

リモートセンシングによる海面高度計測

市川, 香
九州大学応用力学研究所

<https://hdl.handle.net/2324/7339189>

出版情報 : La mer. 62 (1-2), pp.13-22, 2024-11-12. Japanese-French Oceanographic Society
バージョン :
権利関係 :



2023 年度日仏海洋学会賞

リモートセンシングによる海面高度計測

市 川 香

Sea Surface Height Measurements by Remote Sensing Techniques

Kaoru ICHIKAWA

1. はじめに

海洋は、様々な時空間スケールで常に変化している。波浪や潮汐が規則性のある周期的な変化をしているのは陸から見ても分かるし、津波や高潮などは間欠的だが顕著な災害として認識される。海で泳げば、水温や塩分などの海水自身の性質に、昼と夜の日内変動と、夏と冬の季節変化が混在していることを感じるだろう。さらに、海に出る機会が多い釣人なら、良漁場が常に同じ場所に出現するわけではなく、場所も時期も変化することを経験的に知っている。このように我々人類は、太古よりさまざまな海洋の変化を経験し、「海洋観測」という概念が発生する以前から、定性的ながら海の変化を認識してきたと思われる。やがて、それらを定量的に記録し、いろいろな時間や空間のスケールの現象が混在していることを理解し、それらを分離し、各々の原因を探り、未来の予測をすることで、海洋学は発展していったと言えるだろう。

なかでも、海に入らずに陸から直接認識できる「海面の高さ」の変化は、陸に住む人類にとって最も明確に把握されてきた現象ではないだろうか。潮の満ち引きや波の高さなどは、陸に住む人間でもかなり定量的に把握することができる。より正確に計測するには、例えば金属製のワイヤーで海面の高さを電気信号として計測するワイヤー式水位計(図1)などを岸壁に設置して、時間とともに海面の高さがどう変化するかを詳細に記録することが可能である。こういった水位計は、波浪や潮位の計測に多く利用されており、上述のワイヤー式の他にも、海底設置の圧力式、上部に固定したセンサーから海面までの距離を計測する超音波式やマイクロ波式、海面に浮かべたフロートまでの距離を紐やレーザーなどで計測するフロート式など、様々なタイプが存在している。

ところが、岸から離れて沖に出ると、この状況は反転する。すなわち、「陸に住む人間にとって定量的に把握しやすかった海面の高さ」は、沖では固定した参照基準がなくなってしまうために、計測が非常に難しくなってしまう。岸壁という動かない基準があつてこそ水位計による定量的な計測が可能となっていたが、自分自身が海面とともに変位してしまう船舶からだ、水位計を使って海面の高さを正確に計測することができなくなる。

九州大学応用力学研究所 〒816-8580 福岡県春日市春日公園6-1

Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, 6-1 Kasuga Kouen, Kasuga, Fukuoka, 816-8580, JAPAN.



Fig. 1 ワイヤー式水位計（可搬式）。

もちろん、海底に固定された観測塔（図 2）などを用いれば、海岸から離れた場所でも岸壁と同様に水位の計測は可能である。ただし、水深が深い沖合に観測塔を設置するには建設にも資材運搬にも設備運用にも膨大な費用が必要となるため、観測塔の計測が可能なのは、ごく限られた場所と台数に限定されてしまうことになる。

しかし、こうした状況は、1970 年代後半以降の衛星リモートセンシング技術の発展によって打開されていく（市川，2014）。1978 年に打ち上げられた SEASAT 衛星海面高度計は、わずか 3 ヶ月と短命な衛星だったものの、外洋域であっても人工衛星を使うことで海面の高度を計測することが可能であることを示した（例えば ICHIKAWA and IMAWAKI, 1992）。その後も、衛星海面高度計を搭載した Geosat 衛星や ERS-1 衛星が打ち上げられ



Fig. 2 京都大学防災研究所の観測タワー。田辺湾口の沖合 2km 地点（水深 10m）に固定された塔で、海面に向けて超音波式の水位計測をしている（白浜海象観測所のホームページより）。

たことで、外洋での海面高度の測定精度は向上していき（例えば ICHIKAWA and IMAWAKI, 1996）、1992 年の TOPEX/Poseidon 衛星の打ち上げ以降現在に至るまで、35 年間以上の長期間にわたって高精度の海面高度計測が持続されるようになった（例えば，FU and CAZENAVE, 2001）。

一方、洋上には参照基準がないという本質的な問題点も、測位システムの大幅な改善によって解決されようとしている。軍事目的で打ち上げられたアメリカの GPS（Global Positioning System）測位衛星は、1990 年代になると民生利用できるようになり、さらに 2010 年代以降には米国以外のロシアや中国などの測位衛星と併せて GNSS（Global Navigation Satellite System）と呼ばれる衛星測位システムとして利用できるようになった（例えば，GLEASON and GEBRE-EGZABHER, 2009）。

GNSSを使うと、任意の時刻に任意の場所の測位座標値を求めることができるため、たとえ沖合の海上であっても、陸上と同様に参照座標系を使うことができる（例えば ICHIKAWA *et al.*, 2019）。

衛星海面高度計と GNSS という、衛星リモートセンシング技術を活用したシステムの発展によって、現在の我々は、観測塔がない沖合でも海面高度を高精度に計測できるようになっている。本稿では、まず海面高度がどのような要因で変化するのかを 2 節で説明した後に、リモートセンシングによる海面高度測定の手法について 3 節で解説し、今後の展望とまとめを、各々 4・5 節で述べる。

2. 海面高度の変動要因

流体である海水は、外力を受ければ容易に変形する（例えば、DEPT. EARTH SYS. SC. AND TECH., 2017）。上から押されれば（気圧が高ければ）水位は下がり、上に引かれれば（天体からの起潮力がかかれば）水位は上がる。さらに、海面が横方向に引きずられれば（風が吹けば）、粘性によって海面近くの薄い層（粘性境界層）内に流れが生じて海水が移動し、この流れが空間的に一様でなく周辺から水が集まれば（収束）水位は高くなり、逆に周辺に水が抜ければ（発散）水位は低くなる。例えば、粘性境界層内に岸壁に向かう流れがあったとして、流れは壁を貫通できないためにせき止められ、結果として岸壁で水位が高くなる。発達した低気圧が通過する際に高潮が発生する場合、気圧低下による水位上昇と、風による吹き寄せで生じる水位上昇の両方が効くことがある。

ただし、地球のように回転している系ではコリオリの力が働くため、これが効いてくると、外力と流れと水位変化の関係はもう少し複雑になる。波浪や津波のように短い時間スケールの現象だと地球回転の効果はほとんど無視できるが、ある程度長い時間（中緯度だと数日くらい）継続するような流れの場合には地球回転の効果が効くので、流れに対して直交方向に、流速に比例した大きさのコリオリ力が働く。例えば、突風が吹きはじめた際は風応力によって粘性境界層の海水は風下方向に流されるが、風が長時間吹き続ける場合は、

風で生じた境界層内の流れ（吹送流）もコリオリの効果を受ける。風によって海面に伝えられた応力は、境界層の内部を粘性で下方に減衰しながら伝わるため、吹送流は深さとともに流速と流向が変わる（例えば YOSHIKAWA and MASUDA, 2009）。結果として粘性境界層全体では、風の方向ではなく、風向の直交右向きに（南半球だと左向きに）海水が移動（エクマン輸送）することになる。このため、例えば日本周辺の東向きの風なら南側に境界層内の海水が輸送されるし、西向きの風なら北側に輸送されることになる。父島など太平洋の中央部の海域を考えると、その北側に東向きの偏西風が吹き、南側に西向きの貿易風が吹いているので、海水は南からも北からも北太平洋中央部に向かって輸送されてくるために、結果として境界層内に水が集まり、水位が高くなることがわかる。

こうして北太平洋の中央部の海面が高くなれば、周辺に対して海面高度の勾配が生じる。海面高度の勾配（つまり圧力傾度）は、地衡流平衡した流れ（地衡流）に働くコリオリ力とバランスするので、北太平洋中央部の海面高度が高い方を常に右に見るような時計回りの地衡流の循環（亜熱帯循環）が生じていることになる。海面高度の勾配は、圧力傾度力とコリオリ力がバランスした定常状態になっているため、その形状のまま長時間維持される。つまり、地衡流平衡していて時間的に変化しにくい海面高度（海面力学高度）の分布を計測すれば、その勾配から地衡流を求めることができる。

海流の計測には流速計や漂流ブイの軌跡が用いられるが、これらの方法は測器の場所のみの特定の時刻の流速しか計測できないため、広域にわたって海流を計測するのが難しい。外洋の海面力学高度の計測が必要とされる最も大きな理由の一つは、海面力学高度分布から広域の海流の計測が可能になるからである。

ところで、上記のような外力による変形とは別に、海水自体の熱膨張によっても海水位は変化する。質量が同じ海水を考えると、水温が高くて（または塩分が低くて）密度が低いほど、大きな体積が必要になる。「単位底面積あたりの質量」が

圧力で、「単位底面積あたりの体積」が高さになるので、これは「圧力が同じなら密度が低いほど海面高度が高い」と言い換えることもできる。さらにこれを2地点間の比較として記述すると、「海面からある水深（水圧）までの水温が高い（または塩分が低い）場所ほど、海面高度が高くなる」と言い換えることもできる。

海面近くの季節躍層くらの浅い深度に限定すると、上記の熱膨張の話は「海面水温が高いほど海水位が高い」ことになる。これが、いわゆる「地球温暖化による海面水位上昇」の一因である。ちなみに、温暖化による水位上昇にはもう一つ別の要因として、極域や高地の氷が解けて、固体の淡水が液体として海に供給されるために海水の質量が増加するという効果もある。この二つの要因の区別は、海水の質量が増えたか否かで区別することが可能である。つまり、地球の重力分布を計測する米独の衛星 GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) ミッションなどによって、地球上の質量分布の時間変化を計測できるので、水として特定の場所に集中していた淡水の質量が融解して海洋に広がったかどうかを調べることができる。最近の研究結果によると、地球温暖化による水位上昇のうち、熱膨張の効果は4割で水の融解の効果が6割程度だと考えられている（例えば THOMPSON *et al.*, 2019）。

多くの海洋では季節躍層の下に主温度躍層があり、そこを境に下層の冷水と上層の暖水という大まかな二層構造をしている。上述のような浅い季節躍層付近ではなく、主温度躍層よりも深部に参照水深を設定した場合、海面高度に反映される海水温の変動は、もっぱら主温度躍層深度の上下に支配される。つまり、主温度躍層が海面方向に上昇すると上層の暖水が薄くなり下層の冷水が厚くなるために、全体としては冷水の効果が反映されて海面水位は低くなる。逆に主温度躍層が深くなれば、上層の暖水が厚くなる効果によって海面高度は上昇する。

厚さ10メートル程度の粘性境界層の厚さの変化が吹送流の収束・発散で生じているのと同様に、主温度躍層の深度変化は、数百メートルの厚さの

上層の流れの収束・発散によって主に生じる。ただし吹送流が非地衡流なのに対して上層の海流はほぼ地衡流（準地衡流）なので、そもそも収束・発散は生じにくい。準地衡流の収束・発散は、流れに絶対渦度（流れ自身の相対渦度と、惑星渦度の和）があるときに生じる。

相対渦度の効果によって、低気圧性の渦では躍層が上昇して上層が薄くなり海面高度が低下し、高気圧性の渦では躍層が下降して上層が厚くなり海面高度が上昇する。ちなみに、惑星渦度の効果（ β 効果）では、北上流がある場所では水位が上がり、南下流のある場所で水位が下がる傾向があるので、北半球の低気圧性渦は西側に南下流があるので海面高度が低下して、東側では北上流のために海面高度は上昇する。逆に高気圧性渦では西側の海面高度は上昇して東側の海面高度が下降するので、高低どちらの渦でも時間とともに中心の位置が西に伝搬していく性質（ロスビー波）を示す（図3）。実際に外洋の海面高度を計測してみると、非常に多くの渦が存在していて、それらの多くが西に進む性質があることが分かる（例えば AOKI *et al.*, 1995; CHELTON *et al.*, 2007）。この渦の位相速度が分かると、時間が経過すると海面高度（および準地衡流）がどのような変化をするのか予測できるので、将来予測に非常に有効である。データ同化手法など数値モデルとの組み合わせにおいて、海面力学高度の入力データが特に有益なのは、この性質が理由である。

3. リモートセンシングによる海面高度計測

リモートセンシングで海面高度を計測する場合でも、図1や図2のような水位計を用いる場合と、計測要素自体はあまり変わらない。すなわち、位置が既知のセンサーから海面までの鉛直距離を計測することで、海面の鉛直位置（高さ）に変換している。岸壁や海底に固定した水位計の場合、センサーの位置が時間変化しないと見なすことで、海面までの距離の計測から容易に海面高度への変換が可能であった。

船舶にセンサーを搭載する場合、海面の変位によってセンサーの位置が変動してしまうため、前

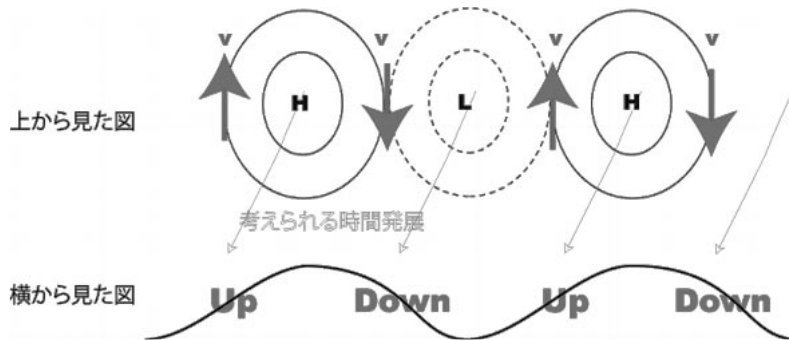


Fig. 3 北半球のロスビー波の伝搬の概略図。高気圧性渦 (H) と低気圧性渦 (L) の周辺に、矢印の向きに準地衡流が流れる。惑星渦度により、北上 (南下) 流では水位が上昇 (下降) するため、時間とともに渦は西側に移動していく。

述の「センサーの位置が既知」という前提が崩れてしまう。例えば、船舶が海面変動に完全に同期する場合、センサーから海面までの距離は一定のままになり、センサーによる水位計測自体の意味がなくなってくる。

一方、人工衛星にセンサーを搭載する場合には、衛星の高さは海面の運動と連動せず独立に求めることができるので、衛星から海面までの距離測定をすることで海面高度を計測することができる。衛星海面高度計の場合、陸上固定局からのレーザー測距や衛星の位置を計測する仏国の DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite) システムに基づく衛星軌道計算によって、精密に衛星軌道高度を求めている。衛星の高度は 800~1000 km ほど上空だが、軌道高度は 0.01 m 程度の精度で決定することができる。ただし、衛星海面高度計の黎明期の 1980 年代までは軌道決定誤差が 0.5~1 m 程度あったため、別途処理が必要であった (例えば ICHIKAWA and IMAWAKI, 1992)。現在のように高精度な軌道決定が可能になったのは、軌道計算に必要な地球の重力場の知見が大幅に向上したことと、安定した軌道になるように軌道を高めに設定しているためである。

センサーから海面までの距離は、マイクロ波のパルスを衛星直下に射出し、海面からの反射波が

衛星に到達するまでの往復時間を計測することで求めている。正確な鉛直距離を求めるために計測を衛星の直下点に限定しているので、衛星軌道に沿う線状にしか観測点が分布せず、観測できない欠測域が周囲に 75~300 km ほど空いてしまうし、同じ場所を観測できるのが 10~35 日後と間隔が長くなってしまう。複数の衛星のデータを組み合わせることで欠測は減らすことができるものの、高々数台の衛星海面高度計群の観測は時空間に密だとは言い難い。このため、2 節で述べた海面高度の変動要因のうち、時間変化が大きい非地衡流成分については、現象の一部のみを間欠的にしか観測できないことになる。例えば半日周期の潮汐成分である M_2 分潮は、約 10 日に一度の Jason 衛星の観測だと次に観測するのは 19.17 周期経過した状態の潮汐なので、位相が飛び飛びになって、エイリアシングされて約 60 日周期の信号に見えてしまう。このため、潮汐信号を抽出するには、長期間のデータを使った特別な処理が必要になる (YANAGI *et al.*, 1997)。

ところで、衛星海面高度計が計測するのは、マイクロ波パルスが上空から照射する半径 10 km 程度の海域 (フットプリント) の平均水位である。実際の海面には波浪が存在しているので、フットプリント内のマイクロ波の反射を細かく見ると、衛星に最も近い波頂部分での反射が最初に起き

て、最後に衛星から最も遠い波底部分で反射される。つまり、衛星がマイクロ波の反射波を受信し初めてから終わるまでの時間差が、波頂と波底の高度差すなわち波高を示すので、衛星海面高度計は海面高度のみならず波高も計測している。外洋の波高を直接計測することができる測器は少ないため、こうした観測は大変貴重である。ただし、個別の波浪を対象とするには衛星海面高度計観測の時空間分解能は粗すぎるため、波浪統計の解析や波浪モデルの検証に主に利用されている（例えば、ICHIKAWA *et al.*, 2020）。

なお、衛星からの計測時にはフットプリント内のマイクロ波の反射強度が空間一様であることが仮定されている。そもそも衛星海面高度計は、1節で述べたように岸壁付近に限定されていた海面水位計測を外洋でも行うために開発されていたので、マイクロ波の反射強度を決める海況が数十kmにわたって一様であるという仮定は無理なものではない。ただ、多くの船舶や地形や構造物が狭い範囲内に混在する縁辺海などの沿岸域ではこの仮定は現実的ではないため、「衛星海面高度計は外洋に限定して使用するもの」と認識されてきた。しかし、海運・漁業・マリンレジャーなどの分野からは、岸から比較的近い沿岸域でこそ海面高度計データを利用したいという要望が高まるようになる。やがて2010年代ころから欧州を中心にフットプリントのサイズを解析手法で小さくする処理法（リトラッキング）が開発されるようになって、衛星海面高度計の利用は外洋のみでなく沿岸域にまで拡大されるようになった。

こうした沿岸海面高度計のデータを調べると、岸壁の水位計で計測されてきた水位変動と、少し沖合の沿岸域の海面高度変動とが異なる変動をすることがあることも分かってきた。例えば、太平洋とインド洋の間にあるインドネシアのマカッサル海峡周辺の島の潮位計データからは、インド洋と太平洋の季節変動が逆位相で、太平洋が相対的に高い時期はマカッサル海峡を南下するインドネシア通過流が強くなり、逆にインド洋が相対的に高くなると南下流が弱く北上流成分が強化されることが分かっている。これらの関係からは、地球

回転の効果がほぼ効かない赤道周辺において、大洋間をつなぐ海峡内の流れが両端の圧力差によって決められていることが想像される。

ところが、沿岸海面高度計のデータを使って海峡内の水位分布の季節変動成分を調べてみると、この想像が間違っていることがわかった（ICHIKAWA, 2023）。図4は、マカッサル海峡内の点（5° S, 117° E）と周辺海域の海面高度の季節変動成分の相関の分布を示したもののだが、インド洋のジャワ島南部に強い正相関、太平洋のミンダナオ島東部に有意な負相関があることが分かり、大洋間の季節変動が逆相関なことが確認できる。しかし、太平洋とマカッサル海峡の間のセルベス海全域や、インド洋とマカッサル海峡の間のジャワ海・フロレス海の南部には相関がないので、マカッサル海峡内と太平洋・インド洋の水位変動は、位相が揃っているが空間的には連続していないことが示唆される。マカッサル海峡内部では、50 m以深の幅が狭くなる3° S付近を挟んで南北間の海面高度の傾斜が大きくなっていて、力学的なバランスを計算すると、この部分の圧力差が海峡内の流速の底摩擦と定量的にバランスしていることが判明した。空間スケールが大きなモンスーンは図4で示した海域全体に吹くので、いろいろな島や浅海域でこの風の吹き寄せ効果が生じ、それぞれは独立した水位変化ではあるが、すべて季節風に起因するために変動の位相が揃う。このように、島の潮位計データだけで想像していた変動の様相と異なる状況が、沿岸海面高度計のデータが利用できることで認識できるようになる。

ところで、船舶などの洋上での水位計測における問題点は「センサーの位置が既知」という条件が満たせないことだと本節の冒頭で説明した。しかし、1節で述べたように、近年GNSS測位の精度が向上しており、海面とともに変動するセンサーの位置そのものを計測できるようになり、この問題を回避できるようになってきた。つまり、衛星海面高度計の軌道高度を計算で求めてきたのと同様に、GNSSを用いてセンサーのプラットフォームの位置を正確に求めることができれば、衛星以外でも海面高度の計測が可能である。

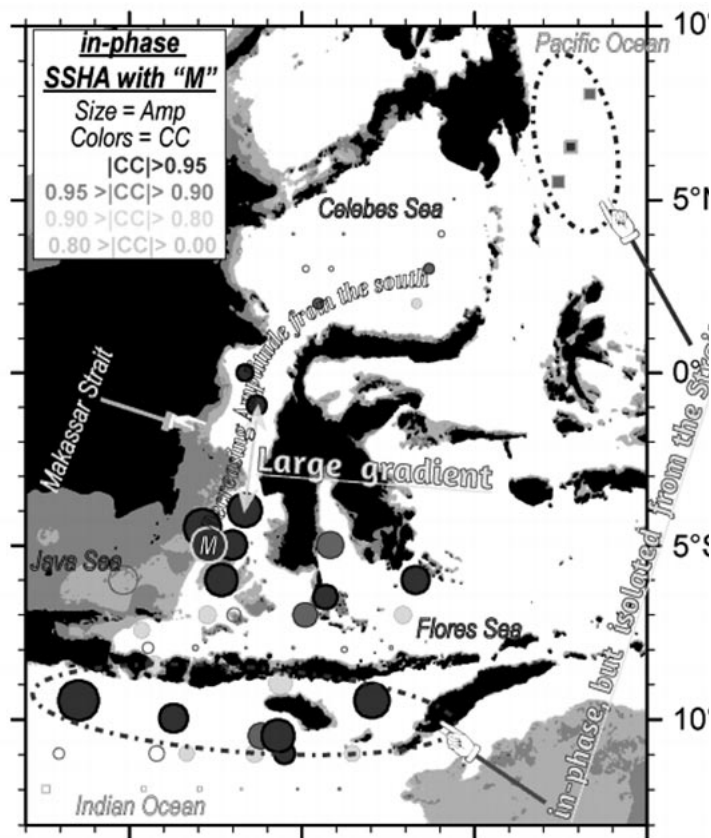


Fig. 4 海面高度の季節変動成分の、マカッサル海峡内の M 点 (5° S, 117° E) と周辺海域との相関分布 (濃淡)。円は正相関で四角が負相関を示し、記号の大きさは同期した季節変動の振幅を示す。影部分 は、水深 50 m と 300m の海域 (ICHIKAWA, 2023)。

近年の GNSS の測定が向上したのは、複数の国のシステムが開放されて測位に利用できる衛星の個数が飛躍的に増加したことと、参照できる地上固定局のデータも全世界に多数設置されたことで、各 GNSS 衛星の時計の誤差などを精度よく推定できるようになったためである。現在は、PPP (Precise Point Positioning) と呼ばれる手法によって、単独の受信機だけからでも、多くの地上固定局のデータを参照しながら最適解を解くことで精度の良い測位ができるようになっている。例えば、図 5 のように海面の水位変動に同期する小型のブイの高度を GNSS で測位すれば、海面高度の変化そのものを計測することができるようにな



Fig. 5 GNSS 受信機を内包した小型ブイを海面に降ろすところ

る（例えば、ICHIKAWA *et al.*, 2018; 2024）。

4. 今後の展望

GNSSを用いた海面高度測定は、時刻や海域の制限なく利用できるため、軌道直下に観測点が限定されるために粗くなる衛星海面高度計の時空間分解能を補うことが可能である。ただし、特定の場所の海面高度を計測するには船舶などのプラットフォームをその場所に移動させなければならないので、人工衛星のような繰り返し観測を広域で行うことは、現実的には難しい。もっとも、特定の航路を繰り返し航海するフェリーなどでGNSS観測を利用すれば、細かい時間分解能で繰り返し海面高度を計測することができる。しかも、実質的にGNSS受信装置を設置するだけで実装できるため、装置の取付と運用のコストがほとんど発生しないという利点も重要である。

なお、衛星海面高度計の時空間分解能は、2023年を境に革新的に向上した。これは、米国のNASA（National Aeronautics and Space Administration）が主体となって進めたSWOT（Surface Water and Ocean Topography）ミッションが開始されたためである（JPL, 2024）。このミッションでは、従来の衛星直下の観測点に加え、その両脇に約60 km ずつの幅をもった帯状の海面高度計測が2 km 格子間隔で行われるため、従来型の海面高度計を60台ほど並走させたような効果がある。従来型の衛星海面高度計では、例えば渦が移動して隣接する軌道の間に入ると欠測になってしまうという問題点があったが、面的な観測ができるSWOTミッションなら、この渦の形状の変化を含めて連続的に移動を追跡することができる。今後、衛星海面高度計を用いた研究はさらに発展していくと考えられる。

5. まとめ

海面の高さは、外力による変形や熱膨張など、様々な要因で変動している。一方、岸壁や観測塔などの固定されたプラットフォーム以外から海面の高さを計測しようとする、プラットフォーム自身の変位の計測も必要になるため、洋上に参照

基準を持たない人類にとっては難しかった。しかし、リモートセンシングの技術を用いることで、人工衛星を用いた沖合海域の海面水位の繰り返し計測や、船舶を利用した海面水位計測までが可能になってきた。

海面高度を変動させる要因は複数あるため、それらに応答する海面高度変動の時間・空間スケールも様々であり、最新のSWOT ミッションを用いたとしても、じゅうぶんに捕捉できない現象も含まれている。今後、船舶GNSSによる補完的な観測や、データ同化手法による数値計算などを併用しつつ、複雑に絡み合った多重スケールの現象の解析が期待される。

謝辞

基本的に私は活動拠点を西日本としていますので、東京で行われる日仏海洋学会には、実は最近まで一度も出席したことがありませんでした。現在は比較的参加するようにしているのですが、それもコロナ禍によってリモート会議が普及したためですので、出欠不精なところはあまり変わっていないようです。不熱心な会員で、誠に申し訳ありません。

こんな私が栄えある日仏海洋学会賞を頂けるようになったのも、これまで京都大学・英国の北ウェールズ大学・愛媛大学・九州大学でお世話になった先生・先輩の皆さんのご指導ご鞭撻のおかげであり、同僚・後輩・学生の皆さんのご協力の賜物だと感謝しております。特に今脇資郎先生には、京都大学の学部学生の頃から衛星海面高度計のデータ処理の基礎から教えていただき、九州大に移ってから中規模渦や黒潮などのテーマをご一緒に研究させていただきました。学部学生当時は、まさか35年経過しても似たような衛星海面高度計の研究をしているとは思っていませんでしたが、それだけ奥の深いテーマを授けてくださったということだと思います。故 柳哲雄先生とは愛媛大と九州大で一緒にさせていただき、特に沿岸域での衛星利用に関しての着想を頂きました。世界的にここ10~15年で沿岸衛星海面高度計のニーズが高まってきたのですが、それよりも

10 年も前から先駆けて沿岸衛星高度計の研究を始めているところに、柳先生の先見の明を感じます。北ウェールズ大学では、John Mathews 先生に多様なリモートセンシングの手法を教えてくださいました。宇宙機関が提供する衛星高度計プロダクトのエンドユーザーから発展していった、船舶での GNSS 観測や高度計データのリトラッキング解析手法の開発など研究を展開・高度化させていくにつれて、マイクロ波の電波工学的な知識が必要となってきたのですが、英国の修士課程での学習成果を活用することができました。ここに記して御礼申し上げます。そして最後になりましたが、惜しめない献身的な協力で支えてくれた家族に心よりの感謝を申し上げます。

なお、研究の一部は科研費 (21K19848, 22H01301) により行われています。

引用文献

- AOKI, S., S. IMAWAKI and K. ICHIKAWA (1995): Baroclinic disturbances propagating westward in the Kuroshio Extension region as seen by a satellite altimeter and radiometers, *J. Geophys. Res.*, 100 (C1), 839–855.
- CHELTON D.B., M.G SCHLAX, R.M. Samelson and R.A. de Szoeke (2007): Global observations of large oceanic eddies, *Geophys. Res. Lett.*, 34 (15), doi:10.1029/2007GL030812.
- DEPT. EARTH SYS. SC. TECH., INTERDISCIP. GRAD. SCH. ENGIN. SCI., KYUSHU UNIV., eds, (2017): *Fluid Dynamics for Global Environmental Studies*, Springer, 368 pp., ISBN 978-4-431-56497-3.
- FU, L. L. and A. CAZENAVE, eds, (2001): *Satellite Altimetry and Earth Sciences, A Handbook of Techniques and Applications*, Academic Press, International Geophysics Vol. 69, 463p.p., ISBN: 978-0-12-269545-2.
- GLEASON S. and D. GEBRE-EGZIABHER, eds, (2009): *GNSS, Applications and methods*, Artech House, 508p.p., ISBN 978-1-59693-329-3.
- 市川 香 (2014): 21 世紀初頭の衛星海面高度計, *海の研究*, 23 (1), 13–27.
- ICHIKAWA, K. (2023): Mean Seasonal Sea Surface Height Variations in and around the Makassar Strait, *Rem. Sens.*, 15 (17), 4324, doi:10.3390/rs15174324.
- ICHIKAWA, K. and S. IMAWAKI (1992): Fluctuation of the sea surface dynamic topography southeast of Japan as estimated from Seasat altimetry data, *J. Oceanogr.*, 48 (2), 155–177.
- ICHIKAWA K. and S. IMAWAKI (1996): Estimating Sea surface dynamic topography from Geosat altimetry data, *J. Oceanogr.*, 52 (1), 43–68.
- ICHIKAWA, K., Y. YOSHIKAWA, A. MORIMOTO, K. FUKUDOME and J.H. YOON (2018): Complementary Remote Sensing Observations of the Tsushima Warm Current Patterns, in “*Remote Sensing of the Asian Seas*” (BARALE V. and M. GADE, eds), Springer, 191–204, ISBN 978-3-319-94067-0, doi:10.1007/978-3-319-94067-0_10.
- ICHIKAWA K., EBINUMA, T., KONDA, M. and YUFU K. (2019): Low-Cost GNSS-R Altimetry on a UAV for Water-Level measurements at Arbitrary Times and Locations, *Sensors*, 19, 998; doi:10.3390/s19050998.
- ICHIKAWA, K., X.F. WANG and H. TAMURA (2020): Capability of Jason-2 subwaveform retracers for significant wave height in the calm semi-enclosed Celebes Sea, *Remote Sensing*, 12, 3367, doi:10.3390/rs12203367.
- ICHIKAWA, K., J.Q. ZHU, J. NODA, R. SAKEMI, K. YUFU and K. MATSUURA (2024): Ship-borne wave gauge using GNSS interferometric reflectometry, *Coastal Engin. J.*, 66 (2), 395–404, doi: 10.1080/21664250.2024.2342596.
- Jet Propulsion Laboratory (2024): *SWOT Science Data Products User Handbook*, JPL D-109532, 202pp.
- 京都大学防災研究所白浜海象観測所ホームページ (2024): <https://rcfcd.dpri.kyoto-u.ac.jp/frs/shirahama/tower.html>
- THOMPSON, P. R., M.J. WIDLANSKY, E. LEULIETTE, D.P. CHAMBERS, W. SWEET, B.D. HAMLINGTON, S. JEVREJEVA, M.A. MERRIFIELD, G.T. MITCHUM and R.S. NEREME (2019): Sea-level variability and change in “*State of the Climate in 2018*”, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 100 (9), S84–S87, <https://doi.org/10.1175/2019BAMSStateoftheClimate.1>
- YANAGI, T., A. MORIMOTO and K. ICHIKAWA (1997):

Co-tidal and co-range charts for the East China Sea and the Yellow Sea derived from satellite altimetry data, *J. Oceanogr.*, 53 (3), 303-309.

YOSHIKAWA, Y. and A. MASUDA (2009): Seasonal variations in the speed factor and deflection angle of the wind-driven surface flow in the Tsushima Strait, *J. Geophys. Res.*, 114, doi:10.1029/2009JC005632.