

## 地上からのウィンドプロファイラレーダ観測による衛星搭載雲レーダの検証

情報通信研究機構 電磁波研究所 山本真之

## 1. 研究の目的

人工衛星搭載センサによる全地球的な雲の観測は、気候変動の現状把握と予測精度向上に貢献する。雲レーダ (Cloud Profiling Radar ; CPR) は、雲粒からの電波散乱を利用することで、雲に関する物理量の高度分布を計測する。人工衛星に搭載された CPR は、広域にわたる雲の鉛直分布が観測できる。EarthCARE (Earth Clouds, Aerosols and Radiation Explorer ; 以下、EC と表記) は、日本と欧州が協力して開発を進める地球観測衛星である[1]。EC に搭載される CPR (以下、EC-CPR) は、衛星搭載レーダで初めてドップラー速度を計測する[2]。EC-CPR では、ドップラー速度計測の活用による雲物理量プロダクトの精度向上が、期待されている。

時間・高度分解能に優れる地上からの観測は、雲に関する力学過程と雲微物理過程を解明するための、有用な手段である。ウィンドプロファイラレーダ (Wind Profiler Radar ; WPR) は、大気屈折率擾乱が引き起こす電波散乱エコー (大気エコー) から、風速 3 成分 (鉛直流・東西風・南北風) の高度プロファイル計測する。鉛直流は、EC-CPR における雲物理量プロダクトの不確定性を生じる大きな要因である。一方、鉛直流を計測する手段は限られている。そのため、雲内の鉛直流を計測できる WPR は、EC-CPR に用いる雲物理量リトリバルアルゴリズムの開発における、有用な観測手段である。

鉛直流を計測する WPR と雲粒を計測する CPR を用いた地上からの下層雲観測を、今年度を実施した。

## 2. 結果

## 2.1 WPR の観測システム

情報通信研究機構が有する 1.3GHz 帯高分解能 WPR (以下、LQ-13 と表記) を用いた。LQ-13 はルネベルグレンズ 13 基で構成されるフェーズドアレイアンテナを有しており、鉛直及び東西南北 (天頂角  $14^\circ$ ) の 5 方向にビームを指向できる。ピーク送信電力は 5.2 kW、中心周波数は 1.3575GHz である。LQ-13 は、大気境界層を含む高度数 km 以下が観測範囲である。LQ-13 は、7 基のルネベルグレンズから構成されるフェーズドアレイアンテナを有する LQ-7[3] をベースに、開発されている。LQ-13 は、ルネベルグレンズの数を増やすことで、LQ-7 よりも大型のフェーズドアレイアンテナを構成している。また、LQ-7 よりも、送信出力が増大している。

LQ-13 には、高鉛直分解能及び高データ品質を達成するための機能が付加されている。高鉛直分解能を達成する手段として、LQ-13 はレンジイメージング (Range Imaging ; RIM) を用いる。RIM では、送信周波数を送信毎に切り替えることで、送信周波数が異なる受信信号を得る。さらに、送信周波数が異なる受信信号に対し、適応信号処理を用いた重み付け合成処理を行うことで、レンジ分解能を向上する[4]。RIM とオーバーサンプリング (Oversampling ; OS) を併用することで、さらにレンジ方向の観測精度を向上できる[5]。LQ-13 では、最大 5 波の送信周波数を用いた RIM と 10 メガサンプル毎秒の OS が、利用できる。

大気エコー以外の不要エコー (クラッタ) は、WPR の風速計測精度を低下させる。そのため、クラッタの影響を極力排除する必要がある。クラッタを抑圧する手段として、LQ-13 はアダプティブクラッタ抑圧 (Adaptive Clutter Suppression ; ACS) を用いる。ACS では、サブアレイと適応信号処理を用いてレーダービームのサイドローブを制御することにより、クラッタを動的に抑圧する[4]。ACS 機能を LQ-13 に付加するため、USRP (USRP は Universal Software Radio Peripheral の略) とワークステーションで構成される ACS 用多チャンネルデジタル受信機が開発された[6]。

## 2.2 地上設置の WPR と CPR による下層雲の同時観測

2016 年 6 月に、東京都小金井市の情報通信研究機構本部において、LQ-13 と千葉大学が有する CPR[7] (以下、FALCON-I と表記) による下層雲の同時観測が実施された。FALCON-I は、周波数変調パルス圧縮を用いることで、低送信出力、高レンジ分解能、高感度を達成している。鉛直分解能を向上させるため、LQ-13 は、RIM と OS を併用した観測モードで運用した。さらに、ACS に必要となるクラッタからのエコーを取得するため、3 基の無指向性サブアレイを用いた。

WPR と CPR による下層雲観測事例の解析を実施するため、WPR から得られたデータを処理した。WPR は、

受信された大気エコーのドップラースペクトルからスペクトルパラメータ（エコー強度・ドップラー速度・スペクトル幅）を推定する。大気エコーは背景風とともに移動するため、鉛直ビームから得られたドップラー速度の推定結果を用いることで、鉛直流の高度プロファイルが得られる。スペクトルパラメータを推定する手段として、大気エコー以外のエコーの混入を考慮したスペクトルパラメータ推定手法[8]を用いた。さらに、ACSを用いることで、鉛直流の計測結果を得た。

EC-CPRにおける雲物理量リトリバルアルゴリズムの開発を見据えつつ、LQ-13とFALCON-Iの観測データを用いた下層雲の事例解析を実施している。

### 3. 今後の展開

地上設置のWPRとCPRによる下層雲観測結果のデータ解析を進め、EC-CPRに用いる雲物理量リトリバルアルゴリズムの開発に貢献する。EC-CPR打ち上げ後の検証に向け、WPRによる計測データを高精度かつ高データ品質で得るための技術開発も、さらに進めていく。

### 参考文献

- [1] 宇宙航空研究開発機構, 雲エアロゾル放射ミッション「EarthCARE」,  
<http://www.jaxa.jp/projects/sat/earthcare/>.
- [2] 宇宙航空研究開発機構, 雲エアロゾル放射ミッション/雲プロファイリングレーダ「EarthCARE/CPR」,  
<http://www.satnavi.jaxa.jp/project/earthcare/index.html>.
- [3] 電波レンズ搭載型対流圏ウィンドプロファイラレーダー (WPR LQ-7) の開発, SEI テクニカルレビュー, **170**, pp. 49-53, 2007. (<http://www.sei.co.jp/technology/tr/pdf/sei10497.pdf> より入手可能).
- [4] M. K. Yamamoto, New observations by wind profiling radars, in *Doppler Radar Observations - Weather Radar, Wind Profiler, Ionospheric Radar, and Other Advanced Applications*, edited by J. Bech and J. L. Chau, pp. 247-270, InTech, Rijeka, Croatia, 2012, doi:10.5772/37140.
- [5] M. K. Yamamoto, et al., Development of a digital receiver for range imaging atmospheric radar, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **118**, pp. 35-44, 2014, doi:10.1016/j.jastp.2013.08.023.
- [6] 山本真之・川村誠治・西村耕司, ウィンドプロファイラ用デジタル受信機の開発, p. 86, 日本気象学会 2016 年度春期大会講演予稿集, 東京都渋谷区, 2016 年 5 月.
- [7] T. Takano, et al., Development and performance of the millimeter-wave cloud profiling radar at 95GHz: Sensitivity and spatial resolution, *Electronics and Communications in Japan*, **93**, pp. 42-49, 2010, doi:10.1002/ecj.10170.
- [8] T. Gan, M. K. Yamamoto, H. Hashiguchi, H. Okamoto, and M. Yamamoto, Spectral parameters estimation in precipitation for 50 MHz band atmospheric radars, *Radio Science*, **50**, pp. 789-803, 2015, doi:10.1002/2014RS005643.

### 研究成果(学会発表)

山本真之・川村誠治・西村耕司・岡本創・藤吉康志, ウィンドプロファイラにおける信号処理 -リアルタイムデータ処理とスペクトルパラメータ推定-, 日本気象学会沖縄支部研究発表会, 沖縄県名護市, 2017 年 3 月.

## 衛星観測を用いたエアロゾル気候モデルの雲微物理過程の検証

東京大学大気海洋研究所 鈴木健太郎

### 要旨

エアロゾル変化がもたらす雲・降水過程への影響を、NASA/A-Train 衛星群に含まれる複数衛星の観測データとエアロゾル気候モデル MIROC-SPRINTARS とで比較した。その結果、気候モデルはエアロゾル増加による雲水量の増加を系統的に過大評価する傾向にあることがわかった。このことは、現在の気候予測において、エアロゾル間接効果による冷却効果が過大評価されていることを示唆している。

### 序論

エアロゾルが雲核となって雲を変質させる効果（エアロゾル間接効果）は現在の気候予測において最大の不確実要因のひとつである。これを低減するためには、気候モデルを雲の素過程レベルで観測情報にもとづいて評価検証し、エアロゾル増加がもたらす雲の変質を精度良く定量化することが必要である。従来の衛星観測では、雲に関する観測情報が非常に限られていたために、モデルの構成要素である個々の物理素過程にまでさかのぼって評価することは多くの場合困難であった。ところが、近年の衛星観測技術の進歩によって、雲に関する詳細な情報が観測的に得られるようになってきた。研究代表者の鈴木健太郎は複数の衛星センサーから得られるこれらの新しい観測データを複合的に組み合わせることで、エアロゾル間接効果の影響を特に受けやすい低層雲の微物理プロセスを統計的に描き出す解析手法を開発してきた。本研究課題は、これらの手法を用いて、九州大学応用力学研究所において開発されたエアロゾル気候モデル MIROC-SPRINTARS を雲の素過程レベルで評価検証し、エアロゾル変化がもたらす雲の変調を定量化することを目的として行われた。

### 方法

NASA/A-Train 衛星群に含まれるCloudSat 衛星およびAqua/MODIS 衛星から得られる降水生成に関する情報と雲光学的厚さ・有効粒子半径のデータを組み合わせた解析を行い、エアロゾル変化に伴う低層雲の雲水含有量の変化を全球規模でとらえる統計を作成した。これは現実大気におけるエアロゾル増加への雲の応答のシグナルを観測的に与えるため、それをリファレンスとして気候モデルの当該プロセスを評価することができる。そこで、衛星観測に対応する解析をエアロゾル気候モデル MIROC-SPRINTARS について行い、衛星観測と比較した。

### 結果と考察

このような比較解析の結果、MIROC-SPRINTARS モデルはエアロゾル増加に対する雲水の増加を衛星観測に比べて過大評価する傾向にあることがわかった。衛星観測によれば、エアロゾル増加に対する雲水量の変化は系統的な地域分布を示し、雲水量が増加する場所と減少する場所が特徴的な分布パターンを持つ。一方、MIROC-SPRINTARS モデルでは、エアロゾル増加に対して雲水量は単調的に増加する傾向が全球規模にわたって支配的であり、エアロゾル間接効果によって雲水は一方的に増加する傾向にあった。これは、モデルにおける雲微物理過程の表現方法に原因があり、エアロゾル増加に伴って降水効率が減少する物理プロセスが強調されすぎていることが主

な理由であると考えられる。すなわち、衛星観測でとらえられた現実大気では、エアロゾル増加による降水抑制がもたらす雲水の増加だけでなく、蒸発やエンTRAINメントなど雲水を減少させるプロセスがはたらいっていると考えられ、気候モデルではこれらが適切に表現されていないことが示唆される。この結果は、現在の気候予測ではエアロゾル間接効果による冷却効果が系統的に過大評価されている可能性を物語っており、より詳細に雲の素過程に根ざしたモデル検証と改良が必要であることを意味している。

## 成果報告

Michibata, T., K. Suzuki, Y. Sato, and T. Takemura, 2016: The source of discrepancies in aerosol-cloud-precipitation interactions between GCM and A-Train retrievals, *Atmos. Chem. Phys.*, **16**, 15413-15424, doi:10.5194/acp-16-15413-2016

## 衛星搭載ライダー CALIOP と雲レーダ CloudSat とひまわり 8 号による オーバーシュートの同期観測

防衛大学校 地球海洋学科 岩崎杉紀

### 目的

本研究は、成層圏まで達する積乱雲（オーバーシュート）が対流圏から成層圏に物質を運ぶのか、運ぶとしたらどのように運ぶのか、これらを観測から明らかにすることを目的としている。ここで、オーバーシュートとは対流圏界面（対流圏と成層圏の境界）を超えた積乱雲の頂上のことである。

一般に、オーバーシュートは断熱過程で成層圏に達しているため、その空気塊は対流圏界面付近の気温より冷たく重い。このため、成層圏まで達してもすぐに下降し始めて対流圏に戻る。つまり、対流圏の空気はオーバーシュートによって成層圏に運ばれるものの、そのまま対流圏に戻る、とされていることが多い。しかし、衛星観測の中にはオーバーシュートの上空は湿っていることを示唆していたり、オーバーシュートから誘発された非断熱過程（重力波の碎波）によって成層圏に雲を運ぶことが数値計算で示されている。この現象は jumping cirrus と言われている。しかし、これの定量的な観測はまだ一例もない。例えば、その生成消滅過程であったり、どんな条件で、何個、どのタイミングで、どのくらいジャンプするか、といった基本的なことでさえ分かっていない。本研究では、オーバーシュートから派生する jumping cirrus のこのような性質を富士山特別地域気象観測所（旧富士山測候所）にカメラを設置して明らかにする。

### 方法

富士山は世界遺産になるので、こげ茶色に塗った 3 台のカメラケースを図 1 のように富士山特別地域気象観測所に原状復帰できるように金具で固定した。ケースの中に USB3.0 カメラを 1 台ずつ設置し、水平 70 度のパノラマ写真（中心の向きは東北）が取れるようにした。カメラ 3 台を USB3.0 のハブを 1 本の USB3.0 の 80m 延長ケーブルに、その延長ケーブルを屋内のパソコンにそれぞれ接続した。なお、ハブや電源はカメラケースの中に収めている。

カメラは、昼は 15 秒毎、夜は 1 分毎に撮影するよう設定した。夜間に撮影する理由は、星を撮影することによって、写真のピクセルごとに方位角と仰角を算出するためである。撮影期間は 2016 年 7 月 11 日から 8 月 11 日の 1 か月間とした。神奈川県横須賀市にある防衛大学校の屋上（標高 100m）にも同カメラを北向きに設置した。同じ雲が両カメラで撮影できれば、ステレオ解析できるためである。

なお、ここでの jumping cirrus の定義は数値計算の知見から以下のようにした。通常、積乱雲の雲頂は対流圏界面より上に行かないので平らになっている（図 2 の点線）。積乱雲全体またはその一部（turret）が強い上昇流を持っていると平らな面から盛り上がる（図 2 のオーバーシュート）。それが下がり平らな面に



図 1 山頂に設置した 3 台のカメラ。風で飛ばされないよう金具で固定している。



図 2. 2016年7月31日の12時30分頃に撮影された霞ヶ浦付近（または鹿島灘沖）に現れた jumping cirrus。

戻ったと同時に雲が数kmほどジャンプすることがある(図2のjumping cirrus)。それをjumping cirrusと呼ぶことにする。オーバーシュートが盛り上がり始めてからjumping cirrusが飛び出るまでおよそ5分である。図2では、jumping cirrusを誘発したオーバーシュートはすでに消えており、別のオーバーシュートが写っている。

筆者は1回だけ肉眼でjumping cirrusを見たことがある。10m/sほどの上昇速度の現象ではあるが、そこから数10km離れていた(離れないと積乱雲の雲頂付近は見えない)、雲は動いていないように見えた。つまり、この現象は一見するだけでは、通常の雲と区別がつけられない。

## 結果

1か月の撮影期間で、山頂に設置したカメラには7個のjumping cirrusが撮影出来た。ただし、成層圏に達していたか否かの判定はまだ2例のみしか出来ていない。2例とも対流圏界面に達していなかったようである。7個すべて7月29日以降であった。東海から関東地方の梅雨明けは7月28から29日だったので、すべて梅雨明け以降に観測された。また、北向きカメラ(北関東から南東北地方を撮影)が5個と最も多く撮影した。

なお、下層に雲が多かったため、防大に設置したものでは1つも撮影できなかった(それ以降にくっつか撮影は出来ている)。これより、少なくとも2016年の夏は富士山の山頂のほうがjumping cirrusの観測に向いていたことが分かる。

図2は2016年7月31日の12時半ころに現れたjumping cirrusである。写真のjumping cirrusの方位角とひまわり8号の赤外面像の低温部が一致する位置は、霞ヶ浦付近または鹿島灘沖である。両地点とも富士山から見ると同じ方で、どちらにも低温部分がある。どちらであるかは今後検討するとして、もしjumping cirrusが霞ヶ浦付近に現れたとすると、富士山から185km離れている。距離と写真の仰角から計算すると、積乱雲の雲頂高度11.2kmで、jumping cirrusはそこから12.8kmまで8分21秒で1.6kmジャンプしていた。レーダ解析では、時間雨量は20mm程度でエコー頂は13km(高度分解能は2km)であった。ただし、館野のラジオゾンデのデータは高度16kmが気温が最も低かった。

レーダで見ると強い積乱雲が立っていても、それが撮影できないことがほとんどであった。これは、積乱雲が立ちやすい時は山頂にも雲がかかりやすいためである。また、絞りが付いていないカメラ(通常の産業用カメラ)を用いたのだが、雲の白飛びを防ぐため絞りを絞って撮影を行った。しかし、これだ日没後30-60分で暗くなり、積乱雲が最も活発な時間の撮影が出来なかった。撮影時間を少しでも伸ばすため、来年度は絞りの代わりに紫外線の量で透過率の変わる光調整フィルタを用いる予定である。また、撮像素子の大きいカメラも用いる。これらの準備も行った。これで満月であれば夜間でも雲観測が出来る予定である。

## 成果報告

この観測は2016年の夏に初めて行ったので、まだ発表は行っていない。以下は予定である。

1. 岩崎杉紀、鴨川仁、久保田尚之、岡本創、石元裕史、牛山朋來、積乱雲のてっぺんからジャンプする雲(jumping cirrus)の特徴、第10回成果報告会(認定NPO法人富士山測候所を活用する会)、東京、2017年3月5日。
2. 岩崎杉紀、瀬口貴文、鴨川仁、久保田尚之、岡本創、石元裕史、牛山朋來、積乱雲の雲頂から飛び上がる雲の撮影、日本気象学会春季大会、東京、2017年5月。

以下は、昨年度の共同利用の成果とそれを受け本研究を思いついた研究(本研究の前段階の内容)の発表である。

1. Iwasaki, S., T. Shibata, H. Kubota, H. Okamoto, Large size and low number concentration cloud in mid and high latitudes, 17th International Conference on Clouds and Precipitation, Manchester, UK, Jul., 2016.

## 静止気象衛星データと地球観測衛星データを複合的に利用した氷雲の解析

気象研究所 気象衛星・観測システム研究部 石元裕史

### ・要旨および序論

全球や広い領域を対象として氷雲の生成や雲微物理特性を明らかにするためには、衛星データを複合的に利用した高度な解析が必要である。これまで応用力学研究所 岡本創研究室との共同研究では、衛星赤外サウンダ (AIRS) データと全球客観解析値を初期値とした 1 次元変分法解析 (1D-Var) によって、対流圏中上層の水蒸気場を解析してきた。またその結果を用いて氷雲周囲の水蒸気氷過飽和度の推定を行い、CloudSat/CALIPSO 観測結果と組み合わせることによって氷雲生成過程と氷過飽和との関係について調べてきた。岡本研究室が主体となって開発している多重散乱ライダーについては、多重散乱計算についての計算技術支援を行ってきた。さらにライダー観測による配向性氷晶の後方散乱特性については、H26 年度九大共同研究において気象研究所の計算手法による計算結果と九大応力研側の計算結果との相互比較等を行うなど、基礎と応用の両面における技術協力を行っている。

本研究課題では衛星データ解析について、これまでと同様の衛星センサデータ解析を通じた研究協力を行う。さらに 2015 年より正式運用が始まったひまわり 8 号データを加えた新しい雲解析技術の共同技術開発に着手する。ひまわり 8 号は、その高い時間分解能とともに従来の地球観測衛星と同等な空間分解能と搭載チャンネル数を持つ世界に先駆けた次世代静止気象衛星である。このひまわり 8 号データと、気象研究所が整備している非球形氷晶散乱データベースおよび最適雲解析アルゴリズムを使い、九大応力研の CloudSAT/CALIPSO プロダクトとの比較などによって氷雲タイプによるリトリーバルに最適な氷晶種類の選択する技術を開発し、またそれら解析結果に基づいた氷雲の微物理に迫る研究を実施する。

### ・研究方法

衛星赤外サウンダを用いた水蒸気場の 1D-Var 解析については、サウンダ観測データおよび初期値となる大気プロファイルデータおよび解析プログラムを気象研が提供し、九大応力研で一定期間のデータ解析を実施できる環境を整備する。ひまわり 8 号データについては、データ配信開始後の解析をスムーズに実施できる環境と解析コード開発、またひまわり 8 号チャンネル波長に対応した非球形氷晶粒子散乱データベースの整備を行う。九大応力研による CloudSat/CALIPSO 解析データとひまわり 8 号とのマッチアップデータ作成、解析事例の選定と予備解析実験を行い、氷雲の複合衛星データ解析手法の開発を開始する。

### ・H28 年度研究結果

H27 年度に引き続き以下に示す共同研究を実施しその成果を発表した。衛星赤外サウンダ AIRS データを用いた晴天域・下層雲域の水蒸気 1D-Var については本共同研究での研究目的を概ね達成した。これに関する成果まとめとして、九州大学応用力学研究所 RIAM フォーラム 2016 において講演を行なった[1]。また CloudSat/CALIPSO とのマッチアップ解析については研究世話人である岡本創教授による学会発表の共著として研究に参加した[7]。ライダー多重散乱計算については、研究協力者の佐藤可織助教が多重散乱物理モデルを新たに開発し[9]、このことによりライダー観測の解析技術が大きく進歩した。

氷粒子のライダー後方散乱特性について、気象研で開発している計算手法である改良型幾何光学近似法 (Geometrical Optics-Integral Equation: GOIE) の結果と、岡本研究室が CALIPSO データ解析に関して共同研究を行っているロシア Borovoi 教授による Physical-Optics approximation (PO) 法による結果とが整合していることを確認した。それを受けて気象研で共同研究を行なっている気象衛星センター増田一彦博士と氷晶粒子のライダー後方散乱比 (ライダー比、偏光解消度、カラー比) の粒子形状や微小な形状の歪みに対する依存性について数値シミュレーション実験を行なった[4]。またそのまとめを論文として投稿し受理され

た[2]。本論文では計算結果だけでなく、氷晶粒子の形状と後方散乱特性との関係についての本質的な議論も行っており、同様な散乱特性計算を行なう研究者にとって示唆に富む内容であると考えられる。

ひまわり 8 号データの解析については、気象研が開発した氷晶モデルを導入し台風や豪雨事例での解析を通じて、同じ粒子モデルに対する衛星ライダー観測とひまわり観測での整合性などについて研究した。またそれに関連して、POLDER 衛星による多方向観測結果を使って、現在世界で用いられている各種氷粒子モデルについての観測整合性の比較を行なった結果についての共著論文が受理・掲載された[3]。これら研究成果によって、氷雲に用いる粒子形状モデル、その粒子の精度の良い光散乱特性計算、観測結果から得られる雲微物理特性、といった統合的雲研究に必要な基礎解析技術が大きく向上したと考えている。

また本共同研究の派生的な研究課題である衛星赤外サウンダを用いた火山灰エアロゾルの物質情報推定については、研究の進展を国内外での学会で発表した[5, 6, 7]。いまだ開発の途中段階ではあるが、ひまわり 8・9 号による火山灰推定アルゴリズムへ応用できる技術であり、現在その推定精度に大きな誤差がある衛星からの火山灰推定を改善する新しい試みとして期待されている。

・成果報告

講演会

[1] 衛星赤外サウンダ AIRS による水蒸気推定と CloudSat\_CALIPSO\_AIRS 複合解析への応用, RIAM フォーラム 2016, 2016 年 6 月, 福岡県春日市

査読付き論文

[2] Masuda, K., H. Ishimoto, 2017: Backscatter ratios for nonspherical ice crystals in cirrus clouds calculated by geometrical-optics-integral-equation method. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, **190**, 60-68, doi:10.1016/j.jqsrt.2017.01.024.

[3] Letu, F., H. Ishimoto, J. Riedi, T. Y. Nakajima, L. C.-Labonnote, A. J. Baran, T. M. Nagao, M. Sekiguchi, 2016: Investigation of ice particle habits to be used for ice cloud remote sensing for the GCOM-C satellite mission. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **16**, 12287-12303.

査読なし論文

[4] Masuda, K., H. Ishimoto, T. Sakai, H. Okamoto, 2016: Backscattering properties of nonspherical ice particles calculated by Geometrical-Optics-Integral-Equation method. *EPJ Web of Conferences*, **190**, 16001, doi:10.1051/epjconf/201611916001.

学会発表 (主著)

[5] Estimation of the volcanic ash refractive index from satellite infrared sounder data, International Radiation Symposium 2016, 2016 年 4 月, ニュージーランド, オークランド

[6] 衛星赤外サウンダデータの解析による火山灰物質情報, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, 2016 年 5 月, 千葉県千葉市

[7] Investigation of the spectral refractive indices of volcanic ash materials using satellite infrared sounder measurements, 2016 AGU Fall Meeting, 2016 年 12 月, アメリカ, サンフランシスコ

学会発表 (共著)

[8] 岡本創, 佐藤可織, 石元裕史, 「CloudSat-CALIPSO-AIRS の複合利用による氷粒子微物理特性の形成メカニズムの全球解析」, 日本気象学会 2016 年度春季大会 B406, 2016 年 5 月, 東京都渋谷区

[9] 佐藤可織, 岡本創, 片桐秀一郎, 石元裕史, 「衛星搭載ライダーを用いた新しい水雲プロダクト」, 日本気象学会 2016 年度秋季大会 D156, 2016 年 10 月, 愛知県名古屋



## 地上・衛星ライダーデータを用いた エアロゾル光学特性データセットの構築に関する観測的研究

(独)国立環境研究所環境計測研究センター 西澤智明

### 要旨

エアロゾルの気候・環境への影響評価に資するエアロゾル光学特性のデータセットの構築を主眼とし、地上および衛星ライダーデータを用いたエアロゾル光学特性抽出アルゴリズムの高度化および周辺技術の開発を行った。具体的には、(1) 昨年度開発したエアロゾル種分類推定アルゴリズムパッケージを用いて CALIPSO 衛星搭載ライダーの長期データ解析を行い、エアロゾル種毎の全球時空間マップを構築した。衛星搭載受動型センサーMODIS や CALIPSO 標準プロダクトとの比較も実施し、アルゴリズムの改良に資する知見を得た。(2) 全7チャンネルを有する多波長ラマンライダーや高スペクトル分解ライダー用のエアロゾル種分類推定手法の開発を行った。本アルゴリズムでは、4種エアロゾルの消散係数と共にエアロゾル種毎の粒径を推定する。

### 序論

エアロゾルの気候・環境への影響を評価するためには、時間的そして空間的(水平、鉛直)に密なエアロゾルの光学特性に関するデータセットが必須となる。本研究では、地上ライダー観測データと衛星搭載ライダー観測データを解析し、導出された光学特性を統合化することで時間的・空間的に密に包括されたエアロゾルデータセットの実現を主眼とした解析手法の開発及びデータ解析を行う。

これまでに実施してきた研究経過を踏まえ(九州大学応用力学研究所共同利用研究:特定研究(H23、H27)、一般研究(H24-H26)等)、本研究では、地上および衛星ライダーデータを用いたエアロゾル光学特性のデータセット構築を推進する。そのために必須となる、エアロゾル光学特性抽出アルゴリズムの高度化および周辺技術の開発を行う。また、地上ライダーデータの蓄積も図るため、地上ライダー観測も行う。

### 実施方法

- (1) 昨年度構築したライダーデータを用いたエアロゾル種分類推定アルゴリズムパッケージを用い、CALIPSO 衛星搭載ライダーデータへのアルゴリズム群の適用を行う。
- (2) 地上の多チャンネルライダー(多波長ラマンライダーや高スペクトル分解ライダー)用のエアロゾル種分類推定手法の開発を行う。

### 結果と考察

(1) 2波長偏光ライダーを用いた3種エアロゾル(鉱物ダスト(DS)、海塩粒子(SS)、全大気汚染粒子(TAP))推定手法( $2\beta+1\delta$ 手法)、単波長ラマンライダー(や単波長高スペクトル分解ライダー)を用いた3種(DS, ブラックカーボン(BC)、BC以外の大気汚染粒子(AP))ないし4種(DS, BC, SS, AP)エアロゾル推定手法(各々、 $1\alpha+1\beta+1\delta$ 手法、 $1\alpha+2\beta+1\delta$ 手法)を昨年度パッケージ化した。このパッケージの $2\beta+1\delta$ 手法を用いて、CALIPSO 衛星搭載ライダーCALIOPの長期データ解析を実施し、エアロゾル種毎の全球時空間分布を推定すると共に、雲・エアロゾル識別等も行った。

得られた結果を受動型衛星センサーMODIS や NASA から公開されている CALIPSO 標準プロダクトとの比較も行った。本研究で推定した DS の消散係数や光学的厚さは MODIS 等の解析値に比べ高く、一方で SS や AP は低いなどの相違がみられ、アルゴリズムの仮定等を改良する必要性が示唆されたが、エアロゾル種毎の全球時空間マップは世界でも類を見ないプロダクトであり、同化・検証等、モデル研究への活用が期待できる。

(2) これまでは最大で全4チャンネルのライダーデータを用いたエアロゾル種分類推定アルゴリズムの開発を行ってきた。国立環境研究所・九州大学の共同研究の下、全7チャンネルの多波長ラマンライダーや多波長高スペクトル分解ライダーの開発・運用が進められている。そこで、全7チャンネルのライダーデータを用いて、4種エアロゾルの消散係数と共に DS, SS, AP の粒径を推定するアルゴリズムを試作した。このアルゴリズムでは、ライダー測定値（消散係数及び後方散乱係数）の波長依存性が粒子の粒径に鋭敏であることを利用して、エアロゾル種毎の粒径を推定する。また、アルゴリズムの性能評価や観測データのリアルタイム解析を見越して、試作した本アルゴリズムを上記のエアロゾル種分類推定アルゴリズムパッケージへ組み込み、利便性を向上させた。今年度はアルゴリズムの評価までには至らなかったが、今後、シミュレーションや実データへの適用を経てアルゴリズムを評価していく。

成果報告

**Nishizawa T., Sugimoto N., Matsui I., Shimizu A., Hara Y., Uno I., Yasunaga K., Kudo R., Kim S. W.,** Ground-based network observation using Mie-Raman lidars and multi-wavelength Raman lidars and algorithm to retrieve distributions of aerosol components, *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer* 188, 79-93, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jqsrt.2016.06.031>

西澤智明、工藤零、岡本創、ライダーデータを用いたエアロゾルコンポーネント導出パッケージの開発、日本気象学会 2016 秋季大会、愛知県名古屋市、2016 年 10 月

西澤智明、杉本伸夫、松井一郎、清水厚、鶴野伊津志、原由香里、工藤玲、多波長ラマンライダーデータを用いたエアロゾルコンポーネント解析、第 34 回レーザーセンシングシンポジウム、長野県下高井郡野沢温泉村、2016 年 9 月

他 3 件

研究組織

氏名	所属	職名	役割・担当	メールアドレス
西澤 智明	国立環境研究所	室長	代表者	<a href="mailto:nisizawa@nies.go.jp">nisizawa@nies.go.jp</a>
岡本 創	九州大学応用力学研究所	教授	衛星ライダ解析	<a href="mailto:okamoto@raim.kyushu-u.ac.jp">okamoto@raim.kyushu-u.ac.jp</a>
佐藤 可織	九州大学応用力学研究所	助教	衛星ライダ解析	<a href="mailto:sato@riam.kyushu-u.ac.jp">sato@riam.kyushu-u.ac.jp</a>

## CloudSat/CALIPSO 雲特性プロダクトの高度化に向けた全球規模気候学的解析

長崎大学大学院水産・環境科学総合研究科 河本和明, 山内晃  
 九州大学 応用力学研究所 岡本創

### ・要旨

九州大学で作成された CloudSat/CALIPSO 併用データを使用し、 $-25\sim 0^{\circ}\text{C}$  温度域におけるユーラシア大陸の東西間では雲の氷相割合の違いがあり、ユーラシア東部 ( $40\sim 80^{\circ}\text{N}$ ,  $60\sim 120^{\circ}\text{E}$ ) では氷相割合が増加しており、一方で水相割合は減少していることを明らかにした。また温度毎の氷相割合は  $-20\sim -5^{\circ}\text{C}$  域、高度毎では下層 3km 以下において東西間の差が大きいことを示した。このことはユーラシア西部 ( $40\sim 80^{\circ}\text{N}$ ,  $0\sim 60^{\circ}\text{E}$ ) に比べて、ユーラシア東部の下層で氷相の形成が促進していることを示唆している。

### ・序論

雲や降雨は、地球のエネルギー収支や水循環を通して、気候の変動・維持に大きな影響を与えている。広域的な雲の分布を観測する手段として人工衛星のデータが広く利用されてきたが、2006 年に能動型センサーを搭載した CloudSat や CALIPSO 打ち上げられたことによって、雲内部の鉛直方向の情報が得られるようになった。しかしながら、氷雲の形成過程や成長過程についてはまだ詳しくわかっていない。本研究では、 $-40^{\circ}\text{C}$  以上の雲層内の氷粒子の形成過程に着目し、2007年 月の2つの領域(東・西ユーラシア大陸)について比較を行った。

### ・実験方法

雲粒子相判別 (KU-type) は *Yoshida et al.* (2010) が開発した CALIPSO 衛星に搭載されている能動型センサー CALIOP から得られる、後方散乱係数と偏光解消度を使用した相判別手法が用いられている。また、氷相は雲粒子判別が水平状氷粒子 (2D-plate)、三次元ランダム配向氷粒子 (3D-ice)、3D と 2D の混合層 (mixture of 2D-plate and 3D-ice) の場合と定義し、水相は  $0^{\circ}\text{C}$  以上の水粒子 (warm water)、過冷却水粒子 (supercooled water) の場合と定義した。雲量は *Hagihara et al.* (2010) が開発した CloudSat/CALIPSO 併用雲マスク (KU-mask) を使用した。雲内部の鉛直気温データは CloudSat の ECMWF-AUX プロダクト (*Partain* 2007) を使用し、地上 2m 気温、短波・長波放射量は JRA-55 再解析データ (*Kobayashi et al.* 2015, *Harada et al.* 2016) を使用した。

雲層内の氷相割合 ( $F_{\text{ice}}$ ) と水相割合 ( $F_{\text{water}}$ ) は以下のように定義し、

$$F_{\text{ice}} = N_{\text{ice}} / (N_{\text{ice}} + N_{\text{water}}) \quad (1)$$

$$F_{\text{water}} = N_{\text{water}} / (N_{\text{ice}} + N_{\text{water}}) \quad (2)$$

ここで、 $N_{\text{ice}}$  は雲層内で検出した氷相雲層数を示し、 $N_{\text{water}}$  は水相雲層数を示す。ただし、光学的厚い雲が発生している場合、雲層内でライダーが減衰して検出できなくなってしまうため、雲頂から光学的厚さが 7 程度までの雲を対象としている。

### ・結果と考察

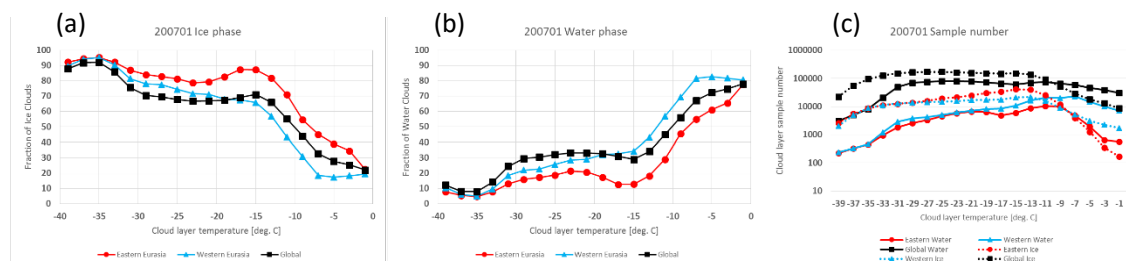


図 1 . ユーラシア大陸東部 (赤) 西部 (青) 全球 (黒) における温度毎の (a) 氷相割合 (b) 水相割合。(c) 温度毎のサンプル数、点線が氷相、実線が水相を示している。

-40°C以上の雲層内の氷相割合はユーラシア東部で高くなっている。図1はユーラシア大陸東部(赤)西部(青)全球(黒)での温度毎氷相(図1(a))・水相(図1(b))を示している。-30°C以下ではあまり違いは生じないが、-20°Cから-5°C域では明らかにユーラシア東部域での氷相割合が増加している(約20%)ことがわかる。室内実験により、この温度域で氷晶は不均質核形成の中でも内部凍結や接触凍結によって生成されることがわかっており(Hoose and Möhler, 2012)、ユーラシア東部で内部凍結・接触凍結が促進していることを示している。

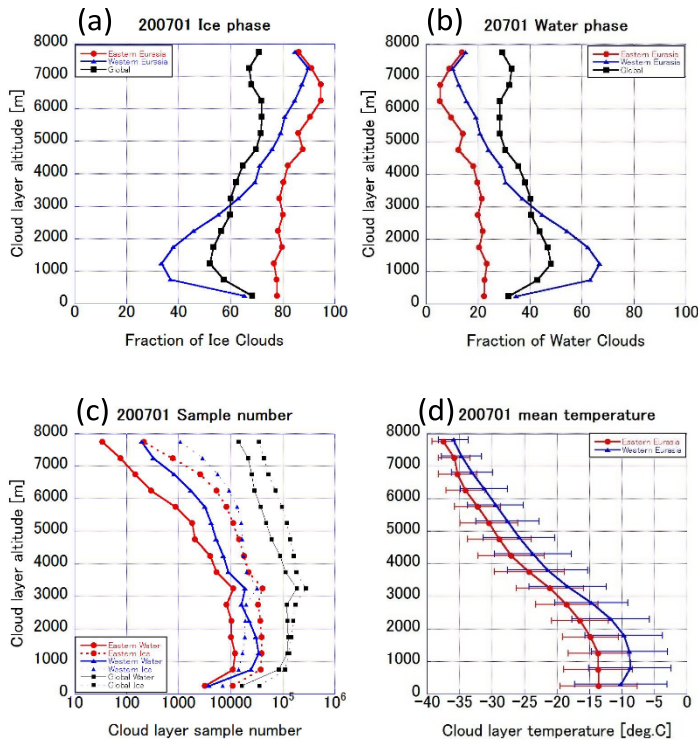


図2 . ユーラシア大陸東部(赤)西部(青)全球(黒)における高度毎の(a)氷相割合(b)水相割合。(c)高度毎のサンプル数、点線が氷相、実線が水相を示している。(d)ユーラシア大陸東部(赤)西部(青)の高度毎の雲層内平均気温(エラーバーは標準偏差を示す)。

ユーラシア東西間の雲層内氷相割合の差は対流圏下層で特に顕著になっている。図2はユーラシア大陸東部(赤)西部(青)全球(黒)での高度毎氷相(図2(a))・水相(図2(b))を示している。ユーラシア大陸東西における氷相割合の差は地表から3km以下で顕著であり、特に1km付近で40%と最大となっていた。また、ユーラシア西部や全球の対流圏下層3km以下の氷・水相割合はカーブを描くように変化しているが、ユーラシア東部では地表面から80パーセント程度でほとんど変化していない。この変化は雲層内の気温(図2(d))と概ね対応しており、ユーラシア東部の1km付近で雲層内気温は最大となり-10°C程度を示し、この高度より高高度や低高度では気温が減少している。この-10°C付近では少しの気温の変化で氷・水相割合は急激に変化する(図1(a))ため、この気温の上がり下がりによってユーラシア西部の氷・水割合はカーブを描くように変化することがわかる。これらの結果はユーラシア東部の雲層は地表面付近から氷相化しており、地表面エアロゾルが氷晶核として効果的に働いている可能性を示唆している。

本研究の結果は、数値モデル出力結果との検証に有用であり、数値モデル内で扱われている雲層内氷相割合の見直しに貢献することができると考える。

#### ・学会発表リスト

山内晃, 河本和明, 岡本創, 「CloudSat-CALIPSO 併用データを用いて解明したユーラシア大陸広域にわたる氷相割合の違いについて」, 日本気象学会 2016 年度秋季大会, B104, 10 月, 名古屋大学

山内晃, 河本和明, 岡本創, 「CALIPSO 衛星データを用いて解明したユーラシア大陸広域にわたる氷相割合の違いについて」, 第 3 回国公私 3 大学環境フォーラム, 12 月, 福岡工業大学

## 若狭湾における水温急変現象に関する研究

福井県立大学 海洋生物資源学部 兼田淳史

## 【研究の目的】

若狭湾（図1）では、数日のうちに水温が変化する現象が発生する。研究の初年度にあたる昨年は2015年に若狭湾の5測点で実施されていた水温データを分析し、8月に大規模な水温低下現象が発生したことを報告した（図2参照）。

この低温化現象が発生した時、若狭湾南部の丹生では水温計を設置すると同時に、多層の流速が測定できる ADCP（Acoustic Doppler Current Profiler, 超音波ドップラー多層流速計）を設置していた。今年度は水温が低温化した時の海水の動きを明らかにすることを目的とし、流れや風のデータ、高解像度モデルの計算結果を分析した。

## 【観測および解析】

若狭湾の定置網漁場の環境を把握するため、福井県立大学、福井県水産試験場、九州大学は水温や流れの観測を実施している。丹生定置は我々が観測を実施している測点の一つで、5-10月頃、海面から海底付近まで10mおきにメモリー式水温計を設置して水温を測定すると同時に、ADCPによって多層の流速も測定している。本研究では、丹生定置で水温の低温化現象の発生が確認された2015年の観測データを用いた（図2参照）。また、低温化現象発生時の流れの情報として、九州大学応用力学研究所が開発した日本海沿岸海況予測システムの計算結果を用い、さらに気象庁のウェブサイトから天気図や敦賀の気象データをダウンロードして分析した。

## 【結果および考察】

図3には、低温化現象の発生前から発生後の2015年8月24-29日の風、南北成分の流速、水温の変化を示している。8月25-26日にかけて台風が日本海を北東方向へ進んでいたため敦賀では風速10m/sを超える強い南風が吹いており（図3上段）、そのとき流れが強くなっていた（図3中段）。ここで風と流れの時系列を比べると、風は南から北へ向かって吹いていたのに対して、流れは北から南へ向かって流れていた。また、最も流れが強くなったのは25日夜で、そのとき最も流れが強くなったのは表層でなく海面下30m層付近に出現したことを示している。

この強風時の流れの時間変化については、日本海沿岸海況予測システムの計算結果を用いて詳しく検討した（図4）。風が吹き始めた8月25日12時頃の流況図をみると（図4上段）、海面下5mの流れの計算結果は風下方向である北に向かって流れていた。その後、風がさらに強くなった26日0時頃になると（図4下段）、表層では北へ向かう流れが強まる一方で海面下30mでは南へ向かう流れが強くなっていた。このこと



図1 測点図. ○、□は水温の係留観測を実施した測点. 初年度の研究で、2015年8月に水温低下現象が丹生、宇久、大島、高浜で発生していたことを確認した。

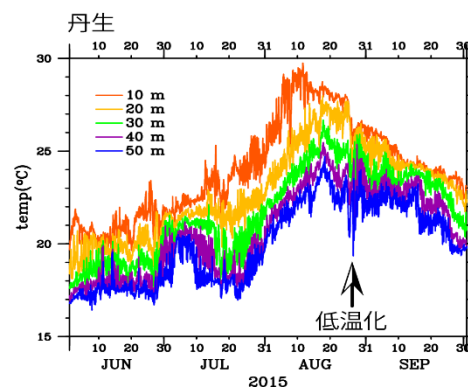


図2 丹生における2015年の水温時系列. 矢印は、8月末に一時的な水温が低下したことを示す。

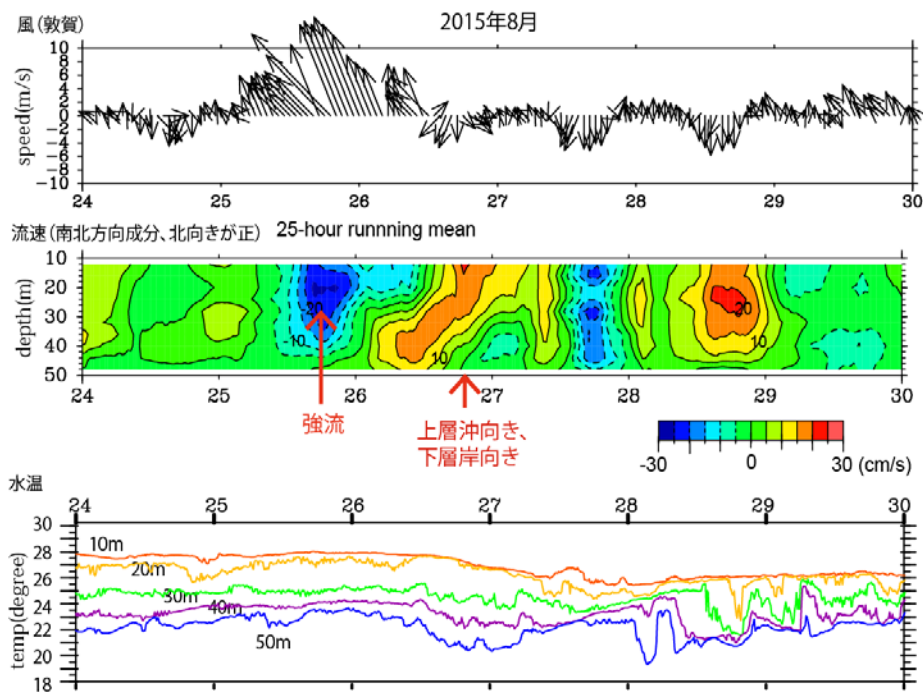


図3 2015年8月24-29日の敦賀の風（上段）、丹生定置で測定された流速（中段）、水温（下段）

昇発生時と類似の流動構造が水温を引き起こしたと考えられる。しかし、このとき特に強風では無かったことから、この流れの構造がその場の風で引き起こされたのか、あるいは別の条件で形成されたのか、丹生だけのデータでは理解することは難しかった。今後も観測を継続して現象の発生頻度や詳細な発生機構について検討する必要がある。

は、南へ向かう流れが海面下 30m 層付近で発生したことを示した観測データをよく再現している。次に 25-26 日の水温の時系列に着目すると（図3下段）、水温には大きな変化が生じていなかったことがわかる。つまり、台風による強風は敦賀半島付近で強い南向きの流れを引き起こしたものの、水温の低下を引き起こす原因ではなかったといえる。

そこで、強風がおさまってきた 26 日以降のデータに着目する。図3に示した流れと水温のデータは、弱い西風または南西風が吹き始めた 26 日 12 時頃から上層は沖向き（北向き）、下層は岸向き（南向き）の構造を持つ流れが発生し、このときに水温が低下していたことを示した。この沿岸湧

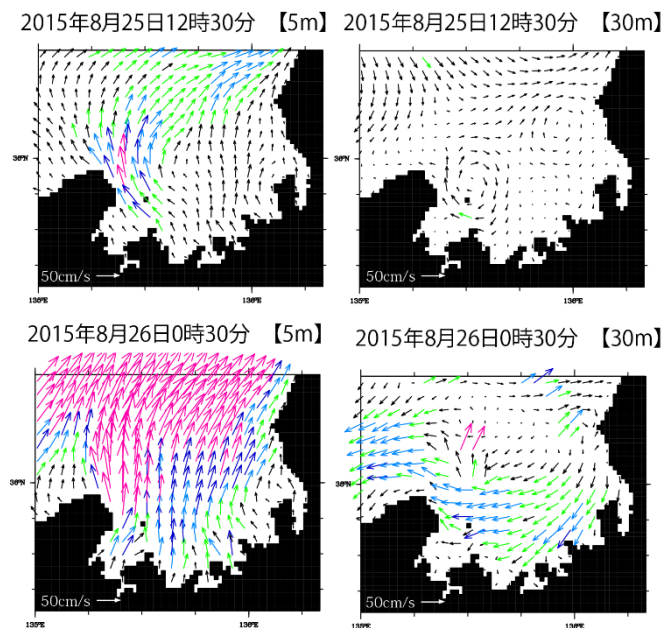


図4 数値モデルの計算結果. 2015年8月25日12時30分（上段）、8月26日0時30分（下段）左図は海面下5m、右図は海面下30mの流れを示す。

【成果発表】

「Impacts of Typhoon on Coastal Currents and Primary Production in Wakasa Bay, Japan」 A. Kaneda, K. Ayukawa, T. Senjyu. Asia Oceania Geosciences Society 2016, 13th Annual Meeting, (2016年8月)

【研究組織】

【研究代表者】

福井県立大学 海洋生物資源学部 兼田淳史

【研究協力者】

福井県水試 漁場環境研究グループ 鮎川航太  
 福井県立大学 生物資源学専攻 吉川泰広

【所内世話人】

九州大学応用力学研究所 千手智晴

PM2.5 エアロゾル濃度変動に関わる NH<sub>3</sub>/NH<sub>4</sub><sup>+</sup>の動態解明に関する研究

名古屋大学大学院 環境学研究科 長田和雄

## 目的

中国における高濃度の PM2.5 汚染に関する報道がきっかけとなり、PM2.5 の越境輸送や国内での発生状況、発生要因の解明に関心が高まっている。PM2.5 は直径 2.5 μm 以下の微小粒子状物質の「集合体」で、硫酸塩 (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) 以外にも硝酸塩 (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)、アンモニウム塩 (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) など様々な化学成分を含む。粒子中の NH<sub>4</sub><sup>+</sup>は、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>や NO<sub>3</sub><sup>-</sup>を中和するカウンター成分として重要であるが、その動態については十分に研究されてきていない。これら粒子中の NH<sub>4</sub><sup>+</sup>や NO<sub>3</sub><sup>-</sup>の生成にはガス状のアンモニア (NH<sub>3</sub>) や硝酸 (HNO<sub>3</sub>) 濃度の測定が重要であるが、これまで時日別の測定例は少ない。そこで、PM2.5 濃度変動要因について検討するために、ガス状の NH<sub>3</sub>や HNO<sub>3</sub>と粒径別の NH<sub>4</sub><sup>+</sup>と NO<sub>3</sub><sup>-</sup>について 1 時間から数日の時間分解能で濃度を測定した。

## 観測方法

大気観測の手法については前年度の報告に詳細を記したので、ここでは概要を示す。NH<sub>3</sub>と微小 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>については連続測定装置 (Osada et al., AAQR, 11, 170-178, 2011) を用い、HNO<sub>3</sub>と粒径別 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>の観測にはデニューダー・フィルター法を用いた (長田ほか, 2016)。観測は九州大学筑紫キャンパスの G 棟 607 号室にて、2014 年 7 月 31 日から 2015 年 10 月 19 日まで行った。H28 年度は、これらデータの解析を行った。

## 結果と考察

図1に示したのは、下から順に、微小粒子中のNH<sub>4</sub><sup>+</sup>濃度、NH<sub>3</sub> (赤)と光学的黒色炭素 (OBC) 濃 (灰)、太宰府での気温と時別雨量 (青の縦棒)、太宰府での風向 (赤)・風速 (黒) である。微小粒子のNH<sub>4</sub><sup>+</sup>濃度には規則的な日内変化が見られないのに対し、NH<sub>3</sub>ではほぼ毎日、朝から昼前にかけて濃度が上昇した。NH<sub>3</sub>の発生源としては畜産・家禽、施肥等の生物・農業活動のほか、自動車排ガスも寄与すると言われている。しかし、ディーゼル排ガスの影響で濃度が上昇するOBCとは、日内変化の様子が必ずしも一致しなかった。図には示さないが、風向別に各種濃度をプロットすると、NH<sub>3</sub>とOBCでは北東～南東方向にかけて濃度が高くなっていた。これは、NH<sub>3</sub>については東～南東方向に存在する養鶏場などの生物・農業由来発生源の影響を受けるためと考えられる。OBCについては、観測地の東方に位置する幹線道路の影響を受けているのかもしれない。

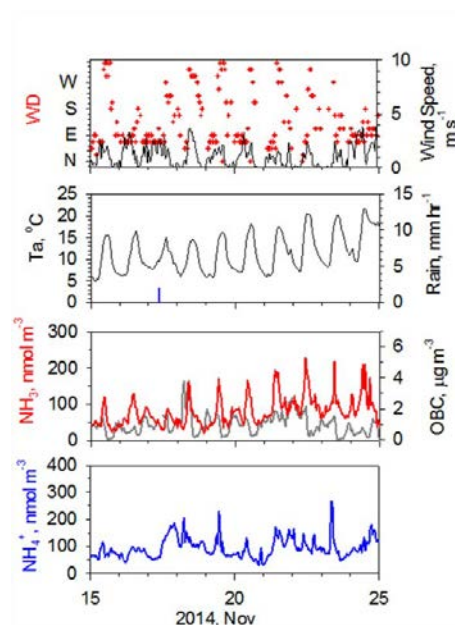


Fig. 1 NH<sub>3</sub> 濃度の日変化の観測例 (2014年11月15～24日)

Fig. 2に、粒径別NH<sub>4</sub><sup>+</sup>濃度とNH<sub>3</sub>濃度、全アンモニア態窒素 (NH<sub>x</sub>) の月平均値、その内訳 (%)、月降水量を示す。粗大粒子のcNH<sub>4</sub><sup>+</sup>濃度は、1~3月に濃度が高く、微小粒子のfNH<sub>4</sub><sup>+</sup>濃度は、1~5月にかけて高めとなる季節変化を示した。NH<sub>3</sub>濃度は春~夏にかけて濃度が高いが、14年8月のように雨量が多いと夏でもNH<sub>3</sub>濃度が低い。NH<sub>x</sub>濃度は2~4月の春に高く、NH<sub>x</sub>に占める粒子態の割合は、気温の低い12~1月で70~80%と高く、気温の高い7~8月には50%以下と低かった。

図には示さないが、HNO<sub>3</sub>濃度もNH<sub>3</sub>濃度と同様に春~夏にかけて高く、粒子中のNO<sub>3</sub><sup>-</sup>濃度は微小・粗大ともに気温の低い時期に高かった。粗大NO<sub>3</sub><sup>-</sup>濃度は冬よりも春に高くなる傾向があり、黄砂や海塩粒子をキャリアにした長距離輸送の影響を受けるためと考えられる。

ガス状・粒子状のアンモニア態窒素と硝酸態窒素濃度について、通年にわたり同時に測定した例は、世界的に見ても少ない。本研究では、研究協力者の尽力により、非常に貴重な通年データを得ることができた。今後は、モデルシミュレーションによる解析を含めてさらに考察を進める予定である。

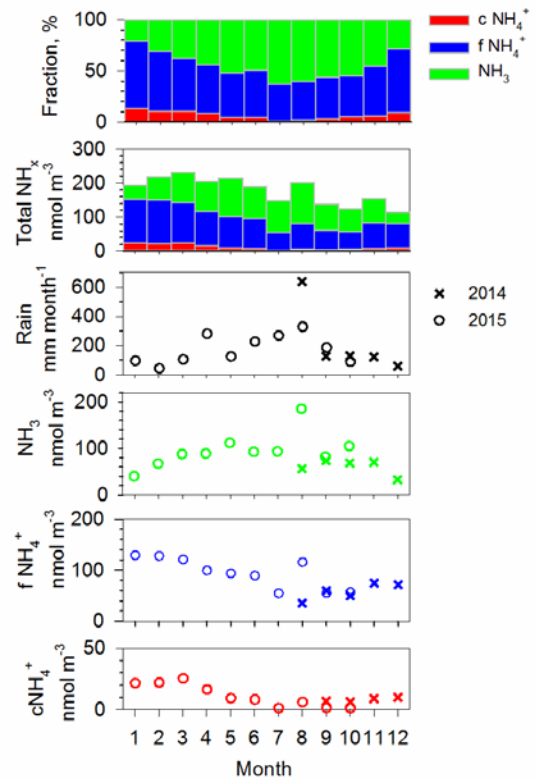


Fig. 2 筑紫キャンパスにおける各濃度の月平均値と内訳 (%)、大宰府での月間降水量。f は微小粒子、c は粗大粒子を示す。

**研究成果報告：【論文】**長田和雄, 上口友輔, 山本重一, 桑原昇平, Pan Xiaole, 原由香里, 鶴野伊津志, 大気エアロゾル化学成分連続自動分析装置(ACSA-12)とデニューダー・フィルター法による大気エアロゾル粒子の粒径別イオン成分濃度の比較, エアロゾル研究, 31, 203-209, 2016.

**【学会発表】**長田和雄・上口友輔・山本重一・鶴野伊津志・Pan Xiaole・原由香里・桑原昇平, 大気エアロゾル化学成分連続自動分析装置(ACSA-12)とデニューダー・フィルター法による大気エアロゾル粒子の粒径別イオン成分濃度の比較, 第33回エアロゾル科学・技術研究討論会, A03, 2016年8月31日~9月2日, 大阪府立大学

長田和雄・上口友輔・山本重一・鶴野伊津志・Pan Xiaole・原由香里・桑原昇平, 大気エアロゾル化学成分連続自動分析装置(ACSA-12)とデニューダー・フィルター法による大気エアロゾル粒子の粒径別イオン成分濃度の比較, 第57回大気環境学会年会, P-081, p341, 2016年9月7日~9月9日, 北海道大学

長田和雄・鶴野伊津志・板橋秀一, 九州大学筑紫キャンパスにおけるNH<sub>3</sub>とNH<sub>4</sub><sup>+</sup>濃度の通年にわたる特別連続観測, 第57回大気環境学会年会, 2A1000, p381, 2016年9月7日~9月9日, 北海道大学

#### 研究組織

代表者：長田和雄（男、53歳）名古屋大学・教授、NH<sub>3</sub>/NH<sub>4</sub><sup>+</sup>とHNO<sub>3</sub>/NO<sub>3</sub><sup>-</sup>等の観測・解析

協力者：原由香里九州大学応用力学研究所・助教、数値モデル

協力者：鶴野伊津志九州大学応用力学研究所・教授、総合解析



## 海洋生態系モニタリングのための群知能海中ロボットシステムの研究開発

大阪府立大学・大学院工学研究科 有馬 正和

## □研究目的

本研究の目的は、海洋生態系のモニタリングを行うための群知能海中ロボットの自律制御システムを確立することである。研究代表者らは、広範囲に亘る海洋生態系のモニタリングや海洋調査に資するための水中グライダーの実用化を目指して、高い運動性能を発揮することのできる主翼独立制御型水中グライダーSOARER (Fig.1) や長期間・広範囲の運用を目指す実海域用ソーラー水中グライダーTonai60 (Twilight Ocean-zonal Natural-resources and Animals Investigator) (Fig.2) を開発している。最大潜航深度1,500m の

SOARER には、多項目海洋環境データロガーRINKO-Profiler を搭載している。一方、最大潜航深度 60m の Tonai60 には、サンゴ礁の蛍光撮影や被度のマッピングを行うための高感度ネットワークカメラや海棲哺乳類の音響観測を行うための水中音響データロガーA-tag, 多項目海洋環境データロガーRINKO-Profiler を搭載している。これらの自律型水中グライダーには実海域での高度な自律性が求められるので、その自律制御システムを確立するためには、深海水槽における多岐に亘る基礎データの収集・解析が必要不可欠である。研究代表者らの所属する大阪府立大学の船舶試験水槽（長さ×幅×深さ：70m×3m×1.5m）は、水中グライダーの性能評価を行うには幅と水深が不十分であり、九州大学・応用力学研究所の深海機器力学実験水槽（長さ×幅×深さ：65m×5m×7m）を使用させていただくことが本研究の進展に最も有効であると判断した。貴研究所・

海洋大気力学部門・海洋流体工学分野は、海中ビークルの運動制御に関する研究において優れた実績があり、中村昌彦准教授との技術交流や情報交換によって群知能海中ロボットシステムに係る研究の飛躍的な進展が図れると考えたことも共同利用研究の目的のひとつである。

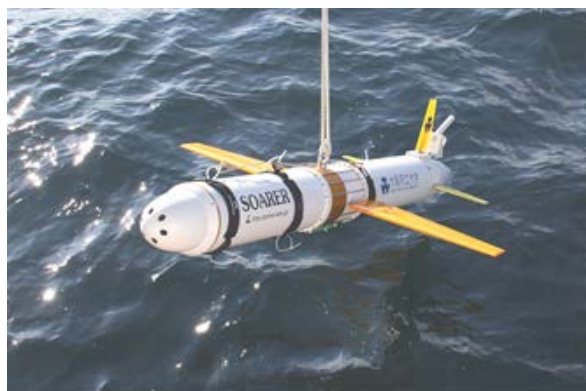


Fig.1 主翼独立制御型ソーラー水中グライダー SOARER

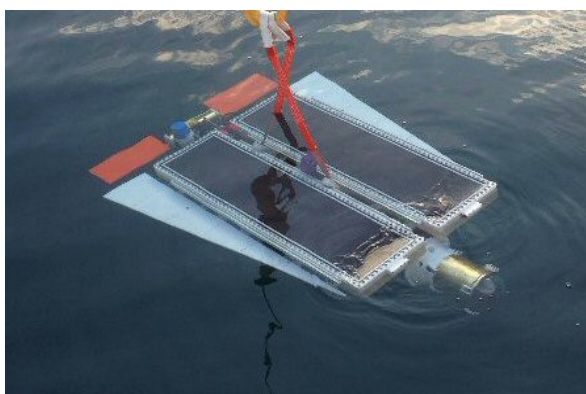


Fig.2 ソーラー水中グライダー Tonai60

□研究の成果

本研究では、実海域でこれら複数機の自律型水中グライダーを効率的に運用するために、群知能海中ロボットシステムの構築を検討した。グライダー型海中ロボットによる長期間・広範囲の運用を実現するために、雰囲気水と機体との密度差を利用した密度差エンジン水中グライダー (Fig.3) を提案し、その実現可能性を検討した。バッテリーなどの動力源を一切用いずに浮力と機体姿勢を自動的に調整することのできる試験機体を設計・製作して、食塩水を用いて密度躍層を形成した水槽試験によって「密度差エンジン水中グライダー」が実現可能であることを実証した (Fig.4)。

次年度以降、SOARER やTonai60 などの自律型水中グライダーと連携した群知能海中ロボットシステムの構築に向けて、完成度を高めたいと考えている。群知能海中ロボットシステムは、長期間・広範囲に亘る海洋環境生態系のモニタリングを目指していて、海中音響観測に関する装置 (4ch-UPAMS および 2ch-UPAMS) を用いた海棲哺乳類の鳴音解析アルゴリズムの構築、船舶が発生する雑音の低減手法の開発を行った。



Fig.3 密度差エンジン水中グライダー試作機



Fig.4 密度差エンジン水中グライダーの潜航試験

□研究組織

氏名	所属	職名	役割・担当分野
有馬 正和	大阪府立大学・ 大学院工学研究科	教授	代表者・総括, システム計画
石井 和男	九州工業大学・ 生命体工学研究科	教授	水中ロボットの自律制御
中村 昌彦	九州大学・応用力学研究所	准教授	所内世話人

## 水中ビークル運用のための装備に関する研究

長崎大学・水産学部 森井 康宏

### 1. はじめに

近年、海洋観測・調査用の海中ビークルは、専用の母船を必要とする大型のものから、専用の母船を必要としない小型のものまで数多く作られ、実用的な段階へと入りつつある。特に、技術者の支援を必要とせず、海洋物理の研究者が比較的容易に海洋観測に使用できる、中、小型のビークルは、専用母船、すなわち専用の母船に装備された投入・回収装置を持たないため、作業がいつそう困難なものとなる。長崎大学附属練習船長崎丸は応用力学研究所と共同で長年海洋観測を行っており、応用力学研究所所有の海中ビークル運用の実績を持つ。そこで本研究では、ビークルを損傷することなく、波浪中で、安全にビークルを運用するために必要な装備について調査・研究を行う。

本年度は、円盤型水中グライダーによる海洋観測、グライダーの位置検出の試み、観測母船の模型試験立会、ビークルの針路保持制御実験について報告する。

### 2. 円盤型水中グライダーによる海洋観測

円盤型水中グライダーによる海洋観測が 2016 年 7 月、東シナ海で実施された。観測場所を Fig.1 に示す。水深 100m の海底が平らな海域である。

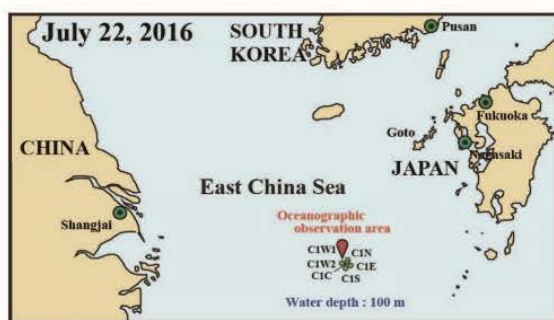


Fig. 1 海洋観測海域

ビークル投入後、SSBL でビークルが順調に潜航していくことを確認した後、「長崎丸」はビークル投入地点 C1W1 (30.15'284 N, 126.51'055 E) を離脱して決められた定点 C1N (30.18'704 N, 126.58'987 E)、C1S (30.08'553 N, 126.55'234 E)、C1E (30.11'999 N, 127.52'814 E)、C1C (30.15'531

N, 126.57'206 E)、C1W2 (30.15'141 N, 126.51'201 E) を巡回し、「長崎丸」装備の CTD による観測、採水、採泥 (堆積物採取)、FRRF (高速反復速度蛍光光度計) による光合成パラメータの測定、TurboMAP (乱流海洋鉛直微細構造測定装置) による微細な流速分布の測定などの海洋観測を行った。

Fig.2、Fig.3 に CTD による海水温度・塩分計測結果と ADCP による流速計測結果の一例を示す。夏季の観測であるので、海面付近で水温・塩分が大きく変化している様子が捉えられている。また、水深 60m~80m 付近で流速が周期的に変動していることがわかる。

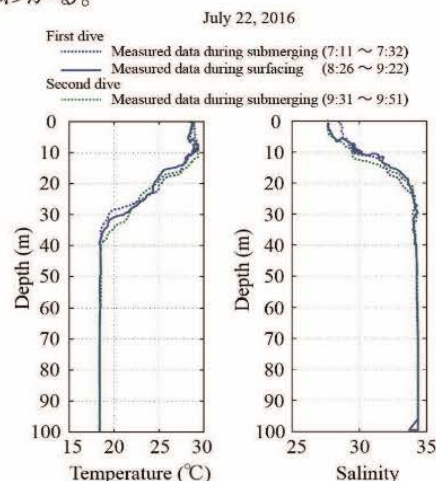


Fig. 2 ビークルで観測された水温・塩分の鉛直分布

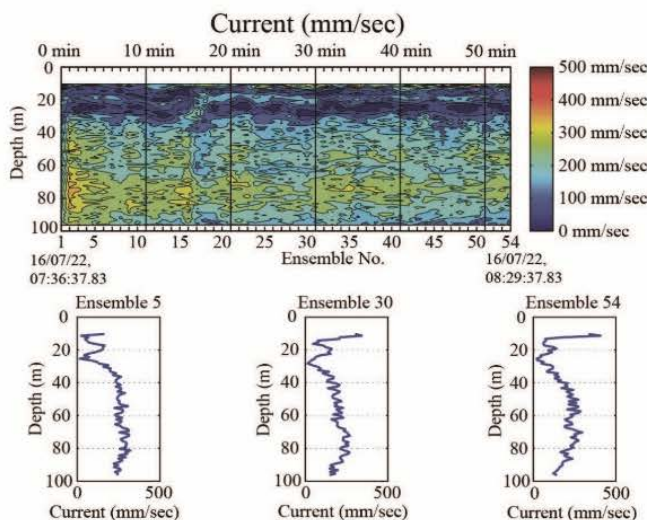


Fig. 3 観測された流速鉛直分布の時間変化

### 3. 水中グライダーの位置検出の試み

長崎丸装備のソナーにより潜航中のビーグルを検出できるかどうかの試験を2016年7月に実施した。海域は海洋観測を実施した Fig.1 に示す海域と同じである。視認できる漁具をソナーでも確認できたがビーグルの検出には至らなかった。試験時は測定範囲が300m程度のSSBLでもビーグル位置を特定できなかったため、検出可能範囲内にビーグルが存在しなかった可能性が高い。



Fig. 4 ソナーによるビーグル検出

### 4. 新造中の長崎丸の模型試験立会

新造中の長崎丸の模型試験が三井造船昭島研究所で実施中であったので、立会いを2017年2月に実施し、斜航中に船体に働く流体力、強制動揺試験により得られる船体に働く流体力について情報収集を行った。引き渡し後の長崎丸の操船についての有用な情報となるはずである。



Fig. 5 斜航試験

### 5. 円盤型水中グライダーの針路保持制御実験

バーチャルモアリング性能を向上させるための針路保持制御実験が2017年3月に長崎新漁港沖の水深60m海域 (Fig. 6) で実施された



Fig. 6 実験実施海域

コントローラはビーグルの非線形運動方程式を滑空平衡状態のまわりで線形化して得られる状態空間表現のもとに設計されるLQIコントローラが採用された。事前に実施された1/2模型を使用した水槽試験 (Fig. 7) でPIDコントローラ良好な制御性能 (Fig. 8) が得られたためである。残念ながら、滑空角度が想定した値と大きく異なってしまったため良好な針路保持性能が得られなかった。次年度共同利用が採択されれば再度挑戦する予定である。

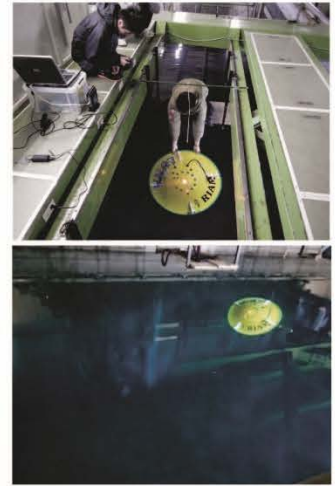


Fig. 7 模型試験

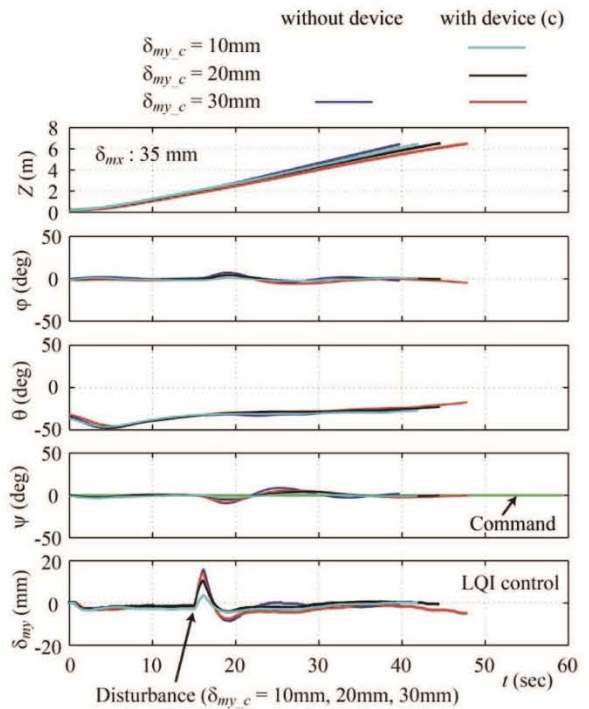


Fig. 8 模型試験結果

### 5. 研究組織

- ・ 研究代表者  
森井康宏 (長崎大学水産学部教授)
- ・ 研究協力者  
山脇信博、内田淳、清水健一、木下宰、楠本成美、  
八木光晴 (長崎大学水産学部)  
中村昌彦 {所内世話人}、野田 穰士朗  
(九州大学応用力学研究所)

## 富山湾におけるブリの回遊メカニズムと漁獲量中短期予測に関する研究

富山県農林水産総合技術センター水産研究所 小塚 晃  
石川県水産総合センター 辻 俊宏

### 1. 目的

富山湾においてブリは古くから漁獲されている重要な魚種である。特に冬季に定置網で漁獲される大型の成魚は寒ブリと呼ばれ、市場価値が非常に高い。そのため寒ブリの豊凶は水産業界のみならず地域社会の大きな関心事であり、漁況予測とその変動要因の解明が求められている。そこでこれまで、応用力学研究所の海洋同化モデル DREAMS\_M の水温分布を用いて、ブリの漁期を通じた漁獲量の予測を実施してきた。一方実際のブリの漁獲量は、約 3 か月の漁期中における数回の大量入網によって決まることが多く、より精度の高い漁獲量予測を行うには、日単位の解析が必要である。これまで大量入網の要因として気象擾乱がいくつかの研究で指摘されているものの、海洋環境との関係については、ほとんど調査されていない。そこで、ブリの大量入網機構を解明することを目的とし、富山湾における大漁入網の 3 事例について、流速との関係を解析した。

### 2. 方法

富山県農林水産総合技術センターが収集している県内の定置網のブリ（4 kg 以上）漁獲量データと漁業者から聞き取りを基に大量入網日を推定した。大量入網のあった漁期（11 月～1 月）の深度 10m, 50m, 100m の富山湾西部（図 1）のモデル流速値を DREAMS\_M から抽出し、北東方向の流速成分の全メッシュ 1 日平均（以下、平均流速）を深度別に計算した。気象擾乱の指標とするため、島根県西郷と北海道寿都との日平均海面気圧の差（以下、気圧差）を求めた。

### 3. 結果および考察

大量入網日として、1997 年 12 月 21 日（富山湾西部～中央部の定置網に 1 万尾超の入網）、2011 年 1 月 2 日（富山湾西部の定置網に 1 万尾超の入網）、2014 年 12 月 27 日（富山湾西部の定置網に 2000 尾超の入網）を選定した。

漁期全体の気圧差と平均流速（いずれも 5 日移動平均）の時系列を比較した。期間中、平均流速は正の値を示すことが多く、つまり北東流が卓越していた。しかしながら、西高東低の気圧配置となり、気圧差が大きくなると、いずれの水深帯においても、平均流速が小さくなり、流れが弱まるか、南西流に転じた（図 2）。さらに、その後 1 週間程度で北東流が卓越する状態に戻る事が示された。

次に大量入網日前の気圧差および平均流速の変化に着目した（図 2）。3 事例とも大量入網の 8～11 日前に気圧差が 8.7～13.8 の極大となり、それに合わせて平均流速も極小となった。その後、平均流速が急激に上昇する途中で大量入網となった。つまり、3 事例の共通点として、西高東低の気圧配置が強まり、富山湾西部の流況は一時的に北東流が弱まり、さらに南西流となった後に、冬季に特徴的な北東流が卓越する状態に戻る約 10 日間以内に大量入網が起こったといえる。

気象擾乱に伴った流況変化が大量入網の要因である可能性があることが示された。一方、ここで示した同様の気象擾乱と流況下においても大量入網とならない場合も多く見られる。今後、さらに事例を増やし、大量入網機構を明らかにしていきたい。

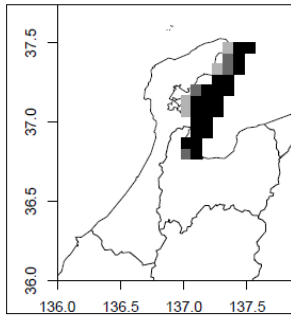


図 1. 平均流速の計算に用いた富山湾西部のメッシュの位置  
 黒色：10, 50,100m、濃灰色：10, 50m、薄灰色：10m を使用

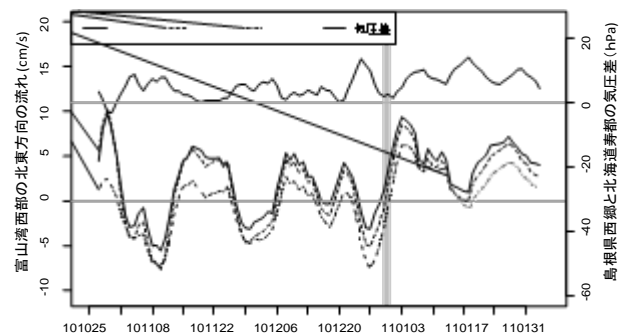
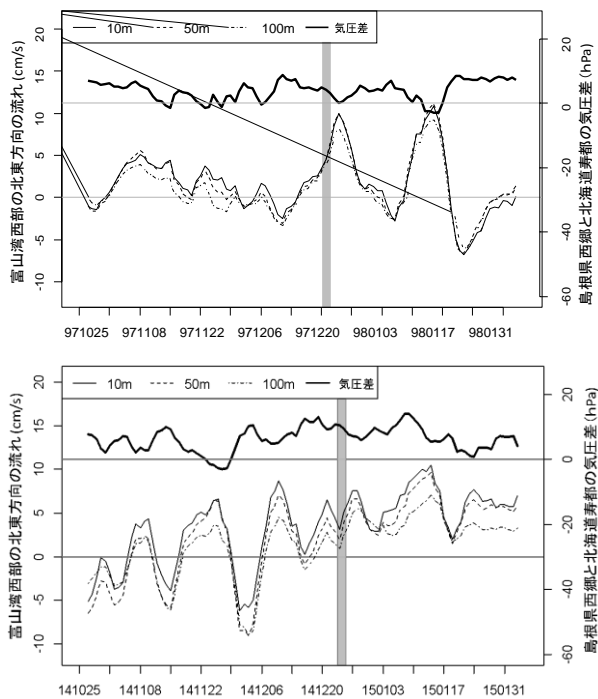


図 2. 水深別日平均流速と気圧差(いずれも 5 日移動平均)  
 左上 1997 年漁期  
 右上 2010 年漁期  
 左下 2014 年漁期  
 射影は推定された大量入網日

#### 4. 発表等実績.

小塚 晃 富山湾周辺の流れと漁況. 第47 回日本海定置漁業振興大会, 2016.6.7, 魚津市  
 小塚晃 富山湾の平均的な流れと、冬型気圧配置 (ブリ起こし) のイベント的な流れ.  
 第71 回日本海海洋調査技術連絡会, 2016.12.7, 千代田区

#### 5. 研究組織

研究代表者	石川県水産総合センター	辻 俊宏	主任研究員
所内世話人	九州大学応用力学研究所	広瀬 直毅	教授
研究協力者	富山県農林水産総合技術センター	小塚 晃	研究員
研究協力者	九州大学応用力学研究所	千手 智晴	准教授

# 船体に取り付けたサテライトコンパスによる外洋波浪の計測手法開発と GNSS 反射信号との対応関係

神戸大学 海洋底探査センター 河口信義

## 研究要旨

本研究は GNSS の一つである GPS 衛星から発射された信号の海面による反射波を計測することで、海面における波浪・海氷、風速などの状態を推定するための基礎的な研究である。本年度は昨年度作成した自動計測可能なサテライトコンパスユニットを曳航船及び被曳航船に設置し、多種類の洋上移動体姿勢計測装置を搭載した中型自航式多目的船に設置し、出入港時、狭水道通過時、沿岸航海時及び作業時に分けて、それぞれの計測装置から得られた結果を示し、GNSS-R による波浪計測の糧とする。

## 1. 目的

当研究室は 2015-2017 までの間、文部科学省宇宙科学研究拠点形成プログラム「GNSS 反射信号を用いた全地球常時観測が拓く新しい宇宙海洋科学」をテーマとした研究プロジェクトに参画しており、本研究はその中で船舶に搭載したサテライトコンパスによって波浪による船体動揺の計測を実験的に調査することを目的とし、洋上移動体にサテライトコンパス設置した実験を行ったので、その結果を述べる。

## 2. 実験

洋上移動体におけるサテライトコンパスユニットを用いた実験は、2016 年 9 月 30 日から 10 月 2 日までに 3 日間、大分港より神戸港まで航行する船舶に搭載し実施した。図 1 にサテライトコンパスユニットを示す。実験洋上移動体としての曳航船は全長 30.4m、総トン数 19 トン、最大乗員数 6 名及び被曳航船は長さ 60m、幅 22m、深さ 3.5m、船体重量は 535 トンで、図 2 に曳航船と被曳航船を、図 3 に大分-神戸間の実験航海の航路を示す。



図 1 サテライトコンパスユニット

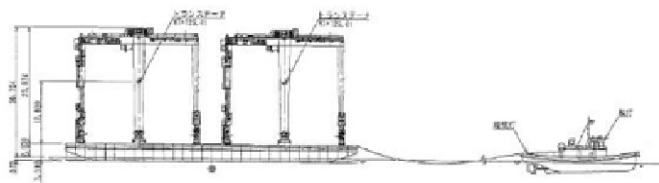


図 2 曳航船と被曳航船



図 3 実験航路

全航海時間は 38 時間であり航海であったが、その間において比較的荒天と考えられるのは台風の影響を多く受けていた海域は前章の航過表によると山口県祝島付近であったことから、ここではその荒天時（波高 1 m，風向 NNW，風力 4）に的を絞って解析を行う。

### 3. 実験結果

図 5 に荒天時の曳航船と被曳船の実際の針路，図 6 に実際の速力，図 7 に上下方向の移動量，図 8-9 に姿勢角であるロール・ピッチ角を曳航船と被曳航船について示す。

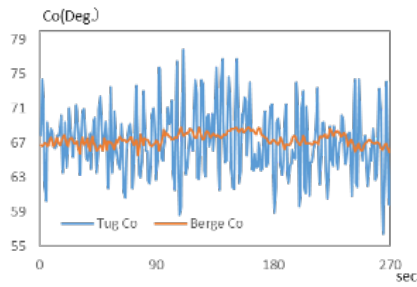


図 5 針路

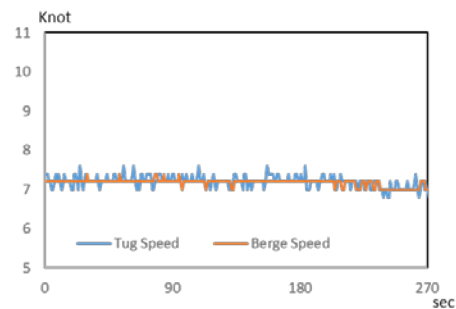


図 6 速力

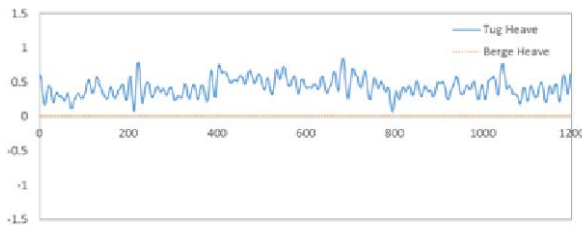


図 7 上下方向の移動量

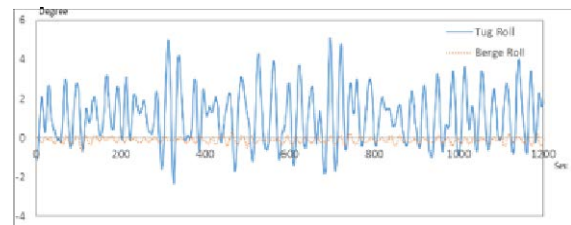


図 8 ロール角

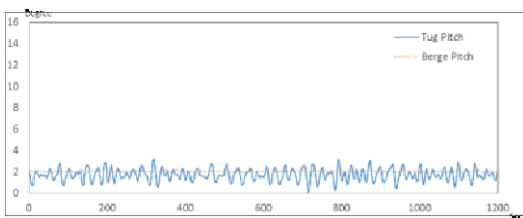


図 9 ピッチ角

### 4. まとめ

本研究は大分から神戸を航行する曳航船及び被曳船に加速度計及びサテライトコンパスを設置し，針路・速力・姿勢角・上下動について荒天時の実験結果を示した。その結果から，概ね洋上移動体における針路・速力・姿勢角・上下動は計測可能で，今後は本装置を用いて海洋波浪情報の抽出を試み，波浪計測ブイによる検定や GNSS-R 信号との対応関係を調べる予定である。

### 研究成果

- 1) GPS コンパスを利用した曳航船・被曳船の船体姿勢計測について，久保田崇；河口信義；斎藤威志，日本航海学会講演予稿集 Vol.4, No.2, pp.250-253, 2016.10.
- 2) Experimental Result of 3-D Movements of Tug Boat and Barge using GPS Compass, Takashi KUBOTA, Nobuyoshi KOUGUCHI and Takeshi SAITO, Proceedings of the Asia Navigation Conference '16 Yeosu, pp.62-71, 2016.11.



## GNSS 反射波信号観測用受信機の開発とマルチコプタによる実証実験

中部大学工学部 海老沼拓史

## 1. 目的

本研究では、海面で反射した測位衛星システム（GNSS: Global Navigation Satellite System）の信号を利用した新しい海洋リモートセンシングの実現を目標としている。これは、GNSS 衛星を信号源としたパッシブなレーダー観測であるため、小型化・省電力化が可能である。また、一度に複数の GNSS 信号を観測できるため、広範囲な海洋観測が可能となる。このようなセンサを複数の小型衛星や無人飛行機などに搭載することで、時間分解能の高い海洋リモートセンシングが期待できる。

九州大学応用力学研究所との平成 28 年度共同利用研究では、平成 27 年度に開発した GNSS 反射波観測用受信機を、応用力学研究所が所有するマルチコプタに搭載して海面高度計測の実証実験を実施した。

## 2. GNSS 反射波による海面高度計測

GNSS 反射波観測受信機は、GNSS 衛星からの直達波を観測する天頂方向のアンテナと、海面からの反射波を観測する nadir 方向のアンテナをと反射波を搭載している。海面からマルチコプタまでの高度が地球の半径に対して十分に小さく、海面が平面として近似できるものとする、海面高度と GNSS 信号の幾何学的関係は図 1 で表すことができる。

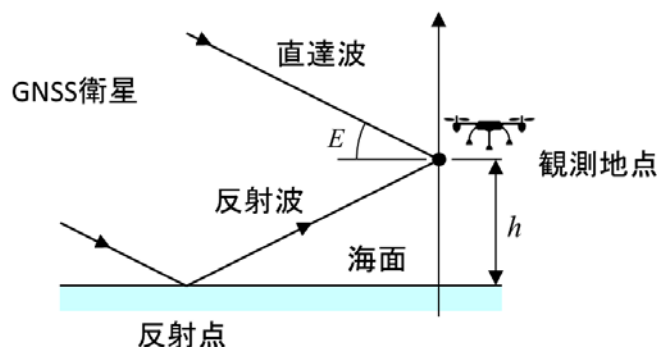


図 1: GNSS 反射波と海面高度との幾何学的関係

ここで、海面から観測地点までの高度を $h$ 、衛星仰角を $E$ 、アンテナ間の時刻同期誤差を $dt$ 、光の速度を $c$ とすると、直達波と反射波の伝搬距離差 $dp$ は次式で表される。

$$dp = 2h \sin E + cdt$$

GNSS 反射波観測受信機で観測される伝搬距離差 $dp$ に対して、未知数は海面からの高度  $h$  とアンテナ間の時刻同期誤差 $dt$ となる。通常、複数の GNSS 衛星が同時に観測できるため、これら 2 つの未知数に対して最小二乗法を解くことで、海面から観測地点までの高度を求める。このとき、マルチコプタの位置が高精度で測位さえていれば、GNSS 反射波観測受信機で推定された高度から、相対的に海面高度を求めることができる。

### 3. 海面高度計測の実証実験

本研究では、平戸に停泊中の銀河丸から、GNSS 反射波受信機を搭載したマルチコプタをフライトさせ、高度 150m からの海面高度計測の実証実験を実施した。図 2 に計測結果の一例を示す。ここで、青線は GNSS 反射波受信機から推定されるマルチコプタの高度であり、赤線は平戸に設置されている電子基準点との精密測位によるマルチコプタの高度を示している。

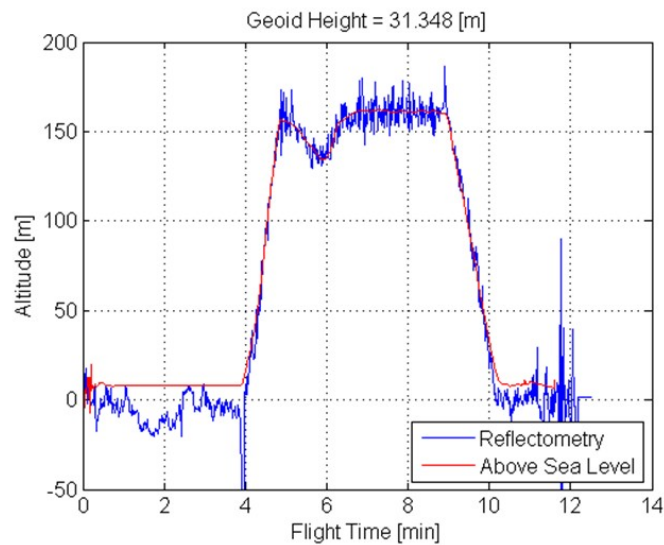


図 2: GNSS 反射波による高度推定結果

図 2 において、マルチコプタが銀河丸の甲板に着地している高度 0m 付近では、海面からの反射波を受信できていないため精密測位結果とは一致しないが、フライト中の高度 50m 以上では、GNSS 反射波による海面からの高度の推定値と高い一致性を示している。しかし、海面での反射時における電波の散乱や、反射点以外からのマルチパスの影響で、GNSS 反射波による高度推定値のばらつきが大きい。

マルチコプタの搭載できるアンテナのサイズに制約があり、マルチパスの低減は困難であるが、反射波観測専用のアンテナ設計が今後の課題である。また、今回の実験では伝搬距離差の計測に伝搬距離観測値を用いたが、より精度の高い搬送波位相による高度推定も試みる予定である。

## 沿岸波浪と GNSS 反射信号との対応関係の観測

京都大学大学院理学研究科 根田昌典

## 目的

文部科学省国家課題対応型研究開発推進事業における平成 28 年度宇宙航空科学技術推進委託費に採択されている研究プロジェクトに関連して、波浪と GNSS 反射波の関連性を調査する必要性が高まっている。そこで、波浪が GNSS 反射波に与える影響についての基礎的な調査を実施するために、GNSS レシーバと波浪の長期観測を実施する。和歌山県田辺湾にある京都大学防災研究所白浜海象観測所が管理する高潮観測塔を利用して、GNSS レシーバを長期間設置し、塔の通常観測データを利用して GNSS 反射波と波浪の関係についての基礎的データを取得する。検証のために、応力研が所有する波浪ブイ、マルチコプターを借用して和歌山県田辺湾において波浪観測を行う。また、(独)水資源機構が琵琶湖に設置している安公川沖ブイにおいても同様の試験観測を実施する。

## 研究の実施体制

本研究は以下の体制で実施した。

研究代表者：根田昌典 (51)：京都大学大学院理学研究科 助教

所内世話人：市川香 (50)：応用力学研究所 准教授

## 手法と結果の概要

研究は、波浪と GNSS 反射波の関連性を調査するための予備的な調査を実施した昨年の結果を踏まえ、継続的なデータを取得するために京都大学防災研究所流域災害研究センター白浜海象観測所の田辺中島高潮観測塔と水資源機構琵琶湖開発総合管理所が所轄する安暴川沖総合自動観測所に GNSS レシーバーを設置し(写真1)、水面状態や海上風などの周辺環境による GNSS 信号の反射波の挙動を調べるための基礎データを取得した。



写真 1：(左)観測塔での GNSS レシーバー設置場所 (赤線枠) と設置近影

研究では京都大学防災研究所流域災害研究センター白浜海象観測所の協力を得て、2016 年 6 月 27 日に和歌山県田辺湾湾口付近にある田辺高潮観測塔に GNSS レシーバーを設置し、連続観測を実施した。波高データから有義波高、有義波周期、Mean Square Slope などの波浪パラメーターを計算した(図1)。

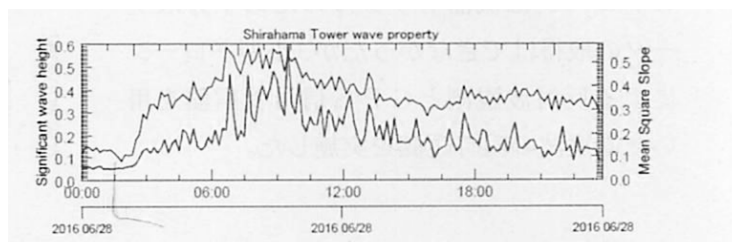


図 1：設置翌日 (6 月 28 日) の有義波高と MSS の時間変化

このデータを基にして昨年度実施した波浪ブイのデータを検証したところ、GROWTHプロジェクトで新規購入した小型の波浪ブイは風波程度の短周期波を比較的良く再現している(図2)。一方、小型ブイは観測塔の波高計よりも高い有義波高を示すとともに有義波周期はより長い値を示した。小型ブイによる観測値はほぼ同時期に観測した中型波浪ブイの観測値とほぼ同等である。白浜観測塔の波高計は超音波式であるためそのフットプリントの影響で波高データが過小評価される可能性があるとの指摘もあり、5秒以上の周期の波の成分だけで比較したところ、有義波高、周期ともに観測塔データとブイデータの差が縮小した。(表1, 2, 図3)

また、波浪情報としてマイクロ波領域でもっとも感度があると考えられるMean Square Slopeと成分波の有義波の波形勾配を比較したところ、うねり成分についてはよい一致を見せ、風波成分についてはあまりよい一致とは言えないことが分かった(図4)。これは有義波の定義と各成分波の波高分布の関係に依存するが、風波は波長のスペクトル幅が広いことに関しては注意が必要である。

GROWTHの一環としてGNSS信号による波浪観測試験は琵琶湖にある独立行政法人水資源機構の安曇川沖総合自動観測所(安曇川沖ブイ)においても昨年度末に設置したGNSSレーダーの維持作業を続けるとともに基礎データを取得した。また、2017年1月7日は安曇川沖ブイに最も近い地域の一つである高島市の琵琶湖こどもの国の湖岸においてドローンを用いた比較検証事件を実施した。大型のドローンは機器トラブルのため十分なデータの取得はできなかったが、小型ドローンによる反射波観測とGPS信号受信器を用いた直達波の同時観測を実施した。

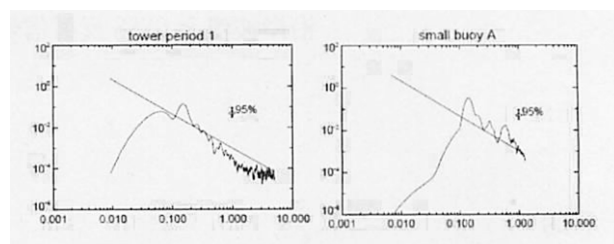


図 2: 観測塔波高計(左)と小型ブイ(右)から得られた波高スペクトル

表 1: 5 秒以下の周期成分から計算した有義波の波高と秋季の比較

	有義波高(塔)	周期	有義波高(ブイ)	周期
小型ブイA	0.131m	3.6s	0.278m	4.5s
小型ブイA	0.119m	3.7s	0.298m	4.7s

表 2: 5 秒以上の周期成分から計算した有義波の波高と秋季の比較

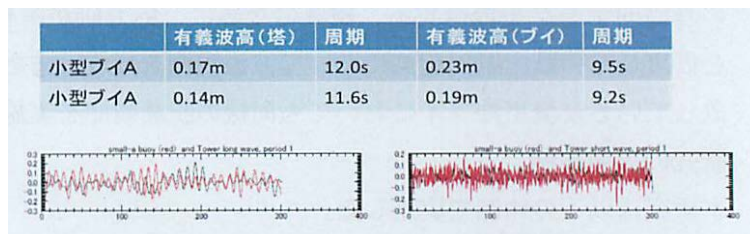


図 3: (左) 5 秒以上の周期の成分比較と (右) 5 秒以下の周期の成分比較の例。線は小型ブイの値、黒線は観測塔波高データを示す。

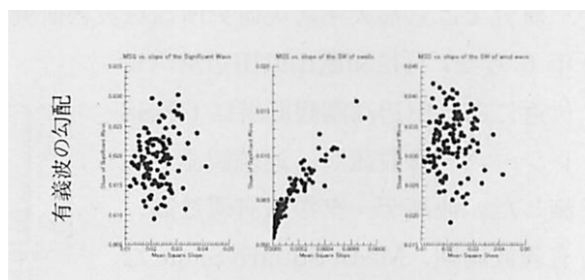


図 4: (左) 観測された波の MSS と(中央)うねり成分の MSS (右) 風波成分の MSS に対するそれぞれの成分波から計算した有義波の勾配(有義波高/有義波長)の比較

## 内部波特有の共鳴現象に関する解析

研究代表者 神戸大学大学院工学研究科 中山恵介

### 研究の目的

過去における研究成果として、辻・及川らは KP 方程式を利用し 2 層流体において 2 波が干渉する場合、Miles の解で示されるような入射波に対して 4 倍にもおよぶ大振幅内部ソリトン波の発生可能性を示した。しかし、2層流体では critical level で示される内部ソリトン波の振幅を抑制する特徴が存在し、修正された Miles の解を直接適用できるかどうかの問題が存在する。現在、申請者等によって投稿準備が進められている論文において、2 層流体における内部波を取り扱う場合、表面波とは異なるメカニズムで共鳴による大振幅の発生が抑制される可能性が示されている。一方で、表面ソリトン波では修正された Miles の解によりピーク位置の推定が可能であることがこれまでの本研究グループにより示された。そこで本共同研究では、入射波の振幅および critical level が内部波の共鳴現象に与える影響を評価し、内部波特有の共鳴現象の解明を行うことを目的とする。

### 研究の方法

2次元平面内において干渉する 2つの内部ソリトン波を対象とし、critical level が共鳴による振幅増幅に与える影響を検討するため、以下の研究項目を実施する。

1. これまでは、それぞれ独立したソリトン波同士の干渉を検討してきたが、本研究ではある間隔で進行する 2波が干渉する場合、つまり4波の干渉について検討する。
2. 4 波の干渉となる場合、異振幅の共鳴による振幅増幅率を理論的に推定し、計算により得られている大振幅が共鳴現象であるかどうかの確認を行う。
3. 内部波に対して、2波の干渉に critical level がどの程度影響をおよぼすかを検討する。

### 主要な成果

本研究の主要な結論は、以下のとおりである。

- (1) 表面波を対象として4波の干渉に関する検討を行った。臨界角度より大きな角度で入射・干渉する場合には、反射波が O-type であることから、その後の反射波同士の干渉も容易に推定することが出来た。一方で、入射角度が臨界角度より小さい場合には、(3142)-type での干渉となるため、反射波同士の干渉が stem を持つ複雑な形状を有するのではないかと推測された。しかし、理論的な説明も含めて、反射波の干渉は O-type であることが分かり、その後の干渉も臨界角度より入射角度が大きい場合と同様に容易であることが示された。
- (2) 上述の結果で示されたとおり、反射波を含む干渉もソリトン波の共鳴現象であることが示された。

- (3) 内部ソリトン波の干渉に関して、大振幅となる場合、critical level との影響も含めて増幅率が3程度にとどまることが示された。

### 研究成果報告

K. Nakayama, T. Kakinuma, H. Tsuji, Oblique reflection of large internal solitary wave, *European Journal of Mechanics (B)*, submitted, (2017)

中山恵介, 清水健司, 柿沼太郎, 辻英一, ソリトン波群の共鳴を対象とした強非線形強分散波動方程式による解析, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.72, No.2, pp. I\_7- I\_12 (2016)

### 組織

中山恵介	国立大学法人神戸大学大学院 工学研究科・教授
柿沼太郎	国立大学法人鹿児島大学学術研究院 理工学域・准教授
辻 英一	国立大学法人九州大学応用力学研究所・助教

## 化学輸送モデルを用いた越境汚染に伴う大気から海洋への汚染質と黄砂の沈着過程の研究

一般財団法人 電力中央研究所 環境科学研究所 板橋 秀一

## 1. 目的

アジア域の急速な経済発展に伴い窒素酸化物 (NO<sub>x</sub>) などの大気汚染物質排出量が増加し、それによる大陸からの越境汚染が懸念されている。大気汚染物質の動態を明らかにしていくには、その除去過程である沈着過程も重要な視点である。昨年度の共同利用研究 (27AO-21) においては、ガス状硝酸と海塩粒子から形成される粗大硝酸塩 (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) を化学輸送モデルで考慮し、中国由来の反応性総窒素化合物 (NO<sub>y</sub>) の約 48% が日本縁辺海域に沈着していることを明らかとした (Itahashi et al., 2016) 本年度は、特に春季に見られる黄砂飛来時の粗大 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> の越境輸送を視野に入れ、化学輸送モデルへの黄砂発生スキームの導入を検討し、検証を行った。

## 2. 手法

アジアスケールをカバーした化学輸送モデル CMAQ (Community Multi-scale Air Quality) を用いた。化学輸送モデルの検証には、2013年秋季から九州大学応用力学研究所において連続観測を行っているエアロゾル化学成分連続自動分析装置 (ACSA) を用いた。ACSA により 1 時間の高時間分解能で微小・粗大 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> などの観測が可能である。3 年にわたる微小・粗大 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> の観測値の解析も合わせて進めた。CMAQ に導入した黄砂発生スキームでは、土地利用区分毎の臨界摩擦速度を設定するが、これらの設定がガス状硝酸と鉱物粒子から形成される粗大 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> の再現性にも大きな影響をもつことがわかった。一方、微小 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> の観測値の解析から、高濃度となる事例が 2015 年 1 月に見られた。この事例について化学輸送モデルを適用し、詳細な解析を行った (Itahashi et al., 2017)

## 3. 結果と考察

化学輸送モデルは 2015 年 1 月 7-18 日の解析対象期間に観測された 2 度の高濃度 PM<sub>2.5</sub> を良好に再現できていた。ACSA の解析から、1 月 11 日のピーク時には硫酸塩 (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) よりも NO<sub>3</sub><sup>-</sup> が高濃度であった。図 1 には、モデルで計算されたこのピーク時の空間分布を示す。福岡では SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> は約 10 μg/m<sup>3</sup> であったのに対し、NO<sub>3</sub><sup>-</sup> は 15 μg/m<sup>3</sup> であった。図 1 には後方流跡線解析の結果 (左図の黒いライン、丸い点は 6 時間毎の空気塊の位置) も示すが、高濃度時に大陸からの移流があったことが示唆された。流跡線上の NO<sub>3</sub><sup>-</sup> の時間変化を解析し、NO<sub>3</sub><sup>-</sup> の越境輸送には SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> と NO<sub>3</sub><sup>-</sup> の対イオンであるアンモニウム (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) とのイオンバランス、湿度などの気象条件が重要であることを明らかとした。

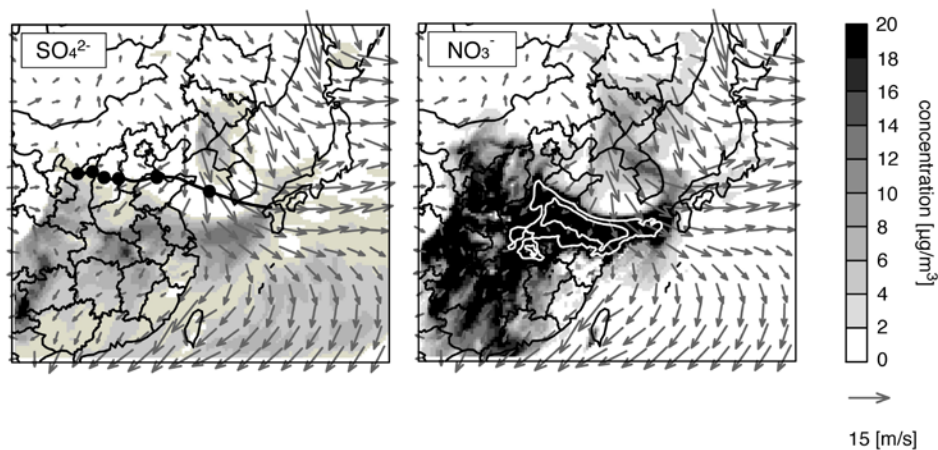


図 1. 西日本において高濃度  $\text{PM}_{2.5}$  が観測された 2015 年 1 月 11 日 15 時（日本時間）の  
 (左)  $\text{SO}_4^{2-}$ , (右)  $\text{NO}_3^-$  のモデル計算値. コンターは  $40, 60 \mu\text{g}/\text{m}^3$  を示す.

#### 4. まとめ

$\text{SO}_4^{2-}$  の越境輸送は従来から指摘されていたが、冬季の  $\text{NO}_3^-$  の越境輸送の重要性が本研究から明らかとされた。今後は特に春季の事例を対象として、粗大  $\text{NO}_3^-$  の生成に関わる黄砂発生スキームについて検証を進め、粗大  $\text{NO}_3^-$  の大気中での動態や沈着（窒素負荷）の生態系への影響をさらに解明していく必要がある。

#### ・研究体制

研究代表者	電力中央研究所 環境科学研究所	板橋秀一
研究協力者	大阪大学 工学研究科	嶋寺光
研究協力者	名古屋大学大学院 環境学研究科	長田和雄
研究協力者	国立環境研究所	杉本伸夫
所内世話人	九州大学 応用力学研究所	鵜野伊津志

#### ・学会発表

Itahashi, S., Hayami, H., Uno, I., Uematsu, M.: Numerical analysis of nitrogen deposition from atmosphere on East Asian oceans, Goldschmidt Conference 2016, パシフィコ横浜, 2016 年6 月29 日

#### ・学術論文

Itahashi, S et al. (2016), *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1002/2016GL068722

Itahashi, S et al. (2017), *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, doi:10.5194/acp-2016-870



## 淀川汽水域における海洋性植物プランクトン赤潮発生機構の解明

神戸大学 自然科学系先端融合研究環 内海域環境教育研究センター 林 美鶴

## 1. 序論

図 1 に示す淀川大堰より下流の感潮域（河口から約 10km の範囲）では、2007 年以降の春季に海洋性有毒植物プランクトンの *Alexandrium tamarense* による赤潮と、これに伴うシジミ貝毒が 2011 年、2013 年、2014 年及び 2016 年の春季に発生している。海水遡上により河川内の塩分が上昇すると海洋性植物プランクトンが増殖可能となることから、これまでに現場観測を実施し、また流動モデルによる解析を行った。2016 年度は一般の海洋数値生態系モデルに塩分を加味して、河口付近での *A.tamarense* の動態解析を行った。また、河川内で定点観測を行い、赤潮発生年と非発生年の生物生産環境の差異を検討した。

## 2. 方法

淀川河口から 2.8km までの範囲を対象に、鉛直 3 層のボックスを設定して、リン循環を解析する数値生態系モデルを構築した。植物プランクトン増殖の律速栄養塩がリンであることは確認している。上層は 0～0.5m、中層は 0.5～1.5m、底層は 1.5～河床で、塩分成層を元に設定した。2012 年 4 月 2～3 日の小潮時の一潮汐隔時観測を実施し、物理項目に加え、*A.tamarense* の細胞密度や栄養塩などの計測も行っていることから、この日の再現計算（24 時間 1 分ステップ準定常計算）を行った。尚、この年は *A.tamarense* 赤潮の発生はなく、河口付近でのみ *A.tamarense* が検出されたため、河口付近を計算対象とした。各層にリンの存在形態として、栄養塩（DIP）DOP、*A.tamarense* を含めた植物プランクトン、及び懸濁態物質の 4 つに分け、これらの間の生化学過程および移流・拡散の物理過程を定式化して、各形態の濃度変動を計算した。同時に *A.tamarense* も計算し、低塩分によって増殖が停止・枯死し、日周鉛直運動が時間（昼間上昇、夜間下降）だけでなく塩分によっても変化（低塩環境へは移動しない）するようモデル化した。一般的な海洋の生態系モデルでは低塩環境は考慮されていない。そのため *A.tamarense* の塩分応答については、Lima and Ogata(2005)の培養実験を元に定式化した。塩分 5 毎の *A.tamarense* の増殖実験によると、塩分 10 以下では増殖出来ず、15 では多少増殖する。このことから、塩分 15 以上の実験結果の近似線を求め、*A.tamarense* が増殖可能な塩分の閾値、同時に枯死の閾値として 14 を使用した。拡散は鉛直方向でのみ考慮し、河床-水中間の物質交換は考慮しなかった。各層の日射量は、日中の観測で得た水中光量の鉛直分布と全天日射量から算出した。河川流量は国土交通省近畿地方整備局淀川河川事務所から提供頂いた。上流境界での流速は、ボックスの体積・塩分保存から推定した。また淀川河川公園（河口から上流約 5km）沖河床（水深 2m 前後）で 2015 年 1 月～2016 年 5 月に定点観測を行った。

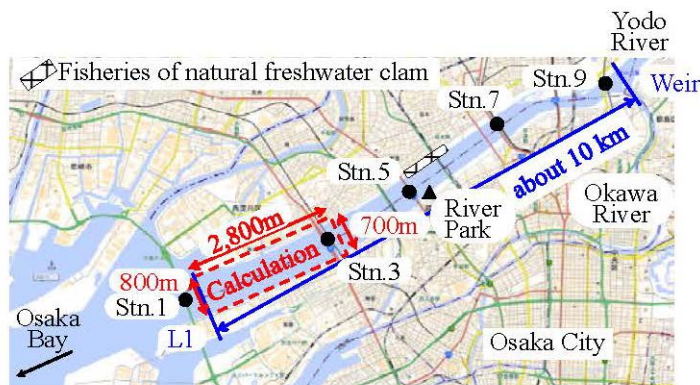


図 1 研究対象領域

## 3. 結果

各形態の計算結果の時間変動は概ね観測結果の時間変動を再現しており、*A.tamarense* を細胞密度換算した計算結果の相対バイアスは-3%であった。

各形態の移動量の計算結果を日合計し、これを大阪湾から下層への *A.tamarense* 流入量で標準化すると、大阪湾からの流入に対し河口では 7%しか増殖せず、流入量の約 8 割が上流へ輸送された。計算結果を昼（6～18 時）・夜（18～6 時）に分けて合計したフラックスを、昼の大阪湾から下層への *A.tamarense* 流入量で標準化した結果（図 2 上）、*A.tamarense* は昼間に下層でのみ増殖し（大阪湾からの

流入量の 16%)、夜間に上流への輸送量が多かった。計算結果を上げ (22~13 時)・下げ (13~22 時) 潮流別に分けて合計したフラックスを、上げ潮流時の大阪湾から下層への *A.tamarensis* 流入量で標準化した結果 (図 2 下)、上げ潮流で上流へ輸送され、下げ潮流で下流へ回帰した。

#### 4. 考察

数値生態系モデルの結果から、*A.tamarensis* の主たる起源は大阪湾であり、夜間に上げ潮流になると上流への輸送がより増える可能性があることが示唆された。淀川で *A.tamarensis* 赤潮は、2007 年以降に 5 回 (年) 発生し、あとの 5 年は発生しなかった。大阪府による大阪湾での赤潮調査結果から、淀川で *A.tamarensis* 赤潮が形成される場合は、必ず大阪湾でも赤潮が形成もしくは *A.tamarensis* が出現していた。しかし大阪湾で *A.tamarensis* 赤潮が形成もしくは出現している場合、必ずしも淀川内で *A.tamarensis* 赤潮は形成されなかった。

*A. tamarensis* 赤潮が発生しなかった 2015 年から、発生した 2016 年にかけて淀川河川公園河床で観測した結果によれば、2015 年の春期は断続的に塩分が 10 を下回ったが、2016 年は塩分 10 以上が維持されていた。水温と日射量については、両年で違いは見られなかった。このことから、2015 年は *A.tamarensis* が生息できない塩分環境であったと考えられる。両年の淀川流量を比較すると、2015 年は多かったことから、過去 10 年の 3・4 月の平均河川流量を調査したところ、も赤潮発生年に比べ非発生年の流量は多かった。以上のことから、大阪湾で *A.tamarensis* 赤潮が発生し、且つ淀川内で塩分 10 以上に維持されることが、淀川内で *A.tamarensis* 赤潮が形成される要件であると言え、いずれかの要件を無くす、現実的には淀川大堰で流量を制御することで、赤潮が抑制可能だと考えられる。

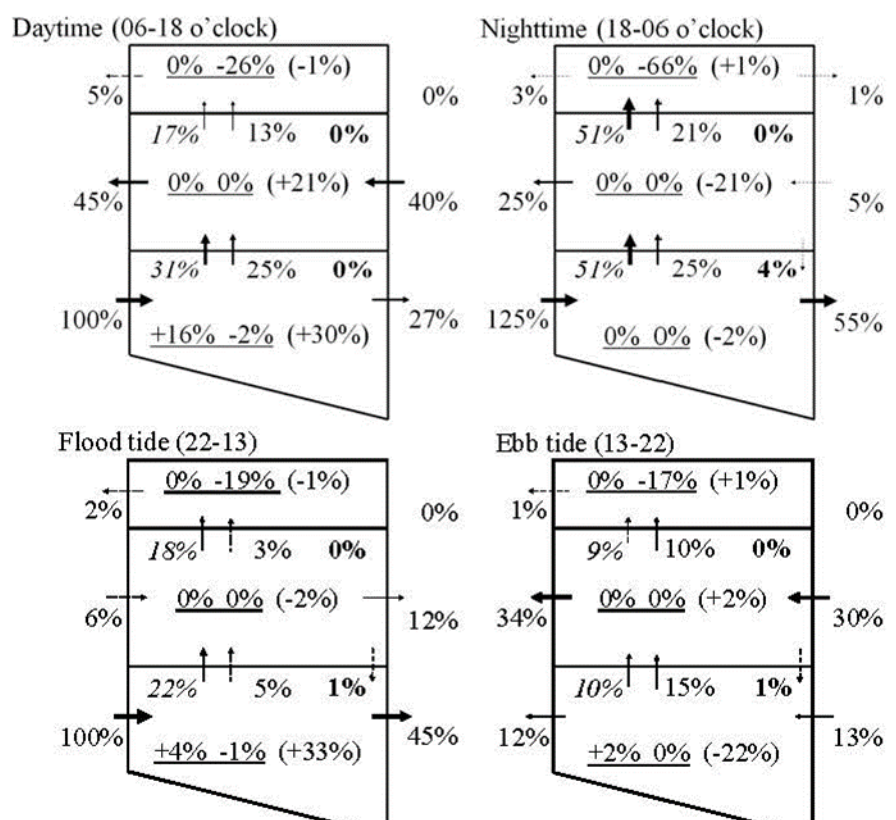


図2 標準化した*A.tamarensis* の昼 (左)・夜 (右) 別、上げ (左)・下げ (右) 潮流別合計フラックス

#### 5. 成果公表

- ・ 林美鶴、宮脇知美、古賀竜太郎「塩分を加味して河川に適用した低次生態系モデル」、日本海洋学会 2016 年度秋季大会、2016 年 9 月
- ・ ANALYSIS OF MARINE PHYTOPLANKTON IN THE YODO RIVER ESTUARY BY THE NUMERICAL ECOSYSTEM MODEL, EMECS'11 Sea Coasts XXVI, 2016 年 8 月

# 塩分を加味して河川に適用した 低次生態系モデル

○林 美鶴 ・ 宮脇知美 ・ 古賀竜太郎  
(神戸大・内海域セ) (神戸大・院海事) (川崎冷熱)

キーワード: *Alexandrium tamarense* ・ 数値生態系モデル ・ 塩分 ・ 感潮域 ・ 海水遡上

## 1. はじめに

淀川大堰より下流の感潮域(河口から約10kmの範囲)には海水が遡上する。ここにはシジミの漁場があり、2007年以降の春季に海洋性有毒植物プランクトン *Alexandrium tamarense* による赤潮と、これに伴うシジミ貝毒が断続的に発生している。これまでに著者らは、現場観測結果(2012年度)から海水遡上要因を解析し(2014年度春季)、物理モデルを用いた海水遡上のシミュレーションを行い(2014年度春季)、物理素過程の寄与を明らかにし(2015年度春季)、遡上距離の推定式を提案した(2015年度秋季)。河川の高塩化が *A. tamarense* 赤潮や貝毒の原因であるため(Yamamoto *et al.*, 2013)、著者らの結果は河川流量を制御して低塩下を抑制することで、これらを防止することが可能であることを示している。一方で、河川内の低次生物生産過程を明らかにしなければ、赤潮発生の根本原因を明らかにする事は出来ず、また適切な低塩環境を定義することも出来ない。

低次生物生産過程を明らかにするには、数値生態系モデルが有効だが、一般的な海洋の生態系モデルでは低塩環境は考慮されていない。そのため著者らは、低塩環境に耐性のある *A. tamarense* の生化学反応を考慮した低次生態系モデルの構築を行ってきた(2014年秋季、2015年春季)。本研究では、改良したモデルを用いて、淀川河口での *A. tamarense* 濃度変動特性を解析した。

## 2. 方法

淀川河口から2,800m上流までの間を鉛直三層(～50cm、～1.5m、～海底)に分け、各層に *A. tamarense*、それ以外の植物プランクトン(主として珪藻)、動物プランクトン、溶存無機態リン、溶存有機態リンを想定し、律速栄養塩であるリン循環の数値生態系モデルを構築した。*A. tamarense* の生化学過程には、低塩環境下では増殖が抑制され、逆に枯死し、また鉛直日周移動が停止する反応を加えた。これらの定式化やパラメータ設定は、Lima and Ogata (2005) の培養実験に基づいた。また光合成にDOPを利用できる様に設定した。光合成に関するパラメータは、夏池ら(2013)の培養実験で求められた値を用いた。モデルに、2012年4月2～3日(小潮、赤潮なし)の観測データを与えて、24時間の準定常計算を行った。

## 3. 結果

図は *A. tamarense* の日合計収支で、下流境界から下層

に水平移流で流入する量(海洋からの供給量)4,185 × 10<sup>3</sup>mg で標準化した割合である。また、昼夜と潮流別に分けた収支も求めた。河口において、*A. tamarense* は底層でのみ増殖し(図中アンダーライン左側の数値)、その量は大阪湾からの供給量の7%である。逆に表層では低塩のため枯死する(図中アンダーライン右側の数値)。日周鉛直移動では、低塩のため上層へは移動せず、夜間に底層へ移動する(図中太字)。大阪湾から輸送された量の78%が上流へ、主に上げ潮時に輸送されるため、夜間に上げ潮になると輸送量が大きくなる可能性がある。26%は中層に戻るため、大阪湾から輸送された量の52%は上流へ輸送され、上流で失われる。

今回用いたデータは赤潮が発生しなかった時のデータであるが、塩分に応じた *A. tamarense* の生化学反応は表現できた。

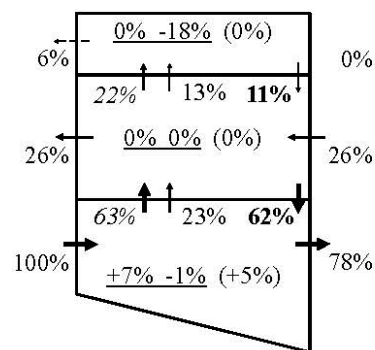


図 *A. tamarense* の日合計収支割合

## 謝辞

本研究は(財)みなと総合研究財団による平成26年度「未来のみなとづくり助成」、及び大阪湾広域臨海環境整備センターによる平成23・24年度「大阪湾圏域の海域環境再生・創造に関する研究助成」により実施した。調査実施にあたり、国土交通省淀川河川事務所福島出張所には多くのご指導を頂いた。研究にあたり大阪府立環境農林水産総合研究所山本圭吾博士、国際エメックスセンター柳哲雄博士から多くのご助言を頂いた。観測には、奈良教育大学藤井智康博士のご協力を賜り、一部の観測機器は九州大学応用力学研究所から借用し、松野健教授、石井大輔博士にご尽力いただいた。関係各位に感謝申し上げます。

# EMECS'11 SeaCoasts XXVI



22-27 | St Petersburg, Russia  
August | 2016

## CERTIFICATE OF ATTENDANCE AND PUBLICATION

this is to certify that

*Mitsuru Hayashi, Tomomi Miyawaki, Ryutaro Koga*

participated in

EMECS'11 – SEA COASTS XXVI Joint Conference

**“Managing risks to coastal regions and communities in a changing world”**

and presented as an poster presentation the following article

*ANALYSIS OF MARINE PHYTOPLANKTON IN THE YODO RIVER ESTUARY BY THE  
NUMERICAL ECOSYSTEM MODEL*

that is published in the Conference Full-size Proceedings submitted for indexation to Web of Science and Scopus

# ANALYSIS OF MARINE PHYTOPLANKTON IN THE YODO RIVER ESTUARY BY THE NUMERICAL ECOSYSTEM MODEL

Mitsuru Hayashi, Kobe University, Japan

Tomomi Miyawaki, Kobe University, Japan

Ryutaro Koga, Kawasaki Thermal Engineering, Japan

*mitsuru@maritime.kobe-u.ac.jp*

In order to understand the temporal variation of the physics and fluid structure of Yodo River estuary in detail, we had made in-situ observation. And the temporal variation of *Alexandrium tamarense* which cause the shellfish poisoning of natural freshwater clam was analyzed by the numerical ecosystem model which is considered the salinity effects. Stratification develops in the downstream side. Chl.a concentration is high in the seawater region. *A. tamarense* is detected in the downstream side. The numerical ecosystem model including the salinity effect for *A. tamarense* was formulated. *A. tamarense* grow only in the bottom layer in daytime, and the daily mean of it is 7 % of it transported from Osaka Bay. *A. tamarense* is transported to the upstream in flood tide. 81 % of it transported from Osaka Bay goes to the upstream zone. Much *A. tamarense* transported to the upstream zone in nighttime due to the vertical migration. Therefore when it is the flood tide in nighttime, more of *A. tamarense* might be transported to the upstream zone.

*Key words: Alexandrium tamarense, Yodo River, estuary, numerical ecosystem model, red tide, shellfish poisoning*

## I. INTRODUCTION

The Yodo River estuary shown in Fig. 1 which is defined in this research as a zone from the river mouth up to 10 km, has fisheries of natural freshwater clam around at 5 km from the river mouth. Shellfish poisoning of natural freshwater clam occurred intermittently in the estuary in spring since 2007, and the shipment of freshwater clams was halted due to government regulations. Cause of the shellfish poison is *Alexandrium tamarense* [1] which is poisonous marine phytoplankton appearing in Osaka Bay every year, and can growth in salinity environment of more than 15 [2]. The lack of fresh water discharge from the weir promoted the initiation of the bloom of *A. tamarense* [3]. In order to understand the temporal variation of the physics and fluid structure of the area in detail, we made in-situ observation and analyzed the temporal variation of *A. tamarense* by using the numerical ecosystem model.

## II. METHODS

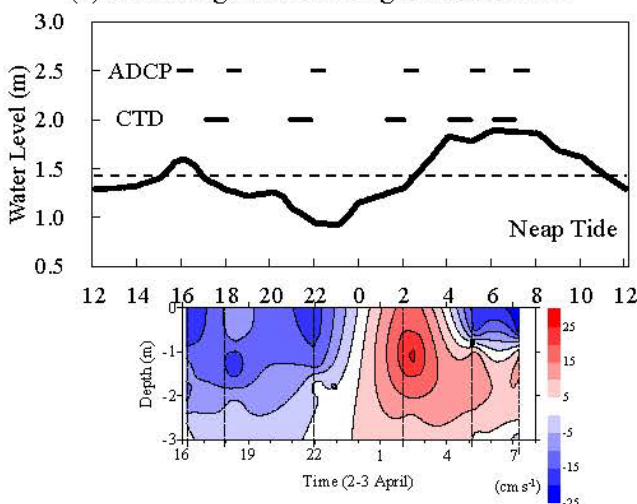
The observation was carried out during April 2nd and 3rd in 2012 in the neap tide. Vertical profiles of water temperature (T), salinity (S), fluorescence, photon (I) and so on were measured by CTD (the conductivity, temperature and depth profiler) in 10 cm width at 5 stations in the intertidal zone between the river mouth and the Yodo River weir shown in Fig. 1. Surface water (0 m) and

the bottom water which is above 1 m from the bottom were sampled at the same time by a bucket and Kitahara water sampler, respectively. Sampled water was dispensed to the poly bottles, and was analyzed for the chemical and biological analysis. The items are cell density of *A. tamarensis*, Chl.a (chlorophyll-a), TP (total phosphorus) and DIP (dissolved inorganic phosphorous) concentrations and so on. Sampled water were kept in the dark and cool condition, and were transported to Research Institute of Environment, Agriculture and Fisheries, Osaka Prefecture to count the cell density, and to Hyogo Environmental Advancement Association to analyze Chl.a, TP and DIP concentrations and so on. The fluorescence values of CTD were converted into Chl.a concentrations using the analyzed Chl.a concentrations. ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) observation was carried out along the traverse line (L1 in Fig. 1) at the river mouth in every 23 cm depth at 0.2 Hz. The observation was repeated 4 cycles during one tidal period shown in Fig. 2(a). The water level was monitored every 10 minutes at Fukushima as shown in Fig. 1 by the Yodogawa River Office, Kinki Regional Development Bureau, Ministry of Land, Infrastructure and Transport.



Fig. 1. Study area.

(a) Tidal height and Timing of observation



(b) Flow velocity at the river mouth.

Fig. 2. Temporal variations of tidal change.

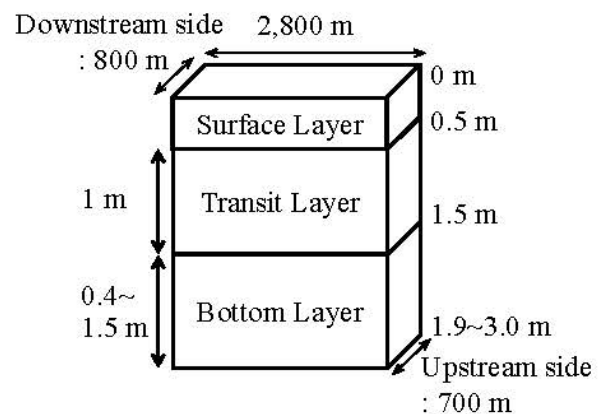


Fig. 3. Size of the calculation zone.

The calculation zone by the numerical ecosystem model shown in Fig. 1 is from L1 up to 2,800 m upstream. Water depth became deeper toward the upstream side, and is shallow in the outside of the upstream boundary. Stn. 3 is included in the zone. The calculation zone was divided into the surface layer (above 0.5 m), the transition layer (0.5-1.5 m) and the bottom layer (below 1.5 m) as shown in Fig. 3. The phosphorus (P) cycling during 24 hours, which is one tidal period of the day was calculated. DIN/DIP ratio is larger than the Redfield ratio (C:N:P=106:16:1) in this observation. It means that the primary production is limited by DIP. The compartments of the numerical ecosystem model is shown in Fig. 4. The types of P are DIP, DOP, phytoplankton, *A. tamarensis*, zooplankton and detritus, and are changed by the biochemical processes. Phytoplankton in this research means other than *A. tamarensis*, and is mainly diatom. *A. tamarensis* utilizes DOP in photosynthesis. The exchange processes between the layers or the outside of the area are the horizontal and vertical advection, the vertical diffusion, the natural sinking of phytoplankton and detritus and the diurnal vertical migration of *A. tamarensis*. *A. tamarensis* move to the surface during the day, and move to the bottom during the night. The horizontal diffusion would be quite small compare to the horizontal advection. Therefore the horizontal diffusion is not assumed. The water depth is shallow in the river. So, the vertical advection speed is assumed as a constant in each depth. The upstream and upward fluxes are positive.

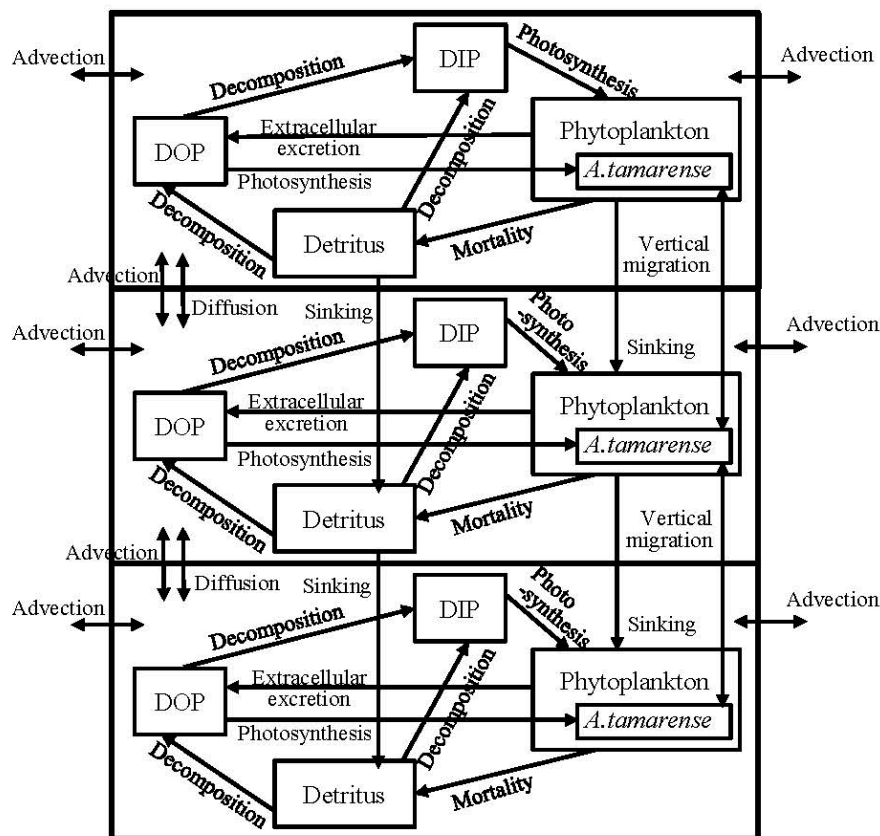


Fig. 4. The compartments of the numerical ecosystem model

Temporal changes in P concentration of each compartment, P in phytoplankton, *A. tamarensis*, zooplankton and detritus, DIP and DOP, are represented by the equations. For example,

equation (1) represents the temporal change of P concentration in *A. tamarensis* (*ATM*). The first and second terms mean photosynthesis. The 3rd term means extra cellular excretion of DOP by photosynthesis. The 4th term means mortality. The 5th term means grazing by zooplankton. The 6th term means the horizontal and vertical transports including the vertical migration.

$$\begin{aligned} \frac{dATM}{dt} = & A_{1-i}ATM_0 + A_{1-o}ATM_0 - A_2(A_{1-i} + A_{1-o})ATM_0 - A_3ATM_0 - B_1ZOO_0 \\ & + \frac{1}{V_0}(F_dU_dATM_d - F_uU_uATM_u + F_sWATM_v + F_s w_t ATM_0 + F_s \frac{K}{H_v}(ATM_v - ATM_0)) \end{aligned} \quad (1)$$

where  $A$ 's are the coefficients of biochemical processes related to phytoplankton, and will be explained later.  $B_1$  represents grazing by zooplankton. Subscripts of the concentrations mean place. Subscript  $0$  refers to the calculating layer. Subscript  $d$  and  $u$  refer to the downstream and upstream side, respectively. But when the water flows out from the calculation layer, the concentration of the calculated layer should be used. Subscript  $v$  refers to the source layer of outflow.  $V_0$  is the volume of the calculation layer.  $H_v$  is the distance between the surface and transition or the transition and bottom layers.  $F$ 's are the section.  $U$ 's are the horizontal advection velocity. Subscript  $d$  refers to the downstream side,  $u$  is the upstream side, and  $s$  is the surface.  $W$  is the vertical advection speed.  $K$  is the vertical eddy diffusivity. The estimation method of  $U$ ,  $W$  and  $K$  will be explained later.  $w_t$  is the vertical migration speed of *A. tamarensis*. It is  $w_t > 0$  during the day (at 06-18), and means the upward motion. It is  $w_t < 0$  during the night (at 18-06), and means the downward motion. Moreover, *A. tamarensis* would not swim to the lower salinity layer. Therefore, the vertical migration is stopped not to move to the layer that salinity is below the threshold. The terms of vertical advection, diffusion and migration are double in the transition layer which have two boundaries with the upper and lower sides.

$A_1$  represents the photosynthesis, and is the function of DIP or DOP concentration ( $DIP_0$ ,  $DOP_0$ ),  $T$ ,  $I$  and  $S$ . Equation (2) shows in case of DIP.  $A_1$  of phytoplankton does not include the term of salinity. And phytoplankton does not use DOP in photosynthesis.

$$A_{1-i} = V_{max} \cdot \frac{DIP_0}{DIP_0 + k_p} \cdot \frac{T}{T_0} \exp\left(1 - \frac{T}{T_0}\right) \cdot \frac{I}{I_0} \exp\left(1 - \frac{I}{I_0}\right) \cdot \left[1 - \exp\left\{-k_{gs}(S^* - S)\right\}\right] \quad (2)$$

The term of nutrient represents by the Michaelis-Menten equation.  $V_{max}$  is the maximum uptake ratio of nutrient.  $k_p$  is the half saturation constant of nutrient for phytoplankton.  $V$  is  $V_{max}$  and  $k_p$  are different depending on the type of nutrients and the phytoplankton species. Shapes of the temperature and photon terms represent that growth is most active in the optimum water temperature ( $T_0$ ) and photon ( $I_0$ ). However photoinhibition does not occur even when the photon in the water is more than  $I_0$ . So,  $I=I_0$  is applied when  $I > I_0$ . The function of salinity effect is formulated based on the result of incubation shown in Fig. 5 [2]. And the threshold of salinity ( $S_g^*$ ) which stops the growth of *A. tamarensis*, and the coefficient of salinity dependency in the photosynthesis of *A. tamarensis* ( $k_{gs}$ ) are given.



$A_2$  is the coefficient of the extra cellular excretion of DOP by photosynthesis.  $A_3$  represents the mortality, and is given by the following equation which is the function of  $T$ , and of  $S$  only case of *A. tamarensis*. The function of salinity effect is also formulated by Fig. 5.

$$A_3 = m_{p0} \exp(k_{m-p}T) \exp\{k_{ms}(S_m^* - S)\} \quad (3)$$

where  $m_{p0}$  is the mortality speed of phytoplankton at 0 deg-C,  $k_{m-p}$  is the temperature dependency of mortality for phytoplankton,  $k_{ms}$  is the salinity dependency of mortality for *A. tamarensis*,  $S_m^*$  is the threshold of salinity in photosynthesis of *A. tamarensis*. Mortality accelerates when salinity is over  $S_m^*$ .

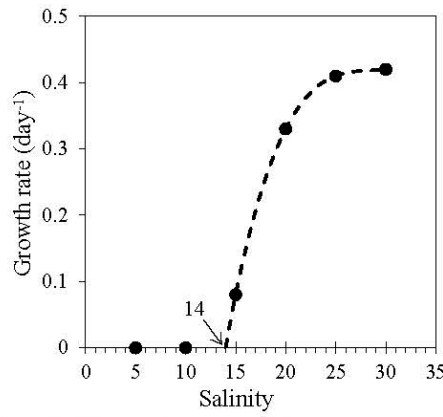


Fig. 5. Growth rate of *A. tamarensis* [2].

Parameters of constant of the ecosystem model are shown in Table 1, and are referred to the previous study [4]. It analyzed the competitive relationship of diatom and non-diatom in the inner part of Osaka Bay which is the estuary of the Yodo River.  $w_t$  has been tuned to reproduce the observed value, and is 1/20 of the value by reference [4].  $V_{max}$  and  $k_p$  related to photosynthesis are referred to previous study [5] based on the incubation by using the Yodo River water. The parameters of salinity for *A. tamarensis* were determined based on Fig. 5.

The data sets of the boundary and environmental conditions of  $T$ ,  $S$ ,  $I$ ,  $V$ ,  $H_v$  and  $F_v$ , which vary temporally and are inputted to the model every minute for 24 hours, were constructed by the observation data. The variations of salinity are 1.0-2.2 in the surface layer, 9.1-12.7 in the transition layer and 24.6-26.5 in the bottom layer. Salinity in the surface and transition layer are always less than 14 which is the threshold of salinity in photosynthesis of *A. tamarensis*. The variations of water temperature is 10.8-11.6 deg-C which is lower than the optimum water temperature. Photoenvironments were the optimum condition at 6 to 18 in the surface layer and at 8 to 16 in the transition layer. Photon in the bottom layer was 7 % of it in the surface layer, and is enough for photosynthesis.

P concentrations in Stn. 1 were used as the boundary condition of the downstream side, and it in Stn. 5 was used as the upstream side. P concentrations in phytoplankton were calculated by Chl.a concentration converted from fluorescence values of CTD and P/Chl.a which was estimated by  $C/Chl.a=30$  [6], the Redfield ratio and the atomic weight of C and P. P concentrations in

zooplankton were assumed 10 % of phytoplankton. P concentrations in *A. tamarensis* estimated by the cell density and P weigh per cell which calculated by C weigh per cell and the Redfield ratio. 2,000 pg-C cell<sup>-1</sup> [7] was used, then 48.7 pg-P cell<sup>-1</sup> was obtained. TP:DOP in the inter tidal zone of Yodo Rivre is 14.5 % [8]. P concentrations in detritus is obtained by subtracting these concentrations from the TP.

Table 1. Values of the parameter used in the ecosystem model.

Parameters	Symbol	Value	unit
Surface Area of Box	$F_s$	2,100,000	m <sup>3</sup>
Cross Section Area of the Upper Layer at the Downstream Boundary	$F_d$	400	m <sup>2</sup>
Cross Section Area of the Middle Layer at the Downstream Boundary	$F_d$	800	m <sup>2</sup>
Cross Section Area of the Upper Layer at the Upstream Boundary	$F_u$	350	m <sup>2</sup>
Cross Section Area of the Middle Layer at the Upstream Boundary	$F_u$	700	m <sup>2</sup>
Sinking Speed of Phytoplankton	$w_p$	$23.2 \times 10^{-5}$	cm s <sup>-1</sup>
Sinking Speed of Detritus	$w_d$	$23.2 \times 10^{-4}$	cm s <sup>-1</sup>
Vertical Migration Speed of <i>A. tamarensis</i>	$w_t$	$0.39 \times 10^{-3}$	cm s <sup>-1</sup>
Maximum Uptake rate of Phytoplankton	$V_{max-p}$	0.75	day <sup>-1</sup>
Maximum Uptake rate of <i>A. tamarensis</i>	$V_{max-t}$	0.5	day <sup>-1</sup>
Half Saturation Constant of DIP for Phytoplankton	$k_{p-p}$	0.12	μM
Half Saturation Constant of DIP for <i>A. tamarensis</i>	$k_{p-i}$	0.15	μM
Half Saturation Constant of DOP for <i>A. tamarensis</i>	$k_{p-o}$	0.1	μM
Optimum Ligh Intensity of Photosynthesis for Phytoplankton	$I_{o-p}$	75	E m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
Optimum Ligh Intensity of Photosynthesis for <i>A. tamarensis</i>	$I_{o-t}$	100	E m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
Optimum water temerature of photosynthesis	$T_o$	30.8	°C
Salinity Dependency of Photosynthesis for <i>A. tamarensis</i>	$k_{gs}$	0.23	
Threshold of Salinity for Photosynthesis of <i>A. tamarensis</i>	$S_g^*$	14	psu
Ratio of extra cellular excretion of DOP by photosynthesis	$A_2$	0.135	g m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup>
Mortality Speed of Phytoplankton at 0 deg-C	$m_{p0}$	8.0	m <sup>3</sup> g-P day <sup>-1</sup>
Temperature Dependency of Mortality for Phytoplankton	$k_{m-p}$	0.069	°C
Salinity Dependency of Mortality for <i>A. tamarensis</i>	$k_{sm}$	1.2	
Threshold of Salinity for Mortality of <i>A. tamarensis</i>	$S_m^*$	14	psu
Ivlev Constant	$\lambda$	0.47	
Threshold of Phytoplankton Density for Grazing by Zooplankton	PHP*	0.1	mg Chl.a <sup>-1</sup>
Grazing Speed of Phytoplankton by Zooplankton at 0 deg-C	$g_{p0}$	0.1	
Temperature Dependency of Grazing for Zooplankton	$k_{g-z}$	0.069	°C <sup>-1</sup>
Constant for Urine Generation of Zooplankton	$\alpha$	0.4	
Constant for Fecal Pellet Generation of Zooplankton	$\beta$	0.3	
Mortality Speed of Zooplankton at 0 deg-C	$m_{z0}$	30.0	
Temperature Dependency of Mortality for Zooplankton	$k_{m-z}$	0.069	°C <sup>-1</sup>
Decomposition Speed of Detritus to DIP at 0 deg-C	$d_{di}$	0.03	
Decomposition Speed of Detritus to DOP at 0 deg-C	$d_{do}$	0.03	
Decomposition Speed of DOP to DIP at 0 deg-C	$d_{oi}$	0.03	
Temperature Dependency of Decomposition of Detritus to DIP	$k_{di}$	0.069	°C <sup>-1</sup>
Temperature Dependency of Decomposition of Detritus to DOP	$k_{do}$	0.069	°C <sup>-1</sup>
Temperature Dependency of Decomposition of DOP to DIP	$k_{oi}$	0.069	°C <sup>-1</sup>

$U$ ,  $W$  and  $K_v$  are estimated by the physical model. The governing equations based on water and salt balances. The water balance in each layer are given by the following equations.

$$\begin{aligned}\frac{dV_1}{dt} &= U_{d1}F_{d1} - U_{u1}F_{u1} + WA_s = 0 \\ \frac{dV_2}{dt} &= U_{d2}F_{d2} - U_{u2}F_{u2} = 0 \\ \frac{dV_3}{dt} &= U_{d3}F_{d3} - U_{u3}F_{u3} - WF_s = \frac{dH_3}{dt} F_s\end{aligned}\quad (4)$$

where subscript  $u$  refers to the upstream boundary,  $d$  is the downstream boundary. The subscripts of number refer to the layer.  $H_3$  is the thickness of the bottom layer. Since  $V_1$  and  $V_2$  are constant, the water budgets by advection are zero. The variation of  $V_3$  by the tidal change and the budget of advection are balanced in the bottom layer.  $U_{d1}$ ,  $U_{d2}$  and  $U_{d3}$  were obtained by ADCP observation. Therefore, the unknown quantities are  $U_{u1}$ ,  $U_{u2}$ ,  $U_{u3}$  and  $W$ .

The salt balance in each layer are given by the following equations.

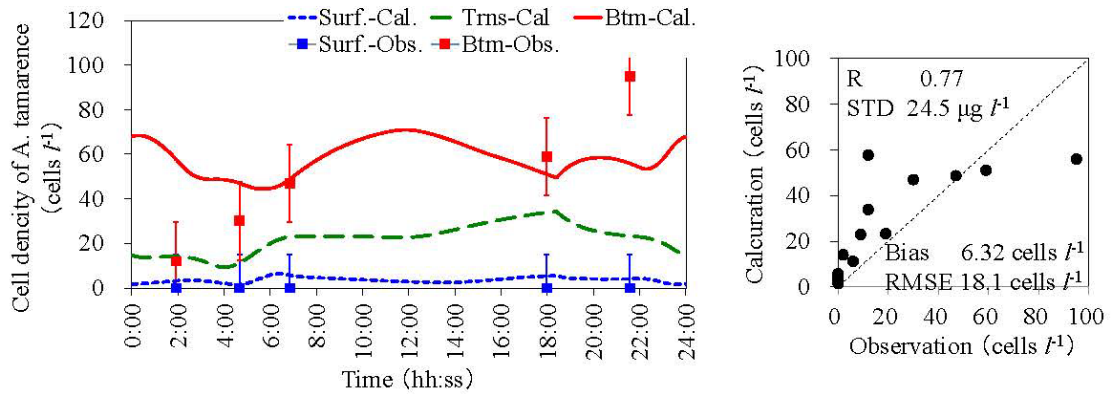
$$\begin{aligned}\frac{dS_1}{dt} H_1 F_s &= U_{d1} S_{d1} F_{d1} - U_{u1} S_{u1} F_{u1} + WS_2 F_s + K_{v12} \frac{S_2 - S_1}{H_{12}} F_s \\ \frac{dS_2}{dt} H_2 F_s &= U_{d2} S_{d2} F_{d2} - U_{u2} S_{u2} F_{u2} - WS_2 F_s + WS_3 F_s + K_{v12} \frac{S_{01} - S_{02}}{H_{12}} F_s + K_{v23} \frac{S_{03} - S_{02}}{H_{23}} F_s \\ \frac{dS_3}{dt} H_3 F_s &= U_{d3} S_{d3} F_{d3} - U_{u3} S_{u3} F_{u3} - WS_3 F_s + K_{v23} \frac{S_{02} - S_{03}}{H_{23}} F_s\end{aligned}\quad (5)$$

where subscript  $12$  refers to the boundary of the surface and transition layers,  $23$  is the boundary of the transition and bottom layers. The additional unknown quantities are  $K_{v12}$  and  $K_{v23}$ . The unknown quantities at the observation time are obtained by the inverse matrix because there are six equations for six unknown quantities.

### III. RESULTS AND DISCUSSIONS

Stratification develops in the downstream side. Seawater intrudes to close to Stn.9 in flood and high tides. And Chl.a concentration is high in the seawater region. Seawater intrusion stops at around Stn.7 in ebb and low tides. High concentration of Chl.a near the surface would be freshwater phytoplankton. Seawater expansion to the river spread a habitat of marine phytoplankton [9]. *A. tamarensis* is detected in the downstream side mainly, therefore the calculation zone has been set at the river mouth. However, the cell density is small, and the red tide was not formulated in this year. Figure 2(b) shows the depth-time cross section of the flow velocity at the river mouth. Plus means the upstream flow. It is the downstream flow in all depth from the observation start until 23 o'clock which is weak ebb tide. It is the upstream flow in all depth from 1 to 4 o'clock which is flood tide. Since the variations of horizontal advection by the budget estimates, it is the downstream flow in all boundaries during 13-21. Therefore, this period was defined as ebb tide. And the other period,

during 21-13, was defined as flood tide. The estimated vertical advection velocity is  $\pm 9 \times 10^{-3} \text{ cm s}^{-1}$ , and the vertical diffusion coefficient is  $10^{-5} - 10^{-4} \text{ cm s}^{-2}$ .



(a) Temporal variations of calculation and observation (b) Correlation with statistical values.

Fig. 6. Calculation result of *A. tamarensis*.

Figure 6(a) is the results of cell density of *A. tamarensis*. Dots show the observed data with the error bar which means the conversion error from concentration in cell density. The results almost reproduced the observed values. Figure 6(b) shows the correlation chart with statistical values. DIP and Chl.a concentrations are under estimate because freshwater phytoplankton is not considered in the model. But *A. tamarensis* is over estimate a little especially in the surface layer. Phytoplankton tends to increase only in the daytime in the bottom layer. Since *A. tamarensis* move to the bottom during night, the increase tendency is also in the nighttime a little.

Figure 7 shows the budgets of *A. tamarensis*. Each number is total flux of 24 hours, and has been standardized by the horizontal advection,  $4,185 \times 10^3 \text{ mg}$ , to the bottom layer of the downstream boundary. The standard number means the volume of *A. tamarensis* supplied from Osaka Bay. *A. tamarensis* grow only in the bottom layer, and the volume is 7 % of it from Osaka Bay (the numbers at the left side with an underline means photosynthesis in Fig. 8). *A. tamarensis* dies at the surface layer (the numbers at the right side with an underline means mortality & grazing), and moves to the bottom layer by the diurnal migration (the numbers of bold type means diurnal migration). These are salinity effect. 78 % of *A. tamarensis* transported from Osaka Bay to the bottom layer goes to the upstream zone (the numbers without decorations means advection). And 26% returns to the transit layer. 52% of *A. tamarensis* transported from Osaka Bay is lost in the upstream zone. *A. tamarensis* is increased in the bottom layer (the numbers in parentheses mean the budget). It suggests the long term variation, for example, spring and neap tide, and the seasonal variation.

Figure 8 shows the budgets which is divided to flood and ebb tides. Each number has been also standardized, and the volume in flood tide,  $4,185 \times 10^3 \text{ mg}$ , was used in this case. *A. tamarensis* is transported from Osaka Bay to the upstream zone in flood tide mainly (81%), and the half of this is returned in ebb tide (27+13 %). Other half is lost in the upstream zone. Return volume to the transit layer is larger than to the bottom layer. *A. tamarensis* would not go to lower salinity layer by itself. So, it is considered that *A. tamarensis* will be transported by the vertical advection and/or diffusion. Figure 9 shows the budgets which is divided to the daytime and nighttime. Each number has been also standardized, and the volume in daytime,  $1,878 \times 10^3 \text{ mg}$ , was used in this case. *A.*

*tamarensis* grow only in daytime in the bottom layer, and the volume is 16 % of it from Osaka Bay. *A. tamarensis* do not go to the transit and the surface layers by itself even daytime because of low salinity, but is transported by the vertical advection (12+22 %) and diffusion (15+32 %). Therefore *A. tamarensis* died at the surface layer (17 % & 22 %), and transported not so much to the upstream zone (27 %). *A. tamarensis* is also transported by the vertical advection (17+29 %) and diffusion (34+109 %) in nighttime. However the comparable volume (24 % & 139 %) move to the bottom layer by itself. Therefore much *A. tamarensis* (148 %) transported from the ocean go through upstream.

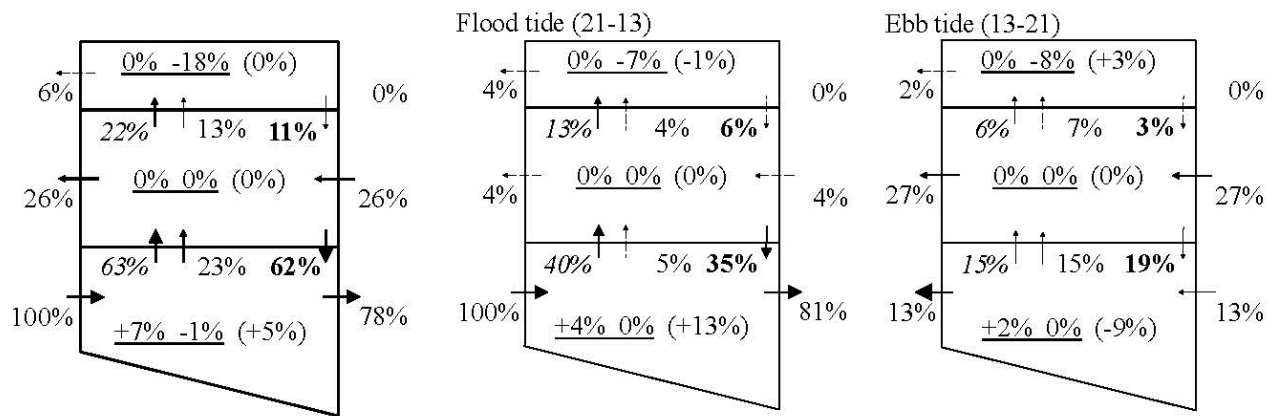


Fig. 7. Budgets of *A. tamarensis*. Fig. 8. Budgets of *A. tamarensis* divided to flood and ebb tides.

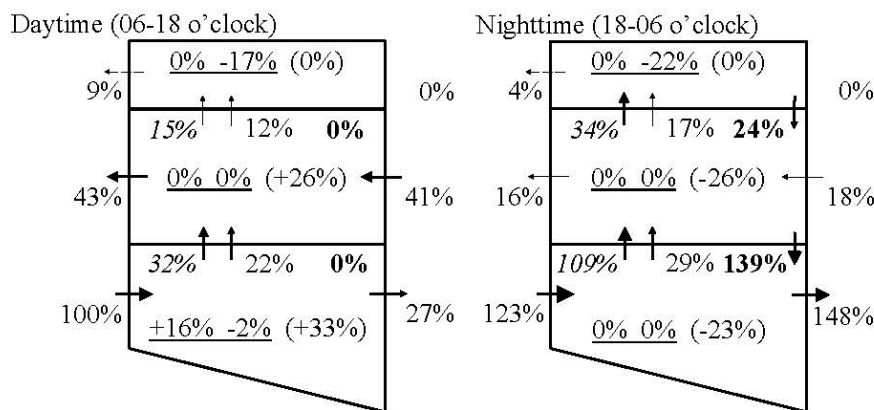


Fig. 9. Budgets of *A. tamarensis* divided to daytime and nighttime.

#### IV. CONCLUSION

In order to understand the temporal variation of the physics and fluid structure of Yodo River estuary in detail, we had made in-situ observation. And the temporal variation of *A. tamarensis* which cause the shellfish poisoning of natural freshwater clam was analyzed by the numerical ecosystem model which is considered the salinity effects.

Stratification develops in the downstream side. Chl.a concentration is high in the seawater region. *A. tamarensis* is detected in the downstream side. The numerical ecosystem model including

the salinity effect for *A. tamarense* was formulated. *A. tamarense* grow only in the bottom layer in daytime, and the daily mean of it is 7 % of it transported from Osaka Bay. *A. tamarense* is transported to the upstream in flood tide. 81 % of it transported from Osaka Bay goes to the upstream zone. Much *A. tamarense* transported to the upstream zone in nighttime due to the vertical migration. Therefore when it is the flood tide in nighttime, more of *A. tamarense* might be transported to the upstream zone.

#### V. ACKNOWLEDGMENT

This research is supported by Osaka Bay Regional Office Environmental Improvement Center, Dr. Koigo Yamamoto, Research Institute of Environment, Agriculture and Fisheries, Osaka Prefecture, Dr. Tomoyasu Fujii, Nara University of Education, Mr. Nobuo Nozaki, Dr. Kohei Hirono, Mr. Ippei Nakamura and Dr. Satoshi Nakada, Kobe University, the Yodogawa River Office, Kinki Regional Development Bureau, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Waterfront Vitalization and Environment Research Foundation, Dr. Takeshi Matsuno and Dr. Daisuke Ishii, Kyushu University.

#### VI. REFERENCES

- [1] K. Yamamoto, H. Homi, and M. Sano, "Occurrence of a red tide of the toxic dinoflagellate *Alexandrium tamarense* in the estuary of the Yodo River in 2007 -Dynamics of the vegetative cells and the cysts," *Bull. Plankton Soc. Japan*, vol. 58(2), pp. 136-145, 2011(in Japanese).
- [2] P. Lim, and T. Ogata, "Salinity effect on growth and toxin production of four tropical *Alexandrium* species (Dinophyceae)," *Toxicon*, vol. 45, pp. 699-710, 2005.
- [3] K. Yamamoto, H. Tsujimura, M. Nakajima, and P. J. Harrison, "Flushing rate and salinity may control the blooms of the toxic dinoflagellate *Alexandrium tamarense* in a river/estuary in Osaka Bay, Japan," *J. Oceanogr.* vol. 69, pp. 727-736, 2013.
- [4] M. Hayashi, and T. Yanagi, "Analysis of change of red tide species in Yodo River estuary by the numerical ecosystem model," *Marine Pollution Bulletin*, vol. 57, pp. 103-107, 2008.
- [5] M. Natsuike, I. Imai, K. Yamamoto, and M. Nakajima, "Effects of phosphorus supply from the Yodo River water on interspecific competition between *Alexandrium tamarense* and *Skeletonema sp.*," *Setonaikai*, vol. 66, pp. 50-53, 2013 (in Japanese).
- [6] T.R. Parsons, Y. Maita, and C.M. Lalli, *A Manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analysis*, Pergamon Press, Oxford, 1984, pp. 173.
- [7] T. Yamamoto, "Phytoplankton," in *Marine Coastal Environment*, T. Hirano, Eds. Tokyo, Fuji techno-system, 1998, pp. 144-174 (in Japanese).
- [8] Y. Nakaguchi, Y. Yamaguchi, T. Nishimura, Y. Hatano, M. Imanaka, and Y. Ariei, "Behavior and seasonal variation of eutrophication substances in the Yodo River system," *Chikyukagaku (Geochemistry)*, vol. 39, pp. 173-182, 2005 (in Japanese).
- [9] M. Hayashi, R. Koga, T. Fujii, and K. Yamamoto, "Analysis of Seawater Run Up in the Yodo River Estuary," Proc. EMECS 10- MEDCOAST 2013 Joint Conference, vol. 2, pp. 1225-1235, August 2013.

## 海面境界過程の観測 “Field Measurements of Marine Boundary Processes”

京都大学大学院 理学研究科 准教授 吉川 裕  
九州大学 応用力学研究所 教授 松野 健

### 1. 目的

海洋表層の 100m 以下の小さい規模の乱流は、混合層深度や海面水温などを変化させることで、大規模な海洋・大気場へ影響を与えうる。近年の数値実験（たとえば Grant and Belcher 2009）によれば、このような乱流は風に加えて波浪によっても生成される。一方、現場観測（D' Asaro 2001）によれば、鉛直流速強度は主に摩擦速度に比例しており、波浪には影響を受けていないように見える。このように波浪に起因する乱流とその影響に関しては、理論（数値実験）と観測に齟齬がある。現状ではこのように波に起因する乱流混合とその影響が不定であり、それが海洋モデルの不確定要素であると同時に海洋の長期予報の不確実性の原因の一つとなっている。そこで本研究では、2014 年 11～12 月と 2015 年 11～12 月に和歌山県白浜沖に京都大学防災研究所の所有する海象観測塔で計測された乱流結果をまとめ、乱流強度の発生条件や速度スケールなどについて先行する理論と比較した。

### 2. 観測の概要

観測塔の近傍の水深 9m 地点に、ADCP (RD 社製、Sentinel-V、1000kHz) を上向きに設置し、流速の鉛直分布を連続的に計測した。この際、波浪計測モードで計測することで、波浪スペクトルも同時に計測した。計測は毎時 0 分～20 分とし、ピン発信間隔は 3Hz とした。観測塔では超音波風速計（ソニック製 SAT-550、サンプリング間隔は 10Hz）により平均風速と（渦相関法を用いて）運動量フラックスおよび顕熱フラックスを毎時 0 分～20 分計測した。潜熱フラックスは、同時刻に赤外放射計で計測した水温と気象計で計測した気温の差と顕熱フラックスと比較すること求めたバルク係数を始めに求め、気象計で得られた比湿を用いて計算した。日射計による短波放射および海面水温から Kim(1992)の式に従って計算した長波放射を合わせて総熱フラックスを計算し、重力加速度と密度を用いて浮力加速度フラックスに変換した。また波浪スペクトルから Kenyon (1969)の式を用いてストークス速度を計算した。

流速のエネルギースペクトルをもとに波浪成分（周期  $T < 30$  秒）乱流成分（ $30 \text{ 秒} < T < 20$  分）平均流成分（ $T = 20$  分）と定義して、ローパスフィルターを用いて乱流成分を抽出した。本研究では、鉛直流成分を主に解析した。

### 3. 結果と考察

図1に2015年に計測された風速・風向、有義波高と海面ストークス速度、総熱フラックスの時間変化を示す。観測期間中の風速は最大で21.9m/s、有義波高は最大で2.8m、熱フラックスは最大2150W/m<sup>2</sup>（冷却）であった（いずれも2015年に観測）。また図2には2015年

11月27日、10:00-10:20に計測された鉛直流速の鉛直分布の時間変化を示す。強い（最大0.1m/s程度）の鉛直流が海面付近から海底近傍まで及んでおり、活発な乱流混合が起こっている様子が伺える。このとき風速は14.7m/s、有義波高は1.63m、熱フラックスは352W/m<sup>2</sup>

（冷却）であった。平均流の水平流速は0.12~0.17m/sで鉛直にはほぼ一様であったが、ストークス速度は海面で0.45m/sもあった。

上述のような強い鉛直流は観測期間中の有義波高の高い期間に観測された。しかし、有義波高が高い場合には風速も海面冷却も大きい（図1）ため、強い鉛直流の生成要因について断定することはできない。そこで、鉛直流の強さ（分散値の鉛直平均値）を、波による乱流生成量と風による乱流生成量の比の概数であるラングミュア数 ( $La = (U_* / U_s)$ ) と、波による乱流生成量と熱による乱流生成量の比の概数であるヘニッカー数 ( $Ho = BH / U_* U_s$ ) で分類した（ここで  $U_*$  は摩擦速度、 $U_s$  はストークス速度、 $B$  は海面浮力加速度フラックス、 $H$  は水深である。） $La$  が小さい（大きい）場合には波成（風成）乱流が、 $Ho$  が小さい（大きい）場合には波成（熱成）乱流が卓越することに対応する。図3に鉛直流の強さを  $La$  および  $Ho$  の関数として示した。 $Ho$  が正のときに海面冷却、負の時に海面加熱である。鉛直流速が強いときには  $La$  と  $Ho$  の絶対値が小さいとき、すなわち波成乱流が卓越しているときに発生していることがわかる。これより、本観測対象海域・期間における鉛直流速の生成要因は主に波であると結論づけられた。また、この結果は Li and et al. (2005) の数値実験結果とも良く整合するものであった。

また、鉛直流速の大きさと摩擦速度の関係を調べたところ、両者は概ね比例しているという先行研究 (D' Asaro 2001) と同様の結果が得られた。先行研究ではその理由を摩擦速度

( $U_*$ ) とストークス速度 ( $U_s$ ) が比例しているからと推測しているが、本観測結果においては、風が強まると運動量フラックスだけでなく（顕熱、潜熱フラックスに起因して）浮力加速度フラックスも増加するため、 $La$  が大きいときには  $Ho$  も大きくなり、結果として鉛直流速の大きさが摩擦速度に比例しているように見えるためであることが示唆された。

### 謝辞

本観測と解析には（株）ハイドロシステム開発の支援を受けた。記して感謝いたします。



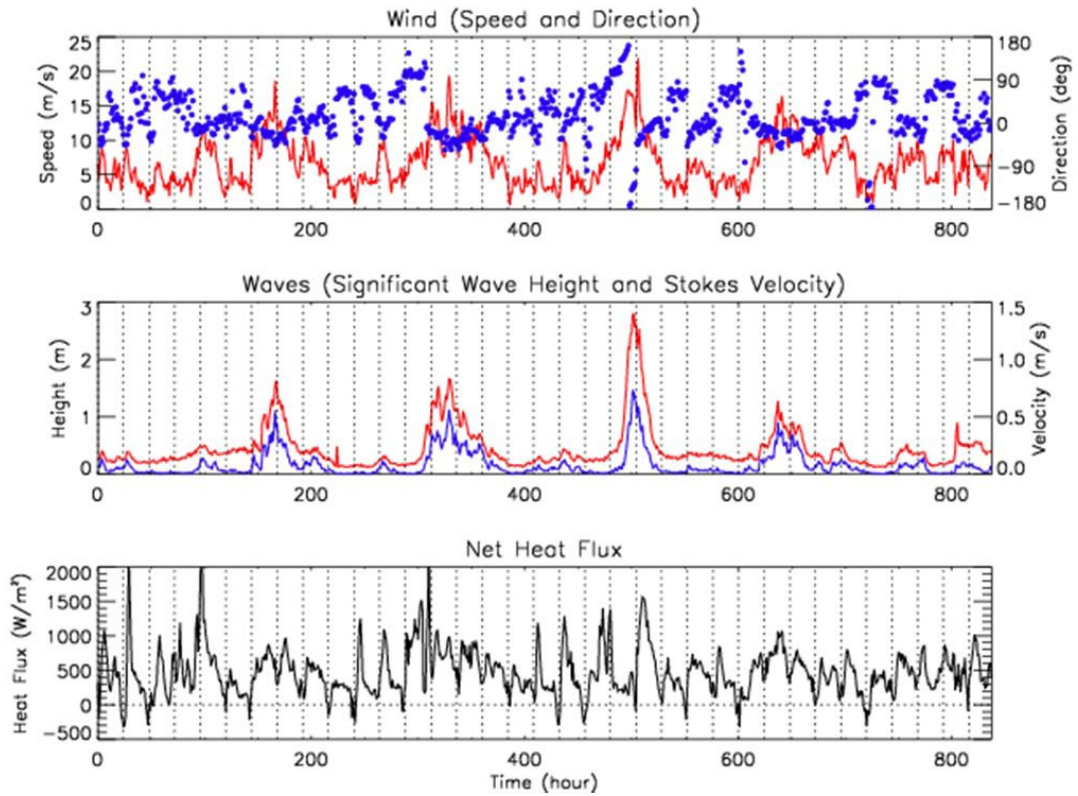


図1：2015年観測時における（上段）風速（赤線、左軸）と風向（青点、右軸）（中段）有義波高（赤線、左軸）と海面ストークス速度（青線、右軸）（下段）総熱フラックスの時系列。横軸は計測開始時からの時間。

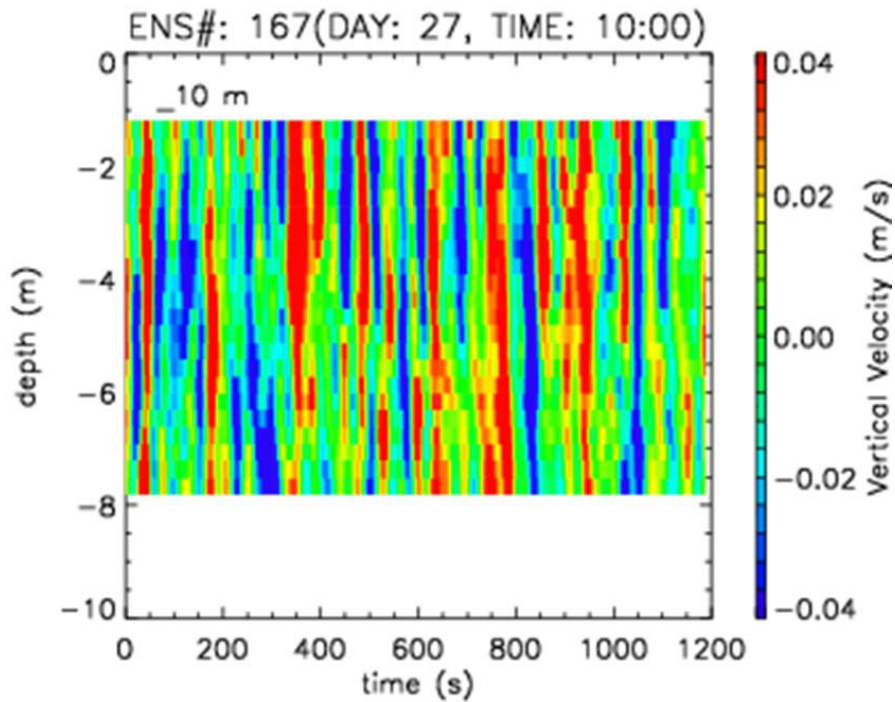


図2：2015年11月27日10:00-10:20に得られた鉛直流速。横軸は時間（単位は秒）縦軸は深さ。

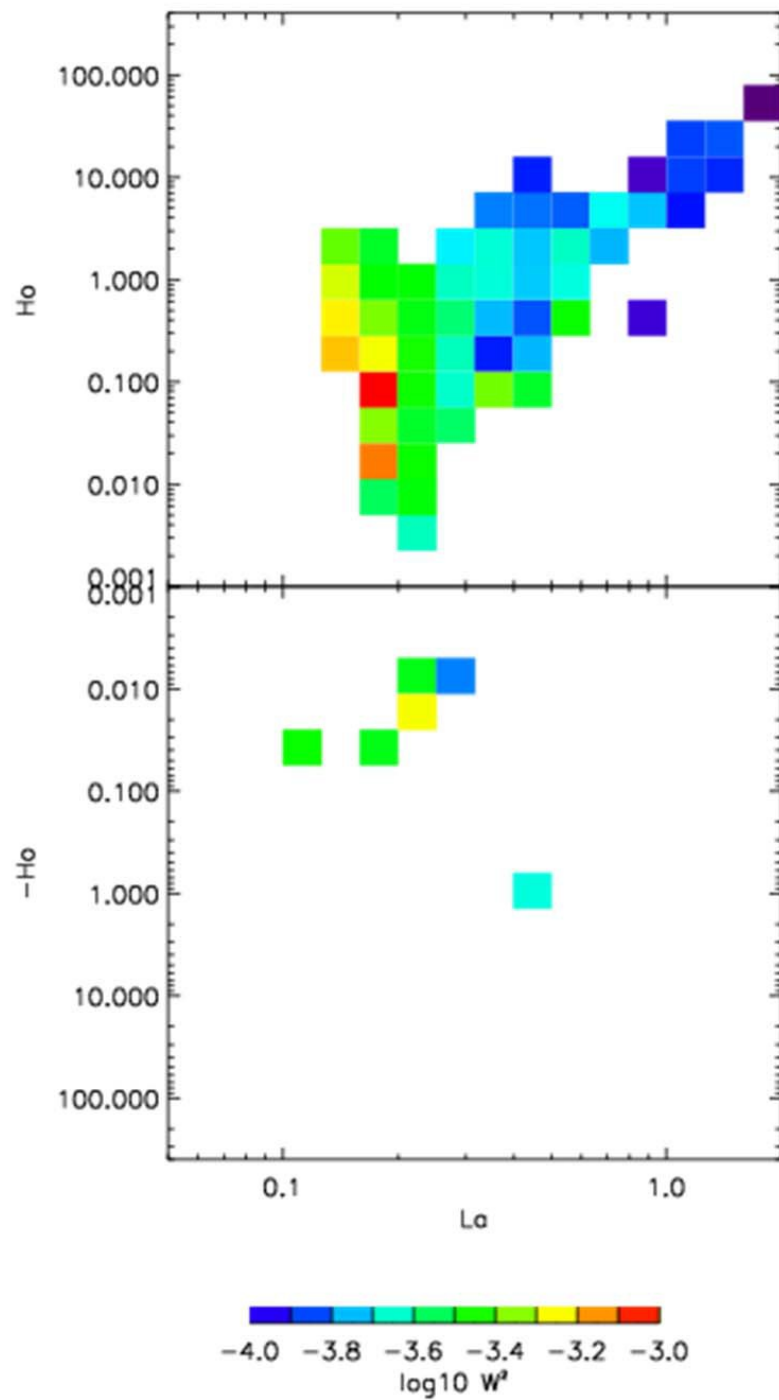


図3：鉛直流速の分散（色）のラングミュア数（横軸）およびヘニッカー数（縦軸）依存性.

## 海洋大循環の力学 ---エクマン層から中深層循環まで

北海道大学大学院 地球環境科学研究所 水田元太

## 1. 目的

海洋大循環は地形、中規模擾乱や潮汐、鉛直混合など様々な要因の影響を受けており、そのしくみは十分には理解されていない。本研究では数値モデル、観測、理論それぞれの専門家が最新の知見を持ち寄ることで海洋大循環のしくみに対する大局的な展望を得ることを目的とする。

## 2. 手法

2016年10月に研究会を開き、以下の話題が提供された。各話題について十分な時間をかけて発表を行い、研究者間で活発に議論を行うことによって有効に研究を進めた。

- (1) 潮流が励起する不安定による河川プリュームの発達制御機構：岩中祐一、磯辺篤彦（九大応力研）
- (2) Finite volume modeling of channel transports for the East/Japan Sea: Sooyeon Han, Naoki Hirose (Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University)
- (3) 海洋表層混合過程の観測と数値実験：吉川裕（京大理）
- (4) 大槌沖陸棚上の海底境界流の観測への挑戦：柳本大吾（東大大気海洋研）
- (5) 東経137度線の亜表層における東西流の経年変動：石崎廣（気象研）
- (6) A Lagrangian view of spring phytoplankton bloom：木田新一郎（九大応力研）
- (7) 亜表層で形成される中・深層水：蓮沼啓一（海洋総合研究所）
- (8) 係留観測データセットから見た北西太平洋における擾乱の特性：水田元太（北大地球環境）
- (9) Prandtl-Batchelor の定理 ---一般化ほかー：増田章（九州大学名誉教授）

## 3. 結果と議論

(1) 非静水圧力学モデルを用いて河川プリュームの形成に対する潮汐の影響を調べた。潮汐がある場合、ない場合のモデル実験の比較から、潮汐によってプリュームによる河川水の沖向きの輸送が抑えられることが示された。また慣性不安定、KH不安定が起きていることが確認された。河川水の輸送が抑えられる原因として、これらの不安定による運動量輸送によってプリュームの持つ沖向き運動量が失われるためであるという仮説を提唱した。実際、モデル実験の結果によると、潮汐がある場合の方が塩分勾配に伴うシアーが強く、渦活動が活発であった。このことは上の仮説と矛盾しない。

(2) 日本海と北太平洋をつなぐ海峡の通過流量を数値シミュレーションで精度よく再現することは、これまで困難であった。この問題を解決するために海峡内部の海底地形を高精度で表現可能な有限要素法モデルを用いたシミュレーションを行った。その結果、津軽海峡の流量が過大評価されやすい、という従来のシミュレーションで見られた傾向が大きく改善された。これは津軽海峡内部の地形の解像度を上げたことで形状抵抗が増加したことに対応していた。地形を変えた実験から海峡内の sill が流量の再現に重要と考えられる。

(3) 海洋混合層の深さは風による乱流混合と、海面の冷却加熱によって支配されると考えられてきたが、近年、波とラングミュア循環の寄与が重要であるという指摘がなされている。一方で、それと矛盾する様な結果を示した研究もあり、明瞭な知見は得られていない。この様な問題を明らかにするために白浜海象観測所（京

都大学)の観測塔においてH-ADCPと5ビーム式ADCPを用いた流速観測を行った。それによると乱流の鉛直流速はラングミュア数が小さい時ほど大きくなり、波の寄与を示す結果となった。またADCPで得られたレイノルズ応力から乱流運動エネルギーの各生成項を直接評価することを試みた所、風より波の寄与が大きく、熱の寄与は小さいことが示唆された。

(4)外洋と内湾の海水交換のしくみを理解することは生態系や漁業活動への影響を知るうえで重要である。船底固定式と洩航式の二種類のADCPを組み合わせ大槌湾湾口の潮流の詳細な構造を明らかにすることを試みた。その結果、上げ潮時に時間とともに傾圧的な潮流が発達し、従来の湾内のみの観測で見られていた潮流の傾圧的構造が、外洋へ出た場所でも存在することが示された。これに対し、海底付近では水平、鉛直方向に複雑に変動する擾乱的な流れが存在していた。今後は親潮、津軽暖流の影響についても調べる予定である。

(5)北太平洋の(137E, 12.5N)における長期係留観測から500ないし700mの亜表層で4年周期の東西流の変動が存在することが示された。数値シミュレーションとの比較からこの4年周期変動は北太平洋全体にわたって見られることが分かった。すなわち、北部では西北西-東南東、南部では逆方向にわずかに傾いた東西に長く伸びた分布を持った東西流が存在し、南北に伝播していた。観測では亜表層と深層で流速変動に位相差が見られることから、これらの変動が赤道波によるものである可能性が示唆される。また十年規模の東西流変動も観測され、風応力によって生じたものであることが示唆された。

(6)植物プランクトンの春季ブルームが起きるしくみには、冬季混合層が薄くなるためであるとする説や、混合層(=混ざった結果)よりも混合強度が弱まることが重要であるとする説などがあり十分な理解が進んでいない。この問題を解決する試みとして、栄養塩、プランクトンをLagrange粒子として扱うモデルを開発した。栄養塩粒子が植物プランクトンに取り込まれるまでの時間としてage, photo ageという二つの量を導入すると、植物プランクトンの増殖速度が混合強度によって制限されているか否かが区別可能なことが示された。

(7)三陸沖では津軽海峡を通じて亜熱帯に起源をもち高温高塩分で特徴づけられる津軽暖流水が低温低塩分な亜寒帯系の親潮水の中へと流入している。この海域では春から秋にかけ400-600mの亜表層に高温高塩分の貫入がしばしば見られ、これらは津軽暖流水がその深さまでもぐり込んだものと考えられる。こうした貫入は鉛直スケールが数十メートルであることから、輸送の過程で上下の水と混合し水塊変質を受けやすい。それが密度、もぐり込みにどう影響するかは今後の課題として興味深い。同様の高温高塩分水の貫入はオホーツク海や日本海など他の海域でもしばしば見られる。

(8)北太平洋西部の深層に広くみられる中規模擾乱は非線形性の強い渦的なものか、あるいは波的なものか、起源は何かといった疑問に答えるために係留観測の歴史的データの解析を行った。解析海域のほぼ全体で、中規模擾乱の流速変動には異方性が見られ、運動のエネルギーは海底で強化されており、擾乱が波的な性質を持つことを示された。卓越する流速変動の方向から擾乱の源が黒潮続流付近にあることが示唆された。

(9)風応力の影響が無視できる深層に渦位が一様な領域が生じるとするRhines and Young (1982)の渦位一様化理論が成り立つためには粘性が移流に対し十分小さいという前提が必要とされているが、どれ位小さければよいか、そもそもその前提は物理的に正しいかといった疑問がある。そこで、楕円型偏微分方程式の最大値の原理を使うことで、粘性が任意の大きさの場合について渦位のとり得る値の範囲を求めた。すなわち、ある閉じた流線内の渦位の値は、流線上の渦位がとる最大、最小値の範囲内に必ずおさまる。これはRhines and Young (1982)の理論を完全に含んでいる。ただし、渦運動が存在する場合は注意を要する。

## 能登半島周辺海域における流況と漁況の関係性

石川県水産総合センター 原田 浩太郎

## 目的

能登半島周辺海域、特に富山湾沿岸はブリをはじめとする多くの回遊性魚種が来遊することから、全国有数の定置網漁場となっている。これら水産資源の漁況を判断するためには、本海域の海況変動機構の理解が重要である。本研究では、能登半島沿岸の対馬暖流沿岸分枝流（以下沿岸分枝流）の変動と主要魚種の定置網による漁獲との関係を解析することで、能登半島周辺海域における漁場形成メカニズムや、沿岸分枝流が定置網の漁況に及ぼす影響について検討することを目的とした。

## 方法

沿岸分枝流量の算出には、大慶（2015, 共同利用研究成果報告第 18 号）の手法を用いた。まず、石川県調査船白山丸による ADCP 観測データから能登半島一舳倉島間（図 1、Line 1）の沿岸分枝流量を計算した。次に、九州大学応用力学研究所が舳倉島に設置した水位計および国土地理院輪島検潮所の毎時の水位データを輪島の海面気圧で補正したうえで両者の差を取り、輪島と舳倉島との水位差を算出した。水位差と流量との間には有意な正の相関が認められたため、この関係をもとに水位差から流量を推定する回帰式を作成し、毎時の沿岸分枝流量時系列データを得た。この流量データと石川県沿岸の観測ブイ（図1、St. 1～7）による 10 m 深の流速観測データから、沿岸分枝流量の変動が定置網周辺の流況に及ぼす影響について解析した。また、石川県水産総合センターの漁獲統計システムによる定置網の魚種別水揚量データと、上記沿岸分枝流量データとを比較し、沿岸分枝の挙動が定置網の漁獲量に及ぼす影響を解析した。

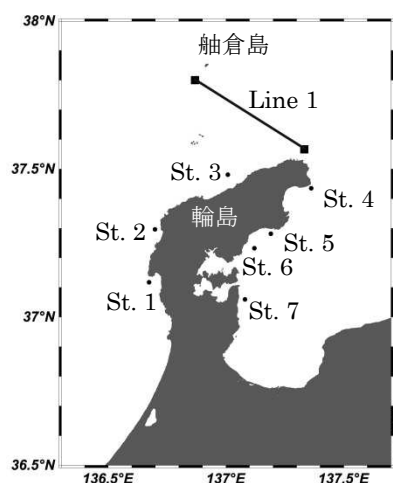


図 1 観測海域

## 結果と考察

上記手法により、2008 年 8 月から 2016 年 9 月までの 8 年間にわたる断続的な毎時沿岸分枝流量が得られた。年間平均流量（図 2）は 0.38 Sv 程度であり、流量には顕著な季節変動が認められ、7 月および 12 月に極大、2～3 月および 10 月に極小となった。各観測ブイによる流向流速観測データから、岸を右に見る向きを正とした各点の月別流速と沿岸分枝流量とを比較した結果（図 3）、能登半島西岸では特に夏期から秋期に沿岸分枝流量と同調して流速が変動していることが明らかになった。また、各年 8～10 月の沿岸分枝流量と能登半島東岸の St. 7 における流速を比較したところ、沿岸分枝流量の低下と St. 7 における流向の反転のタイミングがよく一致しており、沿岸分枝の変動が富山湾内邪の流況に対しても影響を与えていることが示唆された。

沿岸分枝流量と月別水揚量とを比較した結果、いくつかの魚種で水揚量と月平均沿岸分枝流量との間に有意な相関関係が認められ、沿岸分枝の変動に伴う能登半島周辺海域の流況変動が、実際に漁獲に対して影響を及ぼしていることが示された。また、月平均沿岸分枝流量と旬別水揚量とを比較して明瞭な対応の見られる魚種が

あり、例えばシイラは流量の低いときに水揚量が多くなる傾向があることが示された（図 4）。シイラは春期から夏期に北上し、秋期から冬期に南下する回遊を行うが、石川県の定置網では北上期には漁獲がなく、南下期にのみ漁獲される。南下期にのみ漁獲されるのは、秋期に沿岸分枝流量が低下することを利用して沿岸寄りを回遊することが原因となっている可能性がある。このように、対馬暖流の能登半島沿岸分枝流が能登半島周辺海域および富山湾の海洋環境に大きな影響を与えていることが示された。今後は、さらに多様・主要な魚種の漁況・漁場形成について海況との関係を解明することで、漁況予測や効率的な漁業への貢献を目的として研究を進展させていく。また、沿岸分枝流量の変動やそれに伴う沿岸流況の変化のメカニズムについてもさらなる解析を進め、その解明をめざす。

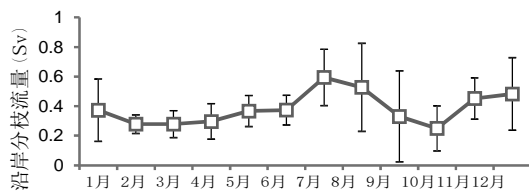


図 2 月別沿岸分枝流量

誤差範囲は標準偏差を示す

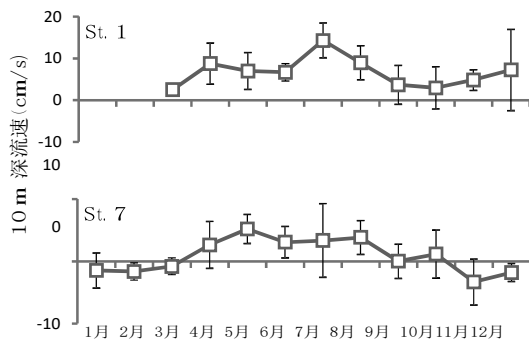


図 3 月別沿岸流速例

上：能登半島西岸 St.1 下：能登半島東岸 St.7

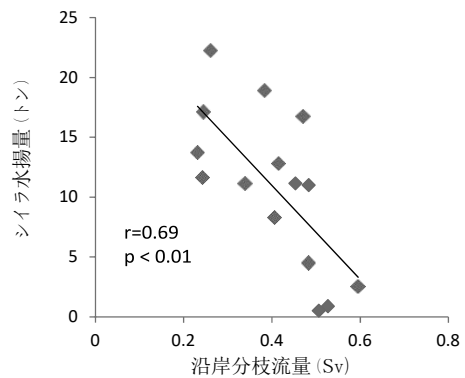


図4 沿岸分枝流量・シイラ水揚量比較

8月上旬から12月下旬の旬平均流量および旬別水揚量の2008~2015年の平均値  
水揚量は St.7 周辺の大型定置網による漁獲

## 研究組織

研究代表者 原田 浩太郎  
 研究協力者 大慶 則之  
 所内世話人 千手 智晴  
 研究協力者 広瀬 直毅

## 対馬海峡から山口県山陰沖にかけての海洋環境モニタリング

長崎大学大学院水産・環境科学総合研究科 滝川哲太郎

## 1. 目的

対馬海峡は東シナ海と日本海をつなぐ唯一の水路であり、対馬暖流は、東シナ海から対馬海峡を経て日本海に流入する。夏季には、対馬暖流は中国大陸の長江起源の淡水を多量に輸送する。対馬海峡は対馬によって韓国側の西水道と日本側の東水道に分かれる。海洋データ同化の手法を用いた数値モデル研究では、東水道通過流は、山口県萩市沖の見島によって分岐している（広瀬ら，2009，海と空）。

本研究では、東シナ海から移流されてくる大陸起源の低塩分水を捉えることを念頭に、対馬海峡東水道の離島等における水温・塩分の連続測定を実施した。また、見島での対馬暖流分枝流の変動を捉えるために、見島とその南側対岸の青海島に水位計を設置し、両島間の水位差を測定した。さらに、萩-見島間のフェリー「おによろず」（萩海運）を用い、見島から沿岸寄りのフェリー航路上の表層水温を測定した。

## 2. 観測

対馬海峡東水邊から山陰沿岸の4観測点（美津島、小呂島、蓋井島、青海島通）に水温・塩分計（または水温計）を設置し、表層の水温と塩分を測定した。美津島、蓋井島、青海島通については漁業用定置網に、沖ノ島については海底からブイを立ち上げ、それぞれ4~5m深に観測機器を設置した。また、萩市浜崎（図1）と見島の間を2または3往復/1日する定期フェリーに、水温収録装置を取付け、航路上の表層水温モニタリングを実施した。

青海島通と見島宇津に水圧式の小型水位計（Rugged TROLL100, In-Situ社）を2012年8月下旬から設置し、10分間隔で2測点の水位を観測している（図1）。水位計設置時にDGPSを用い、東京湾平均海面（TP）を測量した。水位計のセンサードリフトを調べるために、半年に1回程度の水位データ収集時に大気圧を測定している。本報告では、主に、水位計のセンサードリフトについて報告する。

## 3. 結果

青海島通と見島宇津で観測された水位に、48時間のタイドキラーフィルター（花輪・三寺，1985，沿岸海洋研究ノート）を施し、潮汐成分を除去した。図2に、潮汐成分除去後の青海島と見島の水位と水位差を示す（2012年8月下旬~2016年8月下旬）。2015年以降、水位差が上昇している。2014年以前と比べると、4-6cm程度の水位差の上昇が確認できる。Takikawa et al. (2016), CSRの水位差と流速の関係式を用いると、この水位差上昇により、両島間の流速が、10-17cm/s程度、増加したことになる。この顕著な水位差上昇が、自然現象なのか、それともセンサードリフトの影響なのか、大気圧の測定結果を用い検討した。

図3に、水位計で観測した大気圧（10分間隔）と萩の海面気圧（1時間間隔）の時系列を示す。2012年8月の水位計による大気圧の測定値は、萩の気圧の変動と対応している。2012年8月11時20分から11時40分の水位計による大気圧の平均値と、2012年8月11時と12時の萩の海面気圧の平均値を基準とし、水位計のセンサードリフトを見積もった（図4）。2014年まで、青海島と見島の水位計のセンサードリフトは、±2hPa以内と小さく、同様の変化傾向を示した。しかし、2015年以降、両者は異なる変化を示した。特に見島のセンサードリフトは、2016年3月には、5hPa以上と大きくなった。両島間のセンサードリフトの差は、2015年10月に最大6.2hPaとなった。この差は、水位に換算すると約6.2cmに相当する。2015年以降の水位差上昇は、自然現象ではなく、センサードリフトの影響を受けていると考えられる。

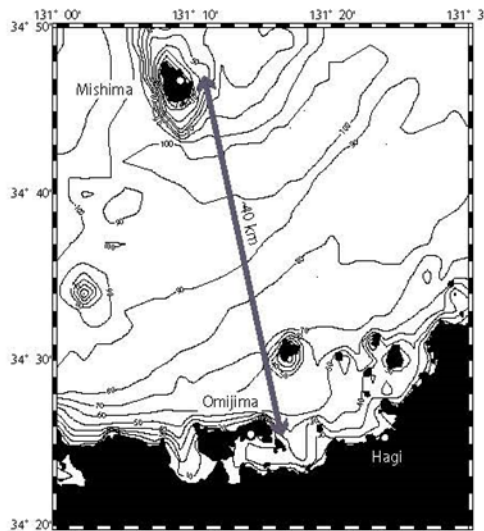


図 1. 観測海域.

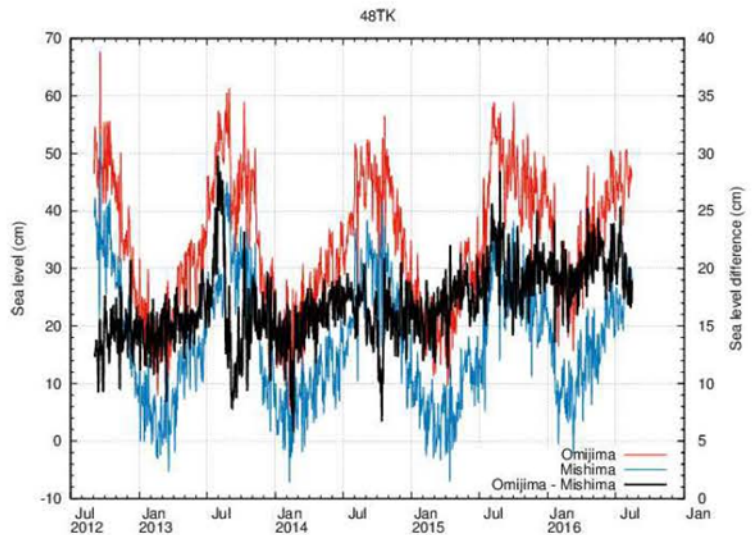


図 2. 青海島 (赤) と見島 (青) の水位 (移動平均). 黒線は両島間の水位差を示す.

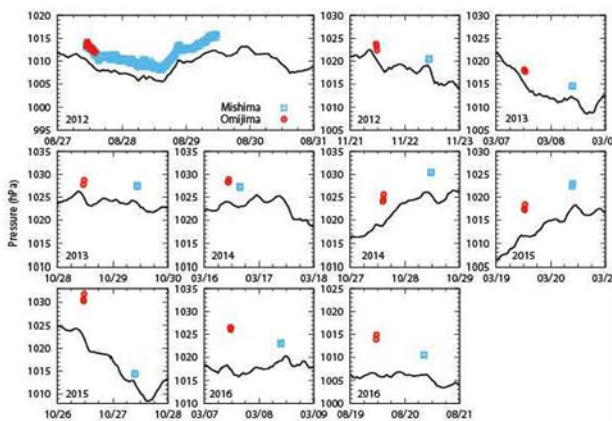


図 3. 青海島 (赤丸) と見島 (青四角) の水位計によって観測された大気圧と萩の海面気圧 (実線). ただし、水位計の観測値に標準気圧 1013.25 hPa を加算した.

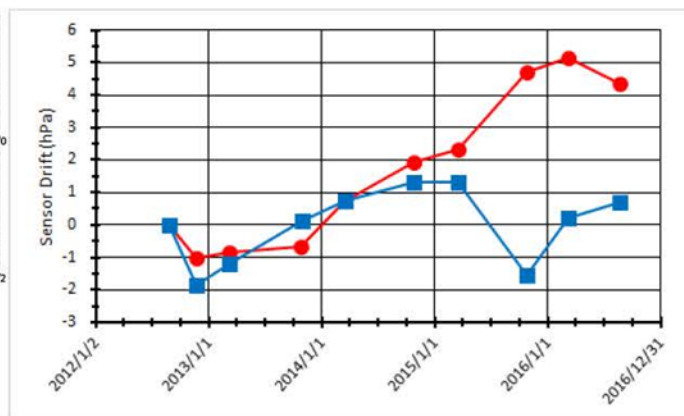


図 4. 青海島 (赤丸) と見島 (青四角) の水位計のセンサードリフトの時間変化.

#### 4. 研究組織

研究代表者 長崎大学大学院水産・環境科学総合研究  
 所内世話人 九州大学応用力学研究所  
 研究協力者 福岡県水産海洋技術センター  
 山口県水産研究センター  
 愛媛大学沿岸環境科学研究センター

滝川 哲太郎  
 千手 智晴  
 内藤 剛, 松井 繁明  
 渡辺 俊輝  
 森本 昭彦



## 瀬戸内海の伊予灘と豊後水道における乱流観測

研究代表者 愛媛大学沿岸環境科学研究センター 郭 新宇

### 背景と目的

豊後水道の底層に黒潮域から冷水が侵入する現象は底入り潮として知られている。底入り潮は水道部を通過して瀬戸内海へと冷水と豊富な栄養塩を供給することから、瀬戸内海の熱や栄養塩の収支に深く関わり、瀬戸内海の生態系に大きな影響を持つと考えられている。この底入り潮の発生について、潮汐の大潮・小潮周期との関連が指摘されており、潮流に伴う鉛直混合が関わることを示唆されているが、その詳細な物理過程は未だ明らかでない。豊後水道における鉛直混合過程に関しては、島影に形成される水平渦によって顕著な混合が生じることが数値実験により明らかにされている [Nagai and Hibiya 2013]。この他に、内部潮汐が鉛直混合に寄与する可能性が観測により示唆されている [Kawamura et al. 2006]。豊後水道における内部潮汐に関しては、申請者らが豊後水道東岸において継続的に実施している水温観測によって、夏季には定常的に発生することが分かっているが、その流動構造に関してはほとんど明らかでない。本研究は、豊後水道において乱流と流れの現場観測を実施し、乱流混合と内部潮汐の特性を明らかにすることを目的とする。

### 研究内容

2016年8月20日に愛媛大学沿岸環境科学研究センター研究船「いさな」を用いて豊後水道における海洋観測を実施した。図1に示す測点02から16までの計8点において、応用力学研究所所有の微細構造プロファイラ TurboMAP-5 と「いさな」搭載の音響ドップラー流速計 ADCP を用い、乱流と流れの鉛直分布を計測した。

### 結果

本研究の観測とは別に、申請者所属機関によって、図1の星印で示す地点において2016年の夏季から秋季にかけて海底設置 ADCP を用いた係留観測が実施されていた。その観測結果より8月20日の乱流観測時には、傾圧第2モードの半日周期内部潮汐流が顕著に発生していたこと、およびその内部潮汐のエネルギーは底層から表層へ伝搬していたことが明らかになっている。

図2aに乱流強度の指標である乱流運動エネルギー散逸率、図2bに鉛直平均流を傾圧流として計算した傾圧流速の断面に沿う方向の成分を示す。測点12-16にかけて表層と底層で南向き、中層の北向きの流れが見られるが、この特徴は海底設置 ADCP で捉えられた傾圧第2モードの半日周期内部潮汐流の特徴と一致し、同一の流れを捉えたものであると考えられる。この内部潮汐流に伴って、海面下40m付近では流れは強い鉛直シアを持ち、いくつかの層ではリチャードソン数が1/4を下回り、不安定が生じ得る条件にあった。実際にこのような層の周辺では乱流運動エネルギー散逸の極大が観測されている(図2b)。内部潮汐は、観測された浮力振動数(図2c)を基に背景の流れが無いとして計算した内部潮汐波エネルギーの伝搬方向(特性曲線)の分布から、豊後水道南部の陸棚端を起源とする可能性が示された(図2a, b)。

本研究によって豊後水道の半日周期内部潮汐波と乱流混合の空間構造が初めて捉えられた。更なる内部潮汐と乱流混合間の関係、およびその底入り潮をはじめとする黒潮系外洋水の波及過程の理解のためには、より多くの観測例と知見を蓄積し、統合的な現象の理解に結びつけていく必要があると考えられる。

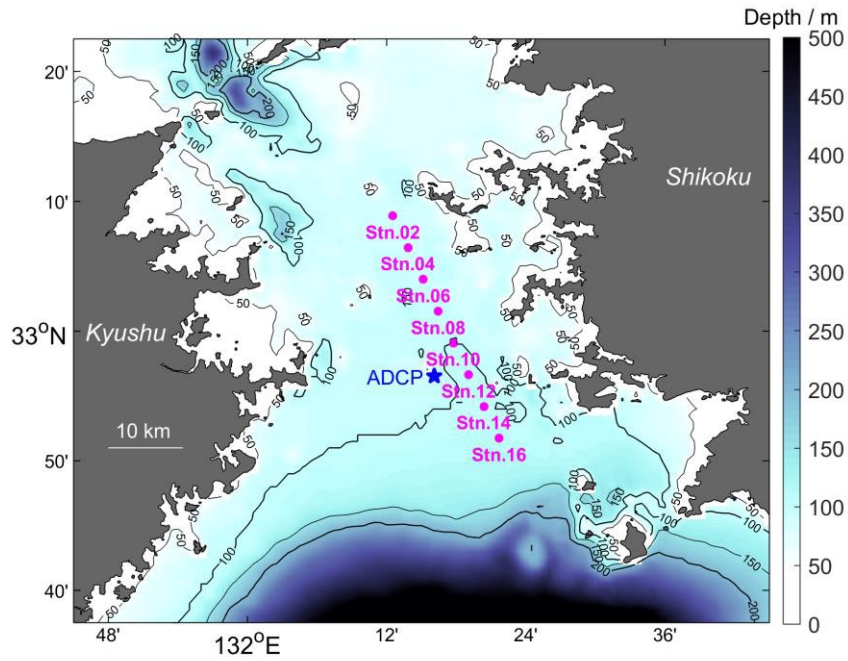


図1 豊後水道における乱流観測点 (測点02-16).

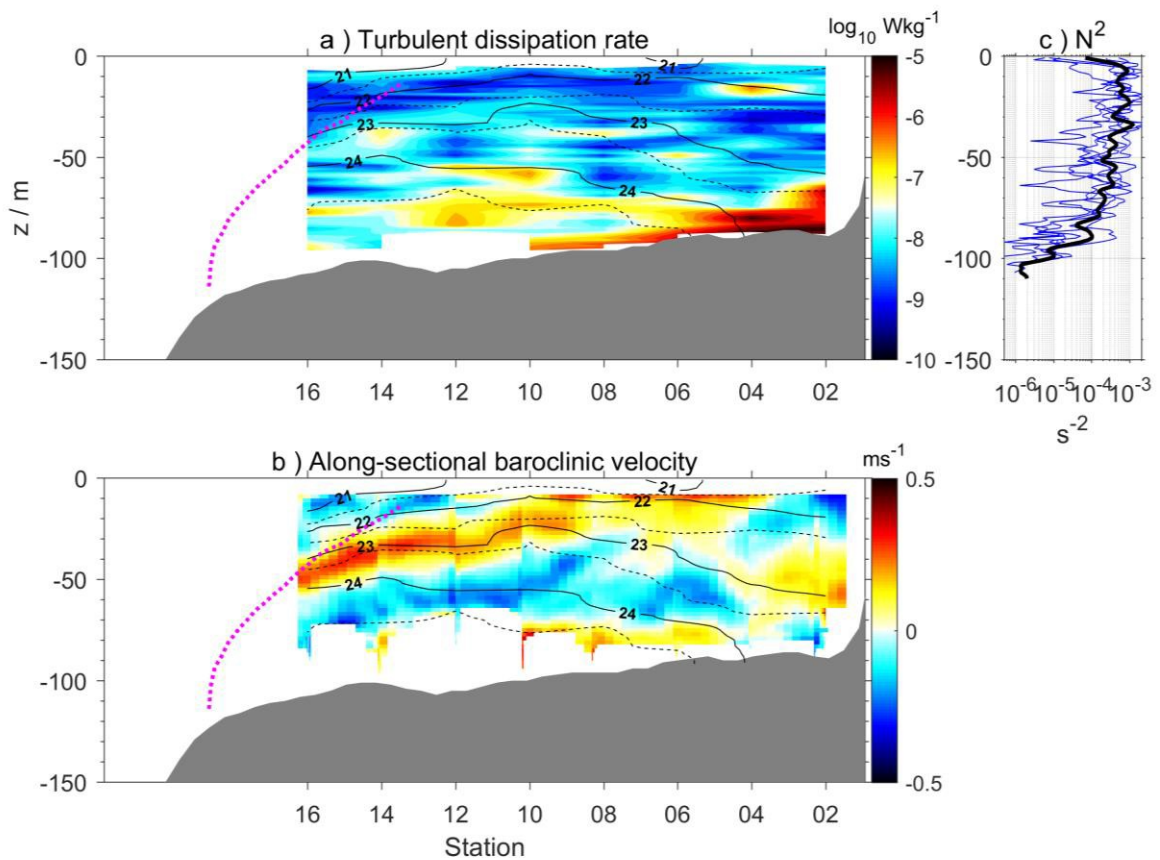


図2 断面観測結果. (a) 乱流運動エネルギー散逸率 (b) 傾圧流速の断面に沿う方向成分(正の値は北西向きを示す). (c) 各浮力振動数の2乗(青線)とその空間平均値(黒線). 図a, b中の黒の実線・点線は海水の密度(シグマティ)を示し、マゼンタ点線は、図cの浮力振動数を基に、背景流が無いとして計算した半日周期内部潮汐エネルギー(群速度)の伝搬方向(特性曲線).

## 日本沿岸域における高解像度塩分動的マップの作成手法の開発

中田聡史 神戸大学大学院海事科学研究科

## 1. 目的

低塩分水の指標となる海表面塩分 (SSS) の情報は、内湾域の水環境のみならず漁場環境の保全の観点から非常に重要である。例えば、河川から沿岸海域に出水される低塩分水 (河川プリューム) は陸域由来の有機物を多く含み、海洋生態系や漁場環境への栄養塩を供給するため、沿岸漁業者や養殖業者からも関心が高い。近年、海表面塩分測定センサーが搭載された SAC-D 衛星 (Aquarius) 等が打ち上げられ、毎日の海表面水温と同時に SSS も面的に得られるようになったが、データ水平分解能は約 50 km であり沿岸域で使用するには極めて困難である。ゆえに、沿岸域において衛星データから塩分場を推定する手法は確立することが不可欠である。縁辺海や沿岸域においては、河川からの陸域由来の有色溶存有機物 (CDOM) が存在し、CDOM 濃度と塩分値には高い負の相関関係があることが知られている。本研究では、この関係を利用して、日本沿岸域における塩分定点観測データと海色衛星観測により得られた CDOM データから、高解像度の海表面塩分値を推定する方法を開発している。前年度は対馬暖流域における河川プリュームを静止海色衛星データから推定した海表面塩分マップを試験的に作成し、韓国沿岸からの河川出水の影響が日本海にも及んでいることを発見した。また、沿岸域に設置された現場塩分データと比較することで SSS マップの妥当性を議論した。当該年度は、韓国南岸からの河川出水の影響を直接受ける対馬海峡に注目し、出現する河川プリュームの動態を調べた。

## 2. 方法

使用した衛星データは、「千里眼」と呼ばれる静止海色衛星の毎時観測によって 2011 年 3 月より得られている水平解像度約 500 m の COMS/GOCI プロダクトから CDOM データ (以降、衛星 CDOM) を抽出して解析に使用した。衛星 CDOM から SSS を推定する経験式を作成するため、対馬海峡内において博多―釜山を 1 日 1 回往復する旅客船 Camellia によって得られた現場観測 SSS データを用いて、衛星 CDOM データが得られた日時とマッチングをした。現場塩分データ提供期間である 2011 年 4 月から 2012 年 8 月までを解析期間とした。本期間内において、現場 SSS と衛星 CDOM との間には、やや相関係数 ( $R=0.71$ ) が低いものの、線形的な相関関係があることが確かめられ、経験式 ( $SSS = -8.081 \times CDOM + 33.62$ ) が作成された。この経験式に基づき、解析期間におけるスナップショットの衛星 CDOM マップから、対馬海峡における SSS マップを作成・整備し、河川プリュームの動態解析に用いた。また、対馬海峡内における沿岸域 (豆酏、郷ノ浦、沖ノ島) で観測された現場塩分データ (海表面下 5m) と衛星データから得られた推定 SSS データを比較することで SSS データの精度を検証可能かどうか議論した。

### 3. 結果と考察

対馬海峡における河川プリュームの解析結果の一例として、図1に2015年5月29日と8月5日における日平均(9:00~16:00まで1日8回平均)SSSマップを示す。いずれのマップにおいても、韓国南岸から韓国最長河川である洛東江(ナクトンガン、延長525km、流域面積23384km<sup>2</sup>)からの出水による河川プリュームが沿岸域に分布している様子がわかる。また、蟾津江(ソムジンガン、延長212km、流域面積4897km<sup>2</sup>)も対馬海峡に流入しており、両河川の年平均合計流量は1000m<sup>3</sup>/sを超える。それらの河川流量を反映して、洛東江の河口より西側の韓国南岸は塩分33以下の低塩分水に覆われていることが多い。このような河川プリュームは韓半島から切離されて日本海内部に流入し、韓半島東側に形成された中規模渦にとりこまれている様子も捉えられた(図2)。九州北岸の沿岸域においては、低塩分水が張り付いているものの、5月と8月も韓国南岸における低塩分水域よりも狭く、九州北岸から流入する河川流量は洛東江や蟾津江のそれよりも少ないことを示唆している。

5月29日の対馬海峡西水道内に注目すると、韓国南岸に張り付く河川プリュームの沖側に、低塩分水が済州島付近から進入してきている特徴がみえる。これは5月下旬から長江水が対馬海峡に流入したことを示唆している。

昨年度に作成したSSSマップと比較すると低塩分水の推定精度が改善されていることがわかった。例えば、韓国沿岸や九州北岸に分布する低塩分水の塩分レンジは30~33であるのに対して、昨年度の塩分レンジは20~28でありやや現実的な塩分を表現していなかった。これは、今年度は旅客船カメラを利用した現場塩分データを用いてSSS推定式を作成したため推定精度が向上したと考えられ、昨年度よりも現実的なSSSマップ推定が可能となった。

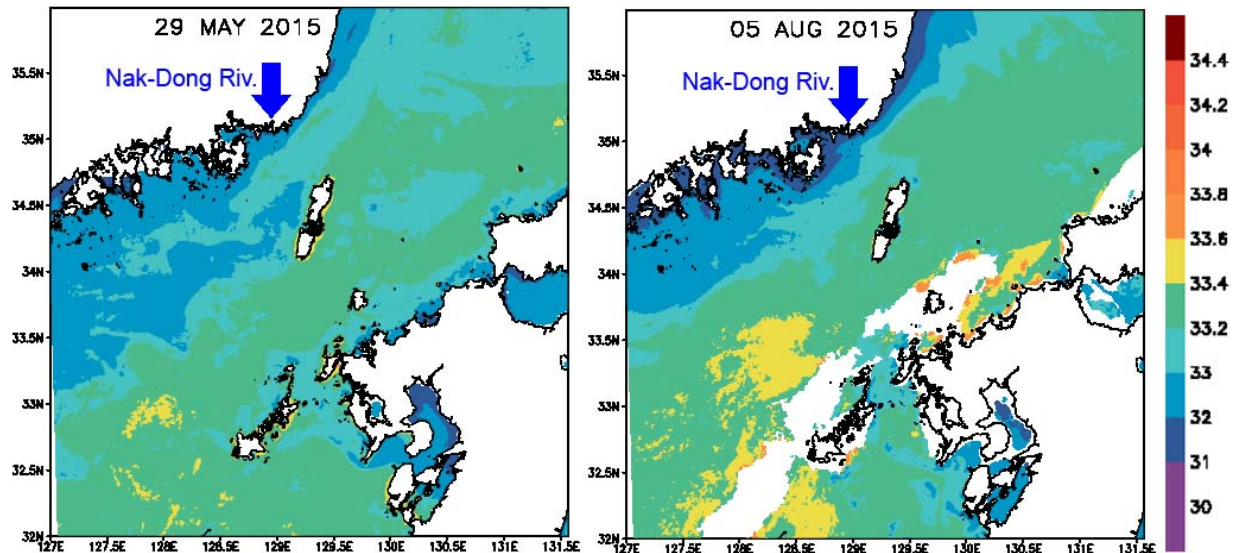


図1 2015年5月29日と8月5日における日平均海表面塩分(SSS)マップ。青矢印は洛東江の河口

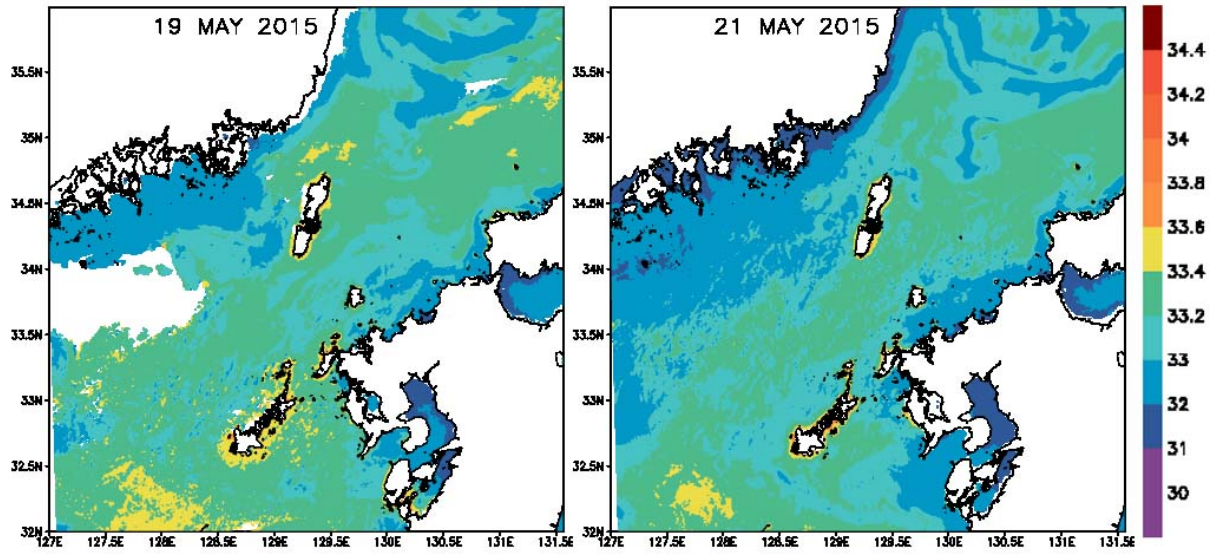


図2 2015年5月19日と5月21日における日平均海表面塩分(SSS)マップ。

研究体制

- 中田聡史 (神戸大学) 代表者
- 千手智晴 (九州大学) 所内世話人
- 広瀬直毅 (九州大学) 研究協力者
- 高山勝巳 (九州大学) 研究協力者

## GNSS 反射信号による海面高度算出手法の開発

(一財)リモート・センシング技術センター 磯口 治

## 要旨

Global Navigation Satellite System (GNSS)の反射波による海面高度算出を実施した。TechDemoSat-1 (TDS-1)の Delay Doppler Maps (DDM)に対して波形解析を実施して直達波と海面からの反射波の差に関する情報( $\Delta \tau$ )を算出し、それをもとに海面高度の算出を行った。距離に関する線形成分としての誤差補正を適用した海面高度は、平均海面高度の変動と比較的よく一致した結果が得られた。アンテナゲインが 7.5dBi 以上という良好な観測条件のデータに対しては、おおよそ 1m の計測誤差で海面高度が検出可能であることが確認できた。

## 1. 序論

Global Navigation Satellite System (GNSS)は主に位置決定のツールとして、現在では、多くの分野で実用されている。近年、GNSS の海洋からの反射波から海洋の情報(海面高度、海上風、波浪)を検出する可能性が示された。米国ではThe Cyclone GNSS (CYGNSS)ミッションのように反射波(GNSS-R)を受信する衛星群によりサイクロン内の海上風を観測し、極端気象現象の予報への貢献を目的としたミッションが立ち上がり、2016年12月に小型衛星群が打ち上げられた。従来の地球観測衛星と比較した時、最も特徴的な点は、受信機のみであることから衛星が小型化でき安価なシステム構築が可能であること。また、それにより、衛星群を形成することで観測頻度の向上を実現できることと言える。日本においても、文部科学省国家課題対応型研究開発推進事業における、H27年度宇宙航空科学技術推進委託費に採択されている研究プロジェクトに関連して、GNSS 反射波から物理量を計測するための手法を開発する必要性が高まっている。本報告では、昨年度に引き続きGNSS-R からの海面高度算出の基礎となる反射波の波形解析に関する検討を行い、実際に海面高度の検出および平均海面との比較を行った結果を報告する。

## 2. 方法

GNSS-R データとして英国の Surrey Satellite Technology Ltd (SSTL) を中心に開発・運用されている TechDemoSat-1(TDS-1)によるデータを使用した。太平洋の反射点における Level 1b の Delay Doppler Maps (DDM)を解析に用いた。検出に用いた反射点の軌道例およびアンテナゲインプロファイル、SNR プロファイルを図1に示す。カラー図は衛星高度計を基に算出された平均海面高度である。データを調べた結果、アンテナゲインが大きい DDM は SNR が高く良好な検出が可能であることが明らかとなった。図2にアンテナゲインが 0.5dBi の場合と 11dBi の場合の DDM およびプロフィールを示す。0.5dBi の DDM はノイズが大きく、立ち上がり位置の検出も手法の違いにより差が生じている。一方、11dBi の DDM は最大受信レベルが高く立ち上がり幅が大きいため、立ち上がり位置が決まり易く手法による差は小さい。

波形解析の手法として、昨年度検討した、①Offset Centre of Gravity Retracker (OCO<sub>G</sub>)、②Threshold Retracker (閾値法) に加えて、③直下型高度計の波形解析で使用されている、理論モデル(Brown Model)をベースにした手法を適用した。比較の結果、②Threshold Retracker (閾値法) の結果がノイズが少なく最も安定していたため、本検討では閾値法を適用した。

波形解析によって算出された  $\Delta \tau$  を基に、式(1)により軌道に沿った海面高度(SSH)を算出した。

$$SSH = \frac{-(\alpha\beta + H_t) + \sqrt{(\alpha\beta + H_t)^2 - (\alpha^2 - 1) \cdot (\beta^2 - R_t^2)}}{\alpha^2 - 1} \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{H_r - H_t}{K} \quad \beta = \frac{R_t^2 - R_r^2 + K^2}{2K} \quad K = R_t + R_r - c\Delta\tau$$

ここで、 $R_t$  は送信機と反射点の距離、 $R_r$  は受信機と反射点の距離、 $H_t$  は送信機と反射点の接平面との距離、 $H_r$  は受信機と反射点の接平面との距離、 $c$  は光速である。

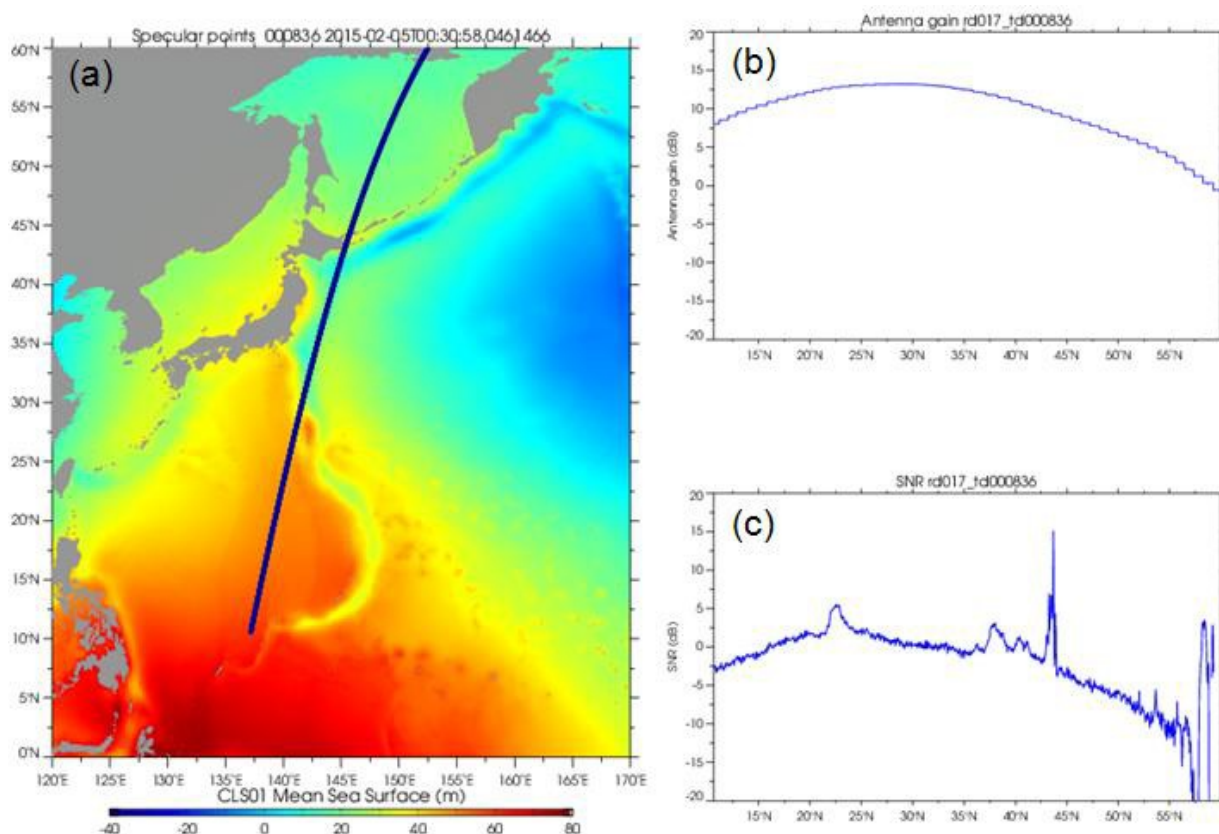


図1 (a) 検出に用いた TDS-1 の反射点の軌道(b)軌道に沿ったアンテナゲインおよび(c)SNR。

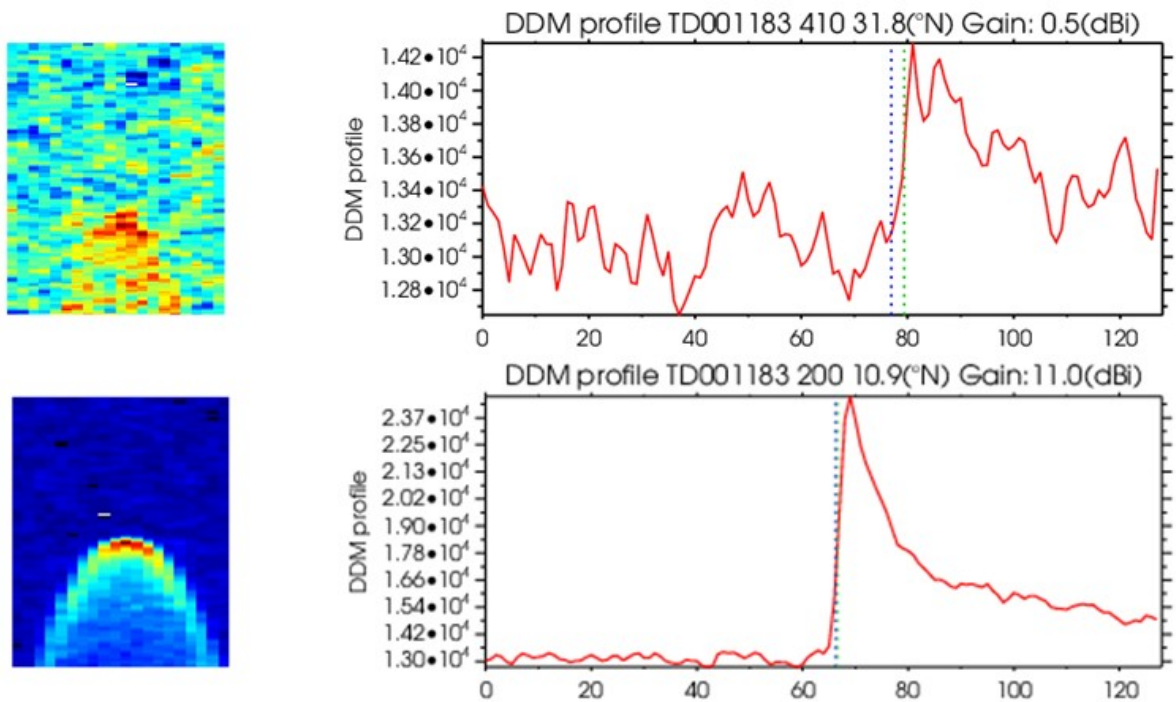


図2 (上図)アンテナゲインが0.5dBi および(下図)11dBi の場合のDDM およびプロファイル例。

### 3. 結果

算出した SSH プロファイルを図3(a)に示す。赤点が算出 SSH、青線が図1の平均海面の軌道に沿ったプロファイルである。検出高度は平均海面に対して差が生じているが、複数の軌道データからの算出により、差は軌道距離に対して線形で減少する傾向が見られ(図3(b))、その傾きは固有の受信機に対してほぼ同じ値を示すことが確認された。原因は現状では解明できていないが、本検討では、線形の誤差成分を除去することで算出高度の補正を行った。補正済み海面高度と平均海面との比較を図3(c)に示す。アンテナゲインの値が高く 7.5dBi 以上の北緯 40 度付近までは比較的良く海面高度変動が検出出来ている。一方で、アンテナゲインが低くなる 40 度以北では検出高度に大きなバラツキが見られることが確認できる。両者の残差の標準偏差は 3.12m であった。アンテナゲインが 7.5dBi より大きい北緯 40 以南の検出データから、異常値を除き、1/e スケールが 75km の重み付け平均を行って平均海面との比較を行った(図3(d))。緑線で示した重み付け平均プロファイルと青線の平均海面との残差の標準偏差は 1m となった。



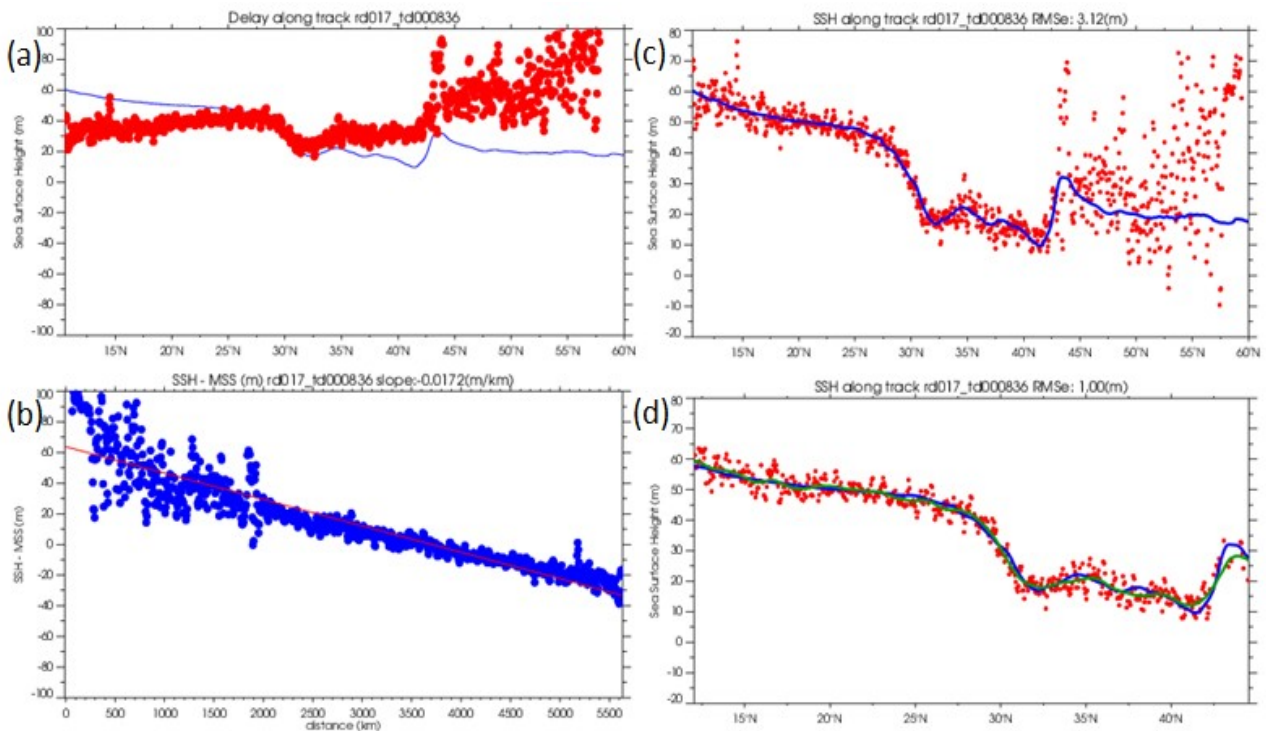


図3 (a) DDM により算出した SSH(赤点)と平均海面(青線)の比較。(b) 距離に対する算出 SSH-平均海面(青線)と線形の近似値(赤線)。(c) 補正済み SSH(赤点)と平均海面(青線)の比較。(d) アンテナゲイン 7.5dBi 以上の海域における比較図。緑線は補正済み SSH(赤点)を1/e スケール 75km で重み付け平均したプロファイル。

#### 4. 考察

本解析の結果、TDS-1 の GNSS-R 信号を処理することにより、条件の良い観測(アンテナゲイン 7.5dBi 以上)では、海面高度を 1m 程度の誤差で検出可能であることが確認された。1m の精度は、海流に関する力学的海面高度変動(0~10cm)の検出には十分でないが、時間変動がない、平均海面、すなわち、ジオイド高の変動程度の検出には繰返し観測を行うことで、利用可能であることを示している。また、ノイズ的な検出誤差はレンジ分解能(帯域幅)、および、SNR をあげることで向上するため、将来の GNSS に対しては 10cm オーダーでの検出に対して期待のもてる結果であると言える。

論文と学会発表リスト

なし。

## 海洋レーダを用いた日向灘表層流の試験観測

宮崎県水産試験場 渡慶次 力

## 1. 研究の目的

日向灘の流況は、黒潮流軸や黒潮系暖水の接岸に伴って不規則に変動し、流速値  $1\text{m/s}$  以上の速い流れが頻繁にあるため（岡田，2003），漁業者の操業成否や水産資源の卵仔稚魚の輸送・成魚の移動に大きな影響を与えているが，その変動特性に関する知見は極端に不足している。そこで，日向灘広域における数時間スケールでの表層流況変動の把握を目的に，海洋レーダを宮崎県に設置した。流況観測の結果，黒潮接岸時に海岸から  $20\text{km}$  以上の沖合域で双峰型ドップラースペクトルが発生し，海洋レーダの照射領域内の観測セル内に異なる流れが存在する可能性を指摘している（大城ら，2016）。本報は，海洋レーダ流速値と実測流速値を比較することで，海洋レーダ計測の流速値の特徴を整理し，双峰型ドップラースペクトルの要因を検討した。

## 2. 使用したデータ

使用した短波海洋レーダは，琉球大学工学部所有の  $24.5\text{MHz}$  帯フェーズドアレイアンテナ型で，2015年11月に宮崎港（以下「宮崎港局」）に，同年12月に清武川左岸（以下「清武川局」）に設置した（図1）。短波海洋レーダのシステム構成やレーダ局は既報に準じた（藤井，2001）。レーダ局では，発射された電波の  $1/2$  波長を持つ海面波浪による強い後方散乱波が受信・信号処理されて記録される。データを手動取得した後，一次散乱のドップラースペクトルのピークの正負の周波数の違いを読み取ってビーム視線方向の表層（約  $0.5\text{m}$ ）流速（以下「レーダ流速」）を得た。本報は，約1年間の連続したデータが取得出来た宮崎港局のレーダ流速を使用した。

現場流速は，約  $30\text{km}$  沖合にある表層型浮魚礁うみさち4号に設置された日本無線社製 ADCP (NJC-30C-10,  $240\text{kHz}$ ) による  $10\text{m}$  深の流速値を使用した（以下「4号流速」）。両流速の比較では，うみさち4号に最も近い観測セルのレーダ流速と，レーダ照射方向の4号流速成分を用いた。また，4号流速と同様に処理した4号風速も利用した。

## 3. 結果

レーダ流速と4号流速は，異なる計測水深に加えて，ビーム照射領域内の広域計測と1点計測の違いがあるにも関わらず，1年間を通して高い正相関 ( $R=0.6$ ,  $p<0.01$ ) となっていた（図2，表1）。しかし，冬季（11月～1月）は，レーダ流速に  $10\text{cm/s}$  以上の沖合に向かう成分が加わっており，北西風に対応する沖合方向へ吹く4号風速値も大きい。すなわち，冬季の海面付近を測定するレーダ流速は，4号流速に比べて，吹送流の影響を強く受けていたと考えられる。以上のことから，大城ら（2016）が事例紹介した2015年12月～翌年1月に計測された双峰型ドップラースペクトルは，黒潮離接岸に伴う流速変動に北西風の影響を受けた吹送流が重なって発生した可能性がある。

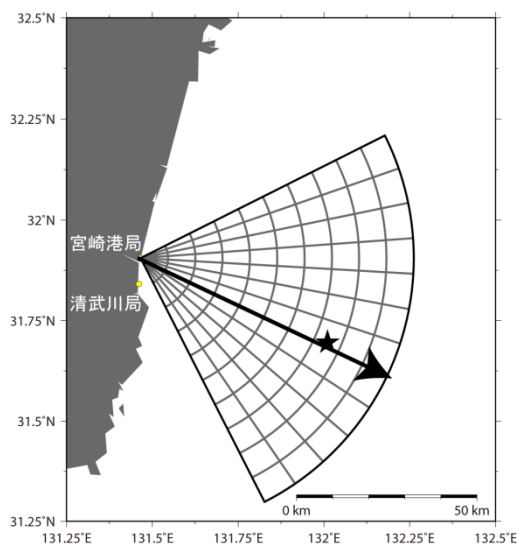


図1 レーダ局の位置及び使用した宮崎港局のビーム方向。

★は表層型浮魚礁うみさち4号の位置を示す。

引き続き、海洋レーダによる長期間の流況データを取得・分析して、双峰型スペクトルピークの原因を調べていく。現配置の宮崎港局と清武川局では、レーダのビーム交差角が小さく、ビーム合成で生じる誤差が大きいため、誤差低減に向けたレーダ局の配置転換を予定している。これらの視線方向流速からベクトル合成された流速値を解析して、日向灘の表層流動場の時空間変動特性を明らかにしていきたい。

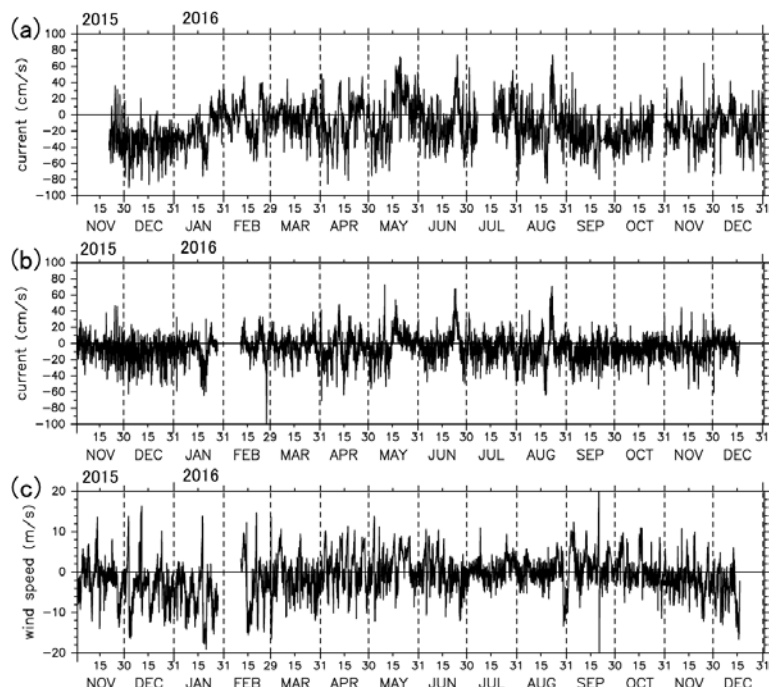


図2 レーダ流速(a)、4号流速(b)、4号風速(c)の時系列。正値は岸に向かう成分、負値は沖に向かう成分をそれぞれ示す。

表1 レーダ流速と4号流速の相関係数(R)、回帰直線の傾き(Slope)と切片 (Intercept)、4号風速の季節変化(正負は図2と同じ)。

Mon.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	all
R	0.35	0.45	0.66	0.65	0.72	0.71	0.49	0.70	0.38	0.52	0.67	0.61	0.60
Slope	0.62	0.68	0.91	0.89	1.29	0.95	0.77	0.99	0.54	0.84	1.04	1.05	0.97
Intercept (cm/s)	-17	-4	-3	-4	+1	-10	-1	-7	-22	-14	-12	-18	-10
Monthly Mean Wind Speed (m/s)	-4.8	-1.7	-1.4	+0.4	+1.0	-0.4	+1.2	-0.6	+2.0	+0.9	-2.2	-3.5	-1.2

#### 4. 論文等

渡慶次力, 林田秀一, 福田博文, 清水学, 市川忠史 (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, 沿岸海洋研究, 53巻2号, 151-157.

渡慶次力, 西口政治, 棧敷孝治 (2017): 宮崎県海況情報の漁業者への経済効果, 水産海洋研究, 81巻1号, 印刷中.

#### 5. 研究組織

代表者	宮崎県水産試験場	主任技師	渡慶次 力
世話人	九州大学応用力学研究所	教授	広瀬 直毅
協力者	九州大学応用力学研究所	教授	磯辺 篤彦
協力者	九州大学応用力学研究所	准教授	千手 智晴
協力者	九州大学応用力学研究所	研究員	高山 勝巳
協力者	水産研究・教育機構 研究推進部		清水 学

## GNSS 反射信号を用いた海氷観測手法の開発

東京大学 大気海洋研究所

木村詞明

### 1. 目的

地球の気候変動の実態把握と将来予測のため、さらには極域海洋の航路等としての利用のために、海氷のモニタリングの必要性は増してきている。現在の海氷リモートセンシングの主力は衛星搭載のマイクロ波放射計だが、観測分解能や頻度、観測できる物理量に限界があり、新たなモニタリング手法の開発に対する期待は大きい。本課題の目的は、文部科学省国家課題対応型研究 開発推進事業における宇宙航空科学技術推進委託費に採択されている研究プロジェクトに関連して、GNSS 反射波を用いた海氷モニタリング手法の開発と、それに寄与するための海氷変動の実態解明をすすめることである。

### 2. 検討と高解像度データ解析

現在、マイクロ波放射計 AMSR2 は数キロメートルの分解能で 1 日 2 回海氷分布をモニタリングできる。衛星で GNSS 反射信号を受信する場合、これを大幅に上回る分解能を期待するのは難しい。

GNSS 反射信号を有用に利用できる可能性があるのは、海氷の厚さ、さらにその推定につながる表面状態（粗度等）の観測である。とくに、短い時間スケールでの表面状態の変化を観測できることが期待される。海氷の表面状態を左右させる細かいスケールでの力学的変形（海氷盤どうし の乗り上がりや破砕）を観測するため、今年度は人工衛星搭載センサー MODIS による観測画像を用いた海氷の動きのモニタリング手法の開発をすすめた。Aqua と Terra のふたつの衛星による時間間隔約 3 時間での分解能 250 メートルの可視画像を用いることにより、海氷の動きを 2 キロメートルの分解能で導出することに成功した。それにより、特に氷縁に近い海氷域では 10km スケールの海氷変動が多くみられ、そのスケールでの海氷の収束と発散は広いスケールでみた海氷の状態を大きく変化させることがわかった（図 1）。

### 3. 今後の課題

まず、GNSS 反射信号が海氷の何を捉えているのかを把握する必要がある。そのために GNSS 反射信号と他の衛星搭載センサーとの観測値の比較をすすめなくてはならない。今年度の研究により比較対象として、マイクロ波放射計と、光学センサーによる可視・赤外画像データは有用であることが示された。

また、検証のため現場での海氷表面の観測を行う必要がある。そのために、応用力学研究所の所有するマルチコプターによる海氷表面の状態の観測が有効である。可能であれば2台のカメラによるステレオ観測により表面の凹凸を定量的に観測することが望ましい。観測海域としては、アクセスが容易なことと、様々な状態の海氷の観測が期待できる点から紋別市から知床半島にかけての北海道沿岸域が適している。今年度もチャンスがあればマルチコプターを用いた北海道沿岸域での予備観測を予定していたが、事情より実施できなかった（海氷の接岸期間が短く、陸からの観測が困難な状況であった：図2）。

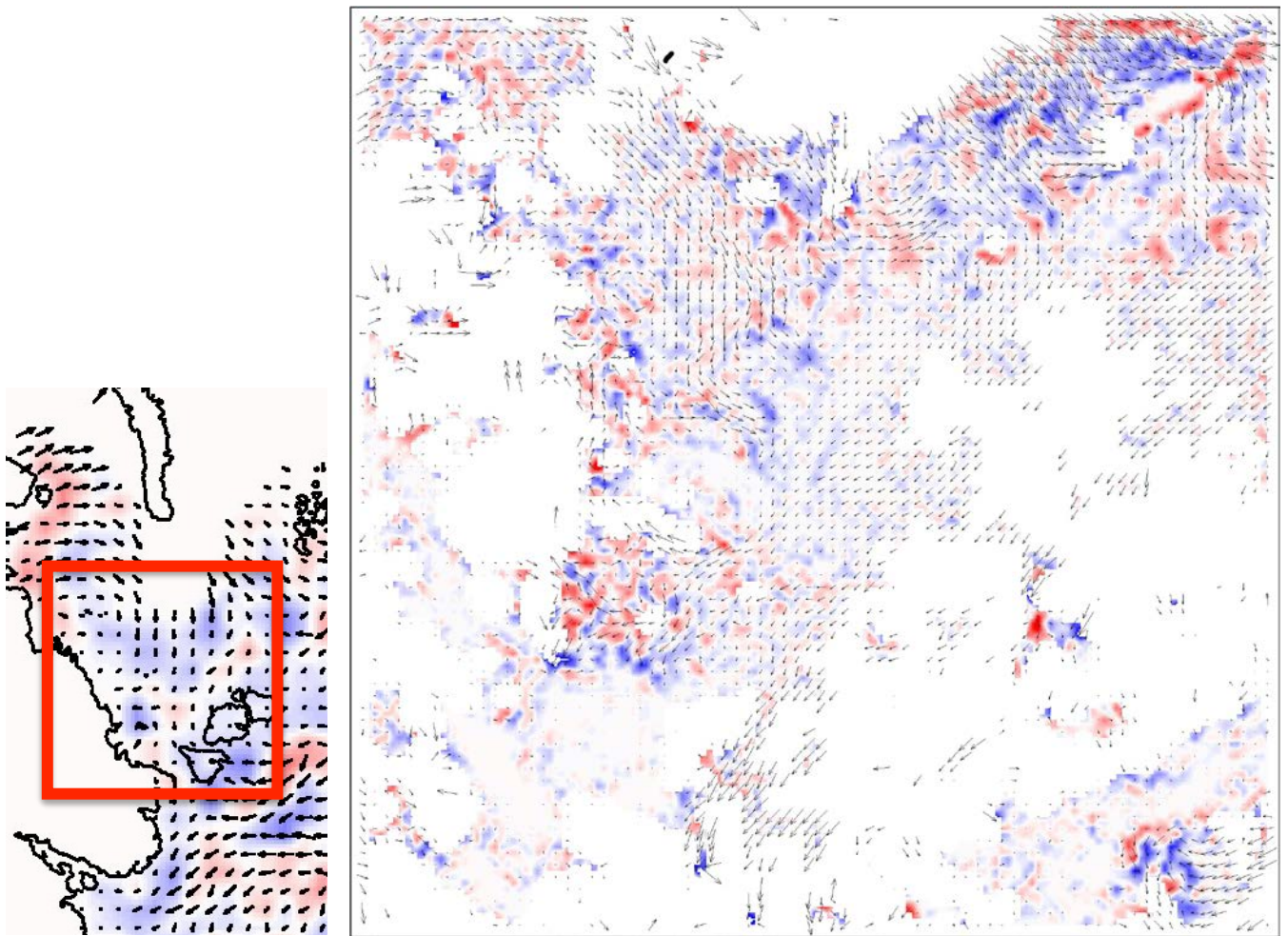


図1：AMSR2 画像から計算した北極海（カラ海）での海氷の動きとその収束・発散（左）と MODIS による可視画像から計算した赤枠内の海氷の動きとその収束・発散（右）青が収束、赤が発散を示す。60 キロメートル分解能のAMSR2 による海氷漂流速度では一様に収束しているように見えるが、2 キロメートル分解能のMODIS を使うことにより、その内部で細かい空間スケールでの収束・発散が起こっていることがわかる。



図 2：現場観測の候補地のひとつ、紋別市のオムサロ海岸。沖合数十キロメートルまで海氷は全く存在しなかった。（2017 年 2 月 19 日撮影）

#### 4. 研究成果の報告

Kimura, N., S. Yaguchi, H. Hasumi, H. Yamaguchi, Satellite observation of the dynamic deformation of sea ice, The 32nd International Symposium on Okhotsk Sea and Polar Oceans, 2017 年2 月22 日，紋別市文化会館（北海道紋別市）

#### 5. 研究組織

研究代表者	国立極地研究所	木村詞明
所内世話人	九州大学応用力学研究所	市川香

## 東アジア域における大気エアロゾルの気候影響に関する研究

富山大学大学院理工学研究部（理学） 青木 一真

**要旨**

大陸から越境して輸送される大気エアロゾルの気候影響を研究するため、2003年から九州 大学応用力学研究所において、太陽放射観測を行っている。これらのデータをもとに、エアロゾルの気候影響解明はもちろん、数値モデルの精度向上など利用している。2016年のエアロゾルの光学的厚さの2015年の季節変化と同じような傾向にあったが、他の日本での季節変化とは違った傾向が観測された。

**1. はじめに**

大陸から越境する大気汚染物質、黄砂粒子、森林火災など、それらが複合した影響は、日本国内から排出される大気汚染物質に加えて、風下側に位置する日本に影響を受けている。九州地方北部では、越境大気汚染やローカルな大気汚染による人為起源の大気浮遊微粒子（エアロゾル）の輸送により、健康被害や気象障害など、私たちの生活にも影響している。本研究は、2003年から応用力学研究所において太陽光と周辺光の波長別の放射輝度データをスカイラジオメーターにより連続測定し、エアロゾル光学的特性の解析を行っている。これらの観測データと数値モデルなどの結果により、エアロゾル粒子やそれが核となって形成する雲の気候影響を評価することを目的とする。エアロゾル粒子は、モデルの開発や応用を行うためにも、定量的な地上観測データの蓄積が重要となる。エアロゾル気候影響を評価する際には、応用力学研究所気候変動科学分野で開発・改良されているエアロゾル気候モデルSPRINTARSを用いて、地上観測や衛星観測の結果を基にモデルの検証を行う。また、主として九州・沖縄地域の観測地点（福岡、長崎、福江島、沖縄等）を利用して、越境大気汚染としてのエアロゾルをいち早くモニタリングし、それらを同化データとして組み入れ、モデルの精度向上につながることを目的としている。

**2. 観測・解析概要**

太陽直達光と周辺光の角度分布の放射輝度を晴天時日中に自動測定出来るスカイラジオメーター（プリード社製、<http://skyrad.sci.u-toyama.ac.jp/>）を利用している。九大応力研をはじめ、様々な場所において連続観測を行っている。この観測データから解析されたエアロゾルの光学的厚さ・オンゲストローム指数（エアロゾル粒径の指標）・一次散乱アルベド（放射吸収のパラメータ）を用いて、気候変動の指標である放射強制力を求める。また、これらのデータを地上検証として用いてSPRINTARSを改良し、東アジア全体の広域的な放射強制力のさらなる精度向上を目指している。今年度は、測器の故障があり、一時期、別の測器を利用して、観測を継続した。

**3. 結果及び、考察**

Fig. 1は、2015年1月から2016年12月までの九州大学応用力学研究所（福岡県春日市）における $0.5\mu\text{m}$ のエアロゾルの光学的厚さ(AOT(0.5))とオンゲストローム指数(Alpha)の月平均値を示したものである。エアロゾルの光学的厚さとオンゲストローム指数の季節変化は、2015年と2016年で概ね同じような傾向が見られた。エアロゾルの光学的厚さは、1月から12月にかけて減少しており、他

の日本各地での観測結果、すなわち、春に最大で、秋冬に最小となる 季節変化とは、ここ2年間は異なっていた。しかしながら、オングストローム指数の季節変化を見てみると春と秋に低い、すなわち、大粒子（黄砂）の影響が見られているため、輸送される物質の変化ではなく、量的な変化からエアロゾルの光学的特性の季節変化が変わっていたのかと考える。この傾向がどうしてなのか、さらに研究を進める予定である。今後も継続した観測を行うことにより、SPRINTARSや衛星観測等と比較しながら、越境大気汚染やローカルな影響評価を行い気候影響の解明につなげていきたい。

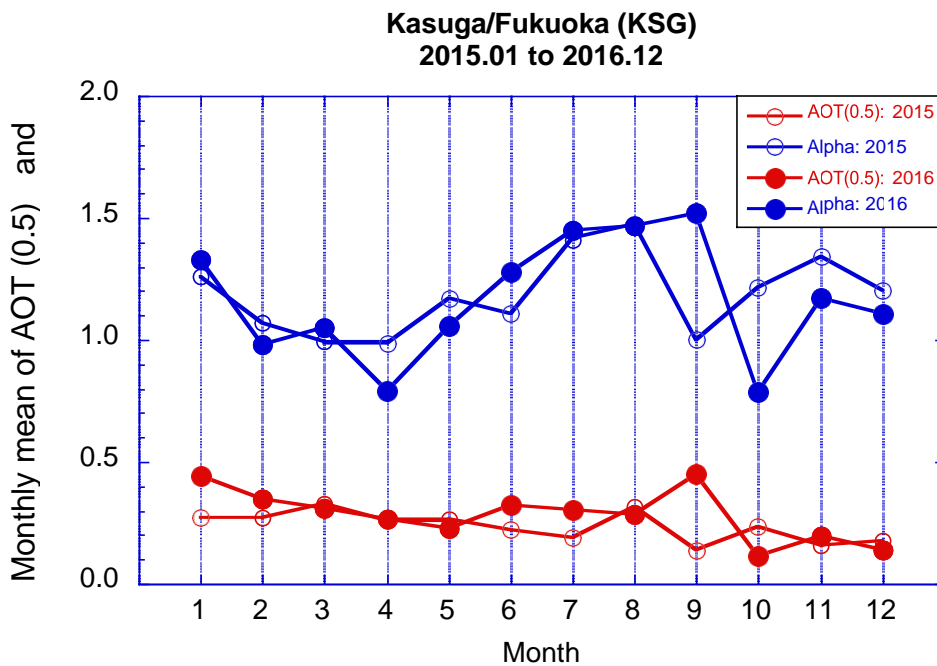


Fig. 1 2015年1月から2016年12月までの九州大学応用力学研究所（福岡県春日市）における  $0.5\mu\text{m}$  のエアロゾルの光学的厚さ (AOT (0.5)) とオングストローム指数 (Alpha) の月平均値

#### 4. 研究成果

Aoki, K., : Long-term and spatial variability of Aerosol optical properties measured by sky radiometer in Japan site. (AGU FALL MEETING 2016, San Francisco, USA, 2016. 12. 16)

Aoki, K., : Temporal and spatial variability of Aerosol optical properties retrieval from sky radiometer observation in Japan site. (AeroCom&AeroSAT2016, Beijing, China, 2016. 9. 22)

#### 5. 研究組織

代表者	青木 一真	(富山大学大学院理工学研究部 (理学) )
協力者	竹村 俊彦	(九州大学応用力学研究所、所内世話人)
	河本 和明	(長崎大学環境科学部)



## 洋上および海中を航走するビークルに働く流体力解析・機体挙動に関する研究

国立研究開発法人海洋研究開発機構

海洋工学センター

海洋技術開発部

百留 忠洋

### 研究目的：

自律型無人潜水機（AUV）の普及や多種多様化にともない、複数機を同時に運用する要求が高まっている。AUVの運用に際して、海中を別海域で航走する無人機を同時に管制することは音響通信の通信距離・範囲の観点から困難である。この問題を解消するためには洋上からAUVを自動で追尾する洋上無人ビークル（ASV）を用意し、これに海中と空中の通信の中継をさせることで遠隔地にある無人機を同時に管制することができるようになる。本件ではASVの模型を用い水槽試験により流体力計測し、それを解析することで波浪中での挙動を検討する。

### 方法：

本年度はASV試作機の流体力や運動性能の情報を基にASV実証機の実機を製作した。実機の製作の工程が大幅に遅れたため、この模型を製作することができなかつたため実験をするにはいたらなかった。しかしながら前年度までに行つたASV試作機の模型の実験で得られた流体力を実証機スケールに換算して流用することで、実証機の運動性能試験を実施することができた。



図 開発中のASV 実証機

## インド亜大陸東北部における大気鉛直構造の解明

東京大学生産技術研究所 木口雅司

## 1. 研究の目的

アジアモンスーン域の一角であるインド亜大陸北東部は、世界最多降水量の記録を持つインド・メガラヤ州チェラプンジがあるシロン高地や、その世界最多降水量がもたらされるシロン高地からの雨が一気に流下するメグナ川流域、チベット高原から下るガンジス川、ブラマプトラ川という巨大河川の河口域に当たるバングラデシュ、そしてチベット高原から流下するブラマプトラ川の中流域にあたりアジアモンスーン域で最も早くから降水現象のあるインド・アッサム州を含み、多量の降水、世界的大河川の集まる、地球水循環を考える上で重要な地域である。また、対流活動が活発であり、竜巻を引き起こす小規模な積雲対流活動などの擾乱が成層圏に流入する水蒸気量に影響を与えている。そのため、研究対象地域における大気鉛直構造の解明は重要である。

本研究では、高層ゾンデ観測や高高度の水蒸気測定が精度よく観測できる Snow White、全球雷データなどの観測データと総観気象場とを組み合わせた解析を実施し、研究対象地域における大気鉛直構造の解明を目指す。

## 2. 研究の手法

バングラデシュ気象局の高層気象観測やインド亜大陸北東部に展開されている官署の雨量観測データ、レーダ観測データなど地上観測データを用いて、プレモンスーン期とモンスーン期における擾乱現象を捉え、積乱雲の存在の有無が分かる全球雷データ(WWLL、<http://webflash.ess.washington.edu/>)を用いて、その要因が積乱雲によるものかどうかを判定する。2007年に集中高層気象観測で取得された6時間データや通常用いられているゾンデより上層の湿度測定が可能である Snow White を用いて取得された水蒸気データ、衛星データ(EOS MLS, AIRS 等)を用いて、プレモンスーン期とモンスーン期の擾乱現象が発現しているときとそうでないときの詳細な大気鉛直構造を明らかにする。さらに、擾乱現象が発現しているときとそうでないときの総観気象場を、NCEP/NCAR や ERA40、JRA55 を用いて示し、その大気鉛直構造がどのように形成されるのかを解明する。

昨年度、Snow white データを用いて高層気象観測や衛星データの検証を実施した結果、科学的解析に耐えうることを確認できたので、それらを用いて気候学的な視点から長期解析を進めた。

## 3. 結果

まず、全球雷データを用いて、本研究対象領域を含む南アジア域の雷発生数と対流活動(OLR)の分布を調べた。解析対象期間は、2008～2013年のプレモンスーン期(3～5月)とモンスーン期(6～9月)とした。バングラデシュ周辺では、OLRの分布からはプレモンスーン期の3～4月はまだ対流活動が活発ではないが、雷発生数で見るとインド亜大陸などの周辺地域に比べ高いことが分かった(図1)。年々変動に着目すると(図2)、2008～2013年を通じて、5月中旬からバングラデシュ及びその近傍で雷発生数が増加する。2010年のプレモンスーン期のバングラデシュでは、雷発生数が他年と比べて多くなっており、一方2013年は4月中旬から6月上旬まではバングラデシュ及びベンガル湾上で雷発生数が多く、モンスーン後期の9月中旬から下旬にかけて大変活発な雷活動が見られる。プレモンスーン期はそれに対応するように、大気上層(250hPa面)の比湿も上昇しており、2010年は他年に比べて多い(図3)。このような年々変動の要因として、ENSOが考えられたが、2010年はLa Nina年、2013年は通常年であり、関係性はあまり見られなかったが、もう少し詳しく調べる必要がある。次にEOS MLSデータからCO、H<sub>2</sub>O、O<sub>3</sub>といった微量気体成分の緯度時間断面図を100、146、215hPa面で作成した(図は省略)。経年変動が大きく見られたが、雷発生数との関連は今後の課題である。

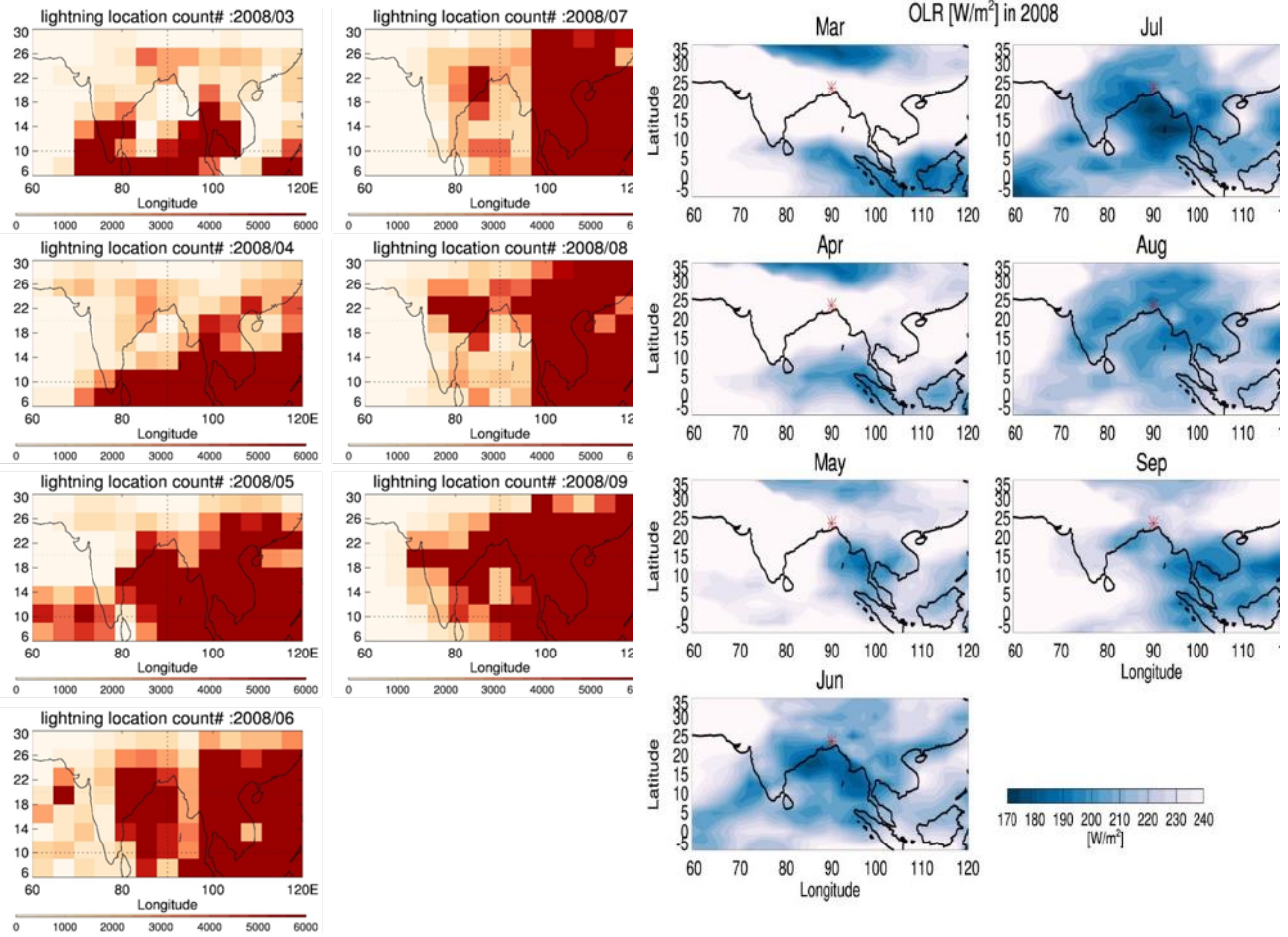


図 1 : 2008~2013 年の 3~9 月における(左)雷発生数と(右)OLR 分布。

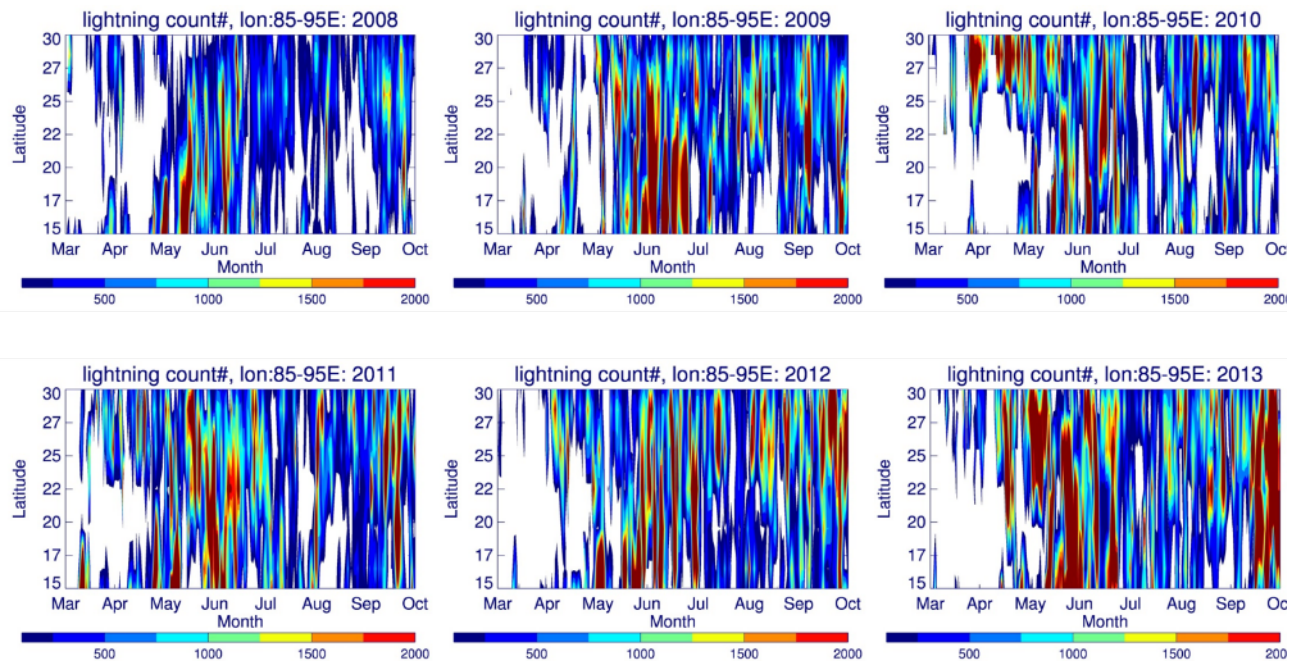


図 2 : 2008~2013 年 3~9 月における雷発生数の緯度時間断面図。

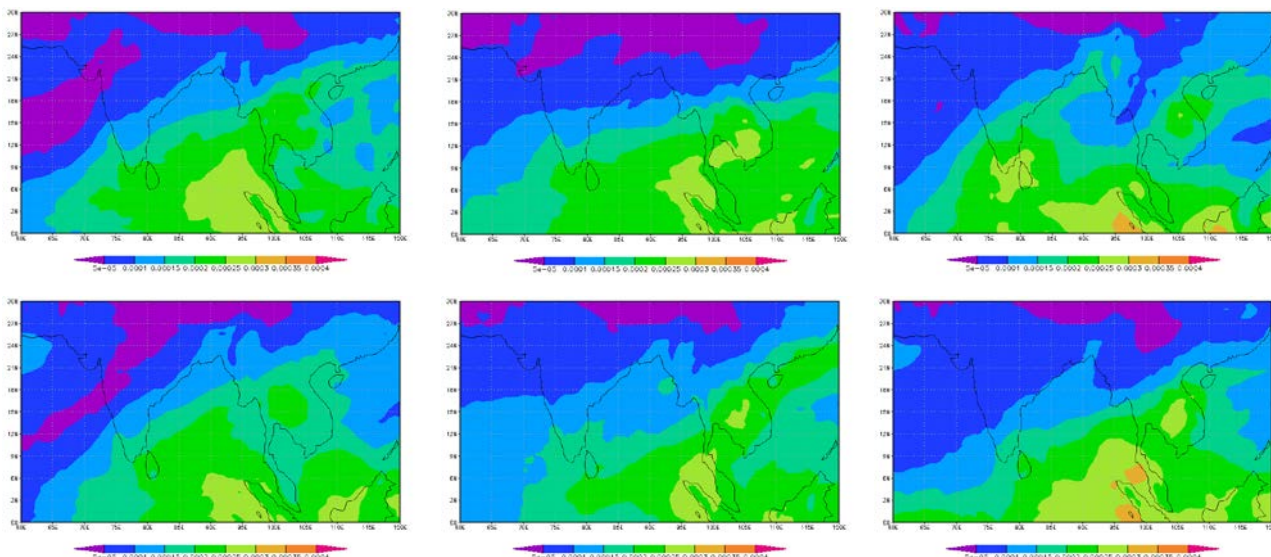


図 3 : 2008～2013 年 4 月の 250hPa 面の比湿(kg/kg)。

次に、雷を発生させるような激しい擾乱の形状について、バングラデシュのレーダを用いて分類を行った。バングラデシュ国内には、現在 5 つのレーダサイトがバングラデシュ気象局によって運用されている。そのうち、南部のケッパラと南東部のコックスバザールに設置されているレーダを用いて、2010～2014 年において観測された降水システムを、形状を「弧状型」、「線状型」、「分散型」に分類した(図 4)。プレモンスーン期からモンスーン初期にかけて、弧状型が多く、モンスーン期に入ると分散型が多いことが分かった。

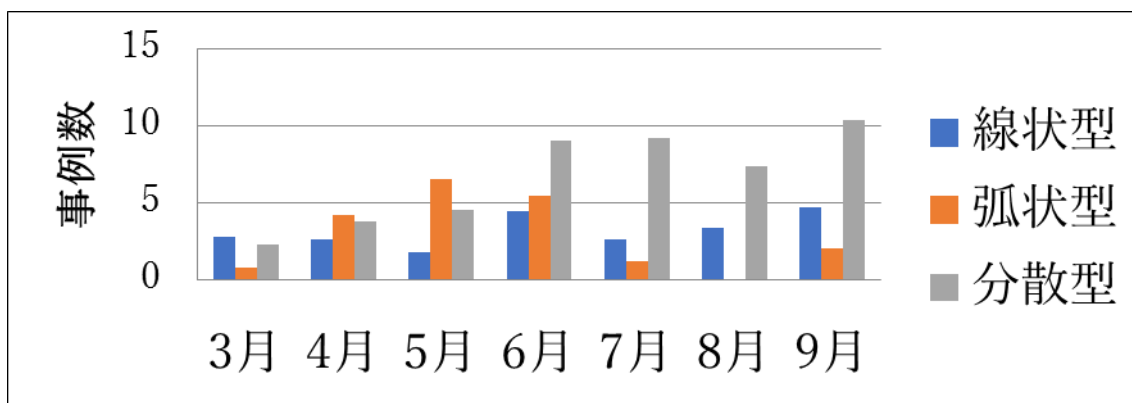


図 4 : Kheppupara レーダ及び Cox' s Bazar レーダで 2010-2014 年に観測された線状型，弧状型，分散型の発生数の月別発生数の分布。

#### 4. まとめ

今年度は、主に全球雷データを中心に月平均スケールの大気場の描像を明らかにした。プレモンスーン期の年々変動も雷の発生数から示唆することができ、特に大気上層での水蒸気の増加が総観場解析から明らかになった。また、擾乱の主な形状がプレモンスーン期とモンスーン期で異なり、このことが成因と鉛直構造の違いを示していることが示唆された。

今後の課題として、より詳細な大気場の時空間変動に着目し、小規模な積雲対流活動に関連する現象の解明を行いたい。

## 東シナ海陸棚域における海底境界層の栄養塩輸送過程

富山大学 大学院理工学研究部 張勁

**Nutrient transport via sea floor of shelf area in the East China Sea**

## 1. Estimation of exchange between shelf water and open sea based on international joint cruises

## 1-1 Introduction

Marginal seas in the western North Pacific and the western boundary current area are rich in the variability of bottom character and bathymetry, constantly or intermittently exchanging energy and materials between land and open ocean. Water mass, as the material transporting carrier, is important to analyze but it is difficult since water masses often have various origins with complicated structures especially in marginal seas and open-ocean interaction dominated areas. To characterize and analyze the water mass structures and to quantify the contributions with high-resolution, in this study, current biogeochemical cruises covering the East China Sea and Kuroshio area connecting to the western North Pacific are introduced using multiple trace elements and isotopes.

## 1-2 Observations and Data

The Hakuho Maru KH-15-3 cruise was successfully conducted, to understand the biogeochemical/physical processes, spatial and temporal variations and cycles of nutrients in the East China Sea. Two cross stations were successfully conducted by two research vessels in very similar date, R/V Hakuho-maru on 27-28 October and R/V Dongfaonghong2 (Ocean University of China) on 25-26 October. Hydrographic data (Temperature and Dissolved Oxygen) comparison by using these two ships is showing in Figure 1.

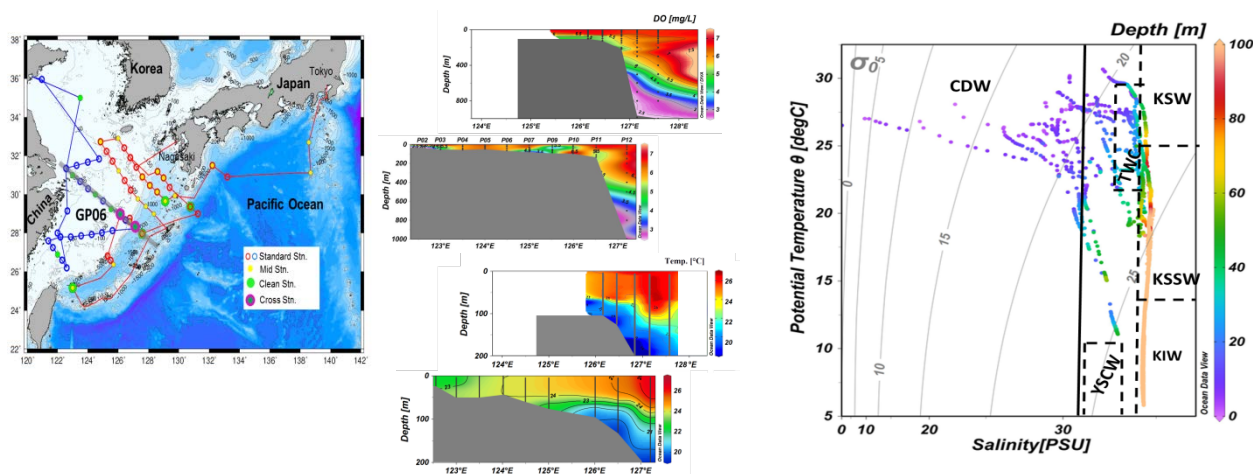


Figure 1. Hydrographic data comparison by using R/Vs Hakuho-Marun and Dongfanghong2.

## 1-2 Result

Chemical tracers e.g. rare earth elements and Nd isotope ( $\epsilon\text{Nd}$ ) are suitable and conservative as water mass indicators, and are excellent tools for classification and analysis of water masses while coupling with salinity and temperature. These physico-chemical tracers can be applied to characterizing and quantifying multiple water masses (>3), particularly where there is complex water structure. Three end-member box models for  $\epsilon\text{Nd}$  of various water masses including CDW (Changjiang Diluted Water), YSCW (Yellow Sea Cold Water) and KW (Kuroshio Water) indicates that the KW contributes 55% to the Japan Sea, and another half portion comes from Yellow Sea Water (37%) and CDW (8%); and approximately over 10% of CDW can influence Kuroshio/the adjacent area of Northwest Pacific.

## 2. How significant of diffusive benthic nutrient flux in the central of East China Sea?

To evaluate the importance of sediment nutrient source, phosphate, silicate, nitrate and nitrite at the porewater, overlying water, and entire water column were measured in the central of East China Sea. Moreover, to quantify the influence of suspended particle, a measurement of multi-size particulate characterizing contour (LISST) was carried out together with CTD casts. All nutrient concentrations in the porewater were greater than overlying water at two sites (B1 and C1), suggesting sediment was nutrient source to the water column. Nutrient diffusion fluxes were calculated from the corresponding concentration gradients at these two stations, accounting for 20-60% of primary productivity. In contrast, at station C4, sediment was nutrient sink. Bottom water at station C4 had low dissolved oxygen (DO, 1.8 ml/l), high weighted nutrients, and finest suspended particle relative to stations B1 and C1 (Fig.2.). Thereby, opposite nutrient diffusion at station C4 is most likely caused by organic matter remineralization at the bottom water. However, phosphate concentrations at the bottom seawater were greater than the overlying water at all three stations. It might be affected by lateral transport near bottom or phosphate was absorbed by high concentration of particles at the seafloor. This study infers that nutrient flux from sediment to the overlying water, and further diffusion to the water column depends on the sediment property (e.g. grain size), in situ biogeochemical process and may associated with water transport.

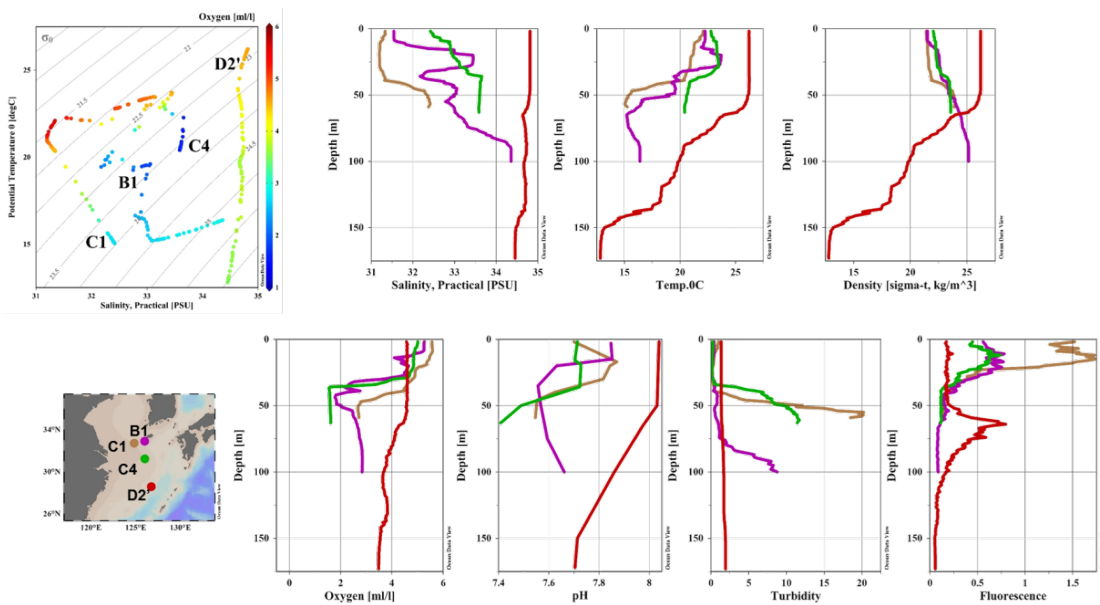


Figure 2. Hydrographic results of the shelf water in East China Sea.

## 3. Scientific meetings

1. J. Zhang, Q. Liu, T. Matsuno, Water mass analysis using rare earth elements of shelf water in the East China Sea: contribution of Kuroshio Intermediate Water. JpGU, Chiba, Japan, May 2016.

2. Q. Liua, J. Zhang, K. Jiang, S. Kambayashi and T. Matsuno. How significant of diffusive benthic nutrient flux in the central of East China Sea? JpGU, Chiba, Japan, May 2016.

3. J. Zhang, Q. Liu and Z-H Zhao, Water mass analysis and fraction estimates using rare earth elements, Goldschmidt 2016, Jun. 2016.

4. J. Zhang, What can we learn from rare earth elements and Nd isotope: material transport and interaction between the East China Sea and the western North Pacific. 3rd Xiamen Symposium on Marine Environmental Sciences (3rd XMAS), Xiamen, Jan. 2017.

## バイスタティック海洋レーダによる対馬暖流観測

愛媛大学沿岸環境科学研究センター 森本 昭彦

## 1. 研究の目的

対馬暖流は対馬海峡を通過後いくつかの分枝流に分かれるとされている。研究代表者らはこの分枝流を観測するため、長崎県対馬市と山口県萩市沖の相島に海洋レーダを設置し海面流速を観測している。海洋レーダは通常2つの送受信局から電波を送信・受信し観測を行うが、我々は1局から送信、2局で受信するバイスタティック観測を行っている。昨年度の共同研究により相島から送信し、相島と対馬で受信するシステムを完成させ、対馬から100km程度の範囲の海面流速を測定できるようになった。しかし、対馬暖流の分枝流、特に200m等深線に沿って流れるとされる第二分枝流を観測するには、対馬局から150kmの範囲の海面流速を測定する必要がある。対馬局から送受信する観測方法では、対馬局から170km程度の範囲まで観測可能なことから、バイスタティック観測システムを改良することで観測範囲を広げることが可能であると考えている。現在のシステムでは100km程度の範囲しか観測できない理由として、我々の使っている電波の周波数に近い外来電波の影響があげられる。外来電波によるノイズを減らすことで、少なくとも対馬局から150kmの範囲の観測を可能にするシステムを構築することが本研究の目的である。

## 2. 参加者

森本 昭彦	(愛媛大学沿岸環境科学研究センター)
杉谷 茂夫	(情報通信研究機構沖縄電磁波技術センター)
市川 香	(九州大学応用力学研究所)

## 3. 研究成果の概要

## 3-1. バイスタティック海洋レーダの概要

本研究で使用する海洋レーダは、情報通信研究機構が開発した送信周波数9.2 MHzのレーダである。海洋レーダは陸上の無線局から海面にむけて短波帯の電波を照射し、照射した電波の波長の半分の波長を持つ海上の重力波からの後方散乱波を受信し、照射した電波のドップラーシフトから海面流速を計測する。海洋レーダにより観測できる海面流速は、受信ビームの視線方向のみであり、海面流速のベクトルを得るためには2局のレーダサイトをそれぞれのビームが交差するように配置し観測を行う必要がある。本研究の海洋レーダシステムは2局のレーダサイトがあるものの、送信機は1局しかない。そのため、海流のベクトルデータを得るためには、送信機のある局では通常の観測を行い、受信機しかないもう1局では海上で側方散乱された電波を受信し流速を計測する必要がある。このような1局送信2局受信のレーダはバイスタティックレーダと呼ばれている。バイスタティックレーダの原理は理論的に示されているが、海洋レーダでこの観測方法が使われたことはほとんどない。

本研究では、山口県の相島局から送信周波数9.2 MHzの電波を送信し、相島局で後方散乱波を、長崎

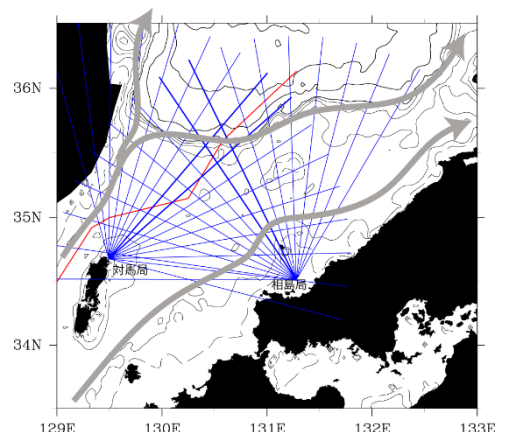


図 1. 対馬レーダと相島レーダのビーム配置(青線)と対馬暖流の流路(灰色線)。

県の対馬局で側方散乱波を受信する（図 1）。2015 年度の研究により側方散乱された電波を受信出来るシステムを構築することができたが、外来電波のノイズレベルが高く目標としている対馬暖流域の流速を計測することができなかった。今年度は送信局（相島局）の送信波を受信局（対馬局）で正確に再現し、受信波とビートを取りながらより狭い帯域に受信波をおとすビートダウンと呼ばれる方法を導入して観測海域を拡大させることを目的とした。

### 3-2. バイスタティックレーダの開発と観測結果

対馬局の受信システムを図 2 に示す。今年度開発したのは図中の赤枠の部分である。1 本の受信アンテナにより相島局から送信された直達波を検出し、その直達波と全く同じタイミングで疑似信号を発生させる（図 2 の青枠の部分）。この内部で発生させた信号と海面からの散乱波とビートを取り、さらに、狭い帯域のバンドパスフィルタにより海面で側方散乱されたシグナルを取り出す。直達波の検出は容易であったが、同じタイミングで内部信号を作り出す部分の作成に時間を要したが、ビートをとるのに十分な精度で疑似信号を発生させることに成功した。なお、原因は不明であるが、1 日に 1, 2 回直達波を検出できないことがある。

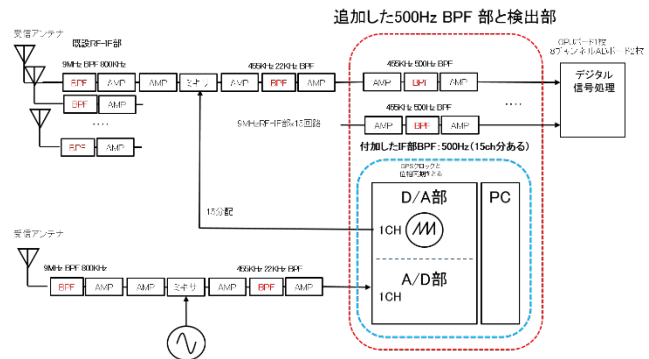


図 2. バイスタティックレーダシステムの構成。赤枠の部分が今年度開発したビートダウンに関わる部分である。

図 3 にビートダウン導入後に対馬局で観測されたドップラースペクトルの例を示す。図 3 のスペクトルは目標としていた対馬局から 150km 地点および 170km 地点のものである。対馬から 152km では約 10dB、171km では約 8dB のスペクトルピークが見られる。これらの場所は山陰沖の陸棚斜面域にあたり、対馬暖流第二分枝が存在するとされる海域である。図 3 のようなスペクトルピークはほとんどのデータで認められることから、本システムにより対馬暖流第二分枝の変動をとらえることができると言える。

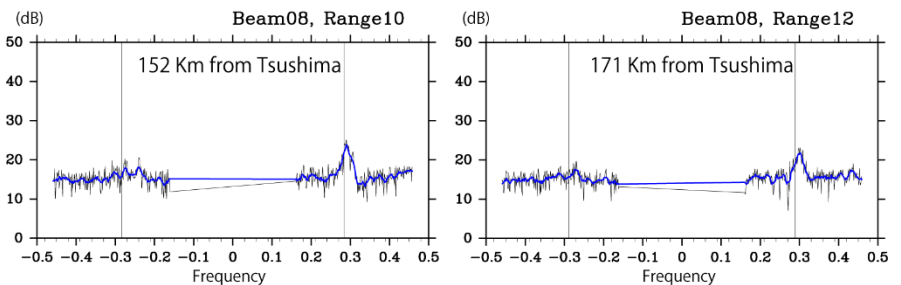


図 3. 対馬局から 152km, 171km 地点でのドップラースペクトル。縦の実線は重力波の位相速度に対応したドップラー周波数を示している。



## 観測塔と飛行体を利用した波浪及び水面計測

研究課題分野 地球環境  
 研究代表者氏名 早稲田卓爾 東京大学大学院・新領域創成科学研究科・准教授  
 応用力学研究所 所内世話人 氏名 市川 香  
 研究課題 観測塔と飛行体を利用した波浪及び水面計測

## 研究組織

早稲田卓爾	東京大学大学院	教授	代表者
稲津大祐	東京大学	特任准教授	実験補助
遠藤貴洋	東京大学	特任准教授	実験補助
藤本航	東京大学大学院	博士後期 1 年	実験補助
北祐樹	東京大学大学院	博士前期 1 年	実験補助
鈴木直弥	近畿大学	准教授	実験補助
田村仁	港湾空港研	研究員	実験実施

## 研究目的：

文部科学省国家課題対応型研究開発推進事業における、宇宙航空科学技術推進委託費に採択されている研究プロジェクトでは、H27 年度より GNSS-R を利用した波浪、高度、風速計測を東京大学は平塚沖総合実験タワーで開始した。観測研究には、波浪と海面水位の現場観測が必要となる。応力研は、現場での観測の経験が豊富であり、計測機器も揃っている。一方、東京大学は平塚沖総合実験タワーを維持管理している。

共同研究を行うことにより、現場での集中観測が実現する。

## 研究成果：

平成 27 年度に開始した東京大学平塚沖総合実験タワー (<http://157.82.157.148/oa/>) における、GNSS (GPS など) の直接波および反射波の計測を継続し、波高計アレイによる海面波形勾配平均値 (Mean Square Slope)、波浪方向スペクトル、風速等、Sea Truth 計測を行った。また、GNSS-R 長期計測を継続し、データベースを構築した。



図： 左から、平塚塔に設置した波浪計アウトリガーと風速計、屋上に設置した GNSS-R 受信アンテナ、屋上に設置した風速計

以上

## マルチコプターを用いた海上気象の観測

富田裕之（名古屋大学・宇宙地球環境研究所）

### 1. はじめに

海上気温、湿度、風速などの海上気象要素の現場観測は、大気の状態を把握するためのみならず、大気海洋の間のエネルギー収支や大気海洋相互作用の実態を把握するために重要な海面フラックスの推定にも必要不可欠である。現在は係留ブイ、観測塔、または船舶などの観測プラットフォームで観測が行われているが、必ずしも十分でない。一方、近年ではマルチコプターをはじめとする無人機の技術発展と普及がめざましく、気象学や海洋学においての利用にも大きな可能性がある。本研究では、マルチコプターを利用して海上気象要素（特に気温と湿度）の観測を実施し、海洋学、気象学においての利用可能性を検討することを大きな目的とする。研究の最初のステップとして、データ取得方法について検討し、マルチコプターによって取得されるデータの特性の理解を試みた。

### 2. 使用機器・方法

使用したマルチコプターは DJI 社の Phantom 2（以下 P2）である。機体重量は、xxx で、標準のバッテリーを用いておよそ 10~20 分程度の連続飛行が可能である。実際の飛行時間は、気象条件、搭載する物体の重量に大きく依存する。気象要素の情報を得るセンサーとして、数種類の気温、湿度計を検討した。仕様として、単体でデータをロギング可能な機能を備え、小型軽量で、防水、検定が可能などの点を考慮して Fujita 社の KT295F を使用した。観測精度は、カタログに記載されている情報として、気温について 0.3°C、湿度については 5% である。予備実験として実施した高精度の観測ができるバイサラ社の WXT520 との比較で、概ねカタログ精度と同等の観測性能を示した。また複数のセンサーの差も、誤差の範囲内で一致していることを確認した。

マルチコプターへのセンサーの設置可能スペースは限られている。P2 の場合、カメラが本体の下部に搭載されており取り外しはできない。バッテリー下部、脚部に設置が可能なスペースがある。バッテリー下部は日射の影響を受けにくいだが、バッテリーの発熱の影響があり得る。脚部は日射の影響を受ける可能性がある。

本研究では、まずリファレンスデータを取得しやすい地上数 m までの飛行により地上付近のデータの取得のための実験を行った。まずは日射の影響を受けにくい日陰のサイトで実施し、センサーの設置場所は、バッテリー下部のスペースと、一部のフライトでは脚部に設置した。実施場所は、屋内と屋外の両方で実施した。

### 3. 結果

図1に、マルチコプター搭載の温湿度センサーと地上に配置したセンサーとで取得した気温データの比較結果を分散分布図として示す。両者の関係は概ね良好で、マルチコプター搭載のセンサーで気温を観測できていることが分かる。バッテリーの発熱による観測への影響は見られない。一方、灰色で示すプロットは、P2の脚部にセンサーを取り付けたフライトで得たデータであり、このフライトでのデータにはマルチコプターと地上に配置したセンサーとの間に大きな差が見られる。日射の影響や、ローターによる上空の空気の巻き込みの影響などが考えられる。

### 4. まとめと今後

本研究ではマルチコプターによる海上気象要素の観測のためのテストとして、実際にマルチコプターに搭載したセンサーと地上センサーで得られた観測の比較から、観測の特性について検討した。マルチコプターで観測を行う場合、日射の影響が少なく、ローターによる影響を受けにくい場所を選定する必要がある。

## 高精度容量式波高計による海表面計測システムの開発

港湾空港技術研究所 田村 仁

## 1. 研究目的

散乱計や合成開口レーダ、また近年注目を集める測位衛星を利用した GNSS-R は人工衛星から発信したマイクロ波信号が海面や地表面で反射することを応用したリモートセンシングで、海面上の風、波、流れなど様々な物理現象を可視化する。これらの衛星リモートセンシングは直接的には波長数十 cm 程度の海表面の高波数スペクトル成分に関連する物理量を観測するため、より精度の高い海表面パラメータの推定には、実海域における「さざ波」の物理現象を解明することが重要なポイントとなる。しかしながら、卓越する風波（波高：メートルオーダー）の上に乗る極微小のさざ波（波高：ミリメートルオーダー）を現場海域で直接観測することはきわめて困難であり衛星データの工学的利用への大きな障壁となっている。本研究では高波数スペクトルを観測可能な計測システムの開発を行い、神奈川県平塚海洋観測タワーおよび琵琶湖安曇川沖総合自動観測所において波浪観測を行った。その結果、波数10-20(rad/m)の短波重力波領域までの波浪を計測可能であることを示した。

## 2. 研究内容

容量式波高計を高密度に配置し高精度波数スペクトル推定するための観測システム開発を行い、相模湾平塚沖および琵琶湖において現地観測を行った。観測期間および計測条件などは表1の通りである。

表1 波高計による現地観測概要

	琵琶湖観測	平塚夏季観測	平塚冬季観測
設置期間	2016/3/28-4/27	2016/6/8-8/10	2017/1/17-27
サンプリング周波数	50Hz	50Hz	20Hz
計測時間	30min	30min	30mins
データ取得数	1010	3017	400

ここでは得られた観測結果のうち、平塚冬季観測の結果を示す。波高計センサー上部の海面高度 2m に取り付けられた風速は観測期間中およそ 1-12m/s であり、風向に関しては冬季の気圧配置から北寄りの風が卓越していた。一方、海象場（図1）に関しては最大で 1.5m の有義波高が観測されている。観測期間中、データ欠損期間（例えば Yday22 および 23）が確認されるが、高波浪および満潮時により波高計センサー長 3m の物理的な上限を超えたことによる。以上の結果から観測期間中は比較的広範囲の気象海象場をカバーしていたと確認できる。

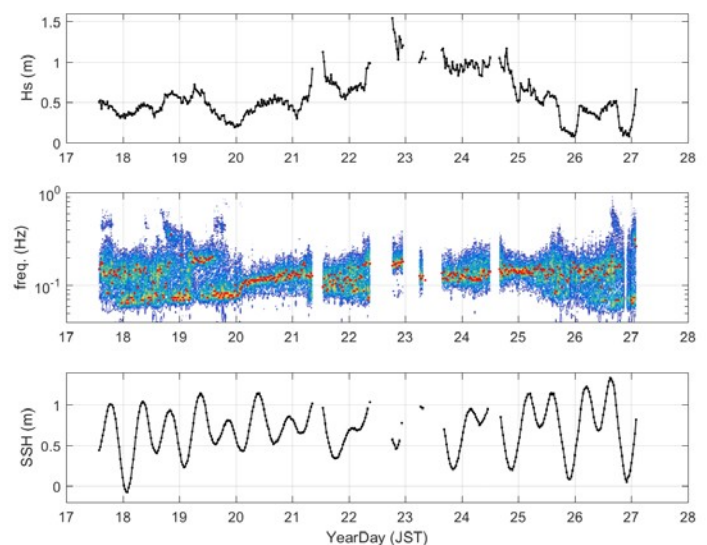


図1 観測期間中の海象時系列データ  
(上段：有義波高，中段：周波数スペクトル，下段：平均海面)

短波重力波領域の波浪（さざ波）に対する波数スペクトル推定には線形分散関係式を仮定した周波数領域から波数領域への変数変換は適用できない。つまり、線形分散関係

$$\sigma^2 = (g + \gamma k^2)k \quad (1)$$

および、周波数ドップラーシフト条件:  $\omega = \sigma + \mathbf{k} \cdot \mathbf{U}$ から

$$F(k, \theta) = \frac{c_g}{2\pi} \left( 1 + \frac{\mathbf{k} \cdot \mathbf{U}}{kc_g} \right) F(\omega, \theta) \quad (2)$$

が得られる。一般的に、流速  $\mathbf{U}$  は長周期波や一般流を含んでいるためどう評価するか不明瞭で短波重力波領域の波数スペクトル推定に適用はできない。そのため本研究では Donelan et al (1996)による wavelet directional method (WDM)を用いた。これは wavelet 変換から得られる時々刻々の波浪振幅、波数、方向から直接的に波数スペクトルを推定する手法である。

図2に WDM によって得られた 1 次元波数スペクトル（黒線）を示す。またここでは FFT から得られる周波数スペクトルに対し、式 (2) および流速をゼロと仮定して得られる波数スペクトル（グレー）も比較のために示す。ピークスペクトル周辺 ( $k \sim 0.05 \text{ rad/m}$ ) では、FFT ベースの波数スペクトルは、WDM による直接推定値と同様な値および形状になるものの、高波数側 ( $k > 3 \text{ rad/m}$ ) では明らかに過大評価をしている結果となっている。さらに高波数スペクトル ( $k = 10 \text{ rad/m}$ ) の平均波向きが海上風向に概ね対応していることが確認できることから（図3）開発を行った波高計センサーおよび解析手法の妥当性が確認される。

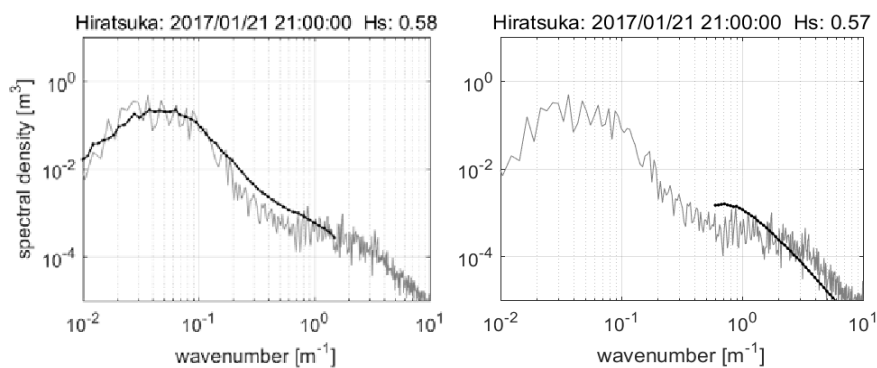


図2 1次元波数スペクトル

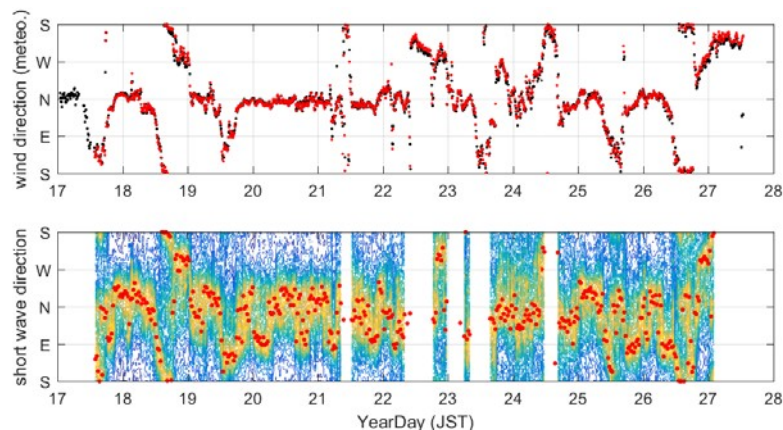


図3 短波重力波の方向スペクトル時間発展（上段：風向，下段：方向スペクトル）

研究組織

研究代表者	港湾空港技術研究所	田村 仁	研究員
所内世話役人	九州大学応用力学研究所	市川 香	准教授
研究協力者	近畿大学	鈴木 直哉	准教授

発表論文及び学会発表無し

## 波浪境界層中間 LES モデルの開発にむけた基礎データ取得のための風洞水槽実験

相木秀則 (名古屋大学 宇宙地球環境研究所)

## はじめに

台風シミュレーション研究において最近では大気・海洋・波浪結合領域モデルがよく使われている(相木 他, 2015)。大気海洋間フラックスのバルク式を高度化するために「風洞水槽実験」、「海上波浪観測」、「気液連続LES数値実験」のような基礎研究が行われてきた。この成果を引き継ぎ、時代の変化に即した学際連携・分野開拓を目指す事が本研究の目的である。特に本共同利用研究では波浪境界層(水深10mから海上100mまでの領域)における渦・波・物質輸送の動態のメカニズムの考察を発展させるとともに、波浪境界層に関する実験教育・社会還元のような啓蒙活動のあり方を探求する。実のところ、波浪境界層に関する学問発展は理学・工学・環境学の狭間にあり、単一学会(コミュニティ)としての基盤形成が難しいという性質があるが、応用展開については多岐にわたるアプローチが期待されている(下図参照)。

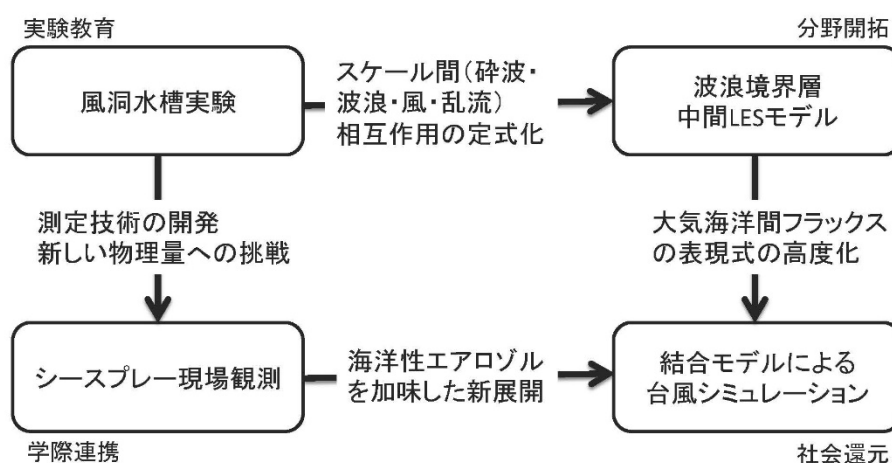


図1: 代表者が展開・計画している波浪境界層関連研究の模式図

## 本研究のアプローチ1: 波浪境界層中間LESモデルの開発のための風洞水槽実験

波浪境界層の素過程(波動力学・乱流混合・物質輸送・大気海洋間フラックス)の考察を発展させるには、1つのLES数値モデルで気側と水側の流体運動を連続的に再現し、統合解析する事が重要である。しかし、従来の土木・機械工学分野のLESでは時空間スケールが小さすぎる。また従来の大気・海洋分野のLESでは水面波の位相変化を陽に解く事ができないという問題がある。そこで本研究では、鉛直ストレッチ格子と水平1m程度の格子を使って、グリッドスケールの水面波は位相変化も含めて陽に解き、サブグリッドスケールの水面波は従来型のエネルギースペクトルモデルを使って統計的に解くという「波浪境界層に

ついでに新しい中間スケール解法」を開拓する事を目指している。WAVEWATCH のようなエネルギースペクトルモデルには砕波によるエネルギー消散のバルク式が入っているが、(上記の中間 LES モデルを組み上げるには砕波の位相情報を付加する必要がある。そこで本共同利用研究では、応力研・風洞付内部波水槽 (全長 17m) を用いて風速 5 ~ 15 m/s の範囲において、100Hz の波高測定とビデオ撮影を行い、この結果を基礎データセットとして、位相関係を詳細に解析できるようにした。

#### 本研究のアプローチ 2 : シースプレー測器の開発のための風洞水槽実験

波浪境界層における物質輸送の動態を明らかにする研究の一環として本共同利用研究代表者は、海上観測プラットフォーム (係留ブイ・海上観測塔) のような強風・塩水飛沫にさらされる環境下において、シースプレーの粒径別個数の時系列を計測できるような測器の実用化を並行して目指している。シースプレー観測は国内ではあまり行われていないが、海洋性エアロゾルの生成源の理解および、衛星や地上ライダー観測による対流圏のエアロゾル分布と雲物理の関係解明 (大気化学分野) との連携において重要である。このシースプレー測器は、風波の一つ一つの砕波による空気中の粒子数変化や水面波との位相関係を調べる事ができるように 3 軸加速度センサーを内蔵している。本共同利用研究においてはこの 3 軸加速度センサーに関する基礎データを取得するために、応力研・海洋環境シミュレーション水槽 (全長 54m) を用いてプランジャー造波による不規則波測定実験を行った。水面に浮かべた加速度センサー筐体を係留する場合と漂流させる場合を比較した。

#### 応用力学研究所・風洞水槽施設・利用日

2016年9月29-30日、2017年2月28日 : 計3日間 (担当 : 油布・石橋)

#### 本共同利用研究に関する発表

相木秀則 (名大) ・根田昌典 (京大) ・田中潔 (東大) ・久島萌人 (名大) ・油布 圭 (九大) ,  
シースプレー測器による海上観測計画 : 海面砕波と海洋性エアロゾル生成の時空間構造を捉える, JpGU-AGU 合同大会, M-IS15, 2017 年 5 月 24 日 (予定 : 幕張)

#### 参考文献

相木秀則ほか : 大気海洋波浪結合モデルの開発と台風実験への応用, 沿岸海洋研究, 52, 139-148, 2015

## 「日本海及び日本周辺海域における環境急変現象（急潮）のモニタリング、モデリング及びメカニズム解明に関する研究集会」報告

研究代表者：井桁 庸介（水研機構日水研）

本研究集会は、2016年8月4日から5日にかけて、九州大学筑紫キャンパス応用力学研究所東アジア海洋大気環境研究センターにおいて開催された。この会合は今回が2回目の開催であり、モニタリング・急潮予報業務等を実務とする水産試験研究機関の担当者と、海洋物理学的な研究を継続してきた研究者とが議論することを目指したものである。

大学および試験研究機関を中心に、両日とも38名が参加し、合計15件の講演があった（講演内容はプログラム参照）。一題あたり、質疑応答含む25分という十分な時間を割いたため、非常に活発な議論が行われ、時には講演時間を超過することもあった。

今回は、日本海に関する発表が8題、太平洋沿岸～東シナ海沿岸に関する発表が7題と、日本全国で実施されているモニタリング・モデリングに関する発表がなされた。沿岸で起きる短期的な環境変動に関わる、物理・生物・水産的な応答に関する数多くの講演がなされ、活発な議論が交わされた。モニタリングデータを手にする水産試験研究機関の担当者にとっては、自身の持つデータの解析方針や手法等を学ぶ良い機会になったようだ。気象擾乱・河川の大規模出水に対する沿岸水の短周期応答への、水産資源・一次生産の応答を把握する試み等、海洋物理学的な知見を基盤にした応用的な研究についての発表がなされ、今後の発展が期待された。

また、水産試験研究機関におけるモニタリング体制の紹介や、観測計画等の紹介もあり、各府県におけるモニタリングの現状等について共通認識を形成することが出来た。そのような情報共有に基づき、参加者同士の懇親を深めた結果、データを通じた共同研究へ発展した事例もあった。今後も、このような議論を継続することで、新たな研究シーズの創出が見込まれると感じられた。

沿岸・短周期変動をキーワードに参加者の募集を行い、研究者の交流の場を作ることは重要である。今後は、生物、水産系にも積極的に間口を広げ、研究集会を出来るだけ継続することで、研究シーズの創出につながることを期待する。



## プログラム

---

8月4日(木)

13:10~13:20

趣旨説明

13:20~13:45

富山湾の平均的な流れと、冬型気圧配置(ブリ起こし)のイベント的な流れ

小塚 晃(富山水研)・辻俊宏・大慶則之(石川県水産総合センター)・千手智晴・広瀬直毅(九大応力研)

13:45~14:10

富山湾における近慣性内部波の伝播

久賀みづき・井桁庸介(水産機構日水研)・広瀬直毅(九大応力研)

14:10~14:35

発生域と伝播経路の違いによる近慣性周期波動の増幅海域の変化

山崎恵市(水産機構中央水研)・北出裕二郎(海洋大)・井桁庸介(水産機構日水研)・熊木豊(京都府農林水産技術センター)・渡邊達郎(水産機構日水研)・清水勇吾(水産機構中央水研)

14:35~15:00

富山湾周辺における対馬暖流沿岸分枝の流路遷移

井桁庸介(水産機構日水研)・福留研一(富山高専)・Alexander Yankovsky(USC)・池田 怜(新潟水海研)・大慶則之(石川県水産総合センター)・鮎川 航太(福井水試)・兼田淳史(福井県立大)・渡邊達郎(水産機構日水研)

15:00~15:10 休憩

15:10~15:35

能登・佐渡沿岸域の流れ場の変動

和川 拓・井桁庸介(水産機構日水研)・池田 怜(新潟水海研)・福留研一(富山高専)

15:35~16:00

千葉県外房沿岸域の急潮について

小林 豊(千葉県水産総合研究センター)

16:00~16:25

室戸岬東沿岸の定置網周辺における潮流の解析

猪原 亮(高知水試)

16:25~16:50

日向灘における流況変動特性

渡慶次 力 (宮崎水試)

16:50~17:15

日本海沿岸帯域海況予測モデルの西方拡大

広瀬直毅 (九大応力研)

8月5日 (金)

9:00~9:25

若狭湾急潮発生時における対馬暖流沿岸分枝の時空間変化

福留研一 (富山高専)・井桁庸介 (水産機構日水研)・熊木豊 (京都府農技セ)

9:25~9:50

京都府における近年の急潮対策

船越裕紀、上野陽一郎 (京都府水技センター)

9:50~10:15

若狭湾における急潮モニタリングと情報提供について

鮎川航太 (福井県水産試験場)

10:15~10:25

休憩

10:25~10:50

駿河湾の急潮 -流動モニタリング-

勝間田高明・仁木将人・田中昭彦・萩原直樹 (東海大海洋)

10:50~11:15

駿河湾の急潮-栄養塩とプランクトン

萩原直樹、勝間田高明、田中 昭彦、仁木 将人 (東海大海洋)

11:15~11:40

トカラ海峡で観測された黒潮を反転させるほどの強流現象について

千手智晴・松野 健・堤 英輔・Keunjong Lee (九大応力研)・中村啓彦・仁科文子 (鹿大水産)・

郭 新宇 (CEMES)・長谷川大介 (水産機構東北水研)

11:40~12:00

総合討論

## 「日本海及び日本周辺海域の海況モニタリングと波浪計測に関する研究集会」報告

研究代表者：万田敦昌（三重大学）

2016年12月15日から16日にかけて、九州大学筑紫キャンパス応用力学研究所東アジア海洋大気環境研究センターにおいて、「日本海及び日本周辺海域の海況モニタリングと波浪計測に関する研究集会」が開催された。今回は、大学および試験研究機関を中心に約40名が参加し、合計12件の講演があった（講演内容は下記プログラム参照）。一題あたり、質疑応答含む25分という十分な時間を割いたため、非常に活発な議論が行われ、時には講演時間を超過することもあった。

例年に違わず、日本海及び日本周辺海域に関する最新のモニタリング結果と数多くの斬新な研究成果が発表され、講演者だけでなく参加者全員にとって有意義な会合となった。それに加え今回は、海況モニタリングに関する講演だけでなく、数値シミュレーションやデータ同化といった、モニタリング結果を活用する側の講演も行われたことにより、データの相互比較やデータの有効利用といった観点からも非常に活発な議論が交わされ、参加者の情報交換・交流といった観点からも実り多い会合となった。

今後とも、観測データに基づいたモニタリングやモニタリング結果を活用した様々な手法により、日本周辺海域の海況・波浪の研究に携わる研究者・関係者が一堂に会する集会になることを期待する。最後に、本研究集会の開催を承諾して頂いた九州大学応用力学研究所、集会を開催するにあたりお世話いただいた東アジア海洋大気環境研究センターの広瀬直毅教授をはじめとする関係各位に深甚なる謝意を表す。

## 日本海及び日本周辺海域の海況モニタリングと波浪計測に関する研究集会

[日時]

2016年12月15日（木）～ 12月16日（金）

[場所]

九州大学応用力学研究所6階多目的交流室(W601)

[研究代表者]

万田 敦昌（三重大学）

[所内世話人]

広瀬 直毅（九州大学）

※ 本研究集会は12月14日午後～15日午前に開催されます。  
「海洋レーダに関する研究集会」（代表者：藤井智史（琉球大））に引き続き行われます。

## プログラム

12月15日(木)

13:30～13:40

### 趣旨説明

13:40～14:05

津軽海峡の過大なモデル流量を修正する方法

広瀬直毅・韓 修妍（九大応力研）

14:05～14:30

長門市青海島と萩市見島の水位差から見積もられた対馬暖流沿岸分枝の変動

滝川哲太郎（長崎大院水産・環境），渡辺俊輝（山口水研セ），千手智晴（九大応力研），森本昭彦（愛媛大沿岸セ）

14:30～14:55

日本海表層貯熱量の十年規模変動

碓氷典久，広瀬成章，豊田隆寛，藤井陽介，高槻靖，倉賀野連

休憩

15:10～15:35

2010年以降の日本海盆における日本海固有水の水温と溶存酸素の変化について  
中野俊也（気象庁）

15:35～16:00

100年後の日本海水温・生態系予測

高山勝巳・広瀬直毅・吉田尚郁（九大応力研）

16:00～16:25

日本海における春季植物プランクトン現存量の時空間変化とその要因

伊藤雅・児玉武俊・和川拓・井桁庸介（水研機構日水研）

休憩

16:40～17:05

北西太平洋高解像度日別海面水温解析(HI MSST)の概要紹介

八川操規（気象庁海洋気象課日本海海洋気象センター），菅野能明・小司晶子・平原幹俊・桜井敏之・木村未夏・佐藤克成・小林健作・小林熙（海洋気象課海 洋気象情報室）

（懇親会）

12月16日(金)

9:30 ~ 9:55

短波海洋レーダによる宗谷暖流の観測と対馬暖流系の季節・経年変動

江淵直人・大島慶一郎・深町康(北大低温研), 清水大輔(極地研), 森島秀太(元北大低温研), 柏瀬陽彦(北大低温研)

9:55 ~ 10:20

自律型海洋観測装置(AOV)を用いた日本周辺の海況モニタリングの開始

西村一星・増田貴仁・土屋主悦・糸井洋人・加藤弘紀(海上保安庁海洋情報部)

10:20 ~ 10:45

日本海の前線近傍における水中グライダー観測

和川拓・井桁庸介・本多直人(水研機構日水研)

休憩

11:00 ~ 11:25

High-resolution modeling of Kuroshio for the ocean current energy estimation in the Takara Strait

Bin Wang (Hohai Univ.), Tianran Liu, Naoki Hirose (RIAM, Kyushu Univ.), Toru Yamashiro (Kagoshima Univ.)

11:25 ~ 11:50

強い逆流が風波の発達に及ぼす効果—異常波浪の発生原因の一つ—

水野偏二郎(元九大応力研)

11:50 ~ 12:10

総合討論

## アジア域の化学輸送モデルの現状と今後の展開に関する研究集会

国立環境研究所 森野 悠

## 1. 目的

応用力学研究所の大気環境モデリング研究グループは、世界的に見てもアクティブに研究を進める研究グループの一つであり、モデル研究と平行して、3波長のレーザーレーダーを導入して黄砂と大気汚染粒子の同時計測を開始している。福岡は特にアジア起源の黄砂・大気汚染の影響が深刻な地域であり、応力研グループによる数値モデルと観測データを統合した解析や、多波長データ同化による黄砂の粒径分布の推定は、未だ十分に明らかにされていない大気中黄砂やエアロゾルの物理特性に関する科学的ブレークスルーをもたらすとして、国内外から大きく期待されている。応力研以外の研究グループにより推し進められている最前線の知見を、アジア域の化学輸送モデル研究のコミュニティで共有すると共に、各分野がリンクし新たなブレークスルーを生む機会を設けることは、アジア域の化学輸送モデル研究の推進やモデルの精緻化にとって非常に重要である。

## 2. 研究集会の概要

場所 九州大学応用力学研究所 W601 多目的研究交流室

日時 平成28年12月2日 13:30-18:00、3日8:40-12:45

## 3. 研究成果

研究集会では、国内の化学輸送モデルを用いた大気環境モデリングに関わる幅広い専門家が数多く集まり、18題の講演発表があった。関係者を含めると40名程度の参加があった。2日間の研究集会の内容としては、「モデル研究と連携する野外観測」、「大気汚染質の排出量の推計とソースリセプター解析」、「領域化学輸送モデルを用いた越境大気汚染の現状と問題点」、「データ同化モデルを用いたPM<sub>2.5</sub>とAODの研究の進展」、「今後の大気観測とモデリングの展望」などの最新の成果の報告され、本研究会が化学輸送モデルを用いた大気環境モデリングのコミュニティにおいて大きな貢献を果たしていくことが期待できる。

以下に研究集会のプログラムを掲載する。

## 資料1

「アジア域の化学輸送モデルの現状と今後の展開に関する研究集会」

場所 九州大学応用力学研究所 W601 多目的研究交流室

日時 平成28年12月2日 13:30-18:00、 3日8:40-12:45

## プログラム

### 12月2日

13:30 - 13:40 研究集会趣旨説明 森野悠、鶴野伊津志

13:40 - 15:40

櫻井 達也(明星大学) : 観測及びモデル解析に基づく大気アンモニアの動態解析

速水 洋(電力中央研究所) : 真瀬フラックスサイトにおける硝酸エアロゾル鉛直濃度勾配の観測

Wei Hu(熊本県立大学) : Insights into a dust event transported through Beijing in spring 2012:

Morphology, chemical composition and impact on surface aerosols

早崎 将光(国立環境研) : PM 広域高濃度と気温逆転層

15:20-15:40 休憩

15:40 - 18:00

Ying Li(国立環境研) : Global maps and altitude profiles of particle phase state in atmospheric secondary organic aerosols.

堀江洋佑(兵庫県環境研究センター) : WRF-CMAQによるPM2.5の発生源解析

浦西克雄(大阪大学) : PMF及びCMAQによるPM2.5の発生源解析-2013年度 東海・近畿地方

小松宏昭(神奈川県)、化学輸送モデルを用いたPM2.5の発生源寄与解析

嶋寺 光(大阪大学) : WRF-CMAQによる高濃度PM2.5予測に対する各種設定条件の影響

### 12月3日

8:40 - 10:30

板橋 秀一(電力中央研究所) : 化学輸送モデルを用いたアジア域の窒素化合物の沈着量推計

Wang Zhe(王哲)(九大応力研) : Modeling study of wintertime LRT of air pollutants in East Asia with NAQPMS and CMAQ

鶴野 伊津志(九州大学) : GEOS CHEMを用いたPM2.5越境汚染のソースリセプター解析

森野 悠(国立環境研) : 有機エアロゾルの揮発特性のモデリング

10:20-10:40 休憩

10:40 - 12:45

原 政之(埼玉県環境科学国際センター) : 領域気象モデルの境界条件による大気環境シミュレーションの不確実性の評価

茶谷 聡(国立環境研) : 客観解析の違いによるインド大気質予測への影響

山地 一代(神戸大学) : モデル間相互比較 J-STREAM の紹介とお誘い

弓本 桂也(気象研究所) : 気象庁・気象研におけるエアロゾルデータ同化-同化予測システムと再解析プロダクト-

森川 多津子(日本自動車研究所) : JATOPにおける大気質モデル予測精度向上の取組み

共同利用研究集会  
「海洋乱流の観測およびモデリング研究」  
“Workshop for observational and modeling studies of ocean turbulence”

京都大学大学院 理学研究科 准教授 吉川 裕  
九州大学 応用力学研究所 教授 松野 健

## 1. 目的と経緯

地球温暖化や海洋酸性化など、緩やかではあるが持続的な環境変化に果たす海洋の役割は大きい。海洋の役割を正しく評価し、気候を精度よく予測するために、海洋モデルや大気海洋結合モデルの高精度化が取り組まれているが、十分な予測信頼性を得るには至っていない。海面境界過程や混合過程にかかわる海洋乱流現象が十分に解明されていないことが、その原因の一つである。

本研究集会では、上記の問題解決を見据え、海洋乱流の観測やモデリングなどに携わる研究者が集い研究成果を発表することで、互いの知識や疑問点を共有し、海洋乱流現象の理解を深めるとともに、今後の研究の展開を模索することを主眼としている。2010年度より共同研究として開始したが、研究集会のスタイルが定着してきたことを踏まえ、本年度より研究集会の枠で申請し採択された。

## 2. 研究集会の概要

今年度は2017年1月5~6日に応用力学研究所で開催した。出席者数は記帳に基づく19名（九大8、東大4、京大3、北大、東北大、延世大（韓国）、水産工学研究所それぞれ1）であった。プログラムの詳細は最後に記す。

最初の講演では、東京大学の永井がインドネシア多島海における水塊変質過程に関する数値実験結果について報告を行った。多島海での複雑な地形による潮汐混合により、インドネシア通過流が太平洋からインド洋へ運ぶ海水の水質は大きく変化すると考えられているが、その詳細は不明であった。そこで潮汐混合を陽に再現する数値実験を行い、多島海での海水の変質過程を定量的に調べた。その結果、潮汐混合が確かに水質を変化させていることを確認するだけでなく、サブメソスケール規模の水平渦が引き起こす水平混合も変質過程に重要であることを示す貴重な結果を得た。次に東京大学の貫は、P S I と呼ばれる内部波の非線形相互作用に着目し、そのメカニズムと現実の太平洋で混合に果たす役割について報告を行った。初めに理想化された数値実験を行い、P S I が内部波の3波共鳴過程を通じて大きなスケールの内部波からより小さな内部波へとエネルギーをカスケードさせるプロセスであることを分かりやすく説明した。次にそのようなP S I により引き起こされる鉛直混合強度を見積もるため、内部波の鉛直構造を考慮した新たな非線形共鳴の計算式を導入し、内部潮汐の減衰率を計算した。その結果、減衰率はP S I の臨界緯度付近で最大となることなど観測と整合的な結果を得るとともに、内部波の鉛直構造に応じた減衰率の構造を理論的に提案することに成功した。次に東北大学の山口は、北太平洋の季節躍層内の水温構造と鉛直拡散に着目した観測データ解析を報告した。混合層下への熱の鉛直輸送を、Argo フロートが取得した水温の鉛直構造から定量評価し、その空間構造を明らかにした。次に混合層内の熱収支解析を行い鉛直拡散の強さの分布を見積もったところ、その分布は熱の鉛直輸送の分布に概ね対応すること、さらに鉛直拡散が混合層下への熱輸送の40%程度を担うことを明らかにした。



休憩を挟んで行われた京都大学の牛島の発表では、日変化する海面熱フラックスが海洋混合層深度に与える影響に関する数値実験について報告された。乱流を精度よく再現するLESを行うことで、海面加熱期の風成混合による混合層深化過程に、日変化する海面熱フラックスが与える影響を調べたところ、低緯度においては、日変化のある場合には無い場合に比べて混合層深度は深くなるが、高緯度においてその逆に浅くなることを示した。さらにそのメカニズムを単純なシルク模型で説明するとともに、海面水温に有意な影響を与え得ることも示し、気候への影響についても議論した。次に水産工学研究所の古市は、夏期の東シナ海における乱流強度の現場観測とそのスケージングに関する報告を行った。これまでに得られた乱流強度の直接観測結果を、海底混合層と中層に分けてまとめることで、それぞれの領域での乱流強度の既存のスケージングを検証し、その修正などを行った。その結果、観測とより良く一致するスケージングを得ることができた。

二日目の最初の講演は、京都大学の萬年から、海洋中の沈降粒子の平均的な沈降速度に対する乱流の影響に関する数値実験結果が報告された。粒子の慣性が無い場合において、乱流が沈降速度に与える影響を体系的に明らかにするため、理想化された状況で実験を行いその影響を整理した結果、乱流の時空間変動が十分に大きい場合には、乱流は海面から沈降し始める粒子の平均沈降速度に影響を与えないが、混合層内部から沈降する粒子には沈降速度を減速させる効果がみられた。さらにこの効果を2次元流の運動学的性質から説明した。次に韓国の延世大学の魯(Noh)は、自然界における多粒子流体に関する総説的な講演を行った。初めに、海洋混合層における乱流は植物プランクトンなどの粒子をより多く混合層内に留める効果があること、ラングミュア循環と呼ばれる乱流はその効果がより顕著であることなどが報告された。次に粒子が流体の密度を変化させることによる影響に関する室内実験、数値実験結果の紹介がなされた。最後に雲中の雨滴粒子成長と沈降、雲の発達と降雨に関する最新のシミュレーション結果について紹介がなされた。

休憩を挟んで行われた北海道大学の松村の発表では、乱流中の流体粒子分布が流体運動に与える影響を陽に表現した最新の数値モデルを用いて、氷河からの濁った融解水がフィヨルド内を3次的に輸送される現象のシミュレーションについて報告がなされた。融解水は初期には懸濁物を取り込んで流れるが、やがて速度が減じると懸濁物は沈降し堆積する一方で、(もともと低塩分なため軽い)融解水は湧昇すること、このような融解水に伴って生じる濁度が最大となる層は亜表層にみられること、 $10\mu\text{m}$ より小さい懸濁粒子のみが10kmより遠方に輸送されうること、などが再現されたとの報告がなされた。最後に九州大学の堤は、トカラ海峡で観測された黒潮流軸付近での強い乱流混合について報告を行った。トカラ海峡内にある海山周辺では鉛直拡散係数にして $0.1\text{m}^2/\text{s}$ にも達する強い鉛直混合が生じていることが明らかとなり、有光層への栄養塩供給過程の一つとして重要である可能性が明らかになった。

### 3. おわりに。

以上の話題提供とその後に行われた質疑応答や議論は、予定を大幅に超えて活発に行われた。また、これまでの断片的な知識の整理や、今後の研究の方向性を考える上で非常に有意義なものであった。今回も、研究を始めたばかりの院生からその道のトップランナーである年長者まで幅広い年代の参加者による忌憚のない議論を可能とするこのような研究会が、海洋乱流のコミュニティーを形成・維持にも非常に有効であることが確認できた。この研究会は来年度も継続して進めることも確認された。

----- プログラム -----

2017年 1月 5日

13:30 -13:40 吉川裕 (京大理)

趣旨説明

13:40 - 14:20 永井平・日比谷紀之 (東大院理)

インドネシア通過流の水塊変成に関する数値的研究

14:20 - 15:00 大貫陽平・日比谷紀之 (東大院理)

海洋内部領域での潮汐混合に関わる非線形波動力学の研究

15:00 - 15:40 山口凌平・須賀利雄 (東北大院理)

Argo データによる季節躍層の鉛直構造と鉛直拡散との関係性について

15:40 - 16:00 休憩

16:00 - 16:40 牛島悠介・吉川裕 (京大院理)

熱フラックスの日周変動が海面加熱期の混合層に与える影響に関する研究

16:40 - 17:20 古市尚基 (水産機構水工研)・東博紀 (環境研)・他 4名

夏季の東シナ海における乱流強度の現場観測とスケーリング

2017年 1月 6日

09:00 - 09:40 萬年隆裕・吉川裕 (京大院理)

海洋混合層における粒子の平均沈降速度に関する数値実験

09:40 - 10:20 Yign Noh (Yonsei University)

Turbulent Particle-Laden Flows in Nature: from Plankton to Clouds

10:20 - 10:40 休憩

10:40 - 11:20 松村義正 (北大低温研)・漢那直也 (北大北極域研セ)・他 3名

グリーンランド氷河融解水の湧昇・エントレインメント過程が駆動するフィヨルド内の熱・物質循環

11:20 -12:00 堤英輔・松野健 (九大応力研)・他 7名

トカラ海峡の黒潮における乱流混合

12:00 - 12:30 総合討論

## 海洋・海岸における波動の解析モデルの展開

研究代表者 鹿児島大学学術研究院・理工学域 柿沼太郎

### 研究の目的

申請者らは、平成 20 年度より、九州大学応用力学研究所の共同利用研究として、内部波を含む海洋波動の非線形問題に関して継続して研究を行なってきた。この成果を踏まえ、様々な視点から海洋・海岸における波動問題に関する研究を行なっている研究者らとともに、平成 27 年度に、応用力学研究所共同利用研究集会を開催した。その際、質疑応答が大変活発に行なわれ、本研究集会の重要性が、参加者によって強く認識された。そこで、波動モデルに関する最新の研究成果を踏まえ、それぞれの波動現象に対して個別に開発されてきたモデルが有する、利点や問題点を議論することを目的として、平成 28 年度に、応用力学研究所共同利用研究集会を開催した。本研究集会による成果は、申請者らの今後の応用力学研究所の共同利用研究に活かされるのみならず、海洋学並びに海岸工学の両者の分野において、様々な波動問題に活用されるモデル開発のための、重要な基礎資料になると考えられる。

本研究組織は、本研究集会を経て有機的に連携し、それぞれのモデルが持つ利点や問題点を整理し、一つの統合的なモデルの開発を目指している。そのために、本研究集会では、海洋波動及び海岸波動の研究者のみならず、多相流体を含む様々な流体を対象とした数値モデルの開発者や、実験的に研究を進める研究者、そして、応用物理学者並びに数学者をその参加者に迎え入れ、多様な角度から流体の波動問題に関して議論した。

本研究集会は、海洋・海岸における波動をとりまく多彩な分野の研究者が、互いの情報を交換し、個々の研究の最前線やその拡がりを理解することで問題意識を共有するとともに、従来のモデルを俯瞰し、更なる発展や展開のためのアイデアを生み出す場となった。

### 研究集会の内容

本研究集会は、2016 年 12 月 17 日（土）午後～18 日（日）午前に、九州大学応用力学研究所の多目的交流室（W601）において開催された。なお、研究集会参加者の主メンバが土木学会海岸工学委員会波動モデル研究小委員会委員であったため、主催を土木学会海岸工学委員会とした。ただし、本委員のメンバは、九州大学応用力学研究所、大阪市立大学及び慶應義塾大学の、物理学、応用数学、並びに、数学の研究者を含んでおり、九州大学応用力学研究所で開催するに相応しい研究集会となった。参加者数は、第 1 日が 13 人、第 2 日が 11 人であった。すべての発表に対して、質疑応答が活発になされた。座長は、研究代表者が務めた。

まず、第 1 日の第 1 セッションにおいて、波動のシミュレーションに関する 2 件の口頭発表及び質疑応答が行なわれた。すなわち、鉛直積分型数値モデルの実際の港湾への適用と、3 次元数値モデルによる津波等の波動シミュレーションに関する発表がなされた。

次に、第 2 セッションでは、波動の数値解析法に焦点が当てられ、2 件の口頭発表及び質疑応答が行なわれた。すなわち、格子法と粒子法の両者を適用した構造流体連成解析と、コンパイル型言語とスクリプト言語の両者を用いた数値モデルによる波動解析に関して発表された。第 3 セッションは、多層と波動と銘打って、2 件の口頭発表及び質疑応答が行なわれた。すなわち、2 層流体における界面の非線形発展と、線形定常型の多層波動方程式に関する発表が行なわれた。

第 1 日には、懇親会が開催され、水の波に関する様々な対象をとりあげてきた理学・工学分野の研究者間で、忌憚のない議論が行なわれた。

そして、第2日の第4セッションでは、孤立波の解析に関して議論された。すなわち、Lattice Boltzmann Entropic Method を用いた非線形波動の数値解析と、表面波・内部波共存場における孤立波の数値解に関する、2件の口頭発表及び質疑応答が行なわれた。

更に、第5セッションでは、波動の数理に関して1件の口頭発表及び質疑応答があった。すなわち、水の波の変分構造と磯部-柿沼モデルに関する研究成果が論じられた。

以上の発表内容の概要を含む、本研究集会のプログラムを以下に示す。

## 九州大学応用力学研究所 共同利用研究集会

### 「海洋・海岸における波動の解析モデルの展開」

日 時 2016年12月17日(土)～18日(日)  
場 所 九州大学応用力学研究所 多目的交流室 (W601)  
主 催 土木学会海岸工学委員会

**2016年12月17日(土)**

**開会の挨拶 (13:00～13:10)**

柿沼太郎 (土木学会海岸工学委員会波動モデル研究小委員会委員長)

### 第1セッション -波動のシミュレーション-

「NOWT-PARI の反射・透過境界とそれを用いた港内静穏度解析」 (13:10～13:50)

平山克也 (海上・港湾・航空技術研究所・港湾空港技術研究所)

ブシネスク方程式を導出する過程で透水層内の流体抵抗則を考慮することにより、分散波の波エネルギーを効率的に減衰させる高次スポンジ層境界、及び消波ブロックによる波の任意反射を再現する透水層境界を開発した。本発表では、これらの概要とこれらを適用した波浪変形計算結果に基づく港内静穏度解析の事例等を紹介した。

「3次元数値流体力学ツール OpenFOAM による波動シミュレーション」 (13:50～14:30)

川崎浩司 (ハイドロソフト技術研究所・研究開発センター)

オープンソース数値流体力学ツール OpenFOAM と構造解析モデル SeanFEM を組み合わせた3次元流体-構造モデルについて説明した。そして、東北地方太平洋沖地震津波で被害があった小白浜漁港の防潮堤を対象に本モデルを適用し、被災メカニズムについて検討した。また、バーチャルリアリティ技術を活用した津波浸水動画についても紹介した。

### 第2セッション -波動の数値解析法-

「格子法と粒子法による構造流体連成解析について」(14:40～15:20)

陸田秀実 (広島大学大学院・工学研究院)

本発表では、格子法と粒子法を用いた構造流体連成問題における数理モデルの計算技術につ

いて紹介するとともに、格子法と粒子法の利点・欠点を相互補完する格子粒子ハイブリッド法の計算事例を紹介した。特に、津波、浮体、係留索、漂流物のすべてが連成する場合の力学的取り扱い方法について述べるとともに、その精度検証結果を説明した。

「z 座標 3 次元グリッドモデルによる波動解析の試み」 (15:20~16:00)

新谷哲也 (首都大学東京・都市環境学部)

コンパイル型言語の高速性とスクリプト言語の柔軟性を取り入れた 3 次元流体シミュレータ **Fantom Refined** を紹介し、特に局所高解像度化のアイデアについて詳しく説明した。波動問題への適用例として孤立波伝播、規則波の浅水変形を取り上げ、その再現精度について報告を行なった。

### 第 3 セッション – 多層と波動 –

「密度の異なった 2 層流体における界面の非線形発展 – 密度非一様性を伴った軸対称渦層の 3 次元発展」 (16:10~16:50)

松岡千博 (大阪市立大学大学院・工学研究科)

**Swirl** と呼ばれる軸対称流れが存在する場合としない場合の両方について密度の異なった 2 層流体における渦層の運動が調べられた。その結果、密度非一様性があると円筒型渦層の運動は、自動的に 3 次元化 (角方向の運動が存在) し、界面 (渦層) は、歪みを伴って巻き上がって回転運動をすることがわかった。また、重力を入れると軸方向に強い伸長効果が生じることが報告された。

「定常型の多層波動方程式について」 (16:50~17:30)

金山 進 (日本大学・工学部)

大規模な没水構造物化や水深が大きく変化する水域に対する静穏度計算へ適用すべく、**Radiation mode** および **Evanescence mode** の両者を評価できる周波数依存タイプの線形定常型の多層波動モデルについて検討した。従属変数の数を低減するため、従来、水位変動と各層の流速を対象としていたものを各層上端での鉛直流速に変更した。

### 懇親会

2016 年 12 月 18 日 (日)

### 第 4 セッション – 孤立波の解析 –

「Lattice Boltzmann entropic method による非線形波動の数値解析」 (10:00~

10:40) 辻 英一 (九州大学・応用力学研究所)

Lattice Boltzmann Method (LBM) の非線形波動モデル方程式への適用例として **Burgers** 方程式を例にとり解析した。Entropic Method を用いて定式化したスキームは、従来のものと比較して良い結果を与えること、特にその長所は、粘性が弱い場合により顕著になることが、明らかになった。

「表面波・内部波共存場の孤立波解」 (10:40～11:20)

柿沼太郎 (鹿児島大学学術研究院・理工学域)

変分原理に基づく、定常進行波を解とする非線形波動方程式系を基礎方程式系とし、自由水面を有する 2 層流体を対象として、表面波・内部波共存場における孤立波解を求めた。その際に、Newton-Raphson 法を適用して、孤立波の数値解を得た。そして、表面波モード及び内部波モードのそれぞれの表面孤立波及び内部孤立波の特性に関して調べた。

## 第 5 セッション – 波動の数理 –

「水の波の変分構造と磯部–柿沼モデル」 (11:30～12:10)

井口達雄 (慶應義塾大学・理工学部)

水の波の基礎方程式系は、変分構造を有している。そのラグランジアンを近似し、対応するオイラー–ラグランジュ方程式として磯部–柿沼モデルが導かれる。近似を変えることにより様々な磯部–柿沼モデルが得られるが、それらの線形分散関係式の間になり立つ関係について、特に浅水波近似という観点から報告した。

**総括及び今後の展望等に関する議論・閉会の挨拶** (12:10～12:40)

柿沼太郎

(共同利用研究集会)

## 非線形波動研究の深化と展開

研究代表者 京都大学情報学研究科 辻本 諭

## 研究集会の目的

近年、著しい発展を遂げてきた非線形波動の研究は、その源流ともいえる流体力学から始まり、様々な幅広い分野を取り込みながら、現在の社会基盤を支える重要な分野になるまでいたっている。非線形波動研究が発展していく過程において、理論研究と実験研究が密接に連携をとることを基礎に据えつつ、全く新しい分野との関連性を見いだすことで、非線形波動研究のさらなる発展を導いてきた。ここでの研究対象である非線形波動は、海洋や大気の流れ、物質やエネルギーの輸送などにおいて普遍的に現れる現象であり、その性質を理解し、また解析手法を発展させることは、地球環境を理解する上でも重要な役割を果たすと思われる。また、非線形波動研究の成果はその普遍性から、非線形現象の物理現象のみならず、生命動態、渋滞等の社会現象、情報学におけるアルゴリズムやネットワークなど、多種多様な分野に波及することになる。

本研究集会は、物理、数学、工学、情報などの多彩な分野から、現象論や数理的研究に関する研究発表を幅広く募り、最先端の研究に現れる種々の現象とその背後にある普遍的原理について様々な分野の立場から議論することで、非線形波動研究の深化とその新たな展開を目指す。「非線形波動」をとりまく様々な分野の研究者が互いの情報を交換し、個々の研究の最前線を理解することで、問題意識を共有するとともに、更なる発展や新しい展開を生み出す場を本研究集会によって提供したい。本研究集会の趣旨である、異分野の相互作用による研究の促進のためには、共同利用研究拠点である応用力学研究所での共同研究集会開催がふさわしいと考えられる。

なお、本研究集会は日本応用数理学会応用可積分系研究部会との共催であった。

## 成果の概要

本研究集会は、平成 28 年 11 月 3 日から 11 月 5 日までの 3 日間にわたり九州大学筑紫地区筑紫ホールにおいて開催され、特別講演 3 件と一般講演 27 件（口頭発表 13 件およびポスター発表 14 件）が行われた。

特別講演では、3 名の講演者を選定して依頼を行った。まず、離散数学に関する話題として、

- ZDD による組合せ集合の表現と列挙：基礎から応用へ

という講演が行われ、情報科学の分野で注目を集めている ZDD（ゼロサプレス型二分決定グラフ）の基礎および応用について研究動向も交えて紹介された。また、最近の海洋波の非線形相互作用に関する話題として、

- 海洋波の非線形相互作用と巨大波浪生成のメカニズム解明

という講演が行われ、巨大波の実際の観測から理論的考察に到るまで、興味深い解説がなされた。さらに、可積分な数理モデルに関する話題として、

- 可積分確率過程に現れる対称関数

という入門的講演が行われ、幅広い分野の研究者による多角的な議論が加えられた。これら特別講演の内容は、非線形現象およびそれを記述する数学モデルに関して、今後の研究の指針となるべき興味深い内容であった。

ポスターセッションを含む一般講演においては、可積分性を有するオートマトンとしての箱玉系の解析、偏微分方程式の数値計算に関する報告および、海洋上の巨大波クラスターからパウルヴェ方程式、数え上げ数学、直交多項式に関する話題まで、多種多彩な内容の報告が行われた。水準の高い講演がなされ、分野を越えた活発な議論が交わされた。

本研究集会は、物理・数学の話題から工学・情報の応用に至る幅広いテーマを扱うこと、3 件の招待講演を除き、講演は公募によるもので自由に発表できることが大きな特色である。全体を通して、幅広い分野での最先端の研究について、多角的な視点から議論することで、非線形波動研究の深化とその新たな展開を図るという当初の目的は、一定程度達成できたものと思われる。「非線形波動」研究のような、様々なテーマが密接に関連しあう分野では、本研究集会のような場の存在が極めて重要である。本共同利用研究集会を実現させていただいた九州大学応用力学研究所に対して、参加者を代表して深く感謝申し上げたい。

## 講演プログラムと概要

11 月 3 日 (木)

13:30~14:00

前田一貴 (関西学院大)

### 番号付き・運搬車付き箱玉系の有限戸田表現

玉に番号がついており、かつ運搬車容量に制限のある箱玉系に対する有限戸田表現を与える。これに関連して、従来知られていたルールとは異なる番号付き・運搬車付き箱玉系の類似物も得られたので、これについても報告する。

14:00~14:30

村田 実貴生 (東京農工大)

### 連立型反応拡散セル・オートマトンの進行波

多成分のセル・オートマトンの中で基本的と考えられるセル・オートマトンとして「連立型反応拡散セル・オートマトン」を提唱した。今回は、その連立型反応拡散セル・オートマトンに現れる進行波について報告する。また、反応拡散方程式で現れる進行波との共通点や相違点について考察する。

14:45~15:45

[特別講演] 堀山 貴史 (埼玉大)

### ZDD による組合せ集合の表現と列挙: 基礎から応用へ

ZDD (Zero-suppressed Binary Decision Diagrams; ゼロサプレス型二分決定グラフ) は、有向非巡回グラフにより集合族 (or 組合せ集合) をコンパクトに表現することのできるデータ構造である。また、ハッシュ表を巧妙に利用することで、ZDD に関する演算を効率よく実行することができる。こうした特長を活かして、制約充足問題の解の列挙や評価に ZDD が利用されている。近年、効果的な ZDD の構築法が提案され、スマートグリッドに向けた電力網の解析、統計的検定、選挙区の区割り、避難所の割り当てなどに向けて、応用が広がってきている。この講演では、ZDD の基礎から応用までを解説する。

16:00~16:30

辻本 諭 (京都大)

### 新しい箱玉系のルールとその解析

オートマトン表示に基づく新しい箱玉系として、一つ飛ばしルールや、2 番目空き箱ルールなどを紹介し、その解析結果を報告する。

16:30~17:00

中田 庸一 (東大)

### 超離散 Somos-4, 5 の初期値問題の解法

Somos sequence は Laurent 性を持つ離散方程式系として知られているが。その超離散対応物のうち超離散 Somos-4 および Somos-5 について任意の初期値に対する一般解を導出したので、その方法について解説する。

17:00~17:30

野邊 厚 (千葉大)

### $A_1^{(1)}$ 型クラスター代数の変異と離散戸田格子

$A_1^{(1)}$  型離散戸田格子のスペクトル曲線である楕円曲線の加法構造を用いて、 $A_1^{(1)}$  型離散戸田格子の時間発展と  $A_1^{(1)}$  型クラスター代数の変異との関係を与える。



11 月 4 日 (金)

10:00~10:30

丸野健一 (早大), 永原新 (早大)

**Davey-Stewartson II 方程式のダーク型線ソリトンの相互作用 : 理論と数値計算**

Davey-Stewartson II 方程式のダーク型ソリトン相互作用について厳密解と数値計算を用いて詳しく調べ, ダーク型ソリトンの相互作用パターンの遷移等について明らかにする.

10:30~11:00

辻 英一 (九大)

**Lattice Boltzmann Entropic Method を用いた Burgers 方程式の数値計算**

格子ボルツマン法は, 優れた特徴を有する数値計算法である. 従来この方法は NS 方程式などに適用されていたが, この方法を Burgers 方程式の数値計算に適用した. 合わせて流体波動のモデルとしての非線形波動方程式への適用性について議論する.

11:10~12:10

[特別講演] 森 信人 (京大)

**海洋波の非線形相互作用と巨大波浪生成のメカニズム解明**

Freak wave/Rough wave は, 外洋において突然 (想定を越えて) 出現する高波を指し, 出現確率の観点から有義波高の 2 倍を超える最大波と定義される事が多い. 1990 年前半に工学分野で議論が盛んに行われた Freak wave の研究では, 一般的な外洋における発生原因として, ほぼ同時期に 3 次以上の高次の非線形干渉の影響が大きいと報告が数値計算および水槽実験の両面で報告された以降, 数値シミュレーションおよび理論共に大きな進展は見られなかった. しかし, 2000 年から理工両分野から注目を集め始め, 分野をまたいだ国際会議も数度開催されている. 特に, ここ 10 年間の研究の進展は大きい. Freak wave の研究は, 非線形波動から非線形統計そして波浪予測まで渡る幅広い研究展開がなされており, 1990 年代の現象の解明に関する研究から, その予測に大きくシフトしてきた. 今回は, 非線形波動力学および工学の両面から見 Freak wave の研究の流れを解説すると共に, 不規則な波の中の最大波の予測に重要な水面変位の 4 次モーメントである kurtosis を予測するための予測式, 方向分散性の影響を加えた半経験式について概説する. その結果, 水槽実験結果については, スペクトルから最大波の分布を推定できることがわかった.

13:30~14:30

[特別講演] 竹山 美宏 (筑波大)

**可積分確率過程に現れる対称関数**

ソリトン方程式としてよく知られている KdV 方程式を 2 次元空間に拡張した Kadomtsev-Petviashvili (KP) 方程式については, それと可換な高次の時間発展を記述する無限個の非線形偏微分方程式が存在する. この方程式系は KP 階層と呼ばれるが, KP 階層の一般解の構成においては, Schur 関数と呼ばれる多変数対称関数が重要な役割を果たす. 数学においては, Schur 関数の様々な拡張 (Hall-Littlewood 多項式, Macdonald 多項式など) が考えられており, 可積分系の研究でも広く使われている. 最近の可積分系の研究で注目を集めている可積分確率過程においては, これまでに考えられていなかった Schur 関数の拡張が現れる. 今回の講演では, この新しい多変数対称関数について, 主に代数的な観点から概説する.

- 14:45~15:15 鈴木貴雄 (近大)  
 **$q$ -パンルヴェVI 方程式の  $q$ -超幾何関数の観点からの一般化**  
 神保・坂井によって導入された  $q$ -パンルヴェVI 方程式は,  $q$ -超幾何関数  ${}_2\phi_1$  を特殊解として持つことが知られている. 今回はハイネの  $q$ -超幾何関数  ${}_{n+1}\phi_n$  を特殊解として持ち,  $n = 1$  の場合に  $q$ -パンルヴェVI 方程式と一致するような,  $2n$  階の差分方程式系を導入する.
- 15:15~15:45 Philip Broadbridge(ラ・トローブ大), 梶原健司 (九大), 丸野健一 (早大), Dimetre Triades (九大/ラ・トローブ大)  
**Construction and simulation of discrete integrable model for soil water infiltration problem**  
 土壌中の水の浸透現象を記述する可積分モデルと, その離散化を提案する. モデルはBurgers 方程式にホドグラフ変換を施した 1次元非線形拡散方程式に対する非線形境界値問題として定式化され, それを用いて可積分離散化を行ったモデルを導出する. また, 数値シミュレーションでの数値安定性と, 厳密解が求まる場合との高精度の一致を要請すると, モデルに対して可積分性とは別の観点からの議論が必要である. この点に関しても考察する.
- 11 月 5 日 (土)  
 10:00~10:30 三木 啓司 (同志社大)  
**多重直交多項式と可積分系**  
 複数の関数を共通の分母多項式を持つ有理関数で近似する同時パデ近似の理論で用いられる多重直交多項式は直交多項式の一つの拡張である. 本発表では, 直交多項式と戸田方程式の対応に注目して, 多重直交多項式から戸田方程式の高次元拡張を提案する.
- 10:30~11:00 山岸弘幸 (都立産技高専)  
**糸のたわみ問題とソボレフ不等式の最良定数**  
 天井からゴム膜で吊るされた無限長の糸に荷重をかけたときの糸のたわみは, 2階線形常微分方程式にしたがう. 糸のたわみの最大幅は, たわみのポテンシャルエネルギーの定数倍で評価する, ソボレフ不等式で表される. 定数倍のうち, 最も小さい定数が最良定数である. 本講演ではゴム膜のバネ定数が一様ではなく, 区間によって異なる簡単な場合での, ソボレフ不等式の最良定数を求めた.
- 11:10~11:40 鈴木 大庸 (法政大) 礪島 伸 (法政大)  
**離散可積分系による Newell-Whitham モデルの時間差分化とその解**  
 交通流モデルの1つである遅延微分方程式Newell-Whitham (NW) モデルと, 可積分である Kac-van Moerbeke (KvM) 系との対比に注目し, 離散時間KvM 系を利用したNW モデルの時間差分化を提案し, 得られた離散時間モデルの厳密解についても議論する.
- 11:40~12:10 上岡修平 (京大) 森居数広 (京大)  
**平面分割に関連するパフィアンについて**  
 行列式はGessel-Viennot-Lindström の方法により, パフィアンは Stembridge の手法により, 非交叉格子路の言葉で組合せ論的に解釈できる. 本講演では, 対称な平面分割の分配関数を与えるパフィアンに着目し, その満たす性質について考察する.

## ポスターセッション概要

朴 炯基 (九大)

### Explicit Formulas for Area-preserving Deformations of Plane Curves in the Equicentroaffine Geometry.

We present a formulation of discrete dynamics of discrete plane curves in the equicentroaffine geometry which is characterized as an area-preserving deformation. The deformation is governed by the discrete Korteweg-de Vries (KdV) equation. We also construct explicit formulas for the discrete deformation as well as the continuous deformation of smooth curves, in terms of the  $\tau$  (tau) function. In the construction, we use the correspondence to the isoperimetric (arc length-preserving) deformation of plane curves in the Minkowski plane.

赤木 洸仁 (東海大) 長井 秀友 (東海大)

### 連立線形方程式の一般解の差分・超離散対応

Max-Plus 代数を用いて構成される連立線形超離散方程式は係数の大小関係によって分類される周期的な解挙動をもつことが知られている。本発表では差分方程式の一般解に対して超離散化を行うことで、これらの分類との対応を与える。

安藤 卓哉 (早大) 高橋 大輔 (早大)

### 東方程式の解の挙動の束依存性について

共役元付き分配束上で束の演算を用いた方程式を考える。この方程式の特殊化として、Boole 束上では ECA を、全順序集合の束上では max-min の方程式を表現できる。本発表では半順序集合の束も考慮し、それぞれの束での解の挙動の相似と相異について議論する。

篠原 麻礼 (早大) 坂田 幸太郎 (早大) 辻本 諭 (京大) 高橋 大輔 (早大)

### 1つ飛ばし箱玉系について

辻本氏によって発見された、箱玉系で定義される種々のソリトン系が存在する。このうちで、玉を持った運搬車が特徴的な動きをする 1 つ飛ばしの箱玉系に焦点をあてる。この系のルール、解のふるまい、max-plus 表現による解析などを解説する予定である。

福田 亜希子 (芝浦工大) 山本 有作 (電通大) 岩崎 雅史 (京都府大) 石渡 恵美子 (東京理科大) 中村 佳正 (京大)

### 箱と玉の両方に番号が付いた箱玉系について

番号付き箱玉系として、玉に番号を付けて区別した箱玉系および箱に番号を付けて区別した箱玉系が知られている。本講演では、それらの番号付き箱玉系の一般化として、玉と箱の両方に番号を付けて区別した箱玉系を定義する。また、新たに定義した番号付き箱玉系の保存量についても触れる。

高松 啓太 (京大)

### 2つの ECA の組み合わせがつくるケーリーグラフの平均距離について

ECA (Elementary Cellular Automaton) とは、直線上に並んだ 0 あるいは 1 の 2 状態をとりうるセルの時間発展ルールで、自身および両隣のセルの状態から次の時刻の状態を決定する。また、ECA による時間発展がケーリーグラフ上のランダムウォークと対応づけられることが知られている。本講演では、ECA のうちルール 60 とルール 195 の組により生成されるケーリーグラフとルール 15 とルール 240 が生成するケーリーグラフが同型であることを変換行列の視点から示す。

一木信吾（東大） 柳澤大地（東大） 西成活裕（東大）

### 隣接サイトの状態に依存する吸脱着機構を持つ完全非対称単純排他過程と複雑ネットワークへの応用

前方の隣接サイトの状態に依存する吸脱着機構を持つ次元開放系の完全非対称単純排他過程について、平均場近似を用いて定常状態を解析した結果を紹介する。また、最後に、この模型の今後の展望の一つとして、複雑ネットワークへの応用について言及する。

松家 敬介（武蔵野大）

### 時間遅れをもつ常微分方程式の離散化について

ロジスティック方程式に時間遅れを入れた Hutchinson-Wright (HW) 方程式の解の挙動は時間遅れに関するパラメータによって変化することが知られている。本講演では HW 方程式の離散化とその解の挙動が微分方程式の場合と同様に時間遅れに関するパラメータで変化することを報告する。

新澤信彦（西日本工大）

### Max Plus 代数での行列式について

Max Plus の連立方程式から変数を消去しようとする、方程式が極端に複雑になってしまうことが多い。ここでは、あるクラスの Max Plus 線形方程式では、その様な複雑化が起らず、可解条件を行列式に相当するもので表せる事を示す。

山本 太郎（京大）

### 2つ飛ばし箱玉系の解析

粒子性を有するミーリ・オートマトンの中で、1つ飛ばし箱玉系のソリトン性が明らかになってきた。本発表では、その一般化として2つ飛ばしルールをもつオートマトンを取り上げ、そのソリトン性を考察する。

羅宇（京大）

### 例外型直交多項式の零点の性質及びその応用

古典直交多項式は、零点に関する Stieljes-Calogero 関係式により、特殊な多体系と関連していると指摘された。古典直交多項式の一つの拡張である例外型直交多項式について、零点に関する Stieljes-Calogero 関係式及びその変形を調べる。それらの結果を利用し、例外型直交多項式と関連する多体系を解析する。

佐藤亜理紗（立教大）， 笈三郎（立教大）

### 期間構造モデルの離散化の試み

金利の期間構造の研究において、Vasicek モデル、CIR モデルなどといったアフィン型モデルは基本的であり、多く利用されてきた。このクラスのモデルでは、対応する微分方程式がリッカチ型になるため、厳密解を明示的に求めることができる。本研究では、時間を離散化したモデルにおいて、同様の考察を試みる。

足立好輝（立教大）， 笈三郎（立教大）

### GL(3) 型 Atiyah-Ward 仮説とモノドロミー保存変形

Atiyah-Ward 仮説とは SU(2) 自己双対ヤン・ミルズ方程式の解法の一つであり、相似簡約を通してパンルヴェ VI 型方程式と関係する。本研究では、これを GL(3) 型に拡張し、対応するモノドロミー保存変形方程式を考察する。

久保涼平（立教大）， 笈三郎（立教大）

**超幾何関数で表される不変量を持つ差分方程式の楕円関数解**

榊・笈によって，超幾何関数で表される不変量を持つ差分方程式の構成法が提案され，近藤によって厳密解が考察されている。今回は，榊・笈の論文では扱われていなかった場合について，楕円関数で解が表示されるものについて報告する。

**開催の期間** 平成 28 年 11 月 3 日 ~ 平成 28 年 11 月 5 日

**参加者** 60 名

(共同利用研究集会)

## 「海洋レーダを用いた海況監視システムの開発と応用」

琉球大学工学部 藤井 智史

### 1. 目的と経緯

海洋レーダは、高い時空間分解能で継続的に沿岸海域をモニタリングすることが可能である。また、陸上設置の観測器であることから、洋上または船舶の観測に比べて運用保守などが容易であるという利点がある。この特徴を生かして、海洋環境の把握や防災への活用、海運や水産業への貢献などが期待されている。

海洋レーダを用いた沿岸域の海況監視システムの構築に向けて、精度向上や効率的運用、信号処理の高度化などのレーダ技術の発展と、観測結果の検証、応用分野や利用範囲の拡大などを議論することを目的として標記研究集会を開催した。この研究集会は、2003年度に応用力学研究所共同利用研究の一環として開始され、国内の海洋レーダに関係する研究者、利用者が一堂に会する研究集会として継続して実施されてきたものである。

### 2. 開催概要

開催日時： 2016年12月14日(水) 午後(14:00~17:00)

15日(木) 午前(9:30~12:00)

開催場所： 九州大学 応用力学研究所 東アジア海洋大気環境研究センター6階 W601号室

参加者： 14日 33名

15日 28名

### 3. 発表概要

本研究集会では10題の発表があり、観測システムの運用報告から津波観測への応用、観測データの解析まで幅広い分野での議論が2日に渡って活発に行われた。

1日目は6件の講演があり、前半は津波観測に関する話題が発表された。三菱電機の山田らは、津波検出に関して、潮流等の長周期成分を除去したのちに観測域内を通過する流速変化の等位相線を検出することで津波到来波面前面としてとらえる手法を提案した。国際航業/愛媛大院理工の藤らは、仮想津波観測実験を通して津波検知距離の統計的解析を行った。津波の流速エネルギーと背景流のエネルギーとの比が検知結果とほぼ一致し、エネルギー比1で検知確率50%に相当することを示した。また、検知距離の日周変動が電離層と関係していることも示唆した。琉球大学院理工の渡久地らは、伊勢湾に設置された海洋レーダで観測された2011年東北地方太平洋沖地震津波到来時の流速データから、その固有振動モードに関して二次元分布とスペクトルの時間変動について考察した。スペクトル増幅関数については湾外の観測データとの比較の必要性が指摘された。電力中央研究所の坂井らは、VHFレーダにより中部電力浜岡発電所地先の観測に関して、定点観測とGPS漂流ブイとの比較検証を行い、良い一致を示したことを報告した。津波検知に関する考察もを行い、Lipaらにより提唱されたQ値については御前崎沖の複雑な地形では利用できないことに言及

した。JAMSTEC むつ研究所の渡邊らから、津軽海峡東部海域観測用に設置した海洋レーダの運用状況に関して報告があった。電磁流速計の繫留観測との比較を昨年に引き続き実施し、南北方向成分流速が一致するのに対して東西成分が海洋レーダでは過小評価になることを示した。視線方向流速で比較すると大畑局の流速値の相関が低いことが分かった。今後さらに原因究明と改良を進めるとのことであった。海上保安庁海洋情報部の西村らは、相模湾レーダによる観測結果から、相模湾内の平均流は反時計回りが卓越し、EOF 解析から第一モードが黒潮流入に対応し、第二モードが局所的海上風に駆動された吹送流成分に関係することを明らかにした。また同時に、第一・第二モードで約 70%を支配していることも示した。

2 日目は 4 件の講演があった。情報通信研究機構の杉谷らは、対馬と相島に設置した遠距離海洋レーダによる対馬海流分岐流観測について、バイスタティックレーダの技術的な紹介をした。彼らは、観測距離の延伸のために受信信号から直達波を検出し、ビートダウン用ローカル信号を同期させて掃引し、中間周波段に狭帯域フィルタを適用する方法を開発した。琉球大学院理工の大城らは、日向灘観測用に宮崎市に設置した海洋レーダで取得された、双峰型スペクトルに関して検証を行った。アンテナパターン計測からサイドロブによる他方向からの情報混入はないことを示した。さらに、双峰型スペクトルの発生頻度と黒潮離岸距離を比較しその関係を示唆した。電力中央研究所の坪野らは、有明海での VHF レーダ観測の視線方向流速から潮流 4 分潮を拘束条件としてパラメータ推定を行った。抗力で潮位と潮流の位相差は補正できたが、粘性係数については感度が低いことが示された。この結果は、視線方向流速だけでもデータ同化に利用できることを示唆している。琉球大学理の久木は、海洋レーダから求まる海上風向を波浪推算に用いる方法を紹介した。島嶼沿岸域のように吹送距離が風向により大きく変化する海域での波浪推算に有効であると考えられる。

講演後の総合討論では、今回の研究集会での議論のまとめが行われ、今後も研究集会を開催する方針が表明された。加えて、琉球大工の藤井から最近の総務省での海洋レーダ無線局免許に関する問題点を挙げ、その状況把握と対応に関する課題を提示し、今後も関係者が連携して情報交換を密にすることを話し合った。

#### 4. 研究集会プログラム

九州大学応用力学研究所 共同研究集会

「海洋レーダを用いた海況監視システムの開発と応用」

(代表者：藤井智史、九大応力研世話人：市川香)

開催日： 平成 28 年 12 月 14 日(水)～15 日(木)

場所： 九州大学筑紫キャンパス

応用力学研究所 東アジア海洋大気環境研究センター6 階 W601 号室

=====

12 月 14 日(水)

14:00-14:10 あいさつ・趣旨説明

藤井智史(琉球大)

14:10-14:35 海洋レーダを用いた津波波面推定方式の検討

山田哲太郎、小幡康、亀田洋志、小柳智之、川相隆、有岡俊彦 (三菱電機)

- 14:35-15:00 海洋レーダを利用した津波検知距離の統計解析と測定精度の検証  
藤良太郎（国際航業／愛媛大院理工），日向博文（愛媛大院理工）
- 15:00-15:25 海洋レーダ観測による津波到来時の伊勢湾の固有振動モードに関する考察  
渡久地優（琉球大院理工）、藤井智史（琉球大工）、日向博文（愛媛大院理工）
- 15:25-15:40 休憩
- 15:40-16:05 遠州灘沖の海洋レーダ観測による防災・環境モニタリングへの活用  
坂井伸一、新井田靖郎（電中研）、田中良仁、上原史洋（中部電力）
- 16:05-16:30 津軽海峡海洋短波レーダの運用状況  
渡邊修一、佐々木建一、山本秀樹、柳谷敏典（JAMSTEC むつ研）
- 16:30-16:55 海洋短波レーダーを用いた相模湾における表層循環流の考察  
西村一星（海上保安庁海洋情報部）、中野知香（東京海洋大）、松坂真衣（海上保安庁海洋情報部）、寄高博行（高知大）、陳イネイ（東芝システムテクノロジー）、白川徹（ウイングマリタイムサービス）、根本雅生、吉田次郎（東京海洋大）
- 12月15日(木)
- 09:30-09:55 遠距離海洋レーダによる対馬暖流分岐流のバイスタティック観測  
杉谷茂夫、雨谷純、岩井宏徳（NICT）、森本明彦（愛媛大沿岸セ）、久島萌人（名大宇宙地球環境研）、藤井智史（琉球大工）、滝川哲太郎（長崎大院水産・環境）、市川香（九大応力研）
- 09:55-10:20 海洋レーダによる日向灘観測において取得したドップラースペクトルについて  
大城弘貴（琉球大院理工）、藤井智史（琉球大工）、渡慶次力（宮崎県水試）
- 10:20-10:45 有明海においてレーダ観測で得られた分潮成分を用いたモデルのパラメータ推定  
坪野考樹、三角和弘、津旨大輔（電中研）
- 10:45-11:00 休憩
- 11:00-11:25 島嶼沿岸域の波浪推算への海洋レーダ利用  
久木幸治（琉球大）
- 11:25-12:00 総合討論



(共同利用研究集会)

### 「東シナ海の循環と混合に関する研究」

"Workshop on the Circulation and Mixing in the East China Sea"

研究代表者 石坂丞二 (名大宇宙地球環境研究所)

#### 1. 目的と開催経過

東シナ海の生物生産には、東シナ海の流動や混合による栄養塩の流入や供給が欠かせない。応用力学研究所では、東シナ海の陸棚域および黒潮域とその周辺海域の循環に関する研究を数年以上にわたって継続的に実施しており、国内外研究機関との共同研究も多方面から進めている。その研究内容は、名古屋大学で進めている生物環境との関連も深く、様々な研究プロジェクトを通して、多くの分野を包含した研究者コミュニティも形成されてきている。研究成果の共通理解を更に深めるため、継続的に開催できる研究集会の場を持つことが今後の共同研究の進展に大きく寄与すると思われる。ここでは、流動や混合などの物理環境と、生物生産との関係を明らかにすることに焦点を当てた研究集会を開催することとした。

出席者は、名古屋大学3名、長崎大学3名、京都大学1名、富山大学1名、九州大学3名であった。本研究集会では、松野健(九州大学)、相木秀則(名古屋大学)、石坂丞二(名古屋大学)、梅澤有(長崎大学)、藤田裕也(長崎大学)、徐倩(名古屋大学)、吉川裕(京都大学)、張勁(富山大学)から話題提供があり、それぞれについて議論を行った。

#### 2. 研究集会の概要

日時：2016年6月11日(土)13:30~12日(日)12:00

場所：九州大学応用力学研究所 6F W601

松野は、東シナ海陸棚域底層での高濁度層における観測結果から、水温とDOが海底境界層で一様であるのに対し、懸濁物量や乱流強度は底層近くで大きくなっていることを報告した。粒子の沈降と鉛直拡散のバランスを仮定して、懸濁粒子の沈降速度を見積もったが、沈降速度が拡散係数に大きく依存する結果となり、仮定したバランスについてさらに検討する必要があるのではないかという議論がなされた。また、リン酸濃度が下層で増加していることから、堆積物あるいは水中の懸濁物質からの溶出の可能性が示唆された。

相木は、陸棚域における台風起源の波動エネルギーフラックスの診断手法などについて述べ、波浪を考慮した大気海洋結合モデルを用いた解析から、内部重力波および外部波の挙動を診断する方法について理論的なアプローチを紹介した。また、海面の波浪の観測機器によって海洋内部へのエネルギーの移動について評価することの重要性について提案した。

石坂は東シナ海のメソスケール渦と春季ブルームへの影響について述べ、日本海若狭湾

沖の低気圧性、高気圧性の渦に関して、春季ブルームの開始のタイミングが異なることについて述べた。それに対して、混合層の定義の問題や、熱フラックスの日周性の重要性などについて議論があった。

梅澤は、硝酸窒素同位体を用いて東シナ海・黒潮海域の基礎生産を支える栄養塩動態について発表した。冬季に発達した塩分 33 程度の黄海冷水塊は、成層の発達によって夏季に北部東シナ海の底層に孤立し、亜表層の植物プランクトン生産に影響を与えること、秋に移行するにつれて、成層構造が弱まり、冷水塊は黒潮由来の海水に押し込まれるようになるため、黒潮中層水由来の栄養塩が生産に与えることが、 $\delta^{15}\text{N-NO}_3$  シグナルからも示された。南風が卓越する夏季の東シナ海では、台湾海峡からの表層水や、長江希釈水の影響が強くなると考えられるが、秋季には、窒素固定や再生産の影響が黒潮中層水にまで見られ、北部東シナ海まで影響していることが示された。夏季における黄海底層冷水の存在や、秋季には黒潮中層にも窒素固定や再生産の影響が見られるなど、複雑な環境が議論された。

藤田は、白鳳丸 KH-15-3 次航海における硝酸塩センサーによる連続観測の結果について発表し、硝酸塩センサーによる測定と採水サンプルからの分析結果に十分有意な相関があることを示し、硝酸塩センサーによる詳細な鉛直分布を用いて、硝酸塩躍層の位置とクロロフィル極大層の深さとの相対的な位置関係を示すとともに、黒潮系水が陸棚中央部の下層に入り込んでいる可能性を指摘した。徐倩は、2009、2010、2011、2013 年の 7 月の済州島南海域での植物プランクトン群集構造を比較し、2009 と 2013 年には 2010、2011 年よりも、珪藻が多く、リン酸塩濃度も高いことについて述べ、湧昇等の影響がある可能性を指摘した。

吉川は、浅海乱流中の懸濁粒子の振る舞いに関する数値実験の結果について報告した。海底近くでは、別々の沈降速度を持つ沈降粒子が異なる見かけの拡散係数を示すこと、また表層乱流が沈降速度に与える影響については、粒子の位置によって相違が見られ、海面においた粒子では、渦によって沈降速度は変わらないのに対し、海面下においた粒子では、渦によって沈降速度は減少し、大きな渦ほど粒子をその位置に保持する効果が大きいことが示された。

張は、希土類元素に対して、塩分、懸濁物質、溶存有機物が影響する実験結果について報告した。

すべての発表ののちに、総合討論を行った。亜表層クロロフィル極大付近での基礎生産や海底境界層内での物質循環の研究を今後どのように勧めるか。具体的に 2016 年 7 月の長崎丸での航海計画を含め議論した。また、来年度以降の研究集会や航海計画、関連する PEACE ワークショップや PICES の CREAMS-AP の活動についても議論した。

応用力学研究所共同利用研究集会

## 東シナ海の循環と混合に関する研究

日時：2016年6月11日(土)13:30~12日(日)12:00

場所：九州大学応用力学研究所 W601 (6階)

6月11日

13:30-15:00

東シナ海陸棚域底層における懸濁物の沈降速度の推定

松野健・李根淙・堤英輔(九州大応力研)・小川俊樹(九大総理工)・張勁・Qian LIU・

神林翔太(富山大理工)

陸棚域における台風起源の波動エネルギーフラックスの診断手法

相木秀則(名大ISEE)

Impact of mesoscale eddies on spring bloom initiation in the Japan Sea

Eligio Maure(名大環境)・石坂丞二(名大ISEE)

15:30-17:00

東シナ海・黒潮海域の基礎生産を支える栄養塩動態

梅澤 有・野崎 龍(長崎大水産・環境)

白鳳丸 KH-15-3 次航海における硝酸塩センサー観測

藤田裕也・石田朗人・近藤能子・武田重信(長崎大水産・環境)

Phytoplankton distributions induced by phosphate availability in the summer East China Sea

徐倩(名大環境)・石坂丞二(名大ISEE)

6月12日

9:30-10:30

浅海乱流中の懸濁粒子の振る舞いに関する数値実験(その2)

吉川 裕(京大理)

希土類元素を用いた東シナ海起源水解析

張勁(富山大理工)・麻洪良・梁傑・何滙軍(中国海洋大)

10:30-12:00

総合討論