

人工衛星リモートセンシングによる大村湾の海水交換の調査とシミュレーション・システムの相似性確認への応用

Investigation of Sea Water Exchange in the Omura Bay by Satellite Remote Sensing Technique and
a Test for Confirming Similarity of a Numerical Simulation System

兵頭 竜二*・後藤 恵之輔**・全 炳徳**

Ryuji Hyodo, Keinosuke Gotoh, Byungdug Jun

Man-made perturbation on the environment has resulted in many problems such as eutrophication and sedimentation in water bodies. In recent years, domestic sewage and industrial waste water are having a bad influence on water quality, especially, estuary and closed bay area. Therefore, water quality controlling and monitoring activities are inevitable.

We tried to apply satellite remote sensing techniques to investigate the sea water exchange of the Omura Bay and the Sasebo Bay. Maximum likelihood method was used to classify and confirm the exchange condition of sea water bodies. And also, the result are compared with an outcome of numerical simulation method by workstation computer.

Keywords : Omura Bay, satellite remote sensing, numerical simulation

1. はじめに

図1-1に示す大村湾は、長崎県のほぼ中央に位置する湾であり、表面積が320km²、平均水深が14.8mの中型の内湾である^{1)・2)}。この湾は、湾北部に位置する針尾瀬戸と早岐瀬戸の2ヶ所を通して、隣接する佐世保湾との間で海水が交換される、二重閉鎖性の湾である。このため、大村湾の海水交換性は、非常に悪いと言われている³⁾。これに加え、近年の湾岸地域からの家庭雑廃水や工場及び団地などからの汚濁廃水の増加のため、大村湾の水質汚濁は年々悪化の傾向にある³⁾。

そこで著者らは、衛星リモートセンシングと実海域での水質調査とを組み合わせ定期的な水質監視や、シミュレーションなどを利用して、大村湾の効果的な浄化策を検討することを目的とした研究を進めている⁴⁾。

これまでの研究^{4)・5)}では、満ち潮時の大村湾と佐世保湾とを同時に捕らえた人工衛星によるリモートセンシング・データ（以下、単に衛星データと呼ぶ）を選び、最尤法⁶⁾による海水の水質的な分類を試みた。このことにより、大村湾が満ち潮の時、佐世保湾から流入してきた海水が、大村湾の中で大きな反時計回りの渦を形成する様子などを明らかにした。また、大村湾の様な閉鎖性内湾への海水の流れ込みを調査する方法として、この様な水質による海水の分類が有効であることなどを示した。

本報告では、人工衛星の観測飛来に合わせて実施した現地観測データを利用して、大村湾の場合にも水質と衛星データとの間に相関性が有ることを確認し、この水質による分類手法の裏付けを行った。また、大村湾が引き潮の時を捕らえた衛星データを新たに選び、同様の水質による分類を実施した。この結果、この水質分類の手法は、大村湾が引き潮の時にも有効に利用できることを確認した。さらに、これまでの結果と合わせて総合的に判断することで、佐世保湾から大村湾に向けて流れ込んできた海水が、大村湾の潮汐に応じてどの様に移動するかについての考察を行った。

また現在著者らは、大村湾の潮流等に関する数値シミュレーション実験を開始しており、このシミュレーション・システムの妥当性を評価・検討する方法が必要である。そこで、この衛星データから得られた、潮汐に応じた水塊移動に関する情報を、シミュレーション・システムの相似性確認に利用する手法について考察を行った。

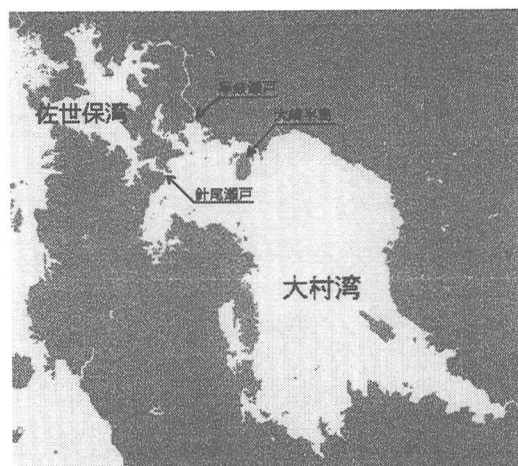


図1-1 大村湾と佐世保湾の概略

* 学生会員 長崎県工業技術センター（〒856 長崎県大村市池田2丁目1303番地8）

** 正会員 長崎大学 工学部 社会開発工学科

2 人工衛星リモートセンシングによる佐世保湾の海水と大村湾の海水との分類^{1), 7)}

大村湾の様に湾口が非常に狭く閉鎖性が高い内湾の場合、隣接する湾と、水質の違いが生じると考えられる。従って、人工衛星リモートセンシングで得られるデータの佐世保湾部分と大村湾部分との水質的な分類を行うことで、佐世保湾から大村湾への海水の流入、または流出の様子を知ることができると考えられる。そこで本研究では、この海水の流入・流出の様子を知るために、大村湾と佐世保湾とを同時に捕らえた人工衛星ランドサット5号のTMデータ（以下、単にTMデータと呼ぶ）を選び、水質的な分類を試みた。なお、この分類には、教師あり分類法の一つである最尤法⁶⁾を用いた。

(1) 解析に用いたTMデータ

本報告では、表2-1に示す7つのTMデータについての解析結果について報告する。表2-1には、TMデータの観測日時と、この日時に対応する大村湾の満潮・干潮などに関する情報も示している。人工衛星の観測時間と大村湾の潮時との関係から、1991年8月14日と1992年9月17日、1994年8月22日のTMデータは、大村湾が満ち潮の最中に観測されたデータである。同様に、1991年12月4日と1991年12月20日のTMデータは、大村湾がほぼ満潮の時に観測されたデータである。さらに、1994年6月3日と1994年7月21日のTMデータは、大村湾が引き潮の時に観測されたデータである。

表2-1 解析に用いたTMデータと大村湾の潮汐に関する情報

LandSat/5の観測日時 日付	時刻	大村湾の潮汐に関する情報					
		潮	方向	潮時	潮高	潮時	潮高
1991. 8/14	10:17	大潮	満ち潮	7:53	18	14:00	79
1991.12/ 4	10:18	大潮	満ち潮	3:44	8	10:33	70
1991.12/20	10:18	大潮	満ち潮	3:56	-1	10:44	72
1992. 9/17	10:15	大潮	満ち潮	7:44	16	14:05	73
1994. 6/ 3	10:12	小潮	引き潮	6:45	62	13:20	29
1994. 7/21	10:11	中潮	引き潮	9:36	76	16:14	8
1994. 8/22	10:10	大潮	満ち潮	5:48	22	11:38	84

(2) TMデータと水質データとの関係

人工衛星リモートセンシングによるデータと、実際の海域で測定した水質データとの相関性については、数多くの研究が成されている⁹⁾。ここでは、1994年8月22日のランドサット5号の大村湾上空飛来にあわせて実施した大村湾の水質測定を例に、大村湾においても衛星データと水質データとの間に相関性があることを簡単に確認しておく。

表2-2 現場での実測データの例（例：1994年8月22日）

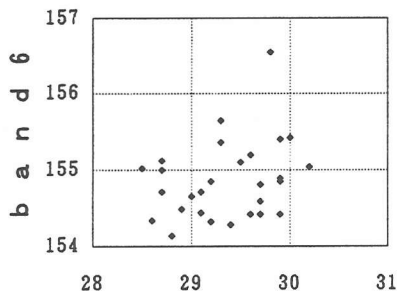
現地での測定場所 緯度 経度		水温 [℃]	溶存酸素 [mgO/l]	対応するTMデータのCCT値と比			
				バンド1	バンド2	バンド6	b2/b1
N32° 54.594'	E129° 49.948	28.7	7.54	61.00	20.36	155.12	0.3339
N32° 55.143'	E129° 49.974	28.7	7.31	61.16	20.26	155.00	0.3313
N32° 55.702'	E129° 49.967	28.7	7.11	60.77	19.71	154.71	0.3244
N32° 56.263'	E129° 49.955	29.0	7.08	60.89	19.83	154.65	0.3257
N32° 56.885'	E129° 49.965	29.2	7.13	60.61	19.69	154.32	0.3249
N32° 58.088'	E129° 49.958	30.0	7.31	61.10	19.89	155.42	0.3257
N32° 59.023'	E129° 49.954	29.3	7.12	59.61	19.79	155.65	0.3321
N32° 59.010'	E129° 53.324	28.5	7.37	59.77	19.91	155.02	0.3332
N32° 58.001'	E129° 52.248	28.6	7.11	60.59	19.93	154.34	0.3291
N32° 56.822'	E129° 51.039	29.1	7.30	60.87	20.08	154.71	0.3299
N32° 56.237'	E129° 50.350	29.2	7.30	61.12	19.75	154.85	0.3232
N32° 55.743'	E129° 49.722	29.9	7.40	60.59	19.67	154.85	0.3247
N32° 55.498'	E129° 49.456	29.3	7.21	60.67	19.87	155.36	0.3276
N32° 55.758'	E129° 49.484	29.5	7.09	60.67	19.81	155.10	0.3266
N32° 55.772'	E129° 50.563	29.7	7.40	61.02	19.79	154.59	0.3244
N32° 55.754'	E129° 51.064	28.8	7.18	61.18	19.81	154.14	0.3239
N32° 55.758'	E129° 52.279	28.9	7.30	60.89	19.73	154.49	0.3241
N32° 55.761'	E129° 53.379	29.1	7.14	60.44	19.65	154.44	0.3251
N32° 54.138'	E129° 52.860	30.2	7.34	60.89	20.20	155.04	0.3318
N32° 53.627'	E129° 53.902	29.9	7.42	61.04	19.83	155.40	0.3250
N32° 53.137'	E129° 54.695	29.6	7.10	62.34	20.44	155.20	0.3280
N32° 52.649'	E129° 55.638	29.7	7.18	62.55	20.63	154.81	0.3299
N32° 52.138'	E129° 56.429	29.4	6.92	62.46	20.38	154.28	0.3264
N32° 51.756'	E129° 57.202	29.6	7.02	62.08	20.10	154.42	0.3238
N32° 51.377'	E129° 57.835	29.7	6.97	61.38	20.00	154.42	0.3258
N32° 50.993'	E129° 58.619	29.9	7.39	61.71	20.51	154.42	0.3323
N32° 50.612'	E129° 59.337	29.9	7.35	61.14	21.36	154.89	0.3495
N32° 50.434'	E129° 59.983	29.8	7.07	64.77	24.02	156.55	0.3708

注) 水温は、水深約10cmの所を測定。溶存酸素量は、水深約1mの所を測定。

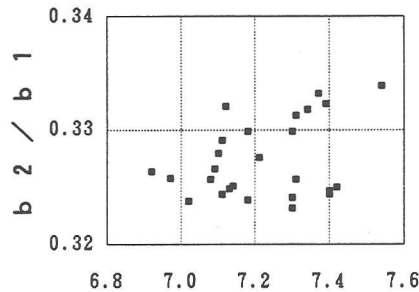
表 2-2 は、1994 年 8 月 22 日に実施した大村湾の水質調査結果の一部で、観測点の緯度・経度、および、それぞれの観測点における水深 10cm の海水温度と、水深 1 m の溶存酸素量を示した表である。またこの表には、それぞれの観測点に対応する TM データのバンド 1、2、6 の CCT 値（7 ビット × 7 ビットの領域の平均値）と、さらにバンド 2 とバンド 1 との CCT 値の比も示している。

ランドサット 5 号のバンド 6 は、熱バンドとも呼ばれ、温度との間に相関性がある。また、バンド 2 とバンド 1 との比は、水中の植物プランクトンなどが持っているクロロフィル a の濃度と相関性があることで知られている。さらに水中のプランクトンは、日中、光合成を行うことで酸素を放出する。このことから、このバンド 2 とバンド 1 との比は、溶存酸素の量との間にも相関性があると推測される。

図 2-1、図 2-2 は、それぞれ、表 2-2 に示した観測点におけるバンド 6 と海水温度との関係、バンド 2・バンド 1 間の比と溶存酸素量との関係を表したグラフである。これらのグラフから、大村湾においても、ランドサット 5 号のリモートセンシング・データと水質データとの間には、何らかの相関性があると考えられる。従って、海水部分の衛星データについて統計的な処理を施すことにより、海水の水質による分類が可能であると考えられる。



海水の表面温度：t [℃]
図 2-1 バンド 6 と海水温



海水の溶存酸素量：DO [mgO/l]
図 2-2 バンド間の比と溶存酸素

(3) 最尤法による海水の分類

ここでは例として、大村湾が満ち潮中である 1992 年 9 月 17 日のデータを用いて説明する。

TM データは、人工衛星に搭載されているセンサーの持つ帯域により、7 つのバンドに分けて記録されている。従って、最尤法による解析を行うため、まず、各バンドのデータの特徴を調べ、図 2-3 に示す 9 つの教師領域を選定した。領域 1 は佐世保湾の一部で、領域 2～領域 9 は大村湾の一部である。また領域 0 は、佐世保湾から大村湾に向けて海水が流入していると考えられる領域の一部であり、この解析で分類抽出しようとしている領域に含まれる部分でもある。

表 2-3 に、目的の領域である領域 0 と教師領域である領域 1～領域 9 について、各バンドの CCT 値の平均値 ± 標準偏差を示す。例えば、表 2-3 に示すバンド 1 について図 2-4 を用いて説明する。

教師領域 1 の CCT 値の平均値は 78.1 であり、教師領域 2～教師領域 9 の CCT 値の平均値と比較して 1.2 以上の差がある。この差は、教師領域 1 の CCT 値の標準偏差に相当する。このため、教師領域 2～教師領域 9 についての CCT 値の平均値 ± 標準偏差の値の範囲は、教師領域 1 の同様の値の範囲に完全には含まれない。これに対して、目的の領域である領域 0 の CCT 値の平均値 ± 標準偏差は 77.8 ± 0.7 であり、この値の範囲は教師領域 1 の同 78.1 ± 1.2 に含まれる。従って、これらの教師領域を用いて最尤法による解析を行うと、佐世保湾の海水と大村湾の海水との分類が可能であり、さらに大村湾内に流れ込んで来ている佐世保湾の海水を分類抽出することが可能と考えられる。

図 2-5 は、1992 年 9 月 17 日の TM データについて、最尤法による解析を行った結果例である。この図では、佐世保湾の一部である教師領域 1 と同じ特性を持つ部分として分類された領域が白く表示されており、この様な部分が大村湾内に入り込んでいることが分かる。この結果から、大村湾の満ち潮時、佐世保湾から大村湾に向け

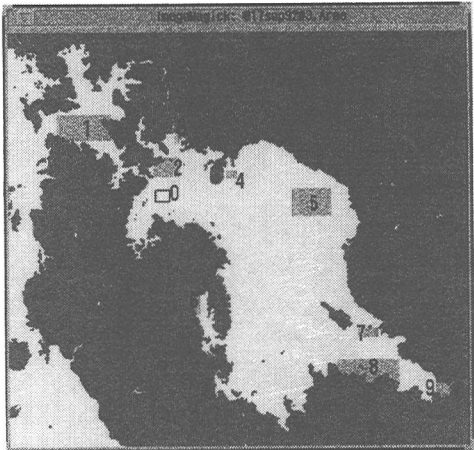


図 2-3 教師領域 (例：1992. 9/17)

て流れ込んでくる海水の様子を把握することができると考えられる。

また、大村湾が引き潮の時は、満ち潮の際に既に佐世保湾から大村湾に向けて流れ込んで来ている海水の領域に着目する。この領域を目的の領域を表す教師領域として、同様の手法による分類を行うと、引き潮の時の水塊の様子を知ることができる。

表 2-3 目的の領域と各教師領域とのCCT値の 平均値±標準偏差 の比較例

領域	バンド1	バンド2	バンド3	バンド4	バンド5	バンド6	バンド7
目的の領域	77.8±0.7	28.9±0.4	24.9±0.6	14.5±0.5	8.0±0.7	144.3±0.7	3.8±0.6
教師領域1	78.1±1.2	28.7±0.5	24.8±0.7	15.5±1.6	8.7±1.5	144.8±0.7	3.9±0.7
教師領域2	76.9±0.8	28.0±0.6	24.3±0.7	15.6±1.8	8.8±1.6	145.0±0.7	3.8±0.7
教師領域3	80.2±1.1	32.2±0.8	27.8±0.9	17.5±0.6	9.1±0.6	144.3±0.8	3.9±0.5
教師領域4	76.2±0.9	27.7±0.5	24.3±0.5	15.4±0.7	8.6±0.7	144.6±0.7	3.7±0.5
教師領域5	71.3±0.7	24.8±0.4	21.5±0.5	13.0±0.6	7.4±0.7	145.9±0.5	3.6±0.6
教師領域6	75.3±1.6	28.2±1.4	24.6±2.3	18.3±3.3	11.3±5.7	145.6±1.3	5.0±2.9
教師領域7	73.0±0.9	27.5±0.6	23.5±0.9	13.8±2.0	7.8±1.5	146.3±0.5	3.6±0.7
教師領域8	70.5±0.9	24.8±0.9	21.3±1.0	14.0±2.8	8.3±3.7	148.0±0.9	3.8±1.7
教師領域9	74.3±2.1	29.2±1.5	25.5±2.5	17.4±4.2	11.7±6.9	149.6±2.1	5.3±3.7

(例：1992年9月17日のTMデータ)

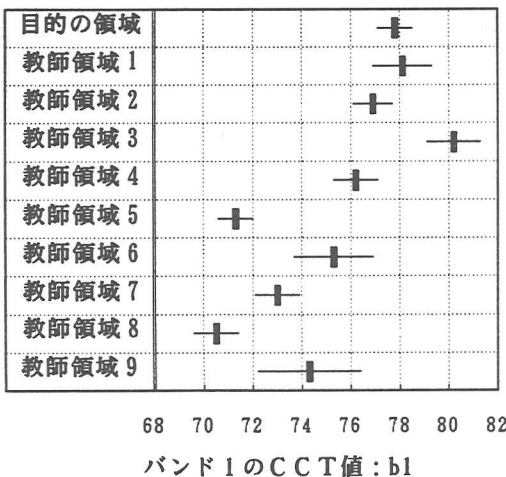


図 2-4 バンド1のCCT値の比較

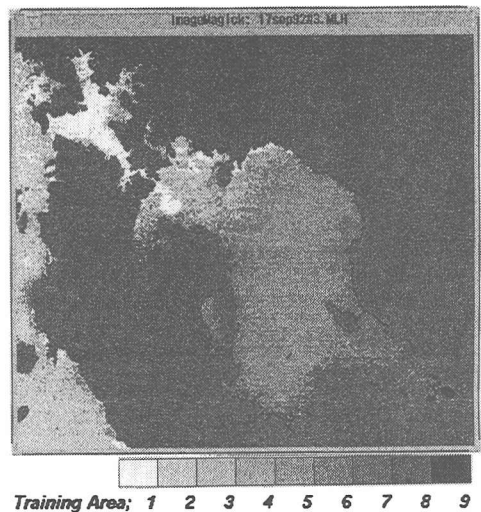


図 2-5 分類結果例 (例：1992.9/17)

3. 大村湾の潮汐による水塊の移動状況

図 3-1 (a)~(g)は、表 2-1 に示した7つのTMデータの解析結果例について、佐世保湾と大村湾との隣接部分を拡大して表示した図である。なお、これらの図では、佐世保湾の海水として分類された領域のみを白く強調して表示している。

(1) 大村湾の満ち潮時

図 3-1 (a)~(c)は、それぞれ、1991年8月14日、1992年9月14日、1994年8月22日のTMデータの解析結果例を示している。

図 3-1 (a)と(b)の人工衛星の観測は大村湾の満ち潮が始まって約2時間30分後に、図 3-1 (c)の人工衛星の観測は同じく約4時間20分後に行われている。今、大村湾の干潮を0%、満潮を100%と表現すると、図 3-1 (a)と(b)は満潮に対して約40%の時、図 3-1 (c)は満潮に対して約75%の時を表している。

これらの図から、大村湾の満ち潮時の様子として、

- ① 満ち潮の開始とともに、佐世保湾の海水は、狭い針尾瀬戸を通り、大村湾に向けて勢い良く流れ込むこと。
- ② 大村湾に流れ込んできた海水は、反時計回りの渦を作りはじめること。
- ③ 満ち潮が進むに従って、この反時計回りの渦が大きく成長すること。
- ④ 満ち潮が進むに従って、針尾瀬戸の南西方向にも流れが広がっていくこと。

などが分かる。

(2) 大村湾の満潮時

図 3-1 (d)と(e)は、それぞれ、1991年12月20日、1992年12月4日のTMデータの解析結果例を示している。

これらの図の人工衛星の観測は、大村湾が満潮になる約20分前に行われている。従って、これら2つの図は、

大村湾のほぼ満潮時を表している。

図3-1(d)と(e)から、大村湾のほぼ満潮時の様子として、

① 満ち潮時に佐世保湾から流れ込んできた海水が作った反時計回りの渦は、さらに大きく成長し、その渦の先端部は大崎半島にまで達すること。

② 佐世保湾から流れ込んできた海水の一部は、大崎半島の対岸に沿って、大村湾の奥に向かって進むこと。などが分かる。

(3) 大村湾の引き潮時

図3-1(f)と(g)は、それぞれ、1994年7月21日、1994年6月3日のTMデータの解析結果例を示している。

図3-1(f)の人工衛星の観測は大村湾の引き潮が始まって約35分後に、図3-1(g)の人工衛星の観測は同じく約3時間30分後に行われている。これら2つの図についても、大村湾の満潮を100%、干潮を0%と表現すると、それぞれ、満潮に対して約90%の時と約50%の時を表している。

これらの図から、大村湾の引き潮時の様子として、

① 引き潮の開始とともに、針尾瀬戸と大崎半島付近の海水が佐世保湾に向けて流れ出ていること。

② 引き潮が進んでも、満ち潮の時に大崎半島の対岸沿いに流れ込んできた海水は、そのまま滞留していること。

などが分かる。

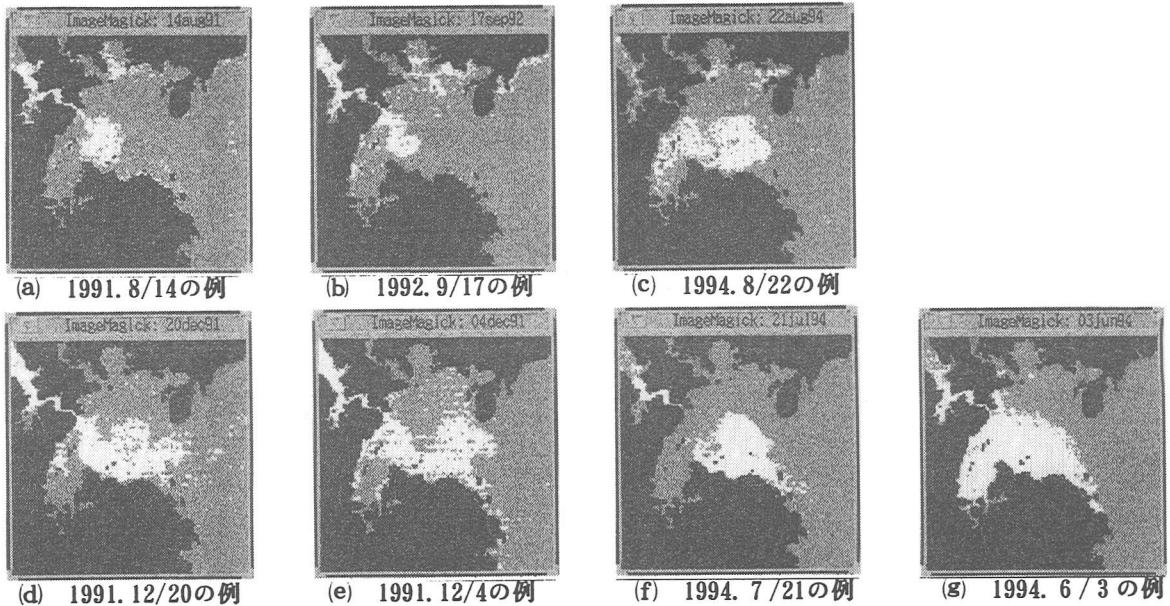


図3-1 TMデータの解析結果例

4. 数値シミュレーション・システムの相似性確認の手法

現在、大村湾の潮流等に関する数値シミュレーションの予備実験として、試験的なシミュレーション・プログラムの開発を行っている。ここでは、この試験的なプログラムでのシミュレーション結果と、衛星データから得られた水塊移動の様子とを簡単に比較することで、衛星データをシミュレーション・システムの相似性確認に利用する手法について考察した。

(1) 数値シミュレーション・システム

現在開発している試験的なシミュレーション・プログラムは、潮流に関する基礎方程式⁷⁾として、

$$\begin{cases} \frac{\partial \zeta}{\partial t} + U \frac{\partial(\zeta+h)}{\partial x} + V \frac{\partial(\zeta+h)}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - fV + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \nu_a \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) + \frac{gU \sqrt{(U^2+V^2)}}{(\zeta+h)C^2} = 0 \\ \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + fU + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \nu_a \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) + \frac{gV \sqrt{(U^2+V^2)}}{(\zeta+h)C^2} = 0 \end{cases}$$

を用い、ADI法⁷⁾による解法を行っている。図4-1は、このプログラムで図3-1(d)に対応する状況をシミュレーションした結果例である。このプログラムでは、図3-1(d)の衛星観測日に対応した潮位を周期的に再現

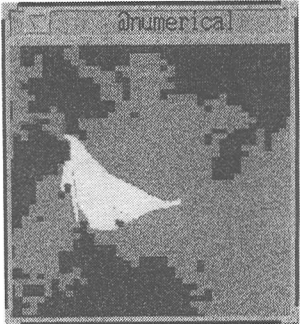


図4-1 数値シミュレーション例

し、大村湾の干潮時から満潮時に掛けて、針尾瀬戸部分に存在した海水が大村湾内を移動した軌跡を白く強調して表示している。現在のところ、この図4-1に示すシミュレーション結果では、TMデータの解析結果に見られたような、反時計回りの大きな渦の形成などが見られず、実際の大村湾と異なる流れ方を示していると考えられる。

(2) 衛星データの利用方法

数値シミュレーションを行う場合、海底や内部の摩擦係数、さらには渦動粘性係数など、不確定な要素が多数存在すると考えられる。この様な不確定な要素の決定や最終的なシミュレーション・システムの妥当性の検証には、従来、潮流や水質などの現地観測の結果が用いられてきた。しかし、現場における観測では、測定器を固定することで長時間の変化を計測することはできても、広範囲の情報を同時に得ることはできない。従って、より正確にシミュレーション・システムの検証を行うには、衛星リモートセンシング等を用いることで、広範囲の面的な情報による補足評価をおこなうことが必要になると考えられる。

今回報告したランドサット等の人工衛星は、海の表面の情報を捕らえている。従って、シミュレーション結果との比較を行う場合、多層モデル等を用いた3次元的な数値シミュレーションを行い、シミュレーション結果の表層部の流れについて比較・検討を行うことが必要と思われる。

また図2-5や、図3-1では、大村湾の北部にある大崎半島の周りにも、佐世保湾の海水として分類され、白く表示された部分がある。この様に隣接湾から流れ込んだ水塊の移動を調べる場合には、水質による分類結果に画像処理を施すことで、連続した同一性質の領域を抽出する必要があると考えられる。

5. おわりに

本報告では、1991年から1994年にかけての人工衛星ランドサット5号による7つのリモートセンシング・データを用いて、佐世保湾部分の海水と大村湾部分の海水とについて分類を行い、大村湾に流れ込んできた佐世保湾の海水塊が、大村湾の潮汐に応じてどの様に移動するかを調査した。この結果、佐世保湾から流入した海水は、大村湾の満ち潮が進むに連れて反時計回りの渦を形成することや、満潮の時この海水の先端は大崎半島付近まで達すること、さらに大村湾の引き潮の時、大崎半島付近の海水が佐世保湾に向けて流れ出ていることなどを確認した。さらに、数値シミュレーション等の妥当性の検証に、この解析結果を利用する方法についても考察を行った。

なお本報告では、衛星リモートセンシング・データを解析する際に必要となる、大気補正などについての厳密な検討は行っていない。また水質分類に使用した教師領域は、各バンド毎のデータを調査した結果、主観的に選定されている。従って、今後これらの大気補正や教師領域選定の問題を解決するためのアルゴリズムを検討し、この水質分類手法を完成する必要がある。

今後、干潮時に大村湾内に残っている佐世保湾の海水を特定することで海水交換率を見積もることや、合成開口レーダを利用した大村湾の潮位の面的な評価などを実施する予定である。これらにより、より多くの、数値シミュレーションの相似性確認に有用な情報を収集することができると考えられる。

最後に、本報告で用いた人工衛星リモートセンシングのデータ所有は米国政府であり、データ提供はEOSAT/宇宙開発事業団であることを付記する。

参考文献

- 1) 長崎県：大村湾海域利用構想，長崎県，1991。
- 2) 飯塚 昭二：大村湾（Ⅰ地質，Ⅱ物理，Ⅲ化学），日本全国沿岸海洋誌，日本海洋学会沿岸海洋研究部会編，東海大学出版会，pp. 879-893，1985。
- 3) 長崎県企画部：豊かな大村湾海域利用シンポジウム，長崎県，pp. 8-9，1993。
- 4) 兵頭 竜二，後藤 恵之輔，全 炳徳，田中 稔：長崎県大村湾の水質監視と浄化に関する方策，第17回学術講演会論文集，日本リモートセンシング学会，pp. 21-22，1994。
- 5) 兵頭 竜二，後藤 恵之輔，全 炳徳，田中 稔：人工衛星リモートセンシングによる長崎県・大村湾内海流の調査と水理模型の相似性確認への応用，海洋開発論文集，土木学会，Vol. 11，pp. 91-96，1995。
- 6) 土谷 清：リモートセンシング概論，朝倉書店，pp. 209-214，1993。
- 7) 後藤 恵之輔，全 炳徳，兵頭 竜二：衛星リモートセンシングを用いた大村湾・佐世保湾の海水分類と潮汐による水塊移動の調査，地球規模の酸性雨等環境問題が日本西部地域に及ぼす影響評価に関する共同研究，長崎大学，pp. 103-110，1996。
- 8) 松梨 順三郎：環境流体汚染，森北出版，pp. 112-122，1993。