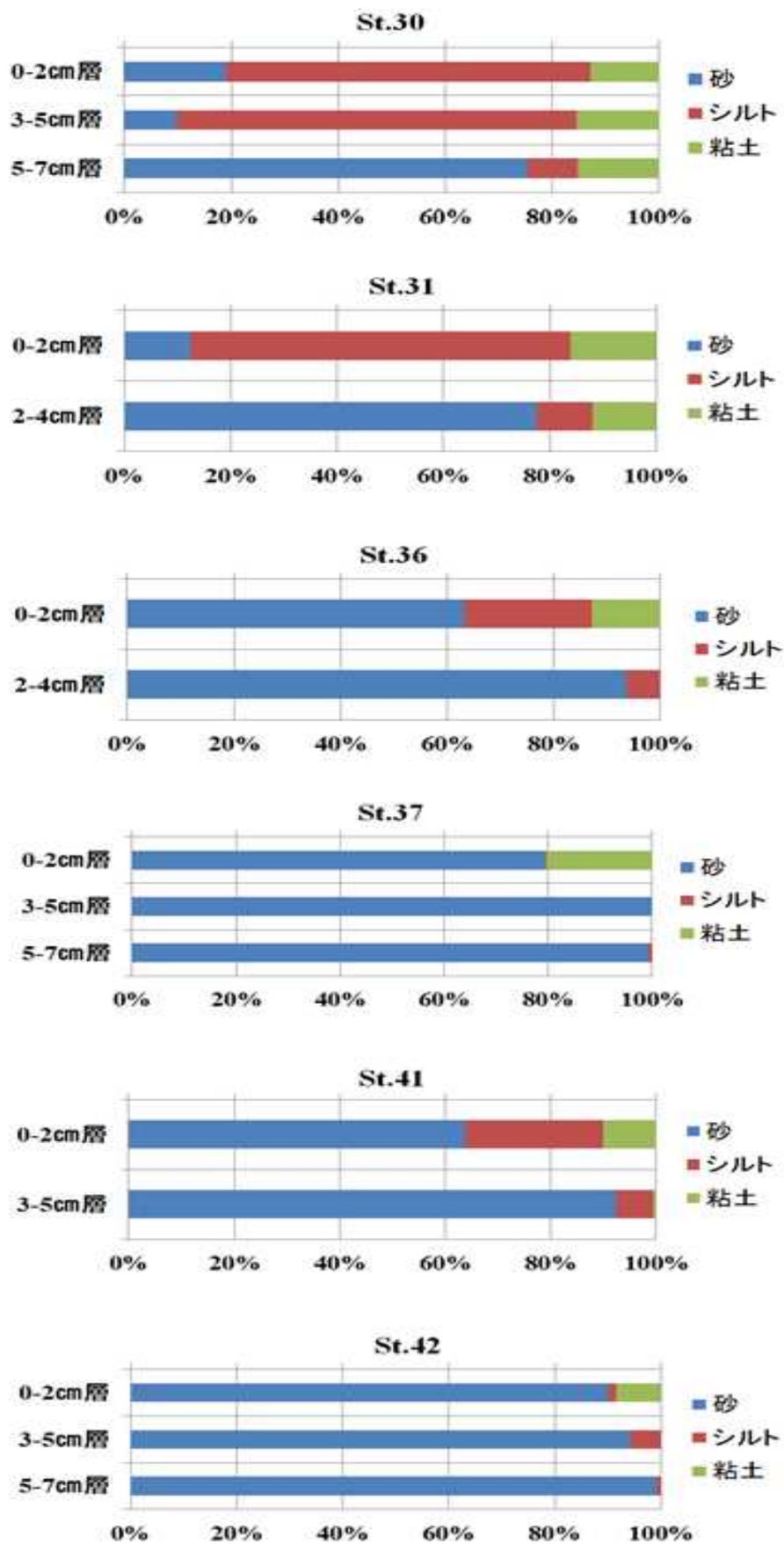


図-5 海域Ⅲの観測点 (St. 30, 31, 36, 37, 41 および 42) の粒度組成

有明海では1997年以降、潮汐振幅が減少することで、潮流振幅が減少、干潟からの泥粒子の巻き上がりの減少、透明度の上昇などを招いていることが報告されている(柳哲雄, 塚本秀史:2004) 5)。湾奥部には反時計回りの恒流が存在している(小田巻ほか, 2003) 6) ため、湾奥西部の沿岸では筑後川から流れ出た堆積物粒子は河口から西偏しながら拡散する(柳哲雄, 塚本秀史:2004) 5) という報告がある。そしてそのような傾向が、時とともに強くなっていることが、図-4 に示す粒径差において、上方粗粒を示す数値に比べて、上方細粒を示す数値が極めて大きい値を示していることから明らかである。

島原半島北岸に位置する St. 31 では、2-4cm 層においてはシルトの割合が 10 %であったのに対して、0-2cm 層では 70 %まで急激に増加している。1960 年代、これらの海域では 0.25 mm よりも大きい粒子で構成されていた(鎌田泰彦:1967) 1) ことから、中央粒径 (mm) の平均値が 0.03 mm と極端に小さくなり、この海域の泥質化が進行中であることがうかがえる。同様の傾向は海域Ⅲのほぼ全域において確認できた。

児玉ほか(2008) 7) は、河川からの底質供給量が増加した、あるいは再懸濁が弱まることによりその場に粒子が堆積しやすくなったことにより、諫早湾沖合の堆積速度が増加したとしている。シルトの増加は東側に隣接する St. 30 でも顕著である。また St. 36 と St. 37 の 0-2cm 層では、下層ではそれまで観測されなかった粘土が 10 %以上を占めるようになっている。下層では見られなかった粘土の出現は St. 36 および St. 37 の北側に位置する St. 41 や St. 42 でも観測されている。なかでも St. 37 と St. 42 ではシルトはほとんど含まず、砂と粘土で構成されていることは、この海域の堆積環境に大きな変化が生じていることを示している。

このように下層に比べて上層で砂の含有率が減少し、シルトおよび粘土の含有率が増加する傾向は、とくに諫早湾沖から長洲沖にかけての有明海湾奥部と島原湾北部の接続海域、すなわち海域Ⅳと海域Ⅰの境界部に当たる海域Ⅲで顕著となり、それは湾を東西に横切るように帯状に広がっていることが分かった。

1990 年 11 月に始まった普賢岳の火山活動は 1995 年 10 月に停止している。火山灰の海域への影響としては、降灰により供給される場合よりも、土石流や降雨後に河川を経て供給される場合のほうが量的にも影響が大きいと考えられるが、近藤ほか(1998) 8) によると島原湾南部に位置する水無川で発生した大規模な土石流では、土砂の流出範囲は河口から 4~5 km とされているため、大量の火山噴出物を運搬し供給する大型の河川が存在しない有明海と島原湾の接続海域で確認された顕著な上方細粒の粒径変化については、河川の影響によるものであるとは考えにくい。

4.5. 結論

今回の調査では、2002 年当時の、有明海および島原湾全域における海底表層堆積物の粒度組成、とくに表層付近において泥化の傾向にあることが読み取ることができた。そのことが現在においても進行中であるかどうかを、今後も検証し続けることが重要と考える。

参考文献

- 1) 鎌田泰彦：有明海の海底堆積物，長崎大学教育学部自然科学研究報告，第 18 号，pp. 71-82，1967
- 2) 近藤寛，東幹夫，西ノ首英之：有明海における海底堆積物の粒度分布と CN 組成，長崎大学教育学部紀要 - 自然科学 -，No. 68，pp. 1-14，2003
- 3) 秋元和實，滝川清，西村啓介，平城兼寿，鳥井真之，園田吉弘：有明海白川沖における過去 60 年間の環境変遷の特性，海岸工学論文集，第 53 卷，土木学会，pp. 941-945，2006
- 4) 九州沿岸水路誌，書誌第 105 号，海上保安庁刊行，2010
- 5) 柳哲雄，塚本秀史：有明海における潮汐振幅の経年変動，海の研究，13 (3)，pp. 295-300，2004
- 6) 小田卷実，大庭幸広，柴田宣昭：有明海の潮流新旧比較観測結果について，海洋情報部研究報告，第 39 号，pp. 33-61，2003
- 7) 児玉真史，皆川昌幸，田中勝久，石樋由香：有明海における堆積速度について，沿岸海洋研究，第 45 卷，第 2 号，pp. 137-143，2008
- 8) 近藤寛，東幹夫，西ノ首英之，合田政次：雲仙・普賢岳の土石流堆積物の水無川河口海域における分布，長崎大学教育学部自然科学研究報告，Vol. 58，pp. 37-51，1998

5章 鹿児島湾，湾奥部の粒度組成の鉛直変化

-長期的に人為的影響のある水域（内湾，湖）における粒度組成や硫化物含量等を用いた底質環境把握 No. 1-

5.1. 序論

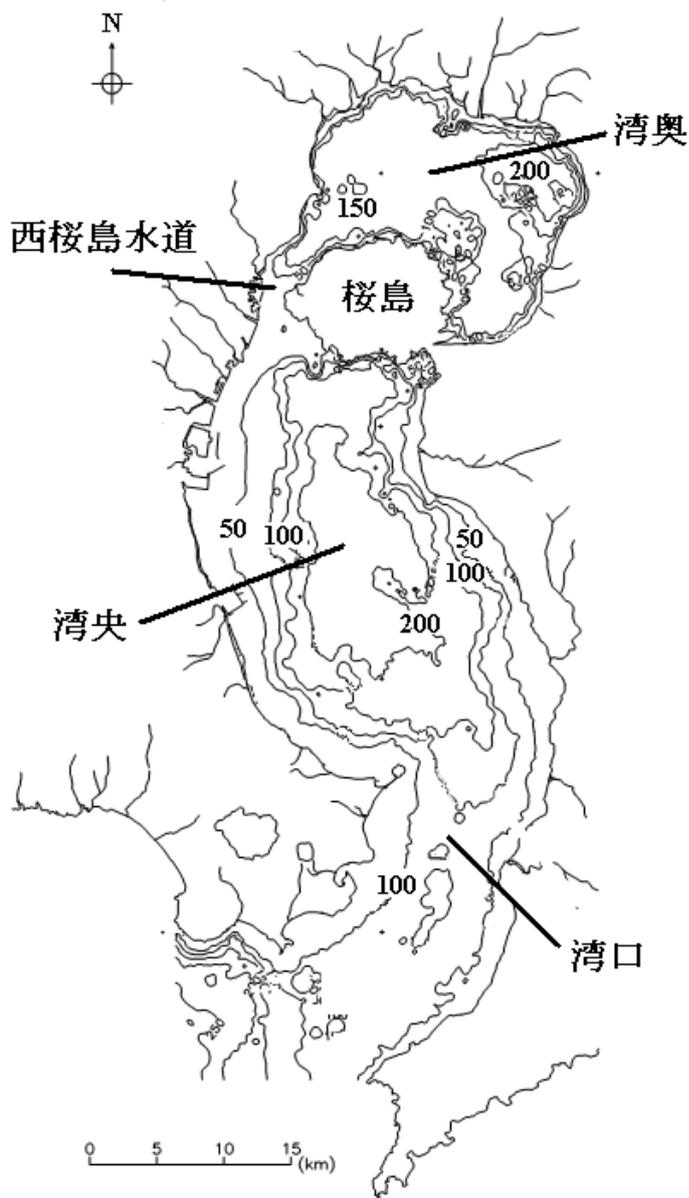


図-1 鹿児島湾の湾口，湾中央および湾奥の地形

鹿児島湾奥部は、1913年以前は桜島の東西にある瀬戸海峡と西桜島水道の2か所で湾中央部と通じていたが、大正の大噴火（1914年）により桜島と大隅半島が陸続きとなって以来、図-1に示すように鹿児島市と桜島を挟む水路幅約3kmの西桜島水道を通してのみ、外洋水との海水交換が可能な非常に閉鎖的な海域となった。

図-2 鹿児島湾中央測線の形状

また図-2のように鹿児島湾は南北約70km、東西約20kmの細長い湾である。加えて最深部で200mを超える阿多、始良の両カルデラが平均水深約30mの西桜島水道で連結されるような形状であり、しかも太平洋に面した湾口部が平均水深約100mの鞍部状であることから、水道より北側にある湾奥部の海水交換は、南に開いた一般の湾よりも劣ると考えられる。さらに厳冬期に起こるとされる海水の鉛直混合についても、底層付近までは混合がそれほど進まないという観測結果も近年報告されている（山中ら、2003）1）。加えて、湾奥部では湾岸地帯における住宅地や産業用地の開発、天降川などの河川流入、カンパチ等を含む多数の養殖施設の存在等に伴う水質および底質環境の悪化が懸念されている（前田、2001）2）。これらの理由から、鹿児島湾岸の持続的発展の維持のためには、何らかの指標を用いて湾内環境を把握することが必要となる。

海水流動特性を把握する場合に一般に用いられるのは、流速計による流れの実測である。しかしながら調査海域内の西桜島水道周辺海域は、鹿児島港沖合の防波堤建設、埋め立て工事による水道幅の減少や、沿岸部の海水面に並べられた多数の養殖生簀により、船舶が通航することが可能な水域が減少しているだけでなく、好漁場であるために漁船がふくそうする海域でもある。したがって、流速計の長期設置が困難な状況にある。そのため観測海域付近の流速の実測値に関し、公表されたデータを

得ることは困難である。一方、湾内の流れ環境指標としての流速を直接測定する代わりに、堆積物が堆積したときの海底直上付近の流れの強さを間接的に示すとされる中央粒径や粒度組成を用いて平均的な流れの状況を推定する手法が考えられる。これは流れが微弱なために流速計による計測が困難な海域を対象にする場合や、広領域での流れの強弱の推定には有効である。本研究では、大隅半島に沿って流入する黒潮暖水舌の一部が達している可能性が高い（大木ら，2005）3)とされる西桜島水道から湾奥北部に向かう海域で、表層より 3cm までの海底表層堆積物の底質サンプリングを 24 地点で行い、1cm ごとに中央粒径および粒度組成の空間分布を求める。また、試料の下層堆積物は上層のものより過去に堆積したものであるという仮説に基づき、算出した粒度組成の鉛直変化から、観測海域を支配する流れの強さの数十年スケールの変化も巨視的に読み取ることとする。鹿児島湾の堆積速度については、0.5～4.2 mm/年（大木，2000）4)という報告があるが、閉鎖性が強いとされる調査海域では堆積速度も比較的早いことが推定されるため、本研究では約 10～20 年の時間経過における底質環境の変化を読み取ることになる。

5.2. 試料採取地点と解析方法

外洋水の影響下にあると考えられる西桜島水道から湾奥北部の海域を観測海域と定めた。観測地点は水道北部より隼人沖に位置する隼人三島に向かう測線上の 12 点、その両側に各 6 点の計 24 点とした。観測点の位置および水深を図-3 および表-1 に示す。観測海域の水深は、水道に最も近い St.1 では 42.7m であるが、St.2 から St.6 にかけて約 140m に達したあとは、ほぼその水深のまま湾奥北部へと続いている。各観測点において、採泥器（日本海洋：G.S 型表層採泥器）を用いて海底表層堆積物を柱状に抜き取った。

図-3 観測海域および観測点位置

表-1 観測海域の水深と位置

観測点	水深(m)	緯度(N)	経度(E)
1	42.7	31-36.1	130-35.3
2	96.7	31-36.5	130-35.8
3	122.3	31-36.9	130-36.2
4	125.5	31-37.2	130-36.5
5	128.0	31-37.5	130-36.6
6	137.8	31-38.2	130-37.5
7	141.1	31-38.8	130.38.3
8	146.4	31-39.5	130-39.0
9	146.3	31-40.2	130-39.7
10	144.3	31-40.8	130-40.5
11	140.3	31-41.5	130-41.2
12	142.5	31-42.1	130-41.9
13	103.4	31-37.7	130-38.0
14	133.0	31-38.6	130.39.0
15	140.1	31-39.0	130-39.6
16	142.6	31-39.7	130-40.3
17	142.1	31-40.3	130-41.0
18	139.6	31-41.0	130-41.8
19	142.1	31-38.5	130-37.1
20	145.7	31-39.5	130-37.9
21	147.9	31-39.9	130-38.5
22	139.1	31-40.6	130-39.1
23	144.1	31-41.3	130-39.9
24	140.6	31-42.0	130-40.7

表-2 中央粒径，粒径差および粒度組成

観測点 単位	層	砂 (%)	シルト (%)	粘土 (%)	中央粒径(d_{50}) (mm)	粒径差 (mm)
1	1	90.0	10.0	0.0	0.432	-0.096
	3	90.6	9.4	4.1	0.529	
2	1	85.4	14.6	0.0	0.453	0.015
	3	87.4	12.6	0.0	0.438	
3	1	60.6	30.8	8.7	0.118	0.054
	3	46.0	39.5	14.6	0.064	
4	1	44.7	44.5	10.8	0.063	-0.051
	3	59.6	31.3	9.1	0.114	
5	1	47.8	37.2	14.9	0.072	-0.022
	3	55.3	33.3	11.3	0.094	
6	1	27.4	59.6	13.0	0.033	-0.004
	3	31.0	54.5	14.5	0.037	
7	1	24.9	60.5	14.6	0.028	0.006
	3	14.8	65.2	20.0	0.022	
8	1	14.4	68.1	17.5	0.019	0.001
	3	6.7	77.4	15.9	0.018	
9	1	4.3	80.5	15.2	0.017	-0.001
	3	19.1	64.7	16.2	0.018	
10	1	4.7	64.7	16.2	0.014	-0.002
	3	8.2	75.4	16.5	0.016	
11	1	4.0	75.7	20.3	0.014	-0.001
	3	3.9	76.6	19.5	0.015	
12	1	0.5	79.6	19.5	0.013	-0.007
	3	16.2	67.2	16.5	0.019	
13	1	30.4	56.8	12.9	0.040	0.007
	3	20.2	63.5	16.3	0.033	
14	1	15.6	68.8	15.6	0.027	0.005
	3	4.1	81.7	14.2	0.022	
15	1	24.9	62.7	12.4	0.022	-0.004
	3	30.5	53.0	16.5	0.026	
16	1	5.3	77.8	16.9	0.020	0.001
	3	1.9	82.8	15.3	0.019	
17	1	7.2	76.1	16.6	0.017	-0.002
	3	17.2	64.5	18.3	0.019	
18	1	14.7	69.5	15.8	0.019	0.001
	3	14.6	69.4	16.0	0.019	
19	1	10.2	72.4	17.5	0.031	-0.005
	3	19.8	66.9	13.3	0.036	
20	1	6.4	76.6	17.0	0.016	-0.003
	3	9.7	78.3	11.9	0.020	
21	1	11.3	73.7	15.1	0.016	0.001
	3	8.8	77.4	13.8	0.015	
22	1	4.0	78.0	18.0	0.017	-0.001
	3	11.1	71.9	17.0	0.018	
23	1	5.1	77.2	17.7	0.015	-0.003
	3	14.1	71.9	14.0	0.019	
24	1	4.5	80.5	15.0	0.016	-0.002
	3	12.8	69.1	18.1	0.018	

※粒径差は，第1層と第3層の中央粒径の差を示す。

この採泥器では同時に3本の試料を採取することができるので、その中から底層水の混濁がないものを選んで、船上にて表層から1cmの部分（以下、第1層）と表層から2~3cmの部分（以下、第3層）に切り分けた。切り分ける際には、上下層とのコンタミネーションを防ぐために、採泥管の径より小さい径をもつ塩ビ管を1cm幅に輪切りにしたものをを用いて、試料の中心部を型抜きする要領で採取した。

研究室に持ち帰った試料は、まず2mmメッシュのふるいを用いて礫を除去した。砂質および泥質部の粒度分析は、レーザー回折式粒度分析装置（島津製作所製：SALD-3100 測定範囲：0.05~3000 μ m）を用いて行った。得られた分析結果より、粒径加積曲線を描き、中央粒径d50の空間分布を各層ごとに求めた。また第1層と第3層の中央粒径の差（以下、粒径差）も求めた。加えて粒子の大きさごとに、粘土（0.004mm未満）、シルト（0.004mm以上0.063mm未満）、砂（0.063mm以上2mm未満）として各含有率を求めた。中央粒径、粒径差および粒度組成（砂、シルト、粘土の各含有率）を表-2に示す。なお、下層より表層の中央粒径の値が大きい（正の値：上方粗粒）場合、堆積環境を支配する流れが数十年スケールで平均的に強くなったと推定し、下層より表層の中央粒径の値が小さい（負の値：上方細粒）場合、流れの強さが減少したと推定して解析を行った。

3. データ解析

(1) 第1層の堆積物

図-4 第1層の中央粒径の等値線 単位(1/100mm)

最初に、現在の海底環境を把握するために、第1層の粒度分析結果について述べる。全観測点の中央粒径は、0.013 mm (St.12) ~0.453 mm (St.2) の範囲となり、これは Wentworth の粒度区分では、中粒シルトから中粒砂に該当する。西桜島水道付近の浅水域で大きな値を示し、湾奥に向かうにつれて急激に小さくなる傾向を示す。図-4 で示されるように、水道部で密に描かれる等値線は湾奥に向かうにつれて、間隔が徐々に広がり、数値的にも変化が少なくなる。等値線は観測海域の南部で東向きに張り出すように描かれる。それは特に 0.020 mm および 0.050 mm の等値線で顕著である。また観測海域の北部および北西部の 12 点 (St.8~12, St.17 および St.18, St.20~St.24) では、中央粒径が 0.020 mm 未満という非常に細かい粒子で構成されている。

(2) 第3層の堆積物

図-5 第3層の中央粒径の等値線 単位 (1/100 mm)

第3層の全観測点の中央粒径は、0.015 mm (St.11, 21) ~0.529 mm (St.1) の範囲となり、図-5 に示すように、全体的に見れば第1層と比べてほとんど大きな変化は見られず、その空間的分布についても同様の傾向が見られる。ただし第1層で見られる 0.020 mm の等値線の北側への張り出しは第1層ほど顕著ではないこと、水道付近の中央粒径が極端に減少しているところに違いが見られる。

(3) 鉛直変化（第3層と第1層の比較）

図-6 粒径差に基づく海域区分

観測点ごとの粒径差の値より, 図-6 に示すように観測海域は大きく3つのグループに分類される. 一つ目(海域 A)は粒径差が顕著な負の値(上方細粒)を示す観測点で, これには St.1 および 4~6, 19, 20 の西桜島水道西部海域の6点が当てはまる. 二つ目(海域 B)は粒径差が顕著な正の値(上方粗粒)を示す観測点で, これには主に西桜島水道東部海域に位置する St.2, 3, 7, 8, 13, 14, 16, 18, 21 の9点が当てはまる. 三つ目(海域 C)は St.15 および St.18 を除く湾奥西部の7点 (St.17, St.9~12 および St. 22~24) が当てはまり, 全体的に粒径差が負の値(上方細粒)を示す海域であるが, St.12 および St.24 で比較的大きな値を示す以外は, 粒径差は小さい.

5.4. 考察

鹿児島湾は湾口部から流入する外洋水が湾口から湾中央部にかけて反時計回りに流入し, 潮汐と相まって湾奥部へ, その一部が流入していることも考えられる. しかしながら湾奥部の海底堆積物の堆積環境および粒度組成の分布に影響を与える主たる要因は潮汐残差流であると考え, 以下のような考察を行った.

第1層の中央粒径が示す値を現在の観測海域の底質環境を表わす基準として採用すると, 粒径差が正の値を示す観測点では, 第3層(過去)から比べて, その堆積物に影響を及ぼしたであろう海底付

近の流れの強さが増大したと一般的に考えられる。これに該当する海域は、西桜島水道付近の2点を除くと、中央測線よりそのほとんどが南東側に位置している。一方、隣接する薩摩半島側の観測点では、逆に顕著な負の値を示す海域も見られ、水道の東西で非常に対照的な結果となっている。また、桜島沿岸部に近い St.13 および St.14 で顕著な増大が読み取れることから、桜島水道北側付近の海底表層付近の流軸が、水道と隼人三島を結ぶ線よりも南東側の桜島北西岸に近い海域へと移動したと推定される。気象庁の1996年から2005年までの桜島の噴火活動に関する資料⁵⁾によると、桜島の噴火活動は、近年で最も活発であった1999年の237回をピークに減少し続け、2005年は12回となっている。しかもこれらの爆発は、南寄りの季節風が卓越する春から夏にかけての爆発は、2001年以降は、ほとんど観測されていないため、降灰による粒度組成への影響は、ほとんどないのではないかと考えられる。したがって、このように当該海域の流況を大きく変えた要因としては、大正大噴火に伴う海岸線の前進や、港湾建設に伴い、桜島水道幅が約4kmから約3kmと狭小化したことなどが考えられる。

第1層と第3層の中央粒径に、変化がほとんど見られない湾奥部において、粒径差が比較的大きい負の値を示した St.12 および St.24 は、観測海域では最も湾奥に位置し、別府川、網掛川など、複数の河川の河口に位置することから、梅雨期にこれらの河川から供給された細粒堆積物による影響ではないかと考えられる。

St.9では、粒度組成の変化が著しいにも関わらず粒径差が小さい値を示すのは、第1層が第3層に比べシルト部（特に粗粒シルト）の分級が良くなったためである。St.9とは対照的に St.1 では、粒度組成には大きな変化が見られないのに、非常に大きい粒径差を示した。これは粒度組成には変化が見られないが、全体的に粒子径が小さくなっていることによるもので、このことは流れの強さの減少を示唆するものである。

上述のことから、調査海域では全体的に粒径差が減少していることがうかがえるが、それらは特に薩摩半島に近い海域で顕著である。これに対して、桜島側で上昇傾向が St.2 から St.13 および St.14 にかけて見られるため、この付近では桜島北西岸に沿う流れが卓越していることがうかがえる。St.3 および St.4 において粒径差が非常に大きい負の値を示したのは、この桜島北西岸沖合に存在する強い流れに隣接して、このような緩流域が形成されたためであろう。

5.5. 結論

海底表層付近の堆積物の粒度組成に影響を与える底層付近の流れについて、流速計による実測が困難な海域であっても、底質の各パラメータを算出することにより流れの状況のある程度把握することが可能であると、本論文では考え、西桜島水道および湾奥で底質採取を行い、その解析を行った。その結果、以下の主要な結論が得られた。

- i) 西桜島水道から湾奥にかけての領域では、底質粒径が水道部では 0.072~0.453 mmの範囲を示して粗く、湾奥海域では 0.012~0.019 mmの範囲となり細かくなっている。また、この傾向は鉛直方向の各層でも同様である。

ii) 粒径差（粗粒化および細粒化）の顕著な傾向がみられたのは、西桜島水道に近い5測点であった。当該海域の流況を大きく変えた要因は、自然要因としては大正大噴火に伴う海岸線の前進、そして人為的要因としては、港湾建設に伴い、桜島水道幅が約4kmから約3kmと狭小化したことが原因と考えられる。

iii) 中央粒径および粒径差に基づき区分すると、当該海域は、A:粒径差が比較的顕著な負の値を呈する海域、B:粒径差が比較的顕著な正の値を示す海域、C:粒径差が小さい値であるが全体として負の値を示す海域の3つに分けられる。

iv) 粒径差に基づいて推定した流れの強さの変化は、西桜島水道付近で最も顕著であるが、水道の西側に位置する海域Aでは負の値（-0.003～-0.051 mm:流速減少）、東側に位置する海域Bでは正の値（0.001～0.054 mm:流速増大）を示し、対照的である。

v) 湾奥北西部の海域C（St.9～12 および St.22～24）は、上方細粒化を示す観測点で占められている。

参考文献

- 1) 山中有一, 井上喜洋, 東政能, 幅野明正: 鹿児島湾の海洋観測-2003-, Bull. Mar. Resour. Environ., Kagoshima Univ., pp.47-69, 2003.
- 2) 前田広人: 鹿児島湾の底質 Bull. Mar. Resour. Environ., Kagoshima Univ., pp. 2-7, 2001.
- 3) 大木公彦, 折見綾: 判閉鎖的鹿児島湾奥部, 過去32年間の底生有孔虫群集の変化, 月刊海洋, pp.813～820, 2005
- 4) 大木公彦: 鹿児島湾の謎を追って春苑堂出版, 2000.
- 5) 桜島（気象庁）http://www.seisvol.kishou.go.jp/fukuoka/506_Sakurajima/506_index.html

6 章 鹿児島湾内海底表層堆積物の特性

-長期的に人為的影響のある水域（内湾）における粒度組成や硫化物含量等を用いた底質環境把握 No. 2-

6.1. 緒言

(1) 観測海域

鹿児島湾は図-1 および図-2 に示すように、九州南部に位置する南北に 70km、幅 25km の細長い湾である。湾は湾口、湾中央および湾奥部の 3 海域に分けられ、それぞれが狭い水道で接続している。湾中央部および湾奥部で最も深い海域は 200m を超え、すり鉢状となっているため、鹿児島湾は閉鎖性の強い海域となっている。とくに湾奥部は水深約 40m の西桜島水道でのみ湾中央部と接続されているためその傾向が顕著である 1)。

湾内では養殖業や河川を通じて供給される生活排水等に含まれるリンや窒素の影響による富栄養化が懸念され、近年は DO が悪化傾向であることも報告されている。さらに湾奥部では、冬期以外は水塊が成層することにより有機物の嫌氣的分解が促進されるため貧酸素状態が長期にわたり持続するなど、底生生物の生息環境としては良好とはいえない環境である。例えば、海底が臭う黒い泥で覆われている海域があるとの湾奥漁業者の指摘もある。鹿児島湾内の水質は定期的にモニタリングされているが、海底地形に応じて局所的に悪化しやすい底質の湾全域での詳細な調査報告が少ない。

そこで本研究では、鹿児島湾全域において採取した海底表層堆積物試料を用いて、底質汚濁の化学的指標の一つである硫化物含量と有機物含量および粒度組成等を調べ、鹿児島湾全域の底質環境を明らかにする。

図-2 鹿児島湾の海底地形

(2) 海況

鹿児島湾の海水循環は、湾央部では外洋水が湾口部から入り、大隅半島沿いに北上し、桜島の南側を通り、薩摩半島沿いを南下していく反時計回りの循環を形成している。西桜島水道以北の湾奥部では、冬期、とくに極寒期を除いて気温による加熱と淡水加入量が増加するため前述のように成層が形成される。低密度となった表層水が西桜島水道の表層を通り湾奥部から湾央部へ流出するため、西桜

島水道の下層では、湾中央部から密度の高い外洋水が流入する状態となる。この時、西桜島水道の水深より深い水深の海水は、気温と密度の関係により湾奥部で停滞することになる。

湾奥部の深部における溶存酸素量は極寒期を過ぎると徐々に減少し始め、夏期から秋期にかけてその減少が著しく、次年の極寒期に鉛直混合による対流が盛んに起きるまでは貧酸素状態が継続されることが報告されている 2),3).

鹿児島湾の湾中央部から湾奥部では、静穏な海面を利用して、年間生産 400 億円、水揚げ量は 5 万 9 千トンと日本一のブリの養殖が行われている。

6.2. 方法

2004 年 8 月に鹿児島大学水産学部附属練習船南星丸で図-3 に示すように、鹿児島湾全域 57 点の海底表層堆積物を、柱状採泥器（離合社製：GK 式）を用いて採取した。

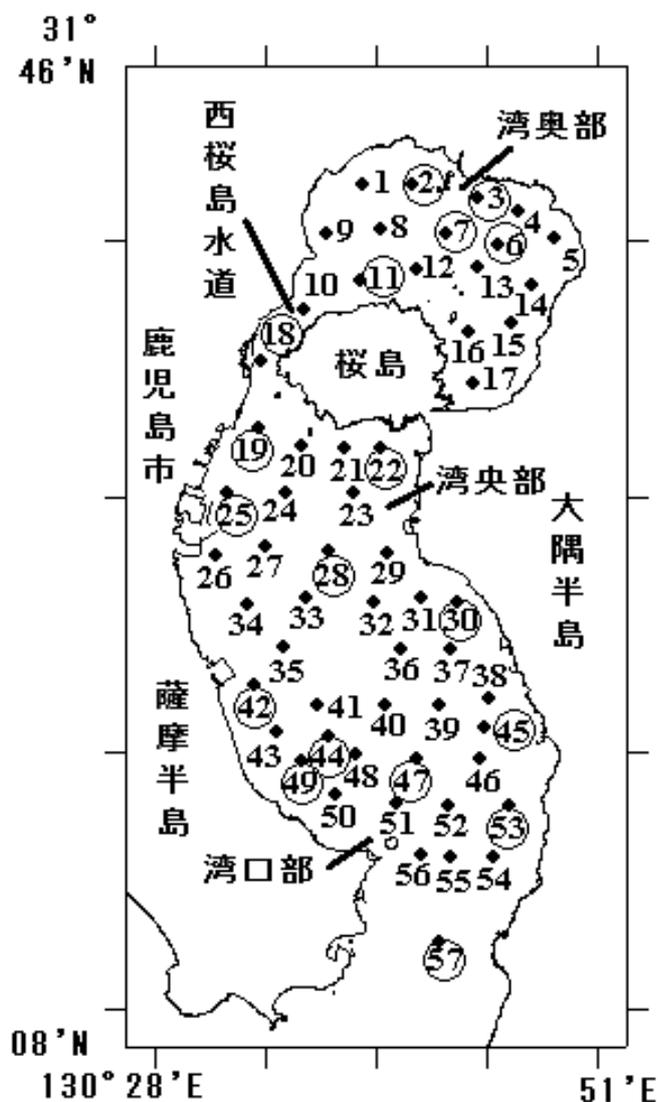


図-3 観測地点

各試料は船上にて表層からそれぞれ 1cm (以下, 0001 層), 2-3cm (以下, 0203 層) の 2 層に切り分け, 0001 層および 0203 層について硫化物含量, 粒度組成および有機物含量を求めた. 加えて, より下層まで試料を採取していた 18 地点については, 5-6cm (以下, 0506 層) および 9-10cm (以下, 0910 層) の分析結果を加えた. ただし St.19 の 0506 層, St.30 の 0506 層および 0910 層については資料が欠落した.

各試料について, 粒度分析は鹿児島大学総合研究博物館所有のレーザ回折式粒度分析装置 (島津製作所製: SALD-3100) の分析結果より, 中央粒径(mm)を算出した. 硫化物含量は水蒸気蒸留法により, 乾泥 1g 当たりに含まれる硫化物量(mg)を算出した. また有機物含量については強熱減量により燃焼前後の質量差より, 有機物量の実験試料全体に占める割合(%)を求めた. そして中央粒径(mm), 硫化物含量(mg/g)および有機物含量(%)について, それぞれ鉛直分布特性および空間分布特性について考察を行った.

6.3. 結果

(1) 中央粒径(mm)および含泥率(%)

中央粒径(mm)は, 0001 層で 0.1mm (細粒砂) - 0.015mm (細粒シルト), 0203 層で 1.341mm (極粗粒砂) - 0.013mm (細粒シルト) であった. また 0506 層 (17 地点) では 0.449mm (中粒砂) - 0.015mm (細粒シルト), 0910 層 (16 地点) では 0.433mm (中粒砂) - 0.013mm (細粒シルト) を示した. 0001 層および 0203 層では, 泥質を示したのは 57 地点中それぞれ 50 地点, 48 地点, そして 0506 層および 0910 層では 16 地点中いずれも 4 地点であった. 0506 層や 0910 層に比べて 0001 層や 0203 層は粒の細かい堆積物で構成されていた. また図-4 に示すように, 含泥率(%)と硫化物含量との間には, 含泥率(%)が 80 を超えると硫化物含量が水産用水基準である 0.2mg/g を超える試料が急増する傾向が見られた. その傾向はとくに 0203 層で顕著であった.

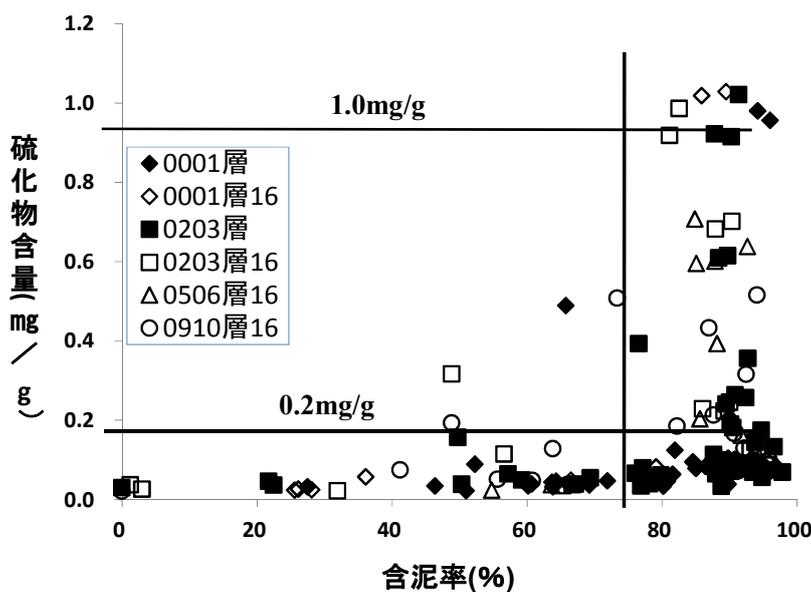


図-4 含泥率(%)と硫化物含量(mg/g)の関係

(2) 硫化物含量(mg/g)

硫化物含量は水産用水基準において「乾泥 1g 中 0.2mg 以下であること」とされている。すなわちこれは底生生物に対して阻害的な影響が出始める濃度ということになる。さらに 1mg を超えると汚染が深刻に進んだ状態と判断される。

図-5 は、全試料の分析結果に基づき描いたものである。左側が 0001 層、右側が 0203 層である。0001 層で 0.2mg/g を超える値を示したのは湾奥東北部の 2 点(St.4,6), 西桜島水道北部の 2 点(St.10,11) および湾央西部に位置する 2 点(St.33,35)となった。これらのうち 1mg/g を超える値を示したのは、いずれも湾奥部に位置する 2 点(St.6,11)である。また 0203 層で 0.2mg/g を超える値を示したのは 18 点で、それらのうち 1mg/g を超える値を示したのは 1 点(St.5)のみである。0203 層では 0001 層に比べて湾奥部で硫化物含量が高い値を示す海域が広がる傾向がみられる。

湾央西部の 2 点は 0001 層のみ高い値を示している。0506 層および 0910 層で 0.2mg/g を超えるのはそれぞれ 6 地点、5 地点であるが、1.0mg/g を超える値は観測されなかった。

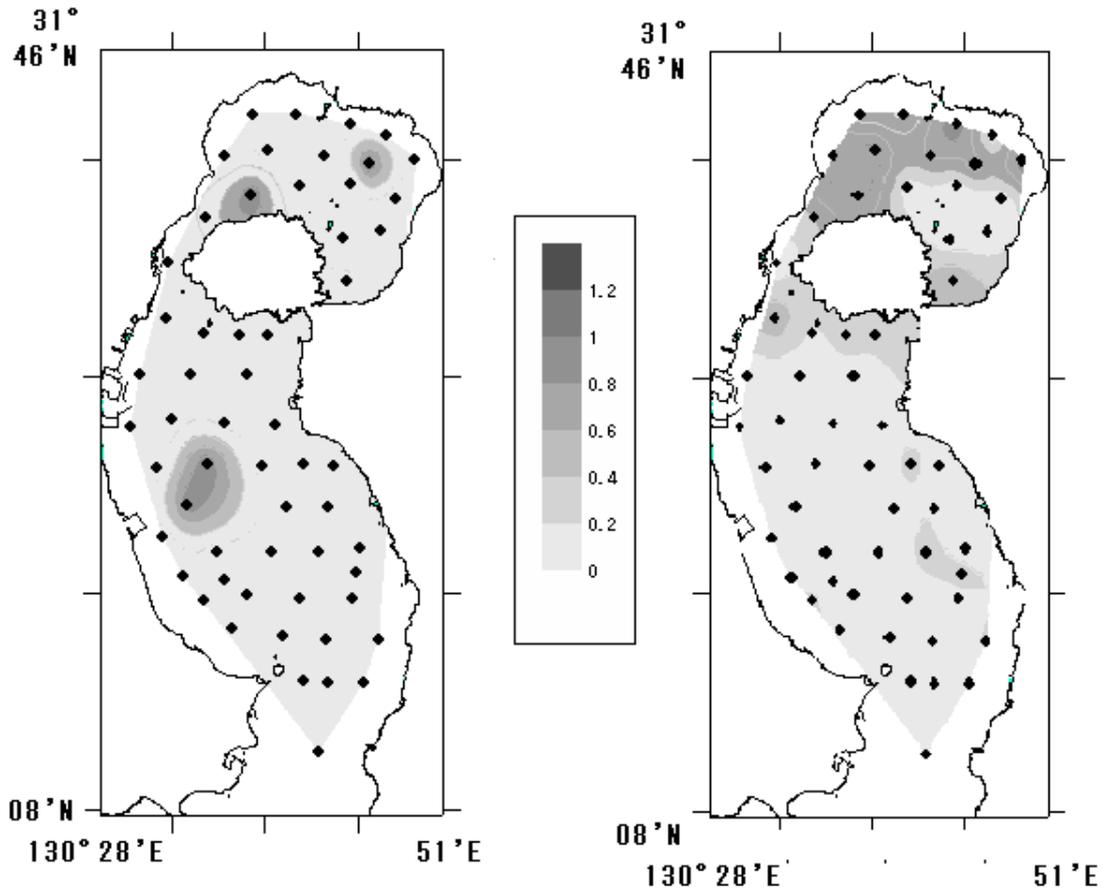


図-5 0001 層 (左) と 0203 層 (右) の硫化物含量(mg/g)

図-6 は、全試料について、水深と硫化物含量(mg/g)の関係を示したものである。0001 層 16,0203

層 16, 0506 層 16 および 0910 層 16 は鉛直方向に 4 層まで分析を行った 18 地点のうち 16 地点をプロットしたものを示している. 硫化物含量(mg/g)が水産用水基準である 0.2mg/g を超える値を示すのは, 0001 層で 7 地点, 0203 層で 18 地点, 0506 層で 6 地点, 0910 層で 5 地点であった. そのほとんどが水深 100m を超える観測点であることが読み取れた. また水深が 100m 未満で 0.2mg/g を超える値を示すのは, 湾奥部の St.1(0203 層), 西桜島水道南側の St.19(0203 層, 0910 層)および湾奥東部の St.45(0203 層)であった, これら 4 地点はいずれも比較的陸岸近くに位置している.

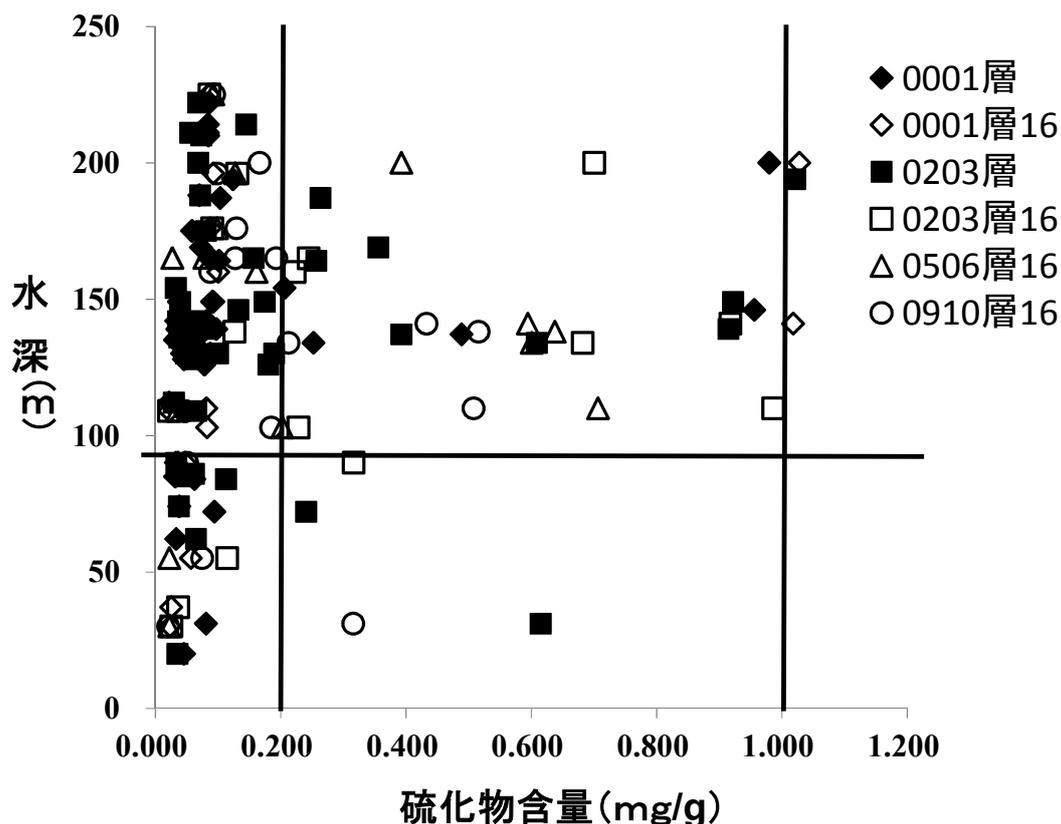


図-6 水深(m)と硫化物含量(mg/g)の関係

鉛直方向の 4 層について分析を行った 18 地点について, その値を表-1 に示す. 各地点において四角で囲んだ極大値を示す層のうち,水産用水基準の 0.2mg/g を超える値を示したのは,0001 層で 2 地点, 0506 層で 1 地点であり, 残りの 7 地点は表層より少し下層の 0203 層に集中していることがわかった. ただし底質汚濁が深刻とされる 1.0mg/g を超える値を示したのは, いずれも湾奥部に位置する St.6 と St.11 の表層部 (0001 層) であった. 全観測点の有機物含量(%)は, 0001 層では 1.31 - 15.86, 0203 層では 1.37 - 21.69, 0506 層では 1.04 - 12.67, 0910 層では 1.15 - 10.86 を示した.

表-1 4層分析を行った18地点における硫化物含量(mg/g)の鉛直変化

	0001層	0203層	0506層	0910層
St.2	0.077	0.127	0.638	0.516
St.3	0.082	0.986	0.707	0.508
St.6	1.028	0.701	0.393	0.167
St.7	0.056	0.682	0.601	0.213
St.11	1.018	0.918	0.595	0.433
St.18	0.024	0.026	0.023	0.021
St.19	0.081	0.615	-	0.316
St.22	0.087	0.245	0.079	0.193
St.25	0.089	0.157	0.028	0.128
St.28	0.086	0.087	0.093	0.094
St.30	0.034	0.065	-	-
St.42	0.057	0.115	0.023	0.075
St.44	0.093	0.131	0.128	0.099
St.45	0.048	0.317	0.037	0.051
St.47	0.088	0.091	0.099	0.130
St.49	0.101	0.223	0.162	0.088
St.53	0.083	0.229	0.203	0.185
St.57	0.023	0.022	0.035	0.048

(3) 有機物含量(%)

図-7は、全層の分析結果から、水深(m)と有機物含量(%)の関係を示したものである。ばらつきはあるものの、いずれの層においても、有機物含量(%)は観測地点の水深が深くなるにつれて増加する傾向を読み取ることができた。

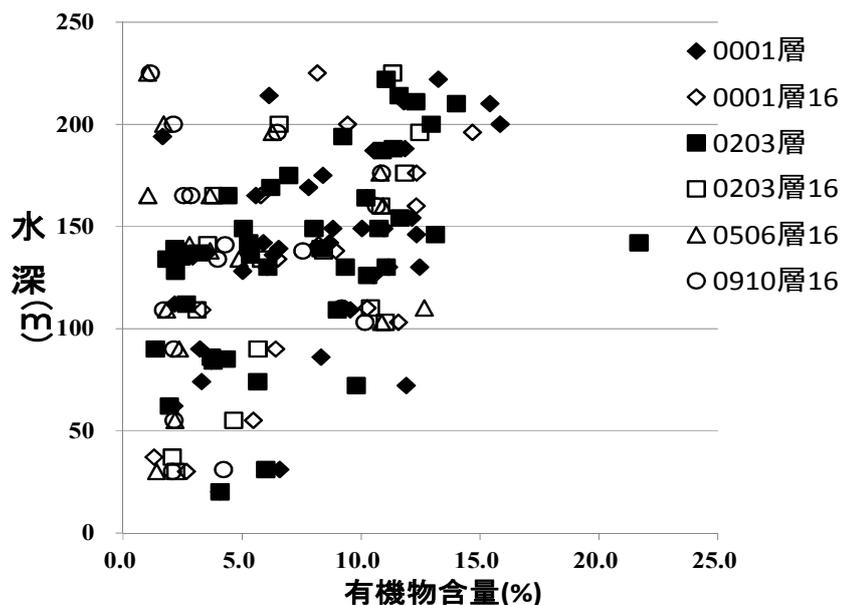


図-7 水深(m)と有機物含量(%)の関係

表-2 に鉛直方向に 4 層分析を行った 18 地点について、その分析結果を示す。各観測点において四角で囲んだ極大値を示す層は 2 地点を除いて、表層部（0001 層）に集中していた。また下層になるほど、有機物含量(%)は減少する傾向がみられた。海域別では、湾奥部よりも湾口部に近い海域で大きな値を示す傾向が見られた。

表-2 4 層分析を行った 18 地点における有機物含量(%)の鉛直変化

	0001層	0203層	0506層	0910層
St.2	8.951	8.442	3.660	7.556
St.3	10.262	10.404	12.667	9.192
St.6	9.446	6.571	1.716	2.120
St.7	6.519	5.820	4.884	3.979
St.11	8.222	3.558	2.807	4.298
St.18	2.674	2.224	1.420	2.080
St.19	6.592	6.010	-	4.223
St.22	5.799	3.818	1.047	2.556
St.25	5.585	4.406	3.672	2.859
St.28	8.177	11.343	1.039	1.153
St.30	2.154	1.950	-	-
St.42	5.483	4.659	2.184	2.153
St.44	14.695	12.476	6.276	6.495
St.45	6.429	5.676	2.370	2.143
St.47	12.338	11.848	10.820	10.862
St.49	12.335	10.841	10.926	10.654
St.53	11.586	11.026	10.885	10.176
St.57	3.327	3.113	1.836	1.705

6.4. 考察

海底表層堆積物の粒径は、それが堆積したときの流れの強さ、すなわち堆積環境を反映している。今回採取した試料のほとんどは泥質堆積物であり、含泥率も全体的に高い値を示したことから、比較的弱い流れの中で堆積が行われたことが読み取れる。

もし供給された有機物全量を分解するのに十分な酸素が存在しない、または供給されない貧酸素状態となると、有機物は酸素を必要とせず分解を行う硫酸還元菌の増殖により嫌氣的に分解されることとなり、硫化物が形成されることとなる。そのような観測点として、湾奥部に位置する St.4, 6, 10, 11, 17 および鹿児島湾中央西部に位置する St.33, 35 がある。これらの観測点では 0203 層よりも 0001 層の硫化物含量が高い値を示す結果となった。0001 層および 0203 層で 1 mg/g 以上の値を示し、底質汚染が深刻と考えられる観測点は、いずれも湾奥部に位置している。

表-1 に示すように硫化物含量は表層（0001 層）よりも、その直下のほうが大きな値を示す傾向が読み取れるが、St.6 や St.11 のように、0203 層よりも 0001 層の硫化物含量が大きな値を示す場合は、貧酸素状態が深刻な海域において硫酸還元菌による分解が、より表層付近で進行しやすくなるためと考える。

硫化物含量が多くなる条件としては、有機物供給量が多いこと、貧酸素状態であること、流れが弱く新たな海水の流入がないことや、成層することにより水塊の鉛直混合がなくなり新たな酸素の供給がない場合などが挙げられるが、これらの例を図-8 に示す St.7 および St.11 の分析結果を基に説明する。なお水深は St.7 が 72m、St.11 が 141m であった。

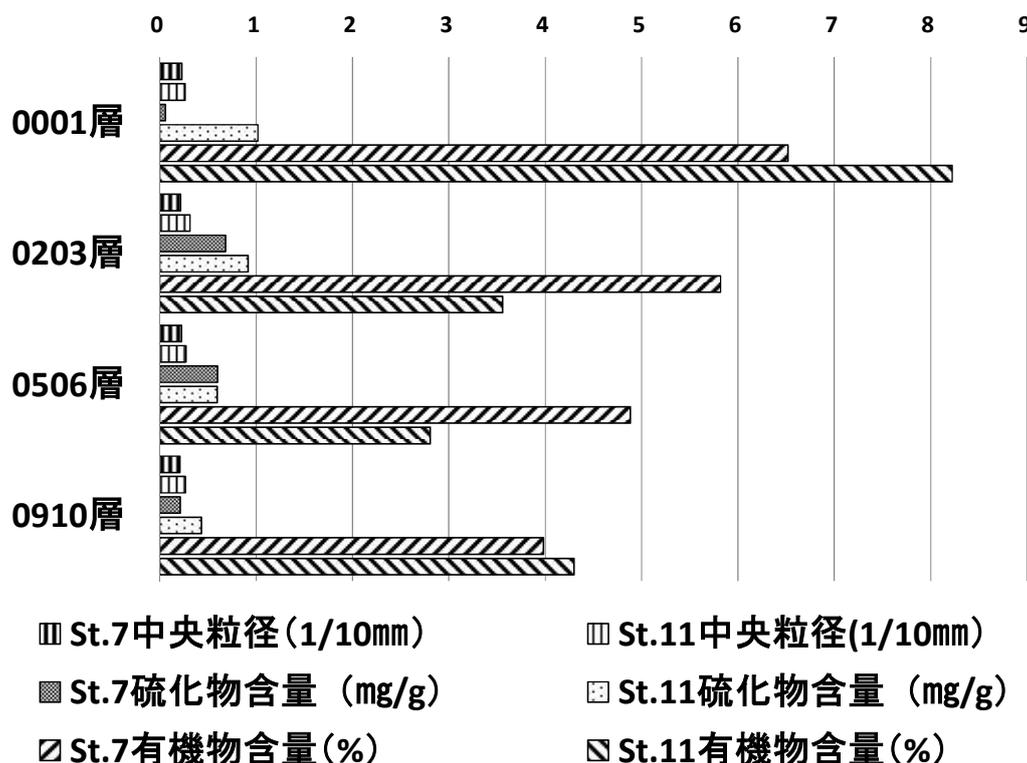


図-8 中央粒径(mm)，硫化物含量(mg/g)および有機物含量(%)の鉛直分布(St.7,St.11)

前述のように 0001 層から 0910 層まで、4 層すべてで試料が採取できた 18 地点のうち、12 地点において 0203 層で硫化物含量が極大値を示した。このことは、St.11 では表層付近が極貧酸素状態となっているために 0001 層よりすでに硫化物含量(mg/g)が高い値を示す結果となったこと、極表層付近の硫化物含量(mg/g)が St.7 のように、基準値(0.2mg/g)以下の値を示しても、下層（とくに 0203 層または 0506 層）では基準値を超える硫化物を含む可能性があることを示唆するもので、とくに湾奥部の底質汚濁の拡がり懸念される。

茶圓(1983)2) により報告された鹿児島湾における海水循環の模式図によると、冬季においては湾中央部、湾奥部、ともに海水の鉛直混合が発生し、表層と底層ではほぼ均一な水塊が存在することに

なるが、春季には 150m 付近より下層では鉛直方向の対流が行なわれない層が徐々に形成される、この層の上端は、季節が進むにしたがってより浅い水深まで移動してくる。そして夏季においては水深 100m 付近に達するとしている。本研究で試料採取を行った 8 月（夏季）においては、図-6 より、硫化物含量の基準値 0.2mg/g を超える含有量を示したのが、4 点を除いて 100m より深い観測点であったことは、冬季の極寒期以外鹿児島湾全域で、底層付近には貧酸素水塊が形成されているが示され、この報告を裏付けるものとなった。

水深 100m により浅い観測点でも、0203 層で 3 点(St.1,19,45), 0910 層で 1 点(St.19)において、0.2mg/g を超える値を示した。これらは湾奥、湾央東部および西部の沿岸に位置し、とくに大雨時などにおいて陸域から供給される栄養塩や鹿児島県の一大産業である養殖業による富栄養化が影響を与えているのではないかと推察された。

鹿児島湾では、とくに外洋水が流れ込みにくい閉鎖された湾奥部では予想以上に底質汚染が深刻であること、また湾奥部以外でも沿岸近くの海域で硫化物含量が高い海域が存在することが明らかになったことから、今後も継続的に調査を行い、年間を通じた硫化物含量の分布状況の変化を把握することが重要と考える。

6.5. 結果

本研究において以下のような結果が得られた。

- i) 全試料のほとんどは中央粒径(mm)が 0.05 未満の細粒シルトを示し、含泥率が 80%を超えると急激に硫化物含量が増加する傾向が見られた。それはとくに湾奥部で顕著であった。
- ii) 鹿児島湾では厳冬期以外は水塊が成層すること、および硫酸還元菌による有機物の嫌氣的分解により海底表層付近が貧酸素状態となることが原因で硫化物含量が高い底質環境が出現する。
- iii) 極表層付近の硫化物含量(mg/g)が水産用水基準の 0.2mg/g 以下の値を示しても、下層（とくに 0203 層または 0506 層）では基準値を超える硫化物を含む可能性があることから、鹿児島湾、とくに湾奥部の底質汚濁の拡がり懸念される。
- iv) 鹿児島湾全域では、主に河川を通じて供給される陸域起源および養殖による局所海域起源の栄養塩が沈降堆積しやすい海域で、底質悪化が生じていると推測される。

参考文献

- 1) 海上保安庁 海底地形図 No.62511, No.62512
- 2) 茶園正明：鹿児島湾の海水循環と水塊の季節変化，沿岸海洋研究ノート，第 21 巻，第 1 号，pp.12-18,1983
- 3) 仁科文子，山中有一，東 政能，幅野明正,中村啓彦：鹿児島湾の海水循環，海洋と生物，第 31 巻，第 1 号，pp.6-11, 2009

7章 池田湖の底質環境の経年変化

-長期的に人為的影響のある水域（湖）における粒度組成や硫化物含量等を用いた底質環境把握-

7.1. 緒言

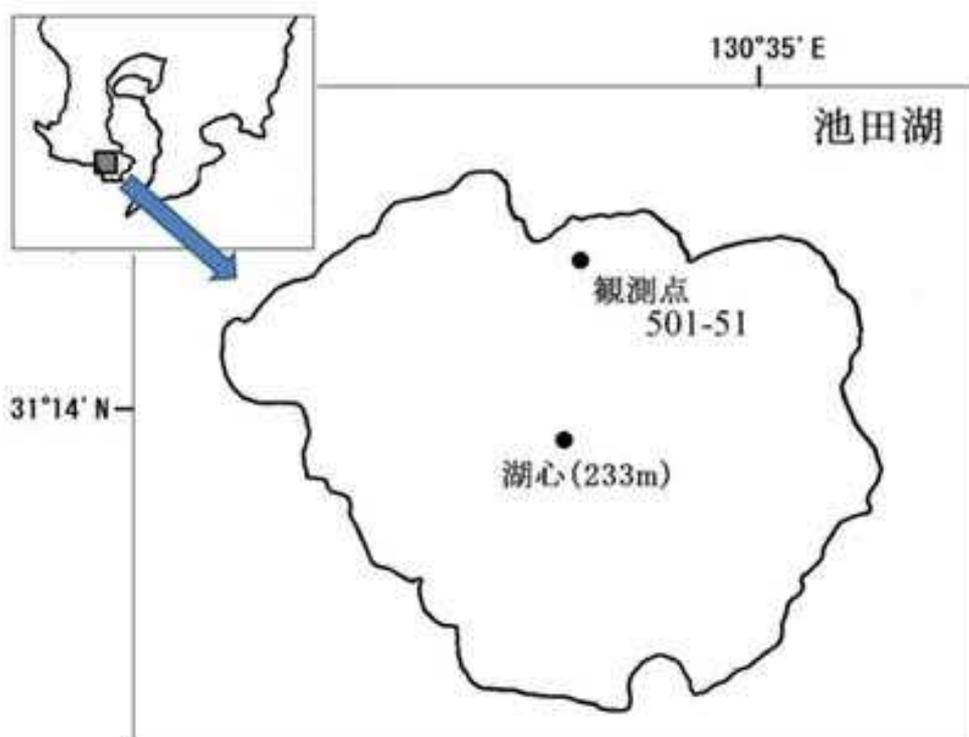


図-1 池田湖および観測点位置

池田湖において湖沼の水質指標である透明度は、1925年5月に26.8mが観測されたが、1985年から1990年にかけては6mであったのが2006年には9mまで回復したものの現在は再び減少傾向にある1)。また溶存酸素量については、1930年代の調査では、成層期にも湖底まで溶存酸素が観測され、その値も60%を下回ることはなかったが、1986年ごろから完全循環がほとんど起こらない状況が続いていると考えられる。このような透明度や溶存酸素量が低下した原因として、池田湖への有機物の過剰な流入がその主たる要因ではないかとされている。

一般に外来性と自生性の有機物負荷の増大に伴って、湖底に沈降する有機物量も増加する。沈降の

過程で有機物は分解されその際に酸素が消費される。分解を免れた有機物は湖底に堆積し、堆積後もさらに分解が進みこの際も酸素が消費されることになる。そのため有機物負荷の増大は酸素消費の増大を意味する。池田湖の場合、湖底に酸素が供給されるのは湖水の循環期に限られるので、循環期の供給量と上記の消費量によって湖底の酸素濃度は決定する。

湖底に酸素が供給されなくなると堆積物中では有機物の嫌氣的な分解過程が進行する。硫化物は嫌氣的分解過程の進行状態を示す重要な指標の一つである。一般に硫化物の生成には二つの過程がある。含硫アミノ酸などの分解に由来するものと、硫酸還元に由来する過程である。池田湖においても、琵琶湖などと同様に湖底の低酸素化に伴う底泥における硫化物生成について調べることは上記の懸念に対してきわめて重要であると考えられる（前田ほか）2) 3) 4)。また深水層での低酸素化、無酸素化の拡大に伴う堆積物表層における硫化物濃度の上昇は湖底表からの窒素やリンの溶出を助長し、さらなる富栄養化につながるという懸念から、鹿児島県では定期的に水質調査を実施している。しかしながら、池田湖の湖底堆積物の底質についての報告は少ない。そこで本研究では年間を通じて採取した底泥試料を用いて、底質汚濁の化学的指標の一つである硫化物含量を基に、池田湖の底質の季節変化を水温躍層の形成過程の観点から明らかにした。

7.2. 調査水域と地形



図-2 池田湖近景

図-1 および図-2 に示すように、本研究で扱う池田湖は、薩摩半島南端部、鹿児島湾口を構成する阿多カルデラの西端に位置するカルデラ湖で、湖面積は 10.9 km²、湖周は 15 km、また水面標高は 66 m。そして最大水深は 233 m に達し、これは鹿児島湾中央部および湾奥部の最大水深とほぼ同程度の深さである。

図-3 に平成 25 年 2 月に、本研究で鹿児島大学水産学部の舟艇を使用して実施した水深測量の結果を示す。湖心付近には水深 230 m を呈する平坦面が広がっている。北西部で幾分なだらかに水深が深くなる以外は、陸岸を離れると、一気に水深が深くなり、北岸では 100 m、西岸では 150 m そして南南岸及び東岸では 200 m の深さに達しカルデラ湖特有の地形となっている。湖心の東側にはもっとも浅いところで 50 m のお椀を伏せたような形状の浅水域が存在していることがわかる。

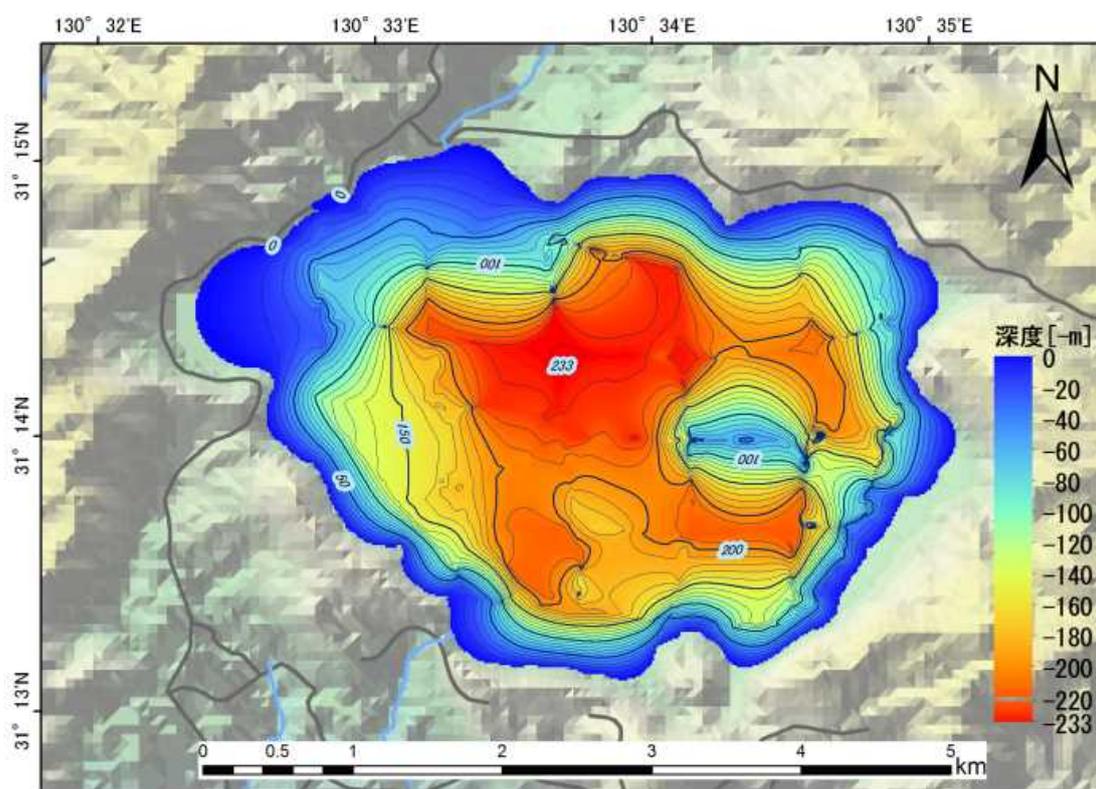


図-3 池田湖の水深図

湖水の利用は 1872 年の新川開削に始まり、現在でも灌漑用水や水道水源として重要な位置を占め、鯉の養殖や小鮎漁などが行われている。湖内に流入する大きな河川は存在していないが、集水域外の 3 河川から導水が行われることにより水位が保たれている。

7.3. 分析方法

(1) 底質試料採取と水質測定



図-4 試料採取（エクマンバージ採泥器）

2005年10月から2006年12月まで、図-1に示す鹿児島県の水質測定計画に基づいた統一地点番号501-51（ $31^{\circ} 14.5' N$, $130^{\circ} 33.5' E$, 水深78 m）の地点で調査を行った。なお2005年10月から2006年3月までは2か月に1回、そして2006年4月から12月までは毎月1回、湖底表層堆積物を、図-4に示すエクマンバージ採泥器を用いて採取した。底質試料は採泥器内で、表層部分（0～2 cm）を薄く剥ぎ取るようにして採取した。採取した底泥試料を用いて、硫化物分析、有機物分析および粒度分析を行った。

水質測定については、底泥試料採取時に多項目水質計（Hydrolab DS5 Multiprobe）を用いて、水温の鉛直分布を表層から水温変化が生じない水深まで測定した。

採取した試料は研究室に持ち帰り、硫化物含量については水蒸気蒸留法により、有機物含量についてはIL（強熱減量）により測定した。また2005年10月に採取した底泥試料を用いて粒度分析を行った。粒度分析には鹿児島大学総合研究博物館所有のレーザー回折式粒度分析装置（SALD-3100：島津製作所製）を用いた。

（2）硫化物分析

硫化物分析用の試料は採取した硫化物を固定するために、採取後ただちに船上で酢酸亜鉛を加え、良くかき混ぜたのち、密封して研究室に持ち帰った。持ち帰った試料は、水蒸気蒸留法により硫化物

を抽出分離した。取り出した硫化物を染色したのち、吸光光度計により測定を行った。得られた値と含水率より乾燥試料 1 g 当たりの硫化物含量 (mg/g) を算出した。分析は同一試料で 2 回実施し、その平均値を硫化物含量とした。

(3) 有機物分析 (強熱減量)

有機物含量は 50 g 程度をアルミ容器に取り、常温で乾燥させて焼却前の重量を測定したのち、マッフル炉を用いて 550 °C で 3 時間燃焼させた。燃焼後、すぐにデシケーターに試料を移し、十分冷却した後に、焼却後の重量を測定した。焼却前後の重量差を有機物含量とした。また含水率を試料の湿重量と乾重量との差より求めた。有機物についても同一試料で 2 回分析を行い、その平均値を有機物含量とした。

(4) 水質計測

底泥試料を採取した地点において、船上より多項目水質計を降下させながら、水深および水温の測定を行い、野帳に記録した。

7.4 分析結果

(1) 深度別水温変化

図-5 に 2005 年 10 月から 2006 年 3 月までは 2 か月ごとに、2006 年 4 月から 2006 年 12 月までは 1 か月に 1 回測定した水温と水深の関係を示す。

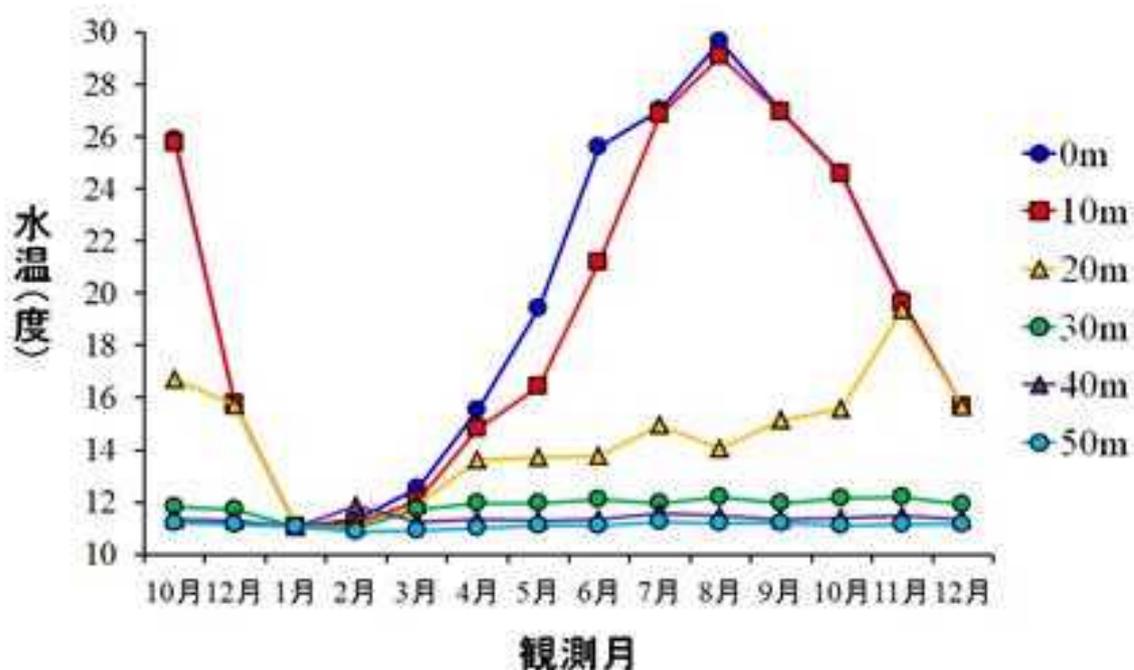


図-5 深度別水温変化 (2005 年 10 月～2006 年 12 月)

表層水温は11.1℃(1月)から29.6℃(8月)の範囲で変化している。2006年の1月から2月にかけての水温は表面から水深50mまで、ほぼ11℃で一定の値を示すため、この時期に表層水と底層水の鉛直的混合が起こっていることがわかる。3月には12.3℃まで上昇するが、この傾向は水深20m付近まで見られる。そして4月になると表面水温は約16℃まで上昇し、このころから水深20m付近において水深の変化に伴う水温変化の大きい層(水温躍層)が現れ始める。その後も表面水温は上昇し続け、8月に29.6℃の最高値を測定したあと、温度は減少するが、水温躍層は翌年の鉛直混合が起こるまで形成される。

池田湖において、夏季に水温躍層は水深14mから20m付近に形成され、水深30mで水温は12℃となり、50mでは年間を通じて11.1℃である。また冬季の1月から3月にかけて発生する鉛直混合によって、水温は表層から下層(水深50m)まで11.1℃でほぼ一定となる。

(2) 硫化物含量

2005年10月から2006年3月までは2か月に1回、2006年4月から2006年12月までは1か月に1回採取した試料から得られた硫化物含量および有機物含量を図-6および表-1に示す。

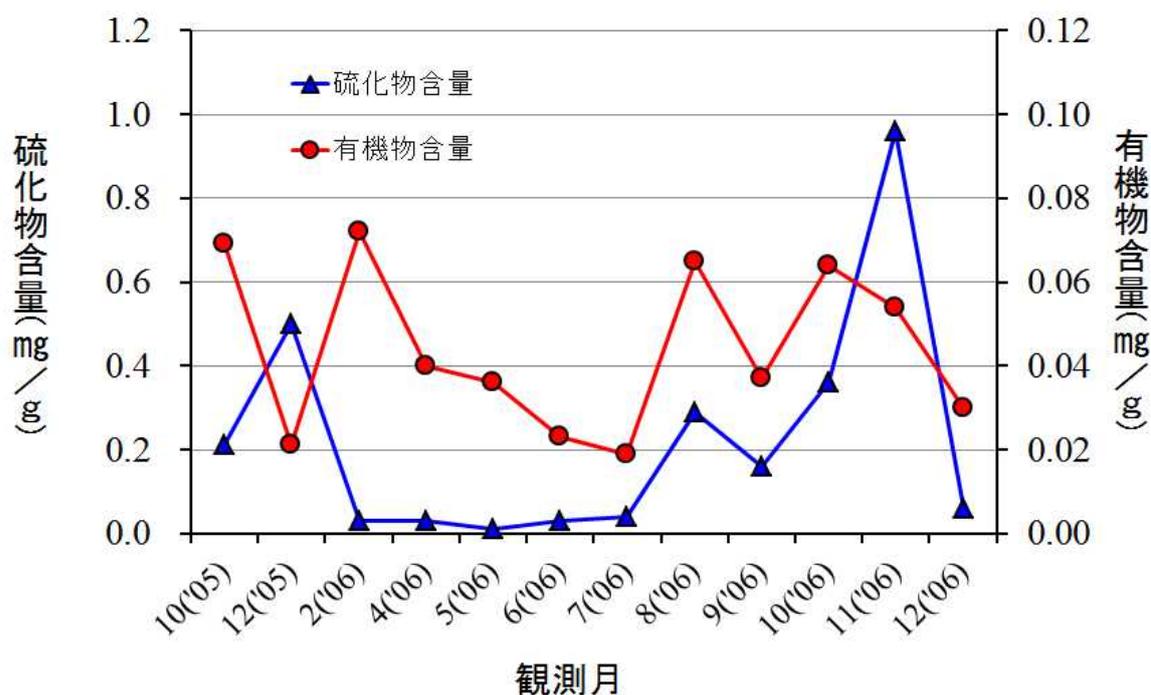


図-6 硫化物含量および有機物含量 (mg/g) (2005年10月～2006年12月)

1月から3月に発生する鉛直混合により、底泥付近まで酸素量が豊富な水塊が供給されるとすぐに湖底表層堆積物の硫化物含量は激減し、8月に水産用水基準の0.2 mg/gを上回る値(0.29 mg/g)を示すまでは硫化物含量の低い状態が継続することから、少なくとも観測地点(水深78m)の水域では、

冬季に鉛直混合が起こったあと、低酸素ではない状態が半年間程度継続することがわかる。また有機物含量の変化も、硫化物含量ほど明確ではないが季節的には、成層期に低く、循環期に上昇する傾向が見られる。

2006年2月から7月の硫化物含量は0.01 mg/gから0.05 mg/gという極めて低い濃度で推移するが、8月になると急激に水産用水基準（0.2 mg/g）を超える値（0.29 mg/g）を示す。その後、9月になると、いったん減少（0.16 mg/g）しているが、10月（0.36 mg/g）、11月（0.96 mg/g）と10月以降は急激に増加している。また2005年12月（0.50 mg/g）は10月（0.21 mg/g）より高い値を示すのに対して、2006年12月（0.06 mg/g）は11月（0.96 mg/g）より、非常に低い値を示している。

表-1 硫化物含量と有機物含量の月別含有量（mg/g）

	硫化物含量 (mg/g)	有機物含量 (mg/g)
2005年10月	0.21	0.069
12月	0.50	0.021
2006年2月	0.03	0.072
4月	0.03	0.040
5月	0.01	0.036
6月	0.03	0.023
7月	0.04	0.019
8月	0.29	0.065
9月	0.16	0.037
10月	0.36	0.064
11月	0.96	0.054
12月	0.06	0.030

これら3層において気温が1℃上昇することに伴う水温変化量は、表層（0.5 m）で0.6℃、100 m および200 m では0.2℃となった、それぞれわずかではあるが、3層とも正の相関を示した。平均気温の上昇に伴う水温の上昇は、表層のみならず、100 m および200 m という深層部でも認められることが分かる。このように硫化物含量は、2005年、2006年ともに10月から12月にかけて増加し、量的な差はあるが、それぞれ季節的な変化があることがわかる。

2006年8月に1回、図-1に示す池田湖最深部、湖心付近233mにおいて底質試料採取を行い、硫化物含量の測定を行ったところ、3.43 mg/g という水産用水基準の約17倍という非常に高濃度の値を計測したが、原因は不明である。

(3) 有機物含量 (強熱減量)

図-6に乾泥1g当たりの有機物含量 (mg/g) の値を示す。有機物含量は0.02 mg/g から0.07 mg/g の範囲である。2005年10月から2006年2月にかけては、2005年12月に含量が低い値を示す以外は0.07 mg/g という観測期間でもっとも高い値を示す。そして2006年4月以降、有機物含量が徐々に減少し始め、2006年6月および7月に0.2 mg/g という最低値を示す。2006年8月になると、2006年10月まで増加する傾向が見られ、2006年10月には0.06 mg/g となる。これより有機物含量は、冬季(10月から2月)の間で増加し、春から夏にかけては減少することがわかる。このように有機物含量と硫化物含量は、ともに冬から春にかけて減少し、夏から秋にかけて増加する傾向が見られた。

(4) 粒度分析

2005年10月に観測点501-51において採取した試料の粒度分析を行い、中央粒径 (mm)、含泥率 (%) を算出した。中央粒径は0.054 mm (粗粒シルト) であり、含泥率は78%となった。

(5) 気温および水温の経年変化

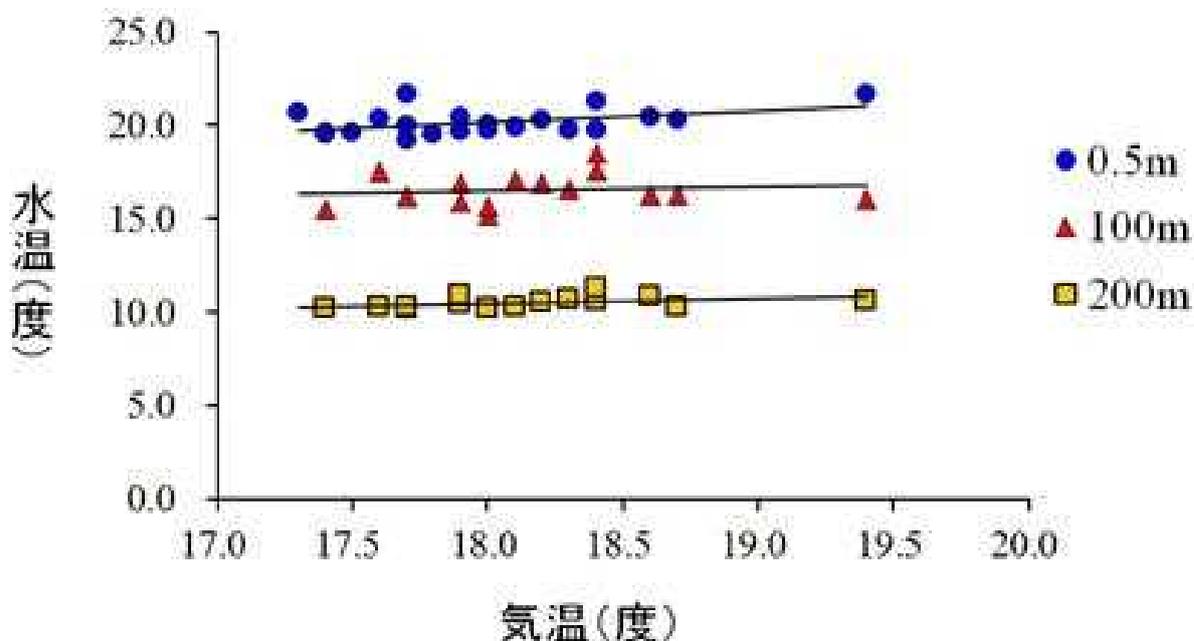


図-7 気温と水温の相関 (気象庁 気象統計情報, 池田湖湖心水温: 鹿児島県環境保健センター) (1978~2005)

図-7に1978年から2005年までの気象庁の気象統計情報から得られた気温(5)と、鹿児島県環境保健センターで測定した湖心付近の表層(0.5m)、水深100mおよび200mの水温(6)との相関関係を示す。図-8に指宿市における日平均気温(1976~2012)および日平均最低気温(1976~2005)を、図-9に4層(0.5m、15m、30m、100m、200m)における水温の年変化(6)を示す。

これらの変化を平均すると、図中に示すとおり、1976年以降、約35年間で指宿市の日平均気温は年0.025℃、日平均最低気温は年0.016℃上昇しているのに対して、図-9に示すように池田湖の水温は、表層(0.5m)では年0.04℃、200mでは年0.05℃の上昇で、水温の上昇速度が気温の上昇速度よりも大きいことがわかる。

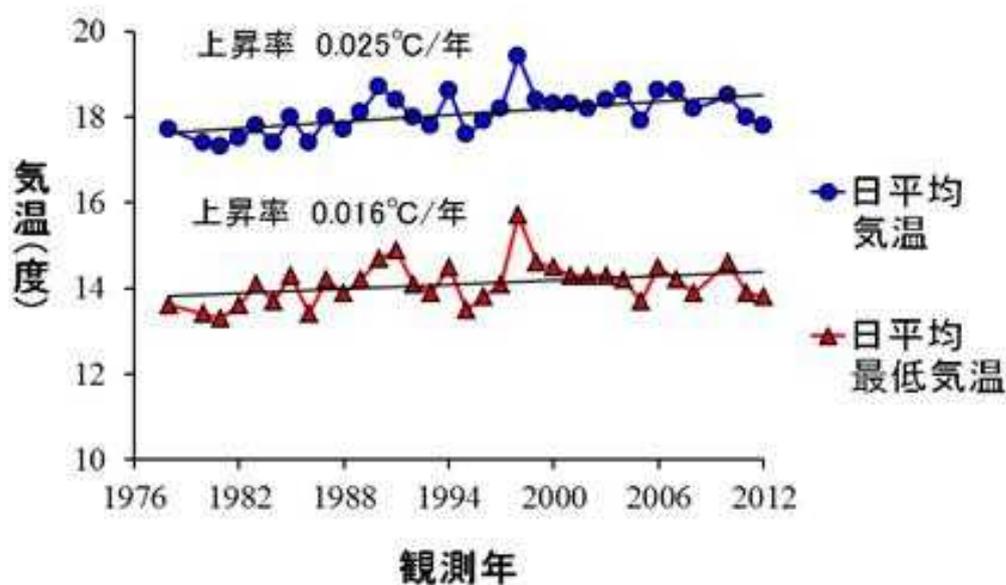


図-8 指宿市における日平均気温と日平均最低気温（気象庁 気象統計情報）（1978~2005）

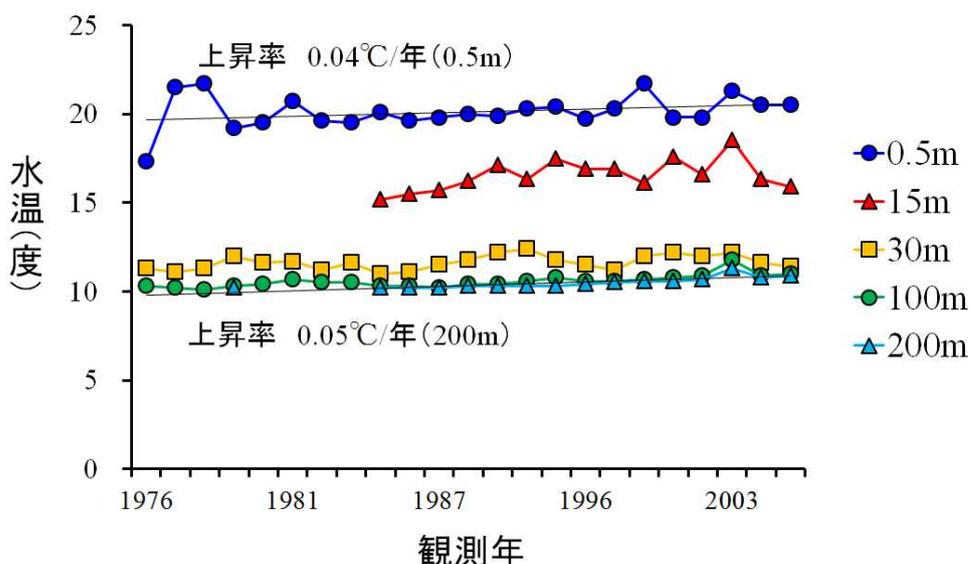


図-9 水深別年平均水温の推移（1976~2005）（池田湖湖心水温：鹿児島県環境保健センター）

7.5 結論

2005年10月から2006年12月の観測期間において底質分析した結果から、硫化物量は2006年2月から7月にかけて最も低い値を示した。これは1月から3月にかけて表面水温が気温の低下とともに表層の冷却された水塊が下降することによって鉛直混合が始まり、水深100mまでは酸素が供給されたことによるものと考えられる。また4月に水温躍層が形成され始めたことにより水塊の鉛直混合が途絶え、酸素が供給されない状況にあるにも関わらず、硫化物量は7月までは増加する傾向が見られない。このことは水深100m付近においては、水温躍層形成後も約3か月間は有機物を分解するのに必要な酸素が水中に存在したことによるものと考えられる。

一方、7月から8月にかけて、硫化物量の顕著な増加が始まり、9月に一度減少しているものの、10月から11月にかけて硫化物の増加量は極大となっている。このことは、水温躍層の形成に伴う水深100m付近における溶存酸素量の不足によって嫌氣的分解過程、すなわち硫化物の生成活性が増加したことを示している。その後、12月に硫化物量が極端に減少する(0.06 mg/g)が水温変化からこの時点で鉛直混合により酸素の供給が起こって硫化物の酸化がおこったことによるものと考えられる。水温の鉛直分布から、年間を通じて池田湖では50m以深の水温は11.1℃を示したことより、表面水が気温の上昇に伴って、11.1℃よりも低い温度に冷やされ続ける期間が少なくなると、鉛直混合が発生する期間は短くなり、規模は小さくなると考えられるため、地球温暖化により上下混合が阻害されやすくなると、ますます底質は悪化する可能性が高くなる。

1976年から2005年の30年間で気温が約1.5℃上昇したことにより池田湖の各層ごとの水温も、わずかずつではあるが、上昇傾向にある。特に水深15m付近での水温の上昇が他の層よりも顕著である。気温の上昇は日平均気温が0.016℃/年、日平均最低気温が0.025℃/年であるのに対して、水温の上昇は表層(0.5m)で0.04℃/年、水深200mでも0.05℃/年となったことから、湖内水温は気温上昇の2倍の速さで上昇しているということになり、この速度のまま単純に上昇すると100年後に湖内水温は現在よりも4~5℃上昇することになる。

表層(0.5m)と下層(200m)の水温差が徐々に縮まることから、冬季における鉛直混合が起きやすい状況となるように思われるが、気温の上昇に伴って、鉛直混合が発生するために必要とする表層の水温が一定の閾値に達する期間が短くなることにより、発生する鉛直混合の規模が縮小することが考えられる。

このことにより深層に供給される酸素量が減少するとともに、鉛直混合が湖底まで及ばなくなる期間が増加し、その結果、湖底の硫化物含量が水産用水基準(0.2 mg/g)を上回る期間が長く続く可能性がある。すなわち、温暖化の進行により湖水の上下混合の程度が弱まることによって、湖底の硫化物濃度の上昇を起こす可能性を示唆する。今後、池田湖の湖底環境の悪化が懸念されるので、さらなるモニタリングが必要である。

参考文献

- 1) 池田湖における水温と水質の状況について：鹿児島県環境保健センター所報，第12号，pp.85-91，

2011

- 2) Maeda H., Kumagai M., Oonishi Y., Kitada H. and Kawai A. : Change in the qualities of water and bottom sediment with the development of anoxic layer in a stratified lake. Nippon Suisan Gakkaishi, 53, pp. 1281-1288, 1987
- 3) Maeda H. and Kawai A. Microflora and bacterial organic acid production in the bottom sediment of Lake Biwa. Nippon Suisan Gakkaishi, 54, pp.1375-1383, 1988
- 4) Maeda H. and Kawai A. Hydrogen sulfide production in bottom sediments in the northern and southern Lake Biwa. Nippon Suisan Gakkaishi, 54, pp.1623-1633, 1988
- 5) 気象庁 (1976年～2005年) : 気象統計情報
- 6) 鹿児島県 (1976年～1983年, 1985年～1990年, 1995年～2000年, 2003年～2005年) : 公共用水域の水質測定結果, 池田湖基準点 2 (501-02)

第 8 章 結論

沿岸域の閉鎖的・半閉鎖的な水域及び、開放的な海域における底質環境に関して調査・研究を行った。対象とした水域は、池田湖、松川浦、島原湾、鹿児島湾、そして屋久島海域である。それぞれの水域で得られた主な結果を以下にまとめる。

第 2 章では、人為的影響のない海域（外洋）における粒度組成等の底質環境を把握するために、鹿児島県屋久島南西海域の粒度組成について調査・解析を行った。その結果、ほとんどの調査地点において、細粒側（粒径 0.5mm 未満）と粗粒側（粒径 0.5mm 以上）にピークを持つ、Bi-modal な粒度分布であることが分かった。このことは少なくとも 2 つ以上の異なる運搬および堆積過程を経た堆積物で調査海域の底質が構成されていることを示唆している。一般に底質の粒度組成を代表するパラメータとして中央粒径（ d_{50} : mm）が用いられるが、本研究で得られた結果のように、堆積環境が異なると推測される Bi-modal な流路分布を示す場合は、中央粒径 d_{50} (mm) を基に行う解析ではそれぞれのモード（分布）の堆積環境などを十分に理解することができないと考え、粒径が 0.5mm 未満と 0.5mm 以上の範囲におけるそれぞれの中央粒径 (mm) を求めて考察を行った。その結果、粒径 0.5 mm 未満における中央粒径 (mm) は 0.14 から 0.17 mm の範囲となり、調査海域全体でほとんど相違がないことが分かった。また、粒径 0.5 mm 未満の堆積物が、本調査海域の海底付近の流れの状況を反映したものであると考えるのが妥当と思われ、Inman (1949) による粒径と限界摩擦速度を基に流れの強さを推察した結果、本研究海域の海底面には 2.0cm/s 程度の流れが存在していることが分かった。

第 3 章では、自然災害（地震・津波）にともない急激な（短期的な）環境変化が生じた海域（内湾）の特性を底質分析により明らかにしようとした。対象とした海域は、東日本大震災により甚大な被災を受けた福島県松川浦である。そして本研究により、松川浦の底質組成は、津波により浦中央部で含泥率が減少、北部・南部海域で増加したことが分かった。津波前はアサリ漁場であった北西部海域の含泥率が特に増加しているために、自然条件での改善は困難と考えられ、今後、人工的な底質改善が望まれる。また、松川浦の地形を示す水深は津波前に比べて浦全体で深くなっている。これは松川浦を含む地域の地盤が地震により低下した事と、細粒成分の堆積底質で構成される海底が津波で浸食されたためと考えられる。

第 4 章では、数年以上の中期的な環境変化が生じた可能性のある半閉鎖的な海域を対象に底質環境の変化を調査・解析した。対象海域は九州西岸にある有明海および島原湾であ

る。本研究では有明海および島原湾の 54 地点において柱状試料を採取し、底質の平面分布および鉛直分布に基づいて、底質環境の変化を考察した。採取試料の長さは、海底面を構成する底質の軟らかさを知る手がかりとなる。そして、試料採取長を海底面の軟らかさ示す指標（硬度指標）と考え、底質試料採取長に基づいて海域を区分化することができた。また、2002 年当時、有明海および島原湾全域において底質堆積物が泥化傾向にあることが分かった。そして、下層に比べて上層での砂の含有率が減少し、シルトおよび粘土の含有率が増加する傾向は、とくに諫早湾沖から長洲沖にかけての湾奥部と島原湾の接続部において、東西に帯状に広がっていることがわかった。

第 5 章では、10 年以上の中・長期的な時間間隔で生じる半閉鎖的な海域での人為的な環境変化を、海底付近の底質の粒度組成や硫化物含量および有機物含有量を用いて考察した。対象とした海域は、鹿児島県本土中央部に位置する鹿児島湾である。とくに外洋水が流入しにくい閉鎖的な湾奥部では底質汚染が顕著であることが分かった。また、湾奥部以外でも沿岸近くの海域で硫化物含量が高い海域が存在することが明らかになった。

第 6 章では、完全に閉鎖的な内水環境での数十年以上の長期的な環境変化を、粒度組成や硫化物含量等を指標に考察した。対象とした水域は、九州最大のカルデラ湖である鹿児島県指宿市の池田湖である。1 年強（15 か月）を通じて採取した底泥試料を用いて、底質汚濁の化学的指標の一つである硫化物含量を基に、池田湖小野底質の季節変化を水温躍層および貧酸素水塊の形成という観点から考察した。その結果、硫化物濃度は成層期の終わりに極大となり、逆に循環期には低下することがわかった。また、近年の温暖化の進行により湖水の上下混合の程度が弱まることによって、湖底の硫化物濃度の上昇を起こす可能性を示唆された。

7 章では、2005 年 10 月から 2006 年 12 月の観測期間において、1 月から 3 月にかけて気温の低下とともに表層の冷却された水塊が下降することによって鉛直混合が始まり、水深 100 m までは酸素が供給されていると考えられた。また 4 月に水温躍層が形成され始めたことにより水塊の鉛直混合が途絶え、酸素が供給されない状況にも関わらず、硫化物量は 7 月までは増加する傾向がないので、水深 100 m 付近では、水温躍層形成後も約 3 か月間は有機物を分解するのに必要な酸素が水中に存在していると考えられた。一方、7 月から 8 月にかけて、硫化物量の顕著な増加が始まり、9 月に一度減少しているものの、10 月から 11 月にかけて硫化物の増加量は極大となっているので、水温躍層形成に伴う水深 100m 付近における溶存酸素量の不足によって嫌氣的分解過程、すなわち硫化物の生成活性が増加し、12 月時点で鉛直混合により酸素の供給が起こって硫化物の酸化がおこる過程が繰り返されているものと考えられた。さらに、1976 年から 2005 年の 30 年間で気温上昇は日平均気温が $0.016^{\circ}\text{C}/\text{年}$ 、日平均最低気温が $0.025^{\circ}\text{C}/\text{年}$ であるのに対して、水温の上昇は表層（0.5 m）

で $0.04^{\circ}\text{C}/\text{年}$ 、水深 200m でも $0.05^{\circ}\text{C}/\text{年}$ となったことから、湖内水温は気温上昇の 2 倍の速さで上昇しているということなり、この速度のままで単純に上昇すると 100 年後に湖内水温は現在よりも $4\sim 5^{\circ}\text{C}$ 上昇することになる。その結果、湖底の硫化物含量が水産用水基準 (0.2 mg/g) を上回る期間が長く続く可能性がある。すなわち、温暖化の進行により湖水の上下混合の程度が弱まることによって、湖底の硫化物濃度の上昇を起こす可能性を示唆された。

本博士論文で対象とした調査海域は、水産有用種の生息領域、および多様性のある水圏生態系の生息領域として重要な海域であり、本研究が、水産有用種の種の変化や量の変動現象の解明や水圏生物（特に絶滅危惧種など）の保全活動に資することを期待する。

博士論文（草案）お祝いの言葉（敬称略）

- ・鹿児島大学水産学部 不破 茂
- ・鹿児島大学水産学部 藤枝 繁
- ・鹿児島大学水産学部 山中有一
- ・かごしま丸一等航海士 幅野 明正
- ・南西丸船長 内山正樹
- ・南星丸 航海士 福田隆二
- ・水産学部技術専門職員 児玉正二
- ・福島県水産課 涌井邦浩
- ・真潮会 松浦洋人
- ・鹿児島大学大学院水産学研究科 鶴成 悦久

日高正康氏の博士論文に寄せて

不破 茂

まず、あなたがこれまで行ってきた海底堆積物に関する研究が「半閉鎖的水域での底質環境に関する水産学的考察」という形で結実したことを大変嬉しく思い、心からお祝い申し上げます。

本研究は、漁業の基盤となる海洋生態系を理解するためには、生物の生息環境の主体である水質だけでなく底質の解析が必要であるという、斬新な視点から取りまとめられたことは、高く評価されるものです。あなたが提示した海底堆積物から生物生産と水圏環境を関連づけて研究する手法は、水産学の研究において新しい展開を図るものです。漁業がこれまでの一網打尽型から資源保全型へ転換している流れの中で、あなたの研究は海洋生態系の持続的利用である漁業の基盤を、時系列的観点、物理的観点や化学的観点から解析することであり、意義深いものです。

思い起こせばあなたたちは、大変やんちゃなクラスでしたね。あなたの学年が鹿児島大学水産学部を二期校で受験した最後の学年であり、各人の振り子の振幅や方向もまちまちな、一癖も二癖もある連中でいっぱいでした。まだ助手だった私もあなた方と実習をやりましたけど、一緒になってソフトボールや駅伝を走ったりと、いろいろ遊びましたね。その中でも飄々としながら、今井先生の指導のもと黙々と卒論に取り組んでいたあなたの姿が、目に浮かびます。

卒業後は日本水産のトロール船を経てかごしま丸の航海士として赴任し、船の運航を担当するだけでなく、兄貴のような感じで学生を指導していたね。私がトロール網のグランドロープ形状の測定実験した時には、様々な手助けをしてもらったよね。その後、あなたが学部で勤務するようになってからは、同僚というよりも漁具学研究室の先輩後輩として接してきたような気がします。先輩風を吹かせてあなたに無礼だったことがあれば、漁具学研究室 OB に免じて、ご容赦頂きたいものです。

学部で講義を担当することになって、たくさんの希望を持っておられたことでしょう。でも、学部の教員となったゆえに学位が求められ、あなた自身がこれまで辛い思いをしてこられたことでしょう。船の航海士としては大変優秀だったけど、研究業績が求められる

学部教員の生活は、まさしくゼロからの出発だったはずですが。それでも、海底堆積物に関する研究を継続してこのような形で結実させた、あなたの努力は大いに賞賛されるものです。あなたがこれまでの研究で切り開いてきた新境地は、これから続く人たちが継続してさらに発展してくれるものと信じています。

博士論文完成お祝い

鹿児島大学水産学部 藤枝 繁

日高正康先生

博士論文完成おめでとうございます。日高先生の長年にわたるご苦労と先生を慕う多くの方々の協力によってまとめられたこの成果は、みなさんの心に残るだけでなく、また多くの研究者に利用され、さらには海洋環境の保全に末永く貢献していくはずです。

でも、私にとっては、ノックをしても返事が返って来ないのは寂しいものです。日高先生が陸上教員になられてから10年以上、隣人として、また同室の住人としてお付き合いさせていただきました。毎朝、先生の部屋の前を通るたび聞こえるいつもの仲間との談笑の声。先生の声が一番大きかったなあ。またノックと共に「先生」って低い声。いまでも部屋のドアがノックされると先生の顔が出てくるような気がしてなりません。学生への相談を親身に受けるだけでなく、私からのお願いや相談を、いつも丁寧に受け止めていただきました。本当にありがとうございました。今では相談しても答えを頂けなくなりましたが、これは早く大人になりなさいってことですかね。

実は1月16日木曜日の夜中の2時半、私、目が覚めました。「そっと起こされた」という感じです。先生だったんですね。何も言わないから。私は何があったかも知らず、朝、大学まで先生へのこのお祝いの文章を考えながら歩いてきました。建物のドアが開くなり、児玉さんから先生の話が告げられ、びっくりして今まで考えていた文章がすべて吹っ飛んでしまいましたよ。あの日から一週間が経ち、私もようやくキーボードに向かって先生へのお祝いのメッセージを打つことができるようになりました。しかし、まだまだ書き進めるのは難しいです。

先生との出会いは、学生時代のかごしま丸です。先生の元気で明るい姿に、憧れの航海士像が重なって、私も船に乗ることを決めました。しかし、その後の乗船実習ではいつも船酔い。「こんなことで自分の夢が打ち砕かれるもんか」と歯を食いしばりながら、なんとかブリッジに立っていました。そんな私を、先生はじめ、船の皆さんが暖かく支えていただいたおかげで、いつか自分も日高先生のような航海士に、またこんな力強いグループ

の一員になりたいと、その後の針路を決めました。先生がいなかったら、違った道を進んでいたかもしれません。また私が志枝と知り合ったのも、日高先生が内地留学でかごしま丸を下船され、ピンチヒッター航海士というチャンスをいただいたからです。それ以外にも先生にはいろんなものを頂きました。ありがとうございました。先生はいつも「志枝はいい子だね」って言ってましたが、あの晩「実はね」と、ようやく彼女に伝えることができました。私たちにとって日高先生はいつまでも「先生」です。

最後に、オーストラリア航海の集合写真を見つけました。先生がみんなに囲まれて真ん中にある写真です。これを私の部屋に置いておきます。これからも私は憧れの先輩として先生を追い続けていきますね。今も隣の部屋から音が聞こえます。たまにはどうぞ、ドアをノックしてください。

2014年1月22日

半閉鎖的水域での底質環境に関する水産学的考察」完成によせて

山中有一

私たちが普段考えている「海」はいわゆる水圏のことであり、その中に生きる生物がその主役である。人間は時には主役を痛めつける悪玉として、時には助け導く善玉の脇役として水圏環境という舞台にかかわっている。そんな舞台の裏の様子が海底の底質構造に刻まれ、記録として残されているのではないかと、そんな想いでこの論文を読ませてもらった。本論文では底質の粒度の分布や化学的な組成から、その上を動く水の振舞いを推測し物理環境を読み解いていく。

第2章では屋久島周辺海域の粒度組成が Bi-modal であることから、この分野の常套手段である中央粒径値が流れの実態を語っていないことを見出している。底質の化学的組成からは、底質をゆりかごとして生まれ、成長し、産卵し、やがて墓場でもある底質の一部となっていく魚や底生動物たちの生態に迫り、生物生産環境の来し方行く末を考える。その考察は大昔の氷期の生物のいとなみにも及んでいる。第3、第4章では大地震や台風など自然界の大きな擾乱が刻み込まれた傷跡を底質構造の変化に見つけ、その傷の癒し方も考察されている。アサリやノリ養殖の好漁場であった松川湾の調査では海底地形と粒度分布の変化を分析し、漁場回復のための具体的処方が第3章で提言されている。第4章では好漁場であった有明海を取り上げ、火山活動などの自然の擾乱に加えて干拓事業など人為的な大規模変化が半閉鎖性海域に与える影響についても考察し、その診断方法としての底質調査の必要性を訴えている。第5章から第7章では我々の眼前に広がる鹿児島湾や指宿に位置する九州最大の湖である池田湖を取り上げ、カルデラの生成に由来する（半）閉鎖性と特筆すべき深さ故に見出しにくい汚染物質の堆積や貧酸素水塊の形成を指摘している。特に池田湖中央部と湾奥部最深部については、緻密な観測データと GIS を用いたデータ解析によつての当該水域の環境悪化に対し警鐘を鳴らしている。

日高さん（同窓であり同じカッターを漕いだ仲間としてそう呼ばせてもらいたい）は練習船の士官・指導教員を長く勤められた。わずかな期間ではあるが同じ経験を持つ者として感じるのは、学生に対して海の上で海に関することを教えるにあたって、光の届かない水中の世界を知りたいという思いだ。海底の砂泥を手掛かりに海上からは見えない海の中のことや海の過去と未来に馳せる思いはその経験から来たものに違いない。古の航海術で

は水深を測るロープの先につけた鉛製の錘（手用測鉛）のくぼみにグリースを詰めて底質を採取し、錨地や錨鎖の長さを決める判断材料にしたという。そのような洋上技術者としての底質とのかかわりが本研究の根っこにつながるのかもしれない。

本論文を読んで感じたのは、良質のミステリーを読んでいるかのような面白さである。一見地味に見えるが、海底の砂泥に隠れた些細な手掛かりで過去の生物の盛衰や見えない水の振る舞いを読み解く。そして海にかかわるヒトという生き物に未来へのヒントを示唆する。日高さん、海にかかわり海を教える立場の一人としてとても勉強になりました。この知識をこれからの海の教育に役立てていきます。ありがとう。

日高先生 博士論文完成のお祝い

かごしま丸一等航海士 幅野 明正

日高先生、博士論文完成おめでとうございます。先生に初めてお目にかかったのは先生がかごしま丸事務長として乗船されているときでした。当時学生だった私たちを兄貴のような存在で指導してくださったのを今でもはっきり覚えています。漁船員としてベーリング海でご活躍の経験を持つ先生は我々学生の目標でもありました。私も漁船員としての勤務を経て平成7年にかごしま丸航海士として戻ってまいりました。一般の航海士とは違い船舶運航の他に学生の指導を行うだけでなく、研究者でもあると教えていただきました。私を練習船士官として直接指導して下さったのも日高先生でした。今日の自分があるのも日高先生のおかげだと感謝しています。

先生は、船舶教員時代から海底堆積物の研究をしておられました。本研究では、沿岸域の閉鎖的・半閉鎖的な水域及び開放的な海域での底質環境について調査研究をされ、調査水域も池田湖、松川浦、島原湾、鹿児島湾、屋久島海域と広範囲にわたって調査研究をされております。特に東日本大震災で被害を受けた福島県松川浦湾の底質組成を震災のわずか6か月後には調査され、アサリ漁場回復の為、人口的な底質改善を提案されています。漁業と密接にかかわる先生ならではの調査研究だと思います。また、地球温暖化が湖底の硫化物濃度の上昇を起し水産用水基準を超える可能性を示し、堆積物と水産の新たな関係を示しています。海底堆積物と水産業を結びつける新たな指標を示した斬新で重要な論文であると思います。

日高先生は、残念ながらこの論文の発表前にご逝去されてしまいました。これからは、私たち後輩が日高先生の学生に対する熱い思い、研究に対する情熱を受継いでいく所存です。どうか、天国から見守っていて下さい。これまでご指導いただき誠にありがとうございました。

心よりご冥福をお祈りいたします。

日高先生 博士論文完成のお祝い

南西丸船長 内山正樹

日高さん、「半閉鎖的水域での底質環境に関する水産学的考察」の論文すごいです。

鹿児島湾を始め屋久島, 福島, 有明海・島原湾, 池田湖と調査された事について, 私には難しい言葉や式が出てきて, 途中から理解できなくなってしまいました。色々質問できればよかったのですが・・・残念。しかも, 私はデータ取りをお手伝いしただけなのに一部論文の共著者になっているではないですか, 驚きと共に恐縮してしまいます。

かごしま丸に乗船中, 当時の東川船長より依頼され日本やマレーシア各地の底質の粒度分析を二人で行ってましたが, このことが今回の研究題材のきっかけになったのでしょうか。性格と行動は普段大雑把なのに(私見), 分析の時は丁寧に行動し新たな一面を発見した物です。その後, 船に未練を残しながらも致し方なく陸上教員に転身し, 学生教育の傍ら地道に勉学・研究を重ね私には想像も出来ないほど努力してこられた結果がこの博士論文(草案)として実を結んだのですね。

海技試験勉強中もそうですが, あなたの, 大変なのにその素振りを見せないところは見習いたいけど, まだまだ追いつきません。私とは物事の見方・考え方が違うのだろうと思いますが, 何時かはそうなりたい。努力します。

研究執筆ご苦労様でした, そしておめでとうございます。

日高正康先生の博士論文（草案）を拝読させて頂いて

南星丸 航海士 福田隆二

この度は日高正康先生の突然のご逝去に触れ、まだ心の整理が出来ておりません。思えば私が学生でかごしま丸に乗船して以来、乗船実習では航海士として実習を指導して頂き、水産専攻科に進学してからは海技免状取得の為に海技試験についてのアドバイスをたくさん頂きました。その後私も航海士としてかごしま丸に乗船することになったのですが、仕事に関することから論文の書き方、さらにはプライベートな相談事まで親身になって考えてくださる、あこがれの先輩でした。このような優しい人柄は先生を知るすべての人が感じていたことだと思います。

先日西 隆一郎先生からご紹介頂いた日高先生の博士論文（草案）を、先生を偲びながら拝読させて頂きました。正直、不勉強な私には半分も理解できておりませんが、先生が練習船教員から陸上教員となられてからこれまでの間、私には想像もつかない御苦勞と御努力をされて来たのだと改めて感じました。この博士論文を仕上げるまでにどれ程の時間と体力をお使いになったのか…。私には想像がつかない程の御努力があったに違いありません。それなのに練習船に乗って来られる普段の先生は冗談好きで、周囲に御自分の苦勞など全く感じさせず、先生の周囲には笑顔があふれていました。闘病が始まってからもそれは変わりませんでした。お見舞いに行った我々には決してきついか苦しいという素振りはお見せになりませんでしたね。とても、とても日高先生らしいと思います。博士論文をここまで完成させておきながら正式に提出できず本当に悔しい思いをされたことと思います。でも、我々は先生の生前の御努力を忘れることはありません。本当にお疲れ様でした。そして、先生の慈愛に満ちたお人柄、先生の冗談、その他楽しいエピソードを思い出として頂きました。本当に、本当にありがとうございました。

日高正康先生、どうぞ安らかに眠り下さい。

博士論文完成お祝い

水産学部技術専門職員 児玉正二

日高先生博士論文完成おめでとうございます。

大型練習船敬天丸廃船にともない自分の意思とは関係なく陸上勤務をせざるおえなくなり論文完成までには、いろんなご苦労があったことと思います。私の場合は陸上勤務を希望して上がりましたが、思っていたより大変なところで、日高先生の助言、ご指導の下ここまで業務をやってこられた事を感謝しております。

思えば、24年度に野呂先生の業務の為に小型舟艇敬天を池田湖で半年間近く使用し調査しました25年度1月で調査が終わったので、鹿児島市の鴨池臨海地方へ持って帰る予定になっていました、日高先生より使用したいとの依頼があり1日だけ池田湖全域の海底地形調査を水産生物・海洋学分野の大学院生鶴成悦久氏と3名で事前準備を行い大しけの中7時間位調査を行った思い出があります。まさかこの調査が日高先生の博士論文の一部になっていたとは思っていませんでした。お世話になり迷惑をかけるばかりで申し訳なく思っていました、論文を拝見しほんの少しだけでも、先生のお役に立てたことをうれしく思っています。

日高先生 博士論文（草案）完成のお祝い
福島県水産課 涌井邦浩

日高先生

博士論文の完成、誠におめでとうございます。
大変な御努力があったことと、推察いたします。
そして、奥様にも心からお祝いを申し上げます。

先生が論文の中で述べられていた松川浦の底質「今後、自然状態では、底質の細粒化はあっても粗粒化が生じることはない。」につきましては、その後の福島県水産試験場相馬支場の調査で、先生の予測どおり、震災前の状態に戻りつつあるのが確認されています。

また、「従って、北西部のアサリ漁場は、人工的に底質改善を行う必要があると考えられる。また、この領域は、同時に沈降した海底面を砂質土で嵩上げしなければ潮干狩り場として使用することも困難と考えられる。」の御指摘につきましては、相馬双葉漁業協同組合や関係機関に提案し、アサリ漁場と潮干狩り場の復旧に役立てたいと考えております。

福島県の沿岸漁業は、東日本大震災にともなう東京電力(株)福島第一原子力発電所の事故で放出された放射性物質の影響で、今も操業自粛を余儀なくされています。松川浦のアサリやヒトエグサ（青ノリ）漁業も例外ではありません。

しかし、松川浦の漁業者は、津波で消失したヒトエグサ種場やアサリ漁場の復旧、母藻や母貝の確保を図り、来る漁業の再開に備え努力しております。そして、近い将来、先生の論文が松川浦の漁業再開に大いに役立つものと期待しています。

現在、私は松川浦を離れ、県庁水産課に勤務し、微力ながら行政面から本県水産業の復興に努めております。

福島県の沿岸漁業は、今も真冬の暗闇の中にありますが、必ず春は来る、明けない夜はない、と信じております。

これからも御支援をよろしく願いいたします。

(追伸)

あまりお酒の強くない先生が、一生懸命選んで送ってくださった焼酎、相馬支場の仲間たちを美味しくいただきました。

ありがとうございました。

日高先生 博士論文（草案）完成のお祝い

真潮会 松浦洋人

日高先輩、おめでとうございます！！

こんにちは。真潮会 松浦です。

水産学部の西教授から日高先輩の博士論文完成に際し、メッセージをお願いします、と光栄にもお声をかけていただきましたので、一言お祝いを言わせてください。

日高先輩、このたびの博士論文（草案）の完成、誠におめでとうございます。この論文作成のためには多くのご苦勞があったことと存じますが、それがこのような立派な博士論文として実を結んだことを、自分のことのように嬉しく感じております。

私は日高先輩の研究には関与していないので、 Cutter部や真潮会での思い出などを書きたいと思います。日高先輩とは大学時代からの付き合いですね。私がCutter部に入学した際は専攻科にご在籍であったかと思えます。当時のCutter部は上下関係が厳しく、一学年上の先輩でも怖くて、ましてや専攻科や大学院に在籍するCutter部OBは神様のような存在でした。さらに、日高先輩の世代はそれまでの鹿大の漕ぎ方を大きく変えただけでなく、結果として、Cutterの全国大会において、鹿大初の準優勝を成し遂げたという「伝説の世代」でありました。そんなすごい人たちの中にあっても、日高先輩は先輩面したところは一つもなく、いつもやさしい笑顔で私たちに接してくださいました。

その後、私が鹿児島大学の職員となり、真潮会の会長を務めることになってからは、日高先輩との関係がより深くなりました。日高先輩の研究室で現役部員と意見交換をしたり、真潮会の今後の活動をどうするか、どのようなサポートが必要なのか等、いろいろと話合いました。そういえば、日高先輩とともに考えた新しい真潮会会則の改正案を総会に提案した際、一部のOBから賛同が得られず、半分泣きながら説明し、やっと承認いただいたことも、今では懐かしい思い出です（笑）。

近年部員不足で廃部も危ぶまれたCutter部が、先の新人戦において男女ともに「準V」という素晴らしい成績を残し、古豪復活に向けスタートを切ったところですが、これも日高先輩が彼らを辛抱強く見守ってくださったことが、このような結果につながったものです。時にご自分のことを横に置きながらでも、Cutter部のためにご尽力くださったことに改めて深く感謝するとともに敬意を表する次第です。

博士論文の完成を節目に、日高先輩の更なる飛躍を祈念しております。そしてこれからも人生の先輩として様々な場面でご指導・ご鞭撻くださいますよう心よりお願い申し上げます。

日高正康先生博士論文（草案）に寄せて 鹿児島大学水産学研究科 鶴成 悦久

私が大学院に入学する際、退職された職場の上司から「私の甥にあたる人物（日高先生）が水産学にいる。とても頼りになる男だから入学したら挨拶に行きなさい」と助言されました。日高先生の研究テーマでもある底質分析については、私にとっても重要な研究課題でもあり、これらの分析法に関する助言や指導の相談を考えていました。ただ、入学後に先生に挨拶に行く機会（きっかけ）がなく、どのようにアプローチしようかと考えていました。ところがある日、私の指導教員である西先生との会話の中で、日高先生が現在、論文博士にて学位取得を目指されていることを聞きました。さらに、その指導は西先生が行っているとのこと。早速、西先生に日高先生の所に挨拶に行きたいと申し出たところ、池田湖の調査を日高先生と共同で実施するとのこと、これを機会にすれば良いとの話をいただきました。実に入学から半年以上が経過した、昨年1月ごろの話です。その池田湖の調査を契機に、ようやく日高先生に挨拶ができた次第です。

池田湖調査は、日高先生が過去に年間を通じて採取した底泥試料を用いて、池田湖の季節変化を明らかにするための研究の一環として、湖表面の水質と湖底地形図の作成を目的に実施されました。調査当日は、北西の季節風が吹き荒れ、大しけの中を日高先生、技術職員の児玉氏とともに鹿児島大学水産学部の敬天丸で調査しました。調査は敬天丸を時速3ノットの鈍足な速度で航行し、ソナーやセンサーを用いて水質調査と深淺測量を行います。そのため、あらかじめ設定した測線上を航行することが重要となるため、私は、あまりにも揺れる船の中で、調査が（それどころか船が沈没しないか）どうなることやらと不安に感じていました。ただ、操船中の日高先生と児玉氏は、実に楽しそうに会話を弾ませています。むしろこの逆境が楽しいかのように、明るく振舞って私を励ましてくれます。荒々しい航海を潜り抜けてきた日高先生や児玉氏を見て、船乗りとしての勇敢さと優しさを感じた調査中の出来事でした。

昨年6月に鳥取県米子市で開催された土木学会海洋開発シンポジウムでは、日高先生とともに論文審査から学会発表までの出来事を思い出します。論文審査中における指摘事項の検討や、学会での発表練習を、日高先生は私や加茂君と同じ目線で、共に切磋琢磨し学会を乗り越えました。発表時、緊張していた私達の姿を見て、日高先生は、自身の学会での体験談を面白おかしく語ってくれました。その結果、私たちは緊張がほぐれ、



写真1-池田湖調査（指宿市）
調査中の敬天丸で会話が弾む日高先生（左）と児玉氏（右）



写真2-西研メンバー（鳥取県米子市）
土木学会（海洋開発）会場にて撮影
左から西先生、鶴成、加茂君、田中先生（第一工大）、日高先生、細谷先生（津山高専）

堂々と発表ができたことを今でも感謝しています。

日高正康先生にはこれからも更なるご指導いただき、先生が培ってきた研究や技術を、後輩である我々に継承して頂けることを期待します。また、博士論文完成にあたり、研究室一同からのお祝いとともに、博士（水産学）として今後のご活躍をお祈りいたします。

編集後記（西 隆一郎）；

日高先生のご病気は予想以上に進行が速く、ほぼ完成していた博士論文を目にしながら、審査用書類提出期限直前に、論文提出を断念することになった。そして、ともに研究をしてきた西 隆一郎がその論文を預かることになった。

2013年夏、日高先生と底質関連の研究打ち合わせをした後に、少し気になる症状があるので市立病院でレントゲンを撮ってきますと言われた。そして、数日してから、先生のご病状と余命を大まかに伝えられた。その時に、博士論文の研究を進めて論文の完成を見るのか、ご家族とのゆとりある生活を優先されるのか相談を受けた。暗に日高先生は、西が、博士論文に関しては断念しご自宅での病気療養を優先してはどのアドバイスを行う旨を期待されているように感じたが、西はある意味で鬼の様なアドバイスを行った。「日高先生、西のアメリカ人師匠は鹿児島に来る直前に肺癌が見つかり、半年間生き残る確率が50%と告知されました。家族は奥様一人で、奥様の将来のことをとても心配され、奥様の将来に憂いを残さないようにいろいろと手配されました。また、その研究分野では、アメリカで一番研究費を稼ぐと言われた師匠で、研究をあきらめずに亡くなる直前まで勤務し、退職した直後に永眠されました。奥様と研究の両方を大事にされた方でした。加えて、海岸環境や沿岸域の底質移動に関する最も古い教科書を残した有名なアメリカ人研究者は、第一次世界大戦に召集されて、欧州の戦地に赴く直前に専門の教科書を出版社に持ち込み、その後、第一次世界大戦の戦地から帰ってくることはありませんでした。これが、その教科書です。」と、お見せした。そして、「西や研究室メンバーでお手伝いしますから、博士論文を完成しませんか」と、真に酷なアドバイスをした。

それから、10月頃まで病室からのメールや、研究室で直接話し合いながら、博士論文完成間近と思われるところまで達した。しかし、日高先生のご病状やお気持ちを考えると、もう限界ではないかと思うに至り、鹿児島大学大学院連合農学研究科への博士論文提出を断念することとなった。ひとえに、日高先生に対する西のバックアップが至らなかったせいであると後悔している。そして、日高先生のご病状を知りながらも、せめて博士論文の謝辞を書いて頂けませんかというところ、11月にお願いしたところ、日高先生が底質の研究を進めて来られる中でお世話になった方々の御指名と支援内容に言及された謝辞を頂戴し

た。そして、2014年の年が明けて、日高先生の博士論文（草案）がほぼ完成したのでホームページで閲覧可能にしましたとの第一報を、相良病院に入院中の日高先生にさし上げた。すると、早速、拝見していただき、奥様に嬉しそうに研究内容を説明されたとのことであった。それが、お亡くなりになられる1週間位前であった。

余命が分かったのに研究継続しましょうと鬼のようなアドバイスを日高先生にした当方には、反省の念しかない。しかし、日高先生がお亡くなりになる直前に、奥様から、「主人が嬉しそうに博士論文を説明してくれました。でも、中身は難しくて分からなかったのですが」との有難いお言葉を頂戴した。その言葉で、日高先生の御苦勞が報われたに違いないと感じた次第である。 — 日高先生、頑張りすぎて大変でしたでしょうけど、御苦勞が報われました。水産学部の底質研究の歴史に残る論文ができて、おめでとうございます。ゆっくり休んでください。 —