

渤海の海水交換機構に関する研究

犬飼直之*・早川典生**・福岡祐介***
Sun Zhao-Chen****・工藤義幸*****

1. はじめに

中国の渤海は約 400 km 四方の広さであるが、水深は浅くしかも渤海海峡のみで海水交換が行われているために停滞性の強い海域となっている。ところで、湾奥部では中国第 2 の河川の黄河が流入している。

近年過剰取水などにより河川水の流出はないと言われているが、衛星写真から判別すると現在でも黄河砂が流出しており、更に都市型水質汚染と合わせて渤海奥部では水質悪化が問題となっている。そういう中、今年 3 月にも中国日報など複数の新聞に、黄河流域での経済活動や住民生活への悪影響への対策として、長江から黄河へ 3 本の運河を建設し、長江の年間流量の約半 4 分の 1 を黄河へ流入させる計画を進行させているという内容が報道されている。もし今後長江から黄河へ大量の河川水が流入するようになると、渤海の環境は大きく変動し、広範囲及び長期的な視野で考えると、渤海からの流出水は更に太平洋へ流出し、日本沿岸域から北太平洋全域へ何らかの影響を及ぼす可能性も予想される。よって早急に環境の変化の有無・規模などを我が国でも把握する必要があると考えられる。

本研究は、上述の技術開発の初期段階として、まず現在の主要な流動機構および物質拡散過程を数値計算により把握し、長期的、広域的な環境変化予測に資することを目的とする。

具体的には、渤海では潮汐流と吹送流が卓越していると考えられるので、まず吹送流の数値計算のために駆動力となる風データや潮汐流の条件を決定し、これらを使用してそれぞれの流れによる物質移流拡散計算をおこなう。

2. 流れと水質拡散の数値モデル

本研究では北緯 30 度から 42 度までの領域を対象領域

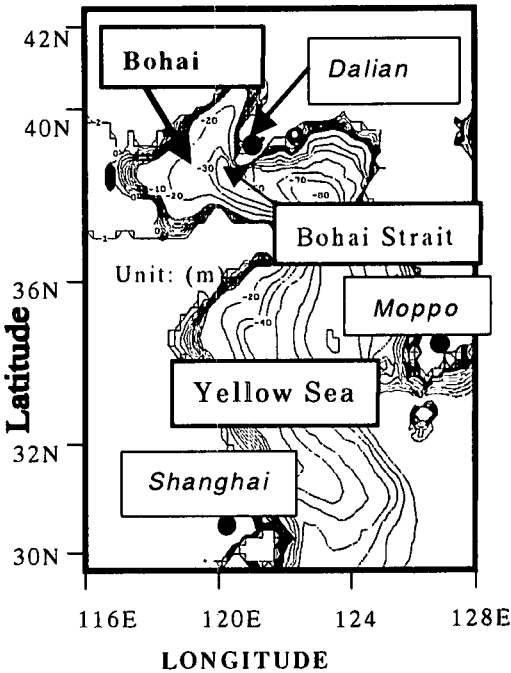


図-1 渤海と黄海

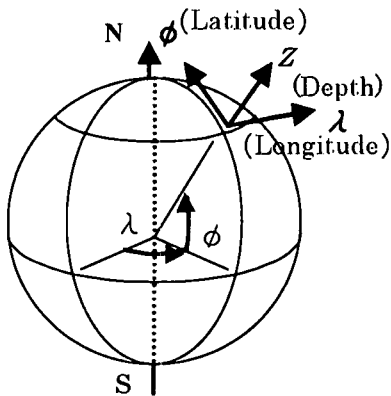


図-2 球面座標系

とするが、領域北部と南部の単位経度当りの長さ比は 0.85 となる。よって流れの数値計算にはバロトロピック

* 正会員 長岡技術科学大学 環境・建設系
** 正会員 Ph.D 長岡技術科学大学 環境・建設系
*** 正会員 工博 長岡技術科学大学 環境・建設系
**** Ph.D Professor, Dept. of Civil Eng., Dalian Uni. of Tech., China.
***** 長岡技術科学大学大学院工学研究科

流れの運動方程式を全陽解的に計算を進める3次元球面座標系のレベルモデルを使用した。図-2に球面座標系を示す。また、静水圧近似、ブシネスク近似、浅海長波近似下における運動方程式及び連続式、物質移流拡散方程式は次のように示される。

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + L(u) - \frac{uv \tan \phi}{a} - fv = & -\frac{1}{\rho_w} \frac{1}{a \cos \phi} \frac{\partial P}{\partial \lambda} \\ & + A_h \left\{ \nabla^2 u + \frac{(1 - \tan^2 \phi) u}{a^2} - \frac{2 \sin \phi}{a^2 \cos^2 \phi} \frac{\partial v}{\partial \lambda} \right\} \\ & + A_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + L(v) - \frac{u^2 \tan \phi}{a} + fu = & -\frac{1}{\rho_w} \frac{1}{a} \frac{\partial P}{\partial \phi} \\ & + A_h \left\{ \nabla^2 v + \frac{(1 - \tan^2 \phi) v}{a^2} - \frac{2 \sin \phi}{a^2 \cos^2 \phi} \frac{\partial u}{\partial \lambda} \right\} \\ & + A_v \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

$$-\rho_w g - \frac{\partial P}{\partial z} = 0 \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -\frac{1}{a \cos \phi} u_s \frac{\partial \zeta}{\partial \lambda} - \frac{1}{a} v_s \frac{\partial \zeta}{\partial \phi} + w_s \dots\dots\dots (4)$$

$$\begin{aligned} L(\alpha) = & \frac{u}{a \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \lambda} (\alpha) \\ & + \frac{v}{a \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} (\cos \phi \alpha) + w \frac{\partial}{\partial z} (\alpha) \dots\dots (5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \nabla^2 \alpha = & \frac{1}{a^2 \cos^2 \phi} \frac{\partial^2 \alpha}{\partial \lambda^2} + \frac{1}{a^2 \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\cos \phi \frac{\partial \alpha}{\partial \phi} \right) \\ & \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + L(C) = K_H \nabla^2 C + K_v \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 $u(\lambda, \phi, z, t)$ および $v(\lambda, \phi, z, t)$ 、 $w(\lambda, \phi, z, t)$ はそれぞれ流速 (m/s) 成分、 t は時間 (s)、 $\zeta(\lambda, \phi, t)$ は水表面高さ (m)、 $f(\phi)$ はコリオリ・パラメーター、 g 重力加速度 (m/s²)、 $P(\lambda, \phi, z, t)$ は圧力 (N/m²)、 a は地球半径 ($=6.37 \times 10^6$ m)、 A_h および A_v はそれぞれ水平及び鉛直の渦動粘性拡散係数 (m²/s) である。また、干潟などの移動境界の計算は表層のみでおこなっている。

3. 数値計算実験のための諸条件の決定

(1) 地形

渤海および黄海は複雑な地形な為に流れも複雑となることが予想されるので、図-1に示すように渤海および黄海全域を含む東経116度から128度、北緯30度から42度で囲まれる領域とした。地形情報はNGDC (U.S. National Geophysical Data Center) から提供される5分刻みの全球情報より当該海域の情報を利用した。

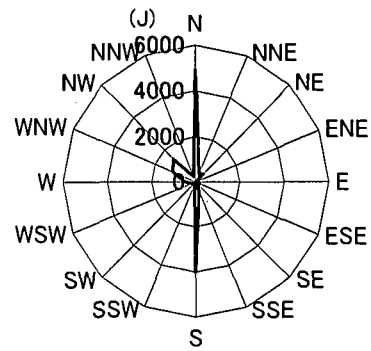


図-3 風エネルギーの頻度特性 (大連, 1997 年 1 月 1 日～12 月 31 日)

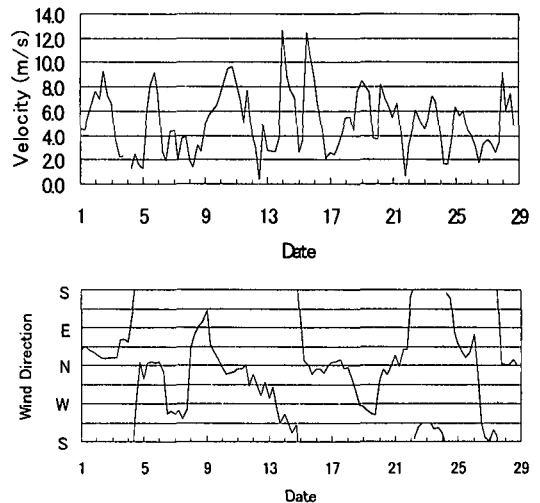


図-4 地上風の時間変化 (上: 風速, 下: 風向) (大連, 1997 年 2 月 1 日～28 日)

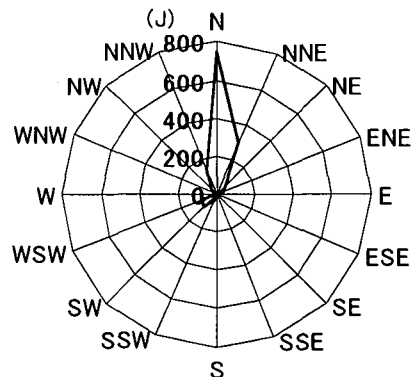


図-5 風エネルギーの頻度特性 (大連, 1997 年 2 月 1 日～28 日)

(2) 吹 送 流

犬飼ら (1999a) は天気図より地衡風を計算し、求めた数値に偏角および係数を与えれば地上風を推算する事ができることを確認している。本研究でもこの手法を用いて 1997 年の 1 月 1 日から 12 月 31 日までの 1 年間の天気図より風データを計算した。吹送流の数値計算の前に、まず領域の中心付近の大連での風向頻度表を作成し、通年および季節毎での卓越風向を求めた。図-3 に大連における 1997 年の 1 年間の風エネルギーの頻度特性を、図-4 に 1997 年 2 月の風向・風速の時間変化を、図-5 大連における 1997 年 2 月の風エネルギーの頻度特性を示す。これらによると通年では北風と南風が卓越していることが分かる。また、2 月には北風が卓越しているのが分かる。吹送流の数値計算ではこのようにして領域全体について求めた風データを 24 時間毎に線形に変化させて入力した。

(3) 潮 汐 流

中野 (1940) の作成した調和定数表によると、渤海および黄海の全域では半日周潮が卓越していることが分かる。よって本研究では半日周潮の潮汐流について数値計算を行った。強制水位は領域内の、上海と沖側の点 (北緯 31 度、東経 126 度) で結ぶ直線、および沖側の点と木浦で結ぶ直線と与えた。また調和定数は、上海 (中国) および木浦 (韓国) は調和定数表より決定し、沖側の点では理科年表などで示される半日周潮の同時潮図および等潮差図より決定した。また、これら 3 点間の位相および振幅は線形に変化するように決定した。

表-1 計算条件

Parameters	Specification
Bathymetry	Etopo-5 data set U.S. National Geophysical Data Center (116-128 E, 30-42 N)
Grid Spacing	5 minutes (spherical coordinate)
Time step	60s
Vertical Layers	5 (Tidal Current), 10 (Wind-driven Current)
Corioli Factor	$f=2\Omega \sin \phi, \phi=30-42^\circ$
Surface Stress	$\left(\rho A_v \frac{\partial u}{\partial z}, \rho A_w \frac{\partial v}{\partial z}\right)=C_a(u_w, v_w)\sqrt{u_w^2+v_w^2}$ $C_a=0.001(0.75+0.067 W)$
Bottom Stress	$(\tau_{bx}, \tau_{by})=\rho C_d(u_b, v_b)\sqrt{u_b^2+v_b^2}$
Wind	Geostrophic wind $W=(u_w, v_w)$
Tidal period	43,200 s (half day period)

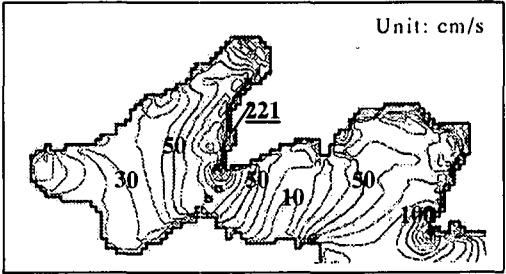


図-6 潮汐流の流速分布 (表層) (渤海海峡付近上げ潮流速最大時)

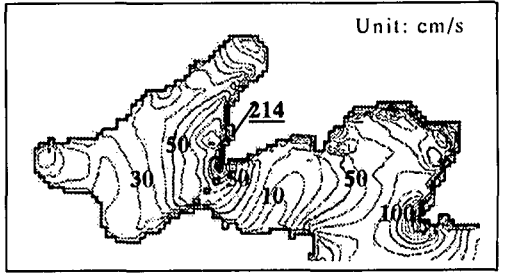


図-7 潮汐流の流速分布 (渤海海峡付近下げ潮流速最大時)

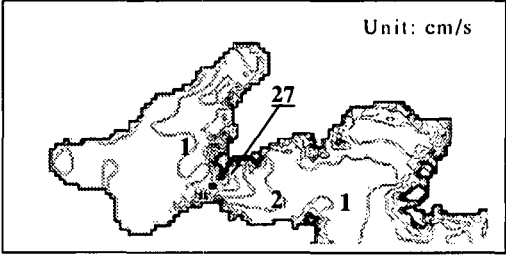


図-8 潮汐残差流の流速分布

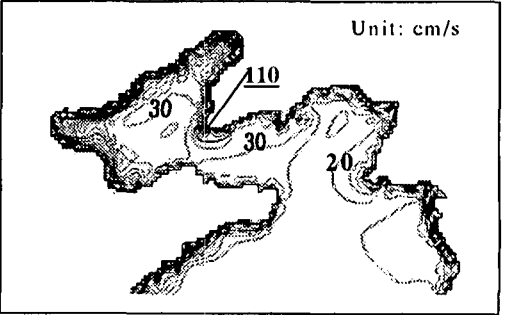


図-9 吹送流風速分布 (計算開始 24 時間後、表層) (大連で北風時、1997 年 2 月 10 日 0 時の天気図より)

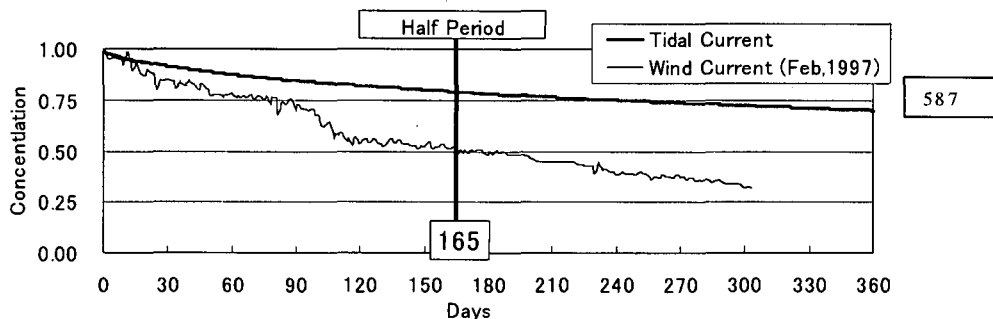


図-10 渤海の海水交換の半減期

(4) 計算条件

計算条件を表-1に示す。

4. 計算結果および考察

(1) 流れの数値計算

まず、最初に潮汐流及び卓越風向時の吹送流の数値計算をおこない、現状の流れの状況を把握した。

a) 潮汐流

渤海海峡付近において上潮流速最大時および下潮流速最大時における表層の流速分布図を図-6, 7に示す。また潮汐残差流の流速分布図を図-8に示す。これらより、潮汐流の流速は渤海海峡付近で毎秒1m以上の流速となるが、1周期平均した潮汐残差流では海峡以外で毎秒1-2cmの流速しかないことがわかる。

b) 吹送流

吹送流の時間変化を計算する前に、まず卓越風向での一定風での吹送流を計算した。大連では2月の卓越風時の風向は北なので、北風時の典型的と思われる天気図より風データを求めた。計算の継続時間については、一般的な流れと風の相互相関係数は6時間程度で最大になると言われているが、能登半島付近で20時間という例(犬飼ら, 1999a)があるので24時間とした。計算より得られた表層の流速分布を図-9に示す。図より、風速は海峡付近では毎秒1メートルを超える流れが、また全域で毎秒20cm以上の流速が生じていることが分かる。

以上のことより、単純振動性が強い潮汐流よりも、吹送流の流速の方が大きいことより、渤海および黄海の海水交換は吹送流に依存するのではないかと考えられる。

(2) 物質の移流拡散

潮汐流および吹送流について物質移流拡散の数値実験を行った。今回は渤海の海水交換における半減期と、黄河河口付近からの物質の拡散過程を計算した。

a) 渤海の海水交換

計算開始時に渤海内の濃度を1、湾外の濃度を0として瞬間濃度放出による移流拡散計算をおこない渤海の海

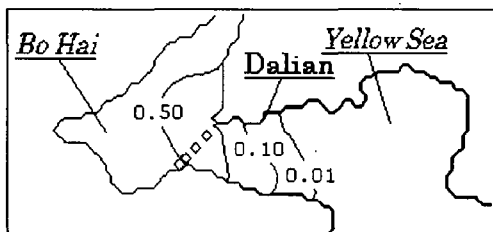


図-11 開始後1ヵ月の濃度分布(渤海海水交換)(潮汐流, 表層, 60周期後)

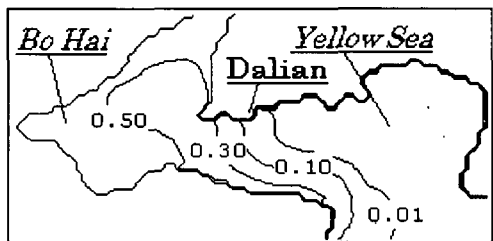


図-12 開始後1ヵ月の濃度分布(渤海海水交換)(吹送流, 表層, 1997年2月1日~28日)

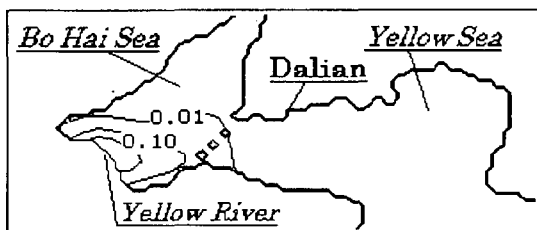


図-13 開始後1ヵ月の濃度分布(黄河河口からの拡散)(潮汐流, 表層, 60周期後)

水交換の半減期を求めた。計算では湾内の各層の濃度の総計が計算開始時の濃度の半分になったときを半減期とした。潮汐流による拡散計算は周期12時間の長周期波であり、吹送流の拡散計算では、1997年1月1日から12月31日までの1年間の毎日の風データを線形に変化させ

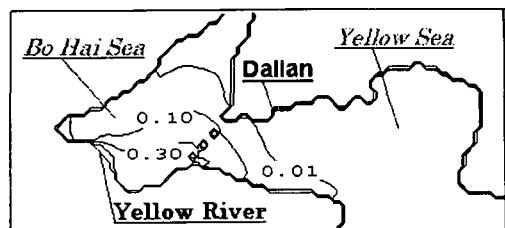


図-14 開始後1ヵ月の濃度分布(黄河河口からの拡散)(吹送流, 表層, 1997年2月1日~28日)

た。層数は流れの計算の時と同様とした。図-10に渤海の海水交換における半減曲線を示す。潮汐流では半減期が求まらなかったため、曲線より漸近線を求め半減期の推定をした。結果によると、潮汐流による半減期は587周期であり、吹送流によるそれは165周期であった。これより、渤海の海水交換は吹送流に大きく依存していることが分かった。図-11に60周期間潮汐流の数値計算をおこなったときの濃度分布を、図-12に1997年2月の1ヶ月間だけ吹送流の数値計算をおこなったときの濃度分布を示す。図より、渤海と黄海の海水交換は主に渤海海峡北部でおこなわれ、黄海南岸沿いに流出していることが分かる。

b) 黄河河口からの流出

次に現在の黄河河口付近からの汚染水の連続点源拡散を計算した。開始時は黄河河口付近の濃度を1とし、それ以外を0とおいた。近年、黄河では河川水が過剰採取されているため河口からの河川水の流出はほとんどないと言われている。このため、今回は河川水の流出は考慮していない。図-13に60週期間潮汐流の数値計算をおこなったときの濃度分布を、図-14に1997年2月の1ヶ月間だけ吹送流の数値計算をおこなったときの濃度分布を示す。図より、黄河河口付近からの海水は渤海海

峡の南部を通り、黄海の南岸沿いに流出していることが分かる。

5. 結 論

(1) 大連における卓越風は夏季に北風であり、夏季に南風となる。

(2) 潮汐は半日周期が卓越している。流速は渤海海峡付近で最大毎秒1m以上となり、吹送流よりも流速は大きくなる。しかし、潮汐残差流は小さくなり、渤海の海水交換には吹送流が大きく寄与している。

(3) 渤海の海水交換について、潮汐流での半減期は1年以上であるが、吹送流での半減期はおよそ半年である。

参 考 文 献

- 犬飼直之、早川典生、福嶋祐介(1999a): 冬季における能登半島沖の風と表面流に関する研究, 水工学論文集, 第43巻, pp. 863-868.
- 犬飼直之・早川典生・福嶋祐介・細山田得三(1999b): 日本海の表面流れの数値計算による検討, 水工学論文集, 第43巻, pp. 857-862.
- 犬飼直之・早川典生・福嶋祐介・細山田得三(1997): 数値計算による吹送流を考慮した海表面粒子追跡に関する研究, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 1046-1050.
- 仲敷憲和(1994): 自由海表面を考慮した海洋循環モデルの開発, 電中研報告, U 94016, 49 p.
- 堀江 毅(1980): 沿岸海域の水の流れと物質の拡散に関する水理学的研究, 港研報告, 360巻, 222 p.
- 中野猿人(1940): 潮汐学, 生産技術センター, 528 p.
- Bryan, K. (1969): A Numerical Method for the Study of the Circulation of the World Ocean, Journal of Computational Phys., Vol. 4, pp. 347-376.
- Garrat, J. R. (1997): Review of drag coefficients over ocean and continents, Monthly Weather Review, Vol. 7, pp. 915-929.
- Kantha, L. H. and C. A. Clayson (2000): Numerical Models of Oceans and Oceanic Processes, A Harcourt Science and technology Company, San Diego.