

日本海の表面流れの数値実験による検討

A Study on the Surface Current in the Japan Sea based on the Numerical Simulation

犬飼直之¹・早川典生²・福島祐介³・細山田得三⁴

Naoyuki INUKAI, Norio HAYAKAWA, Yusuke FUKUSHIMA and Tokuzo HOSOYAMADA

¹正会員 工修 長岡技術科学大学助手 工学部環境・建設系 (〒940-21 新潟県長岡市上富岡町1603-1)

²正会員 Ph. D 長岡技術科学大学教授 工学部環境・建設系 (〒940-21 新潟県長岡市上富岡町1603-1)

³正会員 工博 長岡技術科学大学教授 工学部環境・建設系 (〒940-21 新潟県長岡市上富岡町1603-1)

⁴正会員 工博 長岡技術科学大学教授 工学部環境・建設系 (〒940-21 新潟県長岡市上富岡町1603-1)

The Japan Sea is a semi-enclosed water body with complicated geometry and a narrow strait of Tsushima through which sea current enters. As for the surface current of the Japan Sea, tidal component is weak followed by the sea current component. In wintertime the strong seasonal wind blows over the Japan Sea to induce the surface current. The purpose of this paper is to develop a method to estimate the surface current in winter quantitatively. Firstly, the observed data of wind and surface current off the Noto Peninsula is analyzed to obtain the predominant flow direction of Northwest and the magnitude of the wind driven flow of about 15cm/s. Secondly, the numerical model to calculate tidal flow and sea current is developed with the obtained maximum tidal flow of about 15cm/s and sea current about 3cm/s of the Noto Peninsula, confirming the predominance of the wind driven current.

Key Words : Japan Sea, Noto Peninsula, Tidal Flow, Wind Driven Flow, Tsushima Warm Current

1. はじめに

日本海の水深は対馬海峡付近でおよそ200mであるが、中央部付近では3,000mに及び、その海底地形は非常に起伏が激しい(図-1)。また、水温や塩分濃度などによる密度差も大きく、特に冬季には風の影響を強く受ける。このように日本海の流れは、潮汐流れや海流などの比較的定常な流れの他に地形・密度差・風・地球の自転などに起因する流れも加わり複雑な様相を生成する。

1997年1月に島根県沖で発生した重油流出事故により、島根県から新潟県にかけての沿岸域では重油の漂着などの被害を受けた。この事故で被害が拡大した原因の一つとして、重油の漂流予測が遅れたことが考えられる。よって、表面流れの数値予測モデルの開発が必要であると考え。

2. 目 的

本研究は、吹送流などの非定常的な流れを検討する前に、基本的な流れである潮汐流と海流について日本沿岸域の特に能登半島付近の流れを把握することを目的とする。そこでまず能登半島付近の水温・風速・風向・流速・流向などの観測データを解析して冬季日本海の主要な流れは吹送流であることを確

認し、次に潮汐流・海流の数値計算をおこない、観測データと比較をおこなった。

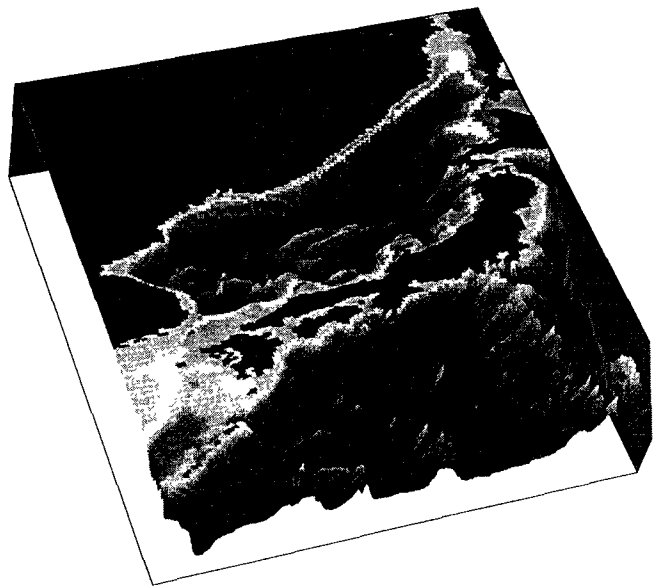


図-1 日本海の地形と計算領域

3. 風と流れの解析

(1) 能登半島付近の水温

図-2は東経137度（能登半島先端部）南北縦断方向の鉛直水温分布（水産庁日本海区水産研究所、1997年2月平均）である。図より、能登半島付近の海表面に暖水があり、それ以外では成層していることがわかる。また、水深約200mで水温は4℃となることがわかる。図-3は図-2と同時期の能登付近の海表面、50m、100m、200mの各水深毎の水温12℃の等温線の平面分布である。図より暖水が能登半島の西側から流入し帯状に分布していることがわかる。

(2) 能登半島の風、海の流れ

図-4に1997年2月1日から28日までの能登半島沖（136° 55′ E, 37° 51′ N）の風のエネルギー分布を示す。ここで、能登半島沖の風エネルギーの解析には舳倉島灯台で観測された2時間毎の観測値を利用した。また、風エネルギーは風速値を2乗し各方位毎に加算して求めた。図より卓越風向は北西であることがわかる。図-5に能登沖の全エネルギーに対する各風速毎の比率を示す。図より、能登沖では10.8m/s以上の風エネルギーが全体の60%以上を占めていることが分かる。

図-6に風と同期間における能登半島沖での表面流のエネルギー分布を示す。図中、(1)能登半島沖9km(137° 01′ E, 37° 34′ N,)、(2)18km(137° 01′ E, 37° 36′ N,)、(3)27km(137° 01′ E, 37° 34′ N)である。ここで能登沖の表面流は、郵政省沖縄電波観測所が輪島～珠洲沖の約30km四方の海域をVHF短波海洋レーダ¹⁾により2時間毎に観測したデータを提供していただき解析をおこなった。また、流れエネルギーは流速値を2乗し各方位毎に加算して求めた。図によると、半島の沖側では南向流が卓越しているが、陸側では南南西向流が卓越しており、陸に沿って流れる東向流も卓越している。

図-7に2月1日0時から10日間の(1)風速および流速、(2)風向および流向の時系列を示す。図より、風速と流速および風向と流向は相関しているようである。また、風向が大きく変化するとき風速および流速は減少しその後増大することがわかる。次に、図-8に能登沖の風と流れの関係を示す。図中、(1)風速と流速の関係、(2)風向と流向の関係である。(1)によると、流速は風速にほぼ比例しており、10m/sの風速で15-25cm/sの流速になる。また、3本の近似直線の傾きの平均は0.028、縦軸との切片は約5-10cm/sである。これは風速が0になっても流速があることを示す。また(2)より、流向は風向に対して進行方向左方に23.9°の風向差を有していることがわかる。

以上の結果より、2月の日本海の流れは風に強い影響を受けていることが確認できた。また、風が起因でない流速も約5-10cm/sあることがわかった。

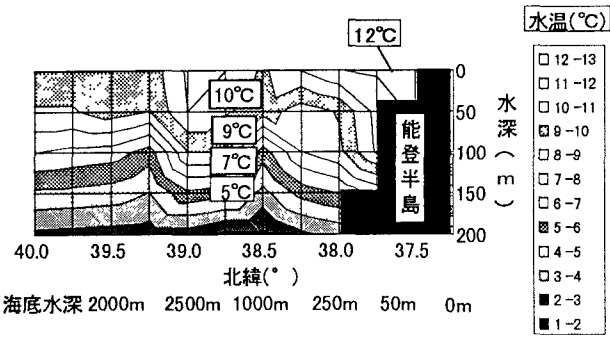


図-2 鉛直水温分布(能登半島沖, 1997年2月平均)

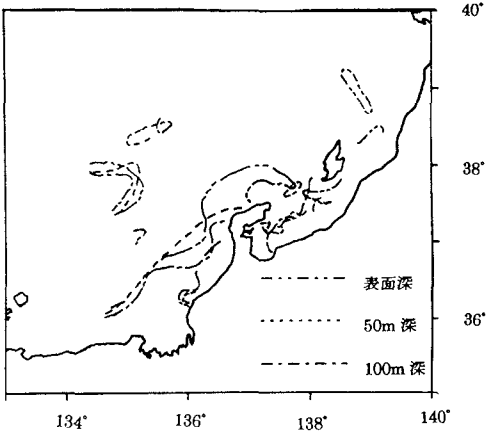


図-3 暖水の等温線分布（12℃, 能登半島, 1997. 2）

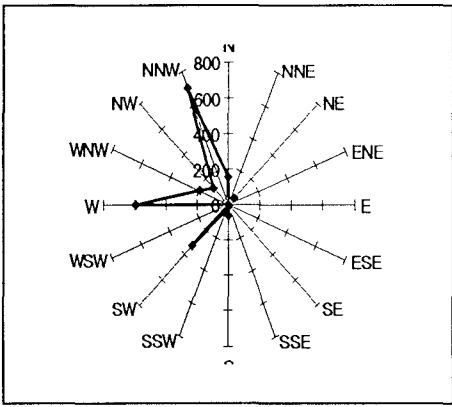


図-4 風のエネルギー特性
(舳倉島, 1997. 2. 1-28)

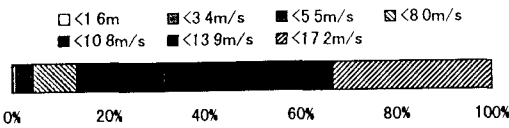
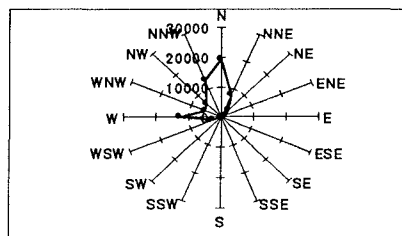
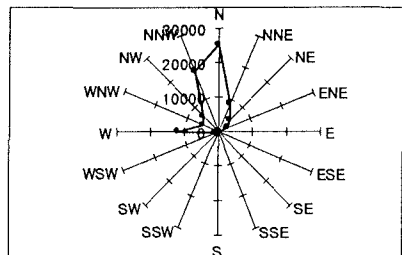


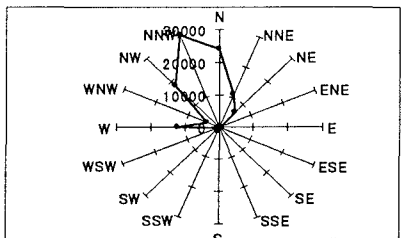
図-5 風速毎のエネルギーの全体の比率



(1) 岸沖9km

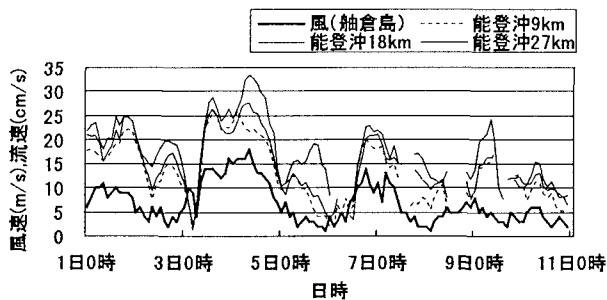


(2) 岸沖18km

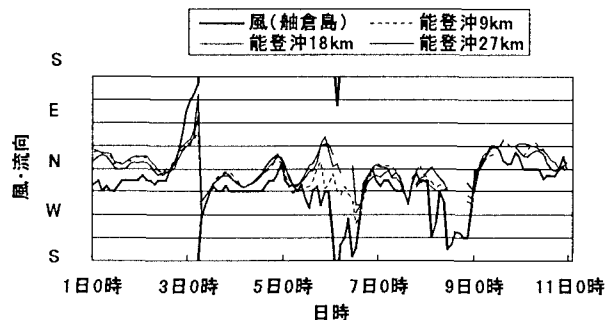


(3) 岸沖27km

図-6 能登半島沖の表面流のエネルギー特性

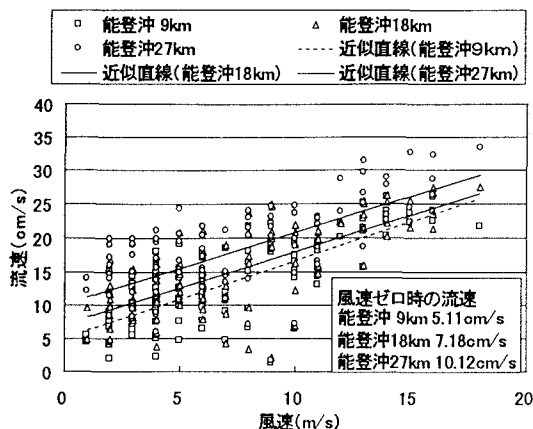


(1) 風速および流速

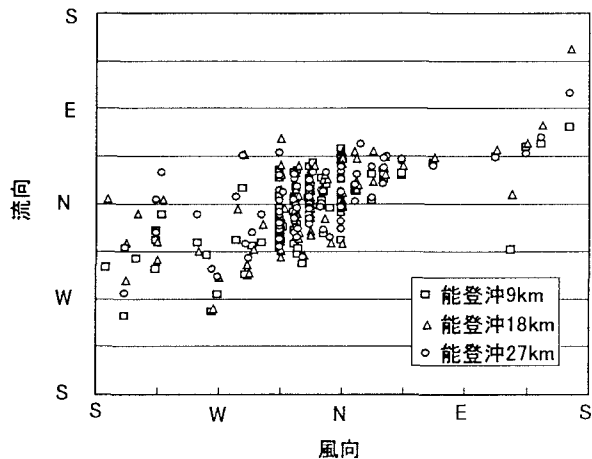


(2) 風向および流向

図-7 風と流れの時系列 (舳倉島, 1997. 2. 1-10)



(1) 風速と流向



(2) 風向と流向

図-8 風と流れの関係 (能登沖, 1997. 2. 1-28)

4. 数値計算

(1) 流れの数値計算式

潮流を考慮した流れの基本方程式は水深方向に積分した平面二次元の長波方程式によって次のように表される。

$$\text{連続式:} \quad \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial [(h+\zeta)u]}{\partial x} + \frac{\partial [(h+\zeta)v]}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

運動方程式:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \\ -fv + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gu\sqrt{u^2+v^2}}{(\zeta+H)C^2} - A_h \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + f u + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{g \sqrt{u^2 + v^2}}{(\zeta + H)^2} - A_h \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (3)$$

ここで、 u 、 v はそれぞれ東方、北方流速成分、 h は水深、 ζ は水位、 f はコリオリ係数、 A_h は水平渦動粘性係数、 C は海底粗度に関するChezy係数、 g は重力加速度である。これらの式を差分法の陰解法に属するADI法⁴⁾で差分化し、水平二次元の単層流れで流れの計算を行った。

(2) 潮汐流と海流の計算条件

計算対象領域は日本海全域とし、基本地形（水深）はU. S. National Geophysical Data Center (NGDC) 提供の'ETOPO-5' data set ($1^\circ/12$ 格子) (図-1) を利用した。コリオリ係数は緯度毎により変化させた。また、 A_h は $10\text{m}^2/\text{s}$ とし、 C はManningの粗度係数より求め、粗度係数は実水深の場合では $0.026(\text{s} \cdot \text{m}^{-1/3})$ 、水深を近似する場合は $0.001(\text{s} \cdot \text{m}^{-1/3})$ とした。潮汐計算では、1997年2月3日は満月であり風の解析をおこなった時期（2月1-10日）は大潮であったことから、潮汐流の最大値を求めるように M_2 潮の位相および主要4分潮の振幅を強制水位として、対馬・関門・ネベリスク・宗谷・津軽の各海峡で与えた。諸元は中野⁴⁾を参考にした。

海流の計算では対馬海峡からの流入量を $2\text{ Sv} (\times 10^6\text{m}^3/\text{s})$ とし、津軽海峡と宗谷海峡からの流出比は6:4とした。また、海峡断面で一様流速となるように与えた。また深層では海流は弱くなる⁵⁾⁶⁾ので、水深1000mまでを実地形としそれ以深は一定とした。

(3) 計算結果および観測値との比較

潮汐流について、図-9に能登半島沖の西向最大流速時のベクトルを示す。図-10(1)に最大水位分布を、(2)に最大流速分布を示す。(2)より、日本海全域では潮汐による最大流速は約 3 cm/s である。この計算の妥当性を確認するために、計算結果を潮汐調和定数および検潮データと比較をおこなった。まず、図-11に各地点の調和定数より求めた値と計算値の時間変化を示す。各地の潮汐調和定数は中野⁴⁾を参考にした。図-11より計算結果は各地点の水位の時間変化をよく表していると考えられる。また、輪島での最大水位差は約 40 cm であることがわかる。次に、図-12(1)に検潮データとの比較のために、富山の検潮所で1994年2月1日～28日に観測された水位の時系列を(2)に計算で求められた水位変化を示す。このデータは日本海洋データセンター（以下JODC）より提供を受けた。観測では半日および日周潮の水位差はおおよそ 20 cm であるが計算結果でも約 20 cm の水位差

が得られている。これらの結果により潮汐流の計算の妥当性は確認できたと考えられる。次に、問題としている能登付近について潮汐流の最大値を確認するために、輪島付近での潮流楕円を図-13に示す。図によると最大約 15 cm/s の潮汐流が生じる。図-10と比較すると、日本海全域の約5倍の流速である。

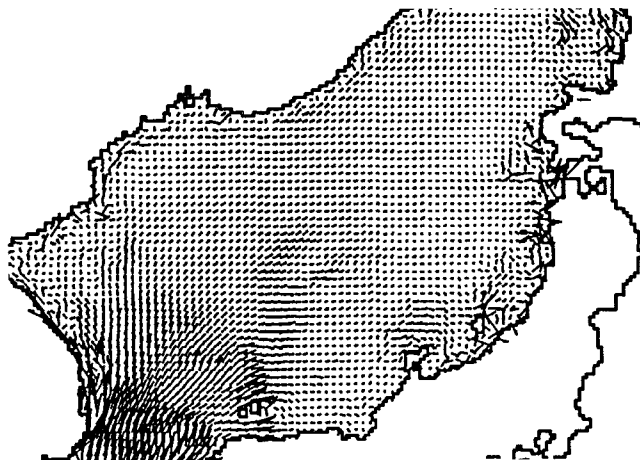
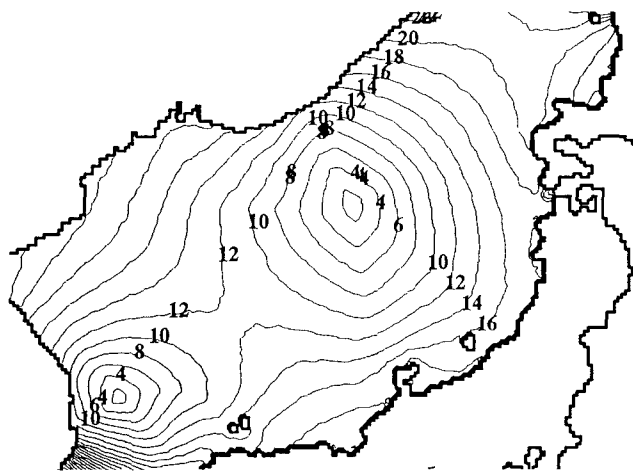
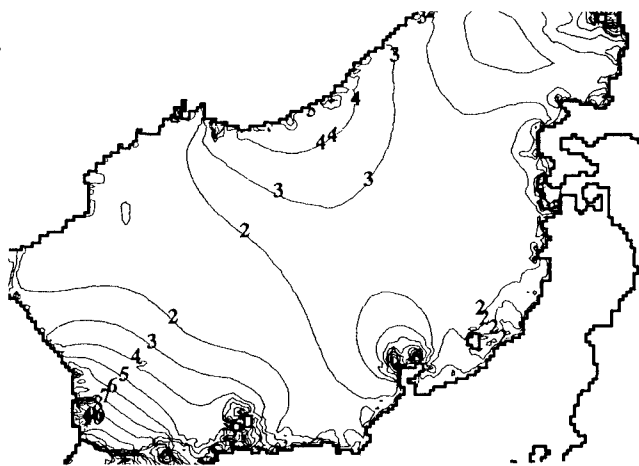


図-9 潮汐計算結果（能登沖西向流最強時）



(1) 最大水位分布（単位：cm）



(2) 最大流速分布（単位：cm/s）

図-10 潮汐計算結果

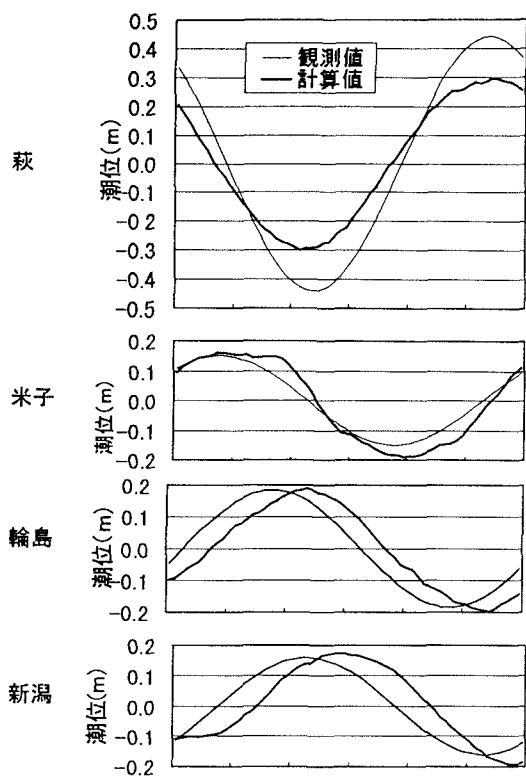
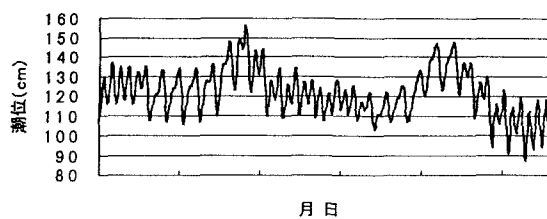
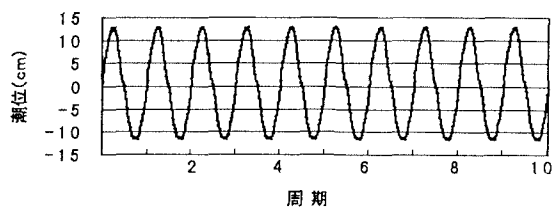


図-11 潮汐調和定数との比較



(1) 観測潮位の時間変化 (1994年2月1日-28日)



(2) 計算潮位の時間変化 (10周期)
図-12 富山桟潮所との比較

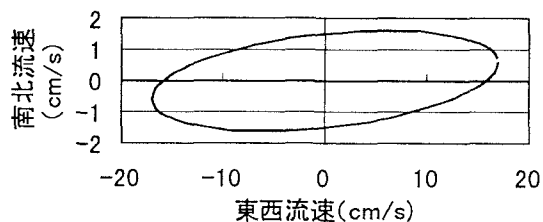


図-13 輪島付近の潮汐 (計算結果)

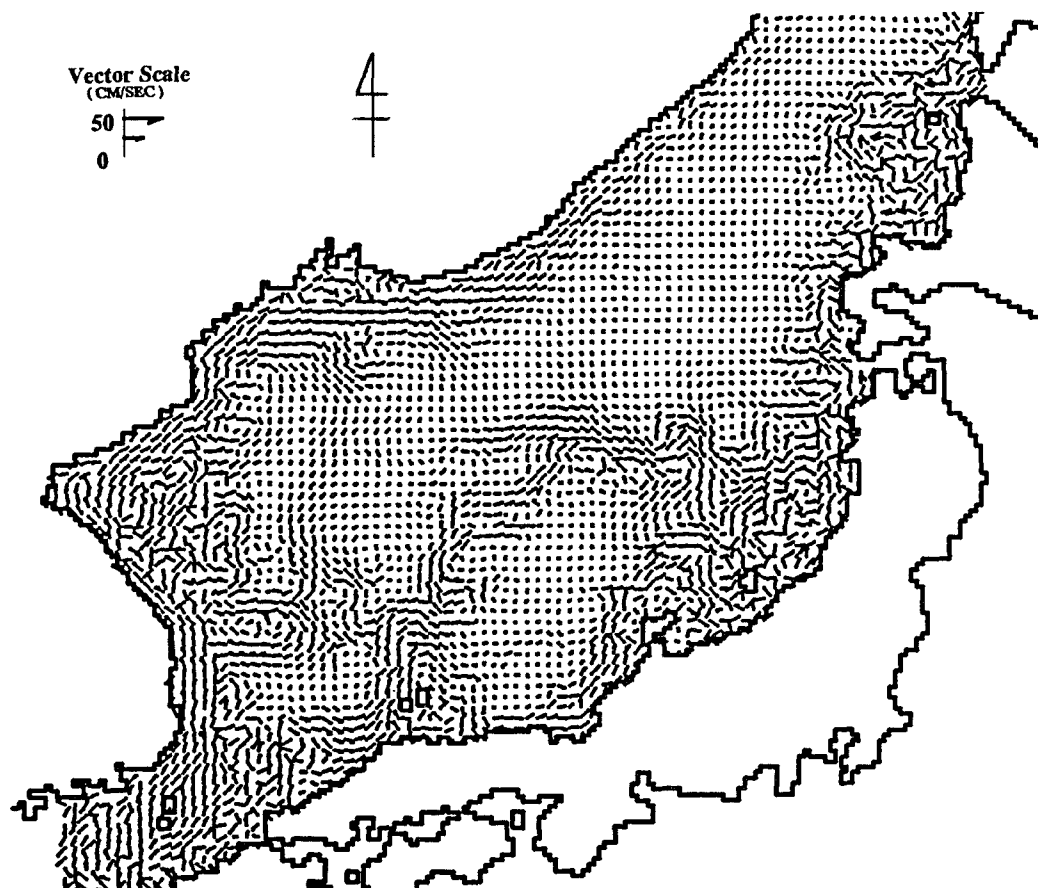


図-14 海流計算結果

次に海流について、図-14に計算結果を、図-15に日本海の流れの模式図を示す。模式図によると対馬海峡から流入した海流は、朝鮮半島および日本の大陸棚沿岸に沿う流れと、日本海中央部を蛇行する流れに分流する³⁾⁶⁾が、計算結果でも同様な流れが再現できている。次に計算値の妥当性を確認するために観測結果との比較をおこなった。図-16に観測による能登半島先端付近での表面付近の流向と流速の関係を、図-17に数値計算による海流の流速を示す。図-16の観測データは北緯37° 20' - 38° , 東経136° 30' - 137° 20' の範囲で1920年~1992年の期間に観測されたデータであり、JODCより提供を受けた。図-16より、最大流速は約40-60cm/sであることが分かる。図-8(1)によると吹送流の最大流速は20-40cm/sであり、また図-13によると潮汐流の最大流速は約15cm/sであるので、その差は約5cm/sである。また図-8(1)によると無風状態での流速は約5-10cm/sである。これらの値は吹送流と潮汐流の成分を除いた値であり、よって海流の流速に対応するのではないかと考えられる。しかし図-17の海流の計算結果では流速は約3cm/sであり、その値よりも小さい値となった。この原因として、平面2次元で計算しており、流速は水深方向に平均されていることが考えられる。

5. まとめ

本研究では、観測値より冬季日本海では吹送流が卓越していることを確認した。また、数値計算で求めた潮汐流と海流について観測値と比較をした。以下に主要な結論を示す。

風と流れの解析

- (1) 能登半島沖では、水深100m以深ではほぼ成層しており、水深約200mで水温は4℃となる。
- (2) 1997年2月の能登半島沖の卓越風向は北西である。
- (3) 能登半島付近の流れは風の影響を強く受けており、10m/sの風で約15-25cm/sの流速になる。
また、無風状態における流速は約5-10cm/sであり、これは海流の流速に対応するのではないかと考えられる。

数値計算

- (4) 能登半島付近の潮位差は最大で約40cmであり、潮汐流の流速は最大で約15cm/sである。
- (5) 能登半島付近の海流の流速は約3cm/sであった。
しかし結論(3)より、実際はもう少し大きいと考えられる。

謝辞：本研究では、水産庁日本海区水産研究所、郵政省沖縄電波観測所、日本海洋データセンター(JODC)より情報を提供していただいた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 徳田正幸・村上和男ら：VHF沿岸海洋レーダの開発と流れ観測, 海岸工学論文集, Vol. 44, pp. 1276-1280, 1997.

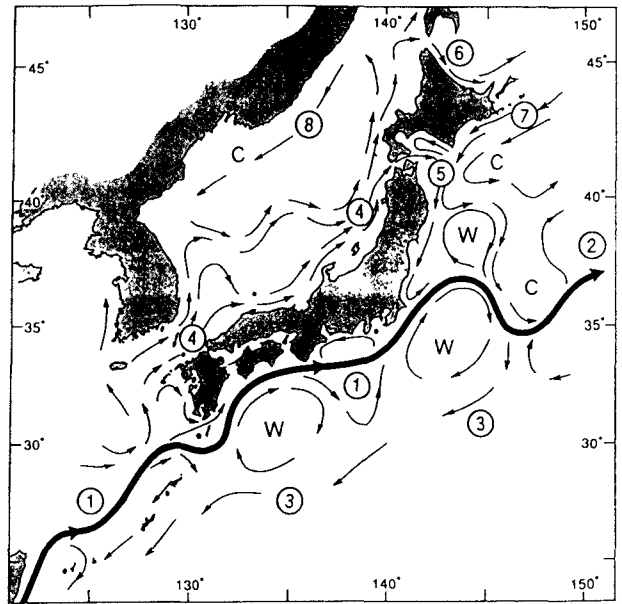


図-15 日本海の流れの模式図 (長沼³⁾, 1977)

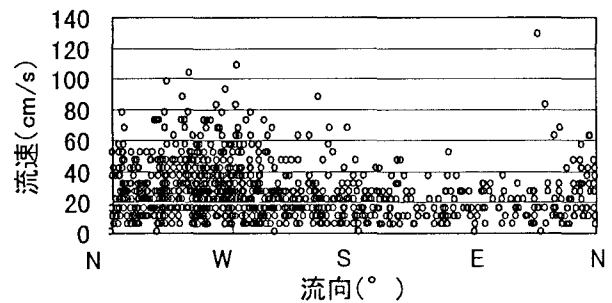


図-16 観測による表面流の流向と流速の関係 (能登半島沖、1920年-1992年、1094点、JODC)

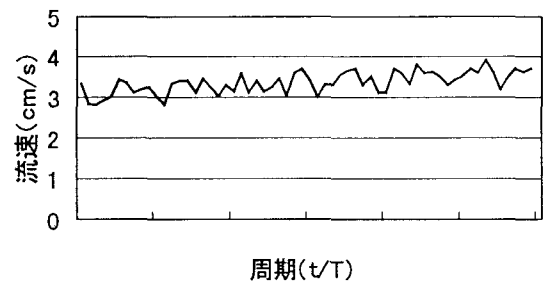


図-17 海流計算結果 (能登半島沖)

- 2) 金哲鎬、尹宗煥：予報型数値モデルから見た日本海の海洋循環、月刊海洋、Vol.26, No.12, pp762-766, 1994.
- 3) 長沼光亮：日本海の流れ変動、月刊海洋vol9, p137-141, 1977
- 4) 中野猿人：潮汐学, 生産技術センター新社, 1940.
- 5) 宇野木早苗：沿岸の海洋物理学, 東海大学出版会, 1993.
- 6) 高野健三ら：海洋物理Ⅱ, 東海大学出版会, 1970.
(1998. 9. 30受付)