

浜名湖今切口の固定化による湖内の潮汐と海水交換特性の変化

有田 守*・青木伸一**・片岡三枝子***

インレットの固定化という大規模な土木工事によりエスチャリーの環境が長期的にどのように変化してきたのかを詳細に調べ、物理環境の変化と生態系の応答の因果関係を明らかにすることは、人為的な環境インパクトの影響を検証する上で重要である。本研究では浜名湖を対象に、物理環境のうち最も重要な要素であると思われる潮汐に着目し、湖の潮汐応答特性とその経年変化を明らかにするとともに、潮汐による外洋と湖との海水交換特性の変化について検討した。その結果、インレットの固定化工事は浜名湖の長期的な環境をもたらしていることが明らかになった。

1. はじめに

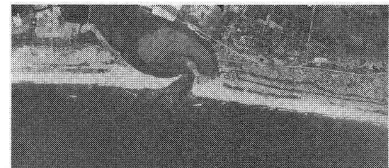
浜名湖は、1953年の台風による湖口周辺の浸水被害を受けて、湖口部今切口の水路幅を200 mに固定化する工事を行った。写真-1に固定化工事以前の1946年および固定化工事後の1997年の今切口の様子を示す。固定化工事によって湖水の排水がスムーズに行えるようになったが、同時に潮汐による外洋水の流入量も多くなった。固定化工事から約30年をかけて湖内の塩分濃度が上昇し、内湾化してきた (Mazda, 1984)。湖内の平均塩分濃度の変化は1953年の23 psu から現在では30 psu に変化している。この浜名湖の内湾化によって湖内に生息する生物は大きく影響を受けていることが示されている (後藤, 2004)。

大規模な土木工事による環境の変化は、工事によってまず物理環境を大きく長期にわたって変化させてしまう。その後それを追従するように生態系の変化がおり、生態系変化の収束は物理環境以上に時間を要することとなる。インパクトを与えられた水環境が物理的、生態環境的にどのように変化していったのかを詳細に調べ、両者の応答の因果関係を明らかにすることは、人為的な環境インパクトを長期的な視点から検証する上で重要である。

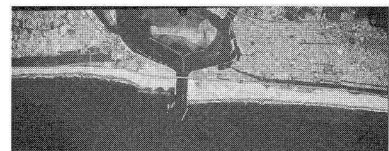
本研究では、浜名湖の物理環境のうちもっとも重要であると思われる潮汐に着目し、長期間のデータを用いて潮位偏差および応答特性の経年変化、潮汐による外洋との海水交換率の変化を明らかにし、インレットの固定化工事の影響を長期的な視点から検証するものである。

2. 今切口断面形状と潮汐の経年変化

最初の今切口固定化工事は、導流堤 (図-1の west-side jetty, east-side jetty, inside center jetty) の建設として、1954年から約15年かけて行われた。また、湖内



(a) 1946年



(b) 1997年

写真-1 浜名湖今切口の変化の様子

の導流堤 (図-1の inside west, inside east) は1985年から5年間で建造された。図-2に湖口断面の経年変化と導流堤長さの経年変化の様子を示す。1953年の台風によって拡大された湖口は、固定化工事によって一端断面面積が減少するものの洗掘が起り水路の断面面積が増加していることがわかる。

3. 潮汐の経年変化

潮汐の解析には、1943年より浜名湖内に設置された気象庁浜松観測所管理の舞阪検潮所の観測記録 (検帳簿) をデジタルデータ化し解析を行った。潮汐データは、観

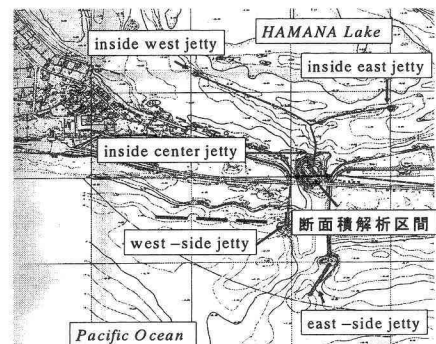


図-1 導流堤の配置状況

* 正会員 博(工) 助手 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻

** 正会員 工博 教授 豊橋技術科学大学建設工学系

*** 非会員 技術職員 豊橋技術科学大学建設工学系

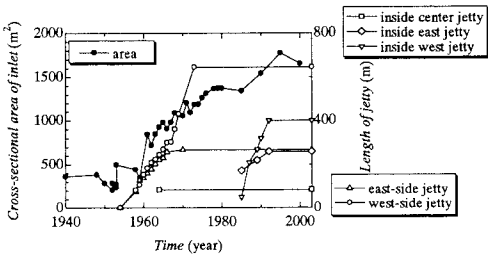
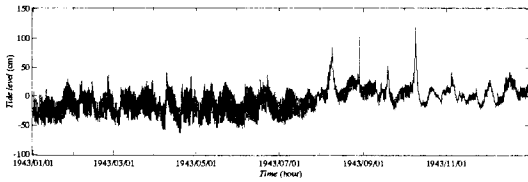
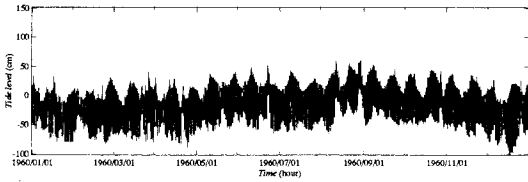


図-2 今切口断面積と導流堤の経年変化

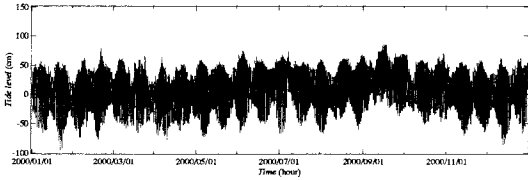
測基準面から水面までの距離を観測しており、それらに球分体のTPを考慮して水面変動を標高として扱おうと試みたが水準点の変更による影響が大きいため、ここでは各年の平均値を各年のデータから差し引いた値を解析データとした。また、欠測データについては各年の平均値で代替した。



(a) 1944年



(b) 1960年



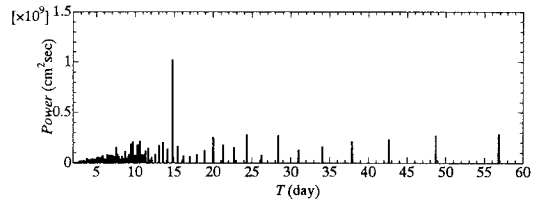
(c) 2000年

図-3 潮汐の時刻歴変化

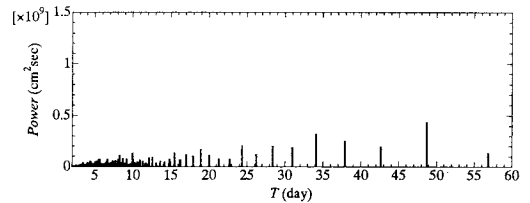
図-3 に固定化工事以前の1945年、および工事後の1960年と2000年の潮汐データを示す。固定化工事前の1943年の潮位の時系列に着目すると8月を境に潮汐の振幅が急激に変化している。また、8月以降では所々で潮位の高くなっているところが見受けられる。これに対して固定化工事後の1960、2000年の潮汐データにはこのような変化は見られない。このことから、固定化工事以前の湖内潮汐変動は、今切口に形成される砂州の消長など

インレットの形状変化に大きな影響を受けていたことが推測される。

各年での潮汐時刻歴データより固定化工事によって湖内での潮汐変動特性が大きく変化したことが推測されたが、各年の時刻歴をFFT解析によって周波数特性を調べてみた。図-4は、1年分の時刻歴データをFFTによって周波数解析し、周波数2日から60日にあたる成分を抜き出し各年の成分を重ねて表示したものである。1943-1949年と1990-2002年と比較すると10-30日の成分の周波数が1943-1949年の結果で大きくなっている。湖の閉塞度が強い状態では湖内の水位が河川流出の影響を受けて大きく変動していたものと考えられる。



(a) 1943-1949年



(b) 1990-2002年

図-4 各周期のエネルギー分布

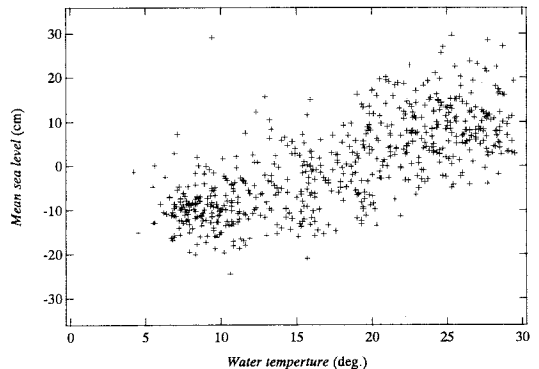


図-5 水温と月平均水面の相関

図-5 に平均潮位と水温の関係を示す。潮汐、水温共にデータは、1951年から2002年までのデータである。水温は、浜名湖水産試験場による月1回の観測データであり、潮汐データは1ヶ月の平均水面である。両者の相関

は高く、水温が高いときに平均水面が高くなる傾向にある。

次に調和分解解析を行い、主要4分潮成分の経年変化を解析した。調和分解は、各年のデータについて行い、各成分についてプロットしたのが図-6である。図-6は1943年の振幅の比として各年の振幅を表したものである。各成分ともに1950年から1970年にかけて振幅が増加する傾向にあり、1943年の振幅に対してO₁分潮以外は約2倍となっていることがわかる。O₁分潮が他の分潮に比べて増幅度が大きいことについては、今後検討する必要がある。

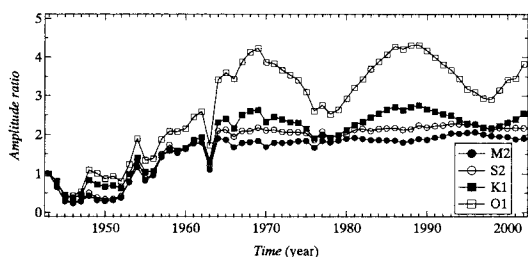


図-6 主要4分潮の経年変化

4. 潮汐伝播特性の経年変化

浜名湖内部に伝播する潮汐は、浜名湖の特異な地形によって、湖口に進入した潮汐が湖奥に到達するまでに2.5 hr 要し、振幅は約50%に減衰する (Aoki ら, 2004)。これらは、湖を北と南で分割した場合、湖口にあたる南では平均水深約2.5 m、北部で10 m と奥に行くに従って急に深くなるという地形と、南部分での平面的に狭くなる地形の影響が考えられる。

浜名湖内部に伝播する潮汐について詳細な観測は1984年に松田が行った以降観測はされていない。1954年に開始された今切口固定化工事後、浜名湖の環境が大きく変化したが1980年頃までに湖内の環境の変化が落ち着いたと考えられていたためである。しかし、近年潮汐振幅が大きくなったのではないかと指摘があり、これを受けて潮汐観測を行った。

潮汐の観測は、2003年9月19日-10月28日まで、図-7に示す浜名湖全13カ所に圧力式波高計 (アレック電子COMPACT-WH, TD) を設置し、計測サンプリング60 s で観測を行った。解析に用いたデータは、2003年9月27日16:00~10月20日10:07までの32768個のデータを対象として行った。

潮汐観測データは、観測機器が設置海底面に作用する圧力 (水圧と大気圧) の変動を計測するため大気圧のみを観測期間中に測定し各潮汐観測データから大気圧を差し引いたデータを解析に用いた。また、観測機器は任意

の水深に設置しているため各観測地点で設置水深の違いによるデータのシフトが見られる。本研究では、潮汐の振幅を解析することを目的としたため水深分に相当する成分については除去し潮汐の振幅のみについて解析を行った。

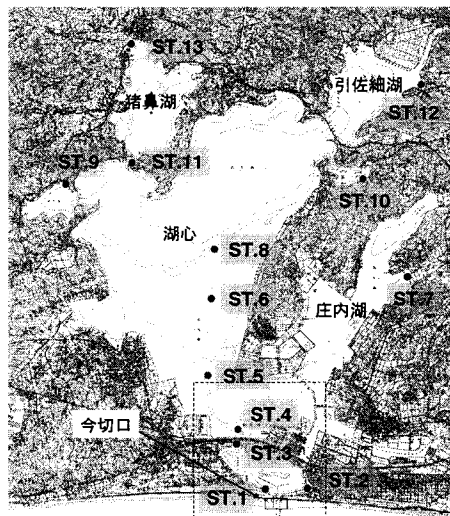


図-7 潮汐観測機器設置場所

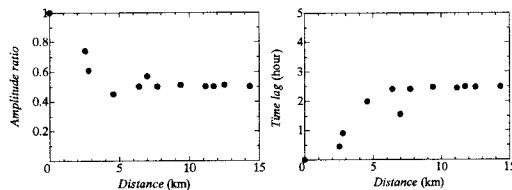


図-8 ST.2におけるM2分潮の解析結果

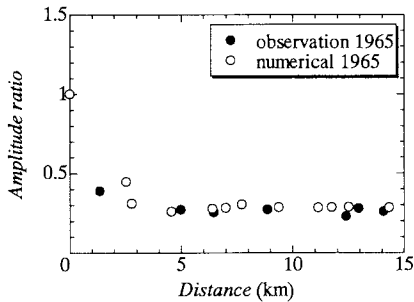
図-8にM2分潮の振幅の減衰と遅れ時間を示す。図-8の横軸は、ST.2を基準として各観測地点ST.3-13までの直線距離を示す。

浜名湖本湖についてM2分潮に対する潮汐振幅の減衰、遅れ時間を整理すると浜名湖に侵入した潮汐は、ST.2から5 km 以内の範囲で振幅が50%に減衰し、同様に5 km 以内で2.5 hr 遅延されることがわかる。本観測結果では、主要4分潮が卓越しており、他の成分についても同様の解析を行ったが潮汐の振幅の減衰と遅延は、M2分潮の結果と同様であった。

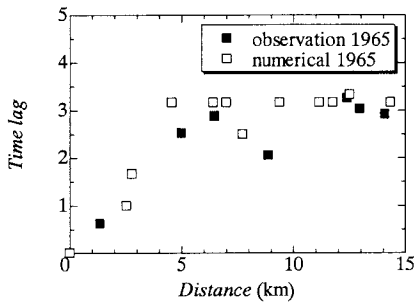
地形変化の影響を確認するために数値計算を行った。数値計算は、汎用のマルチレベルシミュレーションモデル (Nakata ら, 1983, 1988, Taguchi ら, 1988) を用いた。計算では潮汐による外力のみを与え潮汐による湾内の振動が安定した定常状態を解析した。計算に用いた地形は、1965年と2000年の浜名湖をモデル化したものを用いた。浜名湖全域での深浅測量は1965年に行われた以降

行われていない。しかし、今切口周辺の浜名港では毎年深浅測量が行われており2000年の地形は、1965年の地形に2000年の今切口周辺地形を置き換えたものを地形条件として与えた(有田, 2004)。

図-9に1965年の計算観測結果を示す。横軸は、2003年の観測結果と同様にST.2からの距離を横軸で表示し、それぞれM2分潮の潮汐の減衰比、潮汐の遅れを示したものである。振幅は0.25まで減衰し、遅延は3時間であることがわかる。観測値は(松田, 1983)より抜粋した。



(a) M₂分潮の振幅減衰比



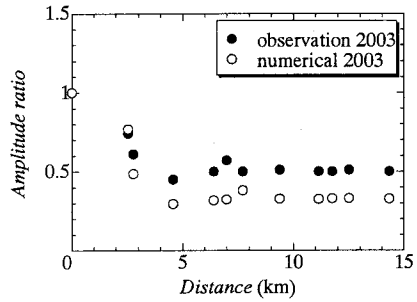
(b) M₂分潮の遅延

図-9 1965年の観測値と計算値の比較

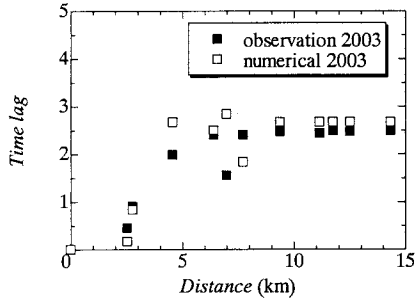
図-10に2000年の計算結果と2003年の観測結果を示す。潮汐振幅の減衰は観測地では0.5であり計算値は0.3とずれが見られたが、遅延は2.5 hrと計算は実験をよく再現している。図-9と10より、湖口の地形変化に伴って潮汐の減衰は小さくなり、遅延時間は短くなっていることがわかる。また、潮汐振幅の減衰も遅延もST.2から5 km程度のところまでで行われていることからST.2から5 kmのところを節にして定常波のモードが存在すると考えられた。

5. 海水交換率の経年変化

浜名湖の塩分濃度は1954年の今切口固定化工事より上昇する傾向にある。静岡県水産試験場浜名湖分場の月1回の定点観測結果より各点の観測結果の平均値をプロッ



(a) M₂分潮の振幅減衰比



(b) M₂分潮の遅延

図-10 2000年の計算結果と2003年の観測値の比較

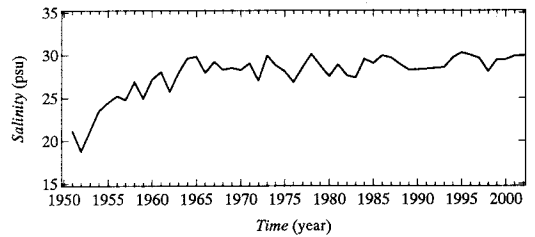


図-11 塩分濃度経年変化

トしたのが図-11である。

観測された塩分濃度は、月1回の観測であり天候や潮汐の影響をすべての観測結果がうけている。しかし、年間の平均値として湖内の塩分濃度を見た場合明らかに1950年から1965年にかけて塩分濃度の上昇が観測結果より伺える。

この塩分濃度結果より浜名湖の海水交換率を算定する。湖内と外海との物質収支は塩分濃度によって決定される。河川からの淡水流入量を Q_f 、浜名湖から流出する流量を Q_s 、浜名湖に外海から流入する量を Q_o とし、浜名湖を1つのボックスとして海水交換率を概算する(図-12)。 Q_s および Q_o は塩分の保存より湖および外洋の塩分 S および S_o によって次式のように Q_f と関係づけられる。

$$Q_s = \frac{S_o}{S_o - S} Q_f \dots\dots\dots (1)$$

$$Q_o = \frac{S}{S_o - S} Q_f \dots\dots\dots (2)$$

ここで、海水交換率 R を外海水の流入量と淡水流入量との比として次式で定義する。

$$R = \frac{Q_o}{Q_f} = \frac{S}{S_o - S} \dots\dots\dots (3)$$

図-12に上式で計算した海水交換率を示す。ただし外海の塩分を35 psuとした。1951年では外洋からの流入量と淡水流入量がほぼ等しかったのに対して1953年以降は海水流入量が数倍に増大していることがわかる。

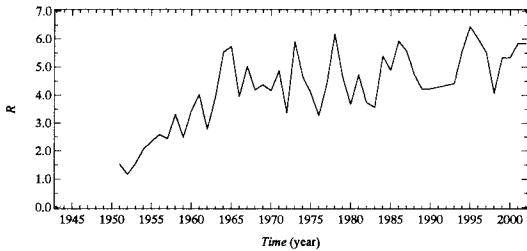


図-12 海水交換率経年変化

6. ま と め

本研究で得られた主要な結論をまとめると以下のようになる。

- (1) 導流堤建設前の潮汐は砂州の消長に対応して月スケールの大きな変動が存在していたが、固定化後は主要4分潮のみが卓越するようになった。
- (2) 主要4分潮はいずれも今切口から数kmの範囲内で急激に振幅が減少し、その間の位相遅れが2, 3時間程度と大きいのが特徴的である。これを解析モデルで検討した結果、湖口近傍の浅瀬付近を節とする定常波のモードが形成されていることがわかった。
- (3) 数値シミュレーションでは、振幅の大きさについては実測値と若干差があるものの、伝播距離に対する変化傾向については現状をよく再現した。
- (4) 過去の地形に対して行った数値計算結果によると、今切口の条件の変化とともに潮汐の振幅は大きく、時間

遅れは小さくなっていることがわかった。

(5) 塩分から求めた海水交換率は年々増加し、工事以前の5倍にまで増加しているが、これは潮流の増大による平面的な混合の促進によることがわかった。

(6) 海水交換能の増大とともに、湖水の高塩分化、貧栄養化、湖奥部での貧酸素水塊の発生などが顕著になってきており、水産業に大きな影響が現れると考えられる。

謝辞：本研究は、文部科学省の21世紀COEプログラム「未来社会の生態恒常性工学」研究活動費の助成を得て行った。

静岡県浜松土木事務所様には貴重なデータを快く提供して頂きました。ここに感謝の意を表します。また、東海大学松田義弘教授には本研究を行う上で多くの助言を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参 考 文 献

Aoki, S. and Arita, M.,(2004): Field measurement of tidal oscillation in an estuary with a narrow inlet, Proc. ISOPE 2004.

Nakata, K., Horiguchi, F., Taguchi, K. and Setoguchi, Y.,(1983): Three dimensional tidal current simulation in Oppa Bay, Bull. Natl. Res. Inst. Pollut. Resour, 12(3), pp. 17-36.

Nakata, K., Taguchi, K., and Setoguchi, Y.,(1985): Three dimensional eco-hydrodynamic model for eutrophication process in the coastal bay, Proc. Int. Conference of Modeling and Simulation, pp. 55-59.

Taguchi, K. and Terasawa, T.,(1988): A numerical model of the turbulent mixing process in the estuary, Proc. Of the 3rd Int. Symp. on Refined Flow Modeling and Turbulence Measurements, Int. Assoc. Hydrodynamic Research, Tokyo, pp. 337-343.

Mazda, Y.,(1984): Year-to-Year Change in Water Exchange Characteristics in a Semi-Enclosed Bay, Lake Hamana, Journal of the Oceanographical Society of Japan Vol.40, No.3, pp. 199-206.

後藤裕康(2004)：漁獲量変動からみた浜名湖の漁場環境の変化，静岡県水産試験場研究報告，第39号。

藤原建紀・國井麻妃・宇野奈津子(2004)：海水位の変動機構，海岸工学論文集 第51巻，pp. 376-380。

有田守・青木伸一(2004)：浜名湖における潮汐特性の経年変化に関する研究，海洋開発論文集 vol.20, pp. 1073-1078。

松田義弘(1983)：浜名湖の海洋環境－湖口地形変化による湖内潮汐の経年変化－，沿岸海洋研究ノート 第20巻，第2号，pp. 178-188。