

— 総 説 —

## 21 世紀初頭の衛星海面高度計\*

市川 香†

### 要 旨

TOPEX/Poseidon と ERS-1 衛星によって、海洋研究用の衛星海面高度計の運用が本格的に開始したのは、20 世紀も終わり近くの 1992 年であった。それからわずか 10 年足らずのうちに、海面高度計は 20 世紀の海洋物理学を推進させた代表的な海洋観測測器の一つとなった。その海面高度計に、ここ数年、新しい動きが出はじめている。本稿では、これまでの海面高度計の歴史を簡単に振り返りながら、海面高度計と海洋研究の今後の展望を探る。

キーワード：衛星海面高度計、海面高度計コンステレーション、COMPIRA ミッション

### 1. はじめに

衛星海面高度計は、人工衛星の直下にマイクロ波のパルスを発射し、海面で反射した電波を受信して伝達時間を計測することで、衛星と海面間の距離を計測する測器である（今脇ら, 1989; 市川, 2002）。衛星の軌道高度を別途求めると、計測した衛星と海面間の距離を、海面の高さ（海面高度）に変換できる。さらに、地球の重力場だけで生じる海面の凹凸（仮想的な静止海面の凹凸）であるジオイド高を除き、風波や潮汐などの短周期変動成分を分離すると、海面付近の流れによって生じた海面力学高度の分布を求めることができる。残念ながら、海上ジオイドの精度は十分に高いとは言い難いが、一般にジオイドの時間変化は小さいので、少なくとも海面力学高度の時間変動成分だけは海上ジオイドの誤差の影響を受

けずに求めることができる。

海面力学高度の凹凸は海面付近の圧力分布を示すため、運動方程式の中での解釈がしやすい。特に、圧力傾度力とコリオリ力が釣り合う地衡流の関係により、海洋上層の海流情報を知るうえで、海面力学高度の傾斜は非常に有用である。ちなみに、船舶による現場観測などでは、海面力学高度とほぼ等価な量として力学的海面高度を計算してきた。ある密度  $\rho$  の層の厚さ  $dz$  と上下の圧力差  $dp$  が、重力加速度  $g$  を用いて静水圧の関係  $dp/dz = -\rho g$  として書けることから、海流が弱く圧力傾度が小さいと期待できる深部（無流面）から海面まで鉛直積分して、力学的海面高度  $\int dz = \int \frac{-dp}{\rho g}$  が求められる。つまり、海面力学高度（力学的海面高度）は、多くの場合に海洋内部の密度構造を反映しており、特に、 $\rho$  の変化が大きい主温度躍層の上下動との対応が良いことを意味している。

海面力学高度にこういった性質があるので、中規模渦の挙動やロスビー波の伝搬から、黒潮の蛇行やエル・ニーニョ現象の記述に至るまで、様々なスケールで時間変動する擾乱に関する我々の知見は、衛星海面高度計に

\* 2013 年 6 月 11 日受領, 2013 年 8 月 23 日受理  
著作権：日本海洋学会, 2014

† 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  
e-mail : ichikawa@riam.kyushu-u.ac.jp

よって著しく進展した。さらに、今ではほとんどの現業のデータ同化モデルに衛星海面高度計のデータが組み込まれて使われているため、こういった間接的な関与まで含めれば、衛星海面高度計の恩恵に与っていない海洋学者はほぼ居ないと言っても良い。

ここまで普及した衛星海面高度計の本格的な運用が開始されたのは、およそ20年前の1992年であった。アメリカNASAとフランスCNESの共同運用衛星と、ヨーロッパのESAの運用する衛星の二系統の高度計観測がこの年に開始されて以来、後者に短期間の中断はあるものの、この観測体制がずっと維持されてきた。衛星海面高度計が、研究利用だけでなく現業利用の主幹として海洋物理学に不可欠な測器となったのは、単に海面力学高度が運動方程式を通して数値モデルとの親和性が高かっただけではなく、これらの運用機関がデータの品質を維持するために不断の努力をしてきた功績も大きいと言って良いだろう。

そんな衛星海面高度計の観測体制に、数年ほど前から変化が出始めた。そこで本稿では、簡単に衛星海面高度計の歴史を振り返りながら、最近の衛星高度計の動向についてまとめ、この後十数年間の展望について記述していく。なお、ここでは、海面高度計を用いた科学的成果に関するまとめは行わない。これは、上述したように、もはや海面高度計は多種多様な分野で意識されずに使わ

れるほど浸透しているため、成果の例を挙げだすと膨大なものになるからである。衛星海面高度計観測の意義や成果に関しては、海面高度計に関する雑誌の特集号や書籍（例えば、Fu *et al.*, 1994; Cheney, 1995; Fu and Cazenave, 2001）や、海面高度計用のポータルサイト（Rosmorduc *et al.*, 2011; AVISO website; JPL website）などを参照して頂きたい。

## 2. 20世紀の衛星海面高度計

### 2.1 1990年代以前

衛星海面高度計は、GEOS-3での試験的運用の後、1978年のNASAのSeasatで正式に観測を開始した。ところが、電気システムのトラブルにより、わずか3ヶ月でこの観測が終了してしまう（Fig. 1）。ゆっくりと変動する海面力学高度の時間変動成分を計測するには、いかにせん3ヶ月という観測期間は短すぎた。そのうえ、衛星海面高度計の観測誤差の主要因の一つである衛星の軌道高度決定誤差が海面力学高度の信号強度の数倍以上の大きさがあったなど（Fig. 2）、残念ながらSeasatには海面力学高度の観測測器としては大きな難点があった。それでも、変動幅が数m以上と大きい海底地形やジオイドの推定など、海面高度測定の測地学的な利用として

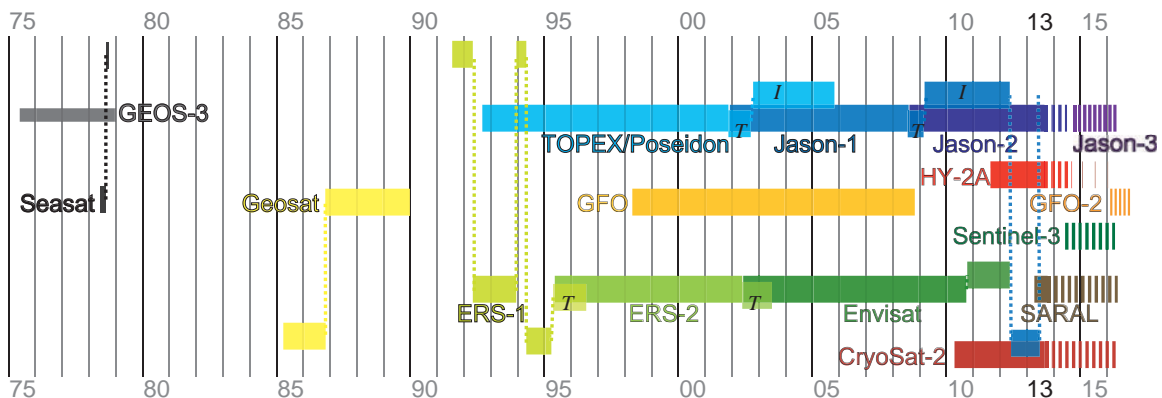


Fig. 1. Summary of satellite altimeter missions up to 2015. Mission phases with frequent but sparse subsatellite tracks are plotted upper part of the figure, while those with dense but rare tracks are shown in the lower part. Character “T” means the tandem mission, while “I” indicates the interleaved tandem mission in which their track patterns are the same as the original ones, but shifted in time or space.

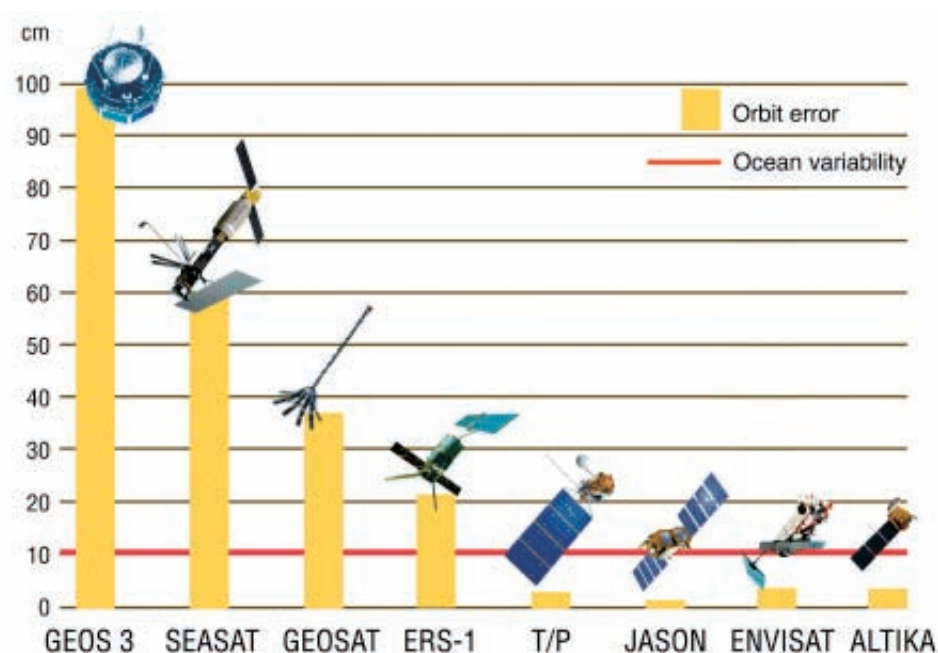


Fig. 2. Improvements in the orbit error (Credits, CNES; Rosmorduc *et al.*, 2011, <http://www.altimetry.info/>).

は、非常に有効であった (Haxby *et al.*, 1983)。

この成果を受けて次の海面高度計 Geosat を打ち上げたのは、アメリカ海軍であった。打ち上げ後の2年弱の測地ミッションは、当時機密扱いとなっていて、主に軍事的な目的で全球的な重力場の観測が行われた。そのミッション終了後の1986年末より、主に海洋学での利用向けに、水平距離で150 km程度の間隔の軌道を約17日で繰り返す Exact Repeat Mission (ERM) が開始され (Fig. 1), このデータは一般公開された。この当時のジオイド高の誤差は海面力学高度の変動幅よりも一桁大きかったため、1節で述べたように、海面高度計はジオイド誤差の影響を受けない時間変動成分のみに限定せざるを得なかった。だが、海面力学高度の時間変動成分を抽出する作業において、測点位置がずれるとジオイドの空間的な凹凸構造の違いも含まれてしまう。このため、軌道を固定して観測を行う ERM は非常に有効な手法だった。実際、これ以降の衛星海面高度計では、(測地的な目的の場合を除き) ERM を行うことが主流となった。

当時の軌道決定精度は依然として良くはなかったが (Fig. 2), 軌道誤差を長波長の関数として除くなど適切なデータ処理をすれば、西岸境界流からの切離渦など

の、比較的信号強度の大きな擾乱を抽出することは可能であった (例えば, Ichikawa and Imawaki, 1994; Aoki *et al.*, 1995)。この結果、外洋には中規模渦が満ちているという、当時としては斬新な描像が提供されるようになった。だが、1988年以降は欠測が目立ちだし、1990年1月には海面高度計の運用が止まってしまい、ここからしばらく衛星海面高度計の観測の空白期間が続く。

## 2.2 高精度観測への動き

満を待して1992年に登場したのが、アメリカの NASA の JPL とフランスの CNES の共同運用の TOPEX/Poseidon (T/P) である。電離層による電波伝達経路の屈折の影響を評価するために Ku バンドと C バンドという二周波の高度計を搭載したり、地球重力場の急峻な起伏の影響や大気抵抗を受けて人工衛星が不安定な運動をしないように軌道高度を高くしたり、潮汐信号を分離しやすくなるように主要分潮のエイリアシング周期を考慮して軌道の ERM 繰返し周期を設定するなど、高精度の観測ができるように細心の注意を払って設計された。

こうした準備のおかげで、T/Pの海面高度の計測誤差は2~3cm以内と格段に小さくなり (Fig. 2), 多くの海洋信号を検出することが可能となった。特に、それまで軌道誤差を除くために取り除かれてきた長波長の信号が扱えるようになり、夏半球で熱膨張による海盆スケールの海面上昇 (ステリック・ハイト) が顕著に見られることや、海洋中のロスビー波などの波動伝搬に関する理解が進んだ。また、約10日毎のERMサンプリングによって60日周期にエイリアシングされた半日周期の潮汐は、調和解析のような簡便な方法で推定でき、比較的精度良く潮汐信号の補正を行うことも可能であった (Yanagi *et al.*, 1997)。

なお、T/Pによる高精度測定は、単にT/Pだけの観測精度ではなく、それ以降の衛星海面高度計の観測精度も大きく向上させた。衛星の軌道沿いの平均海面の分布が高精度に求められたことでジオイドの理解も進み、地球の重力場の分布がより詳細に分かったことで、衛星の軌道決定精度そのものが向上した。実際、Fig. 2に示すように、T/Pとは軌道高度が異なる衛星であっても、T/P以降には衛星の軌道決定誤差自体が飛躍的に小さくなっている。また、T/Pで外洋の潮汐信号が容易に分離できたことで、潮汐モデル自身の向上が図られるようになった。T/P以降の衛星高度計はその恩恵を受けて、いちいち時系列データの調和解析などを施すことなく、数値モデルによる潮汐の推定値を用いるだけで、外洋の潮汐信号を高精度に分離できるようになった。

### 2.3 複数衛星化の動き

T/Pの前年にESAが打ち上げたERS-1は、Seasat同様、海面高度計以外のセンサーも搭載しており、一定期間 (ミッション・フェーズ) ごとに観測対象を選び、それに応じて軌道のパターンを変えていた。衛星の周回軌道は、周回周期を短くすると隣り合った軌道間の間隔が広くなり、逆に軌道間の間隔を狭くすると周回周期が長くなるという、時間と空間の分解能がトレードオフの関係にある。特に、衛星の直下しか計測できない海面高度計の場合、軌道のパターンが観測の分解能と直結してしまう。例えばT/Pの場合、ERM周回周期が約10日と比較的短い、そのぶん軌道間隔が中緯度で300km

程度と広くなり、中規模渦程度の空間スケールの現象を捕捉できないことがある、といった問題が生じる。

ERS-1は、1992年4月から1993年12月まで、海洋観測を主目的とするミッション・フェーズCとなった。このフェーズでは、周回周期が35日と長い軌道間隔が約75kmと短い軌道パターンを採用しており、ちょうど空間分解能が粗いT/Pの軌道パターンと対照的になっている。フェーズCでのこの軌道パターンは、後継のERS-2やEnvisatでも採用され、ERSシリーズの標準的なものとなった (Fig. 1)。時間分解能に優れたT/Pと同時期に、空間分解能に優れたERSシリーズの観測を使うことができたため、両者を併用することで時間と空間の分解能のどちらも犠牲にすることなく海面高度計の分布を得ることができるようになった。これが、1990年代の高度計のもう一つの大きな動きである。なお、後に1998年にGeosatの後継機であるGFO (約17日周期で約150km間隔) が追加されて、さらに複数衛星観測体制が強化された。

## 3. 21世紀以降の衛星海面高度計の動き

### 3.1 観測の長期化と現業化

海面高度計の有用性が確認されると、それを保持するために衛星をシリーズ化して後継機へと引継ぎが行われるようになった。後継機への引継ぎが一番初めに行われたのは、ミッション・フェーズを様々に変えて軌道のパターンを変化させていたERS-1だった。フェーズGが始まる1995年3月から、フェーズCの軌道にERS-1を戻し (Fig. 1)、同じ軌道に後継機のERS-2を飛ばす「tandem mission」に入った。このtandem missionでは、現役の衛星とほぼ同じ場所の海面高度をほぼ同時に観測することで、後継機のセンサー類の校正を行って、海面高度観測の連続性を確保する。21世紀に入ると、T/Pから後継のJason-1へ、Jason-1からJason-2へ、ERS-2から後継のEnvisatへと、合計3回tandem missionが行われており、1992年に設定された軌道パターンの観測を20年以上継続するために不可欠な手順となっている。

こうしたシリーズ衛星の引継ぎとともに、陸上・海上

における校正チームの不断の努力によって、全球の海水位分布の長期連続データが取得できるようになった。こうした長い期間のデータをもとに、全球平均した海水位が年間3mmのペースで上昇していることが、季節変動やエル・ニーニョなどのイベントと明確に区別される有意な信号として示すことができた (Fig. 3)。しかも、こうした海水位上昇は全球で一様ではなく、海洋大循環の強さの変化などに応じた空間的な分布があつて、海域によっては水位が低下していることも分かった。こうした知見は、潮位計など場所が限定されたネットワーク観測だけでは達成できないものである。

ちなみに、衛星海面高度計と非常に親和性の高い、地球の重力場を計測する重力場ミッション (CHAMP, GRACE や GOCE など) が、2000 年ごろから本格化した。これらの重力場ミッションによって、人工衛星から検知できる数百 km 以上の大きなスケールのジオイドの精度が向上して衛星海面高度計の軌道決定精度が上がっ

たが、それに加えて、地球の質量分布の時間的な変動までが議論されるようになった。これまで、重力場は固体地球の質量分布で決まるために地質学的な時間スケールでのみ変化が生じるものとして取り扱われてきたが、例えば順圧的な海水の移動や、氷山の結氷や融解などによって質量分布が変わると、それに従って重力場もわずかに変化する。重力の絶対値に比べると変動量は極めて小さいが、重力場ミッションでは、こうした重力場の微小な時間変化を、衛星測地学的な空間スケールで検出することができる。このデータを用いると、上述した海水位上昇のうち、質量分布の変化を伴う氷の融解によるものと、海水柱の全質量の変化を伴わない熱膨張による効果とを分離することが可能で、両者の比はおおよそ4対6程度であると言われている (Domingues *et al.*, 2008; Riva *et al.*, 2010; Willis *et al.*, 2008)。

衛星海面高度計の長期シリーズ化の財政的な背景には、オペレーショナルな測器として現業利用することが

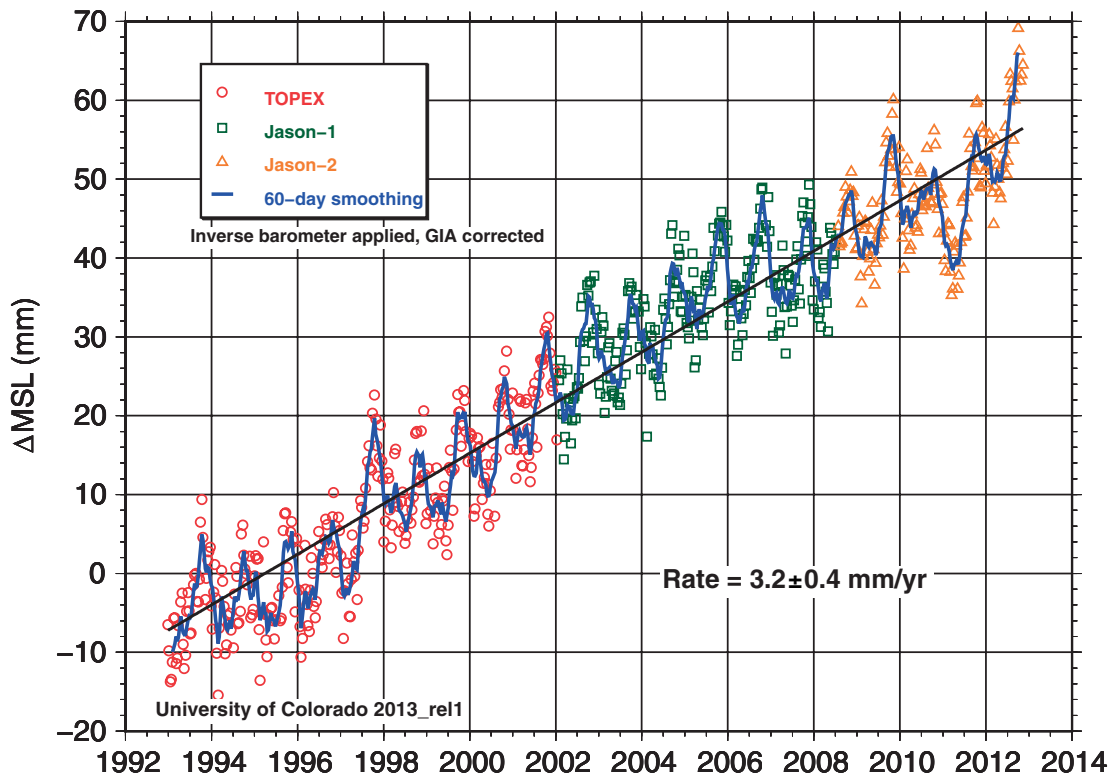


Fig. 3. Time series of the global mean sea level measured by satellite altimeters (Credits, University of Colorado; Nerem *et al.*, 2010).

前提とされている。実際、現在稼働中の Jason-2 では、T/P 当初から運用に携わってきた JPL と CNES に、現業利用を担当する NOAA と EUMETSAT が加わっており、今後の Jason-3 や Jason-CS では後者が運営の主体となる予定である。Jason シリーズの衛星海面高度計は、もはや研究のための実験衛星というより、現業での実利用データ収集を主目的とした実利用衛星という位置づけとなっている。

海面高度計の現業利用への流れは、間違いなく、Argo 計画の全球プロファイリング・フロート観測と、データ同化手法の発展によって加速された。Argo と Jason は、命名の段階からギリシャ神話の Argo 船と Jason 船長の関係性が意識されていたように、強いパートナーシップで結ばれている。海面の高度を海面高度計 (Altimeter) によって全球で均一に計測し、それに比べるとやや疎らではあるが、海中の鉛直構造を Argo のプロファイリング・フロートで観測して、それらをデータ同化 (Data Assimilation) によって均質な三次元データセットへと補間して、さらに時間発展を予測する。こうした「三つの A」を用いた一連の流れは、もはや海洋や気象・気候に関わる現業機関にとって不可欠なものとなっている。

### 3.2 衛星海面高度計のコンステレーション

2013 年 7 月に通信不良によって Jason-1 が引退したため、2013 年 8 月現在で稼働中の海面高度計は 4 機に減った (Fig. 1)。だがこの数は、1992 年以前の 0 ~ 1 機、2002 年以前の 2 ~ 3 機と比べると、確実に増加している。同時稼働している衛星の個数が増えた理由の一つは、長期シリーズ化において、tandem mission で後継機への引継ぎが終了した後の前世代の衛星を利用できるようになったことである。T/P や Jason-1 は、tandem mission 終了後、本来の軌道と軌道の中間に来るように新しい軌道を空間的にずらす interleaved tandem mission を開始した (Fig. 1)。衛星やセンサー群の寿命が尽きるまでという期間の制約はあるものの、運用中に慎重に制御・管理された T/P や Jason-1 は当初の想定以上に寿命を延ばすことができたため、interleaved tandem mission によって空間分解能を上げる新しい軌道パター

ンを追加することができた。

海面高度計の同時稼働個数が増加したもう一つの理由は、新規国が衛星海面高度計の打上げへ参入したことである。多種センサーを搭載した ERS/Envisat のシリーズは、ヨーロッパの地球監視 GMES 計画として複数の Sentinel 衛星として継続展開されるが、高度計を搭載する Sentinel-3 の軌道パターンは、Envisat のものとは異なっている。その代わりに Envisat の軌道パターンで海面高度を計測するのが 2013 年の 2 月に打ち上げられた SARAL で、これはフランスの CNES とインドの ISRO の共同運用である。2014 年まで運用が延長される予定だった Envisat の通信が 2012 年に途絶したため、残念ながら tandem mission こそできなかったが、別の宇宙機関によって軌道パターンの後継がなされるほど、衛星海面高度計のコミュニティは既に大きく育っている。

高度計搭載衛星の配置は、もはや常に数個で構成することができるようになり、今ではコンステレーション (星座) として考える時期になっている。各衛星は、単独のミッション要求だけでなく、コンステレーションの一部としてコミュニティに対してどのような役割を果たすのか、という議論までが求められている。実際、SARAL の打上げの前々年の 2011 年に、中国の CNSA がフランス CNES と組んでアジア初の海面高度計搭載衛星 HY-2 を打ち上げているが、データの公表が遅い点をコミュニティから非難されている。CNES や JPL が長年培った経験を享受している分、コンステレーションの一部としての役割を果たすことが強く求められているのだ。ちなみに CNSA は、2012 年の「海面高度計の 20 年間の進展」の国際記念シンポジウムで、近日中にデータの公開を行うことを発表した (市川ら, 2013)。その後、CNES との協議を経て、AVISO が配布するデータに HY-2 のデータを含めることになったらしい。

### 3.3 沿岸域への拡張と高分解能化センサーへの動き

コンステレーションとして多数の衛星の配置を考慮することができるようになってくると、Jason のような実利用を前提とした参照用の長期シリーズ衛星を確保した上で、それとは別に、これまで試みられてこなかったような実験的な目的の衛星を投入することが可能になる。こ

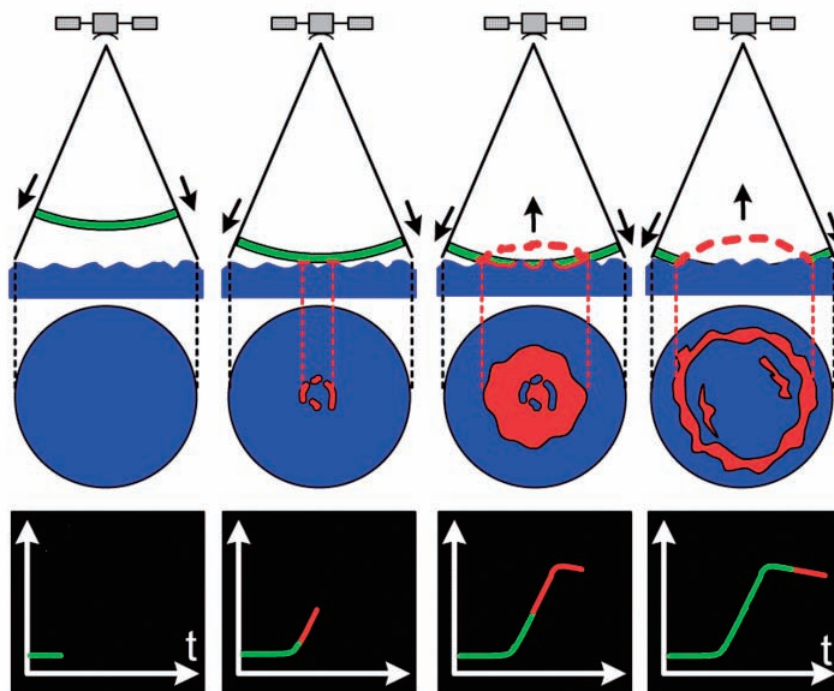


Fig. 4. Schematic figures for an altimeter's pulse (green) and echo (red) signals (top panels) with corresponding footprints on the sea surface (middle panels); as the time proceeds (from the left to the right), the pulse reaches to the crests of waves at the nadir of the satellite, then the troughs of waves, and the surrounding areas. The waveform received by the altimeter (bottom panels) shows a relatively gradual leading edge slope if the wave height at the sea surface is significantly large (Credits, CNES; AVISO altimetry website, <http://www.aviso.oceanobs.com/>).

れが21世紀に入ってからのもう一つの傾向で、これまでの衛星海面高度計が観測対象としてこなかったような海域をターゲットとする動きが始まっている。

海面高度計は衛星直下に向けてパルス電波を打ち、そのパルスが照射する範囲 (footprint) 内で反射された電波の強度を時系列で計測する (Fig. 4)。衛星直下付近の海面の波の山部で反射された電波が最初にアンテナに到達し、やや遅れて波の谷部で反射した電波、そして同心円状に広がる照射領域で反射された電波が続いて受信される。衛星に搭載された高度計は、受信した反射電波強度の時系列 (waveform) から、反射強度の立ち上がり部分の時刻と時間変化率を決定し、衛星と海面間の距離と有義波高をそれぞれ推定している。ところが、半径数 km ほどの footprint の中に陸地や流水など海面以外の物体があると、それらからの反射電波の影響を受けて

waveform が想定から大きく変わってしまうため、単純なアルゴリズムでは waveform の立ち上がり部分の形状を特定できなくなる。このため、これまでの海面高度計では、沿岸域と極域を主な観測対象から外してきた。

しかし、特に沿岸域は人間活動への影響を考える上で最も重要な海域であるため、近年になって衛星海面高度計の沿岸域における利用が重要視されてくるようになった (Cipollini *et al.*, 2010)。このため、例えば過去の Jason 高度計の waveform データを再解析し、沿岸域でも使用できるようにアルゴリズムを再調整した研究用の高分解能プロダクト PISTACH (Mercier *et al.*, 2010) などが作られるようになっている。

さらに、高度計センサー自身の改良も行われている。つい最近打ち上げられた SARAL に搭載された AltiKa 高度計は、これまでの高度計に用いられてきた Ku バン

ド（～13.6 GHz）やCバンド（～5.3 GHz）の電波ではなく、周波数の使用可能帯域幅が国際的に広めに定めてあるKaバンド（～35 GHz）を用いている。広い帯域幅を使うと絞ったパルスが作れる（Fig. 4 左上で、衛星から射出される緑線のパルスの厚みが薄くなる）ので、waveformの立ち上がりを鋭くすることができ、比較的陸の近くでも精度の良い計測ができるように設計されている。Kaバンドは降雨の影響を比較的受けやすいため、これまでの衛星海面高度計では使用が避けられてきたが、あえてそのKaバンドを使用するところに、いかに沿岸域の海面高度を観測する要請が強いかが見える。なお、最近のAltiKaデータの解析結果によると、降雨による欠測は当初推定されていたよりは少ないらしい。

また、もともと極域の氷の高さを計測する目的で打ち上げられたCryosat-2には、SIRAL-2という「SARモード」で動作する高度計が搭載されている。SARモード高度計は、衛星が軌道上を移動することを利用した高空空間分解能の測器で、反射電波の強度だけでなく周波数も計測する。軌道上を移動する衛星から見て、直下点よりも前方から近づいてくる海面から反射した電波（Fig. 5の赤色）と、後方に遠ざかる海面から反射した電波（青色）は、ドップラー効果によって異なる周波数に変調されている。これらを区別することで、進行方向に約250 mの分解能で海面高度を計測することができる。ただしSARモードは大容量データの記録を必要とするので、Cryosat-2のSARモードの計測は原則的に氷上のみで海上では限定的にしか行われていない。同種の高度計を搭載する予定のSentinel-3では、全海域でSARモードの計測を行うことが提案されているが、現在まだ議論中である。

なお、約250 mというSARモードの空間分解能は驚異的だが、ドップラー効果が生じるのは衛星の進行方向のみなので、軌道に直交する方向の分解能は従来のfootprintのサイズの数kmのままである。このため、空間分解能に非常に強い非等方性が生じる。一般に海岸地形は軌道とは直交しないので、SARモードの250 mの分解能が沿岸付近で必ずしもそのまま活用できるわけではない。

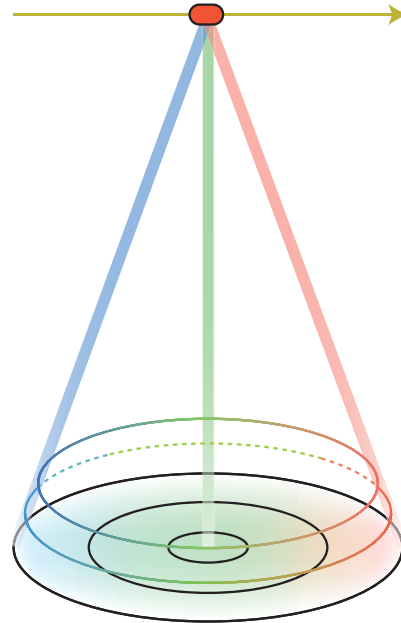


Fig. 5. Schematic figure for the SAR-mode altimeter's distance measurements.

#### 4. 面的な海面高度計測へ

空間分解能の非等方性は、もっと大きなスケールでも生じている。衛星海面高度計は衛星の軌道方向には連続的に海面高度を観測するが、軌道に直交する方向には、数十～数百 km離れた隣の軌道上までデータが全く存在しない。しかも、この「隣」の軌道上の海面高度のデータは、一般に時間的な隔りがある。衛星が地球を一周して同じ緯度に到達する頃（高度計の場合、およそ2時間弱後）には、地球の自転によって観測点の経度が移動している。経度の移動量は衛星軌道面の地軸に対する傾きに依存するが、一般に、空間的にすぐ隣の軌道に到達するのは、衛星が地球を何周か回った後になる。

軌道と軌道間の海面高度分布が全く計測できず、隣の軌道とも時間差があるという問題は、現象の時・空間スケールが比較的大きい外洋域よりも、寿命が短く空間スケールも小さい現象が卓越する沿岸域や縁辺海で特に深刻である（岡ら、2013）。すなわち、衛星直下の海面高度計測の空間分解能を向上させる前節の試みは、陸地のすぐ近くの観測値を増やしたり、高度計が偶然真上を通過した現象を細かく記述したりするには効果がある



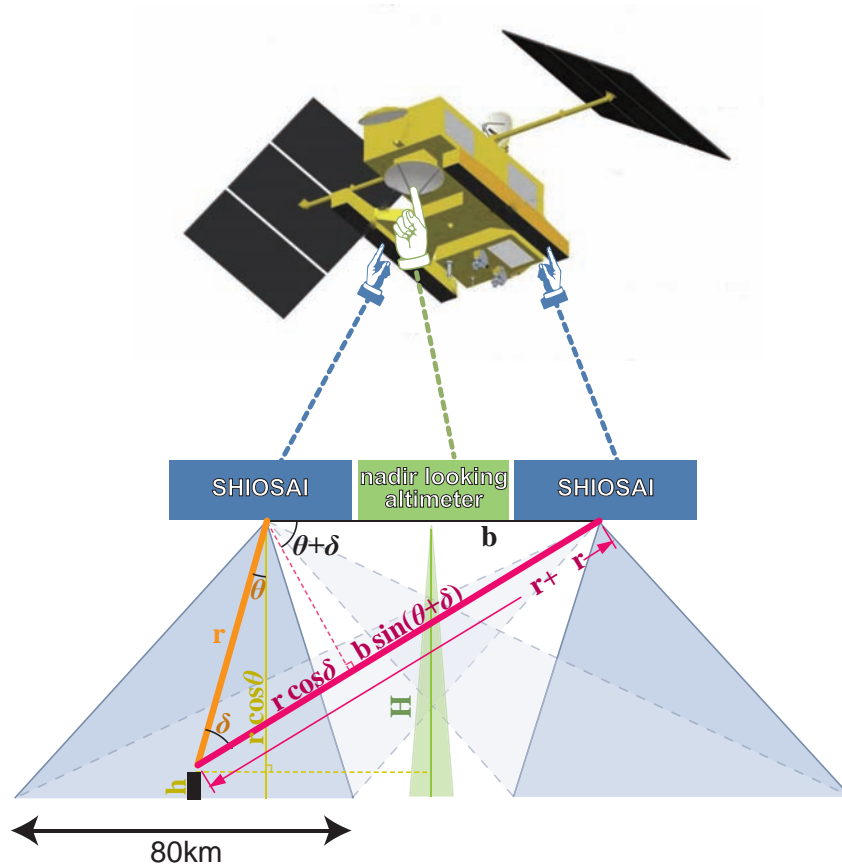


Fig. 6. Concept of an interferometric SAR altimeter (after Nakamura *et al.*, 2012).

が、沿岸域や縁辺海の現象のモニタリングとしての利用にはそれほど有効ではない。

そこで、2019～2020年ごろの打ち上げを目指した次世代の高度計として期待されているのが、JPLとCNESが共同して計画中のSWOTミッションや、日本のJAXAが計画中のCOMPIRAミッションなどの、干渉SAR型の高度計である。ここでは、COMPIRA衛星の現在の設計案をもとに、干渉SAR型の高度計SHIOSAIの説明をしよう。Fig. 6に示すように、COMPIRA衛星は中央に従来の直下型高度計を搭載して、衛星直下の海面と衛星間の距離Hを高精度に計測する。一方、衛星上で距離b (SHIOSAIの場合、約3m)だけ離して配置された左右のSARアンテナは、衛星の直下ではなく、斜め方向に距離の計測を行う。ある地点が衛星直下点よりhだけ海面が高いとして、そこを左のアンテナから計測した距離がr、右のアンテナから計測した距離が

$r + \Delta r$  だとして (Fig. 6)。距離rの計測は、直下型高度計のHに準じた精度は期待できるものの、左右のアンテナ間の僅かな距離差 $\Delta r$ が正しく求められるほどの精度はない。そこで、左右アンテナの受信電波を干渉させ、その位相差を使って $\Delta r$ を正確に求める。このとき、Fig. 6の角度 $\theta$ と $\delta$ に関して、

$$r + \Delta r = r \cos(\delta) + b \sin(\theta + \delta)$$

が成立する。図では誇張して書かれているが、SHIOSAIの場合、 $\delta \sim b/r$ が非常に小さいので、これの高次項を無視していくと

$$\frac{\Delta r}{b} \sim \sin(\theta)$$

を求めることができる。この $\theta$ と、rの計測値を用いて、

$$h = H - r \cos(\theta)$$

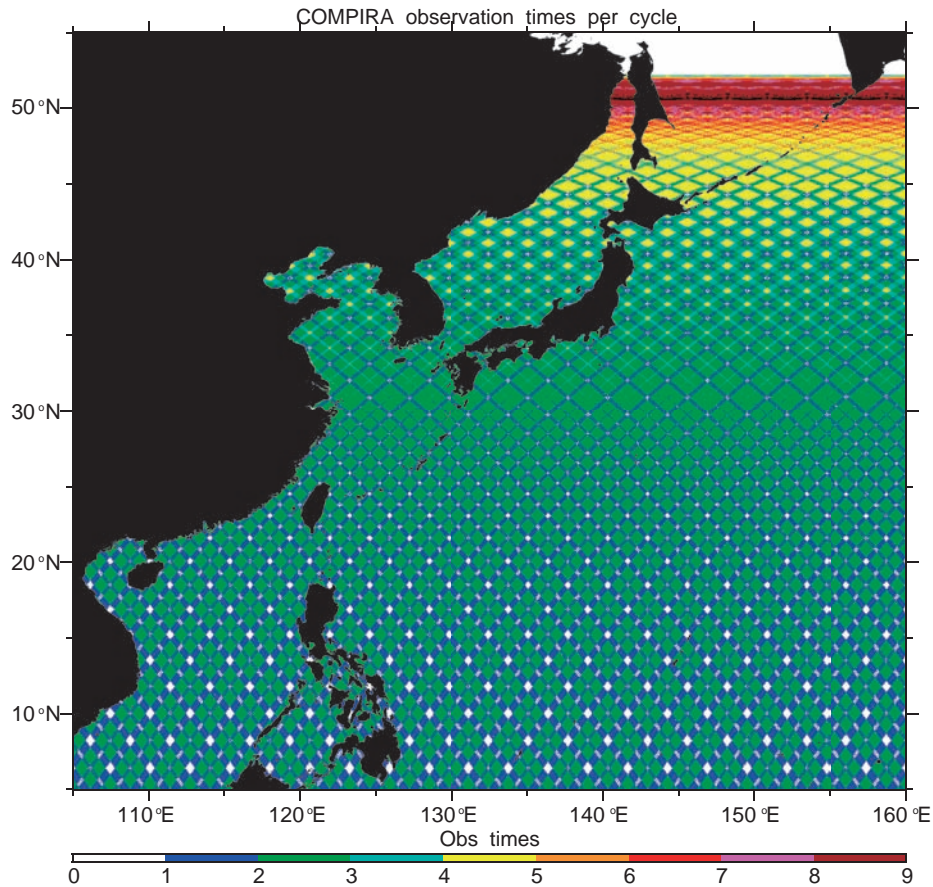


Fig. 7. Number of observations of COMPIRA per one ERM cycle, *i.e.* nearly 10 days; based on the orbit parameters planned in August, 2013 (Isoguchi *et al.*, 2012).

を求めれば、軌道直下から離れた場所の相対的高さ  $h$  を計測することができる。現在の COMPIRA の設計では、衛星軌道の左右の 80 km 幅の海面高度を 5 km の分解能で 5~7 cm の精度で計測する予定である (Nakamura *et al.*, 2012)。つまり、従来の直下型の高度計を 33 台横にずらり並べて編隊飛行を行うようなイメージである。

2.3 節では複数衛星化による時・空間分解能の向上について述べたが、33 台の並列衛星同時観測に相当する COMPIRA の場合、同時に観測できる海域の広さがまず大きな利点となる。少なくとも 160 km 幅の帯状の海域で面的に海面高度が求められるので、これまで非等方的な分解能のために正しく表現できなかった、空間スケールの小さい擾乱が記述できるようになる。さらに、

小さなスケールでも海流の流向が議論できるので、例えば黒潮の小蛇行なども捕捉することができるだろう。

また、一度に観測できる面積が増加すると、時間分解能も向上する。Fig. 7 は、約 10 日の COMPIRA の ERM 回帰周期のうちに、ある地点の海面高度が何回観測されるかを示した図である (Isoguchi *et al.*, 2012)。これまでの直下型高度計では、軌道直下が線状に 1 回 (軌道の交差点で 2 回) 観測されるだけで、それ以外の大部分の海域は、図で白抜きとして示される「観測が 1 回もない」場所であった。ところが COMPIRA の場合、低緯度で白抜きの海域が若干確認できるものの、中緯度の 35°N 付近になると白抜き部分は僅か 2% しかない。それどころか、ほとんどの中緯度海域で最低で 2~3 回、高緯度になると 4 回以上の頻度で海面高度の観測が行わ

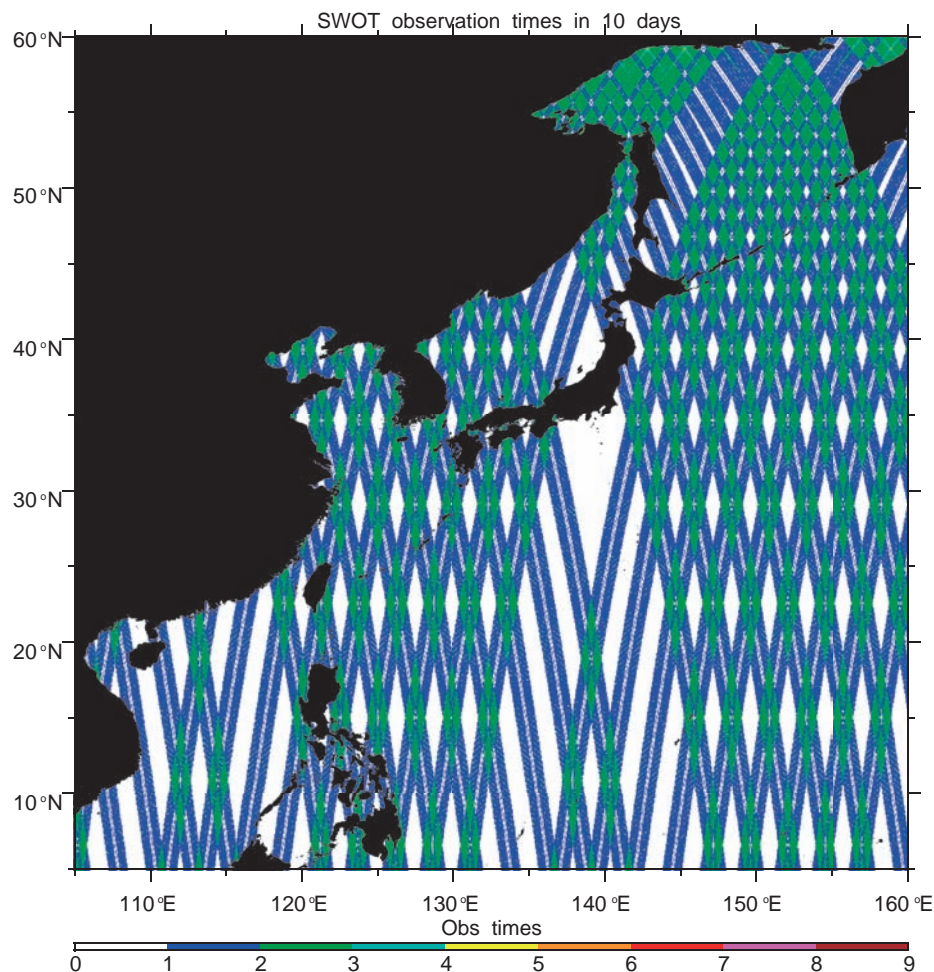


Fig. 8. Number of observations of SWOT in 10 days; based on the orbit parameters planned in August, 2013 (JAXA COMPIRA team, private communication).

れることになる。もちろん、この観測の頻度は、対馬海峡の海洋レーダ観測結果 (<http://le-web.riam.kyushu-u.ac.jp/radar/>) に見られる地形性渦などのような複雑な流況の成長や減衰そのものを表現するには十分とは言い難いが、複雑な流速場の変遷をデータ同化などで補間・推定するのに必要な種となる信号を供給することはできるので、沿岸域のモニタリングへの利用には非常に有用である。

なお、同じく干渉 SAR 型の高度計 KaRIN を搭載する SWOT では、アンテナ間距離  $b$  を約 10 m と広げ、約 1 km の分解能で約 3 cm の精度での海面高度の計測を目指している。一般に長いアンテナ間隔  $b$  を確保す

るには張出型のアンテナを展開させる必要があるが、干渉 SAR 型の計測では素材のたわみ等が深刻な誤差要因となるため、COMPIRA では機体にアンテナを貼り付ける方式を採用している。しかし SWOT は、海洋だけでなく河川や湖沼など陸水の水位も計測対象としているため、アンテナの技術的なハードルを上げてでも、高い空間分解能を確保しようとしている (ちなみに陸水の水位は、約 50 m 分解能で約 10 cm の精度で観測する予定である)。ただし、SWOT の軌道パターンは、沿岸や縁辺海のモニタリングとしての目的では難点もある。周回周期が 21~22 日の SWOT について、Fig. 7 と同じく 10 日間の観測頻度分布を書いてみると (Fig. 8)、全く

観測されない白色の海域が比較的広く生じており、空間的に均質に観測頻度を確保する COMPIRA (Fig. 7) の方が全体にわたっての時間分解能は高いことがわかる。なお、このように SWOT と COMPIRA は空間分解能と時間分解能が相補的な関係にあることから、かつての T/P と ERS-1 がそうであったように、同時に使用することで、最も効果的な成果を上げることができると期待される。

しかし、ここで忘れてならないのは、我々はまだ、こうした革新的な測定方法に見合うだけの潮汐やジオイドなどの補正情報を持ち合わせていないということである。重力場ミッションや、Cryosat-2 や 2012 年以降の Jason-1 の重力測定フェーズ (Fig. 1) などの高空間分解能海面高度測定によってジオイドの精度は確かに向上したが、5 km 格子のスケールで海洋物理学の実用に耐えうる海上ジオイドモデルは、まだ局所的にしか存在しない。T/P で飛躍的に改善した潮汐モデルにしても、これまで扱わなかった陸に近い浅海域を対象とするためには、潮流起源の地形性渦のような非線形性の強いものまでを再現していく必要があるだろう。実際、対馬海峡を往復するフェリーの船上で干渉 GPS 手法を用いて海面高度を細かい空間分解能で実測してみると、地衡流速とよく応答する海面力学高度の凹凸とともに、非地衡流的な性質の海面高度擾乱が多数捉えられている (Ichikawa *et al.*, 2013)。2 節で述べた前世紀の高度計の歴史を繰り返すかのように、ERM によるジオイドの分離や、調和解析による潮汐信号の分離など、実践的解析を丹念に再び行う必要がある。

また、そもそも衛星海面高度計が他の海洋観測衛星と区別されてきたのは、海洋の比較的深い密度構造までが反映される海面力学高度を計測して、運動方程式中の圧力傾度力項を求め、そこから地衡流速が推定できる点にあった。単に面的に細かい構造を観測するだけであれば、海面水温や海面粗度の分布が既に得られている。これらの物理量の微細構造分布は、海面付近の薄い表皮層内部での局所的な物理過程の影響を受けて複雑になっているものの、空間分解能だけで見れば COMPIRA よりもずっと高い。つまり、COMPIRA や SWOT などの干渉 SAR 型の新型高度計は、ただ細かい海洋構造を定性的に求めることが目的ではなく、測定された海面付近の

圧力分布の中に、どのような時・空間スケールの成分が含まれているかを調べ、それぞれの成分が運動方程式のどんな項とバランスしているのかを把握することまでが求められている。逆に言えば、変形半径よりも小さな空間スケールの面的な海面高度観測が可能になる時代が始まることで、非地衡流の力学的なバランスまでを視野に入れた解析ができるようになるだろう。これによって、衛星海面高度計が、また海洋物理学を一步前進させることは間違いはない。

## 5. おわりに

1992 年に打ち上げられた T/P 衛星に始まる高精度海面高度観測は、後継の Jason-1/2 衛星へと世代交代を行いながら、20 年を超える長期時系列データを提供してきた。Argo フロートやデータ同化手法とともに現業用の海況予報に不可欠となった衛星海面高度計は、気候学的な海面上昇までを観測対象として、全球の海水位変動の参照基準を提供し続けている。

同じく 1992 年に本格開始した ERS-1 から続く ERS/Envisat シリーズの衛星海面高度計は、複数高度計による時・空間分解能の向上をもたらした。一度に観測できる範囲が半径数 km の点状海域のみと狭い衛星海面高度計では、観測の時・空間分解能が衛星の軌道パターンで決まり、一方を高めると他方が低くなるトレードオフの関係になってしまう。これを解決するには、衛星の個数を増やす必要があり、その役割を T/P-Jason シリーズと共に担ってきたのが ERS/Envisat のシリーズである。現在では、シリーズ後継機に引き継いだ後の前世代衛星の利用と、インドや中国など新規国の参入もあって、常に 4~5 台の高度計が稼働するコンステレーションを成す状態にまでなっている。ただし、異なる設計の衛星をコンステレーションの一部として組み込んで相互調整するには、参照値となる高精度の Jason シリーズ衛星が存在していることが前提となっている。

このように技術的に安定・成熟して、現業利用が進んでいる衛星海面高度計ではあるが、決して開発が「終わった」測器ではない。実際、国際集会 OceanObs'09 で再確認された沿岸域での観測ニーズ (Fischer *et al.*, 2010) に応答するかのように、陸に近い沿岸海域の利用

を念頭に置いた新データセットや新型高度計センサーが、ここ数年のうちに相次いで導入されるなど、さらなる進化が続いている。むしろ、現業・参照用の Jason シリーズの役割が Jason-2 の打上げ以降に明確になったことで、それとは別目的の実験的性質のある新型海面高度計への取組みが、ここ数年で活発化したと言っても良い。

そんな中で、これまでの衛星海面高度計の概念を大幅に変える、全く新しい高度計が、(喜ばしいことに)日本の JAXA などでは計画されている。干渉 SAR を用いて、直下点以外に側方の高度を測る新型の高度計は、これまでの直下型の高度計に特有な非等方的な時・空間分解能を大幅に改善することができる。海面高度の面的な分布を、数 km という十分な空間分解能で、数日に一度という容認できる頻度で観測することができるため、現象の時・空間スケールが小さい沿岸海域や縁辺海で、特に有効に使われるだろう。とりわけ、東アジアやヨーロッパのように、多国籍の領海が含まれる広大な縁辺海に面した地域では、こうした観測による海況理解は、今後特に重要になってくるだろう。

ただし、過去の衛星の ERM 軌道から外れた場所では、細かい空間分解能のジオイドや潮汐の知識が十分ではなく、そのままでは干渉 SAR 型の新型高度計データを使いこなせない。また、時間変動が激しく、非線形的な地形の影響などを受けた非地衡流成分が卓越するような沿岸域では、計測された海面高度がどんな現象を反映しているのかについてさえ、我々は十分な知識を持ち合わせていない。しかし、未知なることに臆することなく、新たに手にするデータを慎重に品質管理して解析していくことで、海洋物理学の新しい扉が開かれていくであろう。21世紀に入った今からも、衛星海面高度計と共に我々は躍進を続けていくのだ。

## 略号一覧

AVISO; Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data, France  
 CHAMP; Challenging Minisatellite Payload  
 CNES; Centre National d'Etudes Spatiales, France  
 CNSA; China National Space Administration  
 COMPIRA; Coastal and Ocean measurement Mission with Precise and Innovative Radar Altimeter  
 Envisat; Environmental Satellite  
 ERM; Exact Repeat Mission  
 ERS; European Remote-sensing Satellite  
 ESA; European Space Agency  
 EUMETSAT; European Organization for Exploitation of Meteorological Satellites  
 GEOS; Geodetic and Earth Ocean Satellite  
 Geosat; Geodetic Satellite  
 GFO; Geosat follow-on  
 GMES; Global Monitoring for Environment and Security  
 GOCE; Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer  
 GPS; Global Positioning System  
 GRACE; Gravity Recovery And Climate Experiment  
 HY-2; HaiYang-2 (海洋二号)  
 ISRO; Indian Space Research Organisation  
 Jason-CS; Jason Continuity of Service  
 JAXA; Japan Aerospace Exploration Agency  
 JPL; Jet Propulsion Laboratory, USA  
 KaRIN; Ka-band Radar Interferometer  
 NASA; National Aeronautics and Space Administration, USA  
 NOAA; National Oceanic and Atmospheric Administration, USA  
 PISTACH; Prototype innovant de Système de Traitement pour l'Altimétrie Côtière et l'Hydrologie  
 SAR; Synthetic Aperture Radar  
 SARAL; Satellite with Argos and AltiKa  
 SHIOSAI; SAR Height Imaging Oceanic Sensor with Advanced Interferometry  
 SIRAL; SAR Interferometric Radar Altimeter  
 SWOT; Surface Water and Ocean Topography  
 TOPEX; Topography Experiment  
 T/P; TOPEX/Poseidon

## References

- 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.
- AVISO website: <http://www.aviso.oceanobs.com/en/home.html>
- Cheney, R.E. (1995): Preface, *J. Geophys. Res.* 100 (C12), 24893.
- Cipollini, P., J. Benveniste, J. Bouffard, W. Emery, L. Fenoglio-Marc, C. Gommenginger, D. Griffin, J. Hoyer, A. Kurapov, K. Madsen, F. Mercier, L. Miller, A. Pascual, M. Ravichandran, F. Shillington, H. Snaith, T. Strub, D. Vandemark, S. Vignudelli, J. Wilkin, P.

- Woodworth, J. Zavala-Garay (2010): "The Role of Altimetry in Coastal Observing Systems", in *Proceedings of OceanObs'09: Sustained Ocean Observations and Information for Society* (Vol. 2), Venice, Italy, 21–25 September 2009 (Hall, J., Harrison, D.E. & Stammer, D., Eds.), ESA Publication **WPP-306**, doi: 10.5270/OceanObs09.cwp.16.
- Domingues, C.M., J.A. Church, N. J. White, P.J. Gleckler, S.E. Wijffels, P.M. Barker and J.R. Dunn (2008): Improved estimates of upper-ocean warming and multi-decadal sea-level rise, *Nature*, **453**, doi: 10.1038/nature07080.
- Fisher, A.S., J. Hall, D.E. Harrison, D. Stammer, J. Benveniste (2010): Conference summary - Ocean information for society: Sustaining the benefits, realizing the potential, in *Proceedings of OceanObs'09: Sustained Ocean Observations and Information for Society* (Vol. 1), Venice, Italy, 21–25 September 2009 (Hall, J., Harrison, D.E. & Stammer, D., Eds.), ESA Publication **WPP-306**, doi: 10.5270/OceanObs09.Summary.
- Fu, L.-L. and A. Cazenave, (Editors) (2001): *Satellite Altimetry and Earth Sciences, A Handbook of Techniques and Applications*, Academic Press, San Diego, 463pp, ISBN 0-12-269545-3.
- Fu, L.-L., E. J. Christensen and C.A. Yamarone Jr. (1994): TOPEX/POSEIDON mission overview, *J. Geophys. Res.*, **99** (C12), 24369–24381.
- Haxby, W.F., G.D. Kamer, J.L. LaBrecque and J.K. Weissel (1983): Digital images of combined oceanic and continental data sets and their use in tectonic studies, *Eos Trans. AGU*, **64** (52), 995–1004, doi: 10.1029/EO064i052p00995.
- 市川 香 (2002): 衛星海面高度計資料を用いた海面変動の研究, *海の研究*, **11** (2), 305–319.
- Ichikawa, K. and S. Imawaki (1994): Life history of a cyclonic ring detached from the Kuroshio Extension as seen by the Geosat altimeter, *J. Geophys. Res.*, **99** (C8), 15953–15966.
- Ichikawa, K., A. Morimoto, K. Fukudome, J.-H. Yoon, and Y. Yoshikawa (2013): Coastal sea surface dynamic height monitoring by GPS mounted on a ferry boat, *Proceedings of "20 years of Progress in Radar Altimetry" Workshop, Venice, Italy* (Ouweland, L., Eds.), ESA Publication **SP-710**, ISBN 978-92-9221-274-2.
- 市川 香・倉賀野 連・須賀 利雄・今脇 資郎 (2013): 「衛星海面高度計の20年間の進展」シンポジウムの報告, *JOS ニュースレター*, **2** (4), 8–10.
- 今脇資郎・西垣肇・市川香 (1989): アルティメータ・データの処理: 最適内挿法による軌道誤差の補正, *航水研ノート: 空と海*, **11**, 35–47.
- Isoguchi, O., A. Uematsu, Y. Nakajima, R. Nakamura, Y. Yajima, M. Ohki and A. Shinozaki (2012): Preliminary studies on empirical roll angle error reduction and tidal detection for the Japanese altimetry mission, 2012 Ocean Surface Topography Science Team meeting, Venice, Italy. <http://www.aviso.oceanobs.com/fileadmin/documents/OSTST/2012/posters/Isoguchi.pdf>
- JPL website; Ocean Surface Topography From Space, <http://sealevel.jpl.nasa.gov/>
- Mercier, F., V. Rosemorduc, L. Carrere and P. Thibaut (2010): *Coastal and Hydrology Altimetry product (PISTACH) handbook*, **CLS-DOS-NT-10-246**, SALP-MU-P-OP-16031-CN 01/00.
- Nakamura, R., A. Uematsu, Y. Nakajima, Y. Yajima, R. Sato and the COMPIRA Team (2012): X-band interferometric SAR sensor for the Japanese altimetry mission COMPIRA, *信学技報*, **SANE2012-85**, 163–168.
- Nerem, R.S., D. Chambers, C. Choe and G.T. Mitchum (2010): Estimating mean sea level change from the TOPEX and Jason altimetry missions, *Marine Geodesy*, **33** (1), suppl. 435–446.
- 岡 英太郎・磯辺 篤彦・市川 香・升本 順夫・須賀 利雄・川合 義美・大島 慶一郎・島田浩二・羽角 博康・見延 庄士郎・早稲田 卓爾・岩坂 直人・河宮 未知生・伊藤 幸彦・久保田 雅久・中野 俊也・日比谷 紀之・寄高 博行 (2013): 海洋学の10年展望(1)―日本海洋学会将来構想委員会物理サブグループの議論から―, *海の研究*, **22** (6), 191–218.
- Riva, R.E.M., J.L. Bamber, D.A. Lavallee and B. Wouters (2010): Sea-level fingerprint of continental water and ice mass change from GRACE, *Geophys. Res. Lett.*, **37**, L19605, doi: 10.1029/2010GL044770.
- Rosmorduc, V., J. Benveniste, S. Dinardo, O. Lauret, C. Maheu, M. Milagro and N. Picot (2011): *Radar Altimetry Tutorial* (Benveniste, J. and N. Picot, Eds.), <http://www.altimetry.info/>.
- Willis, J.K., D.P. Chambers and R.S. Nerem (2008): Assessing the globally averaged sea level budget on seasonal to interannual timescales, *J. Geophys. Res.*, **113**, C06015, doi: 10.1029/2007JC004517.
- 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.

## Satellite altimeters in the early 21st Century

Kaoru Ichikawa<sup>†</sup>

### Abstract

In 1992, the satellite altimetry started high-precision sea surface height observations. Within ten years since then, satellite altimeters had become one of the most significant instruments that advanced the physical oceanography in the 20th century. In this paper, the perspective of the satellite altimetry in the early 21st century is discussed with simple review of its history.

**Key words** : Satellite Altimetry, altimetry constellation, COMPIRA mission

(Corresponding author's e-mail address: ichikawa@riam.kyushu-u.ac.jp)

(Received 11 June 2013; accepted 23 August 2013)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2014)

---

<sup>†</sup> Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University  
6-1 Kasuga-kouen, Kasuga, Fukuoka, 816-8580, Japan