

GIS を用いた有明海水環境データベースの構築 と環境変化の一考察

AN ANALYSIS OF VARIOUS CHARACTERISTICS OF AQUATIC ENVIRONMENT
USING THE GIS-AIDED DATABASE IN THE ARIAKE SEA

矢野真一郎¹・田井明²・宮下祥子³・齋田倫範⁴

Shinichiro YANO, Akira TAI, Shoko MIYASHITA and Tomonori SAITA

¹正会員 工博 九州大学大学院准教授 工学研究院環境都市部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)

²学生会員 工修 九州大学大学院 工学府海洋システム工学専攻 (同上)

³工修 三菱電機ネットワーク株式会社 (〒102-0083 東京都千代田区麹町1-4-4)

⁴正会員 工博 九州大学大学院学術研究員 工学研究院環境都市部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)

To preserve healthy aquatic environment and to continue sustainable developments in coastal zones comprehensive decision support systems for the Integrated Coastal Zone Management(ICZM) have been required. Geographic Information System(GIS) is a very powerful tool that can handle numerous various data related to spatial information, water quality, bottom sediment, physical oceanography, ecosystem, terrestrial information, human developed, and so on. In the present study, a GIS-aided database for the aquatic environment in the Ariake Sea was developed. The database was used for an analysis of spatial and temporal characteristics of median grain size, density stratification, transparency, tidal current, and red tide. Also, the interaction among river discharge, stratification, and state of red tide, and the relation between the reduction of tidal currents due to the installed nets for laver cultivation and variation of the transparency were investigated. The results indicate an effectiveness of the GIS-aided database for understanding and solving complicated aquatic environmental problems in a coastal zone, and for making a decision in the coastal management.

Key Words : GIS, Integrated Coastal Zone Management, aquatic environment, red tide, Ariake Sea

1. はじめに

近年の我が国における沿岸域の水環境は、高度経済成長期に見られた人命に関わるような深刻な公害問題はほぼ克服されているが、水産資源量が減少傾向にあることなど、決して健全な状態とは言えない。また、沿岸域の水環境は物理的作用や生物・化学的作用に大きく影響されるため、その変化は複雑で時空間的にも変動が大きい。さらに、汚濁負荷の大半は陸域から流入してくるため、健全な沿岸環境を保全・再生・創造していくための施策作りには、流域圏を統合して管理できる統合沿岸域管理(Integrated Coastal Zone Management:ICZM)の考え方が必要となる。

これまで沿岸域では、多くの調査研究が行われてきた。しかし、それらを統合的に整理・解析するための枠組みは確立されていない。地理情報システム(Geographical Information System:GIS)は、各種の情報を電子地図上で地理情報に関連づけて電子

化することにより、多くの情報を視覚的に表現したり、分析できるツールである。我が国でも、阪神大震災を契機に本格的なGISの普及を政策として進め、既に多くの官公庁で導入されて、その有用性が実証されている¹⁾。また、環境情報の蓄積・整理・解析に有用なツールとしても利用されている²⁾。しかし、沿岸域の水環境情報は時空間的な変化と情報の多様性を持つため、GISを構築する際には陸上GISよりも大量のデータが処理できる高度な解析・可視化手法を用いる必要があり、海洋GISにはさらなる研究開発が必要とされている³⁾。

本研究では、近年その水環境悪化が社会問題となり、多くの調査研究が行われている有明海を対象に、GISによる環境情報のデータベース化とそれを用いた解析を行ない、有用性の検討を行なった。

2. データベースの作成

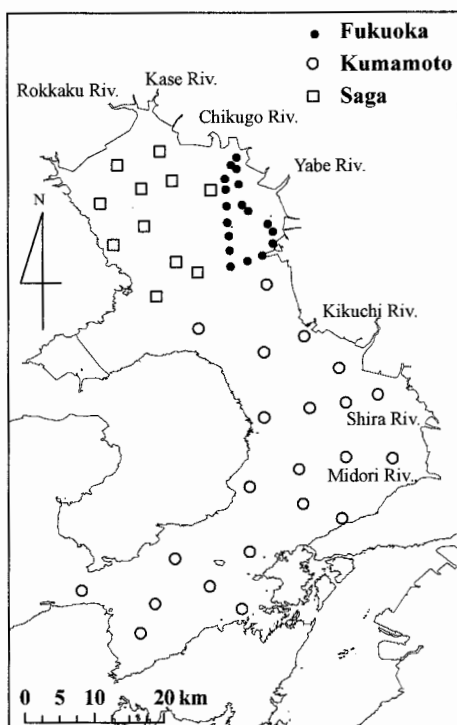


図-1 浅海定線調査の観測地点と流入する主な河川

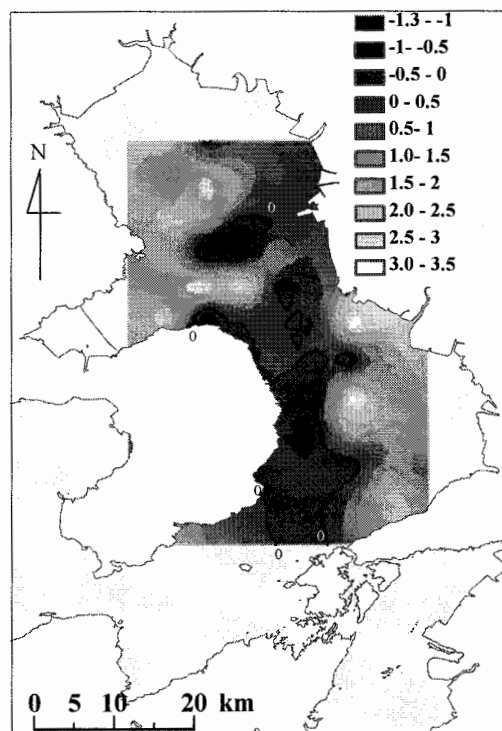


図-2 2002年と1957年のMdφの差

以下のデータについて、ArcGIS(ESRI社製)を用いてデータベース化した。

①浅海定線調査データ：有明海を囲む3県（福岡・佐賀・熊本）により、図-1に示す調査地点で月1回、新月の大潮時を対象として、1965年4月から現在までの42年間継続的に続けられている水質調査によって得られたデータ。主な調査項目は、水温、塩分、透明度、溶存酸素、各種栄養塩である。

②赤潮データ：水産庁九州漁業調整事務所により、有明海の赤潮の発生状況（発生場所、期間、優占種、面積）についてまとめられたもの。

③河川流量データ：筑後川（瀬ノ下観測所）における流量データ。筑後川は有明海奥部に流入する河川流量の7割を占めるため、本研究では筑後川の流量が有明海へ流入する河川流量を代表していると考えて考察を行なった。

④底質データ：1957年⁴⁾、および2002年⁵⁾に調査された底質の中央粒径値Mdφ。前者は、紙の地図上に分布図が示されているため、電子化する作業が必要であった。まず、分布図をスキャナで取り込み、ArcGISのジオリファレンス機能を用いて世界測地系の地図に重ね合わせ、観測地点の位置とMdφの情報を電子化した。次に、電子化したデータをクリギングにより内挿補間し、分布を数値化した。分布の変化を調べるために、図-2に2002年と1957年の差をラスタ演算により計算した結果を示す。図中で負の値は粗粒化、正の値は細粒化を意味する。諫早湾湾口から湾奥西部海域、熊本沖では顕著な細粒化が生じている。一方、島原半島に沿って粗粒化が生じ

た海域も見られる。

⑤潮流流速データ：平面2次元潮流シミュレーション⁶⁾により求めたM₂潮の流速振幅、ならびにノリ網設置の有無によるM₂潮の流速振幅の差。ノリ網の抵抗力は海底摩擦力で表現し、支柱の抵抗は円柱の抗力係数により算出した⁷⁾。ノリ網の設置状況や設置範囲については既存の研究⁷⁾を参照した。

本研究では、これら5種類のデータを利用して、水質の時空間的変動特性やその支配要因、ならびに赤潮の発生条件について検討した。有明海では河川水の流入、季節風、ノリ網の影響などにより季節により水質特性が異なることが予想される。そこで、春（3, 4, 5月）、夏（6, 7, 8月）、秋（9, 10, 11月）、冬（12, 1, 2月）と各季節を定義して解析を行なった。

3. 解析結果と考察

(1) クラスタ分析による海域分類

まず、湾内の水質構造の特徴とその変化を検討するためにクラスタ分析により海域の分類を行なった。用いたデータは、透明度、表層の塩分・水温、および式(1)で求められる層平均リチャードソン数（以下、Ri数）である。

$$Ri = \frac{\left(\frac{\rho_b - \rho_s}{\rho_b} \right) gh}{u^2} \quad (1)$$

ここで、 ρ_b は底層水（海底上1m）の密度、 ρ_s は表層

水の密度, g は重力加速度, h は水深, u は平面 2 次元シミュレーションより求めた M_2 潮の流速振幅である. Ri 数は密度成層の指標であり, 値が大きいと成層傾向, 小さいと混合傾向を表す. これらのデータを季節別に 1975 ~ 1984 年と 1995 ~ 2004 年の期間で平均した. クラスター解析は, データを変数毎に標準化してユークリッド距離を求め, 最遠隣法によって分類を行なった⁸⁾. そして, 得られたデンドログラムより海域を分類した.

夏と冬の結果を図-3 に示す. 図中の線 I はクラスター分析における最大領域, 線 II はその次の中領域の分割線を示している. また, 表-3 には各海域のデータの平均値を示している.

夏は両期間ともに 5 海域に分割された. 各海域の平均値を比較すると, 透明度と表層塩分は湾口から湾奥へ向かって低下し, 表層水温は上昇している. また, 線 II は筑後川河口部と湾奥西部海域を同分類 (海域 E) とするように引かれている. これは, この海域が筑後川からの淡水流入の影響を最も強く受ける海域であるため, 詳細な検討は後述する. 一方, 冬は両期間ともに 6 海域に分けられた. 夏とは逆に表層水温が湾口から湾奥に向かって低下しており, 夏と比べて湾口と湾奥の水温差が大きいことが分かる. また, 夏と同様に線 II は筑後川河口周辺と湾奥西部海域を同じ分類にしていた.

さらに, 夏, 冬ともに 1975 ~ 1984 年と比べて 1995 ~ 2004 年は湾口部の 2 つの海域 (A, B) が北上しており, 透明度の高い海域が拡大している.

(2) 湾奥の河川水の挙動について

次に, 湾奥部の海域分類について考察する. 前述したように, 湾奥部は筑後川河口周辺と西部海域が同じ海域として分類された. この原因を調べるために, 1981 ~ 2004 年の 24 年間について夏の日平均流量が多い上位 3 年 (平均流量: $397 \text{ m}^3/\text{s}$) と下位 3 年 ($81 \text{ m}^3/\text{s}$) について, それぞれ観測点ごとに表層塩分の平均値を求め, 流量が少ないときに対する多いときの表層塩分の変化率を算出した. 変化率の空間分布を図-4 に示す. 筑後川や矢部川の河口に近い福岡南部海域より西部海域のほうが減少率が大きいことが分かる. すなわち, 流量が多くなると, 筑後川から流入した淡水は南側よりも西側に流れていく傾向が強くなることが推察される.

各海域間 (図-4 に示す福岡北部, 福岡南部, 西部の 3 海域) の表層塩分の相関を調べるために夏季における海域ごとの平均値を求めた. そして, これらの関係をより詳細に検討するために回帰分析を行なった. 単純な線形回帰分析は, データの正規分布を前提としているため, 今回のように高塩分側と低塩分側でデータ数が著しく異なる場合は全データを用いた分析には適さない. そこで, 高塩分側と低塩分側からシャピロ・ウィルクス検定⁹⁾ (有意確率: $p > 0.01$) により正規分布が仮定できる範囲をそれぞ

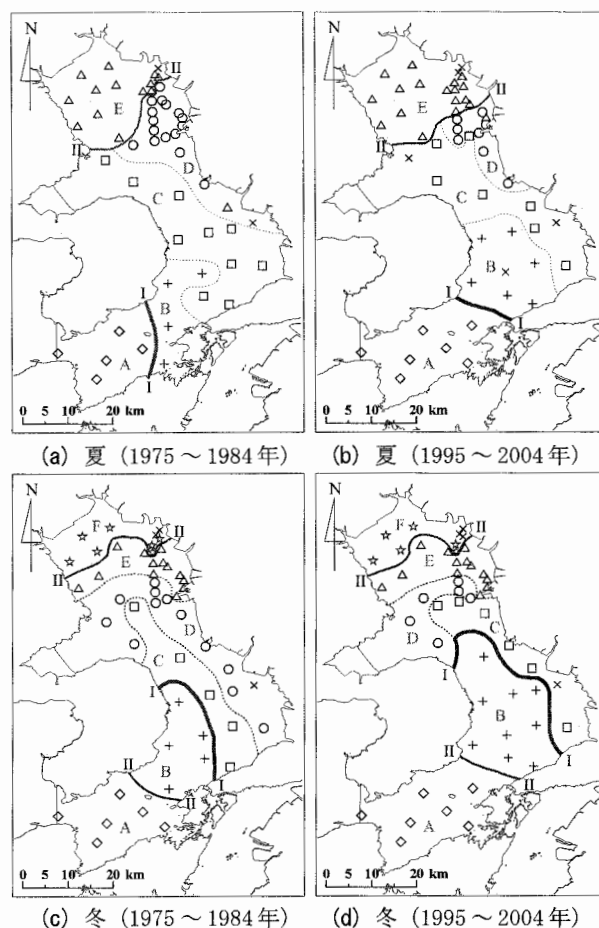


図-3 クラスター分析による海域分類

表-3 海域別の各データの平均値

	海域	透明度(m)	水温(°C)	塩分(PSU)	Ri 数
夏 (1975 ~ 1984)	A	6.7	23.0	32.4	0.25
	B	4.6	24.1	30.4	3.29
	C	3.2	24.8	28.1	3.88
	D	1.9	25.1	27.5	2.08
	E	1.4	25.4	24.3	1.85
夏 (1995 ~ 2004)	A	7.3	23.9	32.2	0.48
	B	4.7	25.2	29.6	3.39
	C	2.9	25.9	27.9	3.43
	D	2.0	25.7	28.2	1.09
	E	1.4	26.2	25.0	1.56
冬 (1975 ~ 1984)	A	6.8	14.0	33.6	0.03
	B	6.0	13.0	32.7	0.20
	C	4.0	12.4	32.2	0.35
	D	2.6	11.5	31.3	0.45
	E	1.5	10.5	30.6	0.11
	F	1.0	9.6	28.6	0.25
冬 (1995 ~ 2004)	A	8.5	14.5	33.2	0.42
	B	6.1	13.1	32.4	0.24
	C	3.1	12.1	31.5	0.42
	D	3.3	11.5	31.3	0.20
	E	1.0	10.3	28.7	0.26
	F	1.2	10.3	29.7	0.06

れ設定し, 筑後川河口が位置する福岡北部に対する福岡南部と西部の回帰直線を求めた. 傾き 1, 切片 0 の基準線も合わせて, 図-5 に結果を示す.

まず, 福岡南部の回帰直線は基準線より上に位置し, 傾きは 1 より小さかった. これは, 福岡北部が

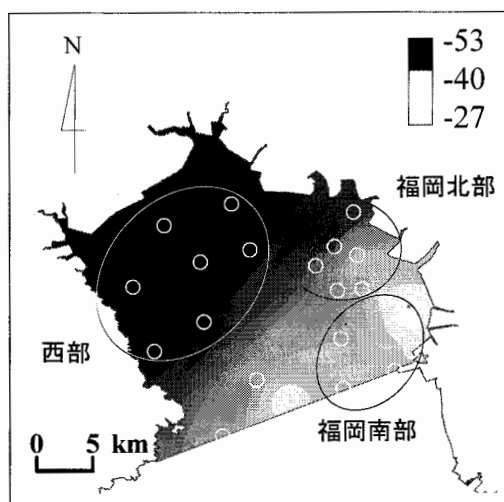


図-4 河川流入による塩分の変化率 (単位: %)
(筑後川流量の上位3年と下位3年の平均値の差)

低塩分化していくと南北間の塩分差が拡大することを表している。一方、西部の回帰直線は、高塩分・低塩分側ともに基準線とほぼ重なっていることから、福岡北部と同様に变化する傾向があることが分かる。これらより、筑後川から流入した淡水は、南方よりも主に西方へ輸送されていることが予想される。また、その傾向は河川流量が大きいほど顕著に表れると考えられる。このことは、筑後川起源の淡水の輸送に対しては、コリオリ力が強く影響していることを示唆している。すなわち、筑後川から南向きに流出した淡水は、コリオリ力が作用することで進行方向に対し右向きに偏向し、西方へ輸送されたと考えられる。このとき河川流量が大きいほど淡水塊の南向きの流出流速は大きく、コリオリ力の作用もそれに比例して大きくなり、西部海域への淡水輸送が促進されることになる。

(3) 透明度の経年変化について

次に、近年上昇傾向にあると言われている透明度の長期変動について検討する。透明度の上昇に関しては、既に多くの報告が行われているが（例えば、中田・野中¹⁰⁾など）、本研究では上昇傾向の季節や海域による違いに注目して検討を行なった。

透明度の経年的な変動傾向を調べるために、各地点で式(2)で示されるケンドールの順位相関係数 $\tau^{(1)}$ を求めた。

$$\tau = \frac{K-L}{K+L} \quad (2)$$

ここで、 K, L はそれぞれ、全ての一対のデータの組み合わせの中で時間と透明度の大小関係が一致した場合の対の個数、ならびに一致しない対の個数である。解析は3県全てのデータが揃っている1975年以降を対象に行なった（危険率: $p < 0.05$ ）。夏と冬の結果のみを図-6に示す。

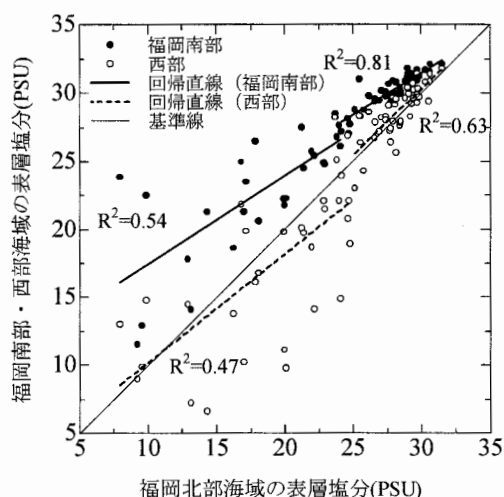


図-5 福岡北部と福岡南部・西部海域における表層塩分の相関図

夏と冬、ならびに図示はしていないが秋と春の全ての季節について、有明海湾口に近い南部海域において有意な上昇傾向を示す地点が数多く確認された。一方、湾奥部に関しては、冬に佐賀県西岸で上昇傾向を示したが、夏や春では有意な傾向性は見られず、測点によっては低下傾向を示した。

夏に上昇傾向が見られないのは、河川流量に影響されている可能性がある。そこで、浅海定線調査実施日（数日間になる場合は最終日）から15日前までの筑後川の平均流量が $100 \text{ m}^3/\text{s}$ より小さい場合のデータのみを用いて同様な解析を行なってみた（図-6(c)）。上昇傾向を示す地点が増えたものの、湾奥に関しては有意な上昇傾向は見られなかった。よって、透明度の変動に関する季節差は、河川流量により生じたものではないと考えられる。

透明度を支配する他の要因として、底質の巻き上げが考えられる。湾奥部で細粒化が進んでいること（図-2）などから、底質が変化してきていると考えられ、透明度にも影響を与えていると推測される。微細な土粒子は海水中で凝集しフロックを形成するため、沈降等の挙動には未解明な点も多く、現在盛んに研究が行われている（例えば、Manning *et al.*¹²⁾など）。一方、田中ら¹³⁾はノリ網の抵抗による流速減少が濁度に与える影響について現地観測を行ない、ノリ網により濁度が減少する傾向があることを示している。そこで、平面2次元潮流シミュレーションより得られたノリ網設置による M_2 潮流速振幅の増加量（正は増加、負は減少を表す）の分布と冬季の透明度の変化状況を比較した（図-7）。透明度が上昇している海域は、ノリ網により流速が減少した海域上にほぼ重なっており、透明度の変動傾向が季節により異なる原因として、主に冬季に設置されているノリ網が影響していることが示唆された。

(4) 密度成層と赤潮の発生の関係について

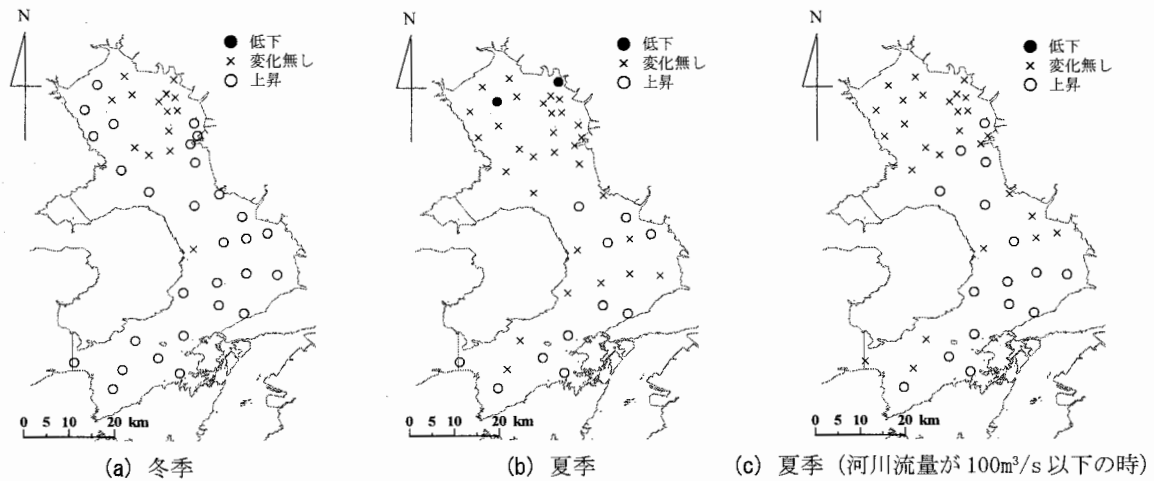


図-6 ケンドールの順位相関による透明度の長期変動の検定結果

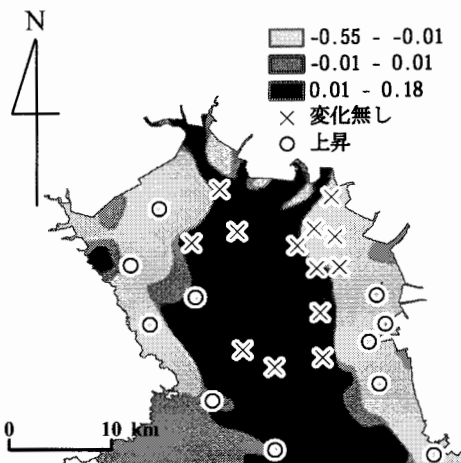


図-7 ノリ網の設置による流速の増減(単位: m/s)と冬季の透明度変動との関係

最後に、赤潮発生状況、密度成層状況、ならびに河川流量の関係を検討した。まず、湾奥部における赤潮の発生状況について、浅海定線調査実施日前後に赤潮が発生したものを「開始」、調査日前後に赤潮が終了したものを「終了」、赤潮が調査日以前から継続しているものを「継続」、それ以外のものは「無し」の4つに分類した。次に、毎月の浅海定線調査の調査最終日から15日前までの期間について、筑後川の平均流量を算出した。4つの分類毎の夏と冬の結果について、前述の Ri 数を縦軸、15日平均流量を横軸として図-8に示す。ここで、 Ri 数は湾奥部に位置する全測点の平均値を用いている。

まず、夏季については、河川流量の増加に伴い、 Ri 数が大きくなり成層化する傾向が分かる。しかし、河川流量が小さいときは大きいときと比べて Ri 数に幅が見られ、同程度の河川流量でも成層度が大きく異なる場合があることが分かる。これは、河川流量が比較的小さい時に生じる密度成層には、日射や風等の気象条件の違いが相対的に強く影響しているためと考えられる。

赤潮の「開始」は Ri 数が3以上のときのみ、「終

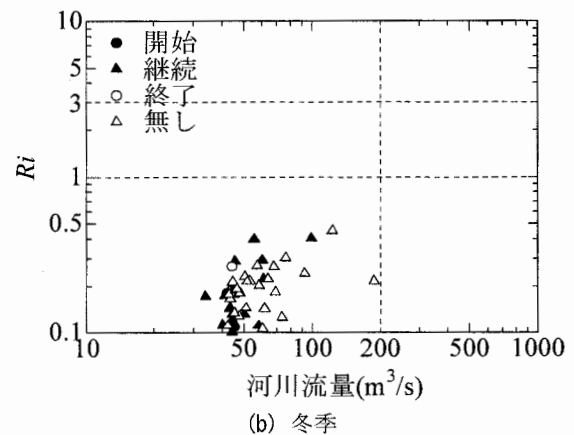
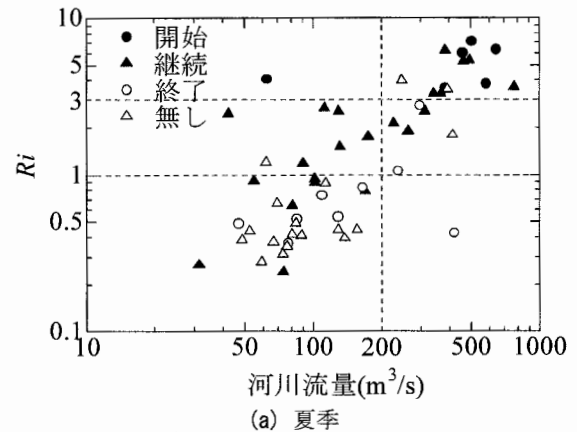


図-8 赤潮発生状況別の Ri 数と河川流量の関係

了」は3未満のときのみが生じている。また、河川流量が $200 \text{ m}^3/\text{s}$ 以下の時、赤潮の「終了」および「無し」は「開始」や「継続」より下側に分布する傾向が見られる。すなわち、夏季の赤潮の消長には成層条件が重要なファクターであることが示された。これより、大潮期に限定された調査であるため密度成層が最も発達しやすい小潮期の情報が欠けている浅海定線調査の結果を用いても、密度成層と赤潮の関連性を示すことが十分可能であるといえる。

一方、冬季については、夏季に比べると Ri 数と流

量の変動が小さく、赤潮の分類には明確な傾向性が見受けられない。これは、冬季においては河川流量の変動が小さいため、赤潮の発生には密度成層以外の要因が強く影響していることを示唆している。現段階では詳細は不明であるため、今後、利用可能なデータを増やし解析する必要がある。

4. まとめ

GISを利用して有明海の水環境データベースを構築し、水質構造を多面的に解析した。クラスター分析による海域分類から、季節別の空間的な水質構造を捉えることができた。また、湾奥部において筑後川の淡水は南側だけではなく西側へも輸送される傾向があることが分かった。長期変動としては、冬の透明度の上昇が顕著であり、湾奥部においてノリ網による潮流減少の影響が示唆された。赤潮の発生と密度成層との関連については、夏季に両者の関連性が強いことが分かった。

本研究の結果より、GISを用いた沿岸域の水環境データベースの有用性について一端を示すことができた。今後、ICZMへの活用を促すために、陸上GISとの結合や海域部分の解析・表現ツールの充実化などを行う必要がある。

謝辞：本研究で用いた浅海定線調査データは、佐賀県有明水産振興センター、福岡県水産海洋技術センター、熊本県水産研究センターにより調査されたものである。河川流量データは国土交通省筑後川河川事務所に提供して頂いた。九州大学大学院総合理工学府の高橋篤氏には、データベースの構築に多大なご支援をいただいた。また、使用データの一部は有明海環境情報・研究ネットワーク (<http://ay.fish-jfrca.jp/ariake/index.asp>) よりダウンロードした。本研究の一部は、平成18年度科学研究費補助金基盤研究(C) (18560500)により実施された。ここに記し、深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 内閣官房測位・地理情報システム推進会議：GISアクションプログラム2010, <http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/sokuitiri/190322/action.pdf>.
- 2) Huang, G.H. and Chang, N.B.: Perspectives of Environmental Informatics and Systems Analysis, *Journal of Environmental Informatics*, 1(1), pp.1-6, 2003.
- 3) 伊藤喜代志, 西田勤：海洋GISソフトウェアの将来性, 月刊海洋, 36(5), pp. 421-425, 2004.
- 4) 鎌田泰彦：有明海の海底堆積物, 長崎大学教育学部自然科学研究報告, 18, pp. 71-82, 1967.
- 5) 大木公彦：重金属が与えた底生有孔虫群集変化に関する研究, 平成13～15年度科学研究費補助金(基盤研究(C))研究成果報告書, pp. 40-59, 2004.
- 6) 田井明, Hatta, M. P., 矢野真一郎, 齋田倫範, 小松利光：諫早湾湾奥の締切りが有明海の潮汐・潮流に与えた影響, 海岸工学論文集, 第53巻, pp. 331-335, 2006.
- 7) 千葉賢, 武本行正：諫早湾潮受け堤防の影響評価のための潮位観測値の分析と流況数値解析, 四日市大学環境情報論集, 第5巻, 第1, 2号合併号, pp. 39-70, 2002.
- 8) 永田靖, 棟近雅彦：多変量解析法入門, pp. 174-185, サイエンス社, 2001.
- 9) 清水信博：もう悩まない！論文が書ける統計, pp. 13-14, オーエムエス出版, 2004.
- 10) 中田英昭, 野中裕子：有明海における海況の経年的な変化, 月刊海洋, 35(4), pp. 256-260, 2003.
- 11) William H. Press, Saul A. Teukolsky, William T. Vetterling, Brian P. Flannery (丹慶勝市, 奥村晴彦, 佐藤俊朗, 小林誠訳)：NUMERICAL RECIPES in C[日本語版], pp. 474-480, 技術評論社, 1993.
- 12) Manning, A.J., Bass, S.J. and Dyer, K. R.: Floc properties in the turbidity maximum of a mesotidal estuary during neap and spring tidal conditions, *Marine Geology*, Vol.235, pp.193-211, 2006.
- 13) 田中勝久, 児玉真史, 熊谷香, 藤本尚伸：有明海筑後川河口域における冬季のクロロフィル蛍光と濁度変動, 海の研究, 13(2), pp. 163-172, 2004.