

慣性流や海陸風による吹送流の算出に関する試み —沿岸域で定点測定した15日間データの活用—

安田秀一

Estimation of inertia currents and drift currents due to the coastal wind (the land and sea breeze) from the fortnight data of tidal currents

Hideichi Yasuda

Although we know that harmonic constants of the four main tidal components, M2, S2, O1 and K1, can be given by the 15 day data of tides or tidal currents, this study shows that oscillatory components except the four components can be newly obtained from advancement of the data processing in which the residual data is prepared by elimination of the four components. Current data analyzed here was measured at the multi-levels of the stationary station in the Suounada sound, the Seto Inland Sea where water motion is induced by wind besides tides because the sound is rather wide and shallow. The inertia current obtained here is fairly accurate compared to the N2 component. It is noteworthy that the drift current due to the land and sea breeze has been analyzed though its period is almost equal to the K1 component eliminated in the residual data. This analysis was possible because the diurnal oscillatory breeze changed in direction in the duration of this experiment.

Key word : Inertia current, Drift current, Land and sea breeze, Harmonic analysis

ASFA : 02170, 2010, 2090

はじめに

潮汐現象が顕著な国内の沿岸海域においては、一般的に主要4分潮(O1, K1, M2, S2潮成分)に引き起こされる潮流が卓越しているとして、それらを分析するために定点で15日間の潮流観測をすることが多い。5番目に大きい分潮としてN2潮成分を取り上げることもあるが、通常の調和解析では、15日間のデータからN2潮成分を取り出すことは困難で、N2潮の大きさを知るためには少なくとも30日間の観測が必要であるとされている。しかしながら、沿岸海域では、船舶の航行が頻繁で観測機材のセンサー部も汚れやすく、長期間係留系を設置してデータをとることは、事故の虞とセンサー部の保守点検の予算負担などから非常に困難となり、沿岸海域の研究調査機関のデータも30日間に比較して15日間のものがかなり多くなっ

ている。このようなことから、海上保安庁からは15日間のデータを基にN2潮成分を算出する方法が提案されているが¹⁾、これは潮汐から得られた遅角(位相遅れ)が適用できるなどの仮定を前提にしている。潮流の場合は、海底近傍や陸岸の摩擦の影響を受けることによって位相は大きくずれることもあり、さらに潮流は非線形効果が大きいため、潮位のように一次の関係で扱える条件はかなり限られてくる。本研究の調和解析の主な目的は、実用的な予報値を導き出すことではなく、沿岸海域の流れのメカニズムを明らかにすることにあることにある。本報では、N2潮も主要4分潮と同様に調和常数(振幅と位相)を求める対象として、海上保安庁方式とは別な手法によって、15日間の潮流データからN2潮成分を導き出す方法を提示し、その精度と15日間データから導かれた主要4分潮の精度についても改めて検討をする。また、この手法の検討・考察を基

2007年4月5日受付. Received April 5, 2007.

水産大学校 水産情報経営学科 (Department of Fisheries Information and Management, National Fisheries University)

別刷り請求先 (corresponding author) : yasuda@fish-u.ac.jp

に、これまで沿岸海域ではあまり対象とされることのなかった慣性流を導き出しその精度と振舞いを考察する。さらに、この手法を応用して、これまで現地データからはほとんど検討されることのなかった海陸風に起因する吹送流の分析を行い、その整合性についても検討を加える。

解析手法

海洋の潮流成分を導き出すために用いられる主な調和解析法として、最小自乗法とフーリエ解析法が知られている。両解析法に関しては中野猿人の著書の中に丁寧に記されており²⁾、小田巻は最小自乗法についてさらに詳細に解説している¹⁾。フーリエ解析法は応用数学のフーリエ級数展開を離散値に適用したもので、結果的には両解析法は同じ計算をしており、分解能などの精度もほとんど変わらないといえるが、最小自乗法の場合は位相が既知となっている場合には任意の周期の振幅も求められるという長所がある。しかしながらフーリエ解析はスペクトル解析と同様に、分解能の条件が満たされていれば未知の振動成分の解析にも適用することができる³⁾。また、フーリエ解析による調和解析からは、スペクトル解析とは違って有限のデータを前提にしていることから、データ解析期間を適切に設定すれば得られた結果の精度は高く、観測データ毎の振動成分の比較も可能である。本研究の調和解析の目的は、実用的な予報値を出すことではなく流れのメカニズムなど海洋現象の解明にあることから、フーリエ解析法による調和解析を通して新たな振動成分の分析を試みた。

15日間の潮流データからは、一般的に、M2 (12.4206)、S2 (12.0000)、K1 (23.9345)、O1 (25.8193) の潮流成分の振幅と位相が求められている。カッコ内の数値はそれぞれ振動周期 (単位は時間) で、これに含まれないN2潮流成分の周期は12.6583時間である。調和解析から振動成分を精度よく求めるためには、データの期間長が振動周期の整数倍に近い必要があるが、15日間(360時間)は、M2、S2、K1、O1、N2の各分潮周期の、28.9841倍、30倍、15.0411倍、13.9430倍、28.4397倍となっており、N2潮流成分以外の4分潮は整数倍に近くなっている。また、M2潮とN2潮の数値に注目すると、M2潮はほとんど29倍といえるが、N2潮は29倍と28倍のほぼ中間となっており、このことは、N2潮の存在がM2潮の調和常数にも影響を及ぼすことを暗に示している。この件については後の精度に関する議論のところでもさらに詳しく述べる。なお、30日間のデータであればN2潮流周期の56.8795倍となって整数倍 (57倍) に

やや近くはなり、小数点以下のところで0.12ポイントの違いが残っているものの、M2潮は58倍となって、解析結果がお互いに干渉しあうということは少ないと思われる。このように30日間のデータは15日間のものに比べて優れているが、一般的には15日間データからは主要4分潮が取り出せるとされている。また上にも述べたような理由で、潮流に関しては15日間の観測が多いことから、本研究では15日間のデータから得られる主要4分潮やN2潮、慣性流、吹送流などの解析結果の妥当性や精度について検討する。

対象とした15日間潮流データは、2005年の夏に実施した周防灘豊前海における定点係留観測⁴⁾のもので、解析に際しては、まず1時間毎の生データを作成し、4分潮の調和常数 (振幅と位相) を求め、15日間の生データから4分潮を差し引いて残渣データを作成した。この残渣データにはN2潮流成分が残っているが、周期が近く振幅の大きいM2潮流成分がすでに取り除かれていることから、データ期間を適切に定めることによってN2潮流成分を取り出すことができるのではないかと考えられる。なお、本報においては、元のデータを「生データ」、それから主要4分潮を取り除いたものを「残渣データ」と呼ぶ。

この方法による解析で、どの程度の精度の調和常数が求められるかを把握するために、まず初めに、長期間のデータが利用可能な潮位を解析して精度の高い調和常数を求め、次にその中の15日分を取り出して、今回の解析手法から求めた調和常数の精度について検討した。潮位の調和解析においては、多くの潮流成分を精度よく求めるためには369日分のデータが望ましいとされているが²⁾、N2潮流成分はその場合でも精度が悪く、5年分 (369日×5) のデータを用いることによって多くの複合潮流成分も含めてN2潮流成分も高い精度で得られることがわかっている³⁾。ここでは、報告3) で用いた有明海の大浦の潮位データ (海上保安庁日本海洋データセンターJODCから引用) を取り上げるが、期間は1998年1月1日0時から5年間 (369日×5) とした。この期間はM2潮流成分がf値の影響によって一定の割合で減少する時期で、比較に用いる15日間データは、その中間にある2000年8月20日からの15日間分とした。それによって、5年分のデータと15日分のデータの比較においてはf値の影響はほとんど考慮する必要がないと考える。

主要4分潮 (M2、S2、K1、O1) の大きさを他の潮流成分と比較して明確にするために、Fig. 1に5年分の調和解析で得られた日周潮周辺と半日周潮周辺の振幅分布を横軸に振動周期を与えて描いた。このデータ期間はほとんどの潮流成分の整数倍に近く、各潮流成分はお互いにうま

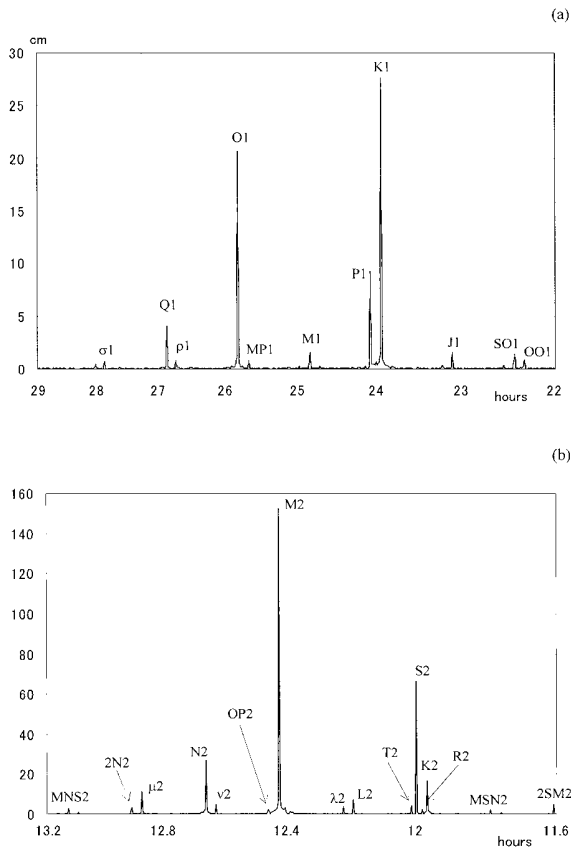


Fig. 1. Amplitude profiles with a tidal period at Oura given by the harmonic analysis of 5-year data. (a) diurnal tidal components and (b) semi-diurnal tidal components

く分離（スプリット）されていることから、各潮汐については精度の高い振幅が得られているはずである。特に主要4分潮は、他の潮汐成分とも明瞭にスプリットされており、調和分解の精度は高いといえる。つまり、ここに示される主要4分潮は、f値の影響は含まれてはいるが、有明海大浦における精度の高い振幅を提示していると判断する。

さて、後でも示すような精度の問題はあるが、一般には潮汐潮流は15日分のデータがあれば主要4分潮を求めることができるかとされている。Fig. 2は、前述の2000年8月における15日間の大浦の生の潮位変動と主要4分潮の合成値、および、生データから合成値を差し引いた残渣データを描いたものである。この図によると残渣データには半日周期程度の振動成分がきれいに残っているが、すでに主要4分潮を取り去っていることから、この振動成分は主にN2潮成分からなるのではないかとと思われる。N2潮の周期は12.6583時間であることから、整数倍に近い時間として240時間を取り上げると、N2潮周期の18.9599倍となり、残渣データから240時間分を用いることによって、N2潮成分が高い精度で得られるのではないかと考えられる。

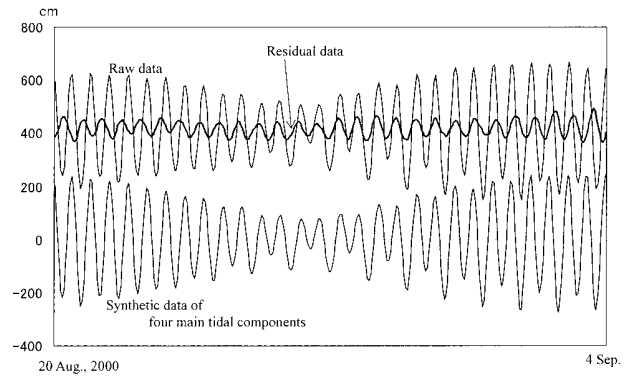


Fig. 2. Variations with time of the raw data, the compound data of four main tidal components and the residual data of tidal level at Oura in the Ariake Sea.

Fig. 3は、残渣データの8月20日0時から240時間分をフーリエ解析法で調和解析したときの振動成分毎の振幅を、Fig. 1と同様にスペクトル表示のように描いたものである。これによると、N2潮のピークは明瞭に現れているが、さらにQ1潮（周期26.8684時間）のところにもピークが現れている。240時間はQ1潮の周期の8.9324倍で整数倍に近くっており、有意な値を出しているものと思われる。

Table 1は、このようにして求めた主要4分潮（360時間分の生データから）およびN2潮成分とQ1潮成分（240時間分の残渣データから）の振幅を、5年分のデータから求めた精度の高い各分潮の振幅と比較できるように表した。比較のために、2000年8月20日から30日分の生データの解析によって得られた各潮汐成分の振幅も記載した。これらの数値を観ると、一見よく対応しているようにも見えるが、15日データのものの方が全体的に大きくなるなど、ある程度の相違を認めざるを得ない。特に最も優勢なM2潮成分の振幅が5年分の解析結果に比べて5%程度も大きくなっており、精度を上げるためにf値補正をすることの意

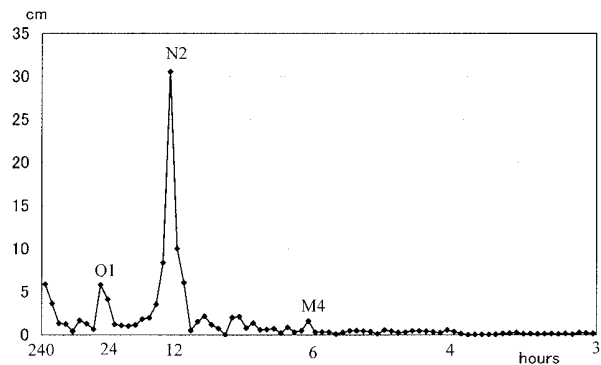


Fig. 3. An amplitude profile of tidal level at each tidal period which is given by the 240 hour residual data of tidal level at Oura.

Table 1. Comparison of the amplitude of tides at Oura among fortnight, monthly and five year data.

	15 day-data	30 day-data	5 year-data
O1	23.25 cm	19.84 cm	20.74 cm
K1	24.79	22.20	27.63
M2	160.88	151.26	152.38
S2	83.74	78.25	66.37
Q1	5.83	6.15	4.17
N2	30.55	26.83	27.26

義も問われかねない。ここで、このような違いの理由を15日間データの妥当性も検討しながら推測できる範囲で記しておく。

まずM2潮が15日データの方で大きい理由については次のように考える。360時間（15日間）のデータにおいては、M2潮は29番目の振動成分に相当し、N2潮は28番目と29番目の間に相当する。このため、N2潮成分はうまくスプリットされず一部がM2潮に取り込まれ、結果的にM2潮成分が5年分のものに比べて精度が悪くなって現れたと考える。大きくなるか小さくなるかについては、M2潮とN2潮のお互いの位相で決まることになる。なお、ここで用いる“スプリット”とは、データ期間を潮汐成分の周期で割ったときの値が1以上あってお互いのFourier係数に与える影響が少ないことを意味する。30日分データの場合にはM2潮とN2潮はスプリットされて5年分のデータの場合に近い値となっている。

次にS2潮において15日データのもの大きい理由は、360時間では分離できないK2潮がスプリットできず含まれてしまったため、30日分でもK2潮はスプリットできないためにこのように異なった値になったと考えられる。

K1潮についてもP1潮（24.0659時間）がスプリットされず、さらに夏に大きく現れやすい気象潮（S1潮周期）の影響でK1潮の誤差を大きくしたものと思われる。S1潮とスプリットしてK1潮を導くには1年分のデータが必要となる。従って、30日分の場合でもずれは大きくなっている。

O1潮が15日データで大きくなっている理由は、15番目の振動周期成分であるK1潮の隣（14番目）にあって十分にスプリットされていないため、30日分データの場合にはK1潮とは十分にスプリットして5年分のデータのものに近い値となっている。

N2潮が大きい理由は、N2潮を十分にスプリットする

ことができずに、N2潮の影響も含んで得られたM2潮を差し引いたことによって、ここでは大きいN2潮が残ったのではないかと推測する。

Q1潮が大きい理由は、P1潮（26.7231時間）がスプリットできなかったということもあるかもしれないが、O1潮の影響を受けているため、N2潮とM2潮の關係に類似したものと考えられる。また、Q1潮が分離できなかったことがO1潮の精度を悪くしているとも考えることができる。

240時間がN2潮周期の整数倍に近いことから、240時間の生データを直接調和解析して、N2潮成分を求めることができるかどうかについて、実際にそうしたときの18番目（周期13.3333時間）、19番目（12.6316時間；N2潮相当）、20番目（12時間；S2潮相当）の振幅は、それぞれ、38.64cm、137.74cm、50.45cmとなった。これらの数値はTable 1のものとは大きく違っているが、その理由は、240時間データからは半日周期成分で最大のM2潮を分析できなかったことから、その成分がM2潮周辺の他の成分に添加されたことによるものと考えられる。調和解析の精度を高めるためには、データ長が対象とする振動成分の整数倍に近いことと、大きい潮汐成分からスプリットされるということが不可欠であると言える。

国内で潮汐・潮流現象を解析するとき、一般に15日間のデータを用いることが多いが、上記の比較によると、その精度については、30日分のデータの方がかなり優れていると言える。15日間データの場合にはM2潮成分はN2潮成分との分離が困難で結果的にM2潮の精度も悪くなる。ここで得られたN2潮も高精度とはいえないが、近似的な値としては得られているのではないかと考える。

15日間データからM2潮成分をよりよい精度で得るために、このN2潮を生データから取り去って調和解析を試みた。このN2潮だけを取り去った残渣データの15日分を調和解析するとM2潮の振幅は149.62cmと得られた。こ

の数値を見ると5年分の潮位データの解析結果にかなり近づいており、精度はよくなっているようであるが、以後の15日間データの調和解析に際しては、15日間データでもM2潮の精度を上げる可能性があるかもしれないというコメントに留め、これ以後のM2潮成分は、従来の解析結果を踏襲し上記のような精度であることを前提に、最初の生データの解析結果のみを適用する。

周防灘豊前海における観測データとその解析結果

周防灘豊前海において貧酸素水塊形成過程の解明のために、2005年8月17日から9月2日までの期間、福岡県苅田港沖の定点 (Fig. 4 ; 平均水深12m) に係留系を設置し潮流などの連続測定を行った。本論文の目的は調和解析を用いたデータの解析手法とその実用性の提示にあることから、この観測の詳細については、別報¹⁾に譲る。本報では、その観測データのうち、海面下1mと3mおよび海底上2m, 1.5m, 1m, 0.5mの電磁流速センサーによる15日間連続データを使って、前節の解析手法を適用して、主要4分潮の他にN2潮成分、慣性周期成分、海陸風による吹送流の分析を行い、鉛直分布等を通じてその整合性について検討した。

N2潮成分と慣性流

240時間のデータをFourierの方法で調和解析すると、19番目の振動成分がN2潮成分に相当することを述べたが、11番目の周期は21.8182時間となり周防灘の緯度における慣性流の周期に近いことがわかる。慣性流については、外国では古くはバルト海の観測結果が知られているが²⁾、国内の内湾などの沿岸海域で慣性流を取り出して報告されたことはないのではないかとと思われる。まずここでは、本手法によって得られたN2潮流と慣性流を他の潮汐成分との比較を通してその振舞いを調べる。

Fig. 5は、海面下1mにおけるこの期間の潮流の、南北と東西の両方向成分の変動 (2005年8月17日12時~9月2日10時)を描いた。この観測では潮流は5分毎に測定しているが、(a)は1時間で平均した流速値の変動で、本報ではこれを基本的な生データとしている。ここで示す12時の値は12時0分から12時55分までの平均である。(b)が生データから主要4分潮を取り去った残渣データである。南北方向成分の方には4分潮の合成値も描いた。大浦の潮位に比べて残渣データにも何らかの変動成分が大きく残り、Fig. 1の潮位に比べて流れの方が複雑な要因を含んでいることを暗に示している。特に、東西方向成分は主要4分潮が卓越しているものの、南北方向成分はそれ以外の振動成分がかなり強いようである。参考のために、Fig. 6には同

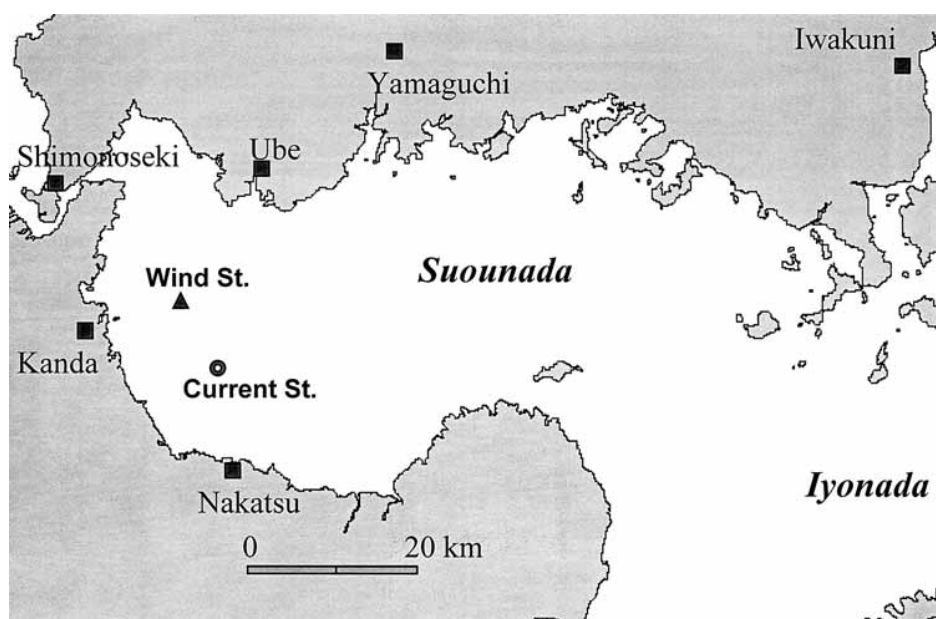
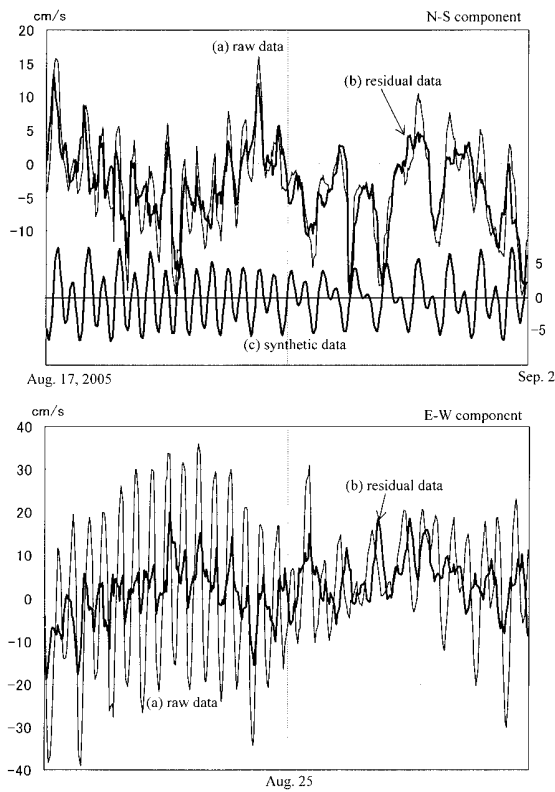


Fig. 4. The mooring station for tidal currents and the wave observation station for winds in the western sea of the Suounada Sound. Marks and respectively indicate stations for currents and winds.



豊前海定潮流データ〔海面下1m〕の生と残渣

Fig. 5. Variations with time of the raw data and the residual data of tidal currents at the level one meter from the sea surface (S-1 m) at the mooring station in the Suonada sound. The duration of the data is nearly 16 days from Aug. 17, 2005.

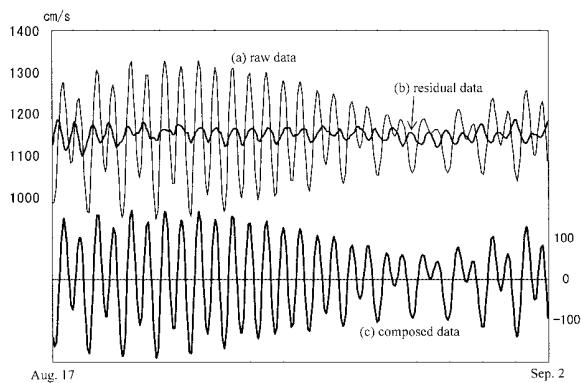


Fig. 6. Variations with time of tidal level at the mooring station in the Suonada sound.

じ期間のこの地点における潮位の生データと残渣データを描いた。これを見るとFig. 1の大浦のものに比べてより複雑な変動性が認められるが、これは、周防灘が伊予灘と豊後水道の両方に開き、さらに関門海峡を通じても海水の出

入りがることによるこの海域の複雑さを反映したものと考えられる。慣性流は、地球自転影響下の流体に及ぼす過渡現象としての反応で、このような複雑さが後で示す慣性周期の変動成分を生み出すことになる。

Table 2は、各層（海面下1 m, 3 m, 海底上2 m, 1.5 m, 1 m, 0.5 mの6層）における8月17日12時から360時間分の潮流データを解析して得られた主要4分潮の潮流楕円要素と主軸の位相遅れを表したものである。この調和解析では、 A を振幅、 ω を振動数、 t を経過時間、 α を初期位相として、振動成分を $A \cos(\omega t + \alpha)$ の形で展開しており、 α が位相遅れに相当する。潮位に比べて潮流の場合は非線形効果が大きいかもあって、調和解析を施して振動成分毎の振舞いを対応づけて検討することには問題があるかもしれないが、最も大きいM2潮成分については、海底に近いほど、主軸方向の振幅が小さくなり、それと共に位相が速くなるという振動流の特徴をよく表しており、さらに楕円率（短軸と主軸の比）が海底近くで大きくなるという自転効果影響下の振動流の特徴も伺うことができる。S2潮成分についてもこの傾向は認められるが、値の小さいK1潮とO1潮については、海底近傍で振幅が小さくなるという特徴以外は、かなりばらついていると言える。

次に、生データから主要4分潮を差し引いた残渣データの8月17日12時から240時間分の潮流データを調和解析したが、その結果である周期毎の振幅の大きさを把握するために、一例として、海面下1 mにおける潮流の東西方向成分の振幅分布をFig. 7に示す。振幅のピークを見ると、まず、長周期の240時間、120時間、80時間のところ大きいピークがあるが、360時間分の生データを解析したときにも360時間、180時間、120時間のところに、それぞれ2.39 cm/s, 5.16 cm/s, 1.94 cm/sの振幅が現れており、潮位データのところでも触れたように、この海域の流れの複雑さを暗に示しているといえる。Fig. 5の(b)からも長い周期の変動が伺われ、この変動がこのような数値に現れていると考えられる。

また、生データから4分潮を差し引いた残渣データの8月17日12時から240時間分を解析して得たN2潮成分と慣性周期成分およびQ1潮成分の各要素をTable 3に示した。N2潮については、海面に近い上層のものはお互いに近い値を示し、調和常数をうまく取り出しているようである。しかしながら、海底近くの底層のものは上層の半分以下の値になっており、Table 2で示すM2潮のようにきれいな振動流になっているとは認められない。K1潮とO1潮の場合と同様に、値が小さいことから振動流の特徴を吟味す

Table 2. Harmonic constants of four main tidal components of currents measured at each level of the stationary station in Buzen Sea, Suounada during fortnight from Aug. 17, 2005.

O1	Major axis(cm/s)	Minor axis(cm/s)	Orientation(°)	Phase lag(°)
S-1 m	3.31	1.43	273.5	131.2
S-3 m	3.24	1.14	293.4	137.7
B+2 m	2.53	0.09	282.5	150.9
B+1.5 m	2.00	0.28	267.5	150.6
B+1 m	1.76	0.42	248.3	156.0
B+0.5 m	1.60	0.39	232.9	165.0

K1	Major axis(cm/s)	Minor axis(cm/s)	Orientation(°)	Phase lag(°)
S-1 m	5.09	2.03	279.5	91.2
S-3 m	4.25	1.53	296.6	104.6
B+2 m	2.29	0.76	239.1	188.7
B+1.5 m	2.07	0.59	220.2	195.4
B+1 m	1.82	0.46	217.0	188.1
B+0.5 m	1.62	0.04	219.2	175.1

M2	Major axis(cm/s)	Minor axis(cm/s)	Orientation(°)	Phase lag(°)
S-1 m	16.90	2.70	260.1	146.4
S-3 m	16.94	2.66	274.2	152.1
B+2 m	13.98	0.97	288.6	122.5
B+1.5 m	13.05	1.38	287.1	119.4
B+1 m	11.96	1.81	287.2	115.0
B+0.5 m	10.10	1.86	287.1	112.2

S2	Major axis(cm/s)	Minor axis(cm/s)	Orientation(°)	Phase lag(°)
S-1 m	9.27	1.39	84.7	58.2
S-3 m	9.64	1.44	87.4	66.2
B+2 m	8.32	0.50	113.7	35.6
B+1.5 m	7.60	0.96	110.6	31.1
B+1 m	6.71	1.09	108.0	30.1
B+0.5 m	5.58	1.05	105.6	29.7

RESIDUE	Amplitude(cm/s)	Orientation(°)
S-1 m	3.83	138.2
S-3 m	3.36	145.6
B+2 m	2.54	148.0
B+1.5 m	2.13	148.1
B+1 m	1.45	148.4
B+0.5 m	1.23	177.4

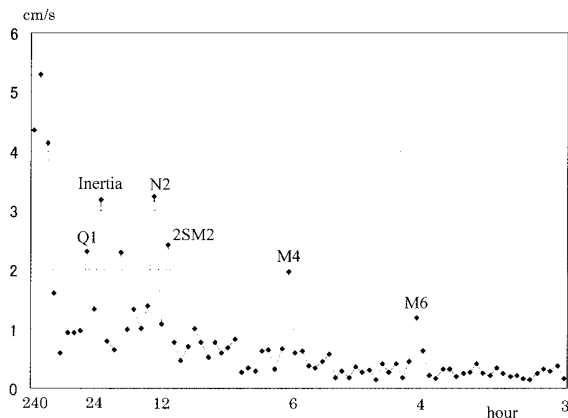


Fig. 7. Amplitudes of the east-west component of tidal current at each oscillatory period. The harmonic analyses are made using the residual data shown in Fig. 4, the duration of which is 240 hours (10 days).

るには精度上に問題があると思われる。

慣性周期のものに関しては、これまでtidal basinといわれる内湾などの沿岸域では注目されたことはあまりなかった。これに近い周期の潮汐成分としてOO 1潮(周期22.3061時間)とSO 1潮(周期22.4202時間)があり、この振動成分はこれらの潮汐成分を表しているのではないかと考えるかもしれないが、大浦の5年分の潮汐データの解析結果によると、これらの大きさはO 1潮やK 1潮成分の1/20程度と小さくなっている。ここに示した潮流の振動成分はO 1潮やK 1潮と同程度に大きく現れており、このことからこの振動成分はOO 1潮やSO 1潮などの潮汐起源のものではなく、それとは別の自転効果による慣性流であると考えられる。また、一般の物理現象においては、固有振動をもっているものに外的要因が働くと、初期段階で固有振動が現れるが、Fig. 5からも推測できるように、この海域は潮汐以外の風や外海(太平洋や日本海)の影響を受けているようで、それによる慣性運動が引き起こされることは十分に推測することができる。理論的には慣性運動は円運動を形成するが、Table 3をみると、慣性周期の楕円率(潮流楕円の短軸方向成分と長軸方向成分の比)は、他の潮汐成分に比べて海面から海底までかなり大きくなっており、このことからこの慣性周期の調和常数は、地球自転効果による慣性流を表していると推察される。

吹送流一定常風成分と海陸風成分一

沿岸海域では特に夏場には海陸風が卓越するが、気圧配置などの気象要因の他に海岸の地形などの影響も受け、教科書のように単純な風系を形成するとは思えない。海陸風

の起動力は海上と陸上の大気温度差に伴う気圧差にあるが、この差は、地域によるものの、一般的に午後1時から2時頃にピークになると考えられる。夜間は気圧差は逆になり、そのため風は振動流となるが、教科書的な単純なモデルにおいては、振動流の位相は起動力の位相に 90° 遅れ、摩擦を受ける境界面上の応力は流れよりも 45° 速くなって起動力の 45° 遅れということになる⁶⁾。つまり、海陸風が海面に与える応力は12時に極大になるわけではなく、3時から15時(位相遅れ 45°)前後であろうということを念頭に以下の解析を行った。

周防灘のこの定点観測地点の北北西約10kmの位置(荊田港から東に約10km)に国交省荊田港湾事務所の波浪観測塔があり、海面上約10mの高さで風向風速も測定をしている。Fig. 8は、波浪観測塔における観測期間中(8月17日12時~9月2日12時)の風の東西方向と南北方向成分の変動を、4時間の移動平均によって描いたものである。これによると、全体的に海陸風と思われるような1日周期の変動が認められるものの、前半では東西方向、後半では南北方向の変動が大きいなど、前半と後半では振舞いが異なっている。特に8月26日から数日間は南北に変動する海陸風がかなり強くなっているようである。このことはそれに引き起こされる吹送流にも影響を与えることになる。また、Fig. 8のグラフを見ると、日周期変動は認められても、潮汐現象のように正弦波的な変動になっているとは言い難い。風は複雑な気象現象に引き起こされるために、単純化して扱うことには限界も伴うが、本報は、海陸風に伴う吹送流の解析の第一段階の試みと位置づけている。

Fig. 5はK 1潮を含めた主要4分潮を除去した残渣データにもかかわらず、1日周期の変動があることを示しているが、この理由は、風に引き起こされる吹送流の振舞いが、風に対応して前半と後半で異なっていることによるものと考えられる。また、後半は小潮期にあたり、気温の低下で成層が弱くなって海水が均質に近い傾向にあった。Fig. 5をよく見ると、流れについても海陸風によるものと思われる24時間周期の変動が目立っていることから解析的に扱いやすいと判断し、この後半に注目して吹送流の分析を試みた。

Table 4は、波浪観測塔(風降風速計は海面上約10m)における8月26日正午から72時間分および96時間分の風向風速を調和解析して得られた残差成分、および、24時間周期成分の振幅、方向、位相遅れである。風のデータとしてよく使用される陸上のアメダスステーション(中津市; 定点観測点から南に約15km)の解析結果も記入した。吹送

Table 3. Harmonic constants of the N2 -component, the inertia current and the Q1 -component at the same station and the same period.

N2	Major axis(cm/s)	Minor axis(cm/s)	Orientation(°)	Phase lag(°)
S-1 m	3.23	1.21	255.3	92.9
S-3 m	3.10	0.98	272.1	98.1
B+2 m	1.53	0.39	307.0	26.2
B+1.5 m	1.45	0.31	300.0	34.5
B+1 m	1.51	0.01	296.5	44.2
B+0.5 m	1.31	0.04	298.1	53.7

Inertia comp.	Major axis(cm/s)	Minor axis(cm/s)	Orientation(°)	Phase lag(°)
S-1 m	3.18	1.70	299.4	118.4
S-3 m	2.27	1.26	337.0	146.2
B+2 m	1.93	0.87	264.9	270.8
B+1.5 m	1.67	0.97	252.2	272.1
B+1 m	1.41	1.09	244.4	269.1
B+0.5 m	1.01	0.90	217.8	244.4

Q1	Major axis(cm/s)	Minor axis(cm/s)	Orientation(°)	Phase lag(°)
S-1 m	2.04	0.52	297.5	106.7
S-3 m	1.68	0.60	309.6	113.2
B+2 m	2.11	1.16	115.3	42.2
B+1.5 m	1.77	0.99	92.5	30.8
B+1 m	1.42	0.74	78.2	29.5
B+0.5 m	1.05	0.43	72.9	29.1

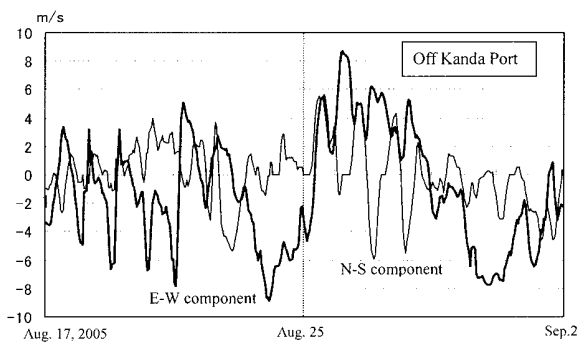


Fig. 8. Variations with time of the east-west and north-south components of the wind at the wave-observational tower. The wind data is running-averaged over 4 hours.

流の解析に陸上のデータを使用することの問題点も浮き彫りになっているかもしれない。解析したデータの初期の時間が正午であることから、90°の位相遅れは18時にピーク

が来ることを意味するが、この表によると海風は18時前にピークになっているといえる。さらに風向風速の生データを見て特に海陸風が顕著になっていた8月27日0時から48時間分の解析も行い、この表の中に記した。これによると、海陸風成分は海上の観測塔では振幅で風速4 m以上とさらに明瞭に現れ、そのピークは陸風で午前4時から5時頃（海風のピークは16時から17時頃）になっている。この解析期間のとり方に関しては、解析期間が長いほどより一般的で説得力のある結果が提示できるが、海陸風が潮汐のように単調に振動するような現象ではないために、期間が長くなるほど現象が曖昧になる傾向にある。解析期間が短い場合は、対象とする現象を分析しやすいが、期間の選択の基準などに一般性（説得力）が欠ける虞もあり、都合のよい期間の選択に陥りかねない。データ解析には曖昧さや誤差は避けられないし、上記のような問題がありうることを

Table 4. Harmonic constants of the residual and the diurnal components of the wind at the wave-observational tower. (a) analytical results of 72 hour data, (b) those of 96 hour data and (c) those of 48 hour data.

72 hours from the noon of Aug. 26

		Amplitude(major)	Minor	Orientation	Phase lag
TOWER	Average	3.99 m/s		90.3°	
	One day	3.38 m/s	1.21 m/s	148.4°	84.5°
NAKATSU	Average	0.99 m/s		102.1°	
	One day	2.71 m/s	0.36 m/s	167.6°	73.6°

96 hours from the noon of Aug. 26

		Amplitude(major)	Minor	Orientation	Phase lag
TOWER	Average	2.56 m/s		90.7°	
	One day	2.66 m/s	1.13 m/s	155.2°	79.6°
NAKATSU	Average	0.68 m/s		92.9°	
	One day	2.54 m/s	0.40 m/s	175.3°	68.7°

48 hours from the midnight of Aug. 27

		Amplitude(major)	Minor	Orientation	Phase lag
TOWER	Average	4.01 m/s		90.2°	
	One day	4.35 m/s	0.69 m/s	353.5°	79.1°
NAKATSU	Average	0.89 m/s		121.7°	
	One day	2.85 m/s	0.28 m/s	356.7°	69.6°

念頭に、ここに得られた数値はあくまでもその条件下での解析結果であることをここでも記しておく。

波浪観測塔においては、この解析期間の定常成分は東向きの傾向があり、海陸風（24時間変動）成分は南北方向に振動している。海陸風による吹送流は、基本的に24時間の周期をもつといえるが、潮流の卓越する沿岸海域においては、これに近いものとして23時間56分周期のK1潮成分が存在する。24時間周期の変動はS1潮に相当し、一般には気象潮の一つとされるが、調和解析からK1潮と分離してS1潮を分析するには、理論的に1年以上のデータが必要となる。本研究における残渣データはK1潮も除去しており、結果的にS1潮も取り去っていることになるが、通常は、潮汐によるK1潮流と気象に関わるS1潮流（日周潮成分）の方向と位相のうち、少なくともどちらかはお互いに異なる。特にFig. 5における残渣データを見ると、K1潮を除去しているにもかかわらず、海陸風の強かった8月

26日から29日頃までは、日変動の流れを顕著に認めることができる。ここで除去したK1潮流は実際にはこのようなS1潮成分も含まれているはずであるが、海陸風は期間中強さと方向が変動していたことから、ある程度の誤差は含むものの、短期間の解析の中では海陸風による吹送流としてうまく現れたのではないかと思われる。

Table 5は、海陸風が特に顕著に表れていた8月27日0時から48時間分の、海面下1m、海面下3m、海底上2mの残渣データを調和解析したものである。同時に比較できるように観測塔の風の解析結果も記入した。

まず定常成分に注目すると、風は東向きに約4m/sで、海面下1mにおける流れは、風の定常成分から時計廻りに60°近く偏向し、海面下3mにおいては大きさは小さくなって方向はさらに時計廻りに偏向している。このような傾向はEkman spiralの様相を定性的によく表している。海底近くの底層の定常成分は鉛直循環流を形成しているようにも

見受けられる。

海陸風に当たる振動成分に注目すると、風は南北方向に4.3m/sの振幅でほとんど直線的に振動し、陸風（北向きの風）がピークになるのは5時過ぎ（位相遅れ79.1°）と見なすことができる。従って海風のピークは午後5時過ぎとなるが、一見遅いようにも感じられる。この理由は本節のはじめにも述べたとおりで、生の風は単調な正弦振動ではなく、倍潮などの高周波成分や定常成分も加わるために、この位相と実際に感じる風とは印象が異なることになるのかもしれない。海陸風成分が海面に与える応力の位相については推測するしかないが、はじめにも述べたように30°程度は速くなって、位相遅れにすると、50°前後になるのではないかと考えられる。このように考えると、海陸風による吹送流は、直線的に振動する風にもかかわらず、大きい潮流楕円を描きながら主軸を時計廻りに偏向させていると見ることができる。このことは解析解⁷⁾ともうまく対応しており、当解析結果によつて、海陸風による吹送流をうまく分析できたと考えている。なお、振動成分についても鉛直循環の傾向を示しているが、このことは水深が浅くなおかつ海陸風が陸岸に近いところでみられる現象であることから傾斜流の傾向を示しているのではないかと考えることもできるが、この海域は、陸を横切る方向に緩やかに傾斜して海岸線は緩やかに湾曲しており、その流れを単純に推測するには無理があるかもしれない。このような場合の傾斜流の振舞いについては、今後数値計算等によつて明らかにする必要がある。

考察とまとめ

潮流などの振動現象の解析には、一般的にはスペクトル解析や調和解析がなされるが、スペクトル解析においては、フーリエ変換が無限のデータに基づいたものであるに

もかわらず、実際には有限長のデータに置き換えるために、解析結果が相対的な値に留まるなど、ある程度の曖昧さは避けられない。また調和解析においては、連続量を離散値に置き換えたことによるわずかな誤差は避けられないものの、データ期間が現象の振動周期の整数倍に近く、さらに、複数の振動成分の現象が含まれている場合には、データ期間とそれぞれの振動現象の周期との比が1以上異なっていれば、振幅や位相などを高い精度の絶対値として得ることが可能である。

本報では、沿岸海域の潮流観測で測定されることの多い15日間データから得られる調和常数の精度と、それから求められる新たな振動成分の意義について検討した。一般には、15日間のデータがあれば主要4分潮は分析できるとされているが、ここでは最大の潮汐成分のM2潮の振幅に約5%の誤差が生じる可能性があることが示された。本報で提示した、主要4分潮を除去した残渣データからN2潮成分と慣性流成分を分析することに関しては、M2潮成分の精度が低いことから、振動周期に近いN2潮成分についても精度が悪かったが、慣性流成分については周期の近いK1潮とも十分にスプリットされてうまく分析できたと考えられる。

潮流の15日間の残渣データには明瞭な振動成分が残っていたが、海陸風の強かった短い期間を対象として海陸風に起因する吹送流の分析も試みた。その解析結果を見ると、定性的には海陸風にうまく対応しており、今回のデータにおける海陸風起源の吹送流の分析は、第一段階としては成功したのではないかと考える。解析の精度を高めるには、振動数の大きい振動風による反応など、さらに解析を加える必要がある。吹送流の非定常性に関しては、閉鎖性海域の物質輸送にも大きく関わるものであり、今後、数値解析や理論解析も併用してその基本的な特性を明らかにしていきたいと考えている。

Table 5. Harmonic constants of the residual and the diurnal components of the currents at the levels, one meter and three meters from the sea surface and two meters from the basin floor. The duration of the data is 48 hours.

	Average		S1(diurnal) component			
	Amplitude	Orientation	Major	Minor	Orientation	Phase lag
Wind						
Tower	4.01 m/s	90.2°	4.35 m/s	0.69 m/s	353.5°	79.1°
Current						
S-1 m	8.01 cm/s	147.1°	7.76 cm/s	4.09 cm/s	32.3°	75.8°
S-3 m	5.83	172.8	6.73	2.41	61.2	80.1
B+2 m	4.51	48.3	7.88	6.66	182.1	63.5

謝 辞

本研究の解析精度の基準として使用した佐賀県大浦の潮位データは、日本海洋データセンター（JODC）で管理されているもので、インターネットを通してダウンロードした。また、使用した風のデータは、国土交通省九州地方整備局荏田港湾事務所から提供頂いた。

本研究は、産業技術総合研究所中国センターの高杉由夫博士と交わした調和解析に関する議論が動機となってできたものである。周防灘豊前海の現地観測においては、いであ株式会社の高島創太郎氏や豊前海区海洋環境保全協議会の湯浅豊年氏の多大なるご協力をいただいた。また、水産情報経営学科情報システム数理講座の2006年度の卒論生、岸本充史氏の卒業論文作成に際して、ここで用いた周防灘豊前海の観測データを掘り起こし、多くの作図を通して、この研究の必要性を示していただいた。さらに、当講座のセミナーにおいては、鬼塚剛博士と伊澤瑞夫博士からも貴

重なコメントをいただいた。これら関係各位に、ここに記して深く謝意を表す次第である。

参考文献

- 1) 小田卷実：水路部研究報告, 16, 71-82 (1981)
- 2) 中野猿人：潮汐學, 古今書院, 東京, 528 pp. (1940)
- 3) 安田秀一：海の研究, 15(4), 319-334 (2006)
- 4) 岸本充史・安田秀一・鬼塚剛・高島創太郎・湯浅豊年：水産大学校研究報告, 56(1), 47-60 (2007)
- 5) A. Defant: Physical Oceanography (I), Pergamon Press, Oxford, 729 pp. (1961)
- 6) H. Lamb: Hydrodynamics 6th ed. Cambridge Univ. Press, London, 738 pp. (1932)
- 7) 安田秀一：2007年度日本海洋学会春季大会講演要旨集, 105 (2007)