

沖縄・石西礁湖自然再生計画立案のための 熱・物質輸送数値シミュレーション

田村 仁*・灘岡和夫**・鈴木庸彥***・宮澤泰正****・三井 順*****

日本最大規模のサンゴ礁海域である石西礁湖を対象とし、そこでの自然再生推進マスター プラン策定において極めて重要な物理環境情報である流動、温熱環境および物質輸送に着目して数値シミュレーションを行った。その結果、リーフが発達し水深の浅い海域で高水温状態が持続されやすい傾向があることが確認されると同時に、小浜島東や西表島東岸の礁嶺の発達が著しく礁湖外から低温水塊が流入しにくい、いわゆる「潮通し」の悪い海域では高水温ストレスを受けやすい海域となっていることが確認された。さらにサンゴ幼生輸送計算より、礁湖中央部・西部から供給された幼生は礁湖内での自己加入の可能性が高いことが示唆され、また宮良川からの礁湖内への赤土流入の可能性が示された。

1. はじめに

石西礁湖（図-1）は石垣島と西表島の間に広がる東西20 km 南北15 km に及ぶ日本最大のサンゴ礁海域であるとともに、400種を超える造礁サンゴが分布する種の多様性の高い海域であり、礁湖内の4区域が海中公園地区に指定されている。近年、琉球列島では赤土汚染（大身謝ら、1998；満本ら、2000）や高水温に伴う白化現象（茅根ら、1999；Kayanne ら、2002），またオニヒトデによる食害などサンゴの劣化現象が各地で多数報告されてきているが、石西礁湖はこれら琉球列島のサンゴ幼生の供給源としても期待されている（鈴木ら、2004）。ことなどから、自然再生推進マスター プラン策定などその保全策が具体的に検討されてきている（例えば、岡野ら、2003）。実際、同海域では20年以上にわたりサンゴ被度等の生物調査（例えば、国際サンゴ礁研究・モニタリングセンター、2003）が行われてきていると同時に、近年ではサンゴ礁環境を知る上で極めて重要となる流動・温熱特性などの物理環境に着目した現地観測がなされてきている（灘岡ら、2003；古島ら、2003；三井ら、2004）。しかし、同海域において保全すべき重要海域やサンゴ群集修復事業実施海域を選定するためには、より詳細な温熱環境特性やサンゴ幼生の輸送・供給過程、周辺諸島からの赤土輸送といった物理環境についての知見が必要とされている。よって本研究では石西礁湖を対象とし、流動、熱・物質輸送に関する数値シミュレーションを行うことで、同海域における詳細な海水流動構造ならびに

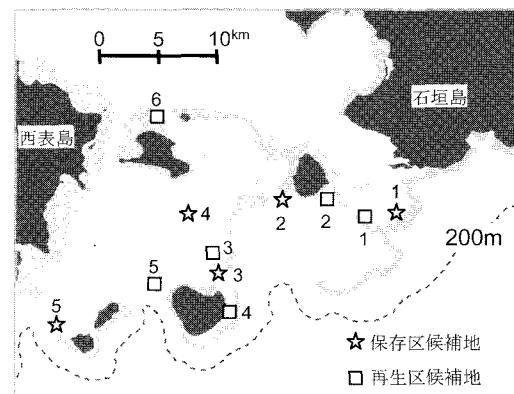


図-1 石西礁湖と保全区・再生区

熱・物質輸送特性の把握を試みた。

2. 石西礁湖自然再生事業

石西礁湖自然再生マスター プランは、石西礁湖及びその周辺海域のサンゴ礁を、持続可能な利用を図りながら円滑かつ効果的に保全・再生を推進することを目的とし、重要海域の保全、赤土汚染対策、オニヒトデ対策、持続可能な漁業・観光利用、サンゴ群集の修復など様々な観点からその再生事業を行う計画となっている。

そのなかでも MPA (Marine Protected Area, 海洋保護区) の選定は、石西礁湖自然再生事業において最も重要な保全・再生施策の一つとなっている。MPA 設定においては主に2つの方針に基づいてその選定が進められてきている。まず一つは保全すべき重要海域（以下、保存区）の選定であり、対象海域としては、良好なサンゴ群集が長期間維持されており、サンゴ幼生の供給源として寄与する海域、同時に固有性の高いサンゴ群集が分布している海域として位置づけられている。なお MPA に設定する場合には、将来的に開発を行わない地域として関係者が合意することや、制度やルールが必要な保全対

* 正会員 博(工) (独)海洋研究開発機構地球環境フロンティア研究センター 研究員

** フェロー 工博 東京工業大学教授 大学院情報理工学研究科 情報環境学専攻

*** JR 東日本 (独)海洋研究開発機構地球環境フロンティア研究センター 研究員

**** (株)テトラ ブロック本部 技術部

策や住民生活の妨げにならないことが条件となっている。

もう一つは、サンゴ群集修復事業実施海域（以下、再生区）の選定であり、再生区とは石西礁湖において重点的に保全すべき海域（重要海域）のうち、サンゴ礁生態系の健全性が損なわれている海域であって、原則としてその回復阻害要因が明らかである海域であり、主な再生策として、サンゴ移植を導入することにより人工的にサンゴ群集の再生を試みる海域と位置づけられている。

本研究では、以上の保全区・再生区を選定するための基本的な情報として、礁湖内における高水温ストレスの空間構造やサンゴ幼生輸送過程の把握、広域物質輸送特性の評価を行うこと目的として数値解析を実施した。

3. 数値解析手法

本研究では数値シミュレーションを基に、礁湖内における高水温ストレス特性、及びサンゴ幼生輸送パターン、また、物質の広域輸送過程を解明することを目的としている。一方、石西礁湖自然再生事業計画調査の一貫として、著者らは同海域を対象として、2002年10月上旬～12月上旬の冷却期、及び2003年5月上旬～7月上旬の加熱期に、多点係留系を用いた現地観測を実施しており、ここでは後者のデータの一部を用いて計算を行っている。現地観測内容およびそれらのデータ解析結果の詳細に関しては、灘岡ら（2003）、三井ら（2004）を参照されたい。

（1）リーフ海域を対象とした数値モデルの概要

温熱及び物質輸送計算で、その最も基礎となる海水流動場の計算には、浅水流方程式にリーフ海域特有の礁嶺の干出効果を評価するために、移動境界条件を取り込んだ数値流動モデルを用いている。また、水深データは海図を基に作成し、水深2m以下の極浅海域には、Paringit・灘岡（2002）によって開発された衛星画像の逆推定手法を用いて高精度水深マップを作成した（図-2）。

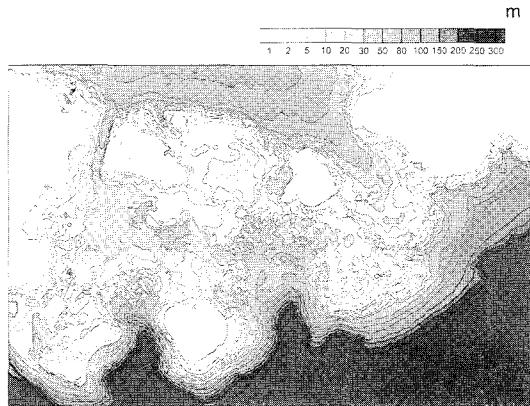


図-2 数値解析領域と水深分布

一方、温熱輸送モデルとしては、短波放射量の海中・海底面での吸収・反射効果、また地中伝導熱を考慮した熱収支解析手法（二瓶ら、2001）を基に定式化した数値熱輸送モデル（田村ら、2004）を用いている。さらにサンゴ幼生輸送過程の把握のためパーティクルトラッキングモデルを用いることで、そのラグランジュ的挙動の解析を行った。

次に計算条件に関して記す。計算期間は、高水温ストレス分布を評価するため一年で最も高水温状態となる7月下旬～8月上旬、さらに石西礁湖でのサンゴの産卵期に当たる5月上旬～5月中旬を対象として行った。

境界条件に関しては、2003年加熱期に行った現地観測（三井ら、2004）によって得られたリーフ外4地点における水位を主要四分潮に調和解析し、北・南・東側境界で与えると同時に、流速に関しては放射条件を用いることで三辺閉境界条件としている。また、西側境界に関してはスリップ壁条件を与えている。水温に関しては四辺境界で27°Cの一定値を与えた。さらに初期条件に関しては流速・水位に関しては静水状態とし、水温に関しては計算領域全体で27°Cとして与えた。そのほか計算に用いた主要なパラメータを表-1に示す。

（2）広域物質輸送評価のための数値モデルの概要

石西礁湖内は概して水深が浅く、それゆえ局所的な地形効果に強く支配された流動場になっている（灘岡ら、2003）。また、浅いがゆえに成層も微弱である。そのようなことから、石西礁湖内を主たる解析対象とした上記の数値シミュレーションでは、平面二次元モデルに基づく計算手法を採用しており、地形効果を十分な精度で反映させるために、高空間解像度計算とすることや水深分布データを高精度に与えることを重要視している。

一方、石西礁湖外の海域では、われわれの現地観測結

表-1 数値解析に用いた主なパラメータ

時間刻み幅(s)	1
東西方向格子幅(m)	100
南北方向格子幅(m)	100
移動境界適用閾値(cm)	10
海底摩擦係数 水深：5m以下 ：5～50m ：50m以上	1.0×10^{-2} 2.6×10^{-3} 1.0×10^{-3}
海表面アルベド	0.06
海底面アルベド	0.25
短波放射吸収係数(1/m)	0.2
地中空間解像度(m)	0.05
地中深さ(m)	0.5
地中温度拡散係数(m ² /s)	5.9×10^{-7}
地中熱容量(J/m ³ /K)	3×10^{-6}

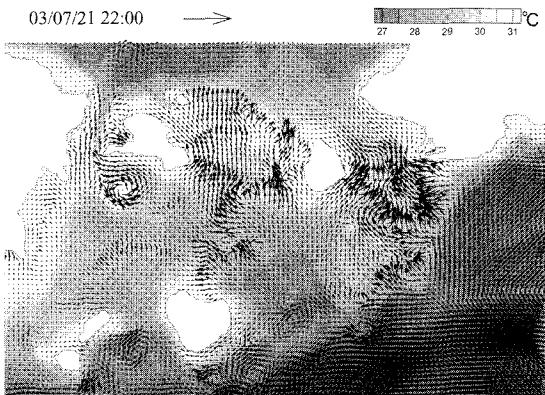


図-3 水温及び水平流速の空間分布

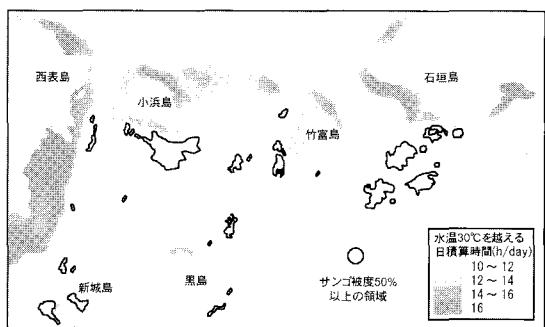


図-4 高水温海域と被度50%以上の分布範囲

果（三井ら, 2004）から明らかなように、外洋影響を極めて強く受ける。したがって石西礁湖外の海域を主たる対象とした数値シミュレーション、例えば、石垣島などからの石西礁湖への赤土流入を検討しようとする場合、石西礁湖と周辺陸域の河口域をつなぐ石西礁湖外の海域を含む領域を対象として、黒潮影響等の外洋影響を直接取り込んだ数値シミュレーションを実施する必要がある。

そこで、本研究では黒潮や中規模渦の解像を目的として開発され、北太平洋全域をカバーする JCOPE（日本沿岸予測可能実験）モデルを用いて、その計算結果から多重ネスティングを行い沿岸域流動計算を行った。具体的には JCOPE の水平解像度 1/12 度のモデル結果から、二重のネスティング（水平解像度：1/60 度及び 1/300 度）を用い、石西礁湖周辺を解像できる水平スケールでの数値解析を行った。計算手法の詳細に関しては、鈴木（2005）を参照されたい。

4. 数値解析結果と考察

（1）礁湖内温熱輸送特性と高水温海域の検討

図-3 は 7 月 21 日 22:00 における水温と水平流速ベクトルを示したものである。この時、ヨナラ水道を通じてリーフ外水塊が礁湖内へ輸送されるが、それに伴ってそ

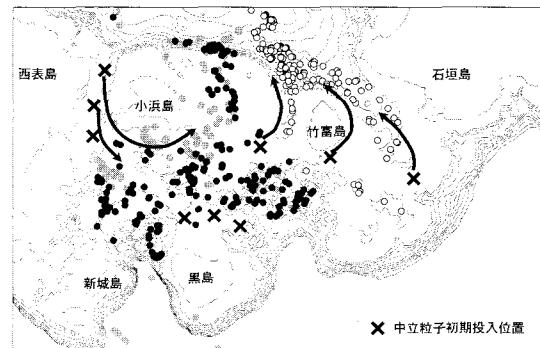


図-5 高サンゴ被度海域からの中立粒子の輸送パターン

表-2 保存区・再生区における日平均積算時間(h)

保存区 1	保存区 2	保存区 3	保存区 4	保存区 5	
0.04	9.05	2.09	1.43	6.75	
再生区 1	再生区 2	再生区 3	再生区 4	再生区 5	再生区 6
0.25	4.25	0.43	7.2	2.8	10.16

表-3 産卵 4 日後の水深 20 m 以浅海域残存率(%)

保存区 1	保存区 2	保存区 3	保存区 4	保存区 5	
52	14	72	4	0	
再生区 1	再生区 2	再生区 3	再生区 4	再生区 5	再生区 6
0	0	78	60	80	26

こで加熱された高水温水塊が礁湖内へ輸送されていることがわかる。

一般的にサンゴは水温 30°C 以上を高水温ストレスとして感じ、その継続時間の長さによって白化現象が生じ、サンゴ群集分布に影響を及ぼすということが報告されている（熊谷ら, 2004）。図-4 は数値解析によって得られた水温 30°C を越える日平均積算時間を示しているが、リーフが発達し水深の浅い海域で高水温状態が持続されやすい傾向にあることがわかる。しかし、一概に水深のみに依存しているのではなく、小浜島東や西表島東岸の礁嶺の発達が著しく、礁湖外から低温水塊が流入しにくい、いわゆる「潮通し」の悪い海域では高水温ストレスを受けやすい海域となっていることが確認できる。さらに 2003 年に行われたサンゴ被度調査結果で、サンゴ被覆度が 50% 以上の分布範囲と比較すると、高水温状態になりやすい海域には高被度領域が存在していないことから、数値解析結果の妥当性が示唆される結果といえる。

さらに表-2 は保存区・再生区における日平均積算時間を見ているが、保存区 2、再生区 6 が比較的長い時間高水温ストレスにさらされる結果となっていることが

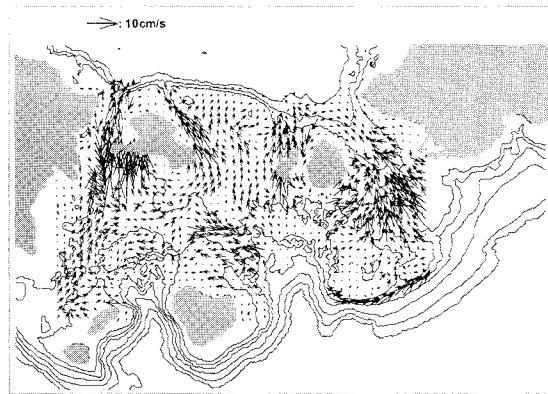


図-6 潮汐平均ラグランジュ流速

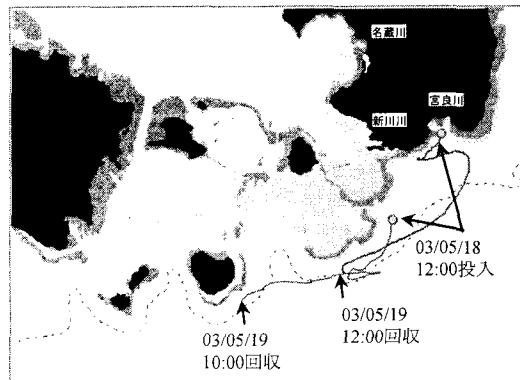


図-7 宮良川河口周辺からの漂流ブイの輸送パターン

確認できる。

(2) 礁湖内サンゴ幼生輸送パターン

図-5は、2003年のサンゴ産卵時に対応する5月12日22:00にサンゴ高被度領域から中立粒子を投入し、その追跡計算を行った結果である。石西礁湖東部投入粒子は、サンゴ幼生が定着行動を開始する産卵一週間後には礁湖北部に輸送されていることから礁湖内での定着率は低いことが示唆された。一方、中央部・西部に投入した粒子は同時期に広く拡散しながらもほとんどは礁湖内に留まっている。このことは中央部・西部から供給されたサンゴ幼生は礁湖内の自己加入の可能性が高いことを示している。

表-3はサンゴの産卵時に合わせて保全区および再生区に投入した粒子のうち、定着行動を開始する4日後(2003年5月16日20:00)までに、着底の可能性が高い水深20m以浅に残っていた粒子の割合を示している。この結果からも礁湖東部の保存区1・2、再生区1・2では着底可能性が総じて低く、一方、礁湖南の保存区3、再生区3・4では可能性が高いことがいえる。

一方、図-6は、礁湖内に面的に置いた粒子から得られた一潮汐間のラグランジュ平均流速を示しているが、これから図-5及び表-3の粒子移動の結果に対応して礁湖内では概ね北向きの流れが卓越していることが確認できる。

(3) 礁湖内への赤土輸送に関する大局的評価

図-7は、三井ら(2004)によって行われた現地観測結果で漂流ブイの輸送パターンを示している。宮良川河口及び石西礁湖南東岸に投入された漂流ブイは約一日かけて、ほぼ直線的な軌跡を辿り、石西礁湖南岸にまで達していることがわかる。このような一方向的な流れは当然ながら潮流によっては説明できず、海流の影響によるものと考えられる。一方、図-8は、JCOPEの計算結果から二重のネスティングにより得られた八重山列島周辺

2003/5/11 1:00 → 2m/s

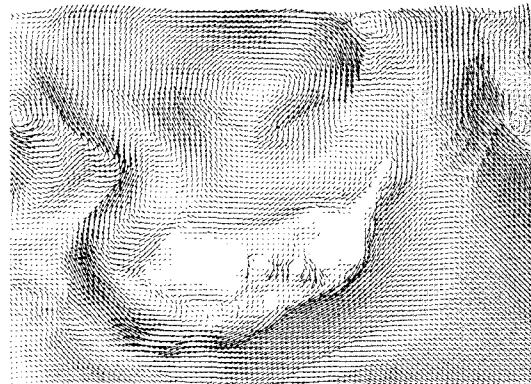


図-8 八重山列島周辺海域における流動場

海域における流動場の表層流速分布を示したものである。これから八重山諸島南岸には黒潮反流による東から西へ向かう海流が生じていることが確認され、漂流ブイが示した軌跡と明確に対応していることがわかる。実際、本モデルにおいて、宮良川河口に中立粒子を投入しその輸送計算を行ったところ、海流に乗った粒子は0.5-1日で石西礁湖南岸に達し、その一部は礁湖内に流入する結果となっている。一方、その他の主要河川である新川川、名蔵川河口に投入した粒子は礁湖北部に輸送され礁湖内への流入は確認されなかった。以上より宮良川から石西礁湖内への赤土輸送経路があることが示唆された。(ただしこのことは、新川川や名蔵川から石西礁湖への赤土流入がないということを主張するものではない。海流パターンは必ずしも時間的に一定したものではないうえ、吹送流の向きと大きさによっては、石西礁湖への赤土流入がこれらの河川からも生じる可能性がある。)

5. おわりに

本研究では石西礁湖を対象とし、流動、温熱・物質輸送に関する数値シミュレーションを行うことで、同海域

における詳細な海水流動構造・温熱・物質輸送特性の把握を試みた。数値解析結果と現地観測結果との比較より、チャネル部や礁湖内の特徴的な水温変動特性を本計算手法で再現できることが確認された。また、リーフが発達し水深の浅い海域で高水温状態が持続されやすい傾向にあるが、特に、小浜島東や西表島東岸の礁嶺の発達が著しく、礁湖外から低温水塊が流入しにくい、いわゆる「潮通し」の悪い海域では高水温ストレスを受けやすい海域となっていることが確認された。サンゴ幼生輸送パターンは礁湖内東部では概ね北向きのラグランジュ流速が卓越しており、中央部・西部から供給されたサンゴ幼生は礁湖内での自己加入の可能性が高いことが示された。さらに宮良川から石西礁湖内への赤土輸送経路があることが示唆された。

謝辞：本研究は、環境省平成16年度石西礁湖自然再生調査による調査研究委託ならびに日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究A(1)(一般)（研究代表者：灘岡和夫、課題番号：14205071）を得て行ったものであることを付記する。

参考文献

- 大見謝辰男・仲宗根一哉・小林孝(1998)：石垣島白保海域の赤土汚染とサンゴ礁の現況、沖縄県衛生環境研究所報、第32号、pp. 113-117.
- 岡野隆宏・長田啓・高橋啓介・相楽充紀(2003)：石西礁湖における自然再生推進調査について、日本サンゴ礁学会第6回大会講演要旨集、pp. 31.
- 茅根創・波利井佐紀・山野博哉・田村正行・井手陽一・秋元不二雄(1999)：琉球列島石垣島白保・川平の定側線における1998年白化前後の造礁サンゴ群集被度調査、Galaxea、JCRS、1, pp. 73-82.
- 熊谷航・田村仁・灘岡和夫・波利井佐紀・三井順・鈴木庸壱・茅根創(2004)：石垣島白保海域における水温環境特性と造礁サンゴ群集の分布、海岸工学論文集、第51巻、pp. 1066-1070.
- 国際サンゴ礁研究・モニタリングセンター(2003)：平成14年度年報、pp. 164-167.
- 鈴木庸壱(2005)：多重ネスティングモデル開発による琉球列島沿岸域の海水流動解析およびサンゴ・オニヒトデ浮遊幼生広域輸送特性の解明、東京工業大学情報環境学専攻修士論文
- 鈴木庸壱・灘岡和夫・宮澤泰正・波利井佐紀・安田仁奈(2004)：JCOPE および沿岸域モデルを用いたサンゴ・オニヒトデ幼生広域輸送特性の把握、海岸工学論文集、第51巻、pp. 1146-1150.
- 田村仁・灘岡和夫・Enrico Paringit・三井順・波利井佐紀・鈴木庸壱(2003)：リーフ地形効果に着目した石垣島東岸裾礁域の流動構造に関する研究、海岸工学論文集、第50巻、pp. 386-390.
- 田村仁・灘岡和夫・Enrico Paringit (2004)：石垣島東岸裾礁域の流動特性に関する現地観測と数値解析、土木学会論文集、No. 768/II-68, pp. 147-166.
- 田村仁・灘岡和夫・熊谷航：裾礁域におけるサンゴ群集周辺の流動・温熱環境特性に関する数値シミュレーション(2004)，海岸工学論文集、第51巻、No. 2, pp. 1061-1065.
- 灘岡和夫・三井順・濱崎克哉・波利井佐紀・田村仁・鈴木庸壱(2003)：沖縄・石西礁湖における海水流動構造および濁質・淡水・熱輸送特性に関する現地観測、海岸工学論文集、第50巻、pp. 1036-1040.
- 二瓶泰雄・灘岡和夫・綱島康雄・丸田直美・青木康哲・若木研水(2001)：サンゴ礁海域の温熱環境特性に関する多面的観測と解析、海岸工学論文集、第48巻、pp. 1146-1150.
- 三井順・灘岡和夫・鈴木庸壱・熊谷航・石神健二・波利井佐紀・Enrico Paringit・田村仁・安田仁奈・飯塚広泰・濱崎克哉・木村匡・上野光弘(2004)：沖縄・石西礁湖における海水流動および濁質・熱・サンゴ幼生輸送特性解明のための総合的観測と解析、海岸工学論文集、第51巻、pp. 1055-1059.
- 満本裕彰・大見謝辰男・小林孝(2000)：石垣島白保海域の赤土汚染とサンゴ礁の現況(第2報)、沖縄県衛生環境研究所報、第34号、pp. 121-124.
- 古島靖夫・菅野進・山本啓之・岡本峰雄・野島哲(2003)：石西礁湖におけるサンゴ産卵期の流動環境について、日本サンゴ礁学会第6回大会講演要旨集、pp. 12.
- Kayanne, H., Harii, S., Ide, Y., Akimoto, F.(2002): Recovery of coral populations after the 1998 bleaching on Shiraho Reef, in the southern Ryukyus, NW Pacific, Marine Ecology Progress Series, Vol. 239, pp. 93-103.
- Paringit, E.・灘岡和夫(2002)：多バンド・リモートセンシングに基づくサンゴ礁マッピングへの逆解析手法の応用、海岸工学論文集、第49巻、pp. 1191-1195.