

海洋深層流観測に衛星重力計の余地はあるのか？

Is satellite gravity mission necessary to observe deep-sea currents?

市川 香^{*1}, 内田 裕^{*2}, 山本浩文^{*2}, 深澤理郎^{*2}, 安倍大介^{*3}
K. Ichikawa^{*1}, H. Uchida^{*2}, H. Yamamoto^{*2}, M. Fukasawa^{*2}, D. Ambe^{*3}

^{*1} 九州大学応用力学研究所, Res. Inst. of App. Mech., Kyushu Univ.

^{*2} 海洋研究開発機構, JAMSTEC

^{*3} 九州大学総合理工学府, Interdiscip. Grad. Sch. Eng. Sc., Kyushu Univ.

Email: ichikawa@riam.kyushu-u.ac.jp^{*1}

Abstract:

Observations of ocean currents are first explained, then characteristic scales in time and space are exhibited from in-situ observational data. Comparing them with those of satellite gravity missions, possibility of observing deep-sea currents by satellite gravity missions is discussed.

1. 海流の観測について

海洋は、魚卵などの物質や熱量を運ぶことで地球環境における重要な役割を果たしているが、それを理解する上で最も基本となるのが海流の分布についての知識である。当然、海洋学の分野では、海流の分布を知るために様々な観測が行われている。

最も直接的な方法は、係留流速計を用いた現場観測である(Fig.1)。海洋には、風によって生じる吹送流や、潮流などの短周期の流れが顕著に存在していて、しかもこれらの流れを少量のデータから定量的に分離するのは難しいため、船舶などによる瞬間的な測流では海流の成分を正確に計測することができ



Fig.1: 係留流速計の例。Moored Acoustic Doppler Current Profiler (MADCP; 左)と、プロペラ型ロータの付いた Aanderaa RCM-8 (右)。

ない。このため、同じ場所に長期間流速計を係留させる係留系が必要となる。係留流速計の観測は、(予算が許せば)任意の場所の流速を直接測定できる利点がある。ただし、空間的に広域の分布を求めるためには、多数の係留系観測を長期間行わなければならないため、広域観測を行うことは事実上不可能である。

一方、近年はリモートセンシングを中心とした広域観測によっても、海洋の流速場の情報が得られるようになってきた。特に、海洋表面の流速場に関しては、HF レーダや海面高度計の活用によって、精度良く広域の流速場が記述できるようになっている。しかも、現状では海面流速の時間変動成分しか海面高度計で記述できていないものの、衛星重力ミッションによって海洋ジオイドの決定精度が向上することによって、時間平均も含めた絶対的な流速場の記述がやがて可能となり、海表面だけに限れば、非常に高い時空間分解能さえ求めなければ現場観測よりもむしろリモートセンシングの方が高精度の観測が行える可能性が高い。

ところが、逆に海洋表層以外では、リモートセンシングによる広域観測はあまり有効に行われていない。ここ最近になって、体積を調整することで水深2000m付近にまで自動的に沈降・浮上する ARGO フロート(Fig.2)が開発され、フロートが沈降してから再浮上するまでの位置の移動として、中層における流速を時間積分した距離の情報が得られるようになってきた。このため、中層の流速に関しては知見が増加しつつある。しかし、それよりも深い層については広域の流速の情報はなく、化学物質(トレーサー)の分布から流れを推定する定性的な方法が依然として主流である。

従って、もしも衛星重力ミッションによって本当に深層での海流が観測できれば、これまでにない新しい知見を海洋学にもたらすことは確実である。ただし問題となるのは、海底における質量変化という間接的な情報をもたらす衛星重力ミッションが、果たしてどの程度正確に深層流を計測できるかという点であろう。極端な話、前述の化学物質の分布による流速場の推定よりも誤差が大きいような観測であれば、あまり有効な知見を与えることにはならない。そこで本稿では、現場係留観測によって得られたデータから深層流の大きさや時間・空間スケールを見積もり、それを衛星重力ミッションの観測精度や時空間分解能と比較することで、衛星重力ミッションによる深層流の観測可能性について議論する。すなわち、衛星重力ミッションによる深層流の観測が、精度や時間スケールまで含めて、本当に有効な知見を海洋学に与えるのかどうかの見積もりを試みる。



Fig.2: ARGO フロート。自動で浮上して位置と密度プロフィールを衛星に送信し、再び沈降する。

2. 深層流の観測データ例

海洋研究開発機構地球環境観測研究センターと九州大学応用力学研究所は、北太平洋のウェーク

島東部通路に 2003 年の 5 月から 5 系の係留系を設置している(Wake Island passage Flux Experiment; WIFE)。この海域(Fig.3)は、北大西洋や南極で形成された深層水が南大洋から北太平洋に入る際に、ほぼ唯一大きく海底地形が開けている場所であり、比較的強い深層流が南東から北西へと流れていると期待されている。本稿では、このデータを用いて、深層流が実際にどの程度の大きさと時空間スケールで変動するのかを見ることにする。

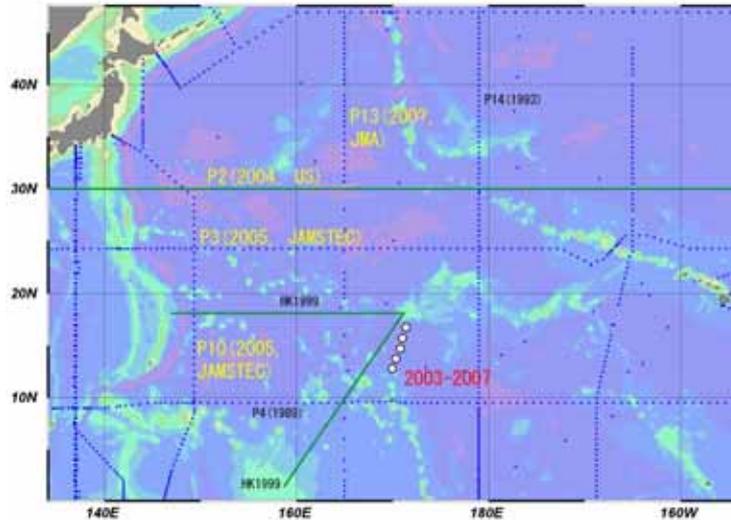


Fig.3: ウェーク島通路の係留系の位置(丸印)と、周辺の海底地形。

観測結果の例として、通路の中央に位置する係留系の地点で、海底直上約 100m に設置した流速計の時系列データを Fig.4 に示す。東西流成分と南北流成分を示す赤線

と青線がやや太めに描かれているように見えるのは、5 cm/s ~ 10 cm/s 程度の振幅の潮流による短周期変動が顕著に存在しているためである。単純な 48 時間移動平均によって潮流成分を落とした Fig.5 では、赤線と青線のそれぞれが、数十日 ~ 数ヵ月程度の変動を示しており、その変動幅は最大で 10 cm/s 程度で、およそ数 cm/s 程度のものが多いことがわかる。

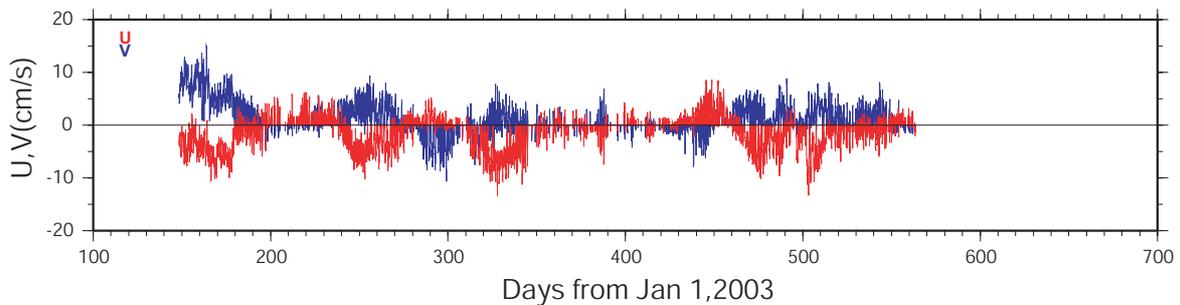


Fig.4: 中央の測点の海底直上約 100m(水深約 5500m)における流速計データの時系列。東西流成分(赤)と、南北流成分(青)を示す。

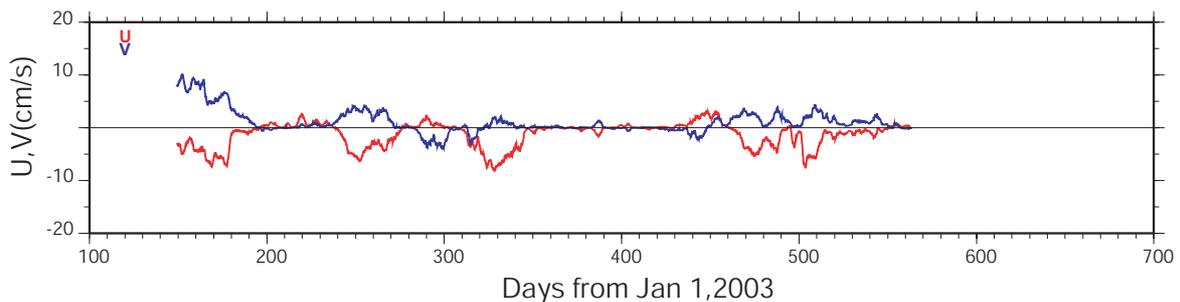


Fig.5: Fig.4 の時系列を 48 時間移動平均して潮流成分を除去したもの。

次に、空間的な分布がどうなっているかを確認する。Fig. 6 は、海底直上 100m の層に設置した流速計のベクトルの時系列を、各々の係留系ごとに示したものである。Fig. 5 で見た通路中央の流速計のデータは、Fig. 6 における 3 番のパネルに該当している。この図を見ると、どの測点でも数十日～数ヵ月程度の変動が存在しているという結果は変わらないものの、その変動には測点間に共通性がほとんどなく、100km 程度しか離れていない隣の係留系と大きく異なることが分かる。すなわち、この時間スケールの変動に関しては、すくなくとも WIFE の係留系で観測している海域では空間スケールが 100km 程度以下である可能性が高い。

なお、一番南側(番号 1)と北側(番号 5)の測点では、時間スケールが十日程度以下の比較的短い変動が他の測点よりも卓越しているようである。これらは、通路の端で海底地形の影響を受けているためだと考えられ、深層流は強く海底地形の影響を受けていることがうかがえる。

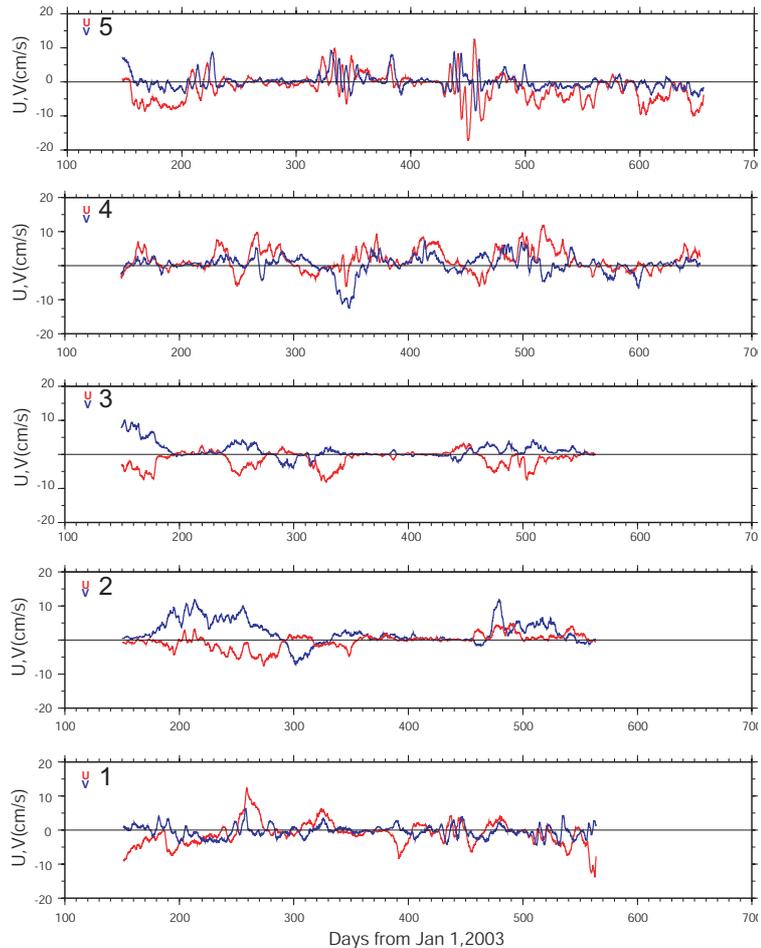


Fig.6: 48 時間平滑化した海底直上 100m の流速の時系列。数字は、南からの測点番号を示す。

3. 衛星重力ミッションによる深層流観測の可能性

衛星重力ミッションで深層流を計測する際の基本となるのは、海面高度計の場合と同様に地衡流平衡である。地衡流平衡とは、圧力傾度力とコリオリ力の釣り合いの状態をいい、流速がコリオリ力に比例するので、ある測線における圧力傾度から、その測線に直行する方向の流速を求めることができる。従って、衛星重力ミッションで測定される流速の時空間分解能は、圧力の観測の測点間隔や時間間隔となる。また、二測点間の圧力差は、この緯度では 10 cm/s の地衡流に対して 100km の距離で 3.8 cm の水位差に相当する量となる。

さて、GRACE の重力場観測における重力の時間変動データの分解能と精度を考えて、前節で紹介した深層流の時空間スケールとの大小を比較してみる。GRACE の約一ヵ月という時間分解能は、深層流の変動のうち、ある程度以上長周期の変動を捉えるには十分なスケールであろう。一方、空間分解能については、この時間分解能だと 300 km 程度となるが、前節の Fig. 6 で見てきたように数ヵ月程度の顕著な

変動の空間スケールは 100km 程度以下であることから、Fig. 6 で顕著に見られている時間スケールの現象は空間分解能が不十分で衛星重力ミッションによる深層流観測では記述できないと考えられる。逆に、GRACE の空間分解能である 300km の距離に相当するのは隣り合う三つの係留測点となるが、Fig. 6 では三点に共通した変動成分の流速変動幅は非常に小さいと考えられるため、それを精度良く観測するための重力場の観測精度も高くなければならない。例えば、300km スケールの流速変動幅が 1 cm/s (0.1 cm/s) のオーダーであったとすると、300km 離れた測点間の水位差は 1.1 cm (0.1 cm) となる。衛星重力ミッションで海洋の質量変化の情報だけを、さまざまな補正の後にどれだけ正確に取り出せるかが問題となるが、大きな空間スケールでの変動幅が小さいことを考えると、困難が予想される。

なお、深層流が海底地形の影響を強く受けることを考えると、大きな空間スケールで広範囲を深層水が流れているような海域は少ないため、今回見た WIFE の海域以外でも共通して空間分解能が粗すぎるという結論が成立すると考えられる。すなわち、衛星重力ミッションでは、深層における流速の値そのものの分布を正確に把握するのは難しいと考えられる。ただし、通過流量として測線沿いに流速を積分する場合には、細かい空間スケールの現象を平滑化して大きな空間スケールの現象のみに注目することになるので、どれだけの量の深層水が南北に輸送されているのか、といった問題は衛星重力ミッションの観測データで議論の対象とすることができると考えられる。

4. 議論とまとめ

ウエーク島東部通路の WIFE の現場係留系観測データから見積もった深層流の時空間スケールや変動幅を考慮して、衛星重力ミッションによる深層流観測の可能性について考察した。衛星重力ミッションでの重力場の変動観測は、時間分解能に関しては深層流の変動の多くを表現できるが、海底地形に強く拘束される深層流をとらえるには、空間分解能は十分とは言えない。ただし、ある断面を通過する深層水の積分流量を考えるような場合には、小さな空間スケールの現象は平滑化されるので、衛星重力ミッションでの深層流観測は有意義であると考えられる。

なお、海洋だけに限ったものではないが、現場観測にはトラブルが常である (Fig. 7)。特に海洋の係留系の観測の場合、高価な観測機器を海の底に沈めるので、回収時に浮上しなければ、全ての観測機器が二度と海底から戻ってこない。その意味ではかなりリスクが大きい観測であり、空間代表性が小さいのを埋め合わせるために多数の系を展開するのは現実的に不可能である。従って、WIFE 観測域のように、深



Fig. 7: 海洋係留観測中のトラブル例。漏水による腐食(左)や、水圧による浮力ブイの破裂(右)。

層水の移動において特に重要な海域のみを重点的に時空間分解能を上げて計測する場合に係留系を用い、全域の分布のパターンを確認するためには、係留系を展開するのではなく、衛星重力ミッションと化学トレーサーのデータを組み合わせて使用するのが最も現実的な用法だろう。

ところで、地衡流の関係式を鉛直微分し、静水圧平衡を仮定すると、流速の鉛直シアと密度の水平微分についての等式となる(温度風の関係式)。この関係式は、密度の鉛直断面の水平的な変化がわかれば、流速の鉛直的な変化が推定できることを意味している。つまり、密度場の分布と、ある層における流速がわかっているならば、その層の流速を鉛直に展開して、上層から深層まで海流を求めることができる。実際、海洋観測においては、深層での流速を近似的に 0 として(無流面仮定)、密度場の分布のみから上層の流速を求めることがよく行われている。これは、深層の流速が上層に比べて十分小さいためと、密度場の観測が比較的豊富にあるためである。海洋の密度場は、水温と塩分(と圧力)のみで決まるが、これらは比較的観測が容易である。また、一般に潮汐などの短周期の変動は成層した密度場を変えない順圧的な応答をする傾向があり、逆に、密度場は(傾圧的な)長周期の変動を反映する傾向がある。このため、船舶などで瞬間的に密度場を観測しても短周期変動の影響を受けにくく、流速場の場合のように長期間の係留が必要にならない。すなわち、密度場は係留系に比べれば、やや広域を若干頻繁に観測することができるのである。

さて、第 1 節でも述べたように、衛星重力ミッションでは重力場の時間変動成分を求める以外に、精度の良いジオイドを提供するという点で海洋学に多大な貢献をすると期待されている。もしも、海面高度計と改良ジオイドの組み合わせによって、海面での流速が精度良く求まるのであれば、密度場の分布から計算される流速の鉛直シアを、海面での流速を参照して鉛直積分していくことで、全層での流速を求めることができることになる。この場合に、深層流がきちんと求められるためには、(海面高度計や密度場観測の誤差が無視できるとして)改良ジオイドの精度が深層流を求めるのに十分な精度であることが必要になる。前々節の議論によると、卓越した数ヶ月周期の深層流の空間スケールは 100km 以下で、振幅は数 cm/s 程度になるため、ジオイドが 100km で 3cm 程度以下の勾配が求まるような精度で決定できることが望ましい。重力の時間変動場で考える場合よりも、平均場であるジオイドの方がデータの蓄積ができて精度向上が期待できる分だけ、衛星重力ミッションのデータのみから深層流を観測するよりも、ジオイドモデルの精度向上を通じて、海面高度計データと密度場観測データから深層流を求めるという方法の方が現実味をおびているかもしれない。