



海洋循環に果たすスケール間相互作用の理解 /
東西・南北・上下から見た日本の気象と気候

沿岸海洋モニタリングの ための高解像度モデルの 開発

— 四国宿毛湾を例にして —

美 山 透

森 岡 優 志

Varlamov Sergey

宮 澤 泰 正

**Development of a High-Resolution Model for
Coastal Monitoring -A Case Study for
Sukumo Bay-**

**Toru Miyama • Yushi Morioka • Sergey
Varlamov • Yasumasa Miyazawa**

みやま とおる : 国立研究開発法人海洋研究開発機構
アプリケーションラボ
もりおか ゆうし : 国立研究開発法人海洋研究開発機構
アプリケーションラボ
Varlamov Sergey : 国立研究開発法人海洋研究開発機構
アプリケーションラボ
みやざわ やすまさ : 国立研究開発法人海洋研究開発機構
アプリケーションラボ

宿毛湾の沿岸総合管理の活動と連動し、水平分解能 1/500 度海洋予測モデルの開発をしており、これを紹介する。予測モデルにフィードバックさせるための、気象衛星「ひまわり 8 号」による海面水温や地元漁業関係者による観測を活用する可能性について論じる。

1. はじめに

日本の沿岸環境においては黒潮や潮汐などの外洋の影響を受けつつ、複雑な海岸線や海底地形により、沿岸特有の変動があらわれる。日本の沿岸は水産業・運輸・マリレジャーなどの経済活動の舞台であるため、変動現象への理解と、それによって期待される予測へのニーズは高い。本研究が対象とする四国西岸は、リアス式の複雑な地形を持つ沿岸に、四国と九州にはさまれた豊後水道を通して、黒潮と潮汐という外洋の影響が見られる好例である（図 1）。

日本の沿岸では、黒潮の変動や潮汐の影響を受けた外洋水の進入が沿岸環境に大きく作用する。海洋研究開発機構（JAMSTEC）のアプリケーションラボは、黒潮・潮汐の外洋変動を取り入れつつ、湾スケールの現象も計算できるマルチスケールの入れ子数値モデルを使い、高知県宿毛湾を対象として、超高分解能（約 200 m）沿岸海洋環境予測モデルを開発している。本稿では、この宿毛湾での予測モデル開発の取り組みについて紹介する。予測モデルは現在まだ開発中であり、さまざまな課題に取り組んでいる最中であるが、そのような沿岸の予測モデリングの課題を共有することは、大槌湾をはじめ、他地域での取り組みの参考になると思われる。

第 2 節では、このモデルの開発に取り組んだ背景と予測モデルについて記述する。第 3 節では、観測によるモデル検証の課題について述べる。第 4 節で、今後の展望について述べる。

2. 研究の背景と予測モデル

宿毛湾は高知県の最西南端に位置し、豊後水道に面している（図 1）。宿毛湾は沖合を流れる黒潮

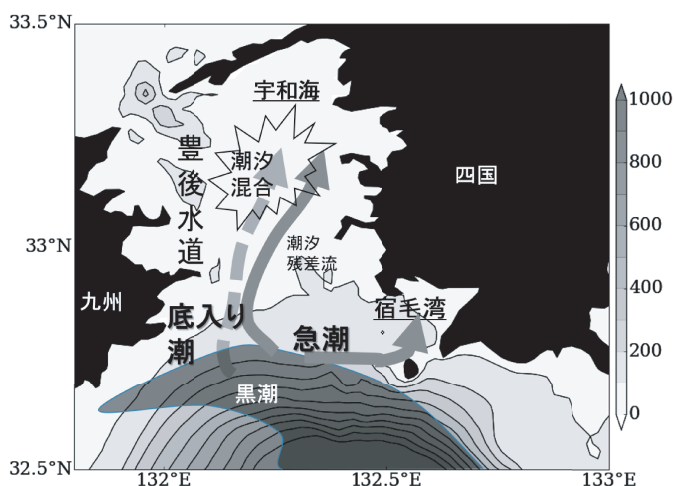


図1 本稿の対象海域と物理. 陰影と等値線は海底地形.

の影響を受けて、日本でも有数の海洋生物種が存在しており、豊かな漁場となっている。沖合ではイワシやサバなどの中型まき網の漁が盛んである。湾内ではブリやクロマグロなどの養殖も行われている。また、海水浴やダイビングや磯釣り、だるま夕日など観光スポットとしても有名である。

しかし近年、宿毛湾の海洋環境が変わりつつある。2009年から毎年湾内で赤潮が発生し、養殖への被害が報告されている。また、海洋生物の住処となる藻場が、磯焼けにより著しく減少している。これら海洋環境の変化とともに、宿毛湾の漁獲量も年々減少を続けている。

宿毛湾で見られるさまざまな問題に対応するため、宿毛湾に位置する宿毛市と大月町は、2012年11月から笹川平和財団・海洋政策研究所の支援を受けて、宿毛湾の沿岸域総合的管理研究会を行ってきた。数年に渡って、宿毛湾の環境状態を調べる「海の健康診断」が行われ、診断の結果や対策などをまとめた報告書が2016年2月に宿毛市長と大月町長に提出された（海洋政策研究所 2016）。

JAMTEC のアプリケーションラボは 2014 年 12 月より研究会に参加し、沿岸域総合的管理に貢献できる海洋予測モデルの開発を行うことになった。沿岸の予測には、外洋の影響を取り入れつつ、湾スケールの現象を解像できるようにすることが望ましい。本研究では、豊後水道を対象とする、水平分解能 1/500°（約 200 m）の分解能モデルを

もつ予測モデル（JCOPE-Sukumo500）を設定した。Sukumo500 は、黒潮を予測する西太平洋を対象とする JCOPE2（分解能約 9 km）（Miyazawa *et al.* 2009）、それに組み込まれ潮汐の変動も考慮に入れた JCOPE-T（水平分解能約 3 km）（Varlamov *et al.* 2015）にさらに入れ子として組み入れることで、外洋の影響を取り入れている（図 2（a））。図 2（b）の四角枠が Sukumo500 の計算領域である。領域は、地元の漁業関係者と相談し、漁業の関連領域を含むように設定した。この領域全てを約 200 m 分解能で解いている。

予測モデルの初期値作成のために、JCOPE2 と JCOPE-T はデータ同化を行っている。JCOPE2 は 3D-VAR によるデータ同化を行っている（Miyazawa *et al.* 2009）。2016 年 10 月からは、従来の 3D-VAR から、データにより共分散行列の影響距離を使い分ける Multiscale 3D-VAR に変更し（Miyazawa *et al.* 2017）、3.1 節で紹介する気象衛星「ひまわり 8 号」の海面水温の同化を改善している。JCOPE-T は JCOPE2 へのスペクトルナッジングを行っている（Varlamov *et al.* 2015）。Sukumo500 はデータ同化を行っておらず、JCOPE-T で与えられる境界条件を通して現実場に近づくような影響が与えられる形になる。

図 2（c）は、高知県柏島周辺（図 2（b）の黒四角に対応）での Sukumo00 が計算した流速を Google Earth に投影した図である。外洋の影響を取り入

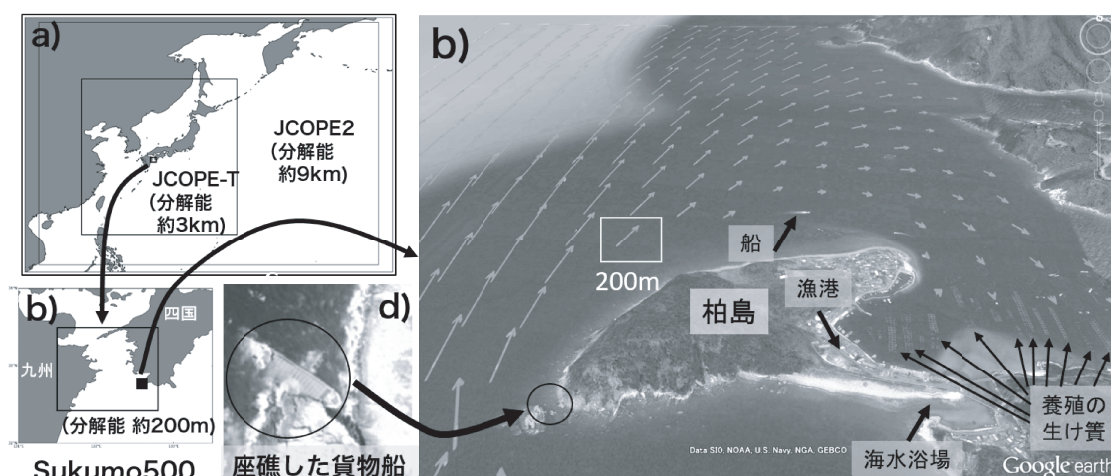


図2 a) 外洋の影響を取り入れるモデル. b) 拡大図. 四角枠がSukumo500の計算領域. c) b)の黒四角を拡大した柏島周辺の流速をGoogle Earthに投影した図. d) 貨物船が座礁した時の航空写真. この対応のための流速情報を提供した.

れつつ、約 200 m の分解能により、漁業・運輸・海洋レジャーの活動で実感できるスケールでの計算が可能になる。

このモデルの準備を行っている 2016 年 3 月 15 日、宿毛湾の柏島の西岸で貨物船が座礁が発生した。油流出などの恐れがあったため、自治体へ潮流に関する予測情報を提供してほしいと依頼があり、Sukumo500 流速情報を地元関係者に提供した（森岡 2016）。以来、2 日先までの予測の更新を毎日実施している。予測の流速情報は web サイトを通して地元関係者に提供している。

3. 観測によるモデルの検証

沿岸のモデリングでは、高い解像度で計算される大量の結果に比して、それを検証・データ同化を行うためのデータが少ない。従来の係留ブイなどに加え、観測データを充実させる新たな取り組みが求められる。本研究で取り組んでいる試みとして、気象衛星「ひまわり 8 号」による海面水温データとの比較と、漁業者による観測データの収集について紹介する。

3.1 気象衛星「ひまわり 8 号」による海面水温データ

2015 年 7 月に運用を開始した気象衛星「ひまわ

り 8 号」は、従来のひまわりに比べて水平分解能の倍増、可視カラー画像化、高頻度の観測が可能などの強化がなされた人工衛星である。宇宙航空研究開発機構・地球観測センター（JAXA/EORC）は、「ひまわり 8 号」から空間分解能 2km の海面水温データを作成している。時間解像度は 10 分ごとのデータまで得られる。従来の極軌道衛星による海面水温プロダクトに比べるメリットは、静止軌道による高い時間分解能により、同一点で海面を観測する時刻が多く、1 日の中で雲の無い時間に海面温度を観測できる機会が大幅に増えることである。そのため、1 日コンポジットを作成した場合、従来のデータに比べて、雲で観測されない場所が少ない海面水温の分布が得られることが多い。

図 3 は、「ひまわり 8 号」の海面水温データから作成した 2017 年 3 月 17 日の 1 日コンポジットを宿毛湾周辺で見た図である。四国足摺岬に接岸した黒潮から伸びた暖水舌（急潮）が明瞭にとらえられていることがわかる。

図 4 は、「ひまわり 8 号」による海面水温（図 4 (a)）と、Sukumo500 で計算された海面水温（図 4 (b)）とを比較した例である。Sukumo500 の海面水温は、2016 年 7 月 31 日に「ひまわり 8 号」が観測した、豊後水道の東側で温度が高く、西が温度が

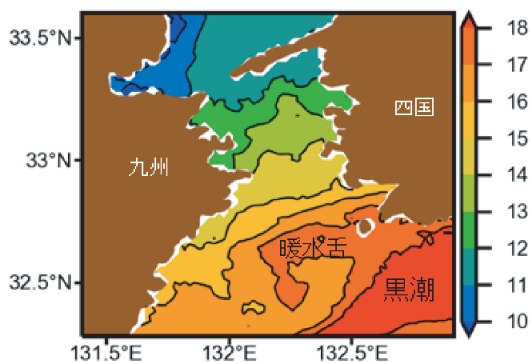


図3 色と等値線が豊後水道の「ひまわり8号」海面水温データの2017年3月17日コンポジット(°C). 本稿にて使用した「(ひまわり8号から作成した)海面水温に関する研究プロダクト」は、宇宙航空研究開発機構(JAXA)の分野横断型プロダクト提供サービス(P-Tree)より提供を受けた。

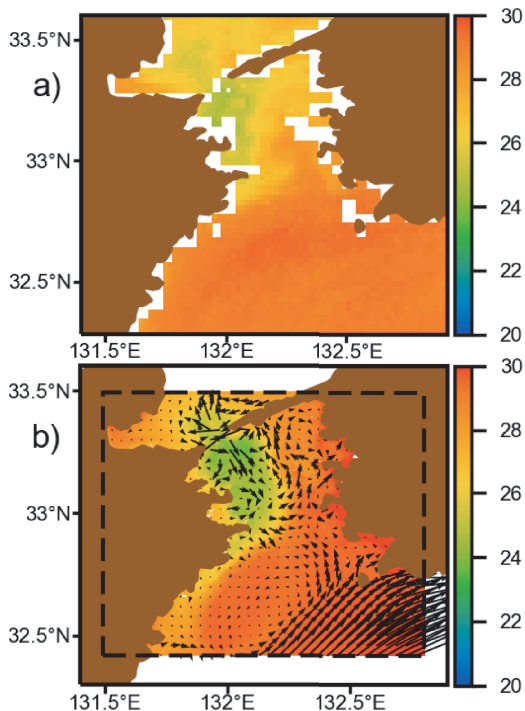


図4 (a) 色が豊後水道の「ひまわり8号」海面水温データの2016年7月31日コンポジット(°C). (b) 色がSukumo500による2016年7月31日平均の海面水温(°C). ベクトルが同じく流速. 流速は東西・南北に20グリッド間隔のみ描画した. 点線はSukumo500の計算領域.

低いという特徴をとらえていることがわかる. 一方で, 定量的に見ると, Sukumo500の西側の低温は, 観測に比べて低すぎる. この低温は潮汐混合によるものであるから (Takeoka *et al.* 1997), この比較により Sukumo500の潮汐混合が強すぎるということがわかる. この低温により, 東側の高温とフロントが生じ, それに対応する地衡流により北向きの流れが発生している. この流れは, 南から高温を南から北に運んでおり, 豊後水道の東側では西側とは逆に「ひまわり8号」に比べて高温のバイアスになっている. この例で見られるように, 「ひまわり8号」の海面水温データは, 沿岸域でモデルと水温分布比較するのに有用であり, モデルの検証と調整に役立つ.

3.2 漁業者による観測

提供している予測モデルのフィードバックとして, 宿毛湾の漁業者から検証のデータの提供を受けている. 図5は, 提供を受けたデータを記した, 手書きのモデルの一例である. 漁船に設置された海面の水温と, 3層の流速計のデータが得られている.

この提供されたデータから, Sukumo500では図3のような暖水舌がうまくとらえられない場合があることが明らかになっている. 原因の一つは, モデルの境界条件によると考えられる. 図3のような暖水舌を再現するには高い分解能が必要であるが (Isobe *et al.* 2010), Sukumo500の計算領域は, 図4(b)の点線の領域のみであり, 暖水舌の再現のために Sukumo500の高分解能が活かされていない. 漁業者によるフィードバックにより, 暖水舌が漁場形成に重要であることが明らかになったので, 新たなモデル領域の設定を準備中である.

地元の多くの漁船には, 図5のような水温と流速を観測する装置が取り付けられており, そのデータを集めることで観測データを大幅に増やせる可能性がある. 一方で, 漁船の観測装置には記録装置が付属していないために, 手書きのメモに頼っている. データの手書きによるやり取りは記録する漁業者にも, それを受け取る研究者にとっても負担が大きい. 実際, 観測は連続的に得られているにもかかわらず, 図5の手書きのメモ

JAMSTEC通知			北緯	東経	潮流(流速:流向)					
月	日	時間	32度内	132度内	水温	2m	25m	50m		
9	7	01:40	45.357 ⁸	25.316 ⁸	27.3	0.7:SW/W	0.8:S/W	0.8:S/W	X	
	7	03:56	45.678	25.376	27.4	0.5:SSW	0.4:SW/S	0.2:WSW	X	
	9	20:02	41.299	25.567	27.0	0.7:W/NW	0.5:W/NW	0.6:W	X	
	11	04:10	46.644	25.727	27.3	0.5:8/W	0.4:9	0.3:SSW	X	
	11	04:28	46.377	25.180	27.3	0.1:SW/W	0.1:ESE	0.1:E	X	
	11	22:40	43.251	27.352	27.5	0.3:N	0.2:NNE	0.2:NE/N	△	
	12	00:38	50.658	20.538	27.4	0.2:NNW	0.1:NNW	0.2:NNW	△	
	12	04:22	50.309	29.999	27.3	0.4:NNW	0.3:NNW	0.2:SW/S	X	
	13	19:15	40.851	21.378	27.6	0.9:W	0.8:W/N	0.9:W/N	X	
	13	20:25	40.764	25.789	27.2	0.3:WSW	0.6:SSE	0.6:SE	X	
	13	23:00	49.027	25.707	27.1	0.4:WSW	0.5:SSW	0.6:S/W	X	
	14	03:52	48.606	25.240	27.1	0.5:W	0.3:NNW	0.3:NE	X	
	14	21:04	45.096	25.141	27.2	0.1:W	0.4:NNW	0.6:NNW	X	
	21	19:46	45.712	25.765	26.0	0.3:ENE	0.2:SE	0.8:NE	X	
	21	21:02	45.957	21.492	24.3	E/N:0.5	0.5:E/N	0.4:E	△	
	22	03:20	45.417	22.548	24.2	0.2:SE/S	0.3:SE	0.2:SE/E	○	
	23	04:45	46.701	25.465	26.3	0.5:NE/W	0.2:NNW	0.2:NNW	X	

図5 地元漁業関係者から送られた観測データを記した手書きメモの例。

に残っているのは、漁業者の手の空いた時に記録されるのみで、1日あたり最大で3点程度である。

宮崎水産試験場では、漁船にデータ転送機能付きGPSデータロガーと取り付けることで、観測データを自動的に収集し、漁業者の作業負担の少ない形でデータを集め、海況日報の作成を行っている(渡慶次ら2016)。この漁船からのデータをJCOPE2に取り入れることで、JCOPE2のデータ同化結果も改善ができるという結果も得られている(宮澤ら、私信)。漁船からのデータ収集を組織化することは沿岸観測の新しい可能性を示しており、宮崎での経験に習い、宿毛で漁船からの観測データを収集する仕組みを作ることは検討に値することだと考えられる。

4. 今後の展望

予測のモデルの開発は、JFすくも湾漁業協同組合や宿毛漁業指導所と協力しながら進めてきた。モデルの領域や、予測結果のwebサイトの表示に関しては、地元漁業関係者の要望を取り入れてきた。2017年の2月には、地元漁業関係者の海況予測システムの説明を行っている(森岡2017)。フィードバックとして、地元関係者からは、海底地形による情報や、3.2節で述べたような観測情報の提供を受けている。予測モデルの使用法としては、漁業関係者向けの情報の他、第2節で述べた座礁貨物船の対応、宿毛湾の豊かなサンゴ礁生態系研究の基礎データなど、さまざまな活用が考えられ、地元関係者と協力しながら、発展さ

せていきたいと考えている。地球環境研究の国際的プログラムFuture Earth、その海洋学における取り組みとしてのSIMSEA(Sustainability Initiative in the Marginal Seas of South and East Asia; 縁辺海に見られる諸問題を海洋科学に基づいて総合的に管理するための国際プログラム)では、科学者と地元関係者との協働作業が強調されている。宿毛湾での取り組みは、その実践例と言える。

気象衛星「ひまわり8号」の高い時空間分解能のデータは、海洋学に新しい可能性をもたらしている。JAMSTECの我々のグループとJAXA/EORCは、「ひまわり8号」のデータの海洋への利用について共同研究を進めている。3.1節で紹介した海洋モニタリング以外にも、Multiscale 3D-VARによるJCOPE2予測モデルへのデータ同化(Miyazawa *et al.* 2017)や、Local Ensemble Transform Kalman Filter(LETKF; Miyazawa *et al.* 2013)によるデータ同化(Hihara *et al.* 2017 準備中)の開発を進めている。

沿岸予測モデルの発展には、観測データの充実が必要である。3.2節で紹介した漁業関係者からのデータ収集以外にも、内航船からのデータやバイオロギングによるデータの活用(Miyazawa *et al.* 2015)など、新たな取り組みが必要とされるだろう。

謝辞: 本研究は、日本財団の助成金を受けて実施された公益財団法人笹川平和財団海洋政策研究所の「沿岸域総合管理モデルの展開に関する調査研究」

の活動の一環として行われました。一部、環境省の環境研究総合推進費 (S-15 Predicting and Assessing Natural Capital and Ecosystem Services (PANCES)) の助成を受けました。

参考文献

- [1] Isobe A, Guo X, Takeoka H (2010) Hindcast and predictability of sporadic Kuroshio - water intrusion (kyucho in the Bungo Channel) into the shelf and coastal waters J Geophys Res-Oceans 115:1-14
doi:10.1029/2009JC 005818.
- [2] 海洋政策財団 (2016) 宿毛市長・大月町長へ宿毛湾沿岸域総合管理研究会から報告, 海を活かしたまちづくり, <http://blog.canpan.info/oprficm/archive/355>
- [3] Miyazawa Y, Zhang R, Guo X, Tamura H, Ambe D, Lee J-S, Okuno A, Yoshinari H, Setou T, Komatsu K (2009) Water mass variability in the western North Pacific detected in a 15-year eddy resolving ocean reanalysis J Oceanogr 65:737-756 doi:10.1007/s10872-009-0063-3.
- [4] Miyazawa Y, Murakami H, Miyama T, Varlamov S, Guo X, Waseda T, Sil S (2013) Data Assimilation of the High-Resolution Sea Surface Temperature Obtained from the Aqua-Terra Satellites (MODIS-SST) Using an Ensemble Kalman Filter Remote Sensing 5:3123-3139
doi:10.3390/rs 5063123.
- [5] Miyazawa Y, Guo X, Varlamov SM, Miyama T, Yoda K, Sato K, Kano T, Sato K (2015) Assimilation of the seabird and ship drift data in the north-eastern sea of Japan into an operational ocean nowcast/forecast system Scientific reports 5:17672 doi:10.1038/srep17672.
- [6] Miyazawa Y, Varlamov SM, Miyama T, Guo X, Hihara T, Kiyomatsu K, Kachi M, Kurihara Y, Murakami H (2017) Assimilation of high-resolution sea surface temperature data into an operational nowcast/forecast system around Japan using a multi-scale three-dimensional variational scheme Ocean Dynamics doi:10.1007/s10236-017-1056-1.
- [7] 森岡 (2016) 宿毛湾の海を活かしたまちづくりレポート 2, 黒潮親潮ウォッチ
<http://www.jamstec.go.jp/aplinfo/kowatch/?p=2306>
- [8] 森岡 (2017) 宿毛湾の海を活かしたまちづくりレポート 3, 黒潮親潮ウォッチ
<http://www.jamstec.go.jp/aplinfo/kowatch/?p=4548>
- [9] Takeoka H, Kaneda A, Anami H (1997) Tidal Fronts Induced by Horizontal Contrast of Vertical Mixing Efficiency J Oceanogr 53, 563-570.
- [10] 渡慶次力, 林田秀一, 福田博文 (2016) 漁船計測による日向灘海況情報提供システムの運用と他海域への展開可能性 (シンポジウム 沿岸海洋学における観測研究の最前線 I) 沿岸海洋研究= Bulletin on coastal oceanography 53, 151-157.
- [11] Varlamov SM, Guo X, Miyama T, Ichikawa K, Waseda T, Miyazawa Y (2015) M2 baroclinic tide variability modulated by the ocean circulation south of Japan J Geophys Res-Oceans 120:3681-3710 doi:10.1002/2015jc010739.

