

# 博士論文（要約）

## 低コスト AUV による海底マッピングおよび インターベンション手法

野口 侑要

東京大学大学院新領域創成科学研究科海洋技術環境学専攻

## 博士論文

低コスト AUV による海底マッピングおよび  
インターベンション手法

野口 侑要

# 目次

1	序論	4
1.1	はじめに . . . . .	4
1.2	本研究の目的 . . . . .	6
1.3	座標系とポーズの定義 . . . . .	7
1.4	本論文の構成 . . . . .	7
2	低コスト AUV による海底 3 次元マップ作成手法	9
3	複雑環境下でのミッションの特性に応じたインターベンションの経路計画手法	10
4	総合的な考察	11
5	結論	12
	参考文献	14
	謝辞	16

# 図目次

1	Sea urchin removal operation [1] . . . . .	4
2	Outline of the proposed system . . . . .	6

# 表目次

# 1 序論

## 1.1 はじめに

人類の持続可能な発展のためには、地球の全表面の約7割を占める海洋を適切に利用していくことが大切である。海は気候を安定させる等の機能を持ち、地球上の生命すべてが生きていくうえで重要な役割を果たしているほか、水産資源を人類にもたらす等の役割も果たしており、人類が海洋から得ている恩恵は枚挙にいとまがない。人類の持続的な発展のためには、海洋を詳細に理解しその環境を保全しながら、適切に開発し利用していくことが重要である。

近年、海洋環境を保全する試みが多く行われてきた。一つが、磯焼け海域での藻場保全の試みである。磯焼けとは「浅海の岩礁・転石行きにおいて、海藻の群落（藻場）が季節的消長や多少の経年変化の範囲を超えて著しく衰退または消失して貧植生状態となる現象」のことを言う [1]。藻場は富栄養化を防止したり海中に酸素を供給したりする等の一次生産の場であるとともに、立体的構造が幼稚魚等の保護育成場となっているため、生態系において大きな役割を果たしている。磯焼けの原因としては地球温暖化等様々な要素が指摘されているが、その一つとしてウニによる藻の食害が大きく取り沙汰されている。磯焼けの対策として海底の定期的なモニタリングや増えすぎたウニの除去作業が行われているが、その範囲は広く、十分な対策がなされていないのが問題である。



図 1: Sea urchin removal operation [1]

このように、海洋環境をモニタリングし、保全していくことは人類にとって大切なことであるが、海中で人が安全に活動できる時間的・空間的範囲には限りがあるため、十分な取り組みを行うことが困難であった。そこで、海中ロボットがしばしば利用されてきた。以下に海中ロボットの概要を述べる。

海中ロボットには、人が乗り込んで操縦する Human Occupied Vehicle (HOV)、人が遠隔操作をする Remotely Operated Vehicle (ROV)、そして全自動で行動する Autonomous Underwater Vehicle (AUV) の3種がある [2,3]。HOV は人が直接環境を観察し状況に応じた動作をすることができるという長所があるが、人が海中から無事帰還することを担保するために、潜航時間やハードウェアの要件が厳しく、運用のコストが大きいという短所がある。そのため、HOV を運用することができるのは、予算規模の大きい研究所等に限ら

れている。

ROV は人間が乗り込まずして人間の判断で動作するため、HOV よりも低コストでありながら複雑な動作をすることができるという長所を持つ。海中における情報通信には陸上と違って電波がほとんど使えないこと、音波を用いた情報通信では情報量や通信できる領域に大きな制限があること等の理由から、ROV の操作は一般的にテザーケーブルを用いて行われる。近年「海中ドローン」と呼ばれる小型で安価な ROV が登場する等、3 種類のうちでは現在最も普及している海中ロボットである。テザーケーブルで機体が物理的に接続されているということは、ケーブルを通じて電力を供給することで長時間の運用を可能にするというメリットをもたらすものの、機体が運用できる範囲がケーブルによって空間的に制限を受けるということは大きなデメリットとなる。機体が運用できる範囲は用意したケーブル長に依存するほか、ケーブルが海底の突起や漁網等に絡まらないように、細心の注意をもって運用しなければならない。また、ケーブルを通じて海流や波の影響を受け、機体の運動が安定しないことも起こりうる。これらの ROV がもつ問題は深さでの運用や、障害物の多い複雑な海域での運用時に顕在化しやすい。

AUV は全自動で動作を行うものであり、これからの海洋利用に最も期待されている海中ロボットである。人が操縦しなくてよいということは、人間の活動時間を超えて長時間運用し得るということであり、空間的・時間的に広い範囲の運用が期待されている。将来的には複数同時運用による効率的な運用や、支援船等が要らない低コストな運用が可能となると考えられており、海洋利用にとって大きな役割を果たすことを期待されている。一方で現状では、複雑な動作や判断の難しい動作を苦手としているほか、運用のコストが高いという短所を持っているため運用できる存在が予算規模の大きい研究機関等に限られ、水質調査や音響による地形探査等、比較的簡単な動作に用途が限られている。もし、AUV が安価で複雑な動作ができるようになれば、人類の海洋利用に大きく貢献できると期待されており、様々な研究が行われている。

AUV の用途として最近実用化されつつある動作の一つに海底の海中光学画像撮影がある [4-8]。海底環境を把握するためには写真撮影等の可視光による観測が不可欠であり、生物学や地質学、考古学といった学術調査から、資源探査や港湾工事、捜索救助活動等の多くの分野で行われているが、海中は陸上と異なり光の減衰が激しいため、高品質な画像を得るためには観測対象に対して数メートルのところまで近接する必要がある。そこで、人間が直接到達できない深度の海底の観測のために AUV がしばしば使用される。

しかしながら現状の AUV による海底光学画像撮影にはいくつか問題点がある。まず一点目は、画像撮影にかかる時間が長いことである。AUV は海底に接近して障害物回避をしながら航行しなければならないため、動作速度は抑えて潜航するのが一般的である。そのため、AUV が時間当たりに観測できる海底の範囲は限られてしまう。二点目は AUV 運用コストが大きいことである。現状の AUV は Doppler Velocity Log (DVL) や Inertial Navigation System (INS) 等の高価なセンサに依存している。また、海底光学画像撮影に用いられる AUV の多くは大型で重く、着揚収にクレーンが必要であり、運用が大変である。AUV は自動で海底の詳細な情報が得られる便利なツールであるが、利用が高コストであるため、あまり広く使われていない。

また近年、AUV によるインターベンション手法の研究が始まっている [9-13]。インターベンションとは、物体の回収や移動等環境に介入する動作のことをさす。AUV がインターベンションできるようになれば、自動で海底環境の保全等の仕事が行えるようになるので、海洋開発にとって大きな一歩になると期待されている。しかし、インターベンションをする際には海底等に近接しなければならないため、障害物への接触のリスクが高く、AUV にとって極めて危険な動作である。したがって実海域でのインターベンションの成功例はまだ少なく、実用化には至っていないのが現実である。

## 1.2 本研究の目的

上述したように、AUV に海中光学画像撮影やインターベンションといった動作を行わせることができれば、海洋利用にとって大きな武器になると期待されているが、コストや機能面の障害からあまり実用化されていないのが現状である。光学画像を撮影ができる AUV の応用先はある程度予算規模の大きい分野に限定されているのが現状であり、自然環境における AUV のインターベンションに至っては世界的にも成功例が限られているのが現状である。

本研究は低コストな AUV による海底マッピングおよびインターベンション手法を開発することで、日本の水産業のような予算規模の小さい産業でも AUV による効率的な海底のモニタリングとインターベンションによる恩恵が得られるようにすることを目的とする。

本研究は図 2 に示すようなシステムの実現を目指す。まず AUV ができるだけ広範囲の海底の光学画像を撮影し、広域の海底 3 次元マップを作成する。そしてミッションの特性に応じて効率的にインターベンションができる経路を計画し、それに従って実際にインターベンションを行うというものである。このシステムを DVL や INS 等の高コストなハードウェアに依存せずに実現させることを目指す。

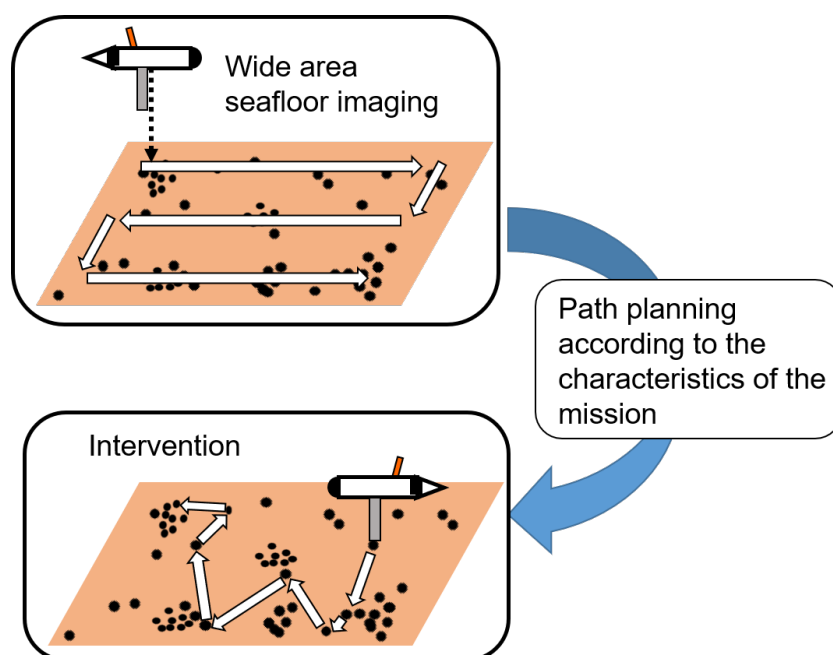


図 2: Outline of the proposed system

このようなシステムを実現するにあたり、参考にすべき研究がいくつか存在する。一つ目は東京大学・九州工業大学のチームが AUV による貝殻サンプリングを成功させた研究である [9, 10]。これは AUV が海底を光学カメラで観測したあと、人間が選定したターゲットをスラップガンでサンプリングするというものであり、提案システムに類似している。しかし、このシステムは高コストなハードウェアに依存していること、海底に障害物があるような複雑な環境でのサンプリングが考慮されていないこと、複数のターゲットに対する効率的な動作計画の議論がなされていない事が問題としてあげられる。また参考にすべきものとして、M. Dunbabin らによる研究も挙げられる [8]。これは、ステレオカメラを持った AUV が海底近くにおいて Simultaneous



Localization and Mapping (SLAM) をしながら潜航し、サンゴ礁に種付けを行うものである。これは、高コストになりがちな水中音響機器無しで海底の観測及び海底へのインターベンションを行うものであり、提案システムに類似している。しかし、視覚情報にすべてを依存しているシステムである故に、海底マッピングの効率が低くなり得る事や、複雑な環境における効率的なインターベンションの議論が十分になされていないことが問題点として挙げられる。このように、現時点でインターベンションを行うハードウェアの開発や、海底近くでの視覚情報を用いた SLAM の技術に関しては世界的に研究が行われているものの、低コストな AUV による広域の海底マッピング手法や、複雑な環境における効率的なインターベンション手法の提案は十分になされていないと考えられる。

したがって、本論文では、1. 低コスト AUV による海底 3 次元マップ作成手法の開発と、2. 複雑環境下でのミッションの特性に応じたインターベンションの経路計画手法の開発を行う。ただし本論文で取り扱うインターベンションとは「サンゴの種付け」や「磯焼け海域でのウニ取り」のように、固定アームの先をターゲットに近接させるものに限定する。本来、AUV によるインターベンションとしてはロボットアームを用いて海底にあるフライトレコーダをサンプリングするというような複雑な作業も含まれるが [12–16]、エンドエフェクタを安全にターゲットに近接させるという動作の構造が同様であるため、本手法の応用が期待できる。

## 1.3 座標系とポーズの定義

本論文において、世界座標系は NED (North-East-Down) 座標系とする。また、手法の説明等でポーズという概念を使用するが、これは位置と回転の両方を含む概念であり、本論文では下のように  $4 \times 4$  の同次変換行列で表す。

$$\xi = \begin{pmatrix} \mathbf{R}_3 & \mathbf{p} \\ \mathbf{0} & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

$\mathbf{R}_3$  は  $3 \times 3$  の回転行列を示す。 $\mathbf{p}$  は以下の 3 次元の変位ベクトルを示す。

$$\mathbf{p} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (2)$$

## 1.4 本論文の構成

以下に各章の概要を示す。

第 2 章「低コスト AUV による海底 3 次元マップ作成手法」では AUV による既存の海底 3 次元マップ作成手法の問題点を上げたあと、低コスト AUV による海底 3 次元マップ作成手法を提案する。さらに、実海域試験をもとに提案手法の有効性を検証する。

第 3 章「複雑環境下でのミッションの特性に応じたインターベンションの経路計画手法」では、AUV によるインターベンションの実用化に向けて必要な機能について議論したあと、複雑環境下でのミッションの特性に応じたインターベンションの経路計画手法を提案する。さらに、シミュレーションによって提案手法の有効性を検証する。

第 4 章「総合的な考察」においては、提案した海底 3 次元マップ作成手法とインターベンションの経路計画手法の統合について議論する。さらに今後の展望についてまとめる。

第5章「結論」では各章を総括する。

（尚、第2章から第4章は内容が雑誌掲載等の形で刊行される予定であり、インターネット公開出来ないために除外されている。）

## 2 低コスト AUV による海底 3 次元マップ作成手法

内容が雑誌掲載等の形で刊行される予定であるため除外。

### 3 複雑環境下でのミッションの特性に応じたインターベンションの経路計画手法

内容が雑誌掲載等の形で刊行される予定であるため除外。

## 4 総合的な考察

内容が雑誌掲載等の形で刊行される予定であるため除外。

## 5 結論

海洋の適切な利用のために、AUV による海底光学画像撮影とインターベンション手法を開発することが大切であるが、現状のシステムでは運用コストが高いうえに機能が限られているのが問題であった。日本の水産業のような予算規模の小さい産業でも AUV による効率的な海底のモニタリングとインターベンションによる恩恵が得られるようにすることを目的として、本論文では図 2 に示すようなシステムの実現を目指すにあたって重要な要素である「低コスト AUV による海底 3 次元マップ作成手法」と「複雑環境下でのミッションの特性に応じたインターベンションの経路計画手法」の提案を行った。

第 2 章で提案した海底 3 次元マップ作成手法は「AUV が高速 ( $\sim 1$  [m/s]) に任意方向の壁面追従ができるため、険しい海底でも短時間の潜航で広い範囲の海底マップを作成することが可能」、「比較的安価なセンサである深度センサデータの効率的な処理により、簡単に合理的な海底 3 次元マップを作成することが可能」「海底付近の流速場を推定可能」という特徴を持つ。本手法は新たに開発した AUV "HATTORI-2" に実装され、有効性が検証された。本手法を用いることで、低コストな AUV でも高速に海底のサンゴ礁を観測することができた。得られた海底の光学画像から、潜航ごとに海底 3 次元マップや流速場を推定することに成功した。環境センサの結果と合わせてマルチモーダルな海底 3 次元マッピングに成功したことは、低コストな AUV でも様々な分野で役立つ観測ができる可能性を示した。各潜航で得られた海底の 3 次元マップおよび流速場を比較することにより、MSE が小さいものに関しては、スケールの誤差や流速場の不自然さが少ない結果を得ることができ、MSE が大きいものに関してはスケールの誤差や流速場の不自然さが大きい結果が得られたことで、本手法で提案していた MSE が 3 次元マップの妥当性検証に有用であることを示せた。またそれらの比較から、測線毎に余り方向を変えないようにすることで測線同士のオーバーラップを増やせば、マップの妥当性向上に効果があることが確認できた。以上のように、本手法は低コストな AUV を用いながら合理的な海底 3 次元マップを作成することができる有用な手法であると考えられる。特に、深度センサのみを用いて 3 次元マップのスケールや姿勢等を同定する機能は汎用性が高く、様々な用途が期待できる。

第 3 章においては、実用化に向けた機能として「複雑な環境下でも動作できること」と「ミッションの特性に応じた経路計画ができること」に注目し、強化学習を用いて戦略的にターゲットへの近接を行う経路計画手法を提案した。経路計画手法は強化学習を用いて各ターゲットに対して近接することの報酬の期待値を計算するローカルパスプランニングと線形計画法を使って戦略的にターゲットを回るパスを考えるグローバルパスプランニングから構成されている。本手法に対しては石垣島沖にて得られた海底モデルを用いたシミュレーションを行い、現実の険しい海底 3 次元マップに対してミッションの特性に応じて効率的にインターベンションを行う経路が計画できることを示した。シミュレーションにおいては、異なる衝突時の報酬や制御のノイズを持つミッションを複数定義し結果を比較することによって、定義によって得られる性能が大きく異なるということを確認した。このことは、本手法が既存の AUV システムにおける効率的な経路計画手法であるということだけではなく、AUV システムの設計時に工学的に重要な視座を与えるものであることを示している。また、計算時間削減の試みとしてランダムな海底環境情報に対して事前に強化学習をしておくことで、ある海底環境情報に対して新たに学習をすることなく経路を計画する方法の有効性を示した。

第 4 章においてはこれら二つの手法の統合の際に問題になる事柄について考察した。二つの手法で AUV のハードウェア要件が若干異なっているが、特に大きな障害ではないことを説明したあと、海底 3 次元マップとインターベンションの経路計画手法の関連について議論した。第 2 章で得られた海底 3 次元マップには 3 次元情報の欠如やスケールの誤差等の問題が含まれることがあるが、それらに対して考えられる解決策を述べた。

また、今後の展望について述べた。

本論文で提案した「低コスト AUV による海底 3 次元マップ作成手法」と「複雑環境下でのミッションの特性に応じたインターベンションの経路計画手法」はそれぞれ独立して使用することができる汎用的な手法であり、単独でもこれからの人類の海洋利用にとって大きな貢献をするものと期待するが、将来的には二つの手法を統合し、実海域でのインターベンションを成功させることで、低コスト AUV でも効率的なインターベンションを行うことのできるシステムを完成させたいと考えている。いつの日か世界中の海でたくさんの AUV がインターベンションを行い人類に貢献している日を夢見て博士論文の結びとしたい。

## 参考文献

- [1] 水産庁, “改訂 磯焼け対策ガイドライン,” 2015.
- [2] Y. R. Petillot, G. Antonelli, G. Casalino, and F. Ferreira, “Underwater Robots: From Remotely Operated Vehicles to Intervention-Autonomous Underwater Vehicles,” *IEEE Robotics Automation Magazine*, vol. 26, no. 2, pp. 94–101, 2019.
- [3] 巻 俊宏, “AUV: 自律型海中ロボット (特集: 「地球環境の変化を知る—技術はどのように貢献するか—」),” *日本機械学会誌*, vol. 121, no. 1199, pp. 24–27, 2018.
- [4] 巻俊宏, 浦環, and 坂巻隆, “自律型水中ロボットによる鹿児島湾たぎり噴気帯の 3 次元画像マッピング (第 3 報)-測位情報と視覚的特徴の併用による画像モザイクング手法,” *海洋調査技術*, vol. 23, no. 1, pp. 1\_1–1\_10, 2011.
- [5] D. L. Bongiorno, M. Bryson, T. C. Bridge, D. G. Dansereau, and S. B. Williams, “Coregistered hyperspectral and stereo image seafloor mapping from an autonomous underwater vehicle,” *Journal of Field Robotics*, vol. 35, no. 3, pp. 312–329, 2018.
- [6] T. Maki, A. Kume, and T. Ura, “Volumetric mapping of tubeworm colonies in Kagoshima Bay through autonomous robotic surveys,” *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, vol. 58, no. 7, pp. 757 – 767, 2011.
- [7] S. D. Ling, I. Mahon, M. Marzloff, O. Pizarro, C. Johnson, and S. Williams, “Stereo-imaging AUV detects trends in sea urchin abundance on deep overgrazed reefs,” *Limnology and Oceanography: Methods*, vol. 14, no. 5, pp. 293–304, 2016.
- [8] M. Dunbabin, J. Roberts, K. Usher, G. Winstanley, and P. Corke, “A hybrid AUV design for shallow water reef navigation,” in *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2105–2110, IEEE, 2005.
- [9] Y. Nishida, T. Sonoda, S. Yasukawa, J. Ahn, K. Watanabe, K. Ishii, and T. Ura, “Benthos Sampling by Autonomous Underwater Vehicle Equipped a Manipulator with Suction Device,” in *2019 IEEE Underwater Technology (UT)*, pp. 1–4, IEEE, 2019.
- [10] S. Yasukawa, Y. Nishida, J. Ahn, T. Sonoda, K. Watanabe, and K. Ishii, “Development and Sea Trials of Vision-Based Control for Sampling-AUV,” in *2019 IEEE Underwater Technology (UT)*, pp. 1–4, IEEE, 2019.
- [11] M. Dunbabin, F. Dayoub, R. Lamont, and S. Martin, “Real-time vision-only perception for robotic coral reef monitoring and management,” in *ICRA Workshop on Underwater Robotics Perception. IEEE*, 2019.
- [12] D. Youakim, P. Ridao, N. Palomeras, F. Spadafora, D. Ribas, and M. Muzzupappa, “Moveit!: autonomous underwater free-floating manipulation,” *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 24, no. 3, pp. 41–51, 2017.
- [13] D. Ribas, N. Palomeras, P. Ridao, M. Carreras, and A. Mallios, “Girona 500 AUV: From Survey to Intervention,” *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 17, no. 1, pp. 46–53, 2012.
- [14] Y. Wang, S. Wang, Q. Wei, M. Tan, C. Zhou, and J. Yu, “Development of an Underwater Manipulator and Its Free-Floating Autonomous Operation,” *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*,



- vol. 21, no. 2, pp. 815–824, 2016.
- [15] Y. Wang, R. Wang, S. Wang, M. Tan, and J. Yu, “Underwater bioinspired propulsion: From inspection to manipulation,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 67, no. 9, pp. 7629–7638, 2019.
- [16] A. Carrera, M. Carreras, P. Kormushev, N. Palomeras, and S. Nagappa, “Towards valve turning with an AUV using Learning by Demonstration,” in *2013 MTS/IEEE OCEANS - Bergen*, pp. 1–7, 2013.

# 謝辞

本論文は多くの方々の助力をいただきここにまとめるに至りました。お世話になった皆様に心から感謝を申し上げます。

東京大学巻研究室の皆様には、常日頃から多大なご助力を賜りました。巻俊宏准教授には指導教員として日頃から研究についてのアドバイスを頂きました。講義や輪講会での指導だけでなく生活面での指導もしていただきました。また、国際学会や多くの実海域試験に参加させていただき、海中ロボット研究の楽しさから大変さまで様々なことをご教授いただきました。のびのびと研究をさせていただき、ありがとうございました。ソートン・ブレア准教授には、お話をさせていただける時間は限られてはいましたが、本研究に関して様々な有用なアドバイスをいただきました。坂巻隆さんには研究室生活や実海域試験等多くの場面でお世話になりました。特に石垣島での実験ではとてもお世話になりました。杉松治美さんにはフォーラムのパネルディスカッションの機会をいただく等、研究のあり方について深く考える機会をいただきました。増田殊大さんには様々な場面でハードウェアに関する多くのアドバイスを頂きました。小池哲さんには磯焼け問題に関して様々な知見を与えてくださり、大変勉強になりました。長野和則さんには画像処理等で貴重なアドバイスをいただきました。松田匠未さんにはいつも優しく声をかけて頂き、相談に乗ってくださいました。高橋朋子さんには研究の進め方等様々なことについて教えて頂きました。山縣広和さんにはビジネスコンテスト出場に付き合ってもらう等、様々な面でお世話になりました。堀本大洋さんには輪講会で貴重なアドバイスをいただきました。大熊健児さんには地下実験室の整理や物品管理・ロボットの運用を手伝っていただく等、様々なことでお世話になりました。ゾンファーさん、メフルさん、ウメシュさんには、輪講発表時にアドバイスをいただいた他、研究室内でフランクに接していただき、英語でのコミュニケーションの訓練をしていただきました。岩本聖奈子さん、武永玲子さんには出張や行事の際の準備等様々な面でサポートして頂きました。後輩の皆さんはくだらない冗談も快く聞いてくれ、息抜きになりました。

また、研究室外の皆様にも様々なご助力を賜りました。名古屋大学の Marc Humblet 特任准教授、海洋研究開発機構の古島靖夫さんには石垣島での実験をはじめ様々なことでお世話になりました。アルファ水工コンサルタツの綿貫啓さんには磯焼けに関して様々な知見を与えてくださり、大変勉強になりました。FullDepth社の伊藤社長には、HATTORI-2の製作や運用でお世話になりました。東京大学の高木健教授、多部田茂教授、和田良太准教授、東京海洋大学の近藤逸人教授には、本論文の審査にあたり重要な示唆を賜りました。

この他、とても多くの方々にご協力頂きました。皆様に心から感謝申し上げます。

最後に常日頃から学生生活をサポートしてくれた妻・両親・祖父母・親戚およびペットの金魚達に心からの感謝を述べ本論文の結びとさせていただきます。博士課程の3年間には私の力不足で苦しい時期もありましたが、おかげさまでこのように博士論文を執筆することができました。ありがとうございました。これからも末永く宜しく願い致します。