

非主要分潮が時刻固定のフェリー観測に与える影響 について

市川, 香
九州大学応用力学研究所

元村, 和史
九州大学大学院総合理工学府

岩清水, 徳堂
名古屋大学院環境学研究科

森本, 昭彦
名古屋大学水循環研究センター

他

<https://doi.org/10.15017/1526196>

出版情報：九州大学応用力学研究所所報. 146, pp.137-141, 2014-03. Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

バージョン：

権利関係：

非主要分潮が時刻固定のフェリー観測に与える影響について

市川 香*1 元村和史*2 岩清水徳堂*3 森本昭彦*4 福留研一*5 尹 宗煥*1

(2014年1月31日受理)

Effects of the minor constituents on time-fixed ferry observations

Kaoru ICHIKAWA, Kazushi MOTOMURA, Noritaka IWASHIMIZU,
Akihiko MORIMOTO, Ken-ichi FUKUDOME and Jong-Hwan YOON
E-mail of corresponding author: ichikawa@riam.kyushu-u.ac.jp

Abstract

The seasonal sea surface height variation in the Tsushima Strait in 2011 winter was reported to be properly observed by the GPS on the ferryboat "New Camellia", but larger variations in the eastern channel were found, which are inconsistent with the other observations. By replacing the 4-constituent tidal model to the 8-constituent one, this inconsistency was modified. Spatial variations of the relatively minor P_1 and K_2 constituents, which are aliased as long-term variations by the daily sampling, result in the pseudo signal in the eastern channel.

Key words : P_1 and K_2 tidal constituents, GPS, the Tsushima Strait, Eastern and Western Channels

1. はじめに

潮汐は、季節変動と並んで海洋中で最も大きなエネルギーを持つ現象の一つであり、特に浅海域では海況を支配する最大の要因であると言える。陸上に生活する人類にとっても潮位の変化は認識しやすかったため、潮汐に関する研究は古くから行われてきた。天体による起潮力に対する静力学的な応答と、それから励起される浅水重力波の伝搬と沿岸地形による固有振動共鳴によって、潮汐信号はある程度体系だった説明ができたため、海岸沿いの検潮所の潮位変化が説明できるような沿岸潮汐モデルが作られると、研究の対象は潮汐そのものから離れ、潮汐混合のエネルギーなどに移っていった。

ところが、1990年代に衛星海面高度計によって外洋の海面の高さの変化が高精度に直接計測されるようになると、外洋潮汐の理解が大幅に進むようになり、潮汐のモデルとしては、むしろ外洋の方が精度が高いものとなった¹⁾。結果として、海岸線からやや離れた浅海域である縁辺海などの近海領域における潮汐の理解が最も遅れることになった²⁾。これは、衛星海面高度計による疎らなサンプリングでは、水深の深い外洋域に比べて空間スケールが小さくなる浅海域の現

象の全貌を把握しきれないためである³⁾。実は、観測網の分解能が現象の時空間スケールに対して不足するという問題は、衛星海面高度計による潮汐の観測に限らず、船舶現場観測を含めて、多くの観測に関して当てはまる⁴⁾。

こうした問題を解決するために、沿岸・縁辺海に特化した高分解能の衛星海面高度計 COMPIRA などが計画されている⁵⁾。さらに、こうした高分解能の海面高度観測にいち早く対応するために、対馬海峡を往復するフェリー「ニューかめりあ」に高精度の GPS を搭載して、沿岸海面高度の高分解能計測が既に始められている(図1)^{5, 6)}。

先に報告した高精度 GPS による対馬海峡の2011年冬季の海面高度の計測結果⁶⁾を見ると、対馬海峡の冬季の流量現象にともなう海面高度変動は、釜山と博多間の潮位計で見た水位差の変動と比べて、およそ対応が取れた結果となっていた。ただし、西水道と東水道の時間変化率を比べると、従来変動が小さいと考えられてきた東水道が、海峡全体に匹敵する程大きく変化するという結果が出ており(図2)、さらなる検討が必要とされていた。

同じフェリーに搭載された ADCP 流速計の計測結果のみならず、海面の流速を計測する海洋レーダの計測結果を見ても、東水道の流量減少の方が大きくなるという結果は支持されなかった。このため、これは GPS 計測処理に固有の誤差が要因であると考えられる。GPS のデータ処理には、気圧や船体動揺など依然として補正がじゅうぶんでない要因を含んでいるが、最大の誤差要因は潮汐補正である。前報⁶⁾においても、名古屋大学地球水循環研究センターが開発し

*1 九州大学応用力学研究所

*2 九州大学総合理工学府

*3 名古屋大学院環境学研究所

*4 名古屋大学水循環研究センター

*5 水産総合研究センター 日本海区水産研究所

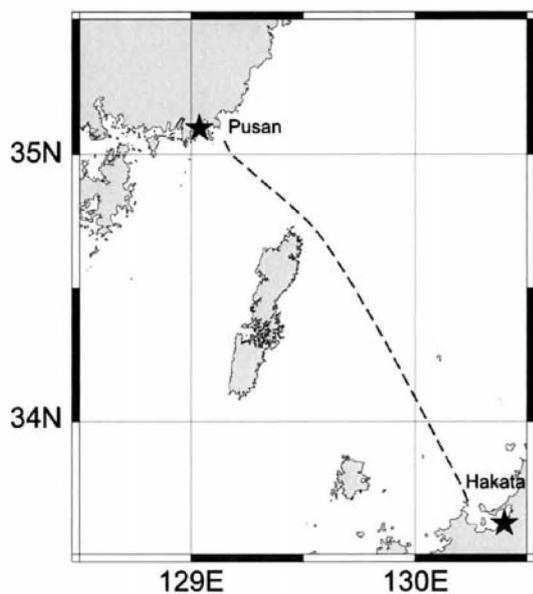


Fig.1 Ferry track of “New Camellia”, and the positions of tide gauge stations.

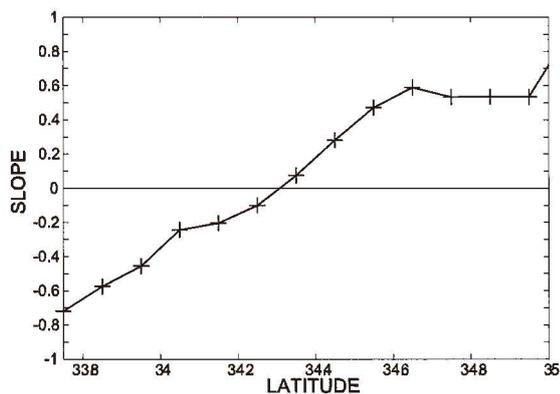


Fig.2 The slope of the regression line between the sea level difference between Pusan and Hakata and the 14-day-averaged GPS sea surface height anomaly along the night-time ship track with the 4-constituent tidal model corrections⁶⁾. The spatial difference between 34.7°N and 33.75°N accounts 0.6-(-0.7)=1.3 times of the whole channel between Pusan and Hakata.

た東アジアの浅海域に特化した局所潮汐モデル(森本, 私信)を用いて潮汐信号を除いているが, それでも残余があり, これを除去するために14日間の時間平滑化を行う必要があった。そこで, 本報では, 局所潮汐モデルを取り換えて再計算を行い, 特に, 比較的弱い分潮である P_1 や K_2 分潮の影響について論じる。

2. 潮汐モデルの変更と季節変動の再現性

使用した局所潮汐モデルは, $1/36^\circ$ 格子の1層の Princeton Ocean Model に, 韓国・中国・日本の沿岸の潮位計測から算出した調和定数と, TOPEX/POSEIDON, Jason-1/2 の海面高度の時間変動を同化したものである。前報⁶⁾では, M_2 , S_2 , O_1 , K_1 の主要4分潮を推定したものをを用いた。本報では, これに Q_1 , P_1 , K_2 , N_2 の4分潮を追加して8分潮を推定した結果を用いる(図3)。図3aで明らかのように, 対馬海峡のほぼ全海域において M_2 分潮が支配的であり, それに続く S_2 分潮とで全体の2/3以上の変動が説明できる。今回追加した4分潮は, どの地点でもすべて10cm以下の振幅であった。

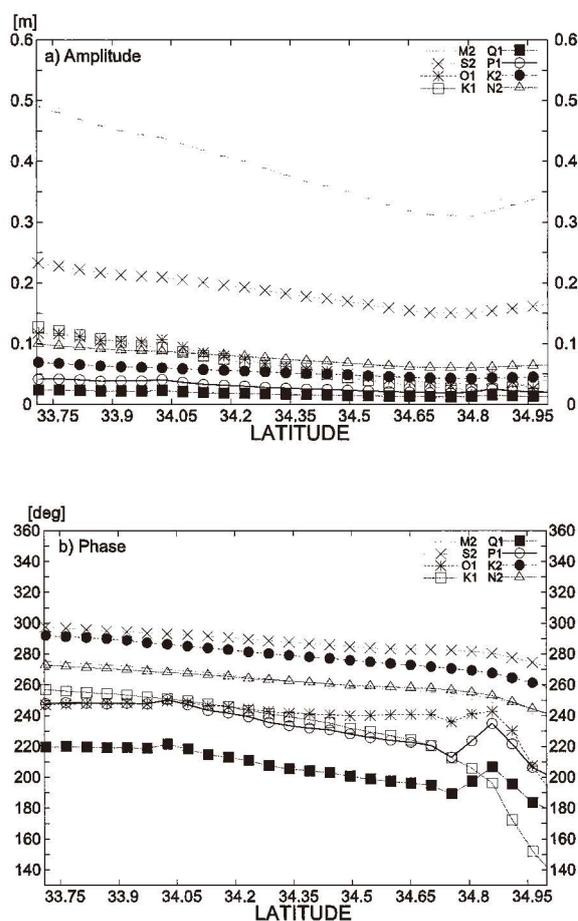


Fig.3 The amplitude (a) and phase (b) of each tidal constituent along the ship track.

図2は, 主要4分潮の潮汐補正をしたGPS海面高度の2011年10月~2012年1月の冬季の3ヵ月間の夜間の(釜山から博多へ向かう)航路沿いの各点での変動(ただし, 潮汐補正の残余を軽減するために14日平滑化したもの)と, 対馬海峡全体の水位変動の指標として用いる釜山と博多の

検潮所の水位差の変動との近似直線の傾きを示したものである。博多と釜山の検潮所の潮位計データは、前報に引き続き、日本の気象庁と、Korea Hydrographic and Oceanographic Administrationより提供して頂いた毎時データをそれぞれ用いる。48時間のTide Killerフィルター⁷⁾を用いて潮汐信号を除去し、日平均して毎日の海面力学高度成分を抽出した。ただし、前報⁶⁾では博多の潮位データの処理に問題があつて、潮位差に熱膨張によるステリックハイトの成分が含まれていて海峡全体の水位差を過大評価していることが判明したので、本報ではそれを修正してある。

対馬海流の東向き流速は、地衡流の関係より北部が南部に比べて海面高度が低いことを意味しており、博多から見た釜山の水位は低い状態にある。冬季には対馬海流の流量が減少する傾向があるため、海峡全体の水位差は小さくなり、博多から見た釜山の水位は相対的に上昇するようになる。図2で各点の水位変化の特徴を見ると、航路の北部ではこれと同じ符号の、つまり時間とともに水位が高くなる傾向を示し、南部では逆に水位が低くなる傾向を示している。例えば東海峡に相当する33.75°Nから34.7°Nまでの水位差を考えると、北部の上昇と南部の下降の影響を受けて、もともと南側が高かった水位差が小さくなっていることがわかる。ただし、その変動幅は対馬海峡全体の変動に対して0.6-(-0.7)=1.3倍の大きさとなり、これは明らかに大きすぎる。

そこで、次に潮汐補正を8分潮に拡張し、同じ処理をして近似直線の傾きの分布を求めたところ、東海峡の変動は大幅に軽減した(図4)。33.75°Nから34.7°Nまでの水位差の変動は、対馬海峡全体の変動に対して0.3-(-0.1)=0.4となり、これまでの知見と矛盾しない結果となった。

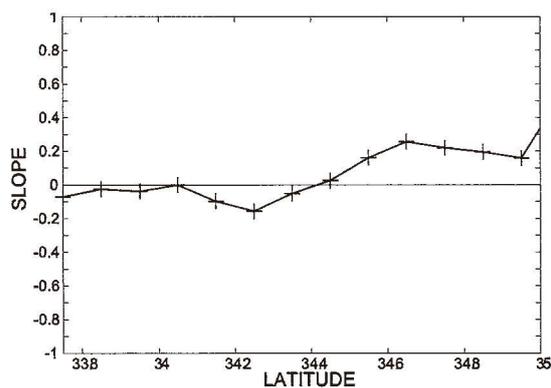


Fig.4 Same as Fig.2, but with the 8-tide constituent tidal model corrections.

3. 非主要分潮の影響について

追加した4分潮の振幅は比較的小さく、さらに14日の時

	Period	Aliased Period	
	[hour]	[day]	
Major	S ₂	12.000000	∞
	M ₂	12.420601	14.79
	O ₁	25.819341	14.19
	K ₁	23.934469	365.24
Additional	Q ₁	26.868356	9.36
	P ₁	24.065891	365.24
	K ₂	11.967235	182.62
	N ₂	12.658348	9.59

Table 1 Periods of the 8 tidal constituents and their aliased period by 24-hour sampling.

間平滑化までが施されているにもかかわらず、潮汐モデルの変更によって図2と図4の結果は大きく異なるものとなった。本節では、この理由を検討する。

14日の平滑化の影響を受けていないことから、新しく加えた4分潮に起因する信号ではありながら、長周期の性質を持っている信号が原因であることが想定される。実は、これは、時刻が固定された24時間周期のフェリー観測でのサンプリングによって、エイリアシングが生じて見かけ上の長周期信号が作られたためだと考えられる。実際、表1に示すように、新しく追加したQ₁, P₁, K₂, N₂分潮のうち、P₁とK₂は24時間間隔のサンプリングによって非常に長周期の信号となって認識されるため、14日程度の平滑化を施しても影響を受けない。

これをより視覚的に示したのが図5である。これは、フェリー航路の観測北端である35.0°Nと南端である33.75°Nで、フェリーが通過する時刻におけるM₂分潮とP₁分潮の値を例として時系列でプロットしたものである。振幅の大きいM₂分潮は、14~15日周期の周期的な信号となっており、従ってその残差もこれに準じた周期性のある信号となるため、14日の時間平滑化によってほぼ消えてしまう。一方のP₁分潮は、振幅ははるかに小さいものの、非常に長周期の時間変動をしており、14日程度の平滑化を施しても一切影響を受けない。しかも、空間的に位相に違いがあるため(図3b)、北端(図5a)では時間的な変化がほとんどないのに対し、南

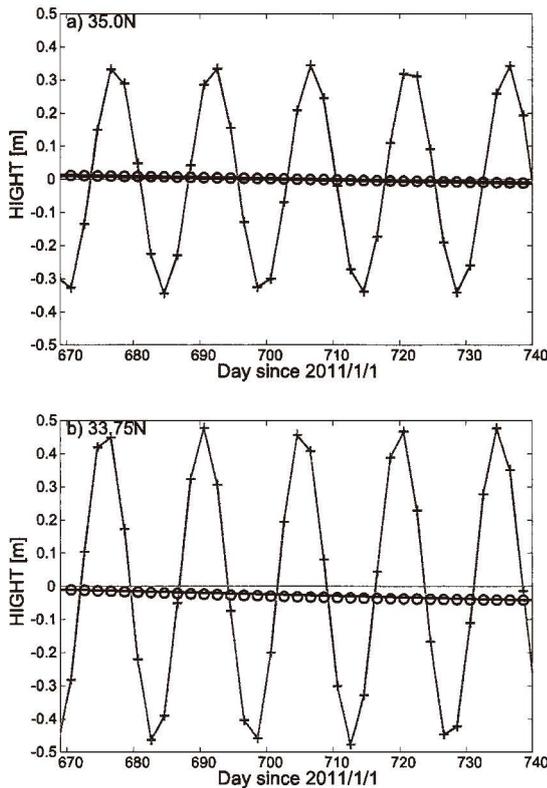


Fig.5 The daily-sampled M_2 (gray crosses) and P_1 (open circles) tidal constituents at 35.0°N (a) and at 33.75°N (b).

端(図 5b)ではゆっくりと海面が低下する傾向を示す。

主要 4 分潮の潮汐モデルを用いた図 2 の結果には、こうした P_1 や K_2 分潮などの影響が補正されずに含まれていることになる。この結果、8 分潮を使った図 4 に比べて、対馬海峡の南側にあたる東海峡の冬季の水位低下が過大評価されていたと考えられる。 P_1 分潮や K_2 分潮自身は振幅で数 cm 程度しかない小さな信号ではあるが、水位差の季節変動自身が 10cm のオーダーの信号であるため、非主要分潮といえどもその効果を適切に除かないと、水位差の季節変動のような長周期で弱い信号の見積もりには大きな影響を及ぼすことがわかった。

4. 議論とまとめ

2011 年冬季の対馬海峡における高精度 GPS による海面高度変動の計測について報告した前報⁶⁾において、東水道の変動が過大評価されるという問題点が指摘されていた。これを検討するために、東アジアに特化した局所潮汐モデルを 4 分潮から 8 分潮に拡張して適用し、その結果の違いを検討したところ、8 分潮を用いて補正した結果には、東水道

の変動の過大評価は現れなかった。

4 分潮の追加によって東水道の過大評価の補正に効果があった。つまり、東水道の過大評価は、これらの追加した 4 分潮に起因していたと考えられる。しかし、追加したのは主要分潮に比べてずっと振幅の小さい 4 分潮であり、しかも 14 日の時間平滑化によって潮汐信号の残余を軽減する処置まで施されている。このような条件下で、どのように非主要分潮が結果に影響を及ぼしたのかを検討した。

フェリーのように時刻が固定した観測の場合、ある場所のサンプリング間隔は 24 時間間隔に固定されてしまう。このとき、 P_1 分潮と K_2 分潮は、それぞれ年周期と半年周期に近い、非常に長周期の信号にエイリアシングされるため、14 日程度の時間平滑化はほとんど何の効果もない。さらに、海峡の南部と北部で位相や振幅に空間的な違いがあると、水位差を考える際には有意な差として検出されうる。対馬海峡の水位差の季節変動自体がもともと小さい変動幅なので、たとえ非主要な分潮であっても、その影響は無視できない可能性がある。

エイリアシングは、フェリーの観測に限らず、サンプリング間隔が長くナイキスト周期が潮汐周期よりも長くなる観測の場合すべてに共通して生じる。例えば約 10 日に一度しか観測できない直下型の衛星海面高度計 TOPEX/POSEIDON (T/P) や Jason-1/2 のようにサンプリング間隔が長いと、エイリアシング周期も長くなる。ただ、潮汐のエイリアシング周期を初めから考慮してサンプリング周期を決めた T/P や Jason-1/2 では、 K_1 分潮の 173 日という例外を除けば、ほとんどの主要分潮のエイリアシング周期が 45~90 日程度の周期帯に集まるため、潮汐の残差によって汚染される帯域も限定される。これに対して時刻固定の毎日のフェリー観測の場合、エイリアシングされた周期が約 10 日程度から年周期程度までと幅が広く(表 1)、しかも海洋変動自身のエネルギーの高い年周期や半年周期の変動が汚染されるため、より深刻な問題となる可能性が高い。ちなみに、現在の解析では日中の活発な対流圏・電離圏活動による GPS 測定の誤差を避けるために夜間の航路のみを解析対象としているが、往路と復路の両方のデータを同時に使用することができれば、エイリアシングの問題は軽減されると考えられる。

今回の解析では、東水道の変動が過大評価されていたのを潮汐補正の分潮を増やすことで修正されたが、逆に、西水道の変動が従来の知見よりも過小評価気味な点については、図 2 から図 4 への変更でも改善されていない。これは、例えば、当初の図 2 の主要 4 分潮の補正の段階で、唯一長周期にエイリアシングされている K_1 分潮が西水道において推定精度が悪かったために、新たに 4 分潮を追加しても変化が出なかったという可能性が考えられる。実際、 K_1 分潮の位相は西水道で急激な変化(図 3b)を示しており、非常に複雑な空間構造をしている可能性があり、このためにこの海域の推定精度が低かったのかもしれない。解析期間を

延ばすなど、引き続き解析を続ける必要がある。

謝辞

本研究は、特別教育研究経費「地球温暖化と急激な経済発展が東アジア域の海洋・大気環境に及ぼす影響の解明」の支援を受けている。

参考文献

- 1) Matsumoto, K., T. Takanezawa and M. Ooe, *J. Oceanogr.*, **56** (2000), 567-581.
- 2) Morimoto, A., *J. Oceanogr.*, **65** (2009), 477-485. 市川, *海の研究*, **23**(1) (2014), 13-27.
- 3) 岡・磯辺・市川・升本・須賀・川合・大島・島田・羽角・見延・早稻田・岩坂・河宮・伊藤・久保田・中野・日比谷・寄高, *海の研究*, **22**(6) (2013), 191-218.
- 4) 市川・福留・尹, *九州大学応用力学研究所所報*, **143** (2012), 129-133
- 5) 市川・元村・福留・尹, *応用力学研究所所報*, **145** (2013), 93-97.
- 6) 花輪・三寺, *沿岸海洋研究ノート*, **23**(1) (1985), 79-87.