

リモートセンシングによる閉鎖性湾としての 佐世保湾の海水交換調査

A Research on the Tidal Current Circulation for Enclosed Bay Named Sasebo-Wan
Using Remote Sensing Technique

後藤恵之輔*湯藤義文*飯盛浩平**荒牧憲隆***板坂修二****

Keinosuke Gotoh, Yoshihumi Yutoh, Kouhei Iimori, Noritaka Aramaki and Shuji Itasaka

Being situated in Northwest Kyushu, Sasebo Bay is connected with the open sea (East China Sea) and also connected with typical enclosed bay named Omura. Especially, The Omura Bay has 53 small and medium size rivers around its coast, which discharge some materials polluting the bay such as sewage, industrial effluents, agricultural fertilizer, ect. All these materials make the bay over-enriched with nutrients and this has been well known as cultural or man-made eutrophication. Therefore, water quality controlling and monitoring activities, recently, are inevitable. In this paper, we tried to research tidal current from the open sea to Omura Bay in order to obtain elementary data for Omura Bay's water purification using the remote sensing techniques. The field survey was carried out at three points with thermal infrared camera. And satellite data called Landsat-5 / TM were applied to explain field data.

Keywords: Sasebo Bay, tidal current, thermal camera, Landsat-5/TM

1. まえがき

長崎県の中央部に位置する大村湾は、世界でも数少ない二重閉鎖性湾という特徴をもつ。また、同時に同湾湾岸部は下水道普及率が低く、年々水質汚濁が進行しており、早急な水質浄化が求められている。こうした現状を改善していく上で、湾内の潮流現象について把握しておくことは大変重要である。

本研究では前記のための基礎資料を得る目的で、佐世保湾において、外海から大村湾にかけての海水交換状況の調査を、熱映像装置を用いた現地観測、及び衛星データによって行った。



図-1 佐世保湾・大村湾位置図

2. 観測及び解析

1) 熱映像装置による観測

本観測は、長崎県北部佐世保湾の湾岸に設けた3つのポイント(図-2 ①~③)において、潮流変化の1周期(満潮→干潮→満潮)でおよそ12時間の潮流現象を、熱映像装置(日本アビオニクス製 TVS-2000: 最小検出温度差0.01℃)を用いて観測を行った。そのとき、満潮時、干潮時、加えて1時間毎にフロッピーディスクに、45分毎15分間ビデオテープに、海水面の温度分布状況の変化をそれぞれ記録した。また、昼間は観測位置の確認及び熱映像画像との比較の意味で、同装置稼働時に同調させてビデオカメラによる可視画像の収録、写真撮影、スケッチを行なった。

2) 衛星データによる解析

今回使用したデータは、LANDSAT5号によるもので、1985年8月29日、1987年9月4日、10月6日の3シーンである。同衛星のデータのうち、バンド1(可視域波長帯0.45μm~0.52μm)、バンド2(可視域波長帯0.52μm~0.60μm)、バンド6(熱赤外域波長帯10.40μm~12.50μm、分解能120m)による情報を利用した。



図-2 ポイント配置図

* 正会員 長崎大学工学部社会開発工学科(852 長崎市文教町1-14)

** 佐藤工業(株)

*** 学生会員 長崎大学大学院

**** (株)神栄工業

バンド2／バンド1の演算値は、植物プランクトン中の特殊な色素の特性を利用して、その存在状況を示すものである。外海と湾内では、植物プランクトンの存在状況が異なっていると考えられるため、この演算値による画像から間接的に潮流現象を知ることが出来ると思われる。従って、本研究では、バンド2／バンド1及びバンド6による画像を用いて、潮流現象の把握を試みる。

3. 観測結果及び考察

1) 熱映像装置を用いた現地観測

本研究において行った現地観測の結果及び考察を以下に各回毎に述べる。

a) 第1回観測(1993年1月23日 10:00～21:00)

第1回観測の観測地点は、俵が浦半島先端の高後崎において行った。同地点に設置した熱映像装置によって、佐世保湾湾口部における潮流現象の変化を観測した(写真-1、図-3(a)～(d))。

満潮から干潮へ向かう下げ潮時において、湾口部には湾内から外海に向かう流れが可視画像によって観測された。このとき、熱映像において、湾口部には一様に湾内より温度が高い(8.50～9.30℃程度)海水の存在が確認される。流れが生じている部分は、周囲より比較的温度が高くなる²⁾と言うことから判断して、湾口部の流れが幾分速くなっていると考えられる。その後、干潮が近付くにつれて湾口部の水温は湾内の水温に近付き、干潮時には8.0℃前後で同一化する。このとき高温部は外海に存在している。また同時に、この変化に伴い、湾口部付近の流れの減衰が可視画像により確認された。

干潮後上げ潮に転じ、湾内方向への流れが徐々に生じて行くのが、可視画像から分かるが、熱画像の時間的変化を見ると、湾内海水より1℃前後温度の高い海水が、湾口部北側に沿うように流入し始め、その後幅を拡大していく。このとき湾口部の流れの中に、楕円状に数箇所周囲より1℃程度温度が低い部分が現われる。可視画像によると、この部分は停滞しているように見える。これは下げ潮時にはない上げ潮時独特の潮流現象の一部である。

以上により、湾口部における海水の流出入は単にその方向を逆転するだけでなく、上げ潮時には異なった流れが生じていることが分かった。

b) 第2回観測(1993年2月13日 1:30～14:00)

第2回観測は針尾瀬戸側湾奥部の海域に面した場所(西海町水浦郡小郡)において行った。観測を開始したのは、満潮後1時間弱を経過した時刻であり、佐世保湾内の潮流は下げ潮時にあたる(図-4(a)～(d))。

この時間の熱映像には、針尾瀬戸側の海面に1～1.5℃程度温度が高い部分が観測された。この高温域は、その後約1時間で観測対象海面の針尾瀬戸側半分の範囲に拡大、徐々に湾中央部へと進行を続け、さらに1時間を経過した頃には、7℃以上の部分が対象海域のほぼ全域にわたって観測された。このことから、この高温域海面は、大村湾方面からの流れであることが分かる。



写真-1 観測対象地域全景(撮影日:1993年1月23日)

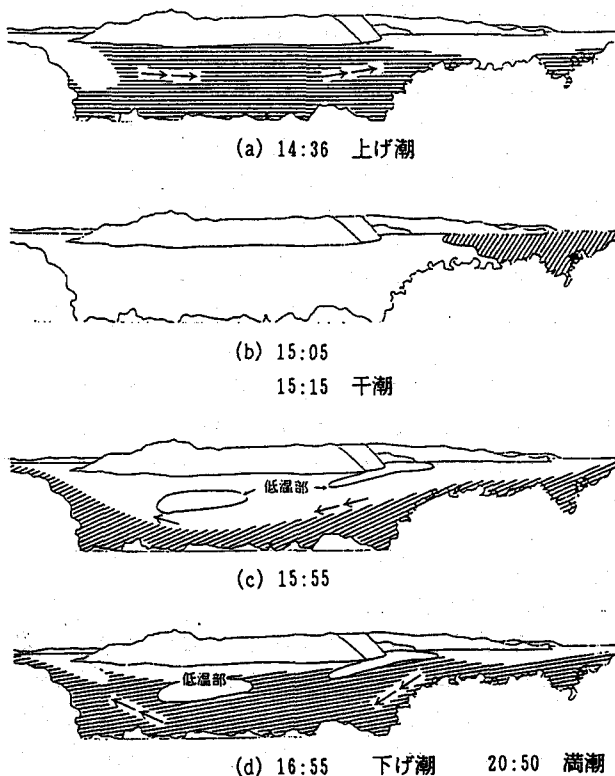


図-3 熱映像装置による潮流図(第1回観測)

満潮後2時間半を経過した時刻の熱映像には、西岸に沿って1℃程温度の低い海面が帯状に存在しているのが確認され、その後この帯状の海面は幅を拡大していき、一部では1.5℃ほど低い部分も観測されるようになる。最終的に、この低温域は観測海域の全体を占めるようになり、干潮の時刻を迎える。

以上のことから、観測対象海域では、下げ潮に転じて2時間ほどの間に、かなりの速さの流れが外海方面に向けて生じ、その後干潮に近づくにしたがって、徐々に速度を減衰させていく、という流れが存在していると考えられる。

干潮後の上げ潮時における流れは、可視画像から針尾瀬戸方向へ向かうことが観測された。この時の熱映像をみると、流れのある部分の水温は4.5℃～5.5℃であり、干潮時の水温とあまり差異が見られない。この理由としては、外海水流入の有無から、2つのパターンが考えられる。一つは湾内へ流入する外海水の水温が湾内の海水温より低いパターン、他の一つは温度差のある海域への到達が出来ずに、そのまま折り返し上げ潮となって湾奥部へ流れ込んだパターン、であるが、第1回観測の結果を参照することにより、前者のパターンの考え方の方が考えやすいと言える。

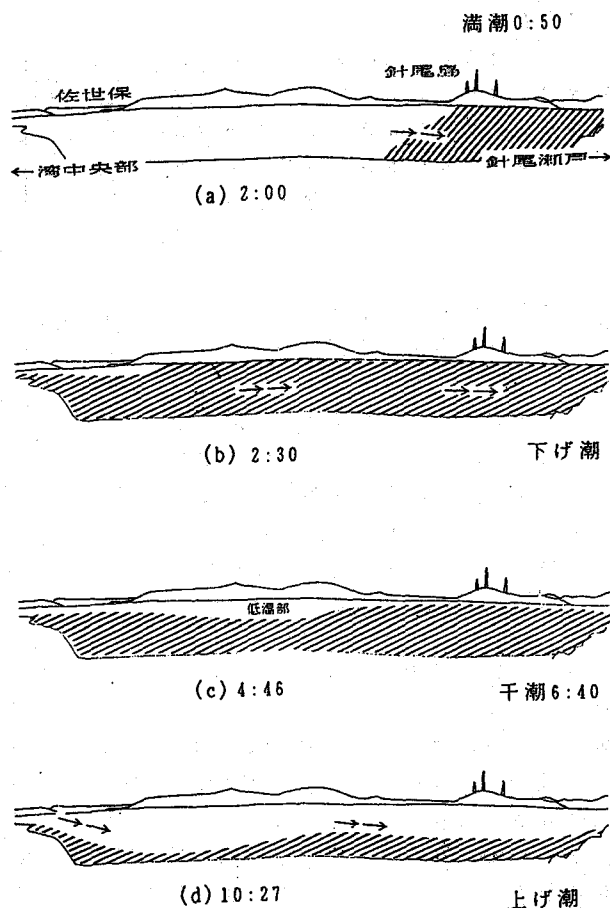


図-4 熱映像装置による潮流図(第2回観測)

c)第3回観測(1993年2月13日 16:00～19:00)

第3回観測は天候悪化のため、僅かな時間の観測しか行うことが出来なかった。観測場所は前2回の観測ポイントの中間位置にあたるため、本観測の結果を前2回の結果と比較検討することで、湾口部から針尾瀬戸にかけての潮流現象の把握が可能となると考えられ、非常に残念であった。

観測結果は僅かであり、本観測による潮流の検証は難しいと考えられる。

2)人工衛星データを用いた解析

今回3シーンの衛星データを用い、バンド2/バンド1の演算値によるクロロフィル-aの濃度分布状況と、バンド6を用いた温度分布状況による佐世保湾内の潮流現象の把握を行なった。

a)解析方法

湾内の潮流現象を人工衛星で捉える場合、その変化が画面上に表されるような手法を取らなければならない。佐世保湾は全体的に浅く(平均水深17.7m)、周囲を陸に囲まれていることから陸域の影響を強く受け、湾内の海水と外海の海水とは温度差が生じやすいと考えられる。特に、夏季や冬季は陸域と海域の比熱の違いから、その温度差は顕著に現われると考えられる。草野ら¹⁾による衛星リモートセンシングを用いた大村湾の潮流解析においては、熱バンドであるバンド6と、その相関関係からバンド1とバンド2による演算値によるものを使用して解析を行っている。本研究でも、この方法を用いることとし、バンド6および、バンド2/バンド1の演算値により解析を行う。

ここで、バンド2/バンド1の演算値について述べる。植物プランクトン等の植物細胞は、クロロフィルという特殊な色素をもっている。この色素は、入射する太陽の光の一部を、可視域のうち、図-5に示すように主に青(0.45μm)と赤(0.67μm)の付近で強く吸収する。入射する白色光のうち、これらの部分が吸収されるため、

植物は緑色に見える。クロロフィルはマグネシウムを含む特別な有機物の分子で化学式は $C_{55}H_{72}O_5N_4Mg$ である。この色素は、植物細胞の中で葉緑体という特殊な器官の中にある。クロロフィルは光を吸収して光合成を行い、植物に必要なエネルギー源を生産する。

クロロフィルは全ての光合成生物に含まれ、化学構造の違いによって、クロロフィルー a、クロロフィルー b、クロロフィルー c などがある。このうち、クロロフィルー a は植物プランクトンに含まれる葉緑素のなかで最も量が多い。

植物プランクトンの季節変化は、水温、塩分、栄養塩類、日射などの環境的要因と生物相互間の関係によって決定づけられる。

冬季は冷却によって表層水の密度が大きくなるため、不安定となって海水の鉛直混合が起り、これに伴って下層に蓄えられた栄養が表層に運ばれる。しかし、表層の水温はまだ低く、日射も少ないので、植物プランクトンの増殖は起らない。春になり水温が上昇し始め、同時に日射も多くなり日照時間が長くなると、冬季間に表層に運ばれた栄養塩を利用して、植物プランクトンの光合成活動が盛んになり、爆発的な増殖が起る。これが春季大増殖で、植物プランクトンの最も著しい特徴である。

春季大増殖が頂点に達すると、栄養塩は消費

し尽くされ、植物プランクトンは急激に減少し始める。この減少期は表面水が高温となる夏季にあたり、海水は成層するため安定となり、鉛直混合は起らず、下層からの栄養塩の補給は途絶える。やがて、植物プランクトンの遺骸が分解されて、栄養塩の再生産が行われ、再び表層で栄養塩が豊富になる。ここで2回目の増殖が起る。これが秋季増殖である。秋季増殖は栄養塩の関係で、春季増殖に較べて増加量は少ない。この様な春秋2回の増殖期をもつ季節変化は、温帯地方の典型的な場合である。高緯度地方に向かうと、春秋2回の増殖期は次第に夏に近付き、やがて夏1回だけしか起らなくなる。一方、低緯度地方に向かうと、増殖期は次第に冬に近付き、やがて冬1回だけしか起らなくなる。しかし、必ずしもこうした規則正しい季節変化が繰り返されるわけではなく、温帯地方でも春1回の増殖のみで終わる場合もあれば、特別な原因で、春秋2回の増殖の他に、かなり著しい増殖が起る場合もあって、年による変動が甚だしい。特に沿岸部では栄養塩、水温、塩分、日射等のほかに、局地的な環境要因が大きく影響するので、規則正しい交換とは著しく異なった変化を示すことが多い。

クロロフィルー a の濃度の分布はそのまま海中の植物プランクトンの量を示している。海洋中の植物プランクトンの量が多いと、クロロフィルー a の濃度が高くなり、可視光で青色にあたるバンド1の C C T 値は低く、緑色にあたるバンド2の C C T 値は高くなる。そこで、バンド2 / バンド1 の演算値を用いて画像に表せば、クロロフィルー a の濃度分布を知ることが出来る。

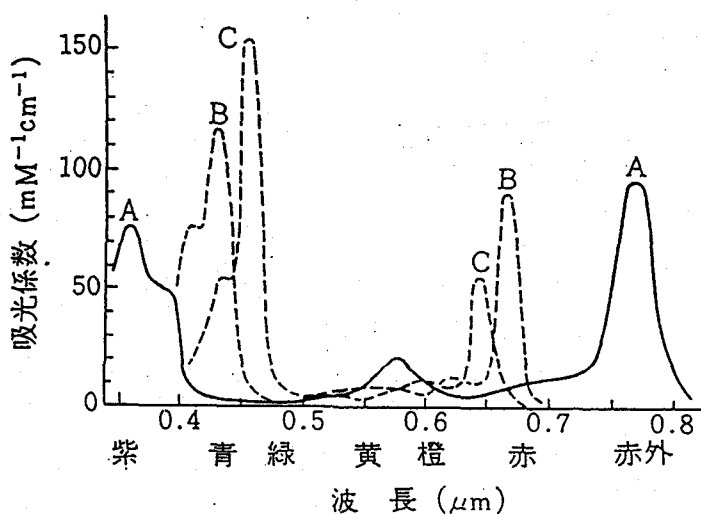
佐世保湾内部の海水は、外海の海水とクロロフィルー a の濃度分布に差があると考えられ、このバンド2 / バンド1 の演算値を用いることで、クロロフィルー a の濃度分布状況から佐世保湾内部の潮流現象を表現できると考えられる。

ただし、バンド2 / バンド1 の演算値は最小値と最大値の幅が小さく、画像自体も全体的に均一化してしまうので、バンド2 / バンド1 の解析の全てのデータについて演算値を500倍して、最小値と最大値に幅をもたせるようにしている。バンド2 / バンド1 の演算値が大きければ、水域中のクロロフィルー a の量は多く、演算値が小さければ、水域中のクロロフィルー a の量は少ない。また、クロロフィルー a の量が多ければ、水域の濁度は増加し、透明度は低下する。逆に、クロロフィルー a の量が少なければ、水域の濁度は減少し、透明度は向上する。この様にクロロフィルー a の量と透明度は相反するものとなっている。

b) 解析結果

① 1985年8月29日観測データ (図-6)

本データが採取された時刻、佐世保湾内は満潮から干潮へ向かういわゆる下げ潮にあたっている。また、湾内潮位も平均潮位に近付いてきており、ほぼ満潮と干潮の中間の時刻と言える。



(B: クロロフィルー a, C: クロロフィルー b, A: バクテリオクロロフィル)

図-5 クロロフィルの吸収スペクトル

これを踏まえた上で各データについてみると、バンド2／バンド1による画像では湾口部を境にクロロフィル-aの濃度に明らかな差が生じている。また同時に、針尾瀬戸から湾中央部へ通じる海域のクロロフィル-aの濃度はやや低いものとなっている。湾内全体におけるクロロフィル-aの濃度分布状況については、湾中央部に一様に高い部分があることがいえる。

バンド6による温度分布状況では、針尾瀬戸から佐世保湾中央部に通じる海域で、海水の温度が周囲に比べてやや低くなっている。

この海面の温度と同一温度である海面が、外海と針尾瀬戸付近の大村湾側海面（図-6（b）右端下）にある。衛星データの撮影時刻の湾内潮位状況から判断して、この低温海水部は、先の上げ潮時に外海から流入してきた（図-6（a））ものの一部であり、大村湾が満潮、佐世保湾が下げ潮である当該時刻においては、その流れを逆転させ流出を始めており、これと同時に、佐世保湾中心部付近にあった海水が、湾口部から外海へと移動していると考えられる（図-6（b））。

②1987年9月4日観測データ（図-7）

データが採取された時刻の湾内潮位は、佐世保湾では満潮後1時間ほど経過した下げ潮時であり、大村湾では満潮前2時間ほどの上げ潮時であることから、平均潮位よりやや高くなっている。

バンド2／バンド1の演算値による画面では、湾奥部（画面中央）に比較的高いクロロフィル-a濃度が高い部分が存在しており、そこから湾口部を通じて外海まで広がっている。時間的には1985年9月4日のものと2時間ほどの差があるが、潮流状況にそう変化は見られないため、同様に、湾中央部付近から湾口部を経て外海へ流出する潮流があると考えられる。

バンド6による画像では、佐世保湾内の温度分布はほぼ一様であり、潮流現象の観測が行えるような変化は見られない。

③1987年10月6日観測データ

衛星データによる観測時刻は1985年8月29日のものとほぼ一致しており、佐世保湾では下げ潮時、大村湾では満潮時にあたっている。

バンド2／バンド1による画像において、佐世保湾内部にはほぼ全域にわたってクロロフィル-aの濃度が比較的高く現われており、先のa)で述べた秋季のプランクトン増殖が発生していることが分かる。

本データから潮流現象の様子を読み取ることは難しいが、前記の2シーン同様湾中央部にクロロフィル-aの濃度が高く現われている。逆に、他の2シーンとは異なり、針尾瀬戸に向かう湾南部においてもクロロフィル-aの濃度は比較的高く現われている。バンド6による湾内の温度分布状況を見てみると、湾内中央部・湾口部寄りに比較的温度の高い海域がみられる。

またこの時、1985年8月29日に針尾瀬戸から湾中央部に見られた低温海水域は確認できない。また、湾口部付近にまで外海の低温海域があり、1985年8月29日の様な海水の湾外流出は画面上には現われていない。

4. 結論

1) 観測結果全体の考察及び問題点

3. の1)において3回の観測を行い、その結果については個々に考察を述べたが、ここではこれらを一連のものと考えての考察する。今回の3ヶ所での観測から、湾内における潮流の（温度）変化には、あまり時間的な変化は見られなかった。とはいえ、その変化が少なくとも観測地域内では、ほぼ一様であることが予想される。また、潮流は上げ潮時と下げ潮時には、単に流れの進行方向が逆転するだけでなく、流れ自体にも変化が見られることが、第1回、第2回の各観測で確認された。

三厨³⁾による「2次元数値シュミレーション解析」において、佐世保湾と大村湾を一体化した数値解析が行われている。これによると、佐世保湾における潮流の流況変化は、

①湾口部潮位が最高時、最低時には、湾口部及び針尾瀬戸方面湾奥部（第2回観測地域）において強い流速が現

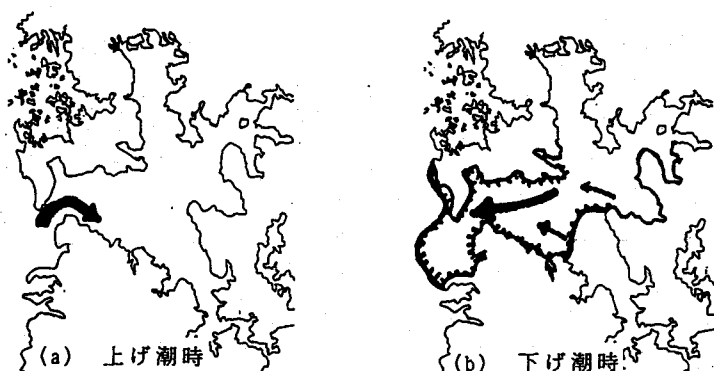


図-6 佐世保湾内の潮流概略図



図-7

佐世保湾内の潮流概略図

われており、その流れが主に南側で強くなっている。

②湾内潮位が上げ潮・下げ潮の平均海面時のとき、湾内流況は針尾瀬戸付近を除いて、ほぼ一様に低い流速の分布となっている。

③佐世保湾の流況には大村湾の位相差をもった流出入が影響しており、また数箇所の入り江では複雑な流況が生じている。

とある。このうち①については第2回観測においてこれに沿うような結果が得られている。②については本観測の多くで認められている。

こうしたことから考えると、今回の観測調査が潮流の観測に有効であることが言えている。しかし、今回の観測回数は3回であり、佐世保湾全域を把握することが出来ず、満足な結果を得ることは出来なかった。当然ながら湾内の潮流現象について論じるには不十分であると考えられる。

2) 人工衛星データと現地観測結果の比較検討

今回使用した人工衛星データにおいて佐世保湾内の潮流は下げ潮時のものであることから、観測結果における同時期の記録と比較してみた。1985年8月29日のデータや、1987年9月4日のバンド2／バンド1の画像では、熱映像装置による観測結果と合致するような結果が得られているものの、その他のデータでは若干異なっている。衛星データが夏季のものであるのに対して、観測結果は冬季のものであり、季節間の差異が影響していることや、1985年、1987年と観測時期が若干古いものであったことなどがその原因としては考えられる。従って、人工衛星データと熱映像装置による観測とは、出来る限り近い時期に行われることが理想的である。

5. おわりに

今回の熱映像装置による観測は、3回に限られ時間的には満足のいくものではなかった。このため当初の目的であった、“佐世保湾内の潮流現象の把握”を達成することは出来なかったものの、断片的ではあるが今回の観測においても大まかな流況を把握することは出来た。今後再び観測を行う際には、観測地点の数を増やし、出来る限り詳細に行うことが大切であると考えられる。

衛星データによる解析によって、佐世保湾内の潮流現象を把握する、という当初の目的は完全には達成することは出来なかったが、大まかな流れについては解明することが出来た。これを、総合的に今までの結果を踏まえて描けば、図-8のようになり、また、次のことが言える。

①上げ潮、下げ潮時において、2時間程度かなり強い流れが生じるが、その前後は非常に穏やかで、停滞に近いような状況にある。

②流れの中でも特に南岸（西彼杵半島側）に沿った流れは強いものとなっている。

以上のことが言え、これは三厨の数値解析の結果³⁾とも合致しており、潮流観測へのリモートセンシングの活用の有効性を改めて示す結果となった。

今後さらなる詳細な観測及び解析によって、潮流現象の把握が行なわれることで、閉鎖性水域の水質浄化が1日も早く達成されることを願う。

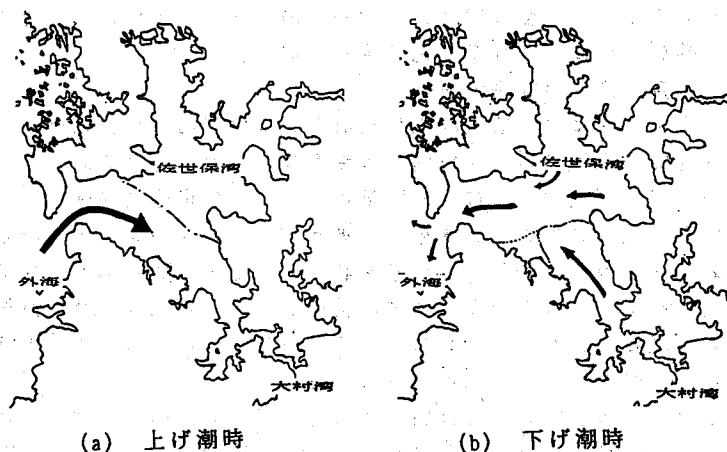


図-8 潮流概略図

最後に、本研究を進めるに当たり、貴重かつ適切な助言をいただいた長崎大学大学院海洋生産科学研究科の全炳徳氏に深甚の謝意を表する次第である。

【参考文献】

- 1) 草野和朗：リモートセンシングを用いた海岸湧出地下水の拡散及び閉鎖性湾の潮流調査に関する研究，長崎大学大学院工学研究科修士論文，pp.95～113，1992.3，
- 2) 後藤恵之輔・草野和朗・平原秀樹・松尾純一：熱赤外線映像装置による西海橋下の海水交換観測，土木学会西部支部研究発表会講演集，pp.378～379，1992，
- 3) 三厨晋也：大村湾における潮流現象に関する研究，長崎大学大学院工学研究科修士論文，pp.75～93，1992.3