

大規模閉鎖性水域の渤海における流動構造の季節変動特性

山中 亮一*・志水 克成**・中辻 啓二***

近年、水環境の悪化が著しい中国唯一の閉鎖性内湾である渤海の流動構造の季節変化と汚濁負荷の供給源のひとつと考えられる黄河の河川水の影響範囲について、Landsat 衛星画像と再現数値シミュレーションにより解析を行った。その結果、① 来州湾の大部分が黄河の河川水の影響下にあること、② 残差流の流速は小さいものの流動構造の季節変化は大きいこと、③ 渤海の中央部海域において形成される水温成層は海上風の影響により、その状態が大きく変化すること、④ 黄河の河川水の挙動は季節により異なり、2000 年は夏季より冬季の方が滞留傾向が強いことがわかった。

1. はじめに

渤海は中華人民共和国の北東部に位置する中国唯一の閉鎖性内湾である(図-1 参照)。我国の閉鎖性内湾と比して水平方向の空間スケールのオーダーが一桁異なる大規模な閉鎖性水域である。海域面積は約 77,000 km² (大阪湾の約 55 倍) と広大であるものの、平均水深は約 18 m と浅い。外海の黄海とは幅が約 100 km の渤海海峡を通じて繋がっている。

近年、中国はめざましい経済発展をとげており、日本における高度経済成長期と同様に沿岸域の環境に大きな負荷がかかっている。そのため渤海においても水質汚濁が著しく、大規模な赤潮が頻発しており、早急に有効な対策を講じる必要がある。この汚濁源は多様であるが、我国と比較したとき、農業からの排水が多いことがあげられる。また、今後の工業化、都市化により都市域においては生活排水の急増が危惧される。

現在の中国の社会・経済状況はわが国の 30 年前と類似しており、渤海の流動特性と水質分布に関する知見は極めて少ない。これは渤海の広大な空間スケールによるもので、広域かつ頻度の高い現地データの収集が困難なためである。このような広域な水環境の解析では人工衛星データや数値計算による解析に頼らざるを得ない。

本研究では、(1) Landsat 衛星画像の解析により、黄河の河口周辺における河川水の影響範囲を明らかにするとともに、(2) 2000 年を想定した再現数値シミュレーションを実施して、渤海の流動と密度構造の解明を行うことを目的とする。とくに河川水の挙動、成層状態の季節変化、気象擾乱がこれらに及ぼす影響について解析を行う。

2. 衛星画像による河川水の影響範囲の解析

Landsat 7 号 ETM+ センサによる衛星画像を解析に用いる。画像データはメリーランド大学のリモートセンシングデータアーカイブである The Global Land Cover

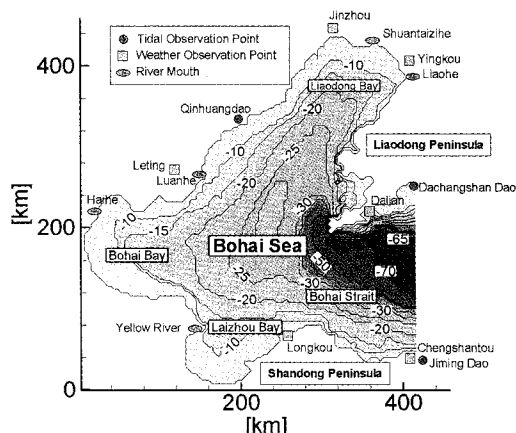


図-1 渤海 (数字は水深 [m])

Facility (GLCF) より得た。ここではラジオメトリック補正と幾何補正済みのデータが公開されている。画像データは 8 bit (256 階調) に対応する 0~255 の Digital Number (DN 値) で構成されている。本研究では DN 値を解析対象とした。図-2 は 2000 年 2 月 28 日に撮影された黄河河口周辺のトゥルーカラー合成画像である。来州湾 (Laizhou Bay) の西岸から湾中央の海域において白色で示された領域が広く分布している様子が確認できる。黄河の河川水は、SS 濃度が 1950 年から 1993 年までの平均で約 25 kg/m³ であったとの報告 (Li ら, 1998) から分かるように SS 濃度が高いことで知られている。したがって、この領域が黄河の河川水の影響範囲に対応していると推測できる。そこで、高濁度水塊の分布の解析に適する波長帯とされる Band-1 (0.45~0.52 μ m) のデータを解析する。画像中の海域における Band-1 データの DN 値のピークは、河口付近の領域で 87、画像右上の領域で 75 であった。そこで閾値を DN=80 として、DN $\leq$ 80 を DN=0、DN $\geq$ 81 を DN=255 にそれぞれ変換する 2 値化処理を行った。

図-3 は処理後の Band-1 画像を示す。河川の影響を受けていると考えられる海域 (DN=255) は灰色、それ以外の海域 (DN=0) は黒色で表した。ここで、Band-1 の

* 正 会 員 博(工) 横浜国立大学助手 大学院環境情報研究院
人工環境と情報部門

** 学生会員 大阪大学大学院工学研究科土木工学専攻

*** 正 会 員 工 博 大阪大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻

波長帯は波長が短いために透過性が強く、海面だけでなく海底に堆積した堆積物が巻き上げられることにより生じる中底層の濁水からの反射も捉えている可能性がある。しかし、図-3 によると黄河の河口周辺よりも水深が浅い來州湾の南東部海域において、Band-1 のセンサで捉えた放射が弱く、画像データの DN 値が小さく黒色で表されていることから、観測時は海底起源の濁水からの放射の影響は小さかったと考えられる。

以上より、本研究では灰色の領域を河川水の影響範囲として取り扱う。図-3 より黄河から流入した河川水は來州湾の広範囲に広がり、この河川水は河口から南東方向に最大約 50 km の海域まで到達していたことがわかった。これより黄河から流入した未処理水などの汚濁負荷は河川水の拡散とともに來州湾の広範囲に影響を及ぼしていると推測される。ところで、黄河の河口より北側の陸域近傍の海域に灰色の領域が存在するが、図-3 によると、この付近に黄河から分流した河川の河口が多数存在することから、これらの小河川が起源であると考えられる。

3. 渤海の流動・密度構造の季節変化

渤海における流動・密度構造の季節変化や河川水の挙動とこれらの支配因子を明らかにするため、前節で解析を行った Landsat 衛星による観測が行なわれた 2000 年を対象とした再現数値シミュレーションを実施した。

(1) 数値計算の概要

数値モデルは中辻 (1994) が大阪湾の流動解析に用いた準 3 次元バロクリニック流動モデル (ODEM) を用いた。ただし、移流項の算定には最高 3 次精度となる MUSCL-TVD スキーム (van Leer, 1977) を用い、海上風による混合作用を考慮するために中立状態の鉛直渦動粘性係数の算定に Henderson-Sellers (1995) による算定式を用いた。図-1 に示す領域を計算対象とし、水平方向は 4 km 間隔で東西 105×南北 110 分割した。鉛直方向は 20 層設定し、層厚は海面から 4,1,1,1,1,1,1,3,3,3,2,2,2,3,3,5,8,10,10,10 m とした。初期密度分布は米国海軍水路部の GDEM (Teague ら, 1990) の冬季のデータを基に計算点に空間補間して与えた。開境界上の水位は主要 4 分潮 (M_2 , S_2 , K_1 , O_1) を考慮した境界値を設定した。なお、調和定数は英国 Hydrographic Office より得た Dachangshan Dao と Jiming Dao の値を用いた。気温、雲量、気圧は気象業務支援センターの世界気象資料より得た渤海周辺 5 地点 (Yingkou, Leting, Longkou, Chengshangton, Jinzhou) の 6 時間毎の観測値を時空間補間したものを用いた。日射量は北緯 40 度の各月の全天日射量 (横山, 1993) を、風速・風向は人工衛星 (Qscat/SeaWinds) による海面における風ベクトル分布を与えた。また、主要 5 河川

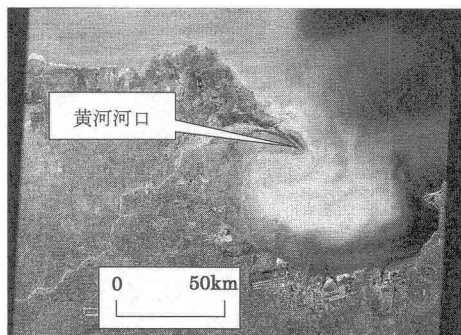


図-2 黄河河口周辺のトゥルーカラー合成図 (2000 年 2 月 28 日撮影)

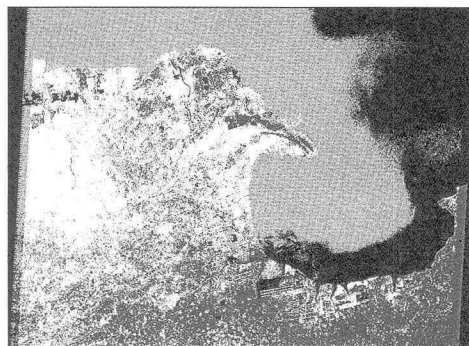


図-3 2 値化処理後の Band-1 画像

表-1 河川流量

河川名		流量 [m³/s]
Liaohe		379
Shuantaizihe		141
Luanhe		128
Haihe		164
Yellow River 2000 年	1 月	38
	2 月	73
	3 月	249
	4 月	128
	5 月	56
	6 月	88
	7 月	355

(Liaohe, Shuantaizihe, Luanhe, Haihe, Yellow River) からの淡水流入を考慮した。黄河 (Yellow River) の河川流量については、2000 年の月別の観測データが得られなかったため、1980 年代の月別流量 (Brismar, 1999) を基に年流量に対する各月の配分を算出し、2000 年の年流量 (Li, 2002) を基に各月の月流量を算定した。これより各月の流量は表-1 のように設定した。他の河川の流量も併せて示した。河口の位置は図-1 に示した。計算対象期間は 1999 年 12 月から 2000 年 8 月までとし、2000 年 1 月から 8 月までを解析対象とした。

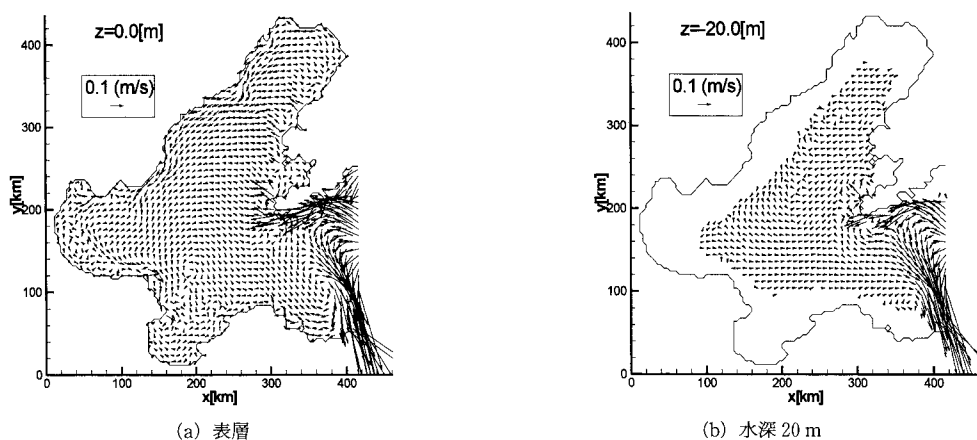


図-4 残差流：冬季

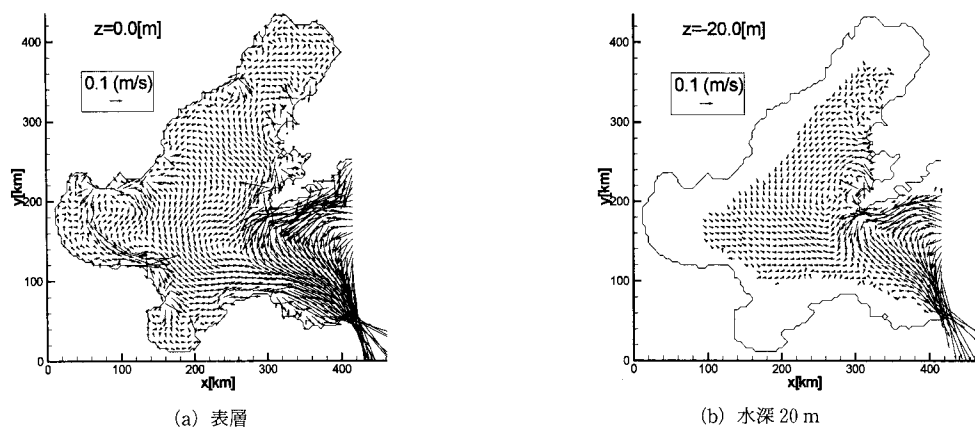


図-5 残差流：夏季

(2) 流動構造の季節変化

冬季(1月)の残差流を図-4に示す。ここでは15日間平均流速を残差流として取り扱う。冬季の表層の残差流は渤海海峡以西の渤海において流速が非常に小さく、流速が0.1m/s以下の領域が大部分を占める。流向は冬季の卓越風である北風の影響で概ね南西流であるが、渤海南東部海域では弱い循環構造も認められる。渤海中央から北東部海域の水深20mでは表層流の補償流としての北東流が生起している。一方、図-5に示した夏季(7月)の表層の残差流は、冬季に比して流速が若干大きく、とくに黄河河口周辺では強い南東流が生起している。水深20mの残差流の流向は渤海において概ね表層と逆向きである。このように、夏季の残差流の流動構造は冬季と同様に3次元的な構造を有しているが、冬季とは流向などの特性が異なる。

(3) 夏季の水温構造

夏季の渤海は水温成層が生起することが指摘されてい

る(Huang, 1999)。そこで本節ではその形成過程と影響範囲について計算結果を基に解析を行う。

図-6に計算結果より求めた渤海の中央海域における水温の鉛直分布と湾内平均風速の経時変化を示す。渤海中央部では5月上旬より成層化が始まり、5月下旬から6月上旬にかけて水深8m付近において水温躍層が形成されることがわかる。この成層構造は6月10日前後に一度解消するものの、6月下旬に再び水深8m付近で発達する。このときの水温の表底差は最大で約4°Cであった。その後、成層構造は消長を繰り返しながら8月上旬には底層水温の上昇によりほぼ解消する。成層構造の消長と風速との関係については成層強度が弱くなった6月10日前後、6月30日前後、7月15日前後にいずれも6m/s以上の風速が認められ、水温構造が強風による流動構造の変化の影響を受けていたことが示唆される。

海上風による成層構造への影響を明確化するため、図-7に7月の計算において海上風と気圧変動の有無を

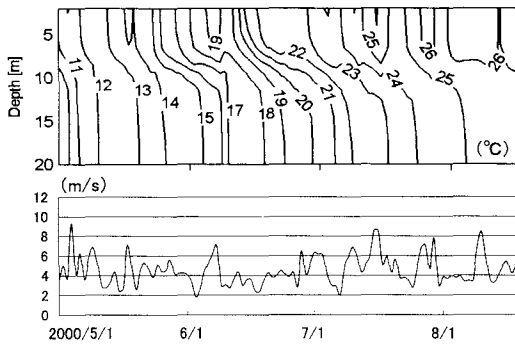


図-6 渤海中央における水温の鉛直分布と湾内平均風速の経時変化

相違点とした2種類の計算結果を示す。海上風と気圧の影響を考慮した水温の鉛直分布(図-7(a)参照)では7月15日に成層構造が解消している。一方、図-7(b)に示した海上風と気圧の影響を考慮しなかった場合は、成層構造の解消は認められず、7月下旬には表層の水温が28°Cにまで上昇した。

以上より、渤海では5月上旬より水温成層が形成されるものの、その成層強度は海上風の影響を大きく受け変化することが分かった。また、この水温成層は5月下旬から7月上旬まで広範囲で生起する。一例として図-8に6月17日における計算結果より算出した海表面と底層の水温差が3°C以上の海域の分布を示す。図-1の水深分布と比較すると水温成層は渤海中央部の水深20m以深の全海域において存在することがわかる。なお、渤海海峡以東の成層構造は、8月の渤海の中央部海域における成層解消後も存在し続ける。これは、この海域が黄海の底層に分布する冷水塊の影響範囲にあるためであると考えられる。

(4) 黄河河川水の分布の季節変化

図-9に2月29日と7月31日の海表面における塩分分布を示す。黄河の河口周辺の塩分分布は、図-9(a)に示した冬季では、塩分29.0 psuの等値線が海岸線に平行に分布している。これは図-3における河川水と海域の境界位置と良好に一致している。すなわち、図-3で示した河川水の影響範囲(灰色の領域)と数値計算により得られた塩分29.0 psu以下の低塩分の領域は概ね一致しており、数値計算が河川水の分布を良好に表現できていると言える。図-3で見られた黄河の河口の北側における河川水の分布は計算結果によると渤海湾の海河(Haihe)河口まで続いており、この水塊が海河の河川水であることが示唆される。しかしながら、本計算では黄河河口の小河川について計算に考慮していないため、その由来については更なる解析が必要と考える。図-9(b)に示した夏季の塩分分布は、とくに河口の東側海域にお

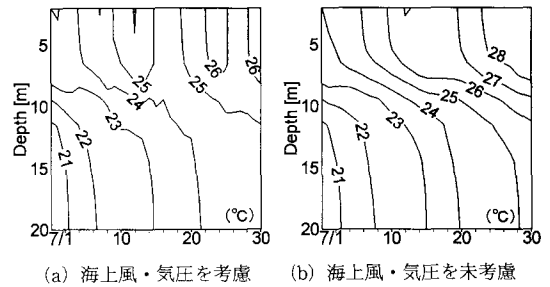


図-7 気象擾乱が渤海中央における水温の鉛直分布に及ぼす影響：7月

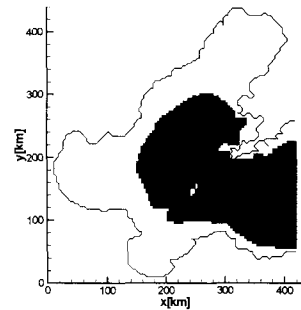


図-8 水温の表底差3°C以上の海域の分布(黒色の領域, 2000/6/17)

いて等値線の分布が冬季と異なり、河川水の挙動が季節毎に異なることが推測される。そこで黄河の河川水の挙動の季節変動特性を明らかにするため、粒子追跡法による数値実験を行った。数値モデルは石塚(2002)が開発したものを援用した。計算対象期間は2月と7月のそれぞれ1ヶ月間とし、粒子は黄河の河口で1時間毎に連続して放流した。図-10に計算結果を示す。図-10(a)に示す2月はすべての粒子が来州湾に滞留し、初期に投入した粒子(図中で濃く着色して表示)の多くが河口から来州湾の対岸方向に移動したことがわかる。一方、7月の結果は来州湾の西岸近くから渤海海峡にかけて粒子が広がっており、2月の結果とは粒子の分布傾向が異なる。

以上より、河川水の挙動は季節ごとの流動・密度構造の相違と河川流量の相違の相互作用により変化し、2000年は夏季より冬季の方が来州湾に河川水が滞留する傾向が強いことがわかった。

4. おわりに

本研究は中国の大規模閉鎖性内湾である渤海の流動構造の季節変化と黄河の河川水の影響範囲について、衛星画像と再現数値シミュレーションにより解析を行った。その結果、①黄河の河川水は来州湾のほぼ全域に影響を及ぼしていること、②残差流の流速は小さいものの残差流構造の季節変化は大きいこと、③渤海の中央海域にお

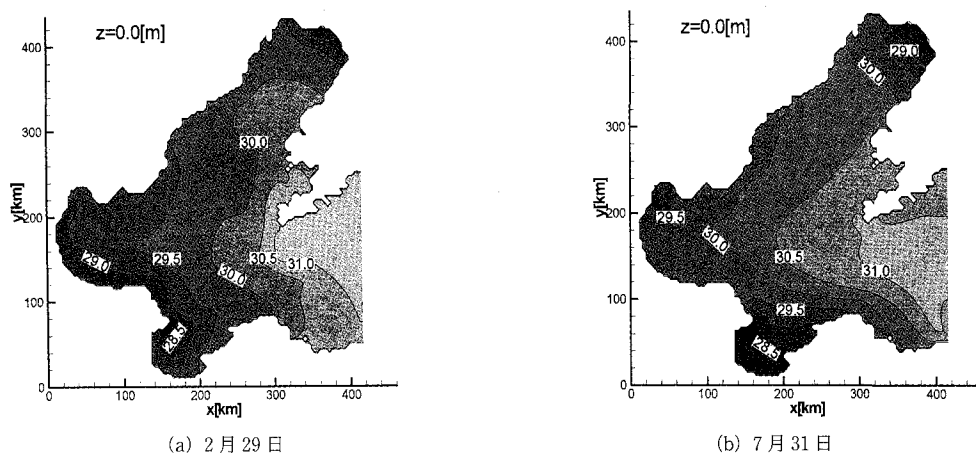


図-9 表層の塩分分布 (図中の数字の単位: psu)

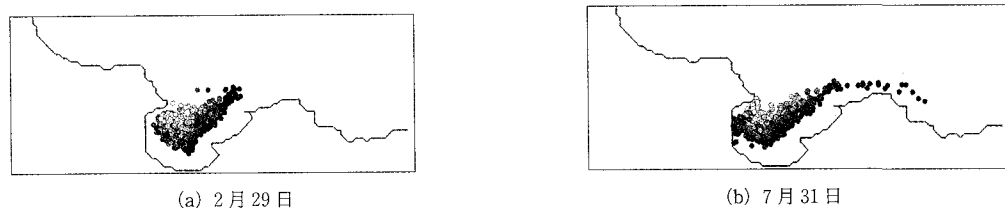


図-10 黄河河口から放流した中立粒子の分布

いて形成される水温成層は海上風の影響を受けやすく水温成層の形成過程に気象擾乱が密接に関わっていること、④黄河から流入した河川水の挙動は季節により異なり、2000年は夏季より冬季の方が滞留する傾向が強いことが明らかとなった。

謝辞: 本研究は文部省科学研究費補助金・基盤研究(A)(2)(課題番号 14205073, 代表者 中辻啓二)の補助を受けた。記して謝意を表する。

参考文献

- 石塚正秀 (2002): オイラー・ラグランジュ法による3次元粒子追跡シミュレーション, 水理公式集例題プログラム集 平成14年度版, 土木学会, 例題6-9.
- 中辻啓二 (1994): 大阪湾における残差流系と物質輸送, 水工学シリーズ 94-A-9, 土木学会水理委員会, pp. A 9.1-28.
- 横山長之 (1993): 海洋環境シミュレーション—水の流れと生物—, 白亜書房, 201 p.
- Brismar, A. (1999): Environmental challenges and impacts of land use conversion in the Yellow river, Interim Report, IR-99-016, 41 p.
- Henderson-Sellers, B. (1985): New formulation of eddy diffusion thermocline models, Appl. Math. Modeling, Vol. 9, pp. 441-446.
- Huang, D., J. Su and J. O. Backhaus (1999): Modelling the seasonal thermal stratification and baroclinic circulation in the Bohai Sea, Continental Shelf Research, 19, pp. 1485-1505.
- Li, G., H. Wei, Y. Han and Y. Chen (1998): Sedimentation in the Yellow river delta, part I: Flow and suspended sediment structure in the upper distributary and the estuary, Marine Geology, Vol. 149, pp. 93-111.
- Li, G., (2002): Thoughts and considerations on Long-term Yellow river development and management, YRCC website (<http://www.yrcc.gov.cn/>). (In Chinese)
- Teague, W. J., M. J. Carron and P. J. Hogan (1990): A comparison between the generalized digital environmental model and levitus climatologies, J. Geophys. Res., 95 C5, pp. 7167-7183.
- Van Leer, B. (1977): Toward the ultimate conservative difference scheme. 4, A new approach to numerical convection, Journal of Computational Physics, 23, pp. 276-299.