若狭湾における定置網漁業の急潮対策に関する研究

福井県立大学　海洋生物資源学部　兼田淳史

【研究の目的】

九州大学が開発した日本海沿岸域海況予報システムの計算結果や京都府および福井県の水産研究機関、福井県立大学が取得する海況観測データは、若狭湾の沿岸域では定置網の急潮対策の精度向上を目的として利用され始めている。本研究は 2018 年度の観測データおよび数値モデルの予測結果を用い、当年度に発生した急潮の特徴を分析するとともに、急潮対策の検証および改善を目的して実施した。

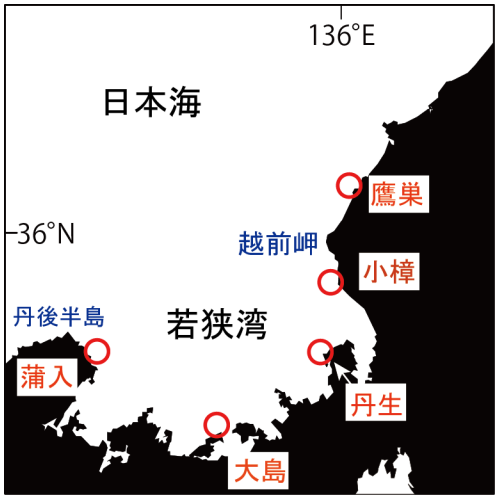


図１　若狭湾および測点図．2018 年に京都府海洋センター、福井県水産試験場、福井県立大学が流速計を設置していた観測点の一例．

【観測および解析】

福井県水産試験場、福井県立大学、京都府海洋センターは若狭湾および越前海岸の定置網近傍で流れや水温を計測している（**図１**）。2018 年度においても、それぞれの測点で電磁流速計や ADCP（超音波多層流向流速計）を用いて流れを計測するとともに、複数個の水温センサーを設置して水温を計測した。本研究では流速が 50cm/s を超える突発的な強流を急潮と定め、それぞれの海域における急潮の発生状況やその特徴について調べ、研究打ち合わせ時にはその情報を共有して今後の対策について考察した。

【結果および考察】

分析結果の一例として、鷹巣における流れの観測結果を**図 2** に示す。図から、2018 年は 7 月上旬から 8 月中旬まで流れは一時的に弱くなった後、8 月下旬に急潮が発生し、その後 9 月中旬にかけて 50cm/s を超える強流が継続的に発生した。また、9 月末から 10 月上旬には台風や低気圧の通過時に急潮が発生したことがわかる。そこで過去の鷹巣の流れの観測データと比較したところ、他の多くの年は 7−8 月に流れが強くなり高い頻度で急潮が発生していたのに対して、2018 年は 7 月上旬―8 月中旬に流れが弱く、例年よりも遅い時期にあたる 8 月下旬以降に急潮が発生したことが特徴であることがわかった。

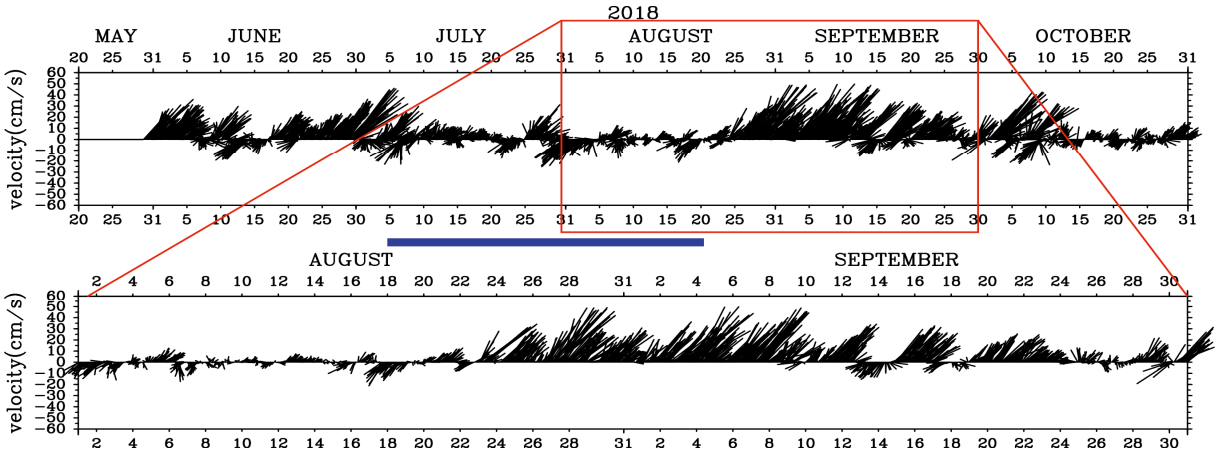


図 2　2018 年 5-10 月の鷹巣の流れの時系列（上）と 8-9 月の拡大図（下）．
上の横軸の青線は、7 月上旬から 8 月中旬まで流れが弱かった期間を示している．

そこで、2018 年 7-8 月は例年よりも流れが弱く急潮が発生しなかった理由と、8 月末の急潮の発生過程について考察した結果について考察した。若狭湾沿岸域の流れは、外洋に対して解放的であるため対馬暖流の影響を強くうける。そのため 7-8 月の弱い流れの発生は、対馬暖流の変動に起因している可能性があると考えた。高解像度モデルの結果を利用して沖合いの流動構造について調べたところ、鷹巣で流れが弱くなっていた時期（図 3 左）は丹後半島沖で対馬暖流が北上し、若狭湾湾口中央部から東部では対馬暖流が離岸していた。鷹巣沖で 7-8 月に例年より流れが弱くなって急潮が発生しなかった理由は、対馬暖流が若狭湾沖で離岸していたためであると考えられた。

次に、8 月下旬に発生した急潮の発生過程について高解像度モデルの結果を利用して検討した。図 3（中央および右）には、急潮が発生する前の 8 月 21 日と急潮が発生した 8 月 29 日の計算結果を示している。8 月 13 日と 21 日の計算結果から、13 日には丹後半島沖で北上していた対馬暖流は 21 日になると次第に北東方向へ流路を変え、越前岬へ近づくようになった。そして、急潮が発生した 8 月 29 日には対馬暖流は越前岬沖で接岸し、急潮していたことがわかった。今までの鷹巣の急潮研究で対馬暖流の接岸に起因して急潮が発生したことが報告されていることから（Kaneda et al., in press)、2018 年は例年よりも遅れたものの、同様の発生過程で 8 月末に急潮が発生したと推察された。

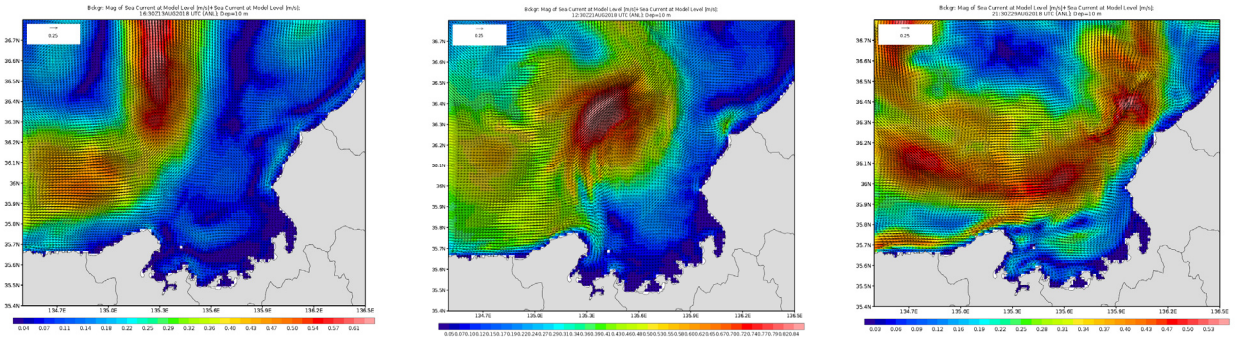


図 3：2018 年 8 月 13 日（左）21 日（中央)、29 日（右）の高解像度モデルの計算結果（海面下 10m）

また、研究打ち合わせでは、京都府の丹後半島・蒲入（図 1）の 2018 年の観測データは既に多くの知見がある台風の通過に起因する急潮のみならず、穏やかな天気のもとで発生する急潮の発生を示したことが報告された。急潮の発生頻度や発生要因は地域ごとに異なっているため、海域ごとの急潮の特徴やその特徴を踏まえた急潮対策の開発を引きつづき進める必要がある。

【関連の成果発表】

Intensification of current in coastal waters around Cape Echizen in summer (2019), A. Kaneda, K. Ayukawa, N. Hirose, T. Senjyu, Y. Kumaki, Y. Igeta, K. Fukudome, T. Watanabe, J. Oceanogra.

【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
【所内世話人】九州大学応用力学研究所　千手　智晴
【研究協力者】九州大学応用力学研究所　広瀬　直毅
福井県水産試験場・漁場環境研究グループ　桂田　慶裕
京都府農林水産技術センター　舩越　裕紀
福井県立大学大学院生物資源学研究科　大西　徹

高解像度日本沿岸モデルを用いた海峡通過流の再現

気象研究所 海洋・地球化学研究部　坂本圭

要旨

気象研究所で開発された高解像度日本沿岸モデルについて、対馬海峡、津軽海峡、宗谷海峡の通過流の再現性を検証した。その結果、過去の研究と比べた平均流量の差が 7%以下となるなど良い再現性が示された。この再現性には、データ同化による現実的な初期値の作成が貢献していた。瀬戸内海で見られた潮汐による通過流の抑止効果は、これらの海峡では見られなかった。

序論

気象研究所では、気象庁の現業システムに向けて、約 2km の水平解像度で日本沿岸全域をカバーする海洋モデルを開発してきた。昨年 2017 年度の本共同利用研究では、瀬戸内海の海峡における通過流の再現性を潮汐の導入によって改善したことを報告した。しかし一方で、日本海につながる対馬海峡、津軽海峡、宗谷海峡の通過流については、日本周辺の海況に強く影響するため重要でありながら、検証が課題として残っていた。本研究では、これら海峡の通過流量の再現性を潮汐の影響も含めて調べる。

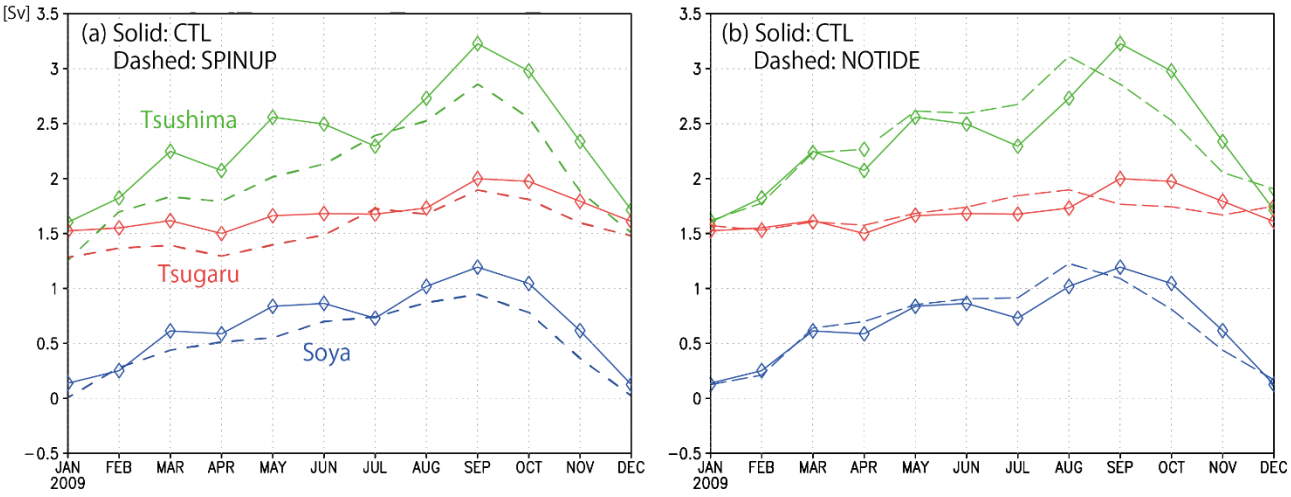
モデルと実験方法

開発したモデルは、気象研究所共用海洋モデル「MRI.COM」を基盤モデルに採用することで、潮汐をはじめ主な沿岸物理過程が組み込まれている。実験の大気強制には JRA-55 較正データ(辻野博之が開発)を、沿岸海況に重要な河川流入には気象庁流域雨量指数にもとづくデータ(浦川昇吾が開発)を使用した。側面境界には双方向結合された北太平洋モデル(主に中野英之が開発)を用いた。実験は、データ同化によって作成された 2008 年 12 月 2 日の場を初期値に用いて実行し、 2009 年の結果を解析した(ケース CTL)。加えて、データ同化を使わずにモデルのスピンアップのみで作成した場を初期値に用いたケース(SPINUP)と、初期値は CTL と同じだが潮汐を与えないケース(NOTIDE)も比較実験として行った。どのケースも実験中はデータ同化しない、いわゆるフリーラン実験である。

実験結果

ケース CTL で再現された海峡の通過流量を図(a)に示す。対馬海峡の流量は 1 月から増加し 5 月に 2.5 Sv、夏に 3 Sv に達し、秋に減少した。津軽海峡では 1 年を通して変化が小さかった。宗谷海峡では 1 月から増大し 8-10 月に 1Sv を超えた。これらの特徴は、通過流量に関する最新の知見である Han et al. (2016, Ocean Dyn.)のマルチ・モデル・アンサンブルの結果とよく一致する。年平均の流量は対馬海峡 2.34Sv、津軽海峡 1.69Sv、宗谷海峡 0.67Sv であり、これも先行研究の値、2.40Sv、1.68Sv、0.72Sv に近かった(差は　3%、1%、7%)。フリーラン実験でも、本モデルは通過流量を現実的に再現したと言える。

図：(a)実験 CTL(実線)と SPINUP(破線)における対馬海峡(緑)、津軽海峡(赤)、宗谷海峡(青)を横切る流量。2009 年の月毎の時系列であり、縦軸は Sv(=10^6 m^3/s)を示す。(b) 破線は実験 NOTIDE の結果を示す。その他は(a)と同じ。



データ同化による初期値の作成がこの良い再現性に寄与したことが分かった。実際、ケース SPINUP の通過流量は年を通じて小さく(図 a 破線)、平均で対馬海峡 2.03Sv、津軽海峡 1.53Sv、宗谷海峡 0.53Sv と先行研究の値に対して 15%、9%、16%も過小だった。一般に、沿岸海洋の主要な物理過程の時間スケールは外洋と比較して小さいため、沿岸モデルのスピンナップにはあまり注意を払われてこなかった。しかし日本沿岸全域ほど大きい領域では、沿岸モデルでも初期値がモデル再現性に重要であることが示唆された。一方で、図(b)に示すケース NOTIDE の通過流量は、月によって若干の差はあるもの、平均で CTL と変わらなかった(差は 1%以内)。今回の実験結果は、瀬戸内海とは異なり、潮汐が通過流を抑制する効果は小さいことを示す。

考察

データ同化による初期値作成が、対馬海峡、津軽海峡、宗谷海峡の通過流の再現に重要であることを示す結果は予期しておらず、これからその具体的な要因を調べる必要がある。また、瀬戸内海では作用していた潮汐の抑止効果がこれらの海峡では見られなかった原因の解明も今後の課題である。

成果報告（1:論文、2,3:学会発表）

1. Sakamoto, K., H. Tsujino, H. Nakano, S. L. Urakawa, T. Toyoda, N. Hirose, N. Usui and G. Yamanaka, Development of a 2km-resolution ocean model covering the coastal seas around Japan for operational application, (submitted to Ocean Dynamics)
2. 坂本圭, 辻野博之, 中野英之, 浦川昇吾, 豊田隆寛, 山中吾郎, 解像度 2km ネスト・モデルを用いた日本沿岸海況の再現 2: 沿岸潮位の再現性, JpGU Meeting 2018, AOS17-01, 2018/5/21, 幕張メッセ
3. Sakamoto, K., H. Tsujino, H. Nakano, S. L. Urakawa, G. Yamanaka, T. Toyoda, N. Hirose and N. Usui, Reproduction of coastal sea-level variations around Japan using a nested 2-km resolution model, AGU Fall Meeting, OS41D-2050, 2018/12/10-14, ウォルター・E・ワシントン会議場

超高解像度湾モデルの精度向上にむけたモデル間相互比較

東京大学　大気海洋研究所　　川崎　高雄

・目的

九州大学応用力学研究所で開発されている海洋大循環モデル RIAMOM は、日本近海の海況予測の実用レベルでの運用に使用されており、その精度は非常に高いレベルにある。東京大学大気海洋研究所では海洋大循環モデル COCO および非静力海洋モデル KINACO を用いて、超高解像度の湾スケールモデリング研究を行っている。COCO では多重ネスティング手法によって、水平格子幅 500m の日本沿岸モデルと 1/4 度の全球海洋モデルをシームレスにつなげ、日本近海の海況予測システムとして活用できる海洋モデルを開発中である。両研究所で用いられている海洋モデルの精度向上のために、COCO と RIAMOM の結果の相互比較を行う。高度化した COCO と RIAMOM の結果を我々が開発中の湾モデルに利用し、過去の特殊事例の再現や将来予測等に役立つモデル開発を推進する。

・実験方法

海洋大循環モデル COCO を用いて、日本近海の海流や水温・塩分場等が再現可能なモデル設定を行った。水平格子幅 1/4 度の全球海洋を最も低解像度の外側のモデル(L0)とし、3 種類の水平格子幅を持つ緯度経度座標領域モデルを段階的に設定することで、水平約 500m 格子の日本沿岸モデル(L3)を構築した(図 1)。まず L0、L1 モデルで構成される 2 重ネストモデルを水温・塩分の同化データに緩和して、2000 年 1 月 1 日から 2013 年 9 月 1 日まで積分した。その後 L1 モデルの結果を L2 モデルに補間し、L0～L2 で構成される 3 重ネストモデルを 9 月 1 日から 9 月 2 日まで駆動した。最後に、L2 モデルの結果を L3 モデルに補間し、L0～L3 で構成される 4 重ネストモデルを 9 月 1 日から 9 月 2 日まで駆動した。今後の湾モデルとの接続も視野に入れ、4 重ネストモデルでは潮汐も考慮した。

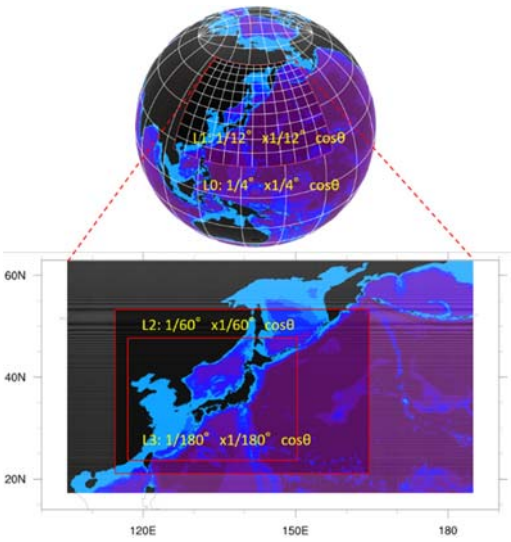


図 1: ネスティング手法を用いた外洋モデルの水平格子設定

一方、非静力海洋モデル KINACO を用いた水平格子幅約90m の超高解像度の湾モデルの構築を行った。最終的には上記の外洋モデルの結果を境界条件としたモデル駆動を目指すが、トライアルとして湾モデル単体による実験を行った。若狭湾の西端である丹後海全域をモデル領域として設定し、2013 年 9 月の大雨時の由良川の河川水大量流出イベントについてシミュレーションを行った。河川水として淡水に加えて、泥・砂など陸起源の懸濁物質の循環に対する影響を調べるために、懸濁物質をラグランジュ粒子としてモデルに組み込んだ。現実的な風や地形を考慮した Realistic シミュレーションと、地形や背景場をシンプルにした Idealized シミュレーションの二種類の設定でモデルを動かした。前者は本シミュレーションがある程度現実の湾状況を再現できているかを確かめるため、後者は多くの感度実験を行うためにシンプルな設定で懸濁物の影響にフォーカスする目的で行った。

・実験結果

外洋モデルは、黒潮・親潮・対馬海流など日本周辺海域での主要な海洋循環を良く再現した。水平格子幅を 500m に設定したことで、黒潮など流量の大きい海流の一部が小さい島や海底地形を通過する際に形成される渦、沿岸域

での上昇流などがよく表現された。潮流をモデルに取り入れたことで、日本沿岸に多く分布する検潮所での海面高度変動が概ね再現された。モデルで表現された黒潮の主要流路であるトカラ海峡で島の下流側にみられるカルマン渦のような構造、沿岸域における上昇流にともなう海面での冷水露出などについても、気象衛星観測「ひまわり」の海面水温データからもその存在が確認され、水平スケールや生成数についても概ね良く再現されていることが明らかになった。

湾モデルでは、河川水の大量流出に伴ってエスチュアリー循環が形成され、これは従来の理論および観測と整合的であった。そのエスチュアリー循環が、懸濁物粒子が大きい場合（すなわち懸濁物の滞留時間が短い場合）は弱くなり、表層と亜表層水の交換もまた弱化した。一方で懸濁物粒子が小さい場合（すなわち滞留時間が長い場合）は鉛直的な密度成層構造が不安定となる効果が支配的になり、表層―亜表層間の鉛直混合が強くなった。懸濁物が河川水プルームやエスチュアリー循環に与える影響は、仮定する懸濁粒子の大きさや流出量に大きく依存することが明らかになった。

・考察

外洋モデルでは、足摺岬・室戸岬南方沖での浅い地形を黒潮の一部が通過する際に生じる海面での強い収束流が表現されたが、ALOS-2 合成開口レーダによってその存在が示唆された。潮流が地形に作用することで、島の周辺に継続的に渦が生成される興味深い物理プロセスも表現されたが、この現象については今後さらに衛星観測との比較を継続して検証をし、海洋モデルの改善に役立てたい。

湾モデルにおいては、懸濁物―沿岸物理相互作用の効果がある程度明らかになってきたが、それが海底堆積物の分布や、海洋生態系にどのような影響を及ぼすか不明な部分が数多く残っている。これらを沿岸域、移行域や外洋域相互作用の解明に向けた発展題材としたい。

・研究成果報告

○ 論文(査読有)

(1) Yasuhiro Hoshiba, Yoshimasa Matsumura, Hiroyasu Hasumi, Sachihiko Itoh, Satoshi Nakada, Keita Suzuki (in revision):「A simulation study on effects of suspended sediment through high riverine discharge on surface river plume and vertical water exchange」Estuarine, Coastal and Shelf Science.

(2) Yasuhiro Hoshiba, Takafumi Hirata, Masahito Shigemitsu, Hideyuki Nakano, Taketo Hashioka, Yoshio Masuda, Yasuhiro Yamanaka (2018):「Biological data assimilation for parameter estimation of a phytoplankton functional type model for the western North Pacific」Ocean Science, 14, 371-386, https://doi.org/10.5194/os-14-371-2018.

○ 学会発表

(1) “Physiological parameter estimation of a phytoplankton functional type model for the western North Pacific”, Hoshiba Y., T. Hirata, M. Shigemitsu, H. Nakano, T. Hashioka, Y. Masuda, Y. Yamanaka, Ocean Science Meeting, Feb 2018, Portland, poster.

(2) “Simulation on the Effects of Suspended Sediment Matters Induced by High Riverine Discharge on Vertical Mixing in a Hypopycnal Plume”, Hoshiba, Y., Y. Matsumura, H. Hasumi, S. Itoh, S. Nakada, Asia Oceaniea Geosciences Society 15th Annual Meeting, Jun 2018, Honolulu, oral.

(3) “Effects of suspended sediment matter’s input by high riverine discharge on surface river plume and vertical water exchange: a simulation study for the Tango Bay, Japan”, Hoshiba, Y., Y. Matsumura, H. Hasumi, S. Itoh, S. Nakada, American Geophysical Union 2018 Fall Meeting, Dec 2018, Washington D.C., poster.

・研究組織

氏 名	所 属	職 名	役 割
川崎 高雄	大気海洋研究所	特任助教	研究代表者
松村 義正	大気海洋研究所	助教	研究協力者
干場 康博	大気海洋研究所	特任研究員	研究協力者
羽角 博康	大気海洋研究所	教授	研究協力者

30特1-4

沿岸海洋環境予測モデルにおける精度向上にむけた相互比較

海洋研究開発機構・地球情報基盤センター　石川洋一

研究目的

九州大学応用力学研究所で開発・利用されている海洋大循環モデル RIAMOM と海洋研究開発機構で開発・利用されている海洋大循環モデル OFES,MRI.COM および COCO の高度化のために、結果を相互比較することによりそれぞれのモデルの特性を明らかにするとともに、各モデルの改良点を洗い出す。本年度も昨年度に引き続き、九州大学応用力学研究所が得意とする日本海などの縁辺海や沿岸域を対象とした比較を行うことにより、海洋物理研究における活用に加え、海洋気象、水産、海上交通などの分野での実利用にむけた海洋モデルの改良をすすめる。また昨年度の成果を踏まえ、九州大学応用力学研究所で開発・利用されている海洋大循環モデル RIAMOM と海洋研究開発機構で開発・利用されている海洋大循環モデル OFES,MRI.COM および COCO のモデル結果に関して、日本海をはじめとする日本周辺海域における再現性を比較することにより、モデルの設定やパラメタリゼーションの違いに起因する差異を明らかにする。

結果

縁辺海や沿岸域を対象とした数値モデルの比較のために、数値モデルの高解像度化の取り組みを昨年度に引き続き行なった。北太平洋全域を対象とした高解像度モデルとしては1/108 度でカバーした設定で計算することを目標としているが、MPI 通信の最適化を行い地球シミュレータでも 1/36 度の設定で十分に動くことが示された。　また、次の 3 つから構成される MRI.COM を用いた日本沿岸モデル（単方向ネスティング）を構築した。

L0: 1/4°x1/6°格子全球モデル

L1: 1/12°x1/18°格子北西太平洋モデル

L2: 1/60°x1/90°格子日本近海モデル

このモデルを用いて FORA-WNP30 の水温・塩分を IAU で取り込んだ積分（初期値化）を 1 ヶ月行い、その後予測 run を 1 ヶ月行うとともに、L2 の内側にさらに日本沿岸全域を含む水平約 500m 格子(1/180°x1/270°)の L3 モデルも作成した。

RIAMOM と MRI.COM の比較に関しては、それぞれのモデルを用いて気候変動に伴う日本海の海洋循環の将来予測実験をそれぞれのグループで行った結果についての情報交換を行った。MRI.COM を用いた将来予測計算では異なるシナリオ・外力を用いたケースを複数行なっており、外力によってかなり異なる予測結果が得られていた。RIAMOM を用いた将来予測は 1 ケースのみであったが、MRI.COM で得られた結果の一つと定性的によく

似た結果となっていた。このことは気候変動に伴う将来予測実験を複数のシナリオ・外力で行うことの重要性を示唆するものである。また、それぞれのモデルで得られたプロセスの解析を進めることで、将来変化のメカニズムをより高い信頼性で得られることが期待できるとともに、モデルの改良にむけた課題の抽出を行うことができると考えられる。

成果報告

西川 史朗・石川 洋一（JAMSTEC)，若松 剛（NERSC)：日本周辺海域の気候変動に関する将来予測. 九州大学応用力学研究所研究集会「日本周辺海域における海況のモニタリングと波浪計測に関する研究集会」 2018 年 12 月 13 日.

研究組織

石川洋一（代表）地球情報基盤センター・グループリーダー　研究のとりまとめ

佐々木英治　　アプリケーションラボ・主任研究員　モデル計算および解析

小守信正　　アプリケーションラボ・主任技術研究員　モデル計算および解析

小室芳樹　　北極環境変動総合研究センター・ユニットリーダー　モデル計算および解析

粒子追跡モデルを用いた奄美海域産スジアラ卵仔魚の輸送過程と最大着底率の推定

鹿児島大学　理工学域工学系　加古真一郎

1. はじめに

西太平洋から東インド洋の熱帯～亜熱帯域に棲息するハタ科魚類であるスジアラは、国内外を問わず高級食材として高値で取引されている(宍道,2016)。我が国の南西諸島海域の沿岸漁業者にとっても、本種は最も重要な水産資源の一つである。実際、奄美海域ではこの資源保護のため、過去20年以上にわたって、人工種苗生産や稚魚の放流が鹿児島県水産技術開発センターなどによって実施されている。加えて、一部の漁協では、小型魚の漁獲を禁止する漁獲体重制限などの対策にも取り組んでいる。しかしながら、奄美海域におけるスジアラの漁獲量は1998年をピークに年々減少し、近年も低位横ばい傾向が続いているため、その資源減少が懸念されている。上記以外の資源保護対策の一つとして産卵期・産卵場の保護が想定されるが、その効果は一切不明である。そこで本研究は、高解像度の海洋循環モデルと粒子追跡モデルを組み合わせ、奄美海域産スジアラ卵仔魚の輸送過程とその着底率を推定し、資源保護の有効性を検証した。

2. 使用モデル・実験設定

本研究は、奄美群島周辺を対象海域（126°E-132°E, 26°N-30°N）とし、Kako et al.(2014) と同様の粒子追跡モデルを用いて数値実験を行った。この粒子追跡実験では、主に表層を漂流するスジアラ卵仔魚(Doherty et al., 1994) の輸送過程を推定するため、九州大学応用力学研究所で開発された Data assimilation Research of the East Asian Marine System Energy (DR_E; Liu et al., 2017) の表層流速場を用いた。両モデルの空間解像度は緯度方向に1/60°、経度方向に1/75°、時間解像度は1時間である。

スジアラは、5 -7月における新月の大潮期に産卵し (Ebisawa, 2013)、次の大潮期にその仔魚は稚魚となって着底する (Doherty et al., 1994)。この知見を踏まえて、粒子追跡実験の開始日は2007 - 2015年の当該日とし、着底までの期間を31日と仮定して計算を行った(全27ケース)。スジアラは、サンゴ礁周辺で産卵するので(Samoilys and Squire, 1994)、粒子の初期位置は奄美群島各島の湾口付近などの27地点とし、各地点から粒子を1000個ずつ放流した。スジアラ仔魚の着底域は、サンゴ礁内側の“ガレ場(死んだサンゴが積み重なった場所)”とされている (Light and Jones, 1997) が、空間解像度が約1.5kmであるDR_Eでは、ガレ場内における卵仔魚の漂流・着底プロセスを詳細に再現することはできない。そこで本研究は、計算期間の最後の4日間に、陸に最も近いモデル格子に一度でも侵入した粒子は、そこで着底する可能性があったとみなし、その粒子数を最大着底率として見積もった。

3. 結果

図には示さないが、31日後であっても、奄美群島周辺海域には多くの粒子が存在することが実験を通して明らかとなった。これは、奄美大島と喜界島の間に存在する南向流や、黒潮内側域の高気圧性渦によって粒子が海域内に捕捉されることに起因する。モデル海域内の粒子数に経年・季節変化はあるものの、全ての粒子がモデル海域外へと輸送されることはなかった。 図1は、奄美群島の各島における仔魚の最大着底率を月ごとに積み上げ棒グラフで表したものである。最大着底率は、2013年5月のように約50%に達するケースが存在する一方で、2014, 2015年の6月のように数%程度のケースもある。この経年変化の理由を明らかにする

ため、最大着底率の偏差がその標準偏差よりも高い年と低い年に分け、各月の流速とその回転場のコンポジット平均を計算し、それぞれの全平均場との比較を行った（図 2）。その結果、流速場が最大着底率の年変動に与える要因が 2 つ存在することがわかった。一つ目は、奄美大島北西側の高気圧性渦の強度である。最大着底率が高いケースでは、奄美大島北西沖の流速が強く（図 2g，2i）、負の回転成分が大きい（図なし）。これは、黒潮が例年よりも南下することにより（図 2g，2i：黒線参照）、この海域周辺の時計回りの渦が強化されることに起因する。そして、この渦に多くの粒子が捕捉されるため、同海域の粒子数は増加する。二つ目は、琉球海流の存在である。最大着底率が低いケースでは、北東向きの流れとして特徴づけられる琉球海流が強いため（図 2e，2f）、多くの粒子がモデル海域外へと流される。一方、図 2（h）の様に、琉球海流が弱化すると、黒潮内側域の渦の強度に関わらず、粒子の着底率は上昇する。

4. まとめ

本研究は、海洋循環モデルと粒子追跡モデルを組み合わせ、奄美群島周辺海域におけるスジアラ卵仔魚の輸送過程とその稚魚の最大着底率を推定し、資源保護に対する産卵期・産卵場の保護の有効性を調べた。その結果、稚魚の最大着底率は、奄美大島北部の高気圧性渦と琉球海流の強度に起因して数%から 50%程度まで年変動することがわかった。このことから、産卵期の保護の有効性は、年ごとに大きく異なることが示唆されるが、流速場の予測が可能であれば、産卵期の保護のあり方を毎年きめ細やかに検討できる可能性も示された。

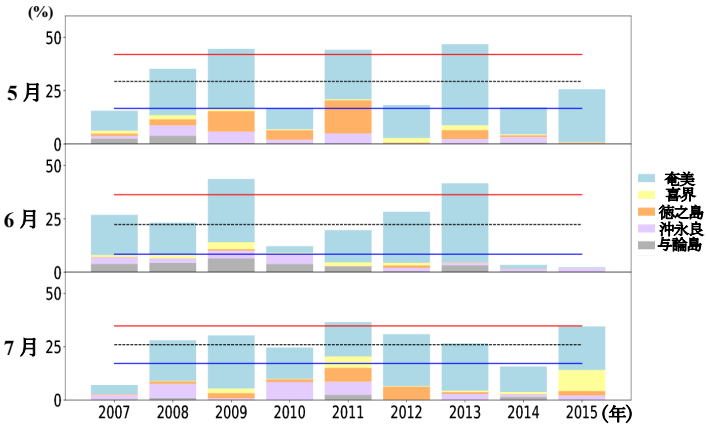


図 1. 奄美群島の年月別最大着底定率。点線は平均値、実線は平均±標準偏差の値を示す。

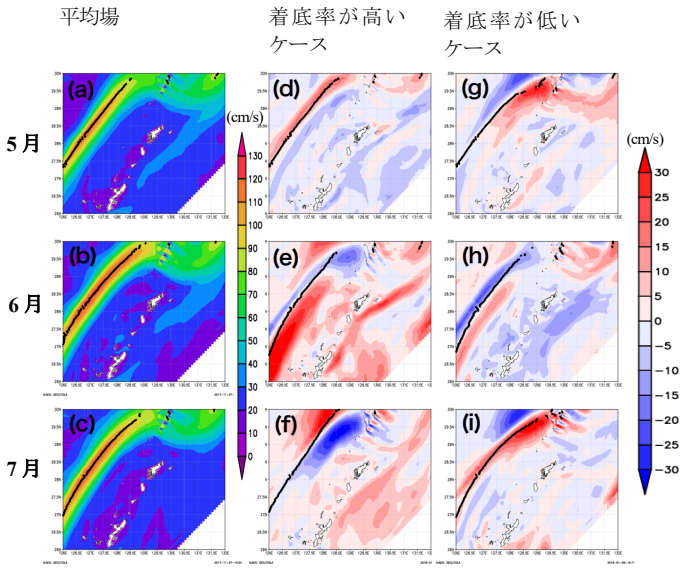


図 2. 流速の全平均場（左）と流速のコンポジット平均値の全平均値からの差。正の値はコンポジット平均の方が平均値と比べて流速が強いことを示す。黒線は各ケースの黒潮の平均流軸位置を示す。

6. 研究体制

代表者	鹿児島大学理工学域工学系	助教	加古　真一郎
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	学術研究員	高山　勝巳
協力者	鹿児島県水産技術開発センター	研究専門員	宍道　弘敏

海洋モデルを用いた、淡水供給の富山湾の海洋構造に対する影響の推定

富山県農林水産総合技術センター水産研究所　小塚　晃

1. 目的

富山湾では、定置網漁業を主体とした沿岸漁業生産が盛んである。漁獲物は、秋から冬にかけて日本海を南下する際に富山湾に来遊する種が多く、漁獲量は魚群の来遊状況と滞留時間による影響を受けていると考えられる。魚群が来遊し湾内に滞留する理由として、南下経路が能登半島によって物理的に遮断されているだけでなく、避寒行動を示す水産生物にとっては水温等の海洋環境も影響していると考えている。

富山県農林水産総合技術センター水産研究所では富山湾とその周辺海域の海洋観測を毎月実施している。この結果から、冬期の湾奥部では、湾口部に比べて約 0.5℃程度温かい暖水域が形成されることがわかっている。この原因として、湾奥部では河川水の影響を受けて海面冷却が遅れるためと考えているが、そのメカニズムは不明である。本研究では、河川水の富山湾に対する影響を調べるために、海洋同化モデル DREAMS_M において海洋物理環境が再現できているかを確認し、暖水域の形成過程を解明する。

2. 方法

本研究では、DREAMS_M から日別の水深 1～200 m（17 層）のデータを使用した。

冬期に富山湾奥部に暖水域が形成される様子が再現されているかを確認するために、1992 年から 2017 年の 9 月 1 日～翌年 3 月 1 日について、月単位の海洋観測結果と DREAMS_M のデータから平均水温場を作成した。

DREAMS_M における湾口部（北緯 37.4 度、東経 137.5 度）と湾奥部（北緯 36.867 度、東経 137.083 度）の 2 地点において水温・塩分の鉛直分布の時間変化を作成した。

3. 結果および考察

実測値と DREAMS_M の平均水温分布から、両者とも 12～3 月にかけて湾口部より湾奥部の方で水温が高くなっていた。水深 100 m における湾口部と湾奥部の水温差は 1 月に最高となり、実測値の水温差は 0.50℃（図 1）、DREAMS_M では 0.71℃であった（図 2）。実測水温の方がやや低めであるが、DREAMS_M で概ね湾奥部に暖水域が形成される様子が再現されていた。

水温・塩分の鉛直分布の時間変化の例として、2016 年 9 月 1 日～2017 年 3 月 1 日の期間の湾口部、湾奥部における DREAMS_M の結果をそれぞれ図 3，4 に示した。等温線が 5℃ごとに太線で描かれており、水深 100 m が 15℃を下回る時期は、湾口部では 12 月中旬（図 3）、湾奥部では 12 月下旬（図 4）で、湾奥部の方が水温の低下が遅くなっていた。また、12 月中旬から 2 月中旬にかけて、湾口部では等温線が垂直であるのに対し、湾奥部では右に凸の曲線を描いている。湾奥部の凸部分には上層部よりも水温が高く、極大となる水塊が存在していることを示している。塩分も合わせて見ると、上層部は低温低塩分からなる低密度水で、その下に高温高塩分の高密度水が存在し、成層を保っていることが分かる。

冬期の富山湾奥部に暖水域が形成されるメカニズムは、河川水と海水が混合し低密度水が上層にとどまることによって、高塩分の対馬暖流水の鉛直混合および冷却を遅くする効果があるためと考えられた。今後、対馬暖流の塩分や、河川流入量などの要素がどの程度、暖水域の形成に影響するのか検討する必要がある。

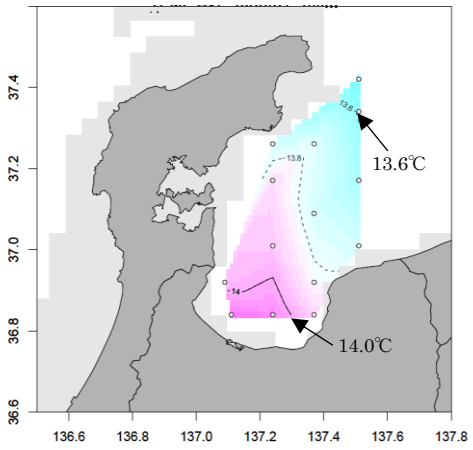


図 1. 観測データを用いた
平均水温分布（1 月 100 m）
図中の白丸は観測点を表す

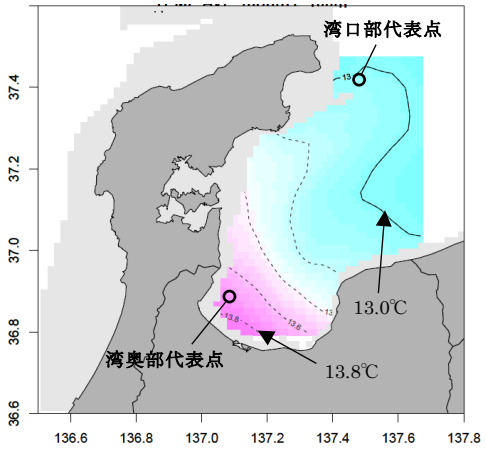


図 2. DREAMS_M の平均水温分布（1 月 100 m）

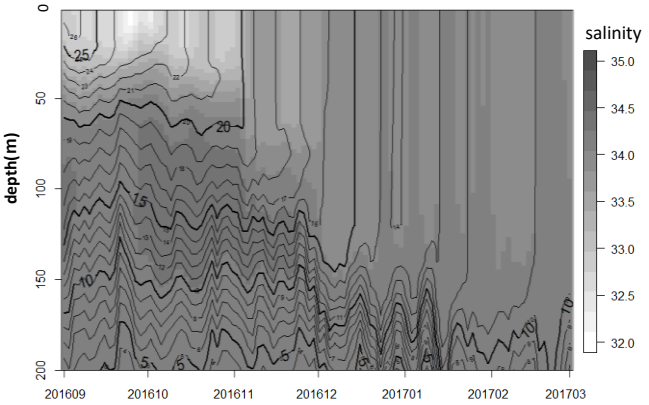


図 3. 湾口部の水温・塩分の推移

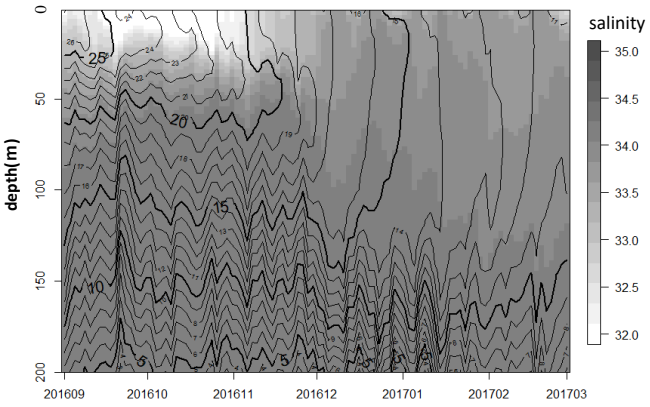


図 4. 湾奥部の水温・塩分の推移

4. 発表等実績.

なし

5. 研究組織

研究代表者	富山県農林水産総合技術センター水産研究所	小塚　晃	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	九州大学応用力学研究所	千手　智晴	准教授

対馬海峡から日本海南西海域にかけての海洋環境モニタリング

－数値モデルとの比較データの収集－

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，当海域の数値モデルと比較しうる観測データの収集を目指ざす。

2. 観測

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。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。同海域で，萩－見島間のフェリー「おにようず」（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。

数値モデルに同化する観測データを得るために，漁業者が操業中に観測しやすい CTD として smart-ACT（JFE アドバンテック社製）を開発している。多くの漁業者が観測を行えば，同化モデルにとって，時空間的に密なデータが得られると考えられる。長崎大学水産学部附属練習船「長崎丸」を用い，対馬海峡において，この smart-ACT の動作テストを行った。ここで，長崎丸の CTD（SBE 911plus）と smart-ACT の同時観測を行った。smart-ACT データは，タブレット端末（またはスマートフォン）のアプリケーション（いであ株式会社の開発）で収集できる。タブレット端末が一旦インターネットに接続されれば，自動的に陸上研究室から観測データを取得できる。本報告では，長崎丸 CTD と smart-ACT で得られた水温・塩分分布を示す。

3. 結果

2018 年 9 月 15 日における水温と塩分の鉛直断面をそれぞれ図 1 と図 2 に示す。長崎丸 CTD と smart-ACT の観測結果には，大きな差異はなかった。ただし，smart-ACT の塩分分布は，長崎丸 CTD のそれと比べ，小さいスケールの構造が確認でき，観測ノイズの可能性も残された。

博多－対馬間の東水道中央部の表層は高温の対馬暖流水であった（図 1）。対馬以北の西水道表層は低塩化しており，長江希釈水の影響を受けていると考えられた（図 2）。東水道・西水道ともに，下層（約 100 dbar 深）には，低温・高塩分水が分布していた。

謝辞

CTD 観測では，長崎丸の船長をはじめとする乗組員の皆様の協力が不可欠でした。ここに感謝の意を表します。

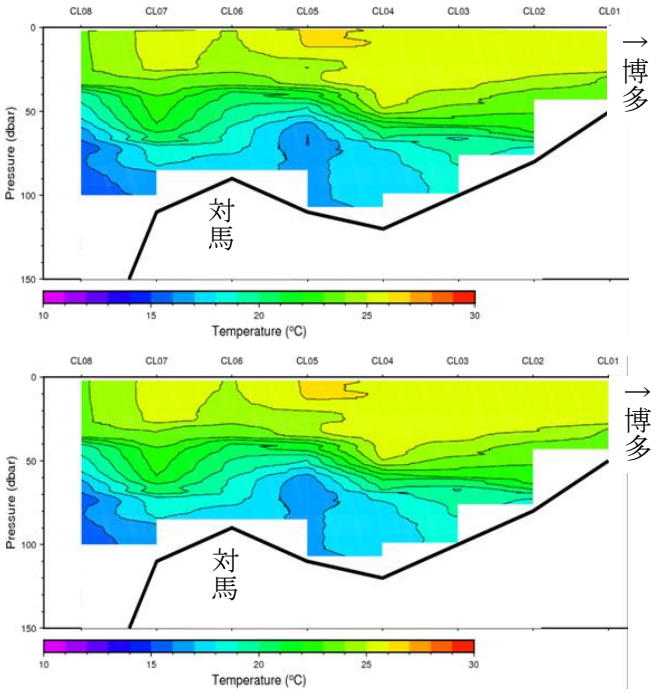


図 1. 対馬海峡横断線における水温の鉛直断面（上図：長崎丸 CTD，下図：smart-ACT）。

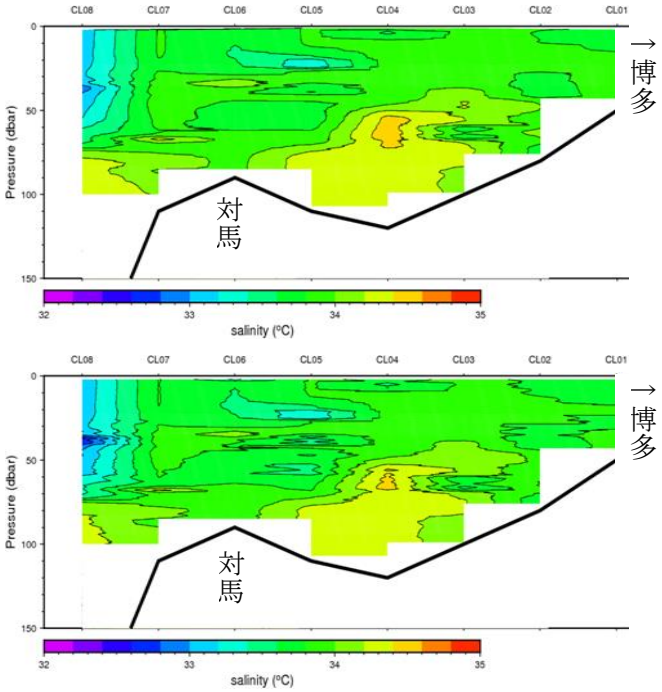


図 2. 対馬海峡横断線における塩分の鉛直断面（上図：長崎丸 CTD，下図：smart-ACT）。

研究組織

長崎大学 大学院 水産・環境科学総合研究科	滝川哲太郎（研究代表者）
九州大学 応用力学研究所	千手智晴（所内世話人），広瀬直毅（研究統括者）
福岡県 水産海洋技術センター	森　慎也，林田宜之（研究協力者）
山口県 水産研究センター	渡辺俊輝，廣畑二郎（研究協力者）
島根県 水産技術センター	金元保之（研究協力者）
愛媛大学 沿岸環境科学研究センター	森本昭彦（研究協力者）

全球雲解像モデルを用いた雲エアロゾル相互作用の放射強制力

名古屋大学工学研究科　佐藤陽祐

1、目的

本研究ではエアロゾル輸送モデル（SPRINTARS[1]）と全球雲解像モデル(NICAM[2])を結合したNICAM-SPRINTARS の全球実験とその結果の解析によって、気候予測の最大の不確定性要素であるエアロゾル・雲相互作用の理解の深度化を目指した。従来気候予測に用いられてきた大循環モデル（GCM）はその解像度の粗さから雲を直接計算することができず、エアロゾルが雲に及ぼす影響も直接できないため、エアロゾル・雲相互作用の見積もりには大きな不確実性が伴っている[3]。この不確実性低減に向けて、平成 29 年度より、雲を全球スケールで直接解像することができる全球雲解像モデル NICAM-SPRINTARS の計算を行っている。本年度は平成 29 年度までに終了した計算結果を詳細に解析し、エアロゾル・雲相互作用の不確実性を評価した。

2、数値モデルと解析方法

本年度は平成 29 年度までに計算が終了した NICAM-SPRINTARS [4]の、全球 14km 解像度で1年間の積分の計算結果を解析した。エアロゾル・雲相互作用の指標として、平成 29 年度と同様に、Cloud Susceptibility （λ [5]）を用い、雲頂温度が 273 K よりも高い暖かい雲を対象として解析を行った。本年度はNICAM-SPRINTARS の結果から求めたλと、Nakajima and Schulz(2009) [6]を参考に、2000 年代から様々な方法によって求められているλを比較した。

3、実験結果

図 1 は 2000 年代から先行研究によって求められたλ（図 1 の上から 3 番目以降）と、本研究で平成 29 年度までに求めた NICAM-SPRINTARS から算出したλの値（図 1 の上から2番目）である。2000 年代前半の研究では、多くの先行研究がλを正の値と報告している一方、本研究で求められた NICAM-SPRINTARS のλは負の値となっている。近年の衛星観測から得られたλ [6]や、また近年報告されている理論的な考察[7]ではλは負の値になるとされており、本研究の結果は近年の報告を支持するものになっている。

しかしながら、衛星観測を用いた最新の結果では、λは 2000 年代に考えられていたよりも 2～3 倍程度大きな正の値になると報告されており（図 1 の一番上[8]）、λの見積もりの不確かさは大きく、エアロゾル・雲相互作用の不確実性は依然として大きいことが示された。

4、今後の課題

本研究の目的である放射強制力の議論をするにあたっては、本研究で明らかになったエアロゾル・雲相互作用の指標（λ）のばらつきの理由を明らかにしなければならない。そのため、本年度は放射強制力の見積もりまで至ることができなかった。このようなλのばらつきの要因は、Rosenfeld et al. (2019) [8]が指摘しているように、図1に提示したそれぞれの文献で報告されているλの求め方が必ずしも一致していないことにも起因している可能性がある。そのため、今後は先行研究で求められたλの算出方法を検証して、同じ条件でλを算出するなどして、λの違いを生む要因を明らかし、その上で、放射強制力の評価を行って行く必要がある。

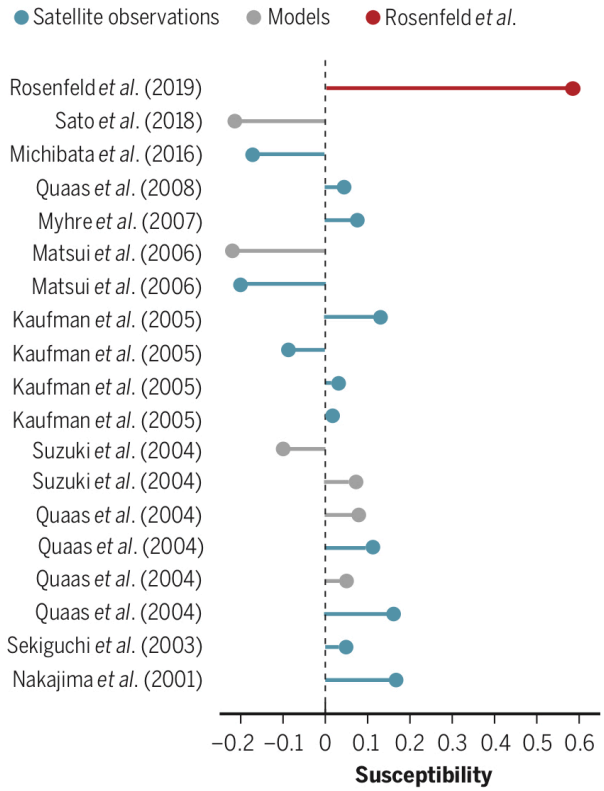


図1：本研究で求めたλ（上から2番目）と、先行研究で求めたλの見積もり。

(Sato and Suzuki, 2019 [9]から引用)

5、研究成果報告

本研究で得られた成果は Science 誌の一般向けの記事（Perspective）として発表された[9]。また Nature Communication 誌から、成果として発表された（昨年度の報告書作成時には未発表であった）[10]。

参考文献

1. Takemura T et al., J Geophys Res. 2005;110: D02202. doi:10.1029/2004JD005029
2. Satoh M et al., Prog Earth Planet Sci. 2014;1: 18. doi:10.1186/s40645-014-0018-1
3. Stocker TF et al. IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. IPCC. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press; 2013.
4. Suzuki K, Nakajima T, Satoh M, Tomita H, Takemura T, Nakajima TY, et al. Global cloud-system-resolving simulation of aerosol effect on warm clouds. Geophys Res Lett. 2008;35: L19817. doi:10.1029/2008GL035449
5. Ghan S et al., Proc Natl Acad Sci. 2016; 201514036. doi:10.1073/pnas.1514036113
6. Nakajima T, Schulz M. What do we know about large-scale changes of aerosols, clouds, and the radiation budget? In: Charlson JH, Robert J, editors. Struüngmann Forum Report: Clouds in the Perturbed Climate System Their Relationship to Energy Balance, Atmospheric Dynamics, and Precipitation. Cambridge: MIT Press; 2009. p. 597.
7. Stevens B., J Clim. 2015;28: 4794–4819. doi:10.1175/JCLI-D-14-00656.1
8. Rosenfeld D et al., Science. 2019;363: eaav0566. doi:10.1126/science.aav0566
9. Sato Y, Suzuki K. Science. 2019;363: 580–581. doi:10.1126/science.aaw3720
10. Sato Y, et al. Nat Commun. 2018;9: 985. doi:10.1038/s41467-018-03379-6

海底資源探査用グライダー型海中ビークルの開発

九州大学大学院工学研究院　山口　悟

1.　研究の目的

近年，日本近海の海底資源の開発が注目を集め，海底資源の賦存量や賦存場所を把握するための様々な調査方法が提案されている。本研究では，OBEM（Ocean Bottom Electromagnetometer）を用いた調査方法に注目し，グライダー型水中ビークルに OBEM を搭載し，自律的に観測・移動を実施するための観測機材の開発を試みた。本装置の実用化により，OBEM 計測において現在問題となっている船舶による投入・回収・移動のための作業時間およびコストの増大が解消され，OBEM による広範囲，長時間の連続調査が効率的に実施可能になると考えられる。

本年度の研究では，特に潜降・浮上装置の開発とその制御系の設計を実施した。すなわち，水中重量調節装置の開発と特性の把握，これに基づく制御系設計に取り組み，九州大学応用力学研究所における水槽試験等を実施した。開発中の機体の写真を Fig. 1 に示す。

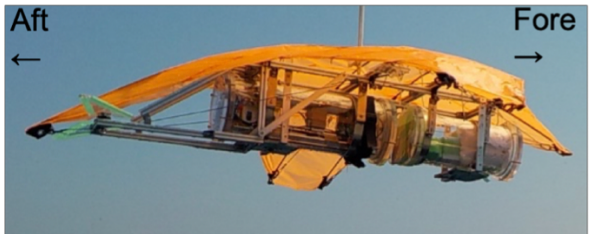


Fig.1 Underwater glider

2.　グライダー型海中ビークルの概要

開発中のグライダー型海中ビークルは装着された翼により滑空することで目的の海底計測点に移動し，着底後調査を行う。その後，適当な高度まで浮上し，再び次の調査地点へ滑空により移動する。OBEM による計測を行うため，本機体はセンサー用電極を装着した十字形のアームを有しているが，滑空中の流体抵抗を減少させるために，アームを覆うように翼面を形成している。翼面下には，前後に 2 つの耐圧容器を有し，前方容器には水中重量調節装置，後方容器には運動制御装置（重心移動装置）やセンサー，コンピュータが搭載される。Fig. 2 に機体の内部構造を示す。

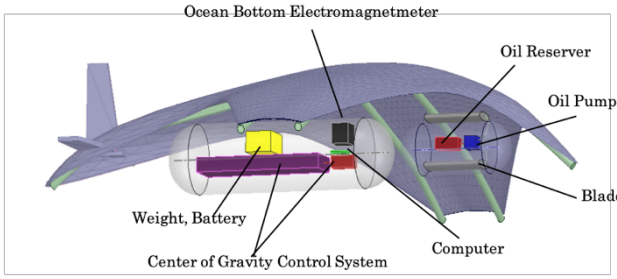


Fig. 2 Construction of the vehicle

3.　水中重量調節装置の特性調査と運動制御系の開発

これまでの研究で実施された実海域試験結果に基づき運動制御系を設計した。ここでは，制御系を機体に実装するために運動制御用の重心移動装置と水中重量調節装置のハードウェアを開発し，これらの動特性を実験により求め，運動モデルを構築する。Fig. 3 に水中重量調節装置と重心移動装置の写真を示す。また，水中重量調節装置の水槽実験の様子と重量変化の時刻歴を Fig. 4 に示す。図には理論値，空中および水中における実験結果が合わせて示されている。

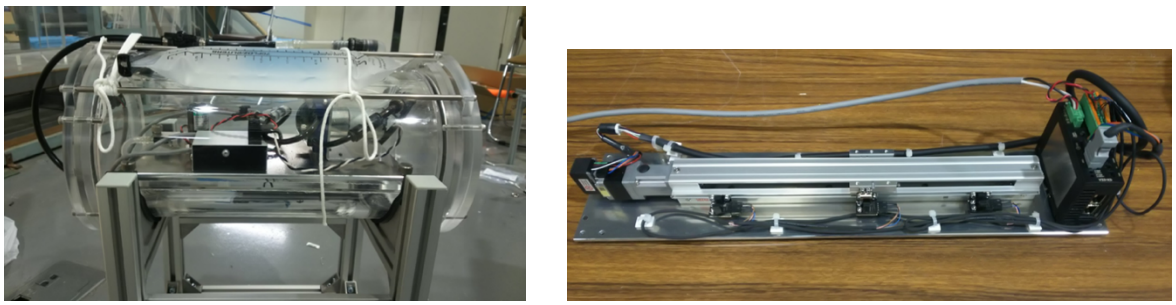


Fig. 3 Buoyancy control and weight shift devices

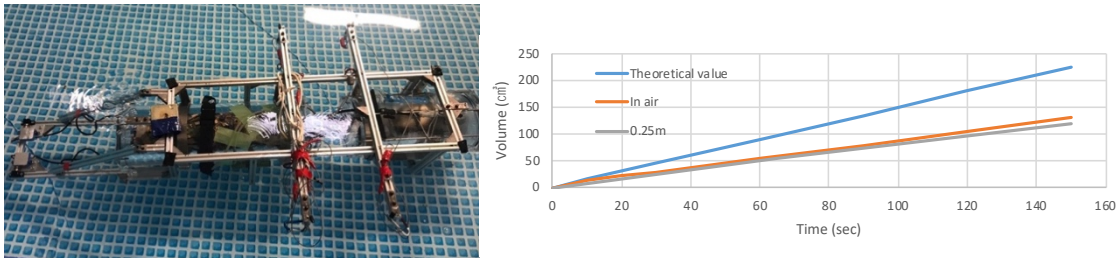


Fig.4 Experimental results for buoyancy control device

調査結果に基づき，着底動作における運動制御系の検討を行った。PID 制御によるシミュレーション結果の一例を Fig.5 に示す。図は上より，着底時の機体位置を示す軌跡，深度時刻歴およびピッチ角，重心移動装置，前進速度，潜降速度の各時刻歴を示す。本条件における滑空比は約 1:4 である。図中の 3 種類の結果はそれぞれ，海底からの高度 3m, 4m, 5m で着底用運動制御系を作動させた場合の結果であり，4m, 5m で始動した場合には着底時に前進速度がほぼ 0 となっていることが分かる。

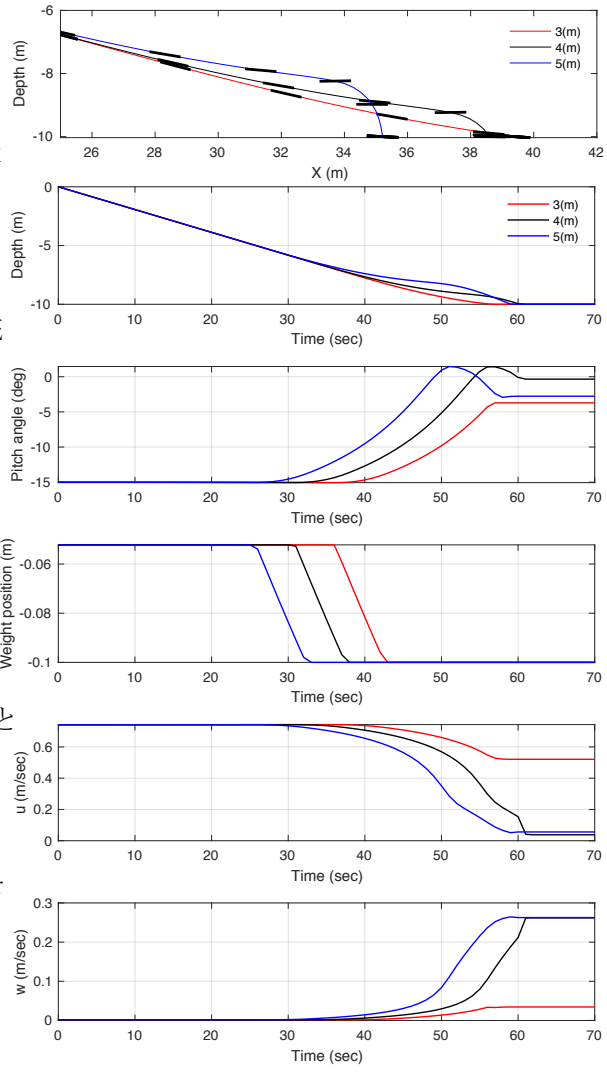


Fig.5 Landing controlled by a PID controller

4. まとめ

海底資源探査用グライダー型水中ビークルの機体開発と潜降・浮上用運動制御系の開発を行った。すなわち，水中重量調節装置の動特性を調査するため，水槽実験を実施した。また，数値シミュレーションにより着底時の機体運動を調査し，重心移動装置を PID 制御系により制御することで適切な着底動作が可能となることを確認した。

5. 成果報告

1) Yamaguchi, S et. al. (2018), “Gliding Performance of an Underwater Glider for Ocean Floor Resources Exploration”, *Proceedings of the Twenty-eighth (2018) International Ocean and Polar Engineering Conference*, 405-409.
2) Yamaguchi, S (2018), “Landing Point Control of an Underwater Gliding Vehicle for Ocean Floor Resources Exploration”, *The 16th IAIN World Congress 2018.*

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 1m / 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，日向灘における表層流況変動の把握を目的に，海洋レーダによる試験観測を実施している。本報は，両局で取得した流速値の精度を検証した。

2. 使用したデータ

短波海洋レーダは，琉球大学工学部所有の 24.5MHz 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「宮崎局」）に，2017 年 3 月に野島漁港（以下「野島局」）に設置した（図 1）。このうち，2017 年 3 月～2018 年 1 月末までのデータを使用した。短波海洋レーダのシステム構成及びレーダ局並びにデータ処理は既報に準じた（藤井，2001）。解析では，両局のレーダで計測された視線方向流速を，時刻補正してベクトル合成した，2 時間毎の二次元格子点の表層流を使用した（図 2）。

現場流速は，約 30km 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

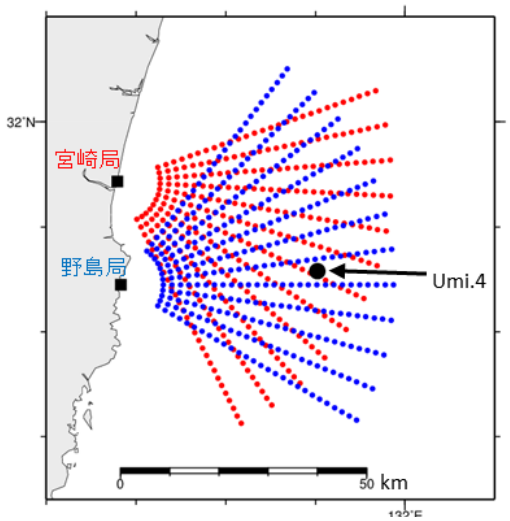


図 1　各海洋レーダ局の位置と観測ビーム方向。
●は表層型浮魚礁うみさち 4 号の位置を示す。

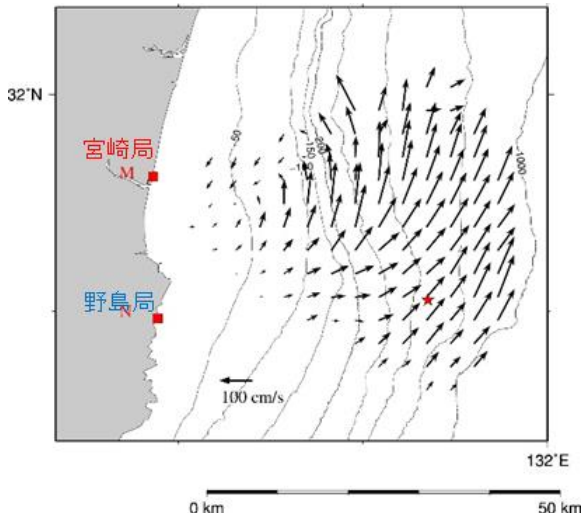


図 2　海洋レーダで計測した流速ベクトル(2017/10/5 18:00)。
★は表層型浮魚礁うみさち 4 号の位置を示す。

(NJC-30C-10, 240kHz)による 10m 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，両データが取得されていた約 7 ヶ月間で解析した。

3. 結果

移動平均時間に対するレーダ流速と 4 号流速の相関係数を比較すると(図 3，左図)，どの移動平均時間に対しても東西流速は南北流速より高い相関係数であった。各成分を詳細に見ると，東西方向は移動

平均時間によらず相関係数 0.8 以上と高いが，南北成分は移動平均が 24 時間前後の約 0.7 を境に，24 時間未満で低く，それ以上で高くなっている。これらを反映して，1 日平均したレーダ流速と 4 号流速の相関係数は，東西流速で 0.92 と高く(図 3，中図)，南北成分が 0.62 と低い(図 3，右図)。両レーダの視線方向流速を合成した流速ベクトルの精度は, 両レーダのビーム交差角が 90° の時に最も高精度となり，それより小さい角度になるにつれて精度が低下することが知られている。両局のビーム方向は主に東西方向に向いていたため，レーダ流速と 4 号流速の東西成分の相関係数は高いが，ビーム方向と直角して交差角 28.4 と低い南北成分の相関係数は低くなったと考えられる。以上のことから，海洋レーダによる流速ベクトルデータを使用する際の留意点として，流速ベクトルの南北成分は東西方向に比べて低精度であることに加えて, 高精度となる 1 日平均値を使用したほうがよいと考えられる(図 4)。今後は，1 日平均の流速値を解析して，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。

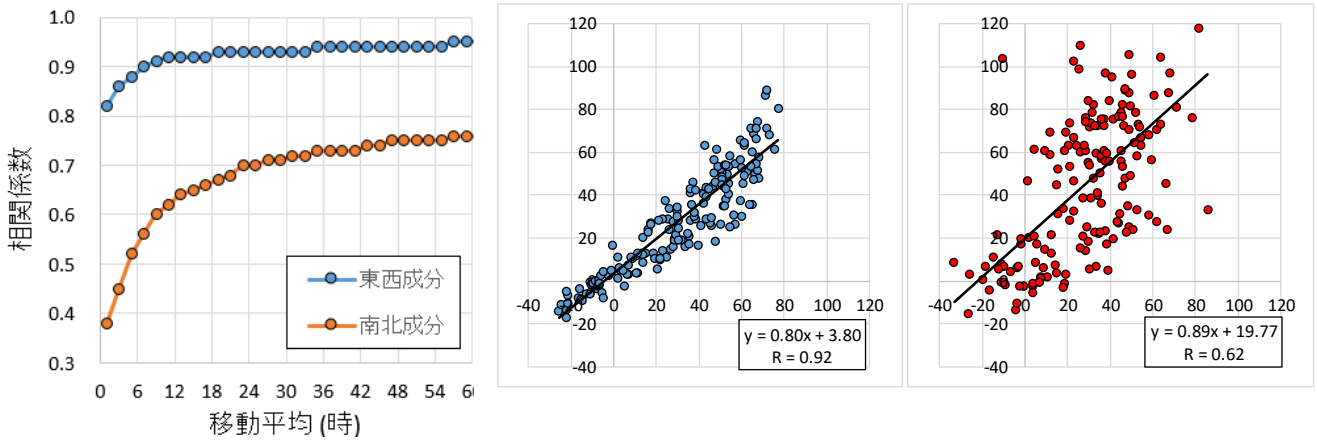


図 3　レーダ流速と 4 号流速の移動平均時間に対する相関係数(左図)，1 日平均のレーダ流速と 4 号流速の東方成分(中図)と北方成分の散布図(右図)

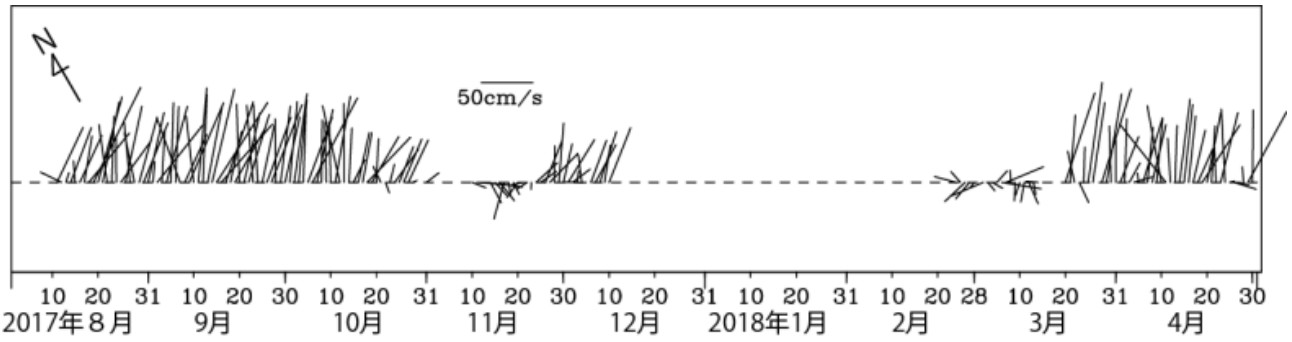


図 4　4 号近傍における HF レーダによる日平均流速ベクトルの時系列

4. 論文等　なし

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	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	琉球大学工学部	教授	藤井　智史
協力者	琉球大学工学部	修士 1 年生	池原　日向

ハイブリッド式自律型海中ロボットの運動性能評価に関する開発

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，海洋環境生態系のモニタリングを行うためのハイブリッド式自律型海中ロボット（HAUV：Hybrid-type Autonomous Underwater Vehicle ）KAUBE-1500 の運動性能を明らかにすることである。この機体は，小型高圧海水ポンプを用いた浮力調整装置と重心移動装置，4 基の水中スラスターを装備し，水中グライダーとしての推進性能と通常の AUV としての運動性能を持ち合わせている。また，浮力調整装置と重心移動装置を適切に制御することによって，鉛直姿勢での潜入および浮上を実現することができる。

Fig.1　ハイブリッド式自律型海中ロボット KAUBE-1500

グライディングから水中（海底）での水平移動への遷移および鉛直姿勢への円滑な運動を実現するためには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，海中ロボット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。また，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極め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自律型海中ロボットに係る研究の飛躍的な進展が図れると期待した。

□研究の成果

本研究では，九州大学応用力学研究所の深海機器力学実験水槽においてハイブリッド式自律型海中ロボット KAUBE-1500 の水槽試験を実施し，その潜航性能を明らかにすることができた。KAUBE-1500 の仕様を Table 1 に，水槽試験の様子を Fig.2 に示す。水槽試験では，遠隔操縦によって浮力調整装置および重心移動装置を制御して機体の姿勢を変化させて垂直の潜入と浮上を実現できることを確認した。また，水中スラスターを駆動させて円滑な姿勢変化ができることを確かめることができ，本機体が所期の目的を果たすことのできる潜航性能を備えていることが明らかとなった。この水槽試験を経て，12 月初旬に鹿児島湾において実海域試験を実施することができたことを附記する。

Table 1　Specifications of KAUBE-1500.

Length	2.650 m
Breadth (wing span)	1.560 m
Height (including upper rudder)	1.060 m
Diameter of fuselage	0.262 m
Mass	abt. 232 kg
Volume of ballast tank	10.0 ℓ
Cruising speed	0.17 m/s
Maximum operational depth	1,500 m

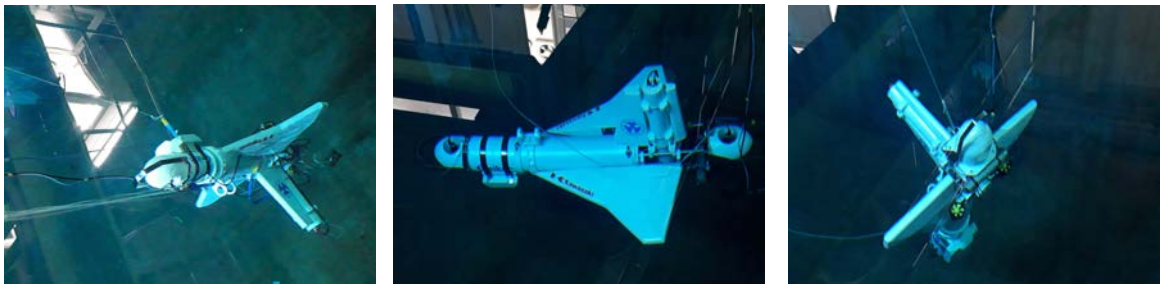


Fig.2　ハイブリッド式自律型海中ロボット KAUBE-1500 の潜航試験の様子
（右より，潜入時・水平潜航・浮上時）

□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
太田 稔宏	永光産業（株） 大阪府立大学大学院	代表取締役社長 社会人ドクター	実験の解析・評価
村山 豊	永光産業（株）	技術部	実験補助
山下 清司	神戸市産業振興財団	顧問	水槽試験の助言
中村 昌彦	九州大学・応用力学研究所	准教授	所内世話人

□研究成果の報告について

共同研究先との協議により，現在，知的財産権の関係で公表を見合わせています。

海洋環境シミュレーション水槽とループ法を使用した吹送距離延長法の確立

兵庫県立大学大学院工学研究科機械工学専攻　高垣直尚

・要旨

海洋や河川上で風シアが生成要因となって発生する風波の発達は，大気海洋間の運動量・熱・物質輸送に影響を及ぼすことから，この各種の輸送量を計測し正確にモデル化するためには，外乱を除去可能な風波水槽を使用することが重要である．今年度は，共同利用施設である九州大学応用力学研究所の風波水槽を使用して,（１）風波の発達区間に関する解析,（２）高風速対応水槽への改修工事および準備実験,を行った．その結果,（１）の解析および（２）の改修工事等を予定通り実施することが出来た.

・序論

海洋や河川上で風シアが生成要因となって発生する風波の発達は，大気海洋間の運動量・熱・物質輸送に影響を及ぼすことから，この各種の輸送量を計測し正確にモデル化するためには，外乱を除去可能な風波水槽を使用することが重要である．しかし，風波水槽では，水槽長さの 100 m 程度までしか風波を発達させることは出来ず，実際の海洋での風波（30 km 程度発達し続ける）を，現在の風波水槽で生成することは不可能である．そこで本研究では，九州大学応用力学研究所の海洋シミュレータ水槽を使用して，波の持つ性質を示す統計量が同じ波を風波水槽入口から何度も送ることで長い吹送距離で発生する波を再現する，いわゆるループ法の確立を目的とする．今年度は，風波の発達区間，いわゆる吹送距離，に関する解析および高風速対応水槽への改修工事および準備実験を行った．そこで，以下では高風速対応水槽への改修工事の内容・結果について報告する.

・実験方法および実験結果

昨年度までの大型風波水槽を用いた実験では，高風速時にテストセクション末端部で砕波が水槽外部に漏れ出すことや，天板が強風により吹き飛んでいくといった問題があったために，高風速下での風波実験が不可能であった．今年度は上記の問題点を解決すべく対策として，液滴除去装置の設置および風波水槽上部の天板強化を行った．同時に，より高風速を実現するため，ファン回転効率を上げるためのグリス注入および整流胴のメッシュ除去も行った．その結果，海水面上高さ風速であるU_{10}が33.6 m/s以上の高風速を実現可能となり，九州大学の大型風波水槽において，台風シミュレーション水槽を作製することに成功した.

・成果報告（論文、学会発表リスト等）

1. Takagaki, N., K. Takane, H. Kumamaru, N. Suzuki, and S. Komori (2018), Laboratory measurements of an equilibrium-range constant for wind waves at extremely high wind speeds, Dynamics of Atmospheres and Oceans, 84, 22-32, doi:10.1016/j.dynatmoce.2018.08.003.
2. 高垣直尚，高根慧太，高畑俊作，岩野耕治，鈴木直弥，小森 悟，強風速下における抗力係数と風波

スペクトルの評価，日本流体力学会　年会 2018，大阪大学　豊中キャンパス，2018 年 9 月 2～6 日

3. 磯川橘花，高根慧太，高垣直尚，高風速時の気液界面を通しての運動量輸送量の測定，日本機械学会関西支部学生発表会，立命館大学，2019 年 3 月 10 日

・研究組織

研究代表者：高垣直尚

研究協力者：高根慧太

研究協力者：髙畑俊作

研究協力者：磯川橘花

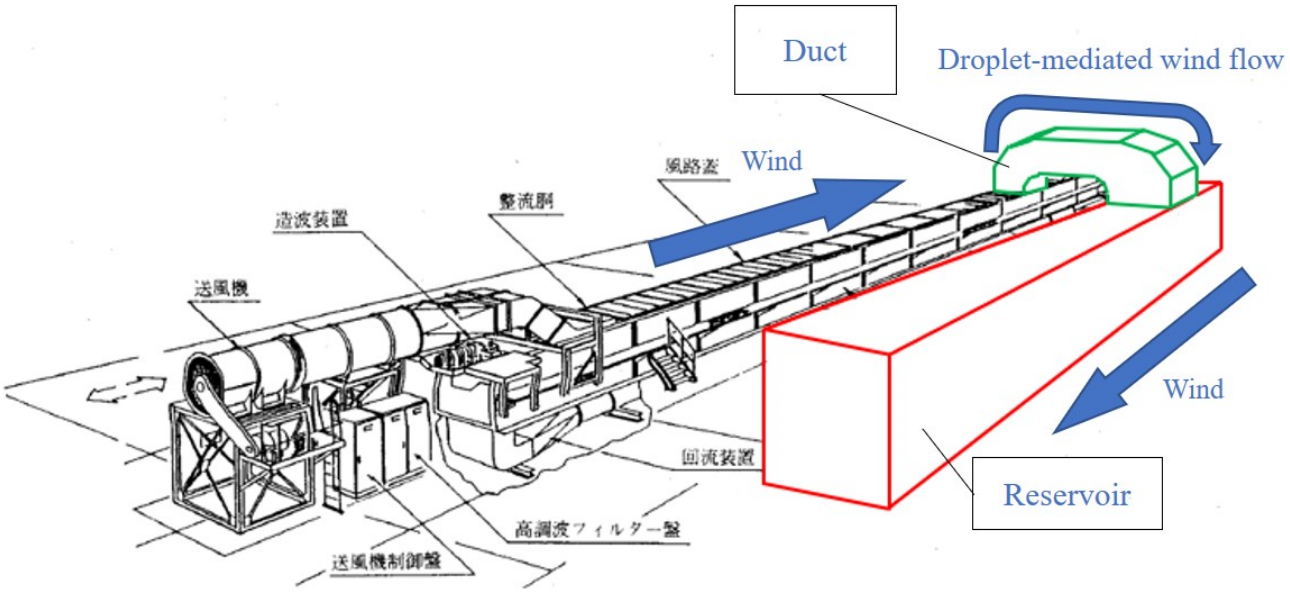


Fig. 1： Schematic of droplet removal system.

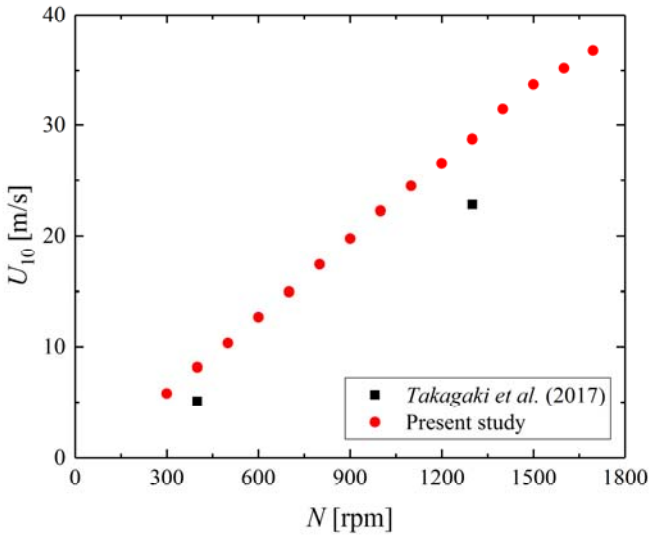


Fig. 2：Relationship between rotation speed N and wind speed at 10 m height U_{10}.

30A0-6

衛星・地上ライダ／レーダ解析のための粒子散乱アルゴリズム開発

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

氷雲の生成や雲微物理特性を明らかにするには、雲粒子の形状等による光学特性の違いに敏感なライダ/レーダ観測を地上と衛星の両面から行い複合的に解析する事が有効である。本課題では九大応力研大気物理研究室が主体となって開発している多重散乱ライダ及び、衛星ライダ／レーダの解析に適用可能な多重散乱物理過程モデルの検証等のための技術支援を行った。また気象研究所で開発した氷晶モデル及び散乱特性計算手法により、大気物理研究室で開発しているレーダ・ライダ複合解析による氷雲解析アルゴリズムの基礎部分である散乱理論計算データの拡充を図った。

・研究方法

ライダ多重散乱計算では、これまでに開発したBackward Monte Carlo法による多重散乱コードに加え、計算効率と汎用性をより高めForward Monte Carlo型に改良したものを開発する。氷晶散乱特性については、粒子形状や大気中での配向の設定、散乱計算手法を精査し、散乱特性計算を実施する。

・研究結果

衛星・地上ライダの観測条件で、開発したモンテカルロ法を用いたライダ多重散乱コードと国際的に開発されている複数のモンテカルロ手法との相互比較を行った結果、計算結果に良い整合性が得られた[1]。また、本課題の世話人である大気物理研究室 佐藤助教が開発したベクトル型のライダ多重散乱物理過程モデル[1][15]では、モンテカルロ手法に対して良い精度で初めて高速に衛星ライダの偏光成分を取り扱うことが可能となった([9]-[11])。これらの研究成果は国際学術誌Optics ExpressにおいてEditor's Pickに選出された[1]。

氷晶のライダ後方散乱特性については、これまでの研究により気象研で開発した改良型幾何光学近似法（Geometrical Optics-Integral Equation: GOIE）と、Borovoi 教授(V.E.Zuev Institute of Atmospheric Optics)によるPhysical-Optics approximation (PO)法がほぼ同じ後方散乱特性を算出できることが明らかとなった。これを受けて、PO法での計算が困難であり、またHIMAWARI8号データ解析にも用いられている複雑形状粒子のモデルであるボロノイ型凝集体氷晶モデル[3][5]について、GOIE法によるライダ3波長での後方散乱特性の計算を実施し、その結果をライダ解析アルゴリズムの基本データとして提供した[14]。

ライダ/レーダによる大気観測の今後の発展を見据え、内部混合を考慮したエアロゾル形状モデル[2]や、X線マイクロCTによる積雪断面画像の解析から開発した雪粒子モデル[6][16]、また雪粒子の融解を考慮した2成分系粒子の可視からマイクロ波における散乱計算手法の開発を行った[7][8]。これら粒子モデルのライダ/レーダ散乱特性を計算してデータベースに加えることにより、より高度な解析アルゴリズム開発の実現が期待される。

・成果報告

査読付き学術論文

[1] Sato, K., H. Okamoto, H. Ishimoto, 2019: Modeling the depolarization of space-borne lidar signals. Optics Express, 27, A117-A132.

[2] Ishimoto, H., R. Kudo, and K. Adachi, 2019: A shape model of internally mixed soot particles derived

from artificial surface tension. Atmospheric Measurement Techniques, 12, 107-118.

[3] Letu, H., T. M. Nagao, T. Y. Nakajima J. Riedi, H. Ishimoto, A. J. Baran, H. Shang, M. Sekiguchi, and M. Kikuchi, 2018: Ice cloud properties from Himawari-8/AHI next-generation geostationary satellite: Capability of the AHI to monitor the DC cloud generation process. IEEE Transactions: Geoscience and Remote Sensing, 1-11.

[4] Hara, Y., T. Nishizawa, N. Sugimoto, K. Osada, K. Yumimoto, I. Uno, R. Kudo and H. Ishimoto, 2018: Retrieval of Aerosol Components Using Multi-Wavelength Mie-Raman Lidar and Comparison with Ground Aerosol Sampling. Remote Sensing, 10, 937.

学会発表（主著）

[5] Ishimoto, H., K. Masuda, Development of particle optical models for satellite remote sensing, CARE-2018, 2018 年 8 月, 中国, 北京

[6] Ishimoto, H., T. Tanikawa, S. Adachi, and K. Masuda, Shapes and Light Scattering Properties of Snow Particles Estimated from X-ray Micro-CT Imagery and Geometrical Optics Method Calculations, PIERS2018 Toyama, 2018 年 8 月, 富山県富山市

[7] 石元裕史、増田一彦、谷川朋範, 近赤外波長でのぬれ雪粒子の光散乱計算, 日本気象学会 2018 年度秋季大会, 2018 年 10 月, 宮城県仙台市

[8]石元裕史, 足立アホロ, 安達聖, レーダー反射特性解析のための融解雪片モデルの開発, 日本気象学会 2018 年度春季大会, 2018 年 5 月, 茨城県つくば市

学会発表（共著）

[9] Sato, K., H. Okamoto, H. Ishimoto, Development and Application of a physical model-based active sensor retrieval scheme, JpGU Meeting, 2018 年 5 月

[10] Sato, K., H. Okamoto, H. Ishimoto, Physical model approach (PM) for the analysis of active sensor systems, 19th Coherent Laser Radar Conference, 2018 年 6 月

[11] Sato, K., H. Okamoto, H. Ishimoto, S. Katagiri, EarthCARE L2 cloud/precipitation algorithms, 7th International EarthCARE Science Workshop & 1st ESA EarthCARE Validation Workshop, 2018 年 6 月

[12] Okamoto H., K. Sato, H. Ishimoto, S. Katagiri, Analysis of cloud and precipitation microphysics: From A-train to EarthCARE, JpGU Meeting, 2018 年 5 月

[13] Okamoto H., K. Sato, S. Katagiri, E. Oikawa, H. Ishimoto, Observations of cloud- and precipitation-microphysics and vertical motion, 7th International EarthCARE Science Workshop & 1st ESA EarthCARE Validation Workshop, 2018 年 6 月

[14] 岡本創,佐藤可織,及川栄治,月原健太郎,長谷川奏一,石元裕史,菊池麻紀,CloudSat-CALIPSO, Aeolus, EarthCARE と GPM による雲・降水解析,日本気象学会 2018 年度秋季大会,2018 年 11 月

参考文献

[15] Sato, K., H. Okamoto, H. Ishimoto, 2018: Physical model for multiple scattered space-borne lidar returns from clouds. Optics Express, 26, a301-a309.

[16] Ishimoto H., S. Adachi, S. Yamaguchi, T. Tanikawa, T. Aoki, and K. Masuda, 2018: Snow particles extracted from x-ray computed microtomography imagery and their single-scattering properties. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 209, 113-128.

・研究組織

研究代表者　気象研究所　石元裕史

研究協力者　九州大学応用力学研究所　佐藤可織

研究協力者　九州大学応用力学研究所　岡本　創

CloudSat/CALIPSO プロダクトを用いた 氷雲の地理分布とその気象要素との関係

長崎大学大学院水産・環境科学総合研究科　河本和明
東京大学　大気海洋研究所　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，ユーラシア大陸東部(40-80N°,60-120E°)とユーラシア大陸西部(40-80N°,0-60E°)の雲特性の季節変動について明らかにした。ユーラシア大陸の全天雲量は冬季に明瞭な差が発生し,ユーラシア西部で雲量が大きくなる。また,冬季(DJF)の雲頂温度-40℃以上の雲内部の雲温度-25～0℃域における雲の氷相割合に違いがあり,ユーラシア大陸東部ではユーラシア大陸西部に比べ，氷相割合が多く，水相割合は少ないことを明らかにした。これらの雲層内熱力学的相割合の東西差は季節変動があり,夏季(JJA)で最小,冬季で最大になることを明らかにした。このことは，冬季のユーラシア大陸東部では,ユーラシア大陸西部に比べて,氷相の形成が促進している可能性を示唆している。

・序論

雲や降水は、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 が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。*Oreopoulos et al.* (2017)では，雲の鉛直分布の違いによって大気の放射特性が大きく変化することを指摘している。*Yamauchi et al.* (2018)では，2007 年 1 月を北半球冬季の代表例として,ユーラシア大陸東西間の雲層内熱力的相割合に大きな違いがあることを明らかにしたが,本研究では季節変動に着目し,ユーラシア大陸東西間の比較を行った。

・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℃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)を使用した。

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

$$F_{ice} = N_{ice} / (N_{ice} + N_{water}) \quad (1)$$
$$F_{water} = N_{water} / (N_{ice} + N_{water}) \quad (2)$$

ここで、N_{ice} は雲層内で検出した氷相雲層数を示し、N_{wate} 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、雲層内でライダーシグナル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 はユーラシア大陸東部（赤色）とユーラシア大陸西部（青色）での各月毎の全天雲量と雲層内氷相発生割合を示している。ユーラシア大陸西部の雲量は夏季で最小になり,冬季に最大になる。ユーラシア大陸西部の雲量は夏季と冬季では約 30%異なることを示している。一方で,ユーラシア大陸東部の雲量は 60-70%と年間を通して大きく変化しない。これらの雲量は 4 月と 10 月付近で逆転することを示し

ている。また, 雲層内氷相割合は 4 月から 9 月では 5%程度の違いしか発生しないが、10 月から 2 月では最大で 20%程度ユーラシア大陸東部で大きくなっている。氷相発生割合の違いはユーラシア大陸西部で雲量が大きくなる季節とよく対応しており, 雲量を含む気象場の違いが氷相発生割合を変化させていることが示唆される。今後はユーラシア大陸間の気象場や, 氷晶核となるエアロゾル特性の違いにも着目し, 氷相発生割合に変化を与える原因について解明を行う予定である。

本研究の結果は, 数値モデル出力結果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。

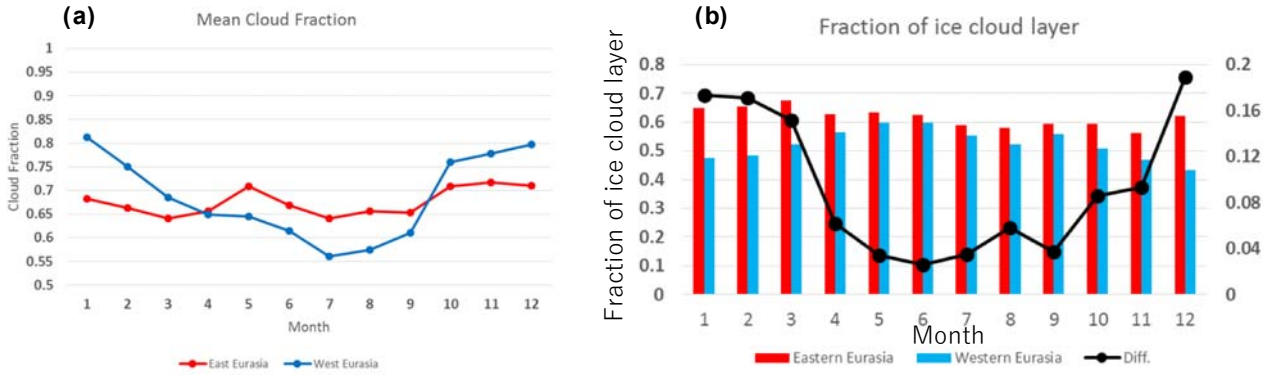


図 1 . 各月毎の(a)ユーラシア大陸東部(赤色)とユーラシア大陸西部(青色)における全天雲量, (b)雲層内氷相発生割合, 黒色実線は氷相割合の差を示す(ユーラシア大陸東部-西部)。

・成果報告

学会発表リスト

Asia Oceania Geosciences Society (アジア-オセアニア地球科学連合)
Contrast of the Ice Cloud Fraction Between Eastern and Western Eurasia Using Calipso Data in Winter Time,
K. Kawamoto and Yamauchi, A.,
2018. June, 5, Honolulu, HI, USA (招待講演)

American Meteorological Society radiation cloud physics meeting(米国気象学会　放射と雲物理会合)
Distinction of the Winter-Time Ice Cloud Fractions between Eastern and Western Eurasia Viewed from CALIPSO,
K. Kawamoto and Yamauchi, A.,
2018. July, 11, Vancouver, Canada(ポスター発表)

Photonics & Electromagnetics Research Symposium(光工学と電磁気学の研究シンポジウム)
Examining the contrast in the ice cloud fractions between eastern and western Eurasia in winter with CALIPSO data,
K. Kawamoto and Yamauchi, A.,
2018. August, 2, Toyama(口頭発表)

30AO-8

衛星搭載雲レーダと降雨レーダによる降水量抽出のためのアルゴリズム開発

研究代表者： 情報通信研究機構　特別招へい研究員　井口俊夫

要旨： 全球降水観測計画（GPM 計画）の主衛星に搭載されている二周波降水レーダ(DPR)のデータ処理アルゴリズムでは二周波での降水からのレーダエコーを用いて固体降水と液体降水の判別を可能とするアルゴリズムの開発を行っている。典型的な場合については良好に判別できるアルゴリズムが開発されている。この共同研究では岡本教授らが携わっている雲レーダとライダーによる観測データに、DPR で用いられているのと同様の手法が適用可能性を吟味し、可能ならばどのような場合にどの程度可能かを検討した。また、DPR では用いられていないドップラー情報など他の情報の利用可能性についても検討した。今年度は特に、DPR で観測された強い固体降水の全球での分布と CloudSat 搭載の雲レーダ(CPR)のデータを用いて岡本教授らが推定した降雪粒子の分布を比較し、比較的良くあっていることを確認した。

序論： 全球降水観測計画（GPM 計画）の主衛星に搭載されている二周波降水レーダ（DPR）の大きな課題の一つは二周波のレーダ反射因子の情報を用いて雪、霰、雹などの固体降水の世界的な分布を捉えることである。そのため、この共同研究の研究代表者は固体降水と液体降水の判別を可能とするアルゴリズムの開発を行ってきた。他方、共同研究者である九州大学応用力学研究所の岡本創教授らは CloudSat 衛星搭載の雲レーダ(CPR)のデータから降雪の分布を推定するアルゴリズムを開発してきている。これらのアルゴリズムはどちらも開発途上であり、不確定要素を多く含んでいて、今後の改良が期待されている。この共同研究では、両者による固体降水の分布を比較し、それの結果を吟味することにより、それぞれのアルゴリズムの改良を目指す。
また、降雨に関しては、DPR では降雨強度を正確に推定可能であるが、雲レーダでは減衰や雪による散乱の影響が大きく、正確な推定が困難である。研究代表者は DPR のアルゴリズム開発に長年携わっており、その中で用いられている減衰補正方法などが CPR のデータを用いた降雨強度推定に利用可能かを CPR データの扱いに詳しい岡本教授らと議論し、その可能性を検討することもこの共同研究の課題である。

方法： CloudSat の雲レーダ(CPR)による降雪推定では、レーダのデータのみを用いた推定方法(C1)と、それにライダーの情報を加えた推定方法(C4)の二つを開発し、両者の比較を行った。C1 では基本的に気温のデータを用いて雲粒子の種類を判別しているが、C4 ではライダーによる後方散乱の情報を用いてその判別をしている。DPR による固体降水の推定は、二周波での見かけ上の反射因子の違いを基にした判別方法であり、DPR の検出感度の関係から、強い固体降水しか検出できない。したがって、絶対量の分布の比較はできないが、全球での相対的な分布を比較することは可能であるので、その分布を CPR を用いた降雪分布を比較した。

結果: GPM/DPR と CloudSat/CPR のそれぞれを用いて季節別に推定した地表面に到達している降雪分布を比較したところ、両者の分布パターンは良く似ていることがわかった。特に、北半球の冬季（12 月、

1月、2月）の分布図で北大西洋のグリーンランド付近で他の地域に比べてはるかに多くの頻度で降雪か観測されている点などでよくあっていた。CPR を用いた降雪の分布推定は米国の他の研究者なども行っているが、彼らが出した降雪分布よりも、岡本教授らのグループが出した降雪分布のほうが、DPR の強い固体降水の分布とよく合っていた。
熱帯の海上における上空の降雪分布に関しては、CPR による推定頻度のほうが DPR によるものより相対的な分布頻度が多くなっていた。
CPR の場合、固体相と液体相が混ざった霙を雪と分離して推定することが可能である。霙の相対的な頻度分布が雪の頻度より高緯度地域では大きいことがわかった。この情報は DPR による固体層と液体層の境界高度を推定するアルゴリズムの開発に役立つものと思われる。

考察： CPR は DPR よりはるかに雪に対する感度が良く、降雪の検出に関しては、ほとんどすべて検出可能である。ただし、多重散乱や減衰の影響で降雨システムの背が高い場合などその下部での降雪の定量的な推定に関しては困難な点がある。他方、DPR では弱い降雪は検出されない。今回比較に使った DPR の指標は、特に強い固体降水（雹、霰および大きな雪粒子）の分布である。全固体降水の中で、DPR により検出可能な強い固体降水（雹、霰および大きな雪粒子）の占める割合は、各降水システムや地域、季節などにより違っていると思われるから、DPR と CPR による相対的な固体降水の頻度分布の比較は、必ずしも同じ基準での比較とはいえないが、今回の比較により全固体降水の頻度と強い固体降水の頻度の割合が地域的にも季節的にも極端に違っていることはないということが推定される。同時に、DPR による強い固体降水の検出アルゴリズムの妥当性がある程度確認されたことになる。また、雹や霰などの大きな粒子に対しては、CPR のデータは多重散乱や減衰の問題だけでなく反射強度そのものに飽和する傾向があり、データの扱いが難しい。DPR のデータとの比較によりどのような対処が可能か検討する価値がある。これは残された課題である。

論文と学会発表のリスト

H. Okamoto, K. Sato, S. Ishii, Y. Ohno, H. Horie, T. Nishizawa, M. Kikuchi, Y. Sakai, T. Iguchi, N. Takahashi, and E. Oikawa, 2018: “Cloud and precipitation microphysics from A-Train and EarthCARE,” SPIE, Asia-Pacific Remote Sensing 2018, Hilton Hawaiian Village, Honolulu, Hawaii, 24 September 2018.

T. Iguchi, R. Oki, and N. Kawamoto, 2018: “GPM’s Dual-frequency Precipitation Radar (DPR) algorithm and measurement of ice precipitation,” European Conference on Radar in Hydrology and Meteorology (ERAD) 2018, Ede, Netherlands, 2-6 July 2018.

T. Iguchi, K. Kanemaru, and A. Hamada, 2018: “Possible improvement of the GPM’s Dual-frequency Precipitation Radar (DPR) algorithm,” SPIE, Asia-Pacific Remote Sensing 2018, Honolulu, Hawaii, 27 September 2018.

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　原田浩太朗

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．また，特に定置網等の沿岸漁業において，流況は海況と密接に関係していると考えられ，基本的な漁況の変動についてよく理解することは，流況と漁況の関係性を考える上で必要不可欠である．そこで今年度は，定置網の漁況に注目し，その長期的な変動について解析を行った．特に，多変量解析手法を用いることで，各魚種の個別の変動だけでなく，魚類相全体としての漁況の変動について整理することを目的とした．

方法

長期的な漁獲データとして，北陸農政局発行『石川県農林水産統計年報』より，1970 年から 2014 年までの定置網による海面漁業生産量データを用いた．上記の期間にわたって漁獲データの存在した魚種のうち，11 魚種 (まぐろ類，まいわし，うるめいわし，かたくちいわし，あじ類，さば類，ぶり類，たら，まだい，すずき，するめいか)の漁獲量 (重量，単位: t)を，log (x+1)の形に対数変換して利用した．

上記の漁獲データについて主成分分析を行い，魚類相の変動の主成分を抽出した．続いて，主成分分析で得られた，上位主成分の各年の主成分得点を応答変数とし，環境変数を説明変数とした重回帰モデルを作成することで，魚類相の変動に影響する環境要因の検討を行った．重回帰モデルについては，AIS によるモデル選択を行った．使用した環境変数は，下段の通りである．

環境要因データ: 石川県調査船白山丸による海洋観測データ (沿岸の観測点における 0 m 深，50 m 深の年平均水温)，気象庁が HP*上で公開している日本海・東シナ海・北太平洋の海面水温データ，太平洋十年規模振動指数 (PDOI: Pacific Decadal Oscillation Index)，アリューシャン低気圧指数 (NPI: North Pacific Index)，南方振動指数 (SOI: Southern Oscillation Index)を用いた．なお，本解析では上記環境要因データについて，全て年平均値を用いた．環境要因データについては，標準化を行ったうえで下記の統計解析に利用した．

結果

第四主成分までの累積寄与率が 76%と高かったため，解析には第一～第四主成分までを利用した．第一主成分に対してはまいわし，たら等の比較的冷水系の魚種が正の値を示し，ぶり，するめいか等の暖水系の魚種が負の値を示した．また，第一主成分および第二主成分の主成分得点を散布図にしたのが図 1 であり，第一～第四主成分の各時系列主成分得点を示したのが図 2 である．重回帰分析結果は表 1 の通りとなった．第三主成分以外に対しては，5%水準で有意な変数が採択された．

---

* 気象庁 HP (http://www.jma.go.jp)

考察

主成分分析の結果から，第一主成分については水温の変動が大きいことが示唆された．しかし，第二～四主成分に対しては，魚種ごとの主成分負荷量の共通性等については読み取ることができなかった．重回帰分析では，石川県周辺の海水温の影響は第四主成分の説明変数として採択されたが，相対的に他海域の水温よりも影響が小さいという結果が得られた．特に第一～第二主成分は長期的な変動が大きい(図 2)ことから，長期的な魚類相の変動に対しては，比較的長周期な資源量の変動等の影響が大きく評価されていると考えられる．しかし，第四主成分に石川県沿岸水温が採択されたことからも，短期的な漁況に対しては，より漁場近くの海況の影響が大きいことも推察される．今後は，能登半島沿岸流況の変動のほか，対馬海峡等のより上流の海況と漁況の関係についても検討を加えていきたい．

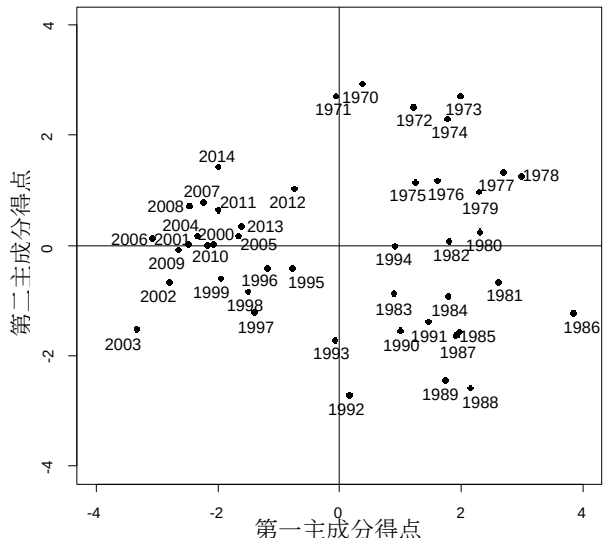


図 1 主成分分析結果散布図

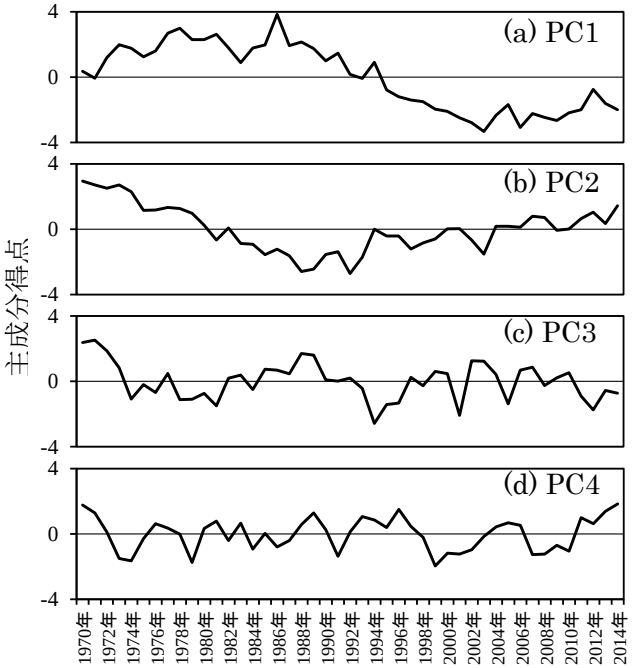


図 2 第一～四主成分得点時系列図

表 1 重回帰分析結果

	説明変数					R^2	AIC
	ECSS	NP	ISK 0 m	PDOI	SOI		
PC1	+***	+***	-	+	+	0.61	154.6
PC2	+	-	-	+***	-	0.27	150.0
PC3	-	+	-	-	-	0.03	142.3
PC4	-	+*	+**	-	-	0.15	126.3

モデル選択に利用した変数のうち，いずれかの主成分の説明変数として採択されたものを示した．略語はそれぞれ以下の通りである．
ECSS: 東シナ海南部水温, NP: 北太平洋水温, ISK 0 m: 石川県沿岸 0 m 深水温
採択されたものは"+"，採択されなかったものは"-"で示しており，添字は次の通り有意確率を表す．
***: p <0.001, **: 0.001< p <0.01, *: 0.01< p <0.05

研究組織

石川県水産総合センター　原田　浩太朗　：研究代表者
　　大慶　則之　：研究協力者
九州大学応用力学研究所　千手　智晴　：所内世話人
　　広瀬　直毅　：研究協力者

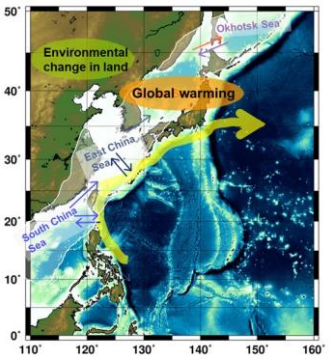
東シナ海陸棚－黒潮間混合域における物質輸送過程理解のための国際共同研究体制の構築

富山大学　大学院理工学研究部　張 勁

Establishment of international cooperative research group to understand the material transport between the boundary area of the East China Sea shelf region and Kuroshio

1. International cooperative research framework establishment

Research activities are categorized into five groups, considering the locations of the marginal seas, that is, Okhotsk Sea (OS), Marginal Seas surrounding Japan, Korea and Russia (MSJKR), East China Sea (ECS), South China Sea (SCS) and material exchange and transport with the Kuroshio, eddies and mixing (ETK), during the first workshop of working group-06 under the IOC Sub-Commission for the Western Pacific (WESTPAC-XII). The second workshop was held in Qingdao, China, on 17-18 December 2018, where twenty-eight experts from five countries in the East and Southeast Asia gathered along with a remote participant from US. Two international cooperative research programs in ESC area have been approved. 1) US/Japan cooperative study on mixing processes in the Kuroshio south of Japan was funded by US/NSF, 2) Bilateral Joint Research Project between Japan and China for the cooperative researches in the ECS was also funded by JSPS, Japan and NSFC, China.



Sub-group 1: Okhotsk Sea (OS)
Russia, Japan
Reginal GEOTRACES, interdisciplinary studies

Sub-group 2: Marginal Sea surrounding by Japan, Korea, Russia (MSJKR)
CREAMS+20, interdisciplinary studies

Sub-group 3: East China Sea (ECS)
- time series area
by China, Japan, Korea
- interaction with Kuroshio

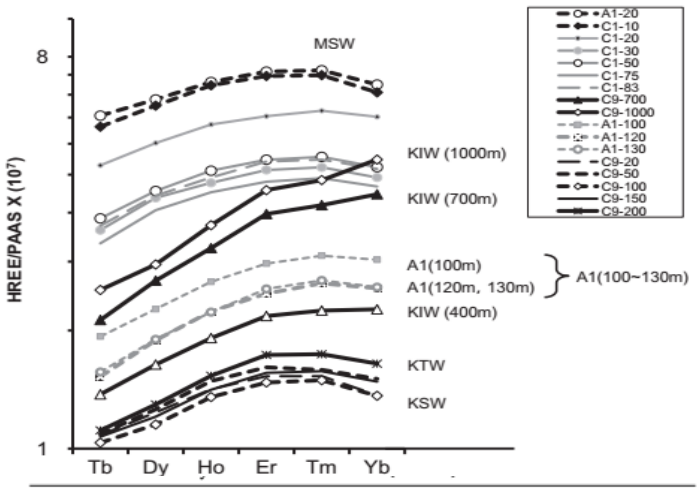
Sub-group 4: South China Sea (SCS)
stratification, circulation
hypoxia, heavy metal pollution,
continental run off, SGD etc.

Sub-group 5: material Exchange and Transport with the Kuroshio and eddies, and mixing (ETK)
biogeochemical proxies, material exchanges,
transport via the Kuroshio, eddies, mixing processes

2. Material transport approaching using physico-chemical parameters

Large amount of materials is transported between the boundary area of the ECS shelf region and Kuroshio. High-nutrient bottom water was identified on the central ECS shelf; however, it is difficult to clarify the various sources solely by estimating the potential temperature (PT) and salinity. Zhang et al., (2018) indicates that the rare earth elements are a good tracer for analyzing water masses. The heavy rare earth elements suggest the important contribution of Kuroshio intermediate water (KIW) in this bottom water. As shown in Figure. 1, the PAAS-normalized REEs pattern which can be distinguished in different endmembers, and the similar calculation result using T and S, and four HREEs, respectively, indicates that REEs series can be used as a tracer for analyzing the fraction of different water masses. The result calculated using four HREEs shows good consistency with the fraction calculated by PT and Salinity, so the rationality of using REEs as a tracer was confirmed. By utilizing PT and

salinity together with four HREEs, we estimated the mixing of four water masses (MSW, KSW, KTW, and KIW), with KIW and KTW accounting for 39±14% and 49±18%, respectively, of the central shelf bottom water in the northernmost research area. This study demonstrates that HREEs, in combination with conventional temperature and salinity, effectively increase the number of available tracers so that water mass analysis can be done with more robust results achieved.



		MSW	KTW	KIW
		%		
Tracers: temp and salinity				
Average	1		56 ± 17	43 ± 18
Tracers: four HREEs				
Average	2		59 ± 17	39 ± 17

Figure. 1 PAAS-normalized REEs pattern and the calculation result using T and S, and four HREEs, respectively

3. International cooperative research cruises in 2018

Various international cooperative research cruises were carried out in the MSJRK, ECS and Kuroshio region. Nagasaki Maru cruise and Kagoshima Maru cruise were conducted around the area of ECS shelf region and the Kuroshio in summer and winter 2018 (Figure. 2), in which the physical and chemical parameters were measured via sensors. Samples for chemical tracers such as REEs and Nd isotopes were preserved after acidifying, and turbulence profile was analyzed using TurboMAP. Some meaningful phenomena were discovered after the analysis using both chemical tracers and physical turbulence data, and further detailed study is expected to be conducted in the future.

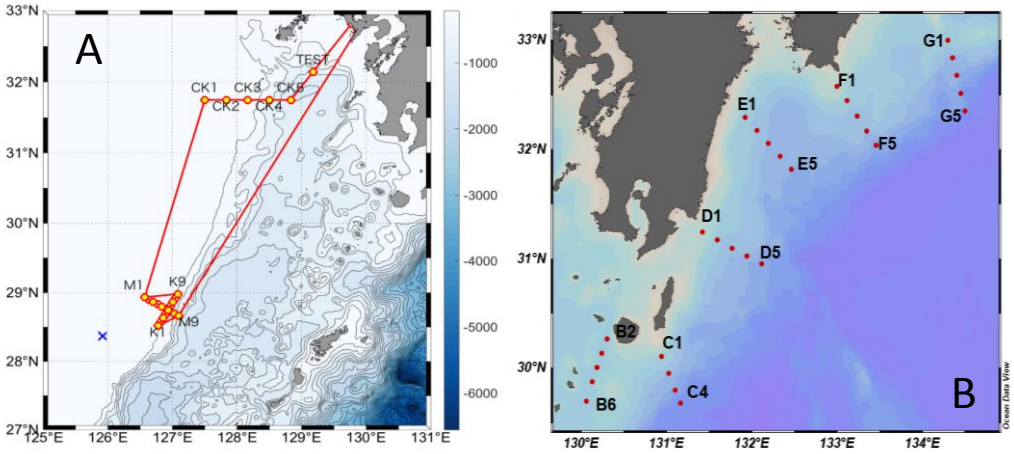


Figure. 2: Stations in Nagasaki Maru cruise (A) and Kagoshima Maru cruise (B)

洋上を航走するビークルに働く流体力解析および運動制御に関する研究

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：

自律型無人潜水機の普及や多種多様化にともない、さまざまな観測形態が求められるようになってきた。本件では、今後海中ビークルによりセンサを曳航して観測する手法について、曳航物を曳航電車で引っ張ることでその挙動の撮影や張力計測を行い、AUV 運動解析に資する

方法：

実験の模様を図 1 に示す。使用した曳航物は、ロッド状、ケーブル状、チューブ状の 3 種類であった。海中ビークルを想定した速度にて引っ張り、その際の曳航物の挙動をビデオ撮影した。また、速度を数種変化させて、曳航時の張力を計測した。この計測により、AUV の運動方程式に曳航物のダイナミクスを加味させ、運動解析の研究に資することができる。

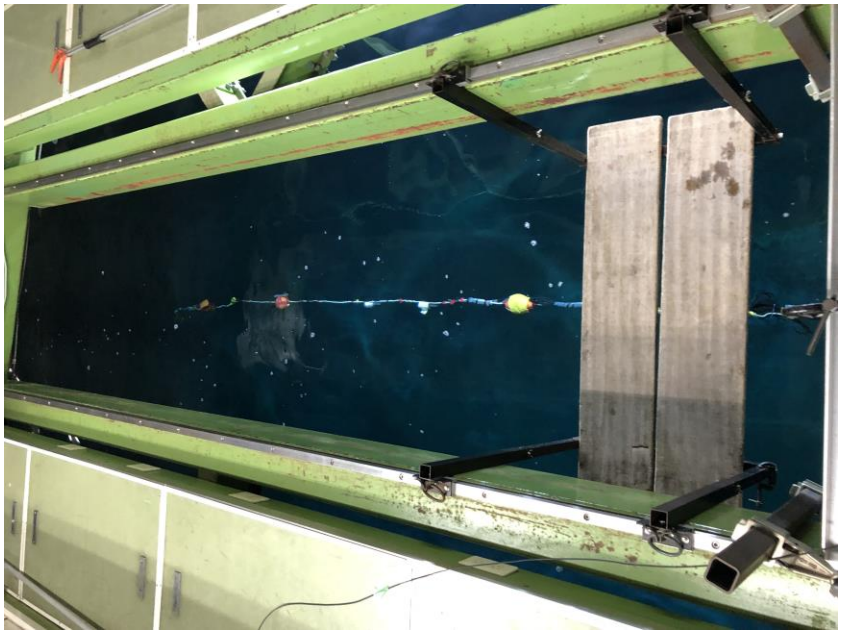


図 1　ロッド状曳航物の実験風景

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

夏季から秋季にかけて発生する急潮と底入り潮は、瀬戸内海と豊後水道の海洋構造と栄養塩動態に大きな影響を与えていることが知られている。急潮と底入り潮の発生は潮汐の大潮・小潮に関連しており、潮汐混合がそれらの発生過程に重要であることが明らかにされているが、瀬戸内海と豊後水道においてどれくらいの潮汐混合がどのように起こっているかは不明な部分が多い。その実態を明らかにすることを目的として、これまでに応用力学研究所との共同利用研究によって実施した乱流観測によって、瀬戸内海の伊予灘における海底地形(サンドウェーブ)による乱流混合の強化、豊後水道における地形性水平渦と内部潮汐に起因する乱流混合の発生を明らかにしてきた。H30 年度は伊予灘のより広域における乱流強度分布を明らかにする観測を実施した。

研究内容

2018 年の 5 月と 8 月に愛媛大学沿岸環境科学研究センター研究船「いさな」を用いて伊予灘における海洋観測を実施した. 佐田岬半島北部の伊予灘の 22 点(図 1)において, 応用力学研究所所有の微細構造プロファイラと「いさな」搭載の音響ドップラー流速計を用いて, 乱流強度の指標である乱流運動エネルギー散逸率 ε と流れを計測した. 観測は 5 月と 8 月それぞれの大潮・小潮に計 4 回実施した.

結果

8 月の小潮(8/4)と大潮(8/11)に南側断面(測点 I5s-I8s, 図 1)において実施した観測結果を.図 2 に示す。8/4 は上げ潮時、8/11 は下げ潮時での観測であった。以前の観測では中央断面(測点 I5-I8)の測点 I7~I8 付近に顕著なサンドウェーブが存在していたが、今回の観測でも存在しており、加えて南側の断面においても測点 I6s-I8s 間の海底に最大高低差 30 m の巨大なサンドウェーブの形成が認められた。なお、北部断面(測点 I5n-I8n)においては、サンドウェーブの高低差は 10 m を下回っていた。小潮・大潮の両方において、断面東部の平坦な海底上では、流れは比較的鉛直的に一様であり、乱流が海底付近の境界層内部においてのみ発達していた一方で、測点 I6s より西部の海底起伏が発達する海域では、流れは傾圧的となり(特に 8/4 は底層に強い流れが見られた)、乱流運動エネルギー散逸率が 10^{-6} から最大 10^{-4} W kg^{-1} にまで強化されていた。 このような強い乱流が捉えられた海域では、傾圧流速ベクトルは表層から底層に向かって半時計回りに回転しており、エネルギー(位相)が鉛直上向き(下向き)に伝搬する内部潮汐が生じていたことを示唆している。実際に、このような内部潮汐と考えられる鉛直シアーに対応するように中層または亜表層で乱流運動エネルギー散逸の極大が見られた。観測海域の乱流混合には海底地形が重要な役割を果たしていると考えられるが、これまで考えてきたサンドウェーブのような数百メートルスケールの地形と、内部潮汐を生じるようなより大きなスケールの地形のどちらがどのように観測された強大な乱流を生じているかを明らかにすることが今後の課題である。

研究組織

郭 新宇(愛媛大学沿岸環境科学研究センター、研究代表者)、遠藤 貴洋(九州大学応用力学研究所、所内世話人)、堤 英輔(九州大学応用力学研究所、研究協力者)

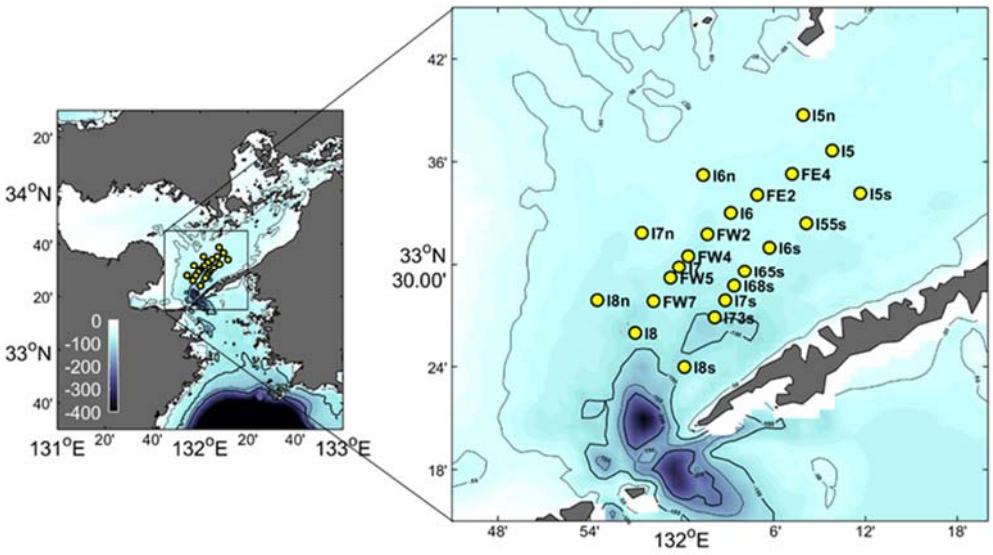


図 1　　西部伊予灘における乱流観測点（海底地形は JTOPO-30 による）.

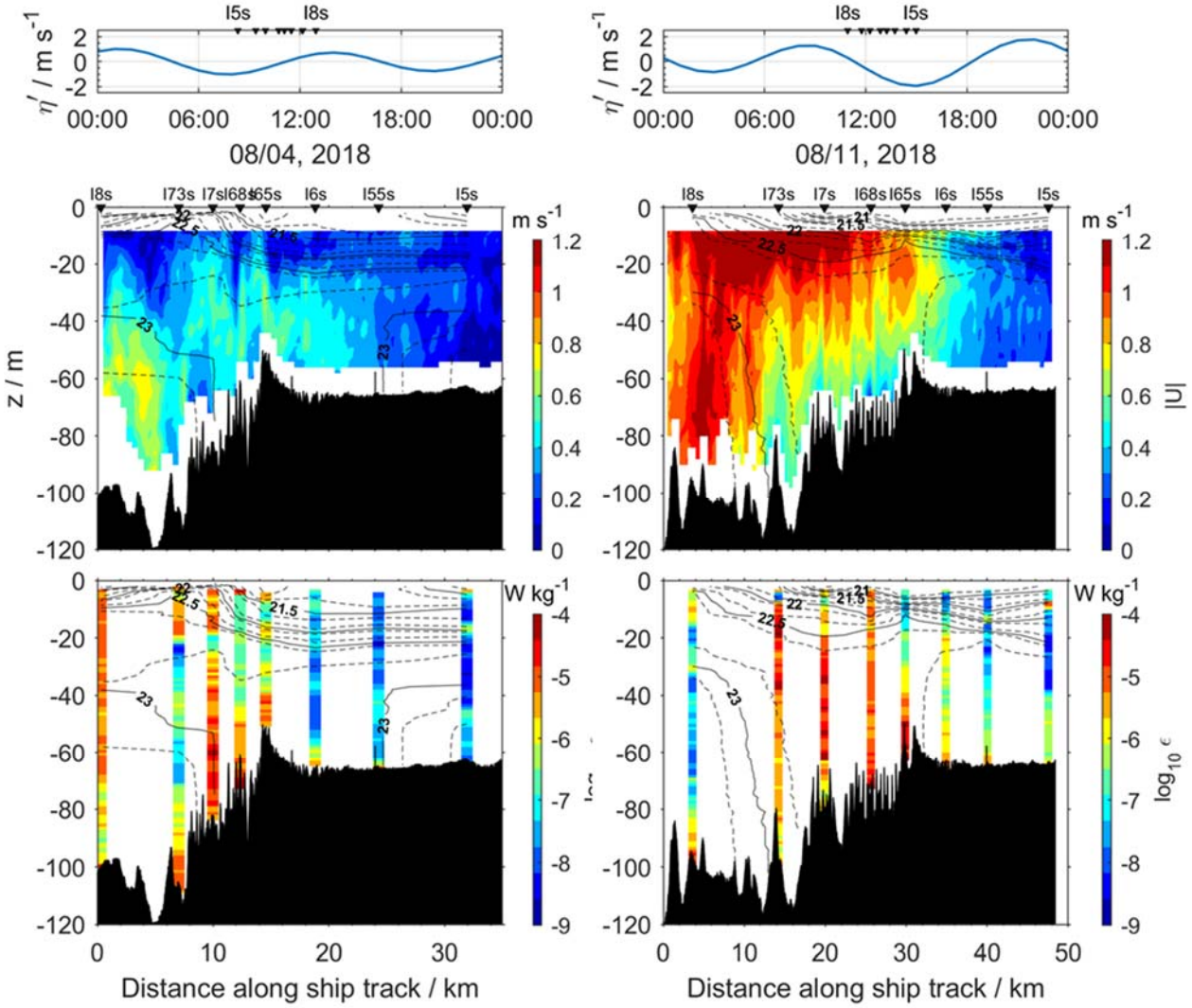


図 2　　南観測断面（測点 I5s-I8s）における流速の絶対値|U| (中段)と乱流運動エネルギー散逸率 ε (下段)の観測結果. 上段は松山における潮位. 左列は 8/4（小潮）, 右列は 8/11（大潮）の結果を示す.

30AO-13

地上・衛星観測及びモデルを使ったエアロゾルの光学的特性の時間・空間変動特性

富山大学大学院理工学研究部（理学）　青木 一真

要旨

九州大学応用力学研究所の屋上にて、大気中に浮遊するエアロゾル粒子の気候影響を研究するため、2003年から太陽放射観測を行っている。エアロゾルの気候影響解明はもちろん、数値モデルや衛星観測の精度向上など利用している。エアロゾルの季節変化は、４年間（2015年から2018年）同じような傾向にあったが、粒子の大きさの季節変化に違いが見られた。また、2017年12月に打ち上げられた「しきさい」(GCOM-C/SGLI, JAXA) とのエアロゾルの光学的厚さの比較結果は概ね相関が良く、打ち上げ１年後の目標数値をクリアした。

１．はじめに

大気中に浮遊する微粒子（エアロゾル）の気候影響は、「PM2.5」をはじめとする社会問題にもなり、様々な角度から研究が進められている。本研究の対象領域である九州北部地方にある福岡県（九州大学応用力学研究所）や長崎県（長崎大学）などは、大陸から越境する大気汚染物質、黄砂粒子、森林火災などの影響を受け、大気環境の監視に注意が必要な地域である。本研究は、1996年から長崎大学おいて、2003 年から九州大学応用力学研究所おいて、太陽光と周辺光の放射輝度を用いたスカイラジオメーターを使った連続観測を行い、エアロゾル光学的特性の解析を行っている。また、エアロゾル粒子の発生源や輸送過程を知ることは、越境大気汚染として、定量的で精度の良い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、大陸から日本へ輸送されてくる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、次世代の大気化学・気象結合モデルの開発や応用、モデルの精度向上につなげる。また、2017年12月に打ち上げられた「しきさい」(GCOM-C/SGLI, JAXA) の地上検証データと使い、衛星観測の精度向上にもつなげる。

２．観測・解析概要

観測は、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、世界約100カ所において観測が行われている。この観測から解析されたエアロゾルの光学的厚さ・オングストローム指数（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、これらのデータをモデルや衛星観測の地上検証として用いてSPRINTARSを改良し、放射強制力のさらなる精度向上を目指している。

３．結果及び、考察

Fig.1は、2015年1月から2018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0.5μm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）の月平均値を示したものである。エアロゾルの光学的厚さとオングストローム指数の季節変化は、３年間（2015年から2018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の季

節変化の特徴は、他の日本各地での観測結果と違う部分もあることが、他の地点と同様に若干であるが減少傾向にある。オングストローム指数の季節変化を見てみると夏に高い傾向があるが、2018年は8月以降、高い傾向が見られなかった。また、2017年12月に打ち上げられた「しきさい」(GCOM-C/SGLI, JAXA) とのエアロゾルの光学的厚さの比較結果は概ね相関が良い結果が得られ、打ち上げ１年後の目標数値をクリアした。今後も継続した観測を行うことにより、モデルや数値モデルの精度向上しながら、気候影響の解明につなげていきたい。

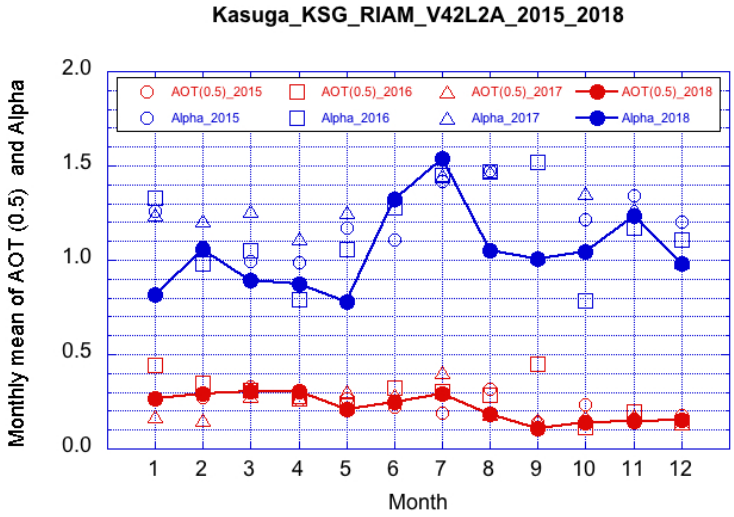


Fig. 1　2015年1月から2018年12月までの九州大学応用力学研究所（福岡県春日市）における0.5μmのエアロゾルの光学的厚さ(AOT(0.5))とオングストローム指数（Alpha）の月平均値

４．研究成果

Kawase, H.,A. Yamazaki, H. Iida, K.Aoki,W. Shimada,H. Sasaki,A. Murata,and M Nosaka, (2018):Simulation of extremely small amounts of snowobserved at high elevations over the Japanese NorthernAlps in the 2015/16 winter, SOLA, 14, 39-45, https://doi.org/10.2151/sola.2018-007.

Aoki,K.,: Long-term measurements of aerosol optical properties in Japan. (17th AeroCom & 6th AeroSAT workshop 2018, NOAA, Washinton DC, USA, 2018.10.15 - 2018.10.19)

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）

30AO-14

逆推計手法による東アジア域排出量データベースの高度化に向けた研究

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

急速な経済発展に伴って中国における窒素酸化物（NOx）排出量は増加の一途をたどっていたが，近年の排出規制等の対策効果により，その排出量が減少傾向に転じているが示されてきている（Li et al., 2017）．一般に排出量データは，経済統計資料等をもとに構築されるが（ボトムアップ法），その推計までには数年を要するという問題点がある．これに対し，準リアルタイムの衛星観測データを拘束条件とすることで排出量を逆推計する手法（トップダウン法）も近年では進展してきている．本共同利用研究では，激変する中国の排出量データを把握するため，逆推計手法を構築し，NOx を対象に排出量データベースを近年まで更新することを目指した．

2. 手法

アジアスケールの化学輸送モデル CMAQ（Community Multi-scale Air Quality）に，既存のアジア域排出量データ REAS version 2.1 を入力データとして 2005 年からモデル計算を実施した．衛星観測では大気柱総量（カラム量）が観測でき，これには Aura 衛星に搭載された OMI センサーによる NO_2 カラム量を用いた. REAS では 2008 年までの排出量が推計されており，例えば 2009 年については，2008 年の排出量データを用いてモデル計算を行った際には，衛星観測データと大きな差が生じることが想定される．逆推計手法は弓本ら（2015）に準じた。REAS version 2.1 が整備されている 2008 年を基準年とし，2009 年以降は 2008 年の排出量を，2005 年から 2008 年までは各年の排出量を先見情報とし，2005 年から 2016 年までの 12 年間の逆推計を実施した。モデルと衛星観測間の系統的なバイアスの影響を逆推計から排除するため，2005 年から 2008 年までの 4 年間の計算結果からは，衛星観測データに対するモデルバイアスを求め，逆推計の仮定から除外した。また，2009 年から 2011 年までの急激な排出量の増加を適切に再現するために，前年の逆推計結果を翌年の先見情報として利用する逐次法を新たに開発し，導入した。

3. 結果と考察

図 1 には逆推計された 2016 年までの中国の衛星観測データおよび排出量推計値を示す. 拘束条件とした衛星観測データは 2011 年にピークとなる変化を示し，逆推計値も同様に 2011 年度に最大で 29.5 Tg となった. 図 1 にはアップデートされている REAS や中国を対象としたボトムアップ法による排出量データ MEIC（Li et al., 2017; Zheng et al., 2018）も合わせて示す．近年の中国の NOx 排出量の傾

向についておよそ一致する結果となった．表 1 に示すように 20 Tg 程度であった 2005 年からピークとなった 2011 年まで，およそ 4-5 割排出量が増加したが，2011 年から 2015 年にかけては 1-2 割程度減少したことが明らかとなった．

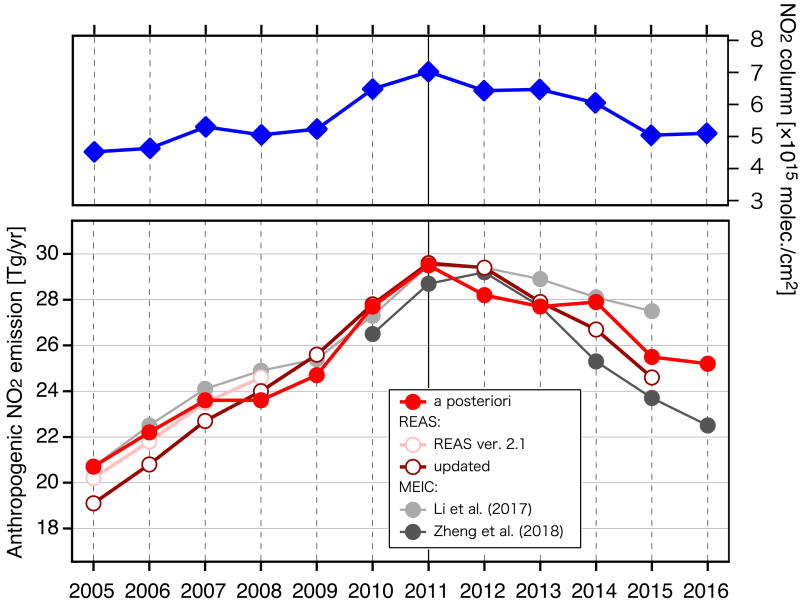


図 1． 2005 年から 2016 年までの NO_2 カラム量および NOx 排出量の経年変化．

表 1． 本研究の逆推計した結果とボトムアップ法による NOx 排出量推計値の変化率の比較．

	本研究	REAS (updated)	Li et al. (2017)	Zheng et al. (2018)
2005–2011 年	+42.7%	+54.5%	+42.9%	—
2011–2015 年	−13.4%	−16.6%	−6.7%	−17.4%

4. まとめ

OMI 衛星観測データを拘束条件とし，中国の NOx 排出量を逆推計した．逆推計された排出量は 2011 年に最大となるような山型の変動を示すことが明らかとされ，ボトムアップ法による排出量データと比較し，概ね整合する結果を得た．本逆推計手法では近年まで更新を行うことを主目的としたが，例えば，空間解像度が向上した最新の TOPOMI センサーを用い高解像度化を図ることが期待できる．

・参考文献

Kurokawa, J et al. (2013), *Atmos. Chem. Phys*, doi:10.5194/acp-13-11019-2013

Li, M et al. (2017), *National Science Review*, doi:10.1093/nsw/nwx150

弓本ら（2015），大気環境学会誌, 50 (5), p199–206

Zheng, B et al. (2018), *Atmos. Chem. Phys*, doi:10.5194/acp-18-14095-2018

30 AO-15

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

これまでの共同研究において，2 層流体において KdV 方程式から得られる critical depth が，2 波の干渉により発生するソリトン共鳴の振幅増幅率を抑制することが分かってきた．その後，実海域における内部ソリトン共鳴に関する検討を行った結果，地形の変化がソリトン共鳴の振幅の増幅率に影響を与えることが示された．示された結果は，下層水深が浅くなることにより振幅増幅率が増大するというものであり，Miles により示された 4.0 を超える可能性が示唆された．しかし，その検討は 1 ケースのみであり，本当に地形の変化が内部ソリトン共鳴による振幅増幅率を増大させるかどうかは不明である．そこで本研究では，2 層システムにおける解析を行うため，これまでに利用してきている強非線形強分散内部波方程式を利用し，地形を指数関数的に変化させた上でソリトン共鳴の解析を行い，内部ソリトン波の振幅の増幅率がどのように変化するかを検討することを目的とする．

研究の方法

干渉する 2 つの内部ソリトン波を対象とし，地形変化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した．

1. 解析において critical depth がソリトン共鳴を抑制する効果を除外し，地形変化による純粋な振幅増幅率の解析を実施するため，critical depth から離れた位置に密度界面が存在する条件下における解析を行うこととする．
2. 地形の変化による効果を解明することが出来た後，critical depth の影響を検討するため，1.と同様な検討を実施する．

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) 下に凸の共鳴内部ソリトン波が進行する際，地形が盛り上がり，全水深が小さくなることで，初期の変形として浅水変形が卓越し，共鳴内部ソリトン波の振幅が大きくなることが分かった．

(2) しかし，全水深が小さくなることは波速を減少させることとなり，その結果，安定的に存在する内部ソリトン波へと変形することが分かった．つまり，最終的には初期の状態に比較して小さな振幅の共鳴内部ソリトン波へと変形し，安定して進行することが分

かった.

(3) 研究の方法 2 に書かれた critical depth に関する検討については，現時点で重要な変化・影響を見つけることができていない．そのため，今後の検討課題であると考えられる．

研究成果報告

K. Nakayama, T. Kakinuma, H. Tsuji, Oblique reflection of large internal solitary wave, European Journal of Mechanics (B), Vol.74, pp.81-91, (2018)

K. Nakayama, T. Sato, K. Shimizu, L. Boegman, Classification of internal solitary wave breaking over a slope, Physical Review Fluids, Vol.4, 014801, (2019)

佐藤 啓央，中山恵介，清水健司, Leon Boegman，二層システムにおける内部ソリトン波の斜面上での砕波形態と物質輸送，土木学会論文集 B2（海岸工学）, Vol.74, No.2, pp. I_655-I_660 (2018)

越智直人，柿沼太郎，中山恵介，水深が変化する水域を伝播する内部波の数値解析，土木学会論文集 B2（海岸工学）, Vol.74, No.2, pp. I_25- I_30 (2018)

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

微細規模から惑星規模にかけての海洋力学過程と規模間相互作用の研究

大分大学　理工学部　西垣　肇

目的

海洋現象についての知見は近年飛躍的に増えている。これには観測技術，計算機パフォーマンス，数値計算技術の発展の貢献が大きい。しかし，海洋現象についての力学理論の進歩はその知見の増大に追いついていない。微細現象から惑星規模に至る海洋現象は，それぞれが独立の過程に見えながら相互に干渉する場合も多い。したがって，多角的かつ包括的な海洋力学理論の再構築が必要である。

このような大目標に近づくため，さまざまな課題に携わっている研究者が集まり，海洋力学過程についての議論を集中的に行い，ブレーンストーミングを経て情報交換と議論の深化を行う。

手法

2018 年 11 月に研究会を開き，後記の話題提供とそれに対する議論を行った。限られた時間内で行われる学会大会の発表と異なり，特に議論の時間を十分に取った。会は寝食を共にする合宿形式で行い，正規のセッションの時間外にも多角的な情報交換や議論を繰り広げた。

提供された話題とその提供者は以下のとおりである。

(1) Virtual wave stress の直接数値計算，藤原泰（京大理）
(2) モノドロミー行列の直接計算による内部波ビームの安定性解析，大貫陽平（九大応力研）
(3) 四国海盆暖水渦の諸特性，蓮沼啓一（海洋総合研究所）
(4) 親潮海域における平均流の力学，西垣肇（大分大理工）
(5) 続流ジェットの再循環 ― 数値実験と概念モデルの比較，水田元太（北大地球環境）
(6) LGM 以降の日本海の変遷に関する海洋力学モデル，磯辺篤彦（九大応力研）
(7) 海底地形の逆推定に関する取り組み，広瀬直毅（九大応力研）

結果と議論

提供された話題の概要は以下のとおりである。

(1) Virtual wave stress の直接数値計算，藤原泰（京大理）

Langmuir 循環は，海洋表層の流れと水面波が相互作用して形成される鉛直循環で，表層混合にとって重要な過程である。その過程において，水面波が粘性減衰するとき，水面波が持つ運動量は表層流に渡される。その際の運動量輸送を virtual wave stress という。その物理過程を再現・解明するためには，vitual wave stress を正確に表現することが重要である。ここでは新たに有限振幅の水面波を扱うことができる数値モデルが開発された。モデルは高精度の数値スキームを用いて高い運動量保存性を実現し，virtual wave stress および Langmuir 循環の強さが正しく表現されていることが確認された。

(2) モノドロミー行列の直接計算による内部波ビームの安定性解析，大貫陽平（九大応力研）

内部潮汐は，その散逸が海洋の深層水湧昇と深層大循環の形成・維持に大きく寄与する。内部潮汐は順圧潮流が海底地形を通過する際に発生し，まずはビーム波の構造をとる。そのビーム波は parametric subharmonic instability による不安定モードを持つことが指摘されているが，そのメカニズムは不明瞭である。その解明のため安定性解析が行われた。周期的に変動する有限振幅の背景場を扱うため，Floquet

理論とモノドロミー行列が用いられた。Parametric subharmonic instability のメカニズムは，逆方向に進行する波束の重ね合わせで生じるうなりによって説明できることが示された。

(3) 四国海盆暖水渦の諸特性，蓮沼啓一（海洋総合研究所）

四国沖の断水渦およびその変動は，黒潮の大蛇行などの変動や流量と密接に関連する。歴史的観測データおよび最新の同化モデル MOVE/MRI.COM-NWP の結果を用い，黒潮および黒潮暖水渦，遠州沖冷水渦のふるまい，および黒潮流量との関連が議論された。

(4) 親潮海域における平均流の力学，西垣肇（大分大理工）

北太平洋北西部の親潮は，南方に進入する親潮貫入や沖合を北東向きに流れる亜寒帯海流を伴う。再解析データの長期平均場を用い，これらの流れ場の力学が議論された。準地衡理論に基づく傾圧ロスビー波の特性曲線の適用で，亜寒帯海流と親潮貫入の存在が診断的に説明できることが示された。

(5) 続流ジェットの再循環 ― 数値実験と概念モデルの比較，水田元太（北大地球環境）

黒潮や湾流は，その下流側で離岸して続流ジェットとして東方に流れ，そのジェットの南北に再循環を伴う。続流ジェットと再循環は中規模渦が作ることが知られているが，その力学過程は十分に解明されていない。ここでは理想化数値実験が行われ，東向きジェットが再循環を作る過程が表現・解析された。Enstrophy の発生と移流および eddy-eddy 相互作用でこの過程を説明できることが示唆された。

(6) LGM 以降の日本海の変遷に関する海洋力学モデル，磯辺篤彦（九大応力研）

最終氷期 (LGM) 以降の 2 万年前以降の日本海の海洋構造と循環について検討された。海底コアなどから見積もられている塩分の鉛直構造と海面水位の変遷をもとに，日本海の海洋力学モデルが構築された。その結果，以下のことが示唆された。2 万年前は海面水位が低く，日本海には顕著な塩分成層があったが，そのころの日本海はほぼ孤立状態だった。1 万 7 千年前からその後の数千年間に鉛直混合が進んだが，それは津軽海峡から高密度の親潮水が流入したことに伴うものである。

(7) 海底地形の逆推定に関する取り組み，広瀬直毅（九大応力研）

現存の海底地形データは精度が不十分で，そのため海洋モデルでの海況の再現・予報は精度を欠く。しかし，すべての海底地形を直接観測することは困難である。そこで，潮流や海流と海洋モデルを用いて地形を逆推定する方法が考えらえる。ここでは，対馬海峡の地形を逆推定するための基礎的情報として，理想化された海底地形が流れに与える影響が，数値モデルを用いて検討された。海山・海盆型の地形について，その高さと半径とに対する流れの依存性が調べられた。振動流と定常流では，後者のほうが地形に対する感度が高く，海底地形の逆推定にはより有利であることが示唆された。

研究組織

研究代表者　西垣肇（大分大）

研究協力者　磯辺篤彦（九大応力研），広瀬直毅（九大応力研），水田元太（北大地球環境），
蓮沼啓一（海洋総合研究所），大貫陽平（九大応力件），藤原泰（京大理）ほか

インドネシア多島海の海洋循環とその気候に及ぼす影響

海洋研究開発機構アプリケーションラボ　佐々木英治

1. 研究目的

西太平洋とインド洋の間に存在し、多くの島々と海が混在するインドネシア多島海域は、海面水温が高く、大気の深い対流が直上で発達するため、多量の降水があり、その地域の気候のみならず全球規模の気候に重要な役割を担っている。また、インドネシア通過流は多島海域を通過して西太平洋からインド洋に流れ、多量の熱を輸送するため、海洋循環場にも重要な役割を担っている。多島海域を含む縁辺海では内部潮汐が大きいため、この海域で起こる鉛直混合は海洋循環場に多大な影響を及ぼすと考えられている。

インドネシア通過流を駆動する力学過程を再現するには、全球規模の海洋モデル、かつ海峡・混合過程を精緻に再現できる高解像度のモデルが必要である。これまで海洋研究開発機構にて地球シミュレータを用いた高解像度海洋大循環モデル OFES2 が開発されてきた。一方、九州大学応用力学研究所では、沿岸域や縁辺海を対象とした力学過程の研究が盛んに実施されている。そこで本共同研究では、研究代表者が実施した OFES2 の出力を用いた研究と、九州大学応用力学研究所が得意とする理想化されたモデル研究を組みあわせながら、インドネシア通過流を含むインドネシア多島海域の海洋循環の研究を実施する。さらに、多島海域の海洋循環が大気海洋相互作用を通じて太平洋、インド洋の広範囲の気候およぼす影響を検討する。

2. 解析手法

OFES2 では全球規模の海洋大循環モデルに潮汐混合スキームが新たに導入された．そこで、その効果を明らかにするため、スキームの ON/OFF 感度実験を実施した。本研究ではこの二つのモデル出力の 1995 年 1 月～2016 年 12 月間の月平均値を 22 年平均し、比較することで潮汐混合がインドネシア通過流及びインドネシア多島海に与える影響を明らかにする。Sasaki et al. (2018)では、潮汐混合スキームが導入されることでインドネシア通過流の流量が大きくなることを明らかにしたことから、本研究ではさらに詳細にモデル解析を行うことで、局所的におこる潮汐混合がインドネシア通過流の流量増加へとつながるメカニズムを検証することにした。まずは太平洋規模で生じた海面高度の上昇の要因、海洋内部の水温と密度・流れ場の変化、そしてインドネシア多島海へと流入するインドネシア通過流の変化に焦点をあてて解析を進めた。

3. 解析結果

太平洋の赤道域全体で起きていた海面高度の上昇に応答するように、水温躍層付近に相当する水深 200 mで水温が上昇していることが確認できた（図１）。$26\sigma_\theta$の等密度線の深さも、水温の変化と同じような個所で深くなっている。海底海山が存在する箇所から、水温上昇のシグナルは強くなっており、海山のような傾斜が急な個所で強い潮汐混合が起きていることが示唆される。このような水温上昇のシグナルは Sasaki et al. (2018)でも北緯 5-10N にて確認されている。等密度線によって強いシグナルが生じている海山が異なり、太平洋に存在する多くの海山で潮汐混合、そして躍層の変化が起きていると思われる。

次に、経度方向の流れ場の変化を検証すると、赤道域を中心に大きく変化していることが明らかになった。躍層の変化が赤道潜流等の赤道の循環場に大きな変化が生じたと推測される。水温の変化が強く表れた海山上では、流れの向きが東向きから西向きへと逆転していることがわかり、β-plume のような現象が起きていることが考えられる。

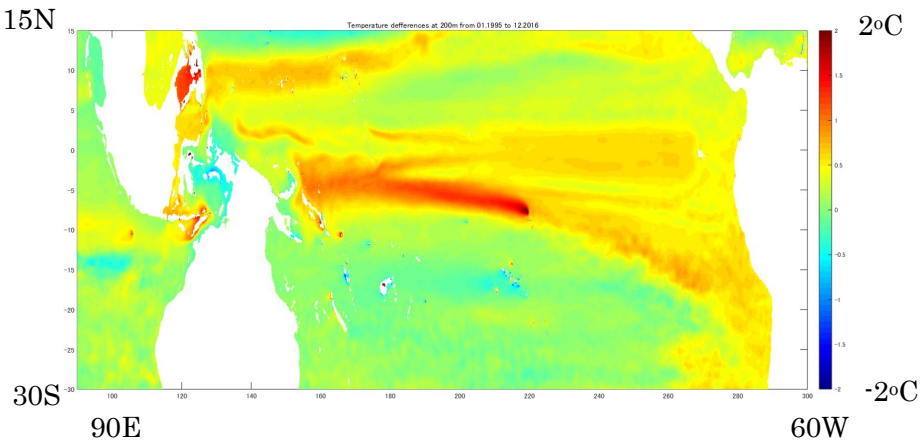


図 1 ：潮汐混合スキームを導入したことによって生じた水深 200m の水温差（On minus Off の 22 年平均；松原 2019 より）

Sasaki et al. (2018)ではインドネシア通過流の流量を見積もっていたため、流量増加がいったいどの海峡・深さで起きていたのか不明だった。そこでインドネシア多島海へとインドネシア通過流が流入する海峡で起きた流れ場と水温の変化を調べた。その結果、流量増加は特に Makassar Strait を中心に起きていることが明らかになった。Makassar Strait はインドネシア通過流の 80%の流量がある主要なルートに位置する海峡である。さらに解析を進めると主に水深約 200～500mの流れが強くなっていることがわかった。この深さはちょうど水温躍層付近に相当することから、増加したインドネシア通過流の流れは主に太平洋の水温躍層付近の海水をインドネシア多島海へと運んでいることを示している。

4. 考察

潮汐混合スキームを海洋大循環モデルに導入したことによって生じるインドネシア通過流の流量増加は太平洋赤道域の躍層付近の水温・循環場の変化がカギを握っていることが明らかになった。躍層付近の変化がインドネシア多島海の海峡に伝わり、流れの強化と流量増加へと繋がっている。今後、潮汐混合による湧昇の強さをさらに検証することでインドネシア通過流の流量増加の起因となっている箇所を特定する必要がある。

5. 研究成果

学会発表

2018 年海洋学会秋季大会， インドネシア多島海および周辺海域における潮汐混合の影響， 松原孝平・木田新一郎・佐々木英治・古恵亮

6. 研究組織

代表者	海洋研究開発機構・アプリケーションラボ	主任研究員	佐々木 英治
協力者	海洋研究開発機構・アプリケーションラボ	主任研究員	野中 正見
協力者	海洋研究開発機構・アプリケーションラボ	主任研究員	古恵亮
世話人	九州大学・応用力学研究所	准教授	木田新一郎

大阪湾に出現するフロント構造と海洋環境の解析

神戸大学内海域環境教育研究センター　林　美鶴

1. 目的

風や淡水流入の空間偏差はないと仮定する時、瀬戸内海では成層・混合指標＝2.5～3.0 に潮汐フロントが形成されると言われている。大阪湾では、西宮環流と沖ノ瀬環流の境界に潮汐フロントが形成されるが（藤原ら、1994、中辻・藤原、1995)、河川影響がなければ潮汐フロントは成層・混合指標＝3.0～3.5 に形成され（Yanagi and Takahashi, 1998)、大潮時にはフロント位置は海峡から離れ且つ変動が大きい（湯浅ら、1996)、などが言われている。これらは、大阪湾に形成されるフロントは明石海峡での鉛直混合により形成されるだけでなく、淀川からの淡水流入による成層も寄与し、かつ潮汐の状態によって時間変動することを意味している。フロントは視認しやすい海面での現象で、研究においても主として海面を対象にしてきた。しかし実際には海水の収束発散場として立体構造を持ち、その機能が沿岸海域の生物生産、水質汚染や漂流ゴミなど、各種の環境テーマに大きな影響を与えている。本研究では、大阪湾の潮目形成域で ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler：超音波ドップラー多層流向流速計)により流動構造を、CTD(Conductivity Temperature Depth profiler)により成層構造を観測し、潮目の鉛直構造の把握を試みた。

2. 方法

神戸大学大学院海事科学研究科付属連取船深江丸で図 1 に示す通り、34°-32’N を、135°-01’～20’E の間で往復した。往復の間、ADCP による流向・流速測定と、CTD による表層水の水温・塩分測定を行い、復路では測点①～⑥に停船して CTD による水温・塩分鉛直分布即手を行った。14 時 50 分に明石海峡の下げ潮流が最大になることから、この時刻を挟んだ時間帯で観測を行った。ADCP は、TELEDYNE RD INSTRUMENTS 社製ワークホースマリナーの 300kHz で、第一層深度 5.9m、層厚 1m、90 層測定に設定した。鉛直分布測定に用いた CTD は、アレック電子社（現、JFE アドバンテック社）製クロロテック AVL220-RS で、0.2 秒毎の測定値を深度 10cm 毎に平均した。表層水測定に用いた CTD は JFE アドバンテック社製 AAQ-H11 で、界面から約 3m の船底からのインテイク水を計測した。

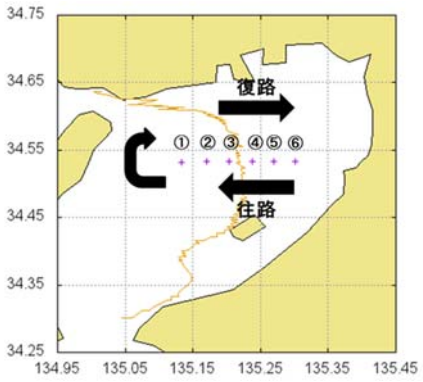


図 1　測点位置（紫色の＋）と 20m 等深線（黄色の線）

3. 結果

浮遊物質や泡などが筋状に伸び、海面が収束しているのを目視で確認した。図 2 は表層水温と塩分の時間変動で、青及び赤の縦線の時刻（位置）で収束を確認した。この前後で、往路では水温が 1.2℃、塩分が 0.6、復路では水温が 1.1℃、塩分が 0.9 急変していることから、これがフロントであると思われる。またフロントの位置は、往路では測点③の西側だったが、復路では東側にあった。すなわち 98 分間にフロントは東に 1.6mile 移動した。

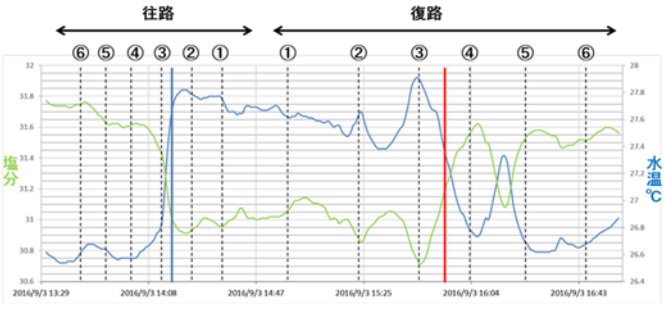


図 2 表層水温・塩分の時間（空間）変動とフロント位置

図 3 に鉛直流、東西流、南北流の鉛直断面を示す。フロントの西側に鉛直流が見られ、明石海峡

での強潮流による鉛直混合域になっている。東西流は全体に東流で、フロントの西側で速く、この下げ潮流によりフロントが移動したと考えられる。南北流は、フロントの西側では南流で、東側では弱かった。図 4 に水温、塩分、密度の鉛直断面を示す。密度は、水温と塩分から算出した。フロントの東側には、深度 5m 程度の高温・低塩・低密度水が分布し、海底にかけて成層化していることが伺える。一方、西側では、深度 2m 程度まで、それより底層と比較してやや高温・低塩・低密度の海水が見られるが、それより底層では海底まで均一である。

以上の測定から、フロントの西側では強い南西の下げ潮流が卓越して鉛直混合し、東側では弱い東流により成層化していること、及びフロント位置は移動することが確認された。

5. 成果公表

なし

6. 研究組織

林　美鶴　神戸大学　准教授

磯辺篤彦　九州大学　教授

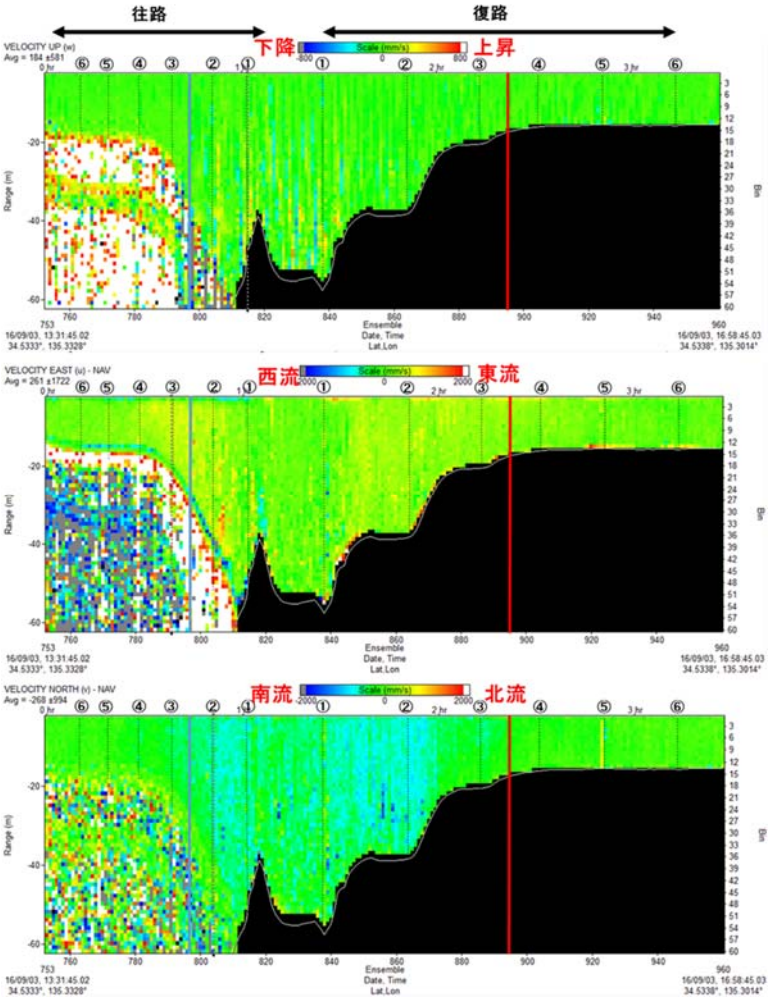


図 3　ADCP による鉛直流（上）、水平流の東西成分（中）と南北成分（下）の鉛直－時間（空間）断面

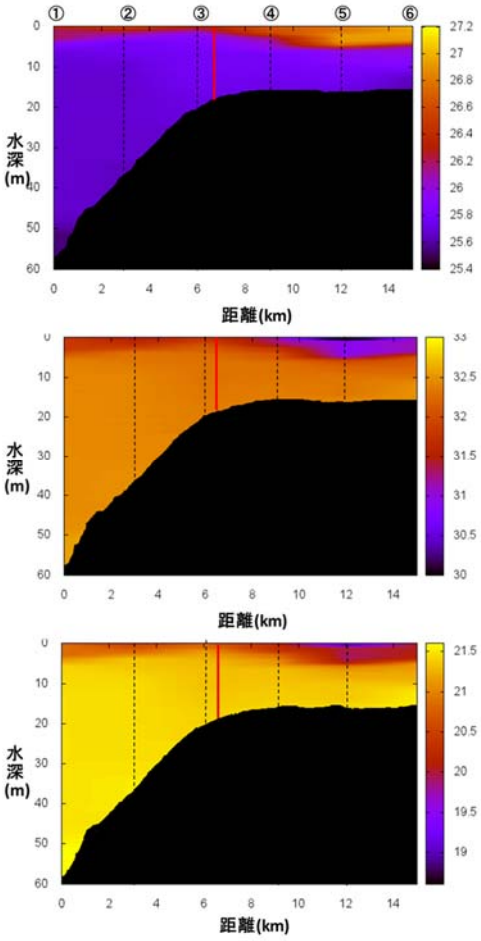


図 4　CTD による水温（上）、塩分（中）、密度（下）の鉛直空間断面

北東アジアにおける粒子状物質の輸送・変性過程のモデル表現に関する研究

神戸大学大学院海事科学研究科
山地一代

1. 目的

海洋研究開発機構（JAMSTEC）と神戸大学などの調査を通して、長崎県福江島にて観測されている PM2.5、および、その主要成分、さらに、それらの前駆物質の大気中濃度を大気質モデルが十分に表現できていない点が指摘されている。我々は、アジア大陸から日本への輸送中の物理・化学過程のモデル表現に焦点をあて、このモデルと観測間の不一致点の原因解明と、その結果を反映させたモデル表現の向上に取り組んでいる。このために、北東アジアを中心にエアロゾルモデル研究を展開する気象庁気象研究所、神戸大学、さらに、その技術を応用利用しエアロゾル再解析マップを開発した応用力学研究所の研究者にて共同研究を進めて行くことが重要である。さらに、大陸からの移流の入口である九州北西部にてエアロゾルの高精度観測を実施している応用力学研究所、JAMSTEC との共同研究を発展させ、九州を基盤とする共同研究の構築が待たれる。我が国にて広く利用されている、大気質モデル（CMAQ：Community Modeling and Analysis System）による北東アジア地域における粒子成分濃度のモデル表現向上のために、複数の異なるモデル結果と九州北部の観測データとの比較を通して、各モデルにて扱われている反応・輸送プロセスとの比較・検証を行なう。得られた差異に基づき、CMAQ の要改良個所を特定し、モデル表現向上のために重要なプロセスを CMAQ へ導入することを検討する。本研究では、可能な限り入力データを統一した、２種類の大気質モデル（CMAQ・NHM-Chem）による PM2.5、および、その関連物質の再現性を調査した。

2. 比較実験のための物質輸送モデル設定

我が国の広範囲にて、断続的に大気中 PM2.5 濃度の上昇が観測された 2016 年 12 月を対象としたモデル実験を実施した。モデルの格子条件（D1: アジア域/ 45km/ 207×157grids、D2: 日本域/ 15km/ 147×141grids）、気象データ（WRF/NCARFNL, ds0833(0.25degree)）、広領域側面境界条件（全球モデル：CHASER）、および、排出量データは共通とし、Chatani et al(2018, Atmosphere)に準ずるモデル設定にて比較実験を行った。

3. 結果および考察

図 1 は、長崎県五島における、2016 年 12 月 6-26 日、モデルと観測による PM2.5 濃度の 1 時間値を示す。CMAQ、NHM-Chem ともに観測された PM2.5 濃度の変動をよく捉えていた。特に、12 月 9 日正午頃にピークとなる PM2.5 濃度の上昇を両モデルともに非常に良く再現できていたが、一方で、CMAQ が PM2.5 の観測濃度を 20 μ g/m^3 程度過大評価する傾向が見られた。この際、CMAQ による硝酸塩濃度が大幅に増大しており（30～40 μ g/m^3、全 PM2.5 濃度の 40% におよぶ）、Shimadera et al.(2018)にて指摘されているように、

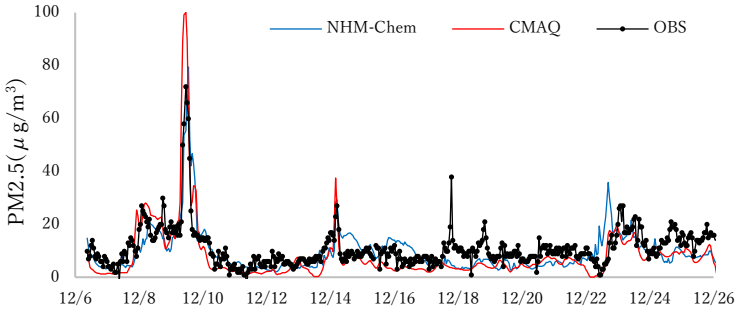


図 1 長崎県五島における 2016 年 12 月 PM2.5 濃度（1 時間値）

CMAQ による寒候期の硝酸塩濃度の過大評価の影響が考えられる。12 月 9 日の日平均値について、PM2.5 成分を比較すると、CMAQ は硝酸塩の割合が大きい（全 PM2.5 濃度の約 30%）が、NHM-Chem による硝酸塩の割合は全 PM2.5 濃度に対して約 15%であった。他方、NHM-Chem は、OC の割合が大きく（全 PM2.5 濃度の約 20%）、また CMAQ の約 1.3 倍であった。今後、両モデル表現を詳細に比較することで、よく知られている CMAQ の寒候期の硝酸塩の過大評価と OC の過小評価の改善を進める予定である。12 月 17-19 日、両モデルともに観測を過小評価しており、その成分濃度もモデル間に大きな違いが見られなかった。12 月 15-16 日、および、12 月 11 日において見られる NHM-Chem の過大評価に関して、CMAQ では僅かしか確認できていない、PM2.5 中の Na、Cl の成分濃度の上昇によるもの可能性が高い。さらに、12 月 24-25 日、CMAQ は硝酸塩、NHM-Chem は Na、Cl の各成分の上昇が見られたが、両モデルともに PM2.5 の過小評価（観測の 40～60%程度）を示した。Na、Cl 成分濃度の違いは、各モデルの中で発生させる海塩粒子の生成過程や粒径分布の違いに起因する可能性が考えられる。

4. 研究組織

研究代表者　山地一代 神戸大学 准教授
所内世話人　弓本桂也 九州大学応用力学研究所　　准教授
研究協力者　平山友基 神戸大学 博士前期課程 2 年
研究協力者　金谷有剛 海洋研究開発機構 主任研究員
研究協力者　梶野瑞王 気象研究所　　主任研究員

黒潮大蛇行を引き起こす膠州海山における傾圧不安定の発達過程

東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻　田中祐希

1. 本研究の背景と目的

日本の南岸を流れる黒潮には，「非大蛇行流路」と「大蛇行流路」という二つの安定した流路が存在することが広く知られている。黒潮の非大蛇行から大蛇行への遷移は，(1)トカラ海峡に近づいてくる高気圧性の中規模渦と黒潮との相互作用による九州南東沖での小蛇行の励起とその東への伝播，(2)紀伊半島の 200 km ほど南に位置する「膠州海山」上を通過する際のこの小蛇行の急激な増幅，を経て引き起こされる(Endoh and Hibiya 2001 など)。

Tanaka and Hibiya (2017)は，二層準地衡流モデルに膠州海山を模した海底地形を組み込むことで，黒潮の非大蛇行流路から大蛇行流路への遷移，特に，海山上における小蛇行の急激な増幅過程を再現できることを示すとともに，この増幅が海山上に捕捉された傾圧不安定によるものであることを，線形安定性解析を通じて明らかにした。実際，数値モデルで再現される小蛇行は，その発達の初期段階においては，線形安定性解析で得られる不安定モードと空間スケール・構造ともよく類似している。

しかしながら，発達が進むにつれて，数値実験で再現される小蛇行は線形安定性解析で得られる不安定モードからずれていく。すなわち，小蛇行は増幅するにつれて，徐々にその成長速度および伝播速度が遅くなるとともに空間スケールが大きくなり，100 日程度で海山全体を占めるようなほぼ定常の大蛇行状態に至るという特徴を示すが，このような特徴は線形理論では説明できない。

この不一致は，小蛇行の発達の後期段階においては非線形効果が重要になることを示唆している。そこで本研究では，小蛇行が定常な大蛇行状態に至るまでの非線形な発達過程を明らかにするため，その第一歩として，海山上の不安定モードの発達に非線形効果を考慮することで実際にこのような小蛇行の発達後期の特徴を再現できるのかを調べる。

2. 方法

Tanaka and Hibiya (2017)と同じ二層準地衡流モデルを用いる。東西方向に周期境界条件，南北方向に直交流ゼロの境界条件を課した f 面上の水路中に海山を置き，背景流として上層に一様な東西流を仮定する(図 1a)。この背景場に線形安定性解析で得られた海山上の不安定モードを小振幅の初期擾乱として与え(図 1b)，その後の時間発展を「非線形項なし（線形実験）」と「非線形項あり（非線形実験）」の 2 ケースで比較する。

3. 結果と考察

図 2 に「非線形項なし」と「非線形項あり」の各ケースにおける擾乱の時間発展の様子を示す。計算開始から一週間後程度までは，「非線形項なし」と「非線形項あり」の両ケースで大きな違いはなく，初期に与えた擾乱はどちらのケースにおいてもほぼ線形安定性解析で予測される通りに増幅していく(図 2a vs. 2b)。

ところがその後，「非線形項なし」の場合には擾乱はそれまでと同様に成長を続けるのに対し，「非線形項あり」の場合には擾乱の成長は止まり，ほぼ 100 日程度で大蛇行に類似した定常状態へと達する(図 2c)。このように，海山上の傾圧不安定モードの発達において非線形項まで考慮することで，線形理論では説明できなかった小蛇行の発達後期の特徴，すなわち成長速度や伝播速度が遅くなるとともに，空間スケールが大きくなって海山全体を占めるようになるといった特徴が再現可能であることが示された。

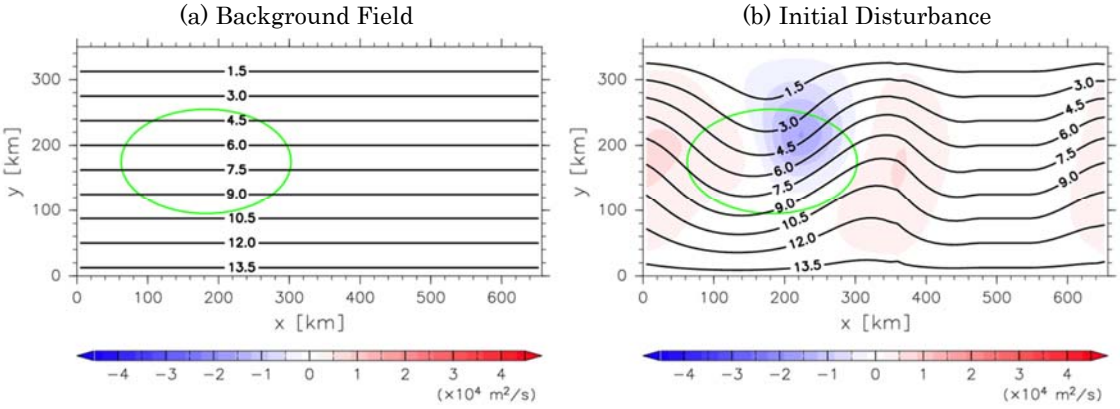


図 1. 二層準地項流モデルを用いた本実験において仮定された，(a)背景場と(b)初期擾乱。コンター($\times 10^4$ m^2 s^{-1})は上層の流線関数，カラーは下層の流線関数をそれぞれ表し，緑線は海山の縁を示す。上層の流線関数は背景場と擾乱を足し合わせたものを表示している。

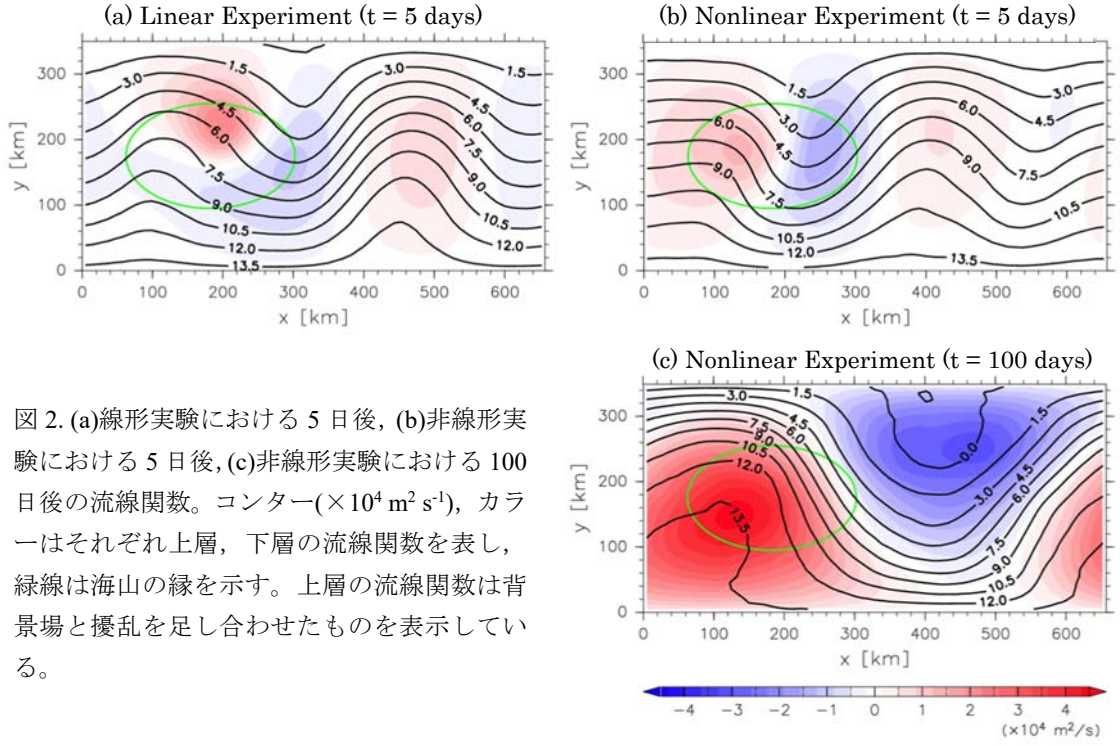


図 2. (a)線形実験における 5 日後，(b)非線形実験における 5 日後，(c)非線形実験における 100 日後の流線関数。コンター($\times 10^4$ m^2 s^{-1})，カラーはそれぞれ上層，下層の流線関数を表し，緑線は海山の縁を示す。上層の流線関数は背景場と擾乱を足し合わせたものを表示している。

雲粒子センサによる large-sparse 雲の観測

防衛大学校　地球海洋学科　岩崎杉紀

目的

本研究の目的は、Large-and-Sparce particle Cloud (LSC)と我々が名付けた雲を、衛星データの解析を行いその性質を明らかにすることである。LSC は衛星搭載ライダ CALIOP では観測しづらく、衛星搭載雲レーダ CloudSat では有意に観測できる、通常の雲とは逆の性質を持っている（図1参照）。LSC に対応するであろう雲の先行研究は、Hughes (1960, MWR)と Hagihara et al. (2014, JGR)の2例しか確認できず、どちらもそれ以降は研究されていない。LSC にどのような役割があるか全くわかっていない。本研究では、これを衛星データから明らかにする。

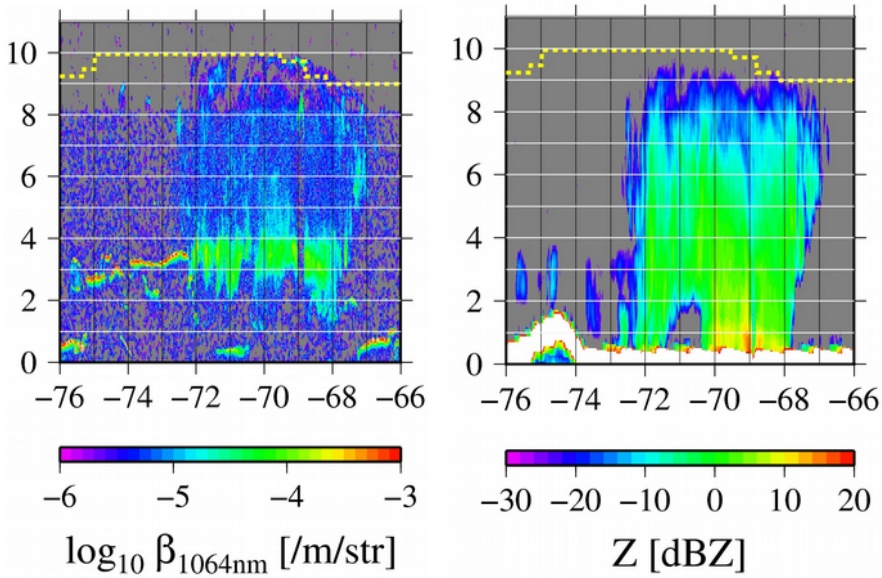


図1　2007年1月8日のドレーク海峡（南極とパタゴニアの間）で観測された CALIOP の後方散乱係数 β と CloudSat のレーダ散乱因子 Z の緯度高度断面。南緯67度から72度で高度5kmから10kmの間に CloudSat では有意に信号があるのに CALIOP ではノイズレベルとなっていることが分かる。

方法

解析には、CloudSat と CALIPSO のデータを複合的に用いた A-train 解析プロダクト（九州大学データ、以降 KU データ）を用いた。KU データには、雲粒の特性や（水雲、過冷却の水雲、氷晶、など）、粒径分布情報（粒子の大きさや個数密度など）の情報が CALIOP と CloudSat の軌道ごと（緯度経度）・高度ごとにリトリーバルされている。

LSC を KU データから取り出すため、(1) 波長 1064nm の β が 10^{-5} m^{-1} str^{-1}以下、(2) Z が-15 dBZ 以上、(3) 積算した往復のライダの消散係数が 0.1 以下、これらを満たす信号が 500 m 以上続くものを LSC とした。(1) と (2) は図1の状態を表しており、LSC の性質を表している。これらのしきい値は図1と同様のいくつか事例から選んだ経験値である。(3) はライダの減衰を無視し信号を公平に扱うための便宜的なしきい値である。LSC の性質とは無関係である。(1) と (2) から、LSC の粒子半径は50 μm以上で個数密度が 10^{-4} m^{-3}以下であることが推測できる。

結果

図2に、しきい値 (1) から (3) を用い、2006年11月から2007年10月の KU データから緯度経度1度ごとの、すべての雲の出現に対する LSC の出現頻度分布を示す。この解析期間は CALIOP のライダ送光方向が真下方向に向いている。送光方向はこの間の一時期に0.3度真下からずれているときもあるが、それらは解析から省いている。これは、氷晶が整列している場合、KU データのリトリーバル結果が異なる可能性があるからである。

図2から、LSC は北極海や南極大陸の海沿いに出現しやすいことが分かる。同様の解析から、LSC の

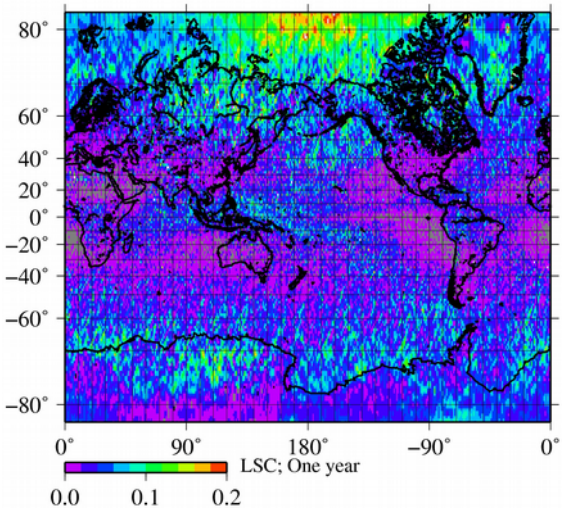


図2 LSC の出現頻度分布。

出現頻度は春先に若干上がることも分かった（図示していない）。

次に、LSC の出現確率と過冷却の水雲の出現確率の積に対する、LSC と過冷却の水雲が同時に出現確率の比を求め、これを $R_{LSC \cap SC}$ とした。同様に氷晶のものを $R_{LSC \cap 2D}$ とした。しきい値（3）から、LSC が上にあり、過冷却の水雲や氷晶がその下にある状態である。もし LSC と過冷却の水雲（氷晶）が完全に独立な事象であれば、$R_{LSC \cap SC}$（$R_{LSC \cap 2D}$）は 1 となる。LSC と過冷却の水雲（氷晶）が常に共存すれば、$R_{LSC \cap SC}$（$R_{LSC \cap 2D}$）は 1 以上、そうでなければ 1 以下となる。図 3 は北緯 60 度から 90 度で平均した月ごとの $R_{LSC \cap SC}$ と $R_{LSC \cap 2D}$ である。これより、LSC と過冷却の水雲は共存せず（$R_{LSC \cap SC}$ が常に 1 以下）、LSC と氷晶は共存しやすいことが分かる（$R_{LSC \cap 2D}$ が常に 1 以上）。

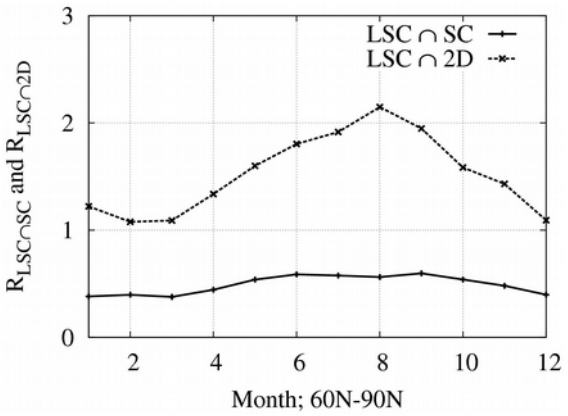


図 3 LSC の出現に対する「LSC と氷晶」「LSC と過冷却の水雲」が存在する割合。北緯 60 度から 90 度の平均

LSC は光学的に薄いため、それ自体では放射や水循環に影響を与えないはずである。しかし、過冷却の水雲を消す作用があることが図 3 から分かる。過冷却の水雲は世界中に存在しているが、LSC は高緯度に多く存在している。このため、LSC は高緯度の気候を調整している可能性があることが分かった。

まとめ

衛星ライダより 1 桁以上感度の良い地上ライダ観測を数十年にわたり行っている研究者に本結果を見てもらったとき「目に見えないが雲らしい信号があることは以前から知っていた。しかし単に薄い雲であろうという認識だった。」とのことだった。ライダ単体では粒径分布が推定できないのでその雲の特殊さが分からないためである。

北極での地上ライダと地上雲レーダの同時雲観測も珍しくはない。両データを組み合わせれば粒径分布の推定ができる。筆者もそのデータを見たことがあるが、LSC が存在する可能性があるという事実を知っていても、そのデータを見つけることは困難であった。極域は下層雲に覆われていることが多いためである。

CALIOP と CloudSat の両方があり、それらによる粒径分布や雲粒情報がリトリーバルできている KU データがあって初めて、今まで存在すら認識されていなかった LSC が高緯度の気候に影響を及ぼす可能性を示すことができた。

次年度に向け、LSC のその場観測の手はずや、それを解析するためのパーセルモデルの開発を行っている。LSC の生成過程の解明につながる研究が出来ればよいと考えている。

成果報告

学会発表

岩崎杉紀、岡本創、佐藤可織、片桐秀一郎、藤原正智、柴田隆、坪木和久、小野貴司、杉立卓治、可視では判別できないほど薄い雲が他の雲に与える影響、日本気象学会春季大会、つくば市、2018 年 5 月 16 日。

瀬口貴文、**岩崎杉紀**、鴨川仁、岡本創、石元裕史、牛山朋來、積乱雲の雲頂から飛び上がる巻雲：Jumping Cirrus の観測と定量的解析による特徴、日本気象学会春季大会、つくば市、2018 年 5 月 17 日。

瀬口貴文、**岩崎杉紀**、鴨川仁、岡本創、石元裕史、牛山朋來、Jumping Cirrus の地上観測と衛星・ラジオゾンデ・地上レーダーによる定量的解析、日本気象学会秋季大会、仙台、2018 年 10 月 29 日。

岩崎杉紀、藤原正智、柴田隆、内野修、森野勇、岡本創、佐藤可織、片桐秀一郎、坪木和久、小野貴司、杉立卓治、Large-Sparse Cloud（粒径大きく個数密度少ない雲）の CPS ゾンデとライダの同時観測結果、日本気象学会秋季大会、仙台市、2018 年 10 月 31 日。

投稿論文

Seguchi, T., **S. Iwasaki**, M. Kamogawa, T. Ushiyama, and H. Okamoto, 2019: Observation of jumping cirrus with ground-based cameras, radiosonde, and Himawari-8. J. Meteor. Soc. Japan, 97, https://doi.org/10.2151/jmsj.2019-033.

Iwasaki, S., T. Seguchi, H. Okamoto, K. Sato, S. Katagiri, M. Fujiwara, T. Shibata, K. Tsuboki, T. Ono, and T. Sugidachi, Large-and-Sparse-particle Cloud (LSC): subvisible clouds detected by space-borne cloud radar above supercooled clouds at high latitudes, Polar Science, revised.

瀬口（Seguchi）が筆頭著者のものは、2017 年度に共同利用で支援して頂いた成果。

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

平成 28 年度に実施された文部科学省国家課題対応型研究開発推進事業宇宙航空科学技術推進委託費では，沿岸波浪と GNSS 反射波の関連性を調査するための基礎的な観測を実施し，検証のための波浪ブイの観測精度や沿岸や外洋の波浪の統計的な性質の抽出の信頼性の検討を行った．これまでに実施した，GNSS レシーバを用いた観測結果を踏まえ、波浪が GNSS 反射波に与える影響についての反射波信号と波浪の状況の比較検討を行う．また，既存の波浪観測データを用いて，2 次元スペクトルや波浪スペクトルの高次モーメント量などから風波とうねりの分離と風波発達に対するうねりの影響評価を行う．さらに、新たに海面直下の乱流観測を実施するための試験観測を行い，GNSS 観測による波浪の影響評価の拡張の可能性を検討する。

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：京都大学大学院理学研究科　助教
研究協力者：花房秀哉：京都大学大学院理学研究科　修士 2 年
所内世話人：市川香：応用力学研究所　准教授

手法と結果の概要

本研究では，波浪と GNSS 反射波の関連性を調査するための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（2017 年 9 月まで）と水資源機構琵琶湖開発総合管理所が所轄する安曇川沖総合自動観測所（2017 年 3 月まで）に GNSS レシーバーを設置した連続観測を行ってきた．今年度は，2017 年 1 月 7 日に琵琶湖北西岸の安曇川河口において実施した試験観測データを用いて GNSS 反射波を用いて海面高度を算出した結果について投稿論文にまとめ、受理された．解析した経路差に現れた摂動は，その周期や大きさから湖面の波浪の波形勾配が影響しているという結果が得られ、波浪の状況の重要性が示唆される．

波浪の状況は、それによる海面の状態変化が経路差に影響する一方で、その影響を評価することができれば、海面表層の波成乱流の評価につながる可能性がある。このことから、昨年度から継続しているうねりと風波の分離観測の解析に加え、今年度は波浪と海表面乱流の同時観測を試みた。

まず、昨年度研究で行った、うねりと風浪の分離手法の高度化により 2014 年 2 月から 3 月にかけて北西太平洋において実施された白鳳丸研究航海(KH-14-1)で行われた波浪観測データを中心とした波浪データを解析した．波浪観測にはこれまで本研究で利用してきたゼニライトブイ（株）社製の GPS 波浪ブイを用いた．昨年までの解析では，Kalma and Calkoen (1992)が提唱した擬無次元波浪エネルギーを利用して，うねりの存在下での風浪の発達度について調査したが，波浪観測データに性質の良くないデータが含まれることや外洋域でのフェッチをどう推定するかが課題であった。そこで観測された波浪から風波成分を抽出し、波浪エネルギーの尺度である equilibrium spectral range parameter と波齢との関係を調べることで異常データを検出し（図 1）、Mitsuyasu and Rikiishi (1978)などによるフェッチと吹走時間の関係を考慮して無次元フェッチを求めた。この結果を用いて比較すると、既往研究の通り、無次元風波エネルギーと非常に良い対応関係を得た（図 2）。これにより外洋域についても妥当なフェッチを計算可能であることが確認できた。

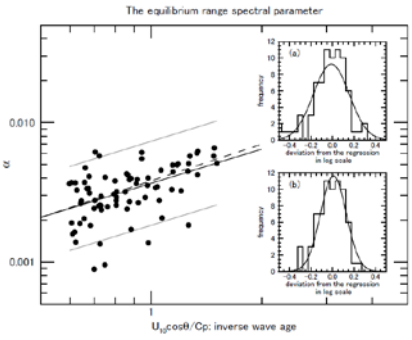


図 1 ：KH-14-1 で得られた equilibrium spectral range parameter と逆波齢の関係。図中(a)は対数空間での回帰直線からの偏差の度数分布を示す。(b)は回帰式からの 2 倍の範囲外の値を除いた場合の分布であり、(b)の方が標準分布に近い。

得られたフェッチを用いて Kalma and Calkoen (1992)が提唱した擬無次元波浪エネルギーを利用して，うねりの存在下での風浪の発達度について調査したところ、うねり成分を抽出して得られた有義波の波形勾配との関係はより明瞭になり（図 3)、うねりの存在によって波浪発達へ影響があることが確認された.

今年度はさらに、波浪と波成乱流の同時観測を目指して、Nortec 社製の慣性センサー付き精密 3 次元流速計(Vector)を本研究の経費で購入・作成した浮体システムに装着し、新青丸航海 KS-18-13 (代表：小松幸生博士）において海面乱流フラックスの直接観測と波浪観測の同時観測を実施した（図 4). Vector 内部に装着した慣性計の観測データを用いて Edson et al.(1998)が開発した船上における大気乱流の渦相関法の計算手法を応用して， 流速計の動揺による見かけ上の観測成分を除く方法を開発した。この方法で海面直下 1.4m の 62.5Hz での 3 次元流速変動を復元したところ、波浪に伴う流速変動とともに高周波流速変動を得ることに成功した。その結果の周波数スペクトルから、表面波に伴う流速変動に相当する周波数帯のパワーは時間的に安定しているものの、散逸過程にある周波数帯の流速変動は時間的に変化していることが分かった（図 5)。今後はここから得られた流速データから、水位変動に伴う流速成分と乱流成分とを分離し、波数スペクトルを求めることが課題である。

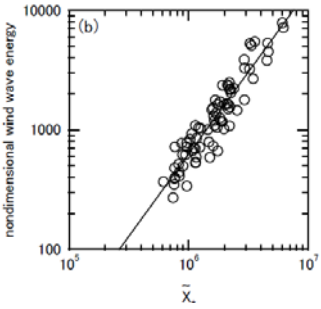


図 2：無次元フェッチと無次元風波エネルギーの対応

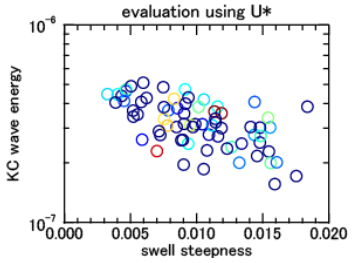


図 3：疑似無次元エネルギーとうねりの波形勾配の関係，点の色はうねりと海上風のなす角度を表す

本研究の成果を含む研究発表

原著論文

- Ichikawa K., T. Ebinuma, M. Konda, K. Yufu (2019): Low-Cost GNSS-R Altimetry on a UAV for Water-Level Measurements at Arbitrary Times and Locations, Sensors (accepted on Feb. 20, 2019)査読有

口頭発表

- Konda M., K. Kutsuwada, N. Suzuki, K. Ichikawa, 2018: The change of the energy of wind wave under the influence of swells observed by the GPS wave buoy, JPGU2018, ATT32-P06, 2018 年 5 月 21 日, 千葉県千葉市
- 市川香，海老沼拓史，李梓原，堤英輔，根田昌典(2018)：Error budget of GNSS-R altimetry on a multicopter, JPGU2018, ATT32-P02, 2018 年 5 月 21 日, 千葉県千葉市
- 奥村立樹，市川香、海老沼拓史，李梓原，根田昌典，吉川裕，馬場康之 (2018)：Wind-independent periodic variations of signal intensity of a geostationary GNSS satellite observed at an ocean observation tower, JPGU2018, ATT32-P03, 2018 年 5 月 22 日, 千葉県千葉市
- 根田昌典，矢島啓，市川香，由布圭，馬場康之，水谷英朗，久保輝広，(2018)：波浪に伴う海面直下の 3 次元流速場の変化の観測，名古屋大学 ISEE 共同利用研究集会「大気海洋相互作用に関する研究集会」、2018 年 12 月 16 日、京都市左京区
- 根田昌典，矢島啓，市川香，由布圭，馬場康之，水谷英朗，久保輝広 (2019)：外洋域における海面直下の 3 次元流速変動の観測について，名古屋大学 ISEE 共同利用集会　海洋波および大気海洋相互作用に関するワークショップ，2019 年 3 月 4 日―5 日、名古屋市千種区

図 4：Vector 観測システムの外観

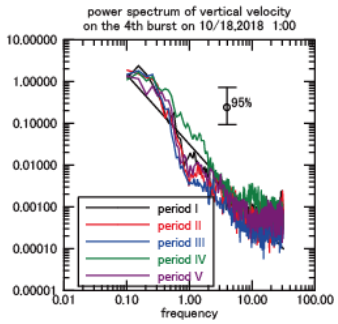


図 5：Vector によって観測された鉛直流速のスペクトルを示す。各色は 1 観測を約 2 分間毎に分割した部分データを表す。水面変異は約 0.25Hz である。1Hz から 10Hz 程度までは時間的なパワー変動がみられる。

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東北部は、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。

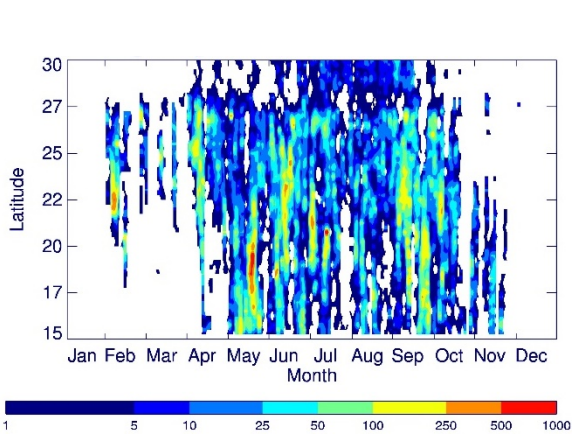
昨年度は収集・整理したデータを用いてより詳細な大気場の時空間変動に着目し、小規模な積雲対流活動に関連する現象を解明したので、今年度は複数年における対流不安定性と物質輸送の観点に基づく解析を実施した。

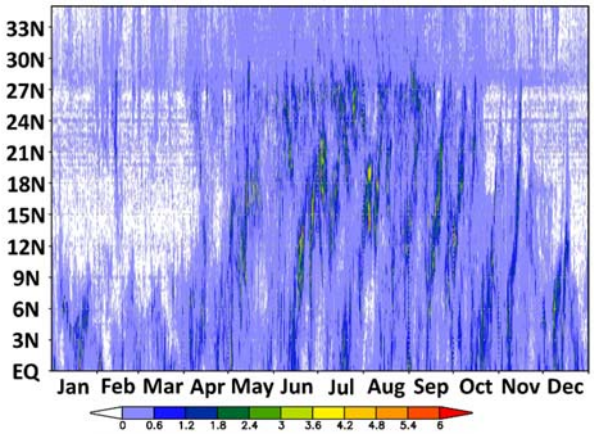
３．結果

今年度は、2005～2013 年の全球雷データ、降水強度、対流不安定を用いて、本研究対象領域を中心に解析を試みた。降水強度の指標として TRMM 3B42 を、対流不安定の指標として ERA Interim の 500hPa 面の飽和相当温位と 925hPa 面の相当温位の差(つまり、θ_e^*_500-θ_e_925 で計算され、差が小さいほど不安定であることを示す。) を用いた。まず東経 87.5～92.5 度平均の緯度時間断面図を、上記の 3 つについて示す。なお、年々変動が大きいため、代表として 2007 年を示す(**図 1**)。対象地域における雷の数はプレモンスーン期に間欠的に活発化し、モンスーン期に入ると 7 月中旬までは周期的に活発であるがその後収束していく。昨年度の解析では月単位での解析だったためこのような季節内変動をえることはできなかった。一方、降水強度はプレモンスーン期の間欠的な降水現象と一致している。また 9 月中旬～下旬まで活発な降水活動が見られ、その後も 10 月まで周期的な降水現象が見られている。このポストモンスーンの降水活動はこれまであまり研究されておらず、今後取り扱っていきたい。大気の安定度を見ると、プレモンスーン期に不安定で、その後モンスーン循環が卓越すると非常に安定した場が継続していることが明瞭にみられる。5 月初旬までは大気が不安定になると降水が見られ、雷も発生しているが、モンスーン期になるとそのような関係がまったく見られなくなる。このことはこれまでの解析で得られた、擾乱の特性の違いが関係していると考えられる。

大気の安定度は降水活動によって解消されると考えられるため、時間分解能を上げた解析が必要である。そこで、ERA Interim の時間分解能である 1 日 4 回(00, 06, 12, 18UTC)等に解析を分け、さらに対象領域内における地形の複雑性を除くため、インド・西ベンガル州の一部を含むバングラデシュ低地に領域を絞って、日変化について解析した(**図 2**)。雷回数ではプレモンスーン期には夕方にピークが明瞭に出ている一方、6 月や 10 月には朝方にもピークが見られる。降水強度は、09UTC（早朝）と 18UTC（お昼）にピークを持つ。対流不安定については、12UTC（朝）にピークが見られており、これらのことから対流活動がどのように発達するか、さらに解析を進めることで明らかになる道筋を得ることができた。

つづいて、雷発生数、降水活動、大気の安定度の関係を調べるために、上述した日変化を用いてそれぞれの事例を散布図に示した(**図 2（右下）**)。1mm 以上の雨を対象として、対流不安定と雷回数との関係を調べた。大気が比較的安定している場合でも雷の回数は多く、関係性が明瞭に見られなかった。対流不安定の指標そのものを改めて検証する必要があると考えられる。





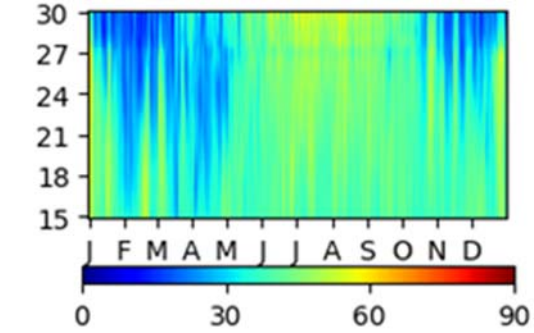
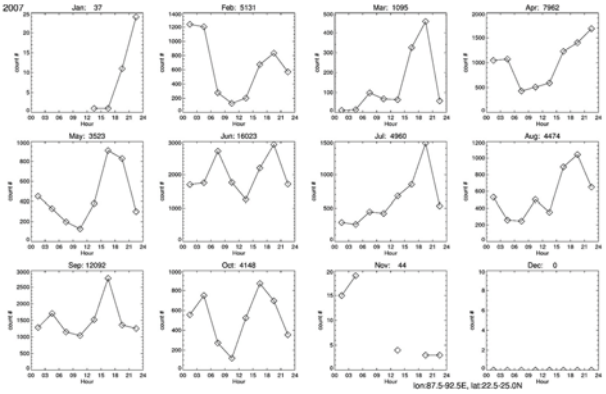
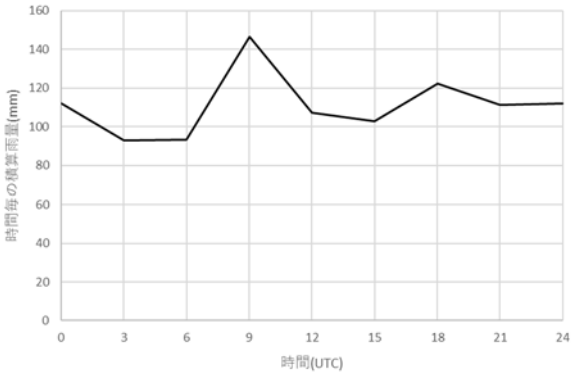
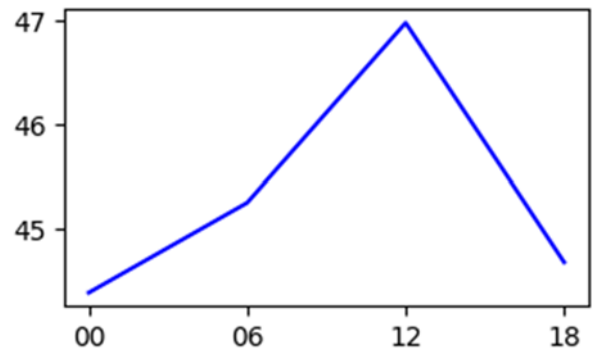


図 1：（左上）雷の回数、（右上）降水強度、（左下）500hPa 面の飽和相当温位と 925hPa 面の相当温位の差（対流不安定の指標）の、2007 年における東経 87.5～92.5 度平均の緯度時間断面図。







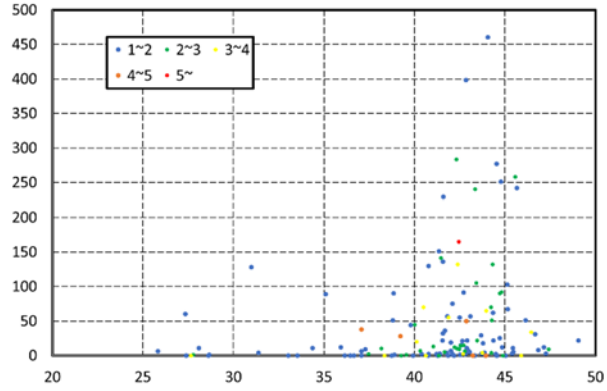


図 2：（左上）雷の回数（LT）、（右上）降水強度（UTC）、（左下）対流不安定の指標（UTC）の、領域平均（北緯 22.5～25 度、東経 87.5～92.5 度）の日変化。（右下）対流不安定（横軸）と雷回数（縦軸）の各降水強度ごとの散布図。

4．まとめ

今年度は、複数年における対流不安定性と物質輸送の観点に基づく解析を実施した。その結果、プレモンスーン期の大気が不安定な時期に間欠的に雷回数が増加し、その結果、降水強度も増加している関

係が明瞭に見られた一方、モンスーン期がプレモンスーン期に比べて大気が安定しているにもかかわらず雷の回数が多かった。さらに、擾乱の発赤メカニズムの解明に迫るため、日周期についても検討した。その結果からは、年を通じて同じ高さの大気の状態の差を対流不安定の指標としていることが、明瞭な関係を示すことを妨げていることが考えられ、実際の鉛直構造をより詳細に解析する必要があることが分かった。

今後は、これらの季節内変動や経年変動を、ERA-interim、JRA55 といった再解析データによる環境場や地上気象観測データやレーダデータによる発生機構を明らかにし、その積雲対流の発生する場の鉛直構造を総合的に解析する。「プレモンスーン期における大気不安定度の季節内変動」、「バングラデシュにおける降水システムの発生・発達機構の解明」、「夏季アジアモンスーンにおける微量気体成分の季節内変動と年々変動」の結果をそれぞれ論文として出版することを最終的な目標とする。また、ポストモンスーン期の降水活動はこれまでサイクロンに注目が集まり、総観場からの解析が少なかったので、今後の課題としたい。

５．研究組織

研究代表者	木口 雅司	東京大学生産技術研究所 特任准教授
研究協力者	江口 菜穂	九州大学応用力学研究所 助教
研究協力者	村田 文絵	高知大学理工学部 講師
研究協力者	林 泰一	京都大学東南アジア地域研究研究所 連携教授

浅海域用水中グライダーの動作試験と運用に関する研究

長崎大学・水産学部　　森井　康宏

1. はじめに

環境変化の予測，環境保全に関する研究のためには、深い海域だけでなく沿岸の水深 50m 以浅の超浅海域の海洋データも必要である。従来の手法としては係留ブイや観測船による観測が考えられるが多点観測に時間がかかりコストも非常に高い。そこで、浅海域で使用可能な水中グライダーを開発し、観測コストの低減を図りたい。水中ビークルの開発には模型による水槽試験のみならず実機を使用した水槽試験や実海域試験が不可欠であり、開発を行うビークルの運動性能や制御性能に関する試験を共同で実施する。

本年度は、円盤型水中グライダーに取り付けた垂直尾翼が発生する流体力の計測、深海機器力学実験水槽において実施された直尾翼付き円盤型水中グライダーの針路保持制御実験、水中ドローンに関する情報収集、水中ビークルの運用に欠かせない母船のオートパイロットに関する情報収集について報告する。

2. 円盤型水中グライダーに取り付けた垂直尾翼が発生する流体力の計測

浅海域でのバーチャルモアリングを可能とするには既存のバーチャルモアリング用円盤型水中グライダーに垂直尾翼を取り付けビークルの旋回性能（針路保持性能）を格段に向上させる必要がある。そこで、運動シミュレーションや運動制御コントローラを設計するのに必要な垂直尾翼が発生する流体力の計測を 1/4 スケールの模型を使用して行った（Fig. 1）。

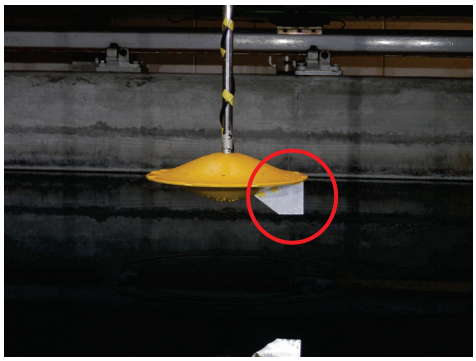


Fig. 1　垂直尾翼が発生する流体力の計測

計測結果の一例として垂直尾翼のラダー角度に対する回頭モーメント係数を Fig. 2 に示す。舵角 25 度程度までは失速せず、回頭モーメントは舵角に比例することがわかる。ただし、本係数値は垂直尾翼を矩形翼に近似して得られる推定値より小さい値となることがわかった。

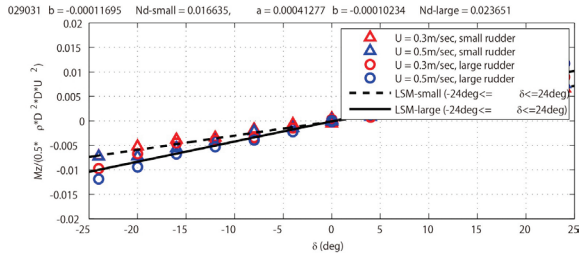


Fig. 2　計測された流体力係数

3. 水槽における垂直尾翼付き円盤型水中グライダー（実機）の針路保持制御実験

2 章で得られた流体力係数を使用して針路制御 LQI コントローラを設計し水槽で性能検証試験を行った（Fig. 3）。

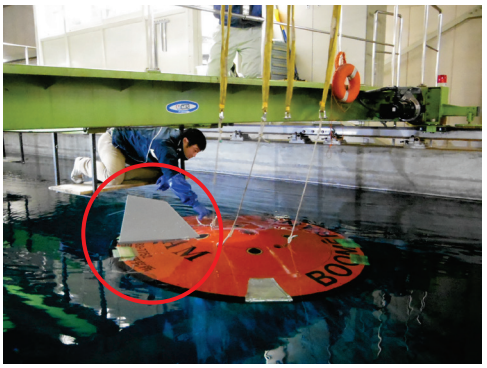


Fig. 3　垂直尾翼付き円盤型水中グライダー（実機）

ラダー角を 0 度とし、ビークル内に搭載された重心移動装置によりビークルの重心を左右に移動し、ビークルをヒールさせることにより針路保持制御を行った結果を Fig. 4 に示す。ビークルに取り付けた安全索を引っ張ることにより発生する回頭モーメントを外乱とした。

垂直尾翼がなく制御を行わない場合は外乱により針路（ビークルの回頭角）が大きくずれてしまう

が、垂直尾翼と制御の効果により外乱に対して針路保持が行われていることがわかる。

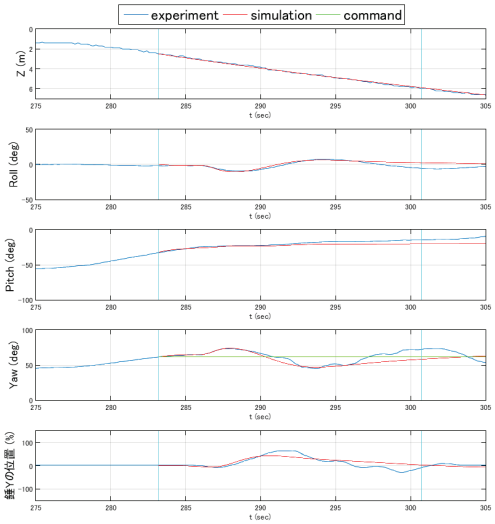


Fig. 4　垂直尾翼付き円盤型水中グライダーの針路保持制御実験結果

4．水中ドローンに関する情報収集

2019 年 2 月 21 日、横浜・大桟橋ホールで開催されたブルーアース・テク 2019 に参加し、水中ドローン（Fig. 5）に関する情報を収集した。

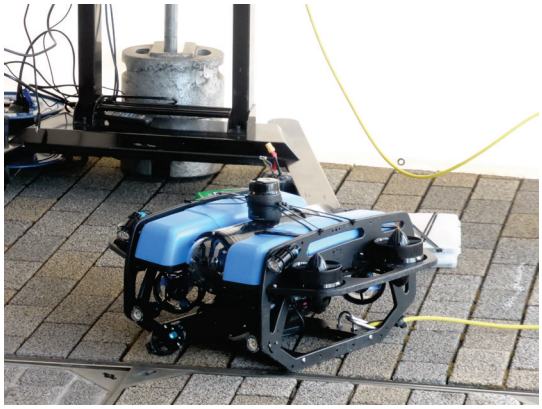


Fig. 5　水中ドローンのオペレーションデモ

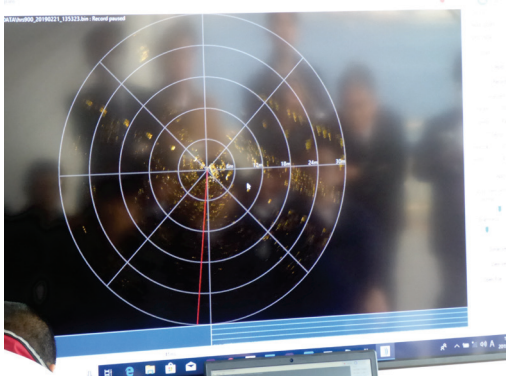


Fig. 6　ビークルに搭載されたソナー映像

ビークルに搭載されたソナー（Fig. 6）は障害物を避ける上でビークルの運用に非常に有用であることや、小型の ROV では流れに対するホバリング性能を確保することが困難であることなどがわかった。また、小型ビークルの母船からの位置情報の確保手法について情報を得ることができた。

5．オートパイロットに関する情報収集

2019 年 2 月 22 日に東京計器を訪問し、水産学部漁業練習船「長崎丸」に搭載されているオートパイロットに関する詳細情報を収集した。

Fig. 7　東京計器におけるオートパイロットに関する情報収集

PID 制御における荒天時のゲイン調整方法やアダプトモード時の制御方法について質問し、モード切替時には PID 制御とアダプト制御間の連続性はないこと、旋回時の切り替えは推奨しないこと、アダプトモードはいわゆる適応制御を行っているわけではないことなどがわかった。水中ビークル運用時やビークル投入・回収時の操船に有用な情報を得ることができた。

6．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（長崎大学水産学部）ほか 9 名

中村昌彦｛所内世話人｝、野田　穣士朗

（九州大学応用力学研究所）

CloudSat 地表面データによる衛星搭載雲レーダプロダクトの評価手法の開発

名古屋大学宇宙地球環境研究所　高橋　暢宏

目的

本研究は 2019 年度に打ち上げ予定の EarthCARE 衛星に搭載される雲レーダやさらに将来に計画される衛星搭載の雲・降水レーダのミッションに向けて、地表面（特に海表面）の散乱断面積の推定手法の検討を行うものである。応用力学研究所の岡本教授のグループと連携し、同研究グループが開発している雲レーダアルゴリズムの高度化にこの知見を生かすことを目的とする。

研究の具体的方法

衛星搭載雲レーダからの降水量や雲水量を定量的に推定するためには、雨や雲による電波の減衰を考慮する必要がある。衛星では、上空から下方に向かって観測を行うため、地表面（海表面）からの散乱強度は減衰補正のための格好の境界条件として用いられるが、地表面の散乱強度は地表面状態に依存しており、その特性を正確に把握する必要がある。本研究では、人工衛星搭載雲レーダの利用を想定して、これまであまり研究がなされていない雲レーダで用いられている周波数（94GHz）における地表面（特に海表面）の散乱断面積に関する研究を行う。

具体的には、CloudSat 衛星搭載雲レーダが実際に観測したデータを用いた解析を行う。雲や雨の減衰の影響を除去した地表面散乱断面積を推定するために、標準プロダクトにある（雲や雨の減衰の影響をうけた）規格化散乱断面積と雲の有無判定フラグを用いることで減衰の影響を受けたものとそうでないものに分類し、統計的な比較を行う。さらに、衛星や再解析データによる地表付近の風のデータを用いたデータベースを構築することにより、汎用性の高いプロダクト作成に結び付ける。

研究成果報告

1. AMSR2 海上風速と CloudSat 地表面散乱断面積(σ0)の関係

GOM-W 衛星と CloudSat 衛星は同じ A-TRAIN 軌道で観測しているため、GCOM-W 搭載のマイクロ波放射計（AMSR2）と CloudSat 衛星搭載雲レーダ（CPR）は時間を置かず、同じ領域を観測可能である。そこで、AMSR2 から得られる海上風速（JAXA 標準プロダクト）と CloudSat からの海表面のσ0 の関係を調べた。方法は、同じ軌道での両センサのマッチアップをとり、海上風速と散乱断面積を CPR の liquid water path（LWP）により分類した。

雲なしの条件での海上風速とσ0 の関係は、非常に高い相関（0.84）を示した。また、両者の関係はσ0＝-3.5*ln(U)＋13.5 と

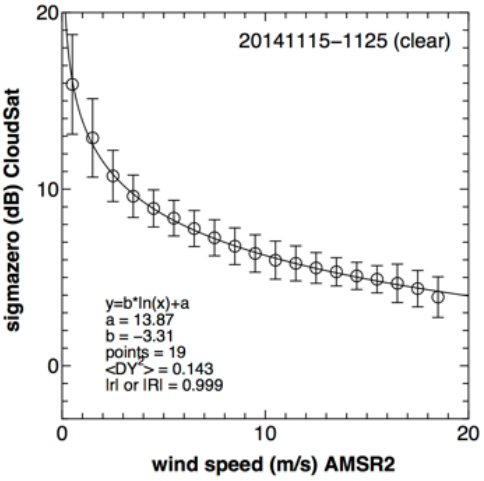


図 1. 海上風速と CloudSat のσ0 の関係（雲なし時）

いった関係式で表すことができることがわかった。標準偏差は約 1.2ｄB であり、これは LWP の値がおよそ 150 gm^{-2}（Sassen and Liao, 1996 の関係式に基づく）に時に対応するため雲レーダの減衰補正に活用するためには、それよりも十分大きな LWP の時のみに使えることがわかる。また、風速がおよそ 4m/s 以下では標準偏差が大きくなり、大きな誤差要因となることがわかった。さらに、CloudSat の標準プロダクトにある LWP の大きさでσ0 と風速の関係を分類すると、LWP によるトータル減衰量を推定でき、LWP の推定の評価できる。

2. GPM 二周波降水レーダ（DPR）による統計的な雨滴粒径分布推定手法の開発と衛星搭載雲レーダへの拡張

DPR の雨滴粒径分布推定アルゴリズムの評価のために、統計的な手法で解析を行った。この手法は、Ku-band のレーダ反射強度因子 Z（mm^6m^{-3}）と Ka-band の Z の差が Mie 散乱の効果の差に依っていることを利用して、両者のヒストグラムを比較することにより雨滴粒径分布のモデルを推定できる。ここでは、雨滴粒径分布のモデルパラメータとして、$k=\varepsilon\ \alpha Z^{\beta}$ 関係を規定するパラメータ ε を用いる。ここで、k は減衰係数（dB/km），Z は、 α、β は定数である。それぞれのヒストグラムを作成し、両者のヒストグラムの差を説明できる ε を探すというものである。この手法によって ε を決定する。この ε を用いて w-band の Z のヒストグラムも再現できる。また、DPR では Ku-band と Ka-band が同時に同じターゲットを観測していることから、統計的な手法と瞬時データによる ε の比較が容易である。なお、今回の解析では、exceedance probability を用いた。

統計的な手法による平均的な ε と瞬時データの ε の平均を比較したところ、両者に高い相関があること確認でき、統計的な手法による ε の推定が可能とあることがわかった。Ku-band のヒストグラムから，様々な ε に対して雲レーダの周波数である w-band でのヒストグラムを再現した。再現した w-band のヒストグラムを見ると、Ku-band のヒストグラムと w-band のヒストグラムはほぼ交わることなく、平行移動で近似できることがわかった。この結果は、例えば CloudSat と TRMM の組み合わせにより ε の推定可能性を示しており、2 周波観測がない TRMM 時代における雨滴粒径分布パラメータの検証・高精度化にも寄与できる。

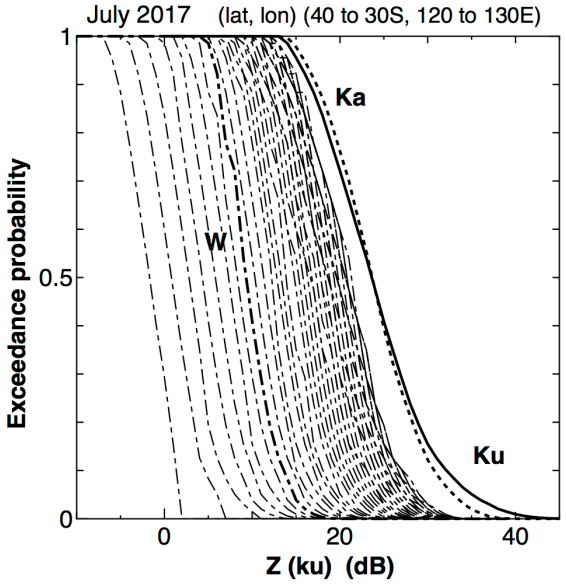


図 1. GPM/DPR の Ku と Ka のヒストグラムと W におけるヒストグラムの範囲

参考文献：

Sassen, K., & Liao, L. (1996). Estimation of Cloud Content by W-Band Radar. Journal of Applied Meteorology (1988-2005), 35(6), 932-938. Retrieved from http://www.jstor.org/stable/26187910

研究成果報告：

Takahashi, N., Overview of the TRMM/EOM experimental data analysis, PMM Science team meeting, Phoenix, Oct. 2018.

Takahashi, N., Statistical validation of drop size distribution estimated by GPM/DPR, JpGU 2019, May 2019.

衛星搭載ライダーデータを用いたエアロゾル・雲プロダクト推定アルゴリズムの高度化と地上検証に資する観測研究（30AO-26）

国立環境研究所　西澤智明
九州大学応用力学研究所　岡本創
九州大学応用力学研究所　佐藤可織
九州大学応用力学研究所　藤川雅大

要旨

衛星搭載ライダーデータを用いた大気粒子プロダクトを生成する解析アルゴリズムの高度化やそれらプロダクトの地上検証に資するデータ解析技術や観測技術の開発・改良を主眼とし、多視野角・多重散乱ライダーの改良技術の考案及び試験を行った。偏光信号を独立した受信望遠鏡で個別測定する現行のシステムを改良し、それらを一体化して測定する受信システムを考案した。試験測定により良好な結果を得ている。また、本考案の受信システムは波長 532nm だけではなく波長 355nm においても同様な測定が可能であり、多波長測定化が可能である。

序論

温暖化をはじめとする地球気候への大気粒子（エアロゾルや雲）の影響評価を主目的の一つとして、大気粒子の時間・水平分布と共にその鉛直構造も測定可能な能動型センサー「ライダー」を搭載した衛星観測が進行している。2006 年打ち上げ後、現在も運用中の CALIPSO 衛星搭載の２波長偏光ミー散乱ライダーCALIOP（NASA）による全球大気粒子観測の後継として、欧共同地球観測プロジェクト EarthCARE では高スペクトル分解ライダーATLID による全球観測が 2021 年から開始される。光学的に厚い粒子層（雲や発生域での鉱物ダスト層など）からのライダー信号には、粒子からの一次散乱成分と共に多重散乱成分が多く含まれ、多重散乱成分の取り扱いは今尚難しい。よって、雲・エアロゾルパラメータの推定アルゴリズムにおいて多重散乱成分をどう考慮するべきかは重要な研究課題となっている。特に、衛星搭載ライダー信号に対する多重散乱の影響は地上ライダー計測に比して大きいため、衛星搭載ライダーデータの解析ではより重要となる。この問題に対し、科研費 A 課題（H25-H28, 課題代表：岡本教授）にて、CALIOP のレーザー波長である 532nm での単波長レーザーを用いて多重散乱成分を独立測定するライダー（多視野角・多重散乱ライダー）を九大・環境研で共同開発し、地上観測研究を実施した。そして、この観測研究の発展として科研費 S 課題（H29-H33,課題代表：岡本教授）が立ち上がり、そこでは ATLID の解析・検証を念頭にして、波長 355nm での多視野角・多重散乱ライダーが情報通信研究機構（小金井市）の構築が計画された（九大・環境研で共同開発）。

上記背景を踏まえ、本研究では、衛星搭載ライダーデータを用いた大気粒子プロダクトを生成する解析アルゴリズムの高度化やそれらプロダクトの地上検証に資する観測技術やデータ解析技術の開発・改良を行う。

実施方法

昨年度の共同利用研究にて（課題番号 29AO-20）、波長 532nm での多視野角・多重散乱ライダーの受信システムの改良手法を考案し（旧システムでは偏光測定を独立した受信系（受信望遠鏡）で行っているが、これを一つの受信望遠鏡で測定する一体化技術）、試作・試験測定を行い、本改良手法が有効であることを示した。そこで、今年度は上記改良手法の実装とその評価を進めた。また、多視野角・多重散乱ライダーの多波長化を企図して波長 1064nm での測定についての検討を進めた。

結果と考察

現行の波長 532nm 多視野角・多重散乱ライダーシステム（国立環境研究所構内に設置）に本改良手法を適用した新システムを構築し、連続測定を開始した。多視野角・多重散乱ライダーシステムでは、直線偏光したレーザーを鉛直上方に送信し、大気粒子による散乱光を小型望遠鏡で集光し、集光した光の強度を検出器（PMT）で測定するシステムとなっている。旧システムでは、小形望遠鏡１つに検出器を 1 つ搭載した一体化構造とし（以下、受信望遠鏡）、全１０本の受信望遠鏡を用いた（全１０ch 測定）。送信レーザー（直線偏光）の偏光に対して水平な成分を５つに受信望遠鏡で計測し、また垂直な成分を５つの受信望遠鏡で測定する。水平成分と垂直成分を測定する受信望遠鏡を１セットとし、１セットずつ鉛直上向き方向から５つの角度（θ）で傾けて測定する（θ=0, 0.6, 1.2, 1.8, 2.4 度）。結果として、本システムではθ=0 以外の受信望遠鏡では多重散乱光を測定し、θ=0 の受信望遠鏡では多重散乱光に加えて一次散乱光も測定することになる。各受信望遠鏡には偏光シートが小形望遠鏡上端部に取り付けられ、これにより偏光選択（水平か垂直か）がなされている。改良システムでは、1 つの小型望遠鏡に水平成分と垂直成分を測定する検出器を取り付け一体化する（計５本の受信望遠鏡を用いて全１０ch での計測を行うため、旧システムと同じ測定チャンネル数となる）。ここでは偏光シートは用いず、偏光ビームスプリッターキューブを使用する。旧システムでは、個々受信望遠鏡は独立して設置されるため、個々受信望遠鏡の傾斜や偏光（偏光シートの回転角）の精緻な調整と保持が必須となる。特に偏光チャンネル間での傾斜角や偏光のズレは致命的な測定バイアスを生んだ。改良システムではこれらの点が改良されており、調整も簡便でかつ安定・精緻なシステムとなっている。多視野角・多重散乱ライダーシステムの校正では、全ての受信望遠鏡を鉛直上方に向けて計測することで、個々チャンネル間の相対校正（例えば、ch10/ch1 など）を行い、その後絶対校正を行う（絶対校正の方法については省略する）。波長 355nm での多視野角・多重散乱ライダーシステムの校正データの解析から、相対校正値の時間安定性が確認されている。

上記の多視野角・多重散乱ライダーシステムの改良として、光ファイバーを用いたシステムも検討した。本ライダーシステムでは受信望遠鏡を傾けるため、安定性の確保から、受信望遠鏡は軽量が望ましい。そこで、偏光ビームスプリッターで光分岐したのち、光ファイバーによって検出器へ送ることで、受信望遠鏡と検出器を一体化する必要はなくなり、軽量化が望める。また、同時に受信望遠鏡自体の小型化も図れる。波長 1064nm の多重散乱ライダーシステムでは検出器としてアバランシェフォトダイオード(APD)を用いる。ライダー計測で広く用いられている市販の APD モジュールは大型（かつ重い）の物が多い。よって、波長 1064nm への拡張においては、光ファイバーを用いたシステム構築が有効と考えられる。

<u>成果報告</u>

１）Nishizawa T.,Kudo R., Oikawa E.,Higurashi A.,Okamoto H., Current status on algorithm developments for Japanese L2 products of the EarthCARE mission, CloudSat/CALIPSO Annual Science Review,2018.4., Boulder, USA.

２）Okamoto H.,Sato K.,Ishii S.,Aoki M.,Nishizawa T.,Sugimoto N.,Jin Y.,Ohno Y.,Horie H., Next-generation-synergetic-observation-system for the unified analysis of CALIPSO, ADM-Aeolus, and EarthCARE-ATLID, 19th Coherent Laser Radar Conference, 2018.6, Okinawa, Japan.

3) Okamoto H., Sato K., Katagiri S., Fujikawa M., Nishizawa T., Sugimoto N., Jin Y., Shimizu A., Ishimoto H., Application of multiple-scattering polarization lidar for the evaluation of space-borne lidar algorithms, EPJ Web of Conferences, 176, 10.1051/epjconf/201817602014, 2018.

4) 藤川雅大、岡本創、佐藤可織、片桐秀一郎、西澤智明、杉本伸夫、神慶孝、MFMSPL を用いた雲相識別手法の検証、日本気象学会 2018 年度春季大会、113, pp63-63, 2018.5、茨城県つくば市

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　　国立環境研究所地域環境研究センター

１．目的

河川から沿岸海洋生態系への栄養塩パスとして機能する河川プリューム(低塩分水)を空間的かつ定量的に把握することは重要である。将来、特に気候変動による台風凶暴化や豪雨激化が予想されており、それらによる海洋環境への影響を把握することの重要性は増している。近年、海面塩分(Sea Surface Salinity: SSS)測定センサーが搭載された衛星(例えば、SAC-D/Aquarius 等）により、SSS データが面的に入手できるようになり、SSS マップからアマゾン川といった世界的な大河川からのプリュームを可視化できるようになった。しかし、このような衛星 SSS プロダクトの水平分解能は数十 km であるため、日本沿岸域において形成されるプリュームを観測するには分解能が粗く観測エラーも大きいため困難である。

これまで我々は、河川プリュームに含まれる有色溶存有機物(CDOM)と SSS との間に高い相関関係があることに注目して、静止海色衛星「千里眼」GOCI-COMS プロダクト(水平解像度約 500 m)から得られた CDOM マップデータを使って SSS マップを推定する手法の開発を進めてきた。本プロジェクトの最終目的は、静止海色衛星によって日本沿岸域全域をカバーできる高空間分解能の衛星 SSS データセットを整備することである。現段階では、比較的現場塩分や CDOM データが多く得られている海域、対馬海峡沿岸域、厚岸湾や噴火湾を含む北海道沿岸親潮域、若狭湾や富山湾といった対馬暖流域、大阪湾・紀伊水道等における SSS マップが整備されてきた。

今年度は、解析領域を瀬戸内海全域に加えて日向灘およびその黒潮域にも拡張した。また解析期間もさらに延長し 2018 年まで収集できる観測データも用いて比較検証を実施した。昨年 12 月末に海色衛星「しきさい」のプロダクトの利用も開始した。昨年は、平成 30 年 7 月豪雨や台風 21 号といった気象災害による洪水が多発した。本報告では、これらの洪水出水により海洋環境へどの程度影響があったのかを検討するために実施した衛星 SSS マップの解析結果を報告する。その一例として、瀬戸内海全域と日向灘および黒潮域における解析結果を紹介する。

２．方法

一昨年度より関係機関（各府県の水産試験場や大学）に表層海水の採水を依頼して、瀬戸内海や日向灘における海水分析を実施、現場塩分および CDOM データが収集されている。それらのデータに基づいて、SSS―CDOM 推定式を湾灘毎に作成した。そして、GOCI-COMS プロダクトから CDOM マップを作成し、SSS―CDOM 推定式に基づいて対象海域における SSS マップを作成・整備した。そして、平成 30 年 7 月豪雨前後の期間(6/20～7/14)や台風 21 号襲来前後の期間(9/3～9/5)における SSS マップに基づき河川プリュームの動態を解析した。

３．結果と考察

図１は平成 30 年 7 月豪雨前の期間(6/20～6/27)と豪雨後の期間(6/28～7/14)における SSS マップである。豪雨前後を比較すると瀬戸内海および日向灘においては塩分が大きく低下しているのがわかる。特に瀬戸内海西部では、豪雨前に高塩分水塊が豊後水道から伊予灘を経由し広島湾や周防灘にまで分布していたが、豪雨後には分布が大きく南に移動しており、広島湾における塩分低下が顕著となった。一方、瀬戸内海東部では、大阪湾、播磨灘、紀伊水道における塩分が概ね 30 以下となり塩分低下が顕著にみられた。日向灘や土佐湾では河川プリュームが沖合にまで大きく発達していた。

図２は豪雨前から豪雨後にかけての塩分変化と陸上に降った累積降水量を示している。塩分変化マップと累積降雨量マップを合成することで、どの地域に降った雨がどのような河川プリューム(塩分低下域)を形成させたか、すなわち豪雨で大きく影響を受けた海域が一目瞭然に把握できる。例えば、豪雨によりほぼ西日本全域で 300mm 以上の降雨量を示しているが、特に四国山地南側に降水が多かったことがわかる。その結果、土佐湾の塩分低下域が示す河川プリュームが形成されたことが図から読み取れる。同様な見方で、広島湾や日向灘南部海域、豊後水道、伊予灘西部、播磨灘、大阪湾、紀伊水道も豪雨により塩分が３以上低下していることがわかる。このように衛星 SSS マップを用いて豪雨による塩分低下域を描画することで豪雨の影響を受けた海域を示唆することが可能となった。また図３のように、高解像度データセットの特徴を生かし、大阪湾において形成された淀川と大和川からの河川プリュームをクローズアップして、プリュームの空間的特徴を他の衛星画像と比較することも可能である。図３(右)は、衛星軌道上に１００機以上展開されている DOVE 衛星が撮影した 7/10 における可視画像であり、淀川からの濁水により河川プリュームが可視化されている。図３(左)の海面 SSS マップと比較すると、低塩分域が濁水の分布域とほぼ一致しており、海面 SSS マップに現れる河川プリューム分布の妥当性が示されている。

二つ目の解析事例として、平成 30 年台風 21 号が日本列島上陸した時の海面塩分変化を捉えた結果を図４に示す。台風 21 号は、主に瀬戸内海中部や西部、日向灘、土佐湾において塩分低下域を形成しながら通過したことがわかる。図４(上)をみると豪雨後の塩分分布(図１下)と一見よく似ているが、図４(下)をみると大阪湾や播磨灘の一部の海域では逆に塩分が高くなっており、台風による鉛直混合により高塩化したことを示唆している。本研究では衛星 SSS マップのほかに、クロロフィル a や光消散係数、懸濁物質の衛星マップも整備している。今後これらを用いて豪雨による海洋環境への影響評価も可能だろう。

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

原田浩太朗（石川県水産総合センター）共同研究者

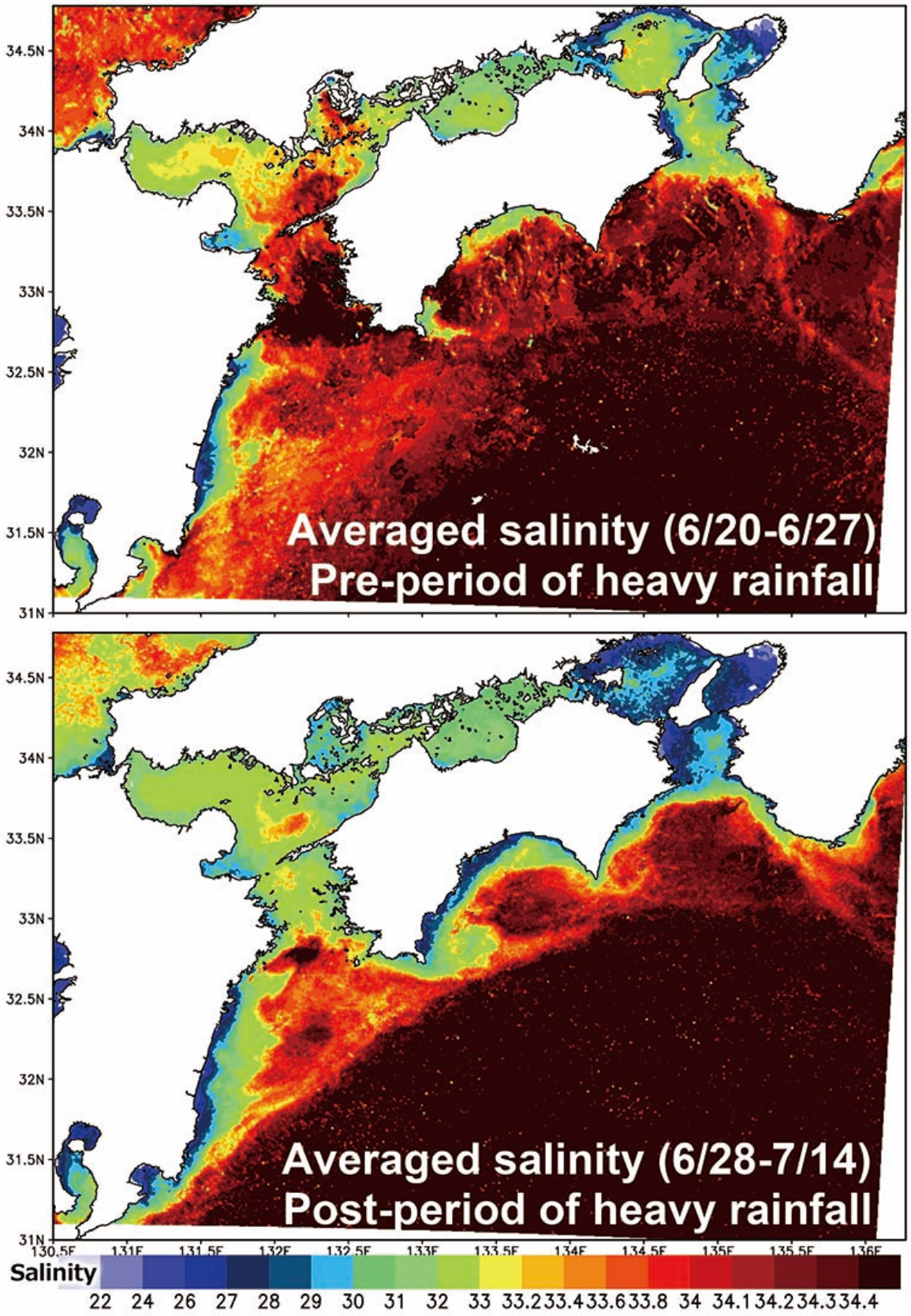


図 1 (上)平成 30 年豪雨前(6/20-6/27)と(下)豪雨後(6/28-7/14)における期間平均海面塩分マップ。

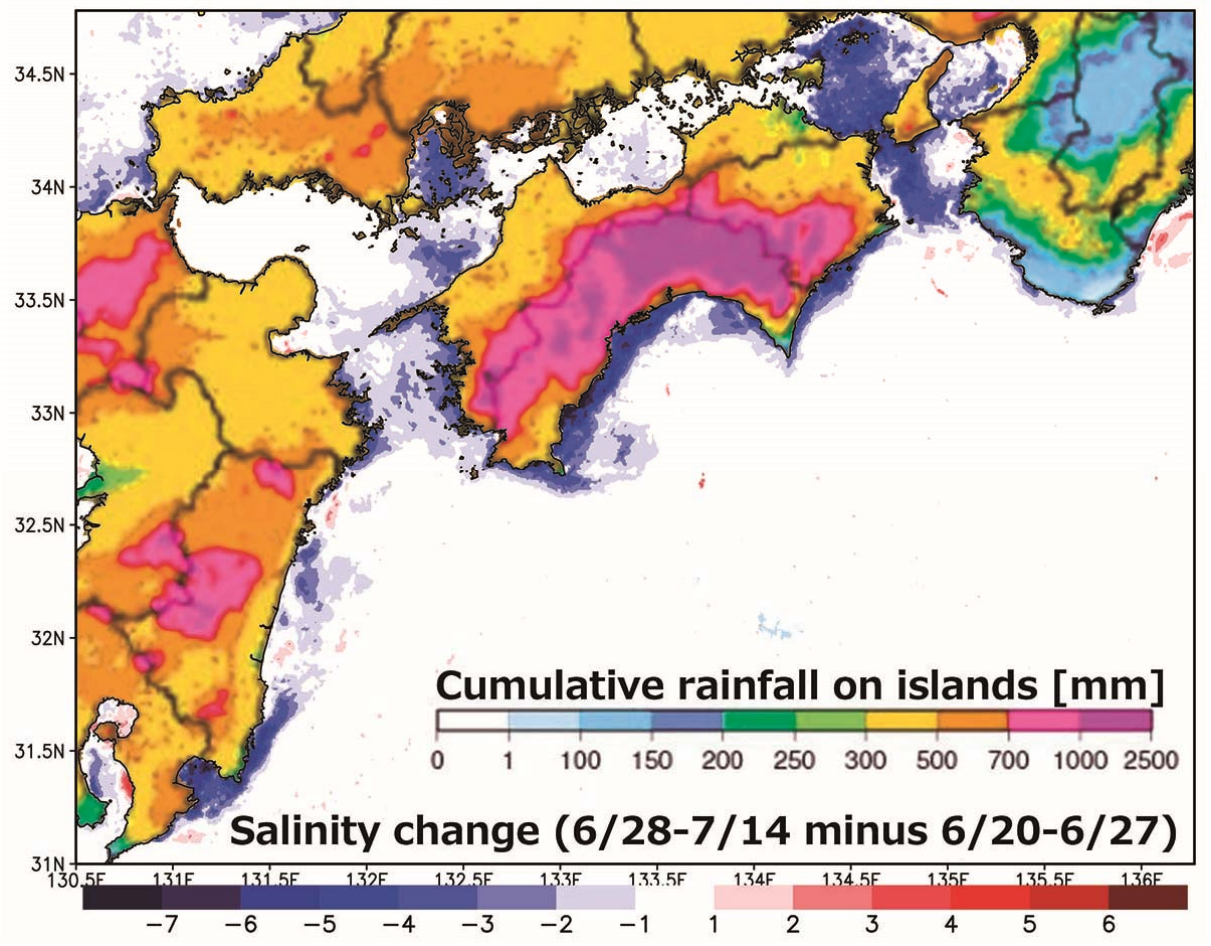


図２　(陸側)豪雨期間における累積降雨量(国土交通省出典)。(海側)豪雨前後における塩分変化(豪雨前 6/20-6/27 の平均塩分値から豪雨後 6/28-7/14 の平均塩分値を引いた差分値)。

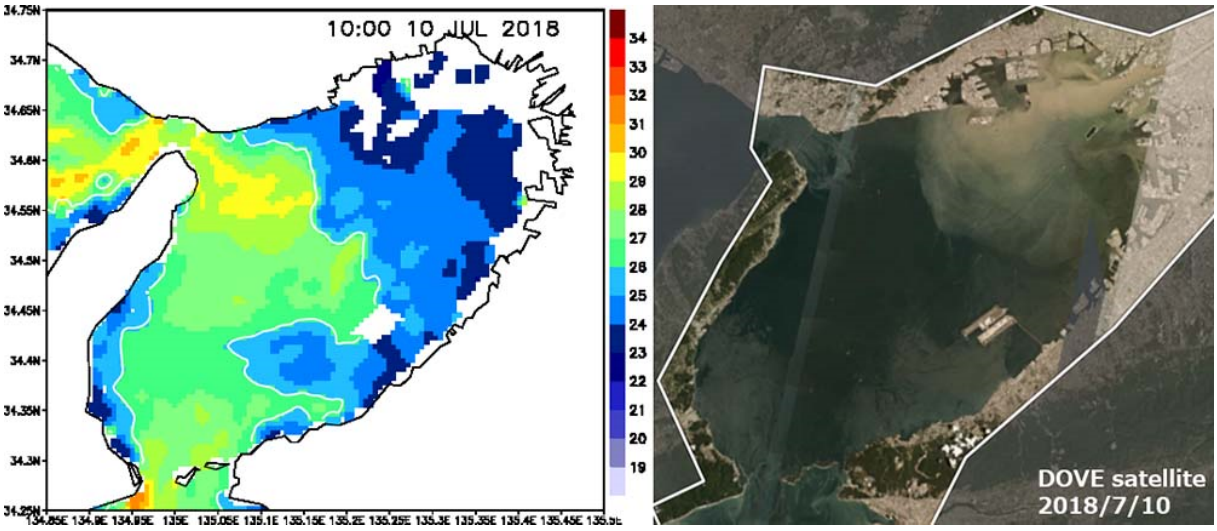


図３　(左)大阪湾における豪雨直後(2018/7/10)における海面塩分マップ。(右)DOVE 衛星が撮影した同日の可視画像。

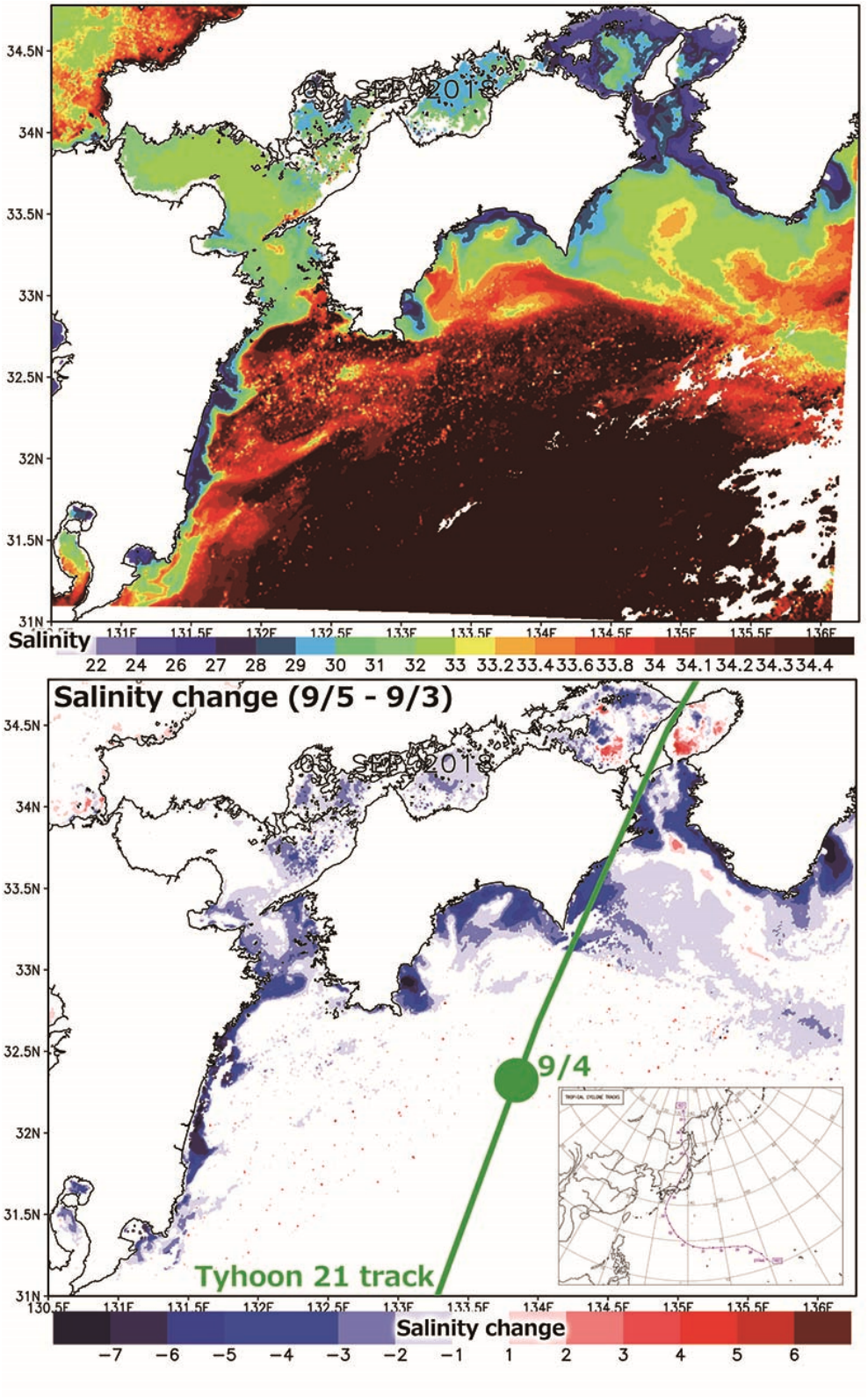


図４ (上)台風 21 号襲来後(2018/9/5)における SSS マップ (下)台風襲来前後における塩分変化(9/5 から 9/3 の海面塩分値を引いた差分値)。

富山湾沿岸域における対馬暖流水の流入に関する研究

富山高等専門学校　商船学部　福留研一

目的

富山湾の季節内の変動に関しては，近年になって，沿岸部の表層では冬季に時計回りの循環，春季から夏季に反時計回りの循環があることが，定置網に設置された流速計による長期のモニタリングより報告された．ただし，沖合も含めた流動構造の季節変動の姿については，現在もよくわかっていない．昨年度は，限られたシップタイムや悪天候時にも観測が可能な XBT を導入することで，春季と夏季に湾内の広範囲における流れ場と水塊構造の同時調査を実現し，春季の対馬暖流の流入の過程や，夏季から秋季にかけての湾西部の渦構造の消長に伴って，沿岸の流れ場が反転する様子を捉えることができた．本研究では，対馬暖流の流入過程や渦の経年変動を同様の観測により調査するとともに，過去 13 年におよぶ若潮丸 ADCP による富山湾奥の流速観測結果を用いて、渦構造が顕著な時期や対馬暖流の勢力や流路との関係について調べた。

観測・データ

富山高等専門学校では実習船「若潮丸」を用いて海洋観測も実施しており，富山湾のやや湾奥の水深約 700m の地点に設定した CTD 観測点（36.53N，137.10E）では，10 年超に渡っておおよそ毎月の CTD 観測および観測点までの往復 ADCP 観測を行なっている．この観測に加えて、対馬暖流の流入や流路変化が予想される時期には湾内広範囲において CTD 観測を行った．その他随時行われる実習航海における CTD・ADCP 観測も用いて解析した．

結果・考察

2018 年の 5 月 31 日、8 月 21 日、11 月 6 日および、2019 年 1 月 22 日 4 回において、図 1 に示した測点において CTD 観測を行った。図 2 に示した湾奥の st06 及び st08 の水温鉛直プロファイルからは 2018 年度は春季の海水温上昇が鈍く、対馬暖流の流入のタイミングが例年より遅かった可能性が考えられる。こういった季節的な変化のタイミングのずれは湾内の生物環境等に影響することが考えられるため、流動場の観測や表層クロロフィル a 濃度の衛星観測とあわせて、その経年変化のインパクトを調べる必要がある。

富山湾の流動構造においては、富山湾奥の沿岸流の季節変化と海底地形が及ぼす影響に注目し、2005 年からの長期の観測データを用いた解析を行った。13 年間で春・夏・秋・冬それぞれ 26・44・25・17 回の若潮丸 ADCP 観測で得られた流速データを季節平均し、海底地形の変化の大きい海域で区切って水平流れ場を見積もることで、富山湾奥沿岸の表層から中層にかけての流れ場における季節変化と、海底地形が及ぼす影響を評価した。図 3 に 2005 年から 13 年間の ADCP 観測結果を用いて作成した、水深 16m における季節毎の流動場を示した。図中の水平ベクトルは、富山湾奥で海岸から急激に海底水深が深くなって 400m に達するあたりの緯度である 36°49′に境界を設け、境界から沿岸までと境界から沖合の 36°53′までの間で観測された流速データをさらに経度 1°ごとに区画を設けてそれぞれ平均し、算出している。水深 16m の水平ベクトル図からは、季節平均した流速は春季と冬季に相対的に大きく、岸に平行に流れている様子が確認できる。夏季や春季に季節平均流速が小さくなっているのは、流軸が安定せずに上下していたり、渦など湾のスケールに比べて相対的に小さいスケールの流動が卓越していることが理由として考えられる。沖合と岸近くの流れの関係に注目すると、春季には沖合と岸近くの双方で東向きの流れであるのにたいして、冬季には沖合で東向きであるが岸近くでは西向きの流れ

が卓越するという違いが見られた。次に海底地形と流速場の関係を見ると、東経 137° 9-10′ あたりにかけて海底水深が浅い領域が沖合に張り出している領域を境に、流れの向きが変化している様子が見て取れる。この傾向は海底水深が 400m より深い沖合の海域で特に顕著であり、水深が深いにもかかわらず、海底地形に沿うように流れの向きが変化していることがわかった。これらが海底地形の影響を受けたものか、それとも湾の西部と東部で夏季から秋季に観測されるような数十キロスケールの渦や対馬暖流沿岸分枝の蛇行などに影響を受けたものなのか、あるいはその両方なのかといったことは今回の解析からは判断が難しい結果となった。湾内沖合に現れる渦や対馬暖流の蛇行といった流動構造の変動が沿岸の流動場ならびに河川水の影響を強く受けた沿岸表層水の輸送にも大きく影響を与えている可能性があるため、これらの変動の経年変化を調べる必要が示唆された。

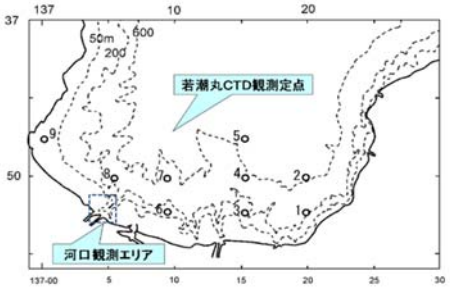


図 1. CTD 観測点の分布

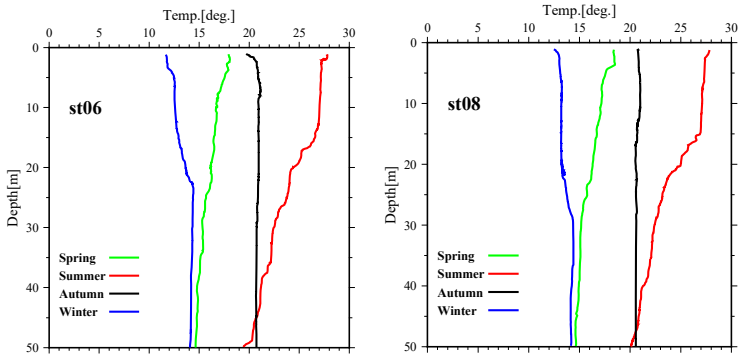


図 2. (左)st06 及び(右)st08 における海水温度の鉛直分布

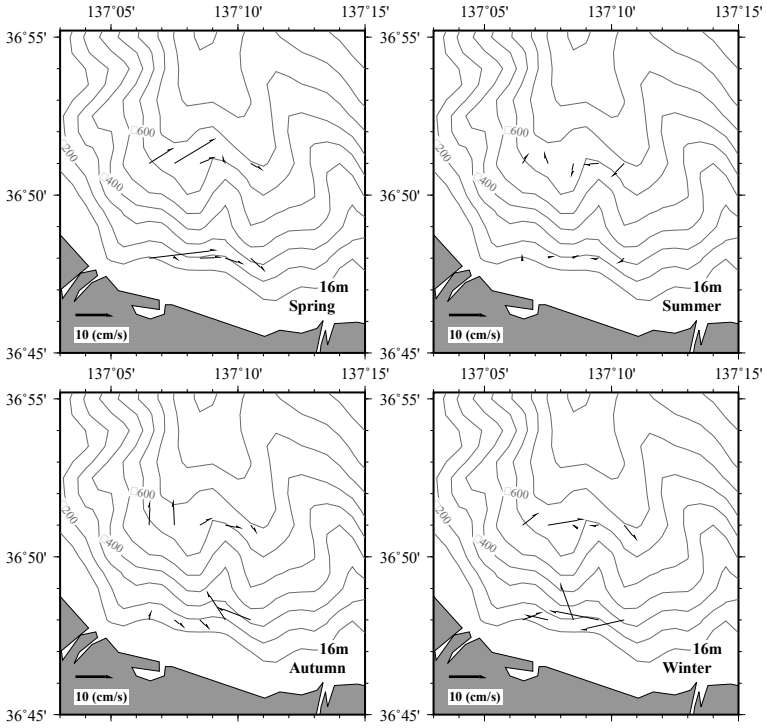


図 3 長期 ADCP 観測による富山湾奥における水深 16m の流速ベクトル図

成果報告

福留研一，千葉元，金山恵美「2017 年の富山湾奥の沿岸流と沖合の流動場の関係について」，日本航海学会講演予稿集，6 巻 1 号 2018 年 5 月 2 日

研究組織

研究代表者：富山高等専門学校　商船学科　福留研一

所内世話人：九州大学応用力学研究所　千手智晴

２０１９年度　応用力学研究所 一般研究
「領域海洋モデルによる GNSS-R 技術の海洋観測への応用の高度化」
共同利用研究成果報告書

東京大学　新領域創成科学研究科
海洋技術環境学専攻　小平翼

1　要旨

相模湾内の平塚海洋観測棟では GNSS-R 技術を用いた海面高度、海上風速等の物理量の観測の試みが行われており（GROWTH プロジェクト）、GNSS-R 技術は常時全球モニタリングシステムへと発展する可能性を秘めている。本研究では昨年度に引き続き観測条件の詳細な把握を目的に相模湾における流況特性を解析した。データは主に海上保安庁が保守・運営する海洋短波レーダーであり、流速が水平方向に非発散であるという制約を設けた変分法によって品質管理を試みた。また、HF レーダと領域海洋モデルのデータ同化の実施に向け、海洋再解析データを初期値・境界値としたダウンスケーリングモデルを構築した。

2　序論

相模湾は南北方向に約 60km、東西方向に約 55km の大きさを持つ。南部の湾口が北太平洋に面している為、湾の流況は黒潮からの影響を強く受ける。大都市圏近郊立地のため、ヨット競技の実施や海水浴場での海洋レジャー活動に多く利用されている。2020 年東京オリンピックのセーリング競技会場にも指定されている。海洋レジャーに加え、漁業も盛んである一方で、定置網が急潮によって被害を受けることが知られている。

このような相模湾内には数少ない海洋観測塔である平塚海洋観測棟が存在し、海洋観測研究にも活用されてきている。加えて、伊豆大島と三浦半島荒埼には海上保安庁が設置した海洋短波レーダー（24MHz）が存在し、水平 1.5km 改造での表層流速の１時間毎の変化を考察することが可能である。湾内の流れ場の変動は南岸を流れる黒潮に影響されることが知られており、大蛇行期である現在は、大島北側に高気圧性の循環流が生まれ、相模湾内には低気圧性の循環が生まれるていると考えられる(Kawabe and Yoneno,1987)。

本研究では、相模湾の中でも沿岸に近い海域を対象として、短波レーダーと数値海洋モデルを活用して流況特性を考察し、GNSS-R 技術の海洋観測への応用に貢献することを目標とする。短波レーダーを用いた既存研究には日向ら(2003)の研究があるが、対象領域は平塚・江ノ島等の沿岸部から離れているため、平塚海洋観測棟付近の流動場の特性については明らかになっていない。、また、数値海洋モデルについても黒潮流路によって湾内の流れが変動することが考えられるため、現実的な流動場の再現については湾内のみならず、黒潮流路についても注意を向けることが必要だと考えられる。

3　方法

3.1　短波レーダ

伊豆大島と三浦半島荒崎には海上保安庁が設置した海洋短波レーダー（24MHz）が存在している。観測は 1 時間毎に行われ、取得したデータは空間分解能 1.5km の格子点に内挿され、インターネットを通じて公開されている。

HF レーダーは海面付近の流速に限定されるが、面的に流速データを取得できる貴重な海洋観測手法であり、活用できれば相模湾内の流れの理解に大きく貢献する。しかしながら、データの品質管理は行われていない。昨年度は 2017 年 11 月 1 日から 12 月 18 日にかけて江ノ島沖に設置した ADCP ブイによる流速データと比較することで HF レーダーの精度についての検討を行った。本年度は三次元変分に基づいてレーダデータに変分 QC を施すことで物理的な整合性を持つ流速場の構築を試みた。

より具体的には、連続の式を満たした上で、次のコスト関数 Jを最小化するように表層流速の推定値u_e, v_eを求める。

$$J = \sum_i \sum_j (u_{e(i,j)} - u_{o(i,j)})^2 + (v_{e(i,j)} - v_{o(i,j)})^2 + \lambda\left(\frac{u_{e(i,j+1)} - u_{e(i.j-1)}}{2\Delta x} + \frac{v_{e(i+1,j)} - v_{e(i-1,j)}}{2\Delta y}\right)^2$$

なお、u_o, v_oは HF レーダににによる観測値 である。第一推定値として年度平均値を使用し、探索手法として最急降下法を用いて計算を行った。

3.2　数値海洋モデルの活用

台風襲来による急潮の発生など、特定のイベントに関する力学的考察には数値海洋モデルの利用が効果的である。考察対象は相模湾であるが、既存研究より湾内の流れは黒潮というより大きなスケールを持つ流れに影響を受けると考えられる。そこで、海洋再解析値 JCOPE2 の現実的な流れ場からのダウンスケーリングを実施する。

利用するモデルは海洋大循環モデル MITgcm である。支配方程式の圧力項に静水圧近似を施さないことも可能であるため、非線形性と分散性を考慮することにより沿岸捕捉波の再現精度向上などに利用できると考えられる。本研究では、水平解像度 1/24 度での第一ネスティンを 2015 年-2018 年の 4 年間にかけて実施した。また、これらの結果を元にした水平解像度 1/96 度での第二ネスティングを実施した。

初期境界条件として海洋再解析値 JCOPE2 を利用することに加え、モデル格子点に内挿し、時空間スケールの大きな変動は JCOPE2 再解析値に沿うように時間スケール 10 日間のナッジングをモデルに課した。

4　結果

4.1　短波レーダ

変分 QC を適用することで岸向きの発散を生むような流れを減らすことはできたが、沿岸付近の流れ場は沖合に比べて不連続であった(Fig.1)。昨年度の解析で利用した 2018 年　ADCP 観測結果の比較からは変分 QC を実施すると、行う前よりも相関が僅かに小さくなるという結果になった(Fig.2)。しかし、RMSE は東西流速、南北流速ともに減少する結果を得た。

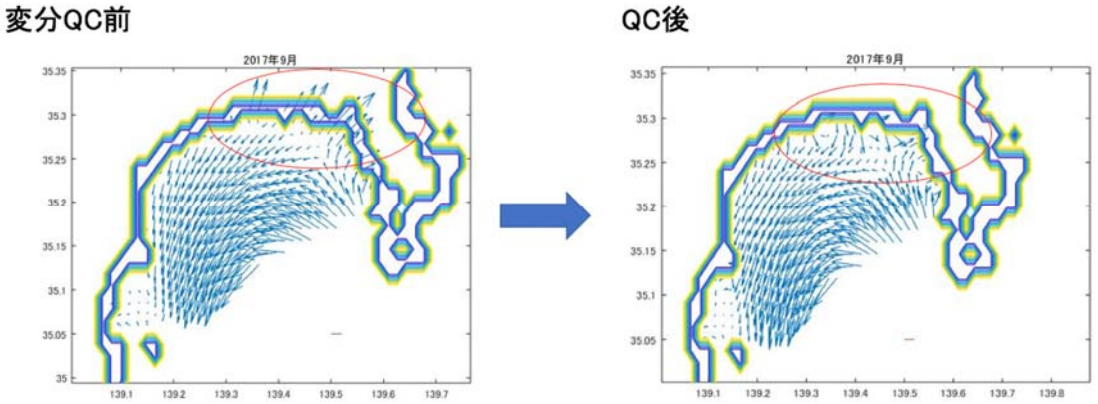


Fig 1　2017 年 9 月平均流速に対する変分 QC の適用

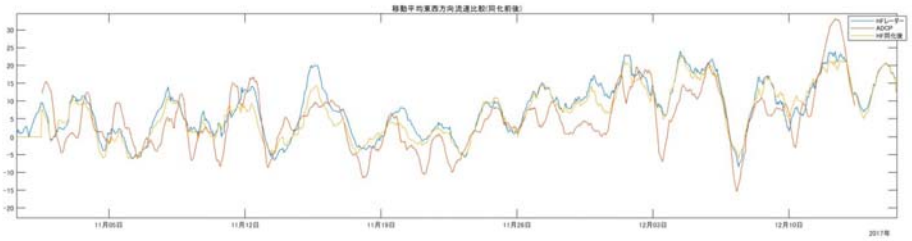


Fig 2　　QC 前後の東西方向流速の ADCP との比較

4.2　数値海洋モデル

2015 年から 2018 年にかけてダウンスケーリングを実施した。水平解像度としては、1/12 度である JCOPE2 の倍の 1/24 とした。第一段階のネスティング結果としては JCOPE2 の物理モデルと大差なく、より高解像度な空間分布が得られた(Fig.1)。海面高度計を用いた詳細な評価が望ましいが、黒潮流路に関してはダウンスケーリング前後に明確な差がないことから、さらなるダウンスケーリングにより相模湾内の詳細な流れ場を考察できるものと考えられる。2017 年 1 月という限定された機関であるが、第二段階のダウンスケーリングの試験実験を行った。さらなる詳細な検討が必要だが、湾内に低気圧性が確認できる日も存在した（Fig.3）。

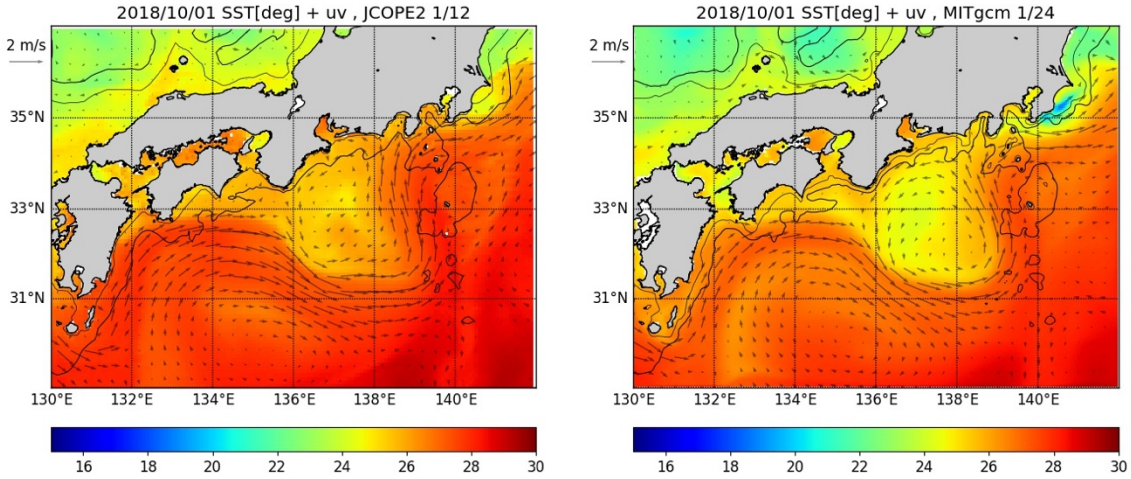


Fig 3 海面付近の水温と流速分布の日平均値, JCOPE2(左),MITgcm(右)

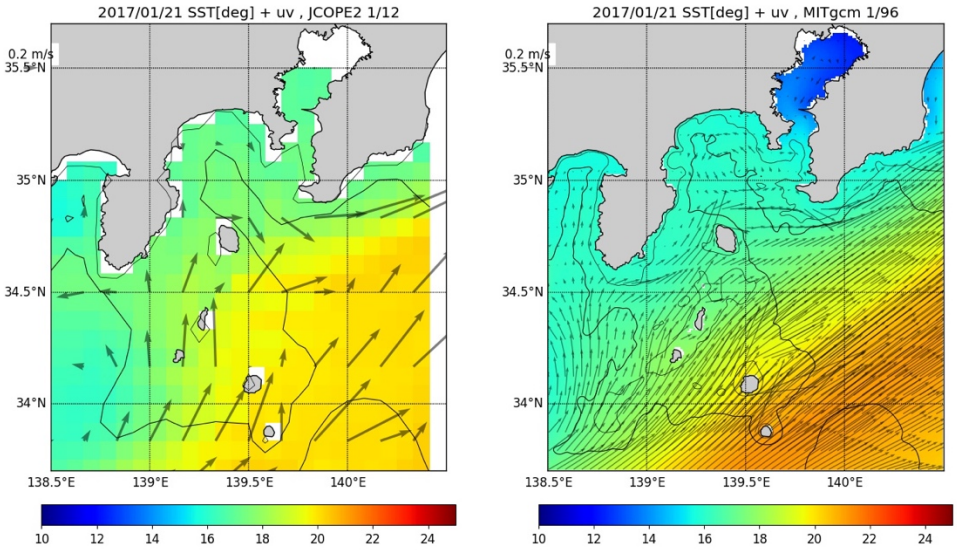


Fig 4 海面付近の水温と流速分布の日平均値, JCOPE2(左),MITgcm(右)

5　まとめと課題

HF レーダの解析に関して、変分 QC を適用することで岸向きの発散を生むような流れを減らすことはできたが、ADCP データとの時系列での比較では、精度の改善が見られる部分と悪化する部分が混在していた。今後、同化の際に観測誤差を考慮すること(大きさや分散、性質など)、境界値を考慮する(現在は１次精度に落とした差分を使用、岸に沿うような方向にすることは考慮していない)といったことに着目することが考えられる。また、発展的な課題として並行して実施しているダウンスケーリングモデルを用いて４次元変分法を実施することなどが考えられる。

多波長ミー・ラマンライダーを用いたエアロゾルの動態把握とデータ同化への応用に関する研究（30AO-30）

国立環境研究所　西澤智明
九州大学応用力学研究所　原由香里
九州大学応用力学研究所　弓本桂也

【要旨】
福岡における多波長ミー・ラマンライダーによる観測・解析を主体とした様々なエアロゾル種の光学特性やその時間変動の把握、そしてデータ同化やモデル検証への応用に向けたライダープロダクトの整備・高度化に資する観測研究を主眼とし、先行研究で開発された解析手法を発展させ、多波長ミー・ラマンライダーデータから４種エアロゾル（大気汚染、黄砂、海塩、煤）の重量濃度の高度分布を算出する手法を考案し、実データへ適用した。ライダー観測から**算出された PM2.5 や PM10、エアロゾル種毎の重量濃度の時間変動は、**地上**サンプリング観測と概ね整合した。一方で、重量濃度の絶対値に対しては、ライダー算出値が過大評価となる傾向が見られた。その過大評価の要因の考察から、内部混合を考慮したエアロゾル光学・微物理モデルの重要性が示され、モデルの精緻化は今後の重要な研究課題の一つとなる。**

【序論】
福岡県は、アジア大陸からの越境大気汚染の影響を強く受けると共に、春期には黄砂も合わせて飛来する。日本海からの海洋性エアロゾルの移流も合わせると、福岡では東アジア域における代表的なエアロゾル種を一通り計測できることになる。様々なエアロゾル種が大気中で混在する、大陸からの長距離輸送中に変質する、といった複雑さはあるが、東アジア域でのエアロゾルの物理的・化学的な特性観測を行うのに適した観測地点の一つといえる。また、大陸からの様々なエアロゾル種の通過地点となることから、観測により得られたデータはエアロゾルの輸送情報を有しており、エアロゾル化学輸送モデルの検証やデータ同化に際して極めて有用な観測情報となる。

2013-2017 科学研究費基盤 S 研究「多波長ライダーと化学輸送モデルを統合したエアロゾル５次元同化に関する先導的研究」において、福岡（九州大学応用力学研究所）および、沖縄、富山に多波長ミー・ラマンライダーを導入し、黄砂・越境汚染粒子等の光学特性の解析、そしてライダーデータ等のデータ同化による東アジア広域のエアロゾルの動態解析や再解析データ構築が試みられた。福岡における多波長ミー・ラマンライダーによる観測は、2014 年から現在まで連続稼働しており、データの蓄積が進められている。また、この課題では、この多波長ミー・ラマンライダーデータを用いて、大気中の代表的なエアロゾル種(大気汚染、黄砂、海塩、煤)の時間・高度分布を推定するアルゴリズムも開発され（Nishizawa et al., 2017）、観測データへの適用も進められている。

上記の背景をもとに、本研究では、福岡における多波長ミー・ラマンライダーによる観測・解析を継続し、様々なエアロゾル種の光学特性やその時間変動の把握、そしてデータ同化やモデル検証へ向けたライダープロダクトの整備・高度化に資する観測研究を行う。科研費基盤 S 研究で構築された観測基盤や解析・モデル技術をもとに、その高度化・発展に資する研究でもある。

【実施方法】
応用力学研究所に設置された多波長ミー・ラマンライダーのデータ解析用にエアロゾル種推定手法（Nishizawa et al. 2017）が開発された。そこで、この推定手法から推定された４種エアロゾルの波長 532nm での消散係数の高度分布データを用いて、エアロゾル種毎の重量濃度および全エアロゾルの重量濃度（PM2.5 や PM10）の算出を行うと共に、地上サンプリングデータとの比較を行う。この研究はライダープロダクトの高度化に相当する。数値モデルで直接的に再現されるパラメータは重量濃度であることから、ライダー等のリモートセンシング計測から重量濃度への変換はモデル検証やデータ同化において有用な技術開発ともなる。

【結果と考察】
重量濃度の算出

エアロゾル種推定手法では、４種エアロゾルの消散係数を推定する際に、エアロゾル種毎の粒径分布や粒子の形状（球か回転楕円体）を仮定する。そこで、この仮定した粒系分布と形状に沿ってエアロゾル種毎に体積濃度を算出しそれに文献値によるエアロゾル種毎の密度を掛け合わせることで、単位消散係数辺りの重量濃度を決定することができる（以下、重量換算係数）。エアロゾル種毎の重量換算係数を適用することで、エアロゾル種毎の重量濃度、そして全てのエアロゾル種の重量濃度を足し合わせることでエアロゾル全体の重量濃度を算出した。また、粒径分布に応じて、直径 2.5μm 以下のみの粒子、ないしは直径 10μm 以下のみの粒子（PM10）を重量計算に入れることで、PM2.5 および PM10 の算出も行うことにした。エアロゾル種毎の重量換算係数の算出では、吸湿成長を考慮し、黄砂以外の粒子に対しては相対湿度に応じた重量換算係数を用意した。実際の重量濃度算出では、相対湿度としてモデル出力データを用いた。また、煤粒子に対しては、従来型の黒色炭素のみで構成された粒子ではなく、内部混合型粒子（硫酸塩等の水溶性の大気汚染成分が黒色炭素成分をコーティングしている粒子）とし、より現実的なモデルを採用した。

<u>地上サンプリング計測との比較</u>

科研費基盤 S 研究では、エアロゾル連続自動分析装置や黒色炭素測定装置による地上エアロゾルサンプリング計測も実施された。そこで、2014 年９月から１年程度のデータを用いて、上記の方法でライダー計測から算出された重量濃度と地上のサンプリング計測結果の比較も行った。算出された PM2.5 や PM10、エアロゾル種毎の重量濃度の時間変動は概ねライダー算出値とサンプリング値間で整合的となった。

一方で重量濃度の絶対値に対しては違いが見られ、ライダー算出値の方が過大評価となる傾向が見られた。その要因としては、エアロゾル種毎の重量濃度換算係数の不完全さと共に、エアロゾル種の誤推定（例えば、黄砂を海塩粒子と誤推定する）も示唆された。これらの共通した問題としては、エアロゾル種推定や重量算出におけるエアロゾルの内部混合の考慮の不完全さが挙げられる（例えば、水溶性粒子によりコーティングされた内部混合型の黄砂粒子は本解析では考慮されていない、など）。煤粒子の推定においては内部混合が考慮された。従来型の黒色炭素のみの粒子モデルで推定された黒色炭素成分の重量濃度は、内部混合型の煤粒子モデルで推定された黒色炭素成分の重量濃度に対して5倍以上もの過大評価となった。このことは、ライダーによる黒色炭素成分の重量濃度の算出において、内部混合を考慮することは極めて重要であることを示している。内部混合を考慮したエアロゾル種毎のモデル（光学特性や重量濃度換算係数など）の高度化が今後より重要な課題と考察される。

成果発表

Hara Y., Nishizawa T., Sugimoto N., Osada K., Yumimoto K., Uno I., Kudo R., and Ishimoto H. (2018) Retrieval of Aerosol Components Using Multi-Wavelength Mie-Raman Lidar and Comparison with Ground Aerosol Sampling. Remote Sens., 10, 937; doi:10.3390/rs10060937.

Nishizawa T., Higurashi A., Shimizu A., Jin Y., and Sugimoto N., Current status and progress on AD-Net and ISDC. 5th International SKYNET workshop (New Delhi, 2019.2)

Nishizawa T., Hara Y., Uno I., Yasunaga K., Kudo R., Shimizu A., Sugimoto N., Ground-based network observation of aerosols and clouds using Multi-wavelength Mie-Raman lidars. SPIE Asia-Pacific remote sensing 2018 (Hawaii, 2018.09).

西澤智明,杉本信夫, 清水厚, 鵜野伊津志, 原由香里, 工藤玲 (2018)“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”, 光アライアンス, 29(10), 1-6.

Nishizawa T., Higurashi A., Kudo R., Irie H., Yasunaga K., Katsumata M., Yumimoto K., Ishii S., Okamoto H., Sato K., Katagiri S., Nakajima T., Validation of the EarthCARE ATLID and MSI products using ground-based lidar and sunphotometry measurements in East Asia. 1st earthcare validation workshop (Bonn/German, 2018.06).

共同利用研究集会

海洋力学理論の研究会

Workshop on theoretical physical oceanography

研究代表者
北海道大学低温科学研究所
三寺史夫

研究集会の目的

海洋力学はこれまで地球流体力学を中心に発展してきた。しかし海盆スケールの海洋循環場の理論が整理され、理解が進んでいくに連れ、近年の海洋力学はより沿岸スケールとの相互作用、高解像で起きている乱流・波との相互作用、大気との相互作用、そして生態系・土砂との相互作用、と一つの理論体系では閉じることの出来ない現象への発展が急速に進みつつある。これまでとは違う研究手法・理論展開が必要となっている一方、個々人で多岐にわたる理論体系の発展の動向・新展開を全て把握することは困難であり、その理論体系の汎用性・特異性に対する議論が不足している。そこで当研究集会では、様々な分野との相互作用を理論的に進めている研究者が集まり、それぞれの研究者が進めている理論体系や高解像度モデル・大気海洋結合モデル・観測データを用いた解析手法を幅広く議論し、「海洋学としてのBig Question はなにか」をテーマに、新しい海洋力学の理論体系の構築を目指す。

研究集会の概要

研究集会名：海洋力学理論の研究会
日時：平成 30 年 9 月 10 日（月）13:00 - 11 日（火）12:00
場所：九州大学応用力学研究所 W501

海洋力学のこれまでの歴史的変遷とともに未解決なまま宿題となっている課題を参加者の一人に具体例を示してもらい、それについての考察を参加者とともに疑問点を理解・解決しながら議論を進めていくという形で研究集会を開催した。研究成果そのものには焦点をしぼらず、研究テーマの発展軸、位置づけを俯瞰的な視点から議論した。今回は、風成循環に関しては亜寒帯域に形成される海洋フロントの形成メカニズム、混合過程に関しては海底地形を起因とする乱流混合のメカニズム、深層循環に関しては熱塩循環の駆動メカニズム、そして海洋の素過程を検証するツールとして粒子追跡モデル、と４つのテーマを中心にプログラムを構成した。それぞれの具体例として、磯口ジェット・黒潮・内部重力波・鉛直混合と循環強度・水循環、を中心に議論が進んだ。1 トピックにつき１時間近く時間をかけたことにより参加者間で疑問点を共有することができ、有意義な研究集会となった。

出席者

１３名（参加者名簿参照）

議論テーマとその概要

13:00-13:30　趣旨説明

三寺史夫（北海道大学）・木田新一郎（九州大学）

海洋力学の課題についての考察を参加者の一人に具体例を示してもらい、それを参加者間でお互いに疑問点を解決しながら議論を進めていくことを確認した．また学会発表とは異なり一つのテーマを十分な時間をかけて議論し、今後の海洋物理学が注目すべき研究テーマの芽を作り出すことを目的として研究集会を進めることを確認した。

10 日（月）

13:30-14:30 亜寒帯域に形成される海洋フロントの形成メカニズム

話題提供：三寺史夫（北海道大学）

Discussion のリード:浮田甚郎（新潟大学）

衛星を通じて海面水温場の観測が進んだことで海洋フロントの実態が明らかになってきている。海洋フロントは、大小さまざまなスケールで存在することが知られているが、その中でも亜寒帯域に形成される磯口ジェットは表層近くにフロントが形成されるにも関わらずその位置が大きく変動しないという特徴を持つ。海底地形が JEBAR を通じて Barotropic から Baroclinic な場へ作用することの重要性が指摘され、理論とともに数値モデル結果が紹介された。また大西洋・南極海など他の海域での理論の適応性についても議論が進んだ。

14:30-14:45　休憩

14:45-15:45　海底地形を起因とする乱流混合のメカニズム１

話題のリード：長井健容（東京海洋大）

Discussion のリード：田口文明　（東京大学）

海流が海底地形に作用した結果、強い鉛直混合が起きることが近年明らかになりつつあるが、その混合の強さや空間分布の現場観測に基づいた検証はまだ不足している。黒潮が琉球列島を通過する海域における最新の乱流観測結果とともに、高解像度で乱流強度を観測する手法が紹介された。海底地形がその近傍で混合を引き起こす不安定メカニズムについての仮説が提示され、さらに黒潮上における鉛直混合が局所から海盆スケールの海洋循環に果たす役割について議論が及んだ。

15:45-16:00　休憩

16:00-17:00　海底地形を起因とする乱流混合のメカニズム２

話題のリード：大貫陽平（九州大学）

Discussion のリード: 相木秀則（名古屋大学）

背景場が変動する中での不安定性解析に関してモノドロミー行列を用いた新たな解析手法が提案された。これまで海洋内部波が引き起こす混合について Far-field における理論が発達してきた一方、Near-Field における理論の構築が進んでいないことが指摘され、それが新手法によって解決できる可能性が示された。成層が地形に作用する際に生じるビーム内部で不安定を引き起こす波の特性が抽出できることが示され、解析結果と適用範囲について議論が行われた。

11 日（火）
9:30-10:30　熱塩循環の駆動メカニズム
話題提供：吉川裕（京都大学）
Discussion のリード: 浦川昇吾（気象研）
深層循環を駆動する主要素である熱塩循環は、これまで Sandstrom, Stommel and Arons, Munk らの仮説が基点となってその理解が進んできた。海洋学における深層の鉛直混合への興味もこれらの研究が重要な役割を果たしている。ただ、鉛直混合と循環の強度の関係性についての議論は、解釈が混乱した形で議論が進んでいることが指摘された。理想実験による過去の研究の検証結果が紹介され、これまでの理論で欠けていた視点や熱塩循環の駆動要因の解釈方法を中心に議論が行われた。

10:30-10:45　休憩
10:45-11:45　淡水循環を抽出するツールについて
話題提供：木田新一郎（九州大学）
Discussion のリード: 古恵亮（JAMSTEC）
海洋循環を議論する際、密度場と循環を一体的に議論・解析することが多いが、水循環に代表されるように、海洋循環は密度とともに、塩分、窒素、炭素、とそれぞれの物質特性・起源に応じて循環が存在しているはずである。そこでラグランジアン粒子追跡モデルを用いて淡水に着目した水循環を追跡する手法が紹介された。インドネシア多島海を例に降水起源の淡水を追跡した結果が紹介され、時空間が大きく変動する場でも適応可能なことが示された。オイラー的手法との差・同位体を用いた手法について議論が進んだ。

11:45-12:00　閉会挨拶
木田新一郎（九州大学）
近年、海洋で注目されている現象を中心に、最新の検証方法・視点が紹介された。昨年度と比べ、混合過程に関する発表が多く、別の視点から見た海洋学としての Big Question が提示され、議論が活発に進んだ。疑問点をその都度、解決しながらディスカッションを進めたことで、時間をかけながら参加者内で理解を共有することができた。

発表論文および学会発表
無し

研究組織

研究代表者

三寺 史夫（北海道大学・低温科学研究所・教授）

研究協力者

浮田 甚郎（新潟大学・自然科学系・教授）

田口 文明（東京大学・先端科学技術研究センター・特任准教授）

古恵 亮（海洋研究開発機構・主任研究員）

勝又 勝郎（海洋研究開発機構・主任研究員）

吉川 裕（京都大学・理学部・准教授）

相木 秀則（名古屋大学・宇宙地球環境研究所・准教授）

長井 健容（東京海洋大学・学術研究院海洋環境学部門・助教）

松村 義正（東京大学・大気海洋研究所・助教）

浦川 昇吾（気象庁気象研究所・海洋・地球化学研究部・主任研究官）

所内世話人

木田 新一郎（九州大学・応用力学研究所・准教授）

研究集会名:海洋力学理論の研究会
場所:九州大学応用力学研究所 W501
日時:2018 年 9 月 10 日 13:00 – 11 日 12:00
代表:三寺史夫、世話人:木田新一郎

プログラム

13:00–13:30 木田新一郎(九州大学)
趣旨説明

13:30–14:30 風成循環のメカニズムに関する数値モデル・観測・理論の発展について
三寺史夫(北海道大学)
浮田甚郎(新潟大学)

14:30–14:45 休憩

14:45–15:45 海洋の鉛直混合に関する考察 I
長井健容(東京海洋大)
田口文明(東京大学)

15:45–16:00 休憩

16:00–17:00 海洋の鉛直混合に関する考察 II
大貫陽平(九州大学)
相木秀則(名古屋大学)

9:30–10:30 熱塩循環のメカニズムに関する数値モデル・理論について
吉川裕(京都大学)
浦川昇吾(気象研)

10:30–11:00 休憩

11:00–12:00 海洋の素過程を検証する数値・観測・理論的ツールについて
木田新一郎(九州大学)
古恵亮(JAMSTEC)

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：　2018 年 12 月 12 日(水)　午後(14:00～17:30)
　　13 日(木)　午前(9:30～10:45)
開催場所：　九州大学 応用力学研究所西棟 6 階　多目的研究交流室（W601 号室）
参加者：　12 日 33 名
　　13 日 36 名

３．発表概要

研究集会では計 13 件の研究発表が行われた。

1 日目は、趣旨説明の後 7 件の講演があった。琉球大学の藤井が NICT 沖縄センターとともに実施している地上波デジタル放送の電波を用いたパッシブバイスタティックレーダでの流速観測の可能性を論じた。三菱電機の高橋はアダプティブアレイ信号処理を用いてドップラスペクトルに混入する干渉波の影響を低減する手法の提案を行った。愛媛大学の尾方は、リアルタイム津波検出法について仮想津波実験を用いて検証した。水深と背景波高により検知性能が大きく変わることを示唆した。JAMSTEC むつ研究所の佐々木らは、CODAR/SeaSonde レーダの流速計測に影響を与えるアンテナパターンとして、AIS 情報を用いたアンテナパターン計測を適用し、係留観測との比較を行った。大畑局のアンテナパターンが課題であることが分かった。琉球大学の久木は、海洋レーダを用いた波浪研究のレビューを行うともに、和歌山観測データを用いて波浪計測の初期結果を示した。電力中央研究所の岡田は、海洋レーダで観測できない沿岸近傍に対してデータ同化の手法を使って流速を求める方法を提案した。遠州灘の観測に対して同手法を適用し電磁流速計との比較から RMSE が 58%低下したことを示した。JAMSTEC の石川は、北海道大学低温科学研究所の江渕らが作成した宗谷海峡におけるミズダコカレンダーに触発され、津軽海峡東部海域を観測している

レーダを用いて同海域のナウキャストを試みた。調和解析から潮流成分とそれ以外の成分の短期予測を行い半日程度の予測可能なことを示した。

1 日目最後の情報交換の時間に、宮崎県水産試験場の渡慶次は、宮崎県が設置中の日向灘観測用の 13MHz レーダの整備状況と予備免許が下りたことを報告した。また、10 月にスペインで行われた海洋レーダワークキャンプに参加したことに触れ、EU 共通のレーダのデータ処理や QC の内容とユーザの視点でのツール開発、普及活動の重要性を述べた。琉球大学の藤井からは、6 月に那覇にて開催された第 4 回 ORCA(Ocean Radar Conference for Asia-Pacific)は、発表件数 42 件、12 か国 63 名の参加があり、盛会であったことが報告された。

2 日目は、6 件の講演があった。北海道大学低温科学研究所の江渕は宗谷海峡およびオホーツク海観測の海洋レーダの 2003 年から 16 年分の観測データを俯瞰し、宗谷暖流の季節変動が大きいことを明らかにした。また、ADCP の鉛直プロファイルも用いて流量を推測するとともに、季節変化はオホーツク海の潮位差との相関が高いことも示した。JAMSTEC むつ研究所／北海道大学水産の阿部は、津軽海峡東部観測の海洋レーダで観測された流速と練習船うしお丸の 10m 深の ADCP での流速とを比較した。正の相関がみられるがノイズが大きく更なる処理の必要性を述べた。風強制に対する応答についても言及し南北方向にのみ流速と風速が相関を持つことを示した。東京大学新領域の小林は、相模湾内の循環流の挙動を知るために、海上保安庁の相模湾海洋レーダで得られた表層流速を調和解析し、係留 ADCP と比較した。比較に際し異常値除去や移動平均により QC を行うとともに変分法による空間 QC も行い、データの信頼性を向上させた。九州大学の青谷は、15 年間の対馬海峡観測のデータを用いて経年変化の解析を行った。吹送流成分の推定から地衡流成分を抜き出した。その結果、2009～2010 年に約 20%流速が上昇する現象がみられた。宮崎県水産試験場の渡慶次らは、2016 年から琉球大学との共同研究で実施している日向灘観測の概略とその成果をもとにしたまき網漁場の形成や急潮指標の可能性について述べ、整備中の 13MHz レーダ稼働後に発信される予定の総合漁場情報の計画を解説した。海上保安庁海洋情報部の藤岡は、海洋状況把握（MDA）の能力強化に向けての取り組みとして、海洋レーダデータの表示を各機関と調整中であることを報告した。

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： 2018 年 12 月 12 日(水)午後～13 日(木)午前

会場：九州大学筑紫キャンパス

応用力学研究所西棟 6 階 多目的研究交流室（W601 号室）

==========

12 月 12 日(水)

14:00-14:05　趣旨説明

藤井智史（琉球大）

14:05-14:30　地デジパッシブレーダによる沿岸流の検出

永江要・浜比嘉正峻（琉球大工）雨谷純・新垣吉也（NICT 沖縄）、藤井智史（琉球大工）

14:30-14:55　アダプティブビーム形成による干渉波抑圧と Bragg 散乱エコー明瞭化
高橋龍平・小柳智之・鈴木信弘・若山俊夫（三菱電機）

14:55-15:20　仮想津波観測実験に基づく海洋レーダによるリアルタイム津波検知手法の検討
尾方浩平（愛媛大院）、門廻充侍（東北大災害科学国際研）、藤良太郎（愛媛大院／国際航業）、高橋智幸（関西大）、日向博文（愛媛大院）

15:20-15:45　AIS 情報由来のアンテナパターンによる流速データ品質の向上について
佐々木建一（JAMSTEC むつ）、橋向高幸（マリンワークス）山本秀樹・高田信・脇田昌英・渡邉修一（JAMSTEC むつ）

15:45-15:55　休憩

15:55-16:20　海洋レーダによる波浪研究の現状と和歌山県沖観測の初期解析
久木幸治（琉球大理）、片岡智哉（東京理科大理工）

16:20-16:45　視線方向流速を活用した 4 次元変分法による沿岸近傍の流動場推定
岡田輝久・坂井伸一・坪野考樹（電中研）

16:45-17:10　津軽海峡 HF レーダーの調和解析とナウキャスト手法の開発
石川洋一・田中祐介（JAMSTEC）

17:10-17:30　情報交換

12 月 5 日(火)

9:30-9:55　海洋レーダで観測された宗谷暖流表層流速場の経年変動
江淵直人・深町康・大島慶一郎・高塚徹・石川正雄・白澤邦男・若土正曉（北大低温研）

9:55-10:20　津軽海峡 HF レーダーデータを用いた基礎的な解析と今後について
阿部泰人（JAMSTEC むつ／北大院水産）、安井智美・平譯享（北大院水産）、佐々木建一（JAMSTEC むつ）

10:20-10:45　HF レーダーによる相模湾表層流の分析
小林諒也・早稲田卓爾・小平翼(東大新領域)

10:45-10:55　休憩

10:55-11:20　対馬海洋レーダーで観測した 15 年間の流況長期変化
青谷裕史・磯辺篤彦・上原克人(九大応力研)、岩崎慎介(寒地土木研)

11:20-11:45　水産振興を目的とした宮崎県における海洋レーダの活用について
渡慶次力(宮崎水試)、藤井智史・池原日向・大城弘貴(琉球大工)

11:45-12:10　海洋の今を見るために　～海上保安庁における海洋状況把握(MDA)の能力強化に向けた取組～
藤岡ゆかり(海洋情報部)

12:10-12:30　総合討論

共同利用研究集会

「東シナ海と日本海の海水循環と生物化学過程」

"Water Circulation and Chemical-Biological Processes in East China Sea and Japan 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・日本海の生物生産には、それらの海域の流動や混合による栄養塩の流入や供給が欠かせない。特に東シナ海からの日本海への海水・淡水・物質の流入は、日本海の生態系に大きな影響を与えていると考えられる。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長年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、名古屋大学や長崎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。これまでこの数年は東シナ海に焦点を当てた研究集会を行ってきたが、平成 29 年度からは東シナ海と日本海の両海域を含め、流動や混合などの物理環境と、生物化学過程との関係を明らかにする研究集会を開催していくこととした。この内東シナ海に関しては、新学術領域研究「新海洋混合学」の A2-4 班の班会議と合同で行った。

出席者は、名古屋大学１名、長崎大学１名、愛媛大学２名、富山大学１名、鹿児島大学３名、東北水研１名、石川県水産総合センター１名、富山県農林水産総合技術センター水産研究所１名、国立台湾大学５名、および九州大学７名であった。本研究集会では、長崎大学練習船長崎丸での東シナ海観測に関連して遠藤貴洋（九大)、吉江直樹（愛媛大)、張勁（富山大)、市川香（九大)、郭新宇（愛媛大）から、トカラ海峡観測に関連して、仁科文子（鹿児島大)、堤英輔（九大)、長谷川大介（東北水研)、吉江直樹（愛媛大)、小針統（鹿児島大)、張勁（富山大)、松野健（九大)、中村啓彦（鹿児島大）から、その他に関して、武田重信（長崎大)、石坂丞二（名古屋大)、郭新宇（愛媛大)、原田浩太朗（石川県水産総合センター)、千手智晴（九州大学)、張勁（富山大）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

研究集会は、2019 年1月 25 日(金)から1月 26 日(土)にかけて、九州大学応用力学研究所で行った。

まず、長崎丸を中心とした東シナ海の観測について５名が発表した。遠藤は、東シナ海陸棚縁辺部において、2017 年 7 月に鉛直第一モード、2018 年 7 月に鉛直第二モードの内部ソリトン波列が観測した結果について報告した。陸棚斜面の等深線に直交する北西方向に加えて、南西・西北西方向に伝播する波列もみられ、その速度は方向によらず、第一モードは約 1.2m/s、第二モードは約 0.34m/s であった。内部ソリトンの通過に伴う鉛直変位は 10～20m、水平（鉛直）流速の変動は潮汐流に匹敵する 0.2（0.1）m/s に達し、最大振幅は北西に伝播する波列で観測された。波列は各伝播方向ともに約 1 日間隔で到来する傾向にあり、その発生過程に日周潮の影響が示唆された。吉江は、2018 年 7 月 24，25，26 日の断面観測について報告し、24・26 日は沖側、25 日は沿岸側に渦があり、中層の栄養塩とクロロフィル a

が増加していた。多波長励起蛍光光度計で測定した植物プランクトンでは、珪藻類（褐色藻類）の中層での変動が大きく、表層で藍藻、亜表層で緑藻系の植物もいることが示されたが、今後検証予定である。張は、堆積物間隙水の栄養塩分布からその水中への供給の可能性について述べた。また、2017 年白鳳丸での観測結果からセシウムが太平洋、ルソン海峡、東シナ海の中層にあるも示した。市川は、東シナ海の内部波の SAR 観測について述べ、Seninel-1A で 2015 年 3 月 14 日にきれいなデータがあり、他にも 80 画像ぐらいはあり、潮時をあわせることも可能であるかもしれないが、風の影響等があり簡単ではないこと、3 月 14 日は内部波以外にも長い波長や黒潮フロント域周辺でざわつきがあることを報告した。郭は、ルソン海峡から黒潮続流域での有光層（100m）への栄養塩の流入の計算を行った。ルソン海峡では当密度面の変化（湧昇）など、日本南岸は地形や渦での沿岸湧昇、続流域ではミアンダリングによる渦度の保存による影響が考えられた。また、台湾東部の栄養塩の季節変化では、夏に流速が強くなり栄養塩も高くなるが、観測とは分布が異なることを報告した。

次に、鹿児島丸でのトカラ海峡から九州東部の観測に関して８名から発表があった。仁科は 2018 年 11 月 17－25 日の航海の概要について述べ、屋久島沖から室戸沖　TS では黒潮系と内側域の水がはっきりと分かれていることを報告した。堤は、トカラ海峡での黒潮による混合の研究の現状をまとめた。海山や海嶺等の地形と黒潮の関係で強い混合が起きており、モデルでも再現が可能であること、強い混合は海山の 1～２倍程度の距離にトラップされているものが多く、少し弱い混合は伝搬することを報告した。長谷川は、LISST-200X での粒子計測について述べ、現状ではまだデータの吟味が必要であることを報告した。吉江は、断面観測に沿った、植物プランクトン、光合成活性、栄養塩の変化について述べ、トカラ海峡を通過した後２日ぐらいたった点で増加しているようにも見えるが、ラインによって陸の影響などが入り込んでいるようであること、サイズとしては、ナノ・ピコプランクトンが多いことを報告した。小針は、クロロフィル極大の下の硝酸塩フラックスのピークで採水した水の培養実験について述べた。栄養塩の少ない水で栄養塩供給に対して植物・動物が応答していること、ピコ・ナノ・マイクロプランクトンいずれも増加するが、ナノプランクトンに対する摂餌圧が高く食べられていること、それによって動物が増えているを報告した。ラグランジ観測でもトカラ以降に植物が増加し、中型・大型動物も増加しているが、増殖しているには速すぎるため、沿岸から入ってきている可能性が指摘された。張は、鹿児島丸 2018 年での航海での希土類の速報について述べた。鉛直混合と等密度混合が必要であることはわかったが、どのような時間スケールで混ざるかはこの方法では難しいのではないか議論があった。松野は、ルソン海峡から四国沖にかけての、黒潮流域における乱流混合の研究状況についてまとめた。特に、地形と流れ（黒潮＋潮汐）でどのように鉛直混合が起こるかを、エネルギーバランスの観点から見ていく必要性。この乱流がエネルギー減衰、栄養塩の供給、生物生産への影響など、何にどう寄与しているかを明らかにすることが大切であることを報告した。中村は、来年度からのワシントン大学と共同研究について述べた。ワシントン大学では EX-FLOAT を 10 台平瀬に流して乱流を面的に測定し、日本側は係留系を設置したいと考えていることを報告した。

15 日には、その他の研究について報告があった。武田は、窒素固定を行なうトリコデズミウムとリケリアに関して、東シナ海での調査した結果について述べた。2018 年の長崎丸航海では後半にトリコデズミウムが多く、MODIS のクロロフィルも 19 日より 26 日が増加していること、リケリアは珪藻と一緒にいるため、深いところリンの比較的多いところに多く、トリコデズミウムはリンが必要でブルームが島回りに多い可能性を報告した。石坂は、海色衛星データを利用した東シナ海黒潮フロント域とトカラ海峡域のクロロフィル変動観測について述べた。2018 年の長崎丸観測時のひまわり 8 号での連続ク

ロロフィル画像では、長崎丸観測ラインに多くの表面クロロフィル変動が黒潮に沿って流れてきており、長崎丸観測との対応を今後詳細に調べる必要があること、トカラ海峡にも多くのクロロフィル変動が見られ、平瀬周辺では6月のMODIS画像ではクロロフィルが高くなっているが、4月のSGLIデータではむしろ低くなっていることについて報告した。郭は、黒潮本流域における栄養塩輸送に関する観測データとモデル結果の解析について述べ、栄養塩の輸送は第1モードは大蛇行の影響、第2モードは属流の安定・不安定と考えらえる10年近いゆっくりした変動で決まっていることを報告した。原田は、石川県沿岸の定置網における魚類相の変遷に関して主成分分析を行い、その変動要因について述べた。多くの魚種が石川県周辺の沿岸水温変動よりも東シナ海の長期変動と関連しており、産卵場との関係や対馬暖流との関連などの可能性があること、2017年1−3月は史上最低の大不漁であったこと、3月4日・5日に富山湾研究会「富山湾の不漁の原因を探る（仮)」が開催されることが報告された。千手は、以前行った伊豆小笠原海嶺付近の深層循環の西岸境界流に関する回転水槽実験に関して、地形が日本海に似ていることから、日本海の深層循環との比較を行った結果を報告した。張は、WESTPACのGG06(PEACE)について述べ、2019年5月20−21日にソウル大学で会合が行われること、2020年からの第２期には黒潮グループとの連携する可能性があることを報告した。

すべての発表ののちに、総合討論を行った。遠藤を中心に、名古屋大学宇宙地球環境研究所の共同利用・共同研究での研究集会に応募し、7月に予定している新長崎丸での航海の計画を詰めることとなった。また、来年度の九州大学応用力学研究所の共同利用・共同研究での研究集会は、東シナ海・日本海にとどまらず、広く東アジア縁辺海を対象とすることとなった。

九州大学応用力学研究所 共同利用研究集会
「東シナ海と日本海の海水循環と生物化学過程」

場所：九州大学 応用力学研究所

日時：2019 年 1 月 25 日 09:30～17:30　大会議室（本館 2F、玄関ロビーの上）

1 月 26 日 09:30～12:30　3 階 301 講義室

プログラム

1 月 25 日（金）

１．長崎丸の観測（09:30～12:00）

（１）遠藤貴洋（九大）：東シナ海陸棚縁辺部でのこれまでの観測結果（物理）

（２）吉江直樹（愛媛大）：東シナ海陸棚縁辺部でのこれまでの観測結果（化学・生物）

（３）張勁（富山大）：東シナ海陸棚縁辺部でのこれまでの観測結果（化学）

（４）市川香（九大）：東シナ海や南シナ海の観測海域の過去の SAR 画像解析

（５）郭新宇（愛媛大）：台湾東部海域の栄養塩濃度の季節変化

２．6 月と 11 月のトカラ海峡観測（13：00～17：30）

（１）仁科文子（鹿児島大）：かごしま丸航海の概要と海洋構造

（２）堤英輔（九大）：トカラ海峡におけるこれまでの乱流観測とその取りまとめに向けて

（３）長谷川大介（東北水研）：KG1815 における LISST-200X による粒子観測について

（４）吉江直樹（愛媛大）：トカラ海峡から四国南岸にかけての栄養塩および植物群集組成の変遷

（５）小針統（鹿児島大）：薩南海域に特異的な海洋混合に対するプランクトン群集の応答：
培養実験およびラグランジュ海洋観測による評価

（６）張勁（富山大）：かごしま丸 KG1815 航海の速報：水塊混合について

（７）松野健（九大）：黒潮流域における乱流混合：ルソン海峡から四国沖まで

（８）中村啓彦（鹿児島大）：来年度の UW とのかごしま丸の観測計画

（９）総合討論

1 月 26 日（土）

09:30～12:30

（１）武田重信ほか（長崎大）：東部東シナ海における窒素固定藻類の分布と環境要因の関わり

（２）石坂丞二（名古屋大）：「しきさい」で見た黒潮

（３）郭新宇（愛媛大）：黒潮本流域における栄養塩輸送に関する観測データとモデル結果の解析

（４）原田浩太朗（石川総水セ）：石川県沿岸の定置網における魚類相の変遷とその要因

（５）千手智晴（九大）：日本海の深層循環に関する一考察：回転水槽実験からの示唆

（６）張勁（富山大）：WESTPAC WG06 の活動報告と関連情報の紹介

総合討論

「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、2018 年 8 月 2 日から 3 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 4 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 12 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、講演時間を大幅に超過することもあった。

今回も、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、太平洋沿岸に関する発表が 6 題、日本海に関する発表が 5 題、日本周辺全体を対象とした発表が 1 題だった。沿岸で起きる短期的な環境変動に代表される、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。高知県では、水産試験研究機関の担当者が精力的に流動等のモニタリングを展開し、大量のデータから問題となっている現象を数多く抽出した一方、その研究とリンクするようなモデル研究結果の発表もあり、これまで未解明だった紀伊水道～高知県沿岸の急潮の研究が大きく進む期待が持てる会合となった。その他にも、急潮に限らず、沿岸の海洋環境を大きく変える暖水波及や、駿河湾、富山湾、若狭湾等における海水循環、渦形成に関する研究発表がなされ、今後の発展が期待された。また、本会合では、短周変動に限らず、海洋環境の平均場や経年変動に関する発表、議論もなされ、急潮等の極端現象を議論する上でのそれらの重要性が認識された。

総合討論では、これまで、急潮被害という認識に乏しかった長崎県からの、急潮被害の報告があり、急潮被害に関する定置網漁業者への啓蒙をどう行うか、また長崎県における今後の急潮研究の端緒を開くための議論が行われた。これらの議論に基づき、参加者同士の懇親を深め、水産を背景にする研究者と海洋物理をバックグラウンドにする研究者の相互理解が進んだ。今後も、生物、水産系にも積極的に間口を広げ、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。

プログラム

——8

月 2 日（木）
13:30～13:40
趣旨説明

13:40～14:05
高知県内における 2017 年から 2018 年にかけての急潮発生経過
猪原　亮（高知水試）

14:05～14:30
高知県東岸の急潮
〇寄高博行（高知大黒潮圏／農林海洋）・猪原亮（高知水試）

14:30～14:55
SETO システムを用いた高知県沿岸での急潮事例の調査
坂元　賢治（大阪管区気象台）

14:55～15:05
休憩

15:05～15:30
日本周辺海域をターゲットとした海洋過去将来予測・ダウンスケーリングデータセットの構築
〇西川史朗(海洋研究開発機構)・ 若松剛(Nansen Environmental and Remote Sensing Center)・石川洋一(海洋研究開発機構)・ 石崎廣(海洋研究開発機構)・ 田中裕介(海洋研究開発機構)・ 坂本圭(気象研究所)・ 辻野博之(気象研究所)

15:30～15:55
駿河湾フェリー搭載 ADCP を用いた長期流動観測 －湾奥海域の顕著な季節変動－
〇勝間田高明(東海大学・NPO 法人 海洋環境保全協会)・仁木将人(東海大学)・田中昭彦(東海大学)・髙嶋恭子（東海大学)・杉本隆成(東京大学名誉教授)・丹佑之(東海大学・一般社団法人 無人機研究開発機構)

15:55～16:20
日本南岸沿岸域に影響を与える黒潮からの暖水波及の観測と発生機構の推定
〇清水勇吾(水研機構中央水研)・伊藤大樹(水研機構中央水研)・安倍大介(水研機構中央水研)・岡崎誠(水研機構国際水研)

16:20～16:45
豊後水道の底入り潮
〇森本昭彦・浅原貫太・前谷佳奈（愛媛大)・滝川哲太郎（長崎大）

8 月 3 日（金）
9:15～9:40
台風が対馬海峡へ連行してきた高潮位に起因する山陰沿岸の急潮
〇伊藤雅・井桁庸介（水研機構日水研）

9:40～10:05
富山湾周辺海域の海洋環境の経年変動パターン
〇小塚　晃　（富山水研）・千手知晴（九州大学応力研）

10:05～10:30
2017 年の富山湾奥の沿岸流と沖合の流動場の関係について
〇福留研一（富山高専），千葉 元（大島商船高専），金山恵美（富山高専）

10:30～10:40
休憩

10:40～11:05
若狭湾環流形成と丹後半島への対馬暖流接岸との関係
〇井桁庸介(水研機構日水研)・兼田淳史(福井県大)・伊藤雅(水研機構日水研)・福留研一(富山高専)・熊木豊(京都府海洋センター)・鮎川航太(福井県庁)

11:05～11:30
若狭湾における ADCP 搭載ブイの反射強度データの利用に向けた取り組み
〇兼田淳史(福井県大)・桂田慶裕（福井県水試）

11:30～11:45
総合討論

（研究集会）

地球流体における波動と対流現象の力学

研究代表者
伊賀 啓太（東京大学 大気海洋研究所）

研究集会の目的

近年の計算機技術の著しい進歩により，地球･惑星大気や海洋の小規模渦から大規模循環まで，計算機の上で再現できるようになった．そして，人工衛星による宇宙からの観測は，地球・惑星全域での広域情報の入手を可能にした．今日では，地球科学は再現と検証の手段を得て，先端科学のひとつに変貌しつつある．そのような状況に於いて，地球流体力学は数値計算の結果や衛星観測の厖大なデータを整理し統一的な理解を得るのに，重要な役割を担う学問である．本研究集会の目的は，複数の分野の地球流体力学に関連した研究者が一堂に会し，相互に最新の情報を交換し，新しい学問の展開を模索するものである．

研究集会の日時・場所

日　時: 2019 年 3 月 7 日（木）～3 月 8 日（金）
会　場: 九州大学筑紫キャンパス　応用力学研究所　本館６階　多目的研究交流室(W601)

研究集会の概要

本集会は応用力学研究所と東京大学大気海洋研究所の間で交互に開催される研究集会であり、今回は２０回目にあたる。

発表内容は大別して、地球流体力学に関し回転成層流体の室内実験や理論的研究、地球大気海洋に関して、数値モデリングの改善や諸現象の力学的理解、惑星大気に関し金星や木星大気についての発表があった。発表は１５件あり、３０名の参加者があった。学部学生から名誉教授の発表まであり、情報交換や教育の場として重要な機会であった。これまで九大で世話人を努めてこられた和方教授が今年度定年退職を迎えられることになるが、この貴重な研究集会が今後とも引き継がれることが望まれる。

室内実験では、回転した水槽内の流体運動に関する議論があった。その一つは、海底深層流を模した実験で、水槽中に設置した部分的な仕切りにより流れの流動特性がどの様に変わるかの報告があった。また、高速で回転した水槽中に形成される軸対称流れの循環に関し理論解を導出し、さらにその流れ場の中に発生する不安定波動の線形安定解析についての報告があった。地球大気の研究では、台風に関連した２件の発表があった。台風の周りで波数２程度の強風域が台風の目の周りを旋回する現象が報告され、その観測データの解析と、数値モデルによる再現、エネルギー解析の報告があった。もう一件は、LES による数値シミュレーションより、台風下層に２種類のロール状の風分布が存在することを示し、エクマン境界層解による鉛直シアー風の線形固有値問題から、その発生維持機構を議論した発表があった。

大気の局地循環に関し、ゲリラ豪雨の同化実験について報告があった。その予報には、時間的に非常に密な観測が必要であり、３０分程度の間隔でのデータ同化の必要性が指摘された。その際、雷のデータも取り入れる事により雲中の霰分布の改善に役立つとの興味ある発表があった。この雷と荷電の発生域の違いをどの様に考慮したら良いか議論があった。また日本海の海面水温の局地気象への影響について報告があり、日本海の海水温の重要性が指摘された。またブロッキング高気圧の小規模渦の選択的吸収と予報可能性の関連に関する報告があった。次に対流圏の気象状況の再現性に関し、成層圏の影響に関する報告があった。気象数値モデルの上端境界を高くした（成層圏の計算精度をあげた）場合と低くした場合では対流圏の降雨にも変化があり、上端境界を高くした場合北極圏の極夜ジェットの再現性が大きく改善されることが報告され、気象予報の向上には、成層圏を正確に計算する必要性の提言があった。

海洋循環に関し、３層海洋モデルを風応力で駆動した際、海底に海山がある場合、その影響域がロスビー波として西方に伝わり西岸境界流へ影響するとの報告があった。その海山の水平スケールに依存する波動の群速度の違いにより、東方への伝播の可能性がないかなどの議論があった。

惑星大気では、金星スーパーローテーションの再現性に関する議論があり、鉛直渦粘性係数が大きい場合、スーパーローテーションの再現が難しいとの報告があった。また、金星には対称不安定の存在が可能ではないかとの指摘があった。最後に、木星大気についての話題もあり、アンモニア密度が増加した場合、湿潤対流が禁止される仕組みについての発表があった。

講演プログラム

３月７日（木）

12:50-13:00　代表者挨拶　伊賀 啓太(東大 AORI)

13:00-13:25　河田 裕貴(東大 AORI),伊賀 啓太(東大 AORI),横田 祥(気象研究所),
栃本 英伍(東大 AORI)
台風の内部コア領域に見られる非軸対称構造に関する観測的・数値的研究

13:25-13:50　寺西 修二(京都産業大),高谷 康太郎(京都産業大)
位相依存性のない pseudomomentum の新たな定義について

13:50-14:15　千手 智晴(九大・応研),吉田 次郎(東京海洋大)
回転水槽実験による Stommel-Arons 型深層循環に対する鉛直壁の効果の検討
: 日本海深層流分布の解釈への応用

14:15-14:40　野口 尚史,小山 志穂里,松野 友樹(京大･工)
乱流により駆動される粒子群の流動

14:40-15:00　Break

15:00-16:30　和方吉信教授 最終講義
大気海洋力学の研究を振り返って

場所：九州大学筑紫キャンパス 事務棟（共通管理棟）3F 大会議室

19:00-21:00　＊＊退職記念祝賀会＊＊

３月８日（金）

9:00-9:25　伊藤 純至(東大 AORI),伊賀 啓太(東大 AORI),新野 宏(東大 AORI)
エクマン層と LES で再現した台風境界層の不安定解析

9:25-9:50　伊賀 啓太(東大 AORI)
円筒水槽内の回転する底面上の軸対称流の波の共鳴

9:50-10:15　加瀬 有理(富山大･理),松浦知徳(富山大)
強流域に与える海底地形(海山・海嶺)の影響と中規模擾乱の発生

10:15-10:35　Break

10:35-11:00　前島 康光(理研),牛尾 知雄(首都大),三好 建正(理研)
　　ゲリラ豪雨予報高度化に向けた高頻度・高解像度データ同化実験

11:00-11:25　飯塚 聡(防災科研)
　　海面水温の誤差バイアスが豪雨に及ぼす影響

11:25-11:50　山崎 哲(AMSTEC)
　　2010 年夏ブロッキングの持続と予測におけるのストームトラックの寄与

11:50-12:15　河谷 芳雄(JAMSTEC),Kevin Hamilton(Univ. Hawaii),
Lesley Gray(Univ. Oxford),Scott Osprey(Univ. Oxford),渡辺 真吾(JAMSTEC),
山下 陽介(JAMSTEC)
　　成層圏が対流圏循環に及ぼす影響：MIROC-AGCM モデルを用いた考察

12:15-13:20　Lunch

13:20-13:45　松田 佳久(学芸大)
　　金星の大気大循環再考

13:45-14:10　杉本 憲彦(慶大),高木 征弘(京産大),松田 佳久(学芸大)
　　東西平均加熱による高速な金星スーパーローテーションの発生

14:10-14:35　高木 征弘(京産大・理),杉本 憲彦(慶大),樫村 博基 (CPS/神戸大),
安藤 紘基 (京産大),松田 佳久(学芸大)
　　金星大気における対称不安定の可能性

14:35-15:00　中島 健介(九大・理),福之上 嘉刀(九大・理)
　　木星型惑星における湿潤対流の禁止条件について

発表15件、参加者30名

海洋・海岸等における波動の解析モデルの比較

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，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，研究の更なる発展を目指し，様々な視点から海洋・海岸等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 年度より，応用力学研究所共同利用研究集会を開催している．研究集会では，質疑応答が大変活発に行なわれ，本研究集会の重要性が，参加者によって益々強く認識されている．そこで，平成 30 年度には，応用力学研究所共同利用研究集会として，波動モデルに関する最新の研究成果を踏まえ，各分野における波動現象に対して開発されてきたモデルを比較検討し，議論を行なうことを目的とした．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．

また，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す．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ている研究者，そして，応用物理学者並びに数学者を迎え入れ，多様な角度から流体の波動問題に関して議論を行なう．

以上のように，本研究集会は，海洋・海岸等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により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する．こうした目的に照らせば，本研究集会は，共同利用研究拠点である応用力学研究所での開催が相応しいと考えられる．

研究集会の内容

本研究集会は，2018 年 12 月 15 日（土）14:00～16 日（日）12:20 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は，土木学会海岸工学委員会波動モデル研究会のメンバであり，主催を土木学会海岸工学委員会波動モデル研究会としたが，本研究会のメンバは，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．こうした分野横断的な活動を進めるにあたり，本研究集会の継続的な開催は，大きな意味を有している．参加者数は，両日とも，10 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．

まず，第 1 日の第 1 セッションにおいて，津波の数値解析に関する 2 件の口頭発表及び質疑応答が行なわれた．すなわち，全球津波伝播解析 Python モジュールの構築と，分裂を示す河川津波の数値解析に関する発表がなされた．

次に，第 2 セッションでは，沿岸域における流体運動の数値解析に焦点が当てられ，2 件の口頭発表及び質疑応答が行なわれた．すなわち，没水堤周辺での不規則波の波高及び周期の変化とその再現計算と，超巨大台風による伊勢湾湾奥部における高潮浸水解析に関して発表された．

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 3 セッションでは，波・流れの解析モデルに関して議論された．すなわち，渦層モデルを用いた自由境界流れの解析と，磯部－柿沼モデルの数学解析に関する，2 件の口頭発表及び質疑応答が行なわれた．

更に，第 4 セッションでは，波動モデルの新展開に関して 2 件の口頭発表及び質疑応答があった．すなわち，KdV-Burgers 方程式の格子ボルツマン法による数値計算（第 2 報: 新しい定式化と計算結果）と，多層波動方程式の固有関数系グリーン関数の多段ステップ散乱問題への適用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・海岸等における波動の解析モデルの比較」

日　　時　2018 年 12 月 15 日（土）14:00～16 日（日）12:50
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　波動モデル研究会

2018 年 12 月 15 日（土）

開会の挨拶（14:00～14:10）

柿沼太郎（土木学会海岸工学委員会波動モデル研究会主査）

第 1 セッション －津波の数値解析－（座長：辻）

「全球津波伝播解析 Python モジュールの構築」（14:10～14:40）

新谷哲也（首都大学東京・都市環境学部）

沿岸の小領域から全球に至るまでのスケーラブルな津波伝播解析を目的として，重心ボロノイ図と TRiSK スキームに基づく非線形長波シミュレーターを開発した．シミュレーターは Python によって制御可能であり，既存の解析解との整合性の確認，及び津波伝播解析のテスト計算の実施を行うことができた．

「分裂を示す河川津波の数値解析」（14:40～15:10）

柿沼太郎（鹿児島大学学術研究院・理工学域）

河川を遡上する津波が有する基礎的な特性を把握することを目的として，3 次元数値解析を行なった．河川幅及び静水深が一定の単断面河川においても，ソリトン分裂の発生に伴い，津波の伝播につれて津波高さが増加する場合があった．また，複断面河川において，位相速度に河川横断方向の成分を有する津波を確認した．

休憩

第 2 セッション －沿岸域における流体運動の数値解析－（座長：新谷）

「没水堤周辺での不規則波の波高及び周期の変化とその再現計算」（15:20～15:50）

平山克也（港湾空港技術研究所・海洋研究領域）

暫定利用する港湾の安全性や更なる被災リスクを評価するために，被災し水没した防波堤に残存する防波性能を把握する断面模型実験及びブシネスクモデルによる再現計算を実施した．その結果，成分波間の非線形干渉により不規則波が短周期化する条件を見出し，不透過潜堤は，特にうねりによる荷役障害が懸念される離島港湾では新たな静穏度対策となり得ること等を示した．一方，透過潜堤では波の分裂に比べ抵抗による減衰が卓越した．

「超巨大台風による伊勢湾湾奥部における高潮浸水解析」（15:50～16:20）

川崎浩司（ハイドロ総合技術研究所）

昨今，地球温暖化に伴う海面上昇と台風の強大化が懸念されている．したがって，1959 年の伊勢湾台風を上回る巨大台風が及ぼす影響について検討することは重要である．本研究では，伊勢湾湾奥部を対象に，室戸台風級の超巨大台風時，および現在／将来気候から予想される最大高潮条件における高潮浸水計算を行い，超巨大台風による浸水特性について議論した．

懇親会

2018 年 12 月 16 日（日）

第 3 セッション －波・流れの解析モデル－（座長：金山）

「渦層モデルを用いた自由境界流れの解析」（10:00～10:30）

松岡千博（大阪市立大学大学院・工学研究科）

界面と水上あるいは水中にあるバルク渦との相互作用が渦層モデルと点渦近似を用いて計算された．その結果，バルク渦はその渦度が小さくても，界面に大きな影響を与え，安定な界面を大変形させてケルビン・ヘルムホルツのような不安定性を引き起こすことが確かめられた．

「磯部－柿沼モデルの数学解析」（10:30～11:00）

井口達雄（慶應義塾大学・理工学部）

水の波の基礎方程式系に対する変分構造を利用して導出される磯部 - 柿沼モデルについて数学解析を行い，波高水深比の小ささを仮定しない強非線形波に対しても成立する高次浅水波近似モデルになっていること，更に，これまでに知られている高次浅水波モデルよりも多くの点で優位なモデルであることを報告した．

休憩

第 4 セッション －波動モデルの新展開－（座長：松岡）

「KdV-Burgers 方程式の格子ボルツマン法による数値計算（第 2 報: 新しい定式化と計算結果）」（11:10～11:40）

辻　英一（九州大学・応用力学研究所）

非線形分散波動方程式である KdV-Burgers 方程式に関して，格子ボルツマン法を用いた，ある数値計算法を提案する．Burgers 方程式を解くのに有効であった Entropic LBM を用いて近似的に定式化し，先行研究と比較する．

「多層波動方程式の固有関数系グリーン関数の多段ステップ散乱問題への適用」(11:40～12:10)

金山　進（日本大学・工学部）

多層波動方程式の線形分散関係式から導かれる固有関数系を用いて離散化を伴うことなく波動流速場の解析を行うことができる．昨年度はグリーン関数の概念を導入することによって解析の際に扱われる代数方程式を系統的，効率的に解く手法を示したが，本研究においては境界が領域の両端に置いて与えられる場合にも拡張し，複数領域を対象とした境界値問題，すなわち多段地形における散乱問題への適用方法を紹介した．

総括及び今後の活動・展望等に関する議論（12:10～12:40）

柿沼太郎

閉会挨拶（12:40～12:50）

辻　英一（九州大学応用力学研究所共同利用研究集会世話人）

「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

富山高等専門学校商船学科　福留研一

2018 年 12 月 13 日から 12 月 14 日にかけて，九州大学筑紫キャンパスにおいて，応用力学研究所共同利用研究集会「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．本研究集会は，1998 年度の「対馬・津軽海峡の海況モニタリングと日本海の波浪計測に関する研究集会」に始まり，3 回の研究集会名の変更を経て，2009 年度よりは「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」として開催されてきた．21 回目を迎えた今年度は，より対象海域を広げる意図でタイトルを「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」と変更し，日本周辺海域に関する最新の海況モニタリングと波浪計測結果はもちろん，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広く募集した．

今年度の研究集会には，大学および試験・研究・開発機関を中心に，現場観測に携わっている多くの方々にも継続してご参加頂いて，40 名の参加者と 13 題の講演があった．対象とする海域を広げたことで，講演では日本周辺海域を対象とした高解像度の気候変動予測データセット作成の取り組みや波浪再解析データの検証，日本沿岸の太平洋側における波浪モニタリングとモデリング，沖合津波の流れの計測と即時予測といった海域を日本海に限らない最新の成果が報告された．加えてグライダーやロボットといった新しい手法を用いたモニタリングと海況予測への取り組み，新しい海況計測機器を用いた旧計測機器データの検証，水産資源や生物環境への影響を理解・予測して情報提供することまで視野に入れた海況モニタリングの報告もあった．さらには，本研究集会の開催のきっかけともなった対馬海峡の海況モニタリングに関する再解析結果や，東シナ海における長期の水塊構造の変動，海象と気象の相互作用についても成果が報告されるなど，幅広い海域における様々な角度からの現場観測，力学研究，数値シミュレーションに関する研究発表と活発な議論が行われた．今後とも，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となり、活発な議論と情報交換の場と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して頂いた広瀬直毅教授をはじめとする諸氏に感謝する．

「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」
日程: 平成 30 年 12 月 13 日（木）午後～14 日（金）午前
*13 日の夜、懇親会を行います

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
(http://www.kyushu-u.ac.jp/access/map/chikushi/chikushi.html)

研究代表者: 福留研一(富山高専)
所内世話人: 広瀬直毅(九大応力研)

-----12 月 13 日（木）-----
13:50-14:00　趣旨説明

14:00-14:25
日本周辺海域の気候変動に関する将来予測
西川史朗・石川洋一(JAMSTEC)、若松剛(NERSC)

14:25-14:50
日本周辺海域の漂流波浪ブイデータによる再解析データの検証
久木幸治（琉球大理）

14:50-15:15
岩手県大槌湾の波浪モニタリングとモデリング
藤井孝樹・小松幸生（東大院新領域/大気海洋研）、田中 潔（大気海洋研）

15:15-15:40
船舶の航行（AIS）データによる沖合津波の流れの計測と即時予測への利用
稲津大祐（東京海洋大）

15:40-15:55　休憩

15:55-16:20
水産研究・教育機構における海洋モニタリングと海況予測への水中グライダー利用の取り組み
清水勇吾（水研機構中央水研）、奥西 武・筧 茂穂・長谷川大介（水研機構東北水研）、和川 拓・井桁庸介・本多直人・久賀みづき（水研機構日水研）、瀬藤 聡・赤松友成（水研機構中央水研）、黒田 寛（水研機構北水研）、伊藤進一（大気海洋研）

16:20-16:45
四胴ロボット船による七尾西湾の観測
原田浩太朗（石川水総セ）

16:45-17:10
ローター式流速計と超音波ドップラー流速計の比較実験
千手智晴（九大応力研）

17:10-17:30　情報交換

-----12 月 14 日（金）-----
09:00-09:25
宮崎県の沿岸資源変動における豊後水道の重要性
渡慶次 力・中西健二・外山寛隆（宮崎水試）

09:25-09:50
九州西方沿岸域における気象津波の発生・増幅機構

福澤克俊・日比谷紀之(東大院理)

09:50-10:15
初夏の黒潮上における深い対流発生時の環境場
万田敦昌（三重大学生物資源科学部）

10:15-10:25　休憩

10:25-10:50
対馬海峡水温の日周変動に対する大気応答
趙 寧・劉 天然・広瀬直毅（九大応力研）、岩崎慎介（寒地土木研）

10:50-11:15
対馬海峡通過流量の再推定
内海勇哉（九大総理工）、髙山勝巳・広瀬直毅（九大応力研）

11:15-11:40
気象庁東シナ海 PN 線にみられる長期変化・十年規模変動　～長期再解析データの整備～
小嶋 惇・村上 潔・中野俊也（気象庁 地球環境・海洋部）

11:40-12:10　総合討論