

狭水路で連結された湖における密度成層下の湖水流動と物質交換特性について

Flow and Material Transport in a Small Stratified Lake Connected to a Main Lake by a Narrow Channel

陸 眞姫¹・青木伸一²・大谷 聡³・奥村和皓⁴

Jin-Hee YUK, Shin-ichi AOKI, Satoru OTANI and Kazuaki OKUMURA

An intensive field survey was carried out in Inohana and Hamana Lakes including a narrow channel to investigate the characteristics of flow and material transport between the two lakes. In the vertical profiles of flow and phosphorus concentration, Inohana Lake has a two-layer structure under stratified conditions; the outward flow and particulate phosphorus (PP) in the surface, while the inward flow and dissolved phosphorus (DP) in the middle and bottom. The surface discharge in the channel can be estimated from the wind. Using a simple box model that made use of salinity as a tracer, the horizontal and vertical exchange of waters were calculated and agreed with the observed ones. The vertical transport of salinity was influenced by advection and responded to the density field, i.e. the degree of stratification.

1. はじめに

猪鼻湖は浜名湖の奥に位置し、本湖と長さ 200m、最小幅約 75m の狭い水路で連結されている枝湖の 1 つである (図-1)。夏の密度成層形成期には、底層に大規模な貧酸素水塊が発生して湖の水質悪化を招いている (青木ら, 2001, 2002)。また、貧酸素水塊形成時に底泥から溶出した栄養塩は本湖である浜名湖の富栄養化にも影響を与えている可能性がある。水質が悪化する密度成層期に、連結水路を通してどのような輸送が生じて本湖と枝湖の間で物質の交換が行われ、また猪鼻湖内では表層と底層間の物質の移動がどのような特性を有しているのかについて明らかにすることは、水質改善のシナリオを描く上でまず必要な検討事項である。本研究は、水路内での流れの連続観測データと水路・湖内多点での高頻度な水質観測結果をもとに、塩分をトレーサとした簡易なボックスモデルを用いて、夏期の平均的な流動を定性的・定量的に明らかにするとともに、リン濃度の鉛直分布特性から、その輸送特性を明らかにすることを目的に行ったものである。

2. 現地観測

2006 年 7 月 11 日～8 月 26 日の間、猪鼻湖と浜名湖の湖水交換の実態を調べるために、水路北端 (猪鼻湖の入口、水深は約 -15.5 m; 図-1 の St. 1) の湖底に ADCP (Nortek 社製 Aquadopp-1MHz) を設置し、流

れの連続観測を行った。観測間隔は 10 分、鉛直方向分割幅は 1 m である。この期間中に水路内において約 1 週間に 1 回の塩分、水温、密度等の鉛直分布の観測を行った (アレック電子製, Compact-CTD)。また、鉛直混合特性を明らかにするために、猪鼻湖内を中心に計 11 地点で塩分、水温、溶存酸素濃度等の定期的な観測 (約 1 週間ごと) を実施した。水路および湖内の 2 点 (図-1; St. 1, 7, 11) では、2 回の採水 (表層から水底まで 50 cm ごと) およびリンの分析を行なった。リンの分析は、DP (溶存態リン) と TP (全リン) はペルオキシ二硫酸カリウム分解法で、PO₄-P (リン酸態リン) はモリブデン青法で吸光光度法より分析した。さらに、湖内南東の最深部 (図-1 の St. 8) で ADCP を用いた流速の鉛直プロファイル観測 (10 分間隔, 0.5 m の鉛直分割) を行った。

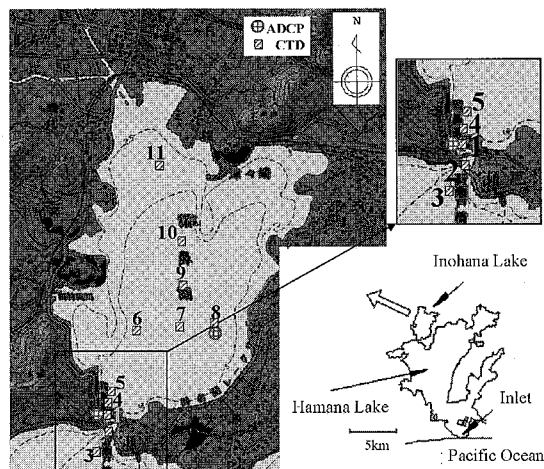


図-1 猪鼻湖と観測地点

1 工修 豊橋技術科学大学大学院環境生命工学専攻
2 正会員 工博 豊橋技術科学大学教授
3 元豊橋技術科学大学大学院生
4 豊橋技術科学大学大学院建設工学専攻

3. 湖水流動と物質交換特性

(1) 水路での湖水流動特性

図-2 は、猪鼻湖と浜名湖をつなぐ狭水路（瀬戸）で観測された流速の時系列を 25 時間移動平均したものを、風および降雨のデータとともに示したものである。流速成分としては、湖水交換に関係する南北方向水平成分のみを、水深別にプロットしている。時系列の比較より、流れは風によく対応して変動しているが、水深 -2 ~ -3 m を境に、表層と中・底層で流れの向きが反転している場合も見られる。2005 年に行った観測においても同様の結果が得られており（陸ら, 2006）、水路内の平均流は 2 層構造を有していることが再確認できた。流速プロファイルの観測が水路内の 1 点に限定されているため、観測データのみから水路の平均流を定量的に議論することは難しいが、2005 年と同様に表層 3 m までの全流量に淡水率を掛けて得られる淡水流量はほぼ河川流入量に相当するものとなっており、表層の流量については、1 点の観測でもほぼ正しく見積もることができる。

陸ら (2006) は、浜名湖と猪鼻湖を結ぶ狭水路での湖水交換には風が大きく寄与しており、特に表層流は風の影響を強く受けることを示した。そこで、表層流速と風の関係を調べた。図-3 は、1 日平均の表層 (0 ~ -3 m) の南北方向流量と風速の南北方向成分の変化を対比して示したものであるが、両者の変動はよく対応していることがわかる。

風データから表層平均流量を推定するために、2006 年のデータを用いて回帰式を求めた。式 (1) は、1 日平均の風の東西方向成分 (x [m/s], 東向きが正) と南北方向成分 (y [m/s], 北向きが正) から表層の日平均流量 (Q_s [m³/s], 猪鼻湖に流入する向きが正) を求める式である。

$$Q_s = K_0 + K_1x + K_2y + K_3x^2 + K_4xy + K_5y^2 \dots (1)$$

ここに、 $K_0 \sim K_5$ は定数であり、それぞれ、 $K_0 = -15.3$, $K_1 = 1.32$, $K_2 = 15.6$, $K_3 = -10.8$, $K_4 = -18.8$, $K_5 = -12.8$ で与えられる。なお、 K_0 は期間中の平均流量にほぼ一致している。図-4 は、式 (1) の適用性をみたものであるが、風速データから精度よく表層流量が予測されていることがわかる。ただし、200 日頃の降雨の後、観測値が予測値よりも大きくなっている期間がみられることから、まとまった降雨の後の表層流は風だけでなく河川流入の影響も受けていることが推測される。図-5 は、2006 年のデータで求めた回帰式 (1) を、2005 年のデータに適用して比較したものであるが、予測精度は非常に高いことがわかる。陸ら (2006) によれば、この表層流量は、夏期の平均をとると、河川からの淡水流入量の数倍に達し、2005 年夏期では 5 倍程度、

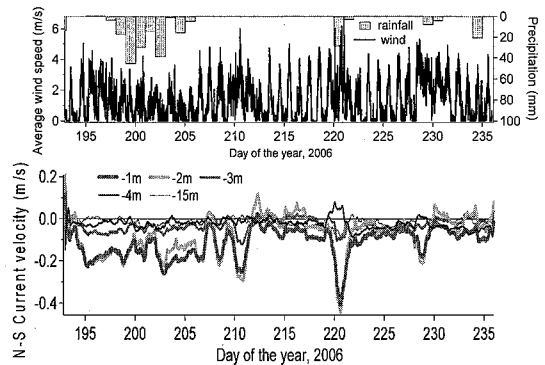


図-2 瀬戸での風・降雨（上）および水平流速の 25 時間移動平均（下）

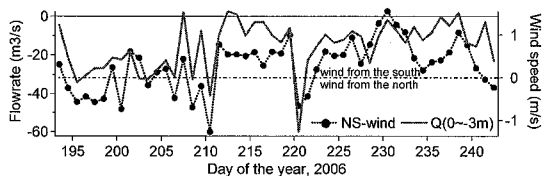


図-3 瀬戸における日平均流量（表層）と風速の南北方向成分の変化

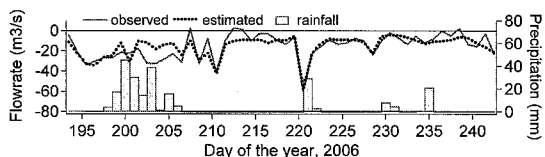


図-4 表層流量の予測値と観測値の比較 (2006)

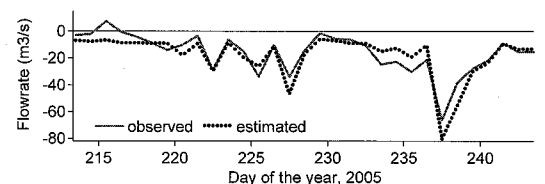
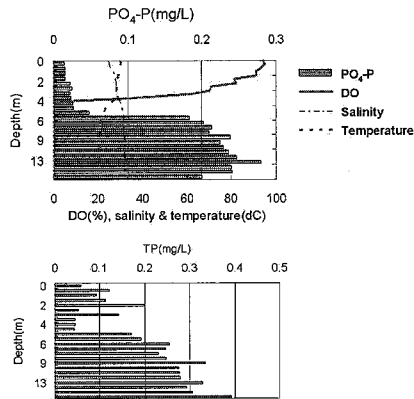
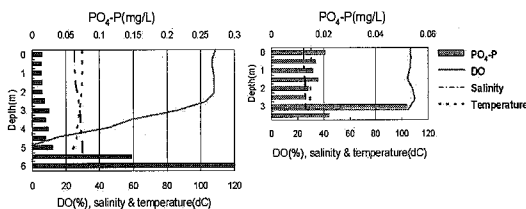


図-5 2005 年の観測データに式 (1) を適用した結果

2006 年夏期では 3 倍程度であった。このことは、中底層では表層流出量と河川流入量の差の分だけ猪鼻湖内に流入していることになり、流れの 2 層構造が湖水交換に大きく関わっていることがわかる。しかも、この交換量が風によってほぼ規定されることが明らかになった。2005 年と 2006 年で湖水交換量に差異が生じたのは、風の条件が異なったことや、降雨後の表層流出の差異によるものであると思われる。

(2) リン濃度の鉛直分布

図-6 は、2006 年 8 月 17 日に、水路内 (St. 1) で採水

図-6 St.1 での $\text{PO}_4\text{-P}$ (上) と TP (下) 濃度の鉛直分布図-7 St.7 (左) と St.11 (右) での $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度

した水のリン濃度 ($\text{PO}_4\text{-P}$ および TP) の鉛直分布を、溶存酸素飽和度 (DO)、塩分および水温とともに示したものである。水路内のリン濃度は、密度や DO の鉛直分布に対応して明確な 2 層構造を示しており、特に底層では溶存態のリン ($\text{PO}_4\text{-P}$) がその大部分を占めることがわかる。一方、TP との比較から、表層では懸濁態リンが支配的であることがわかる。3. (1) で示したように、水路内では流れが 2 層構造を有すること、およびリンの濃度および形態にも明確な 2 層構造がみられることから、水路での湖水交換により、猪鼻湖には底層を通して浜名湖側から高濃度の溶存態リンが流入し、表層から懸濁態リンが流出する構造がうかがえる。

一方、図-7 は、同日における湖内南側 (St. 7) と湖内北側 (St. 11) の観測地点での $\text{PO}_4\text{-P}$ の鉛直分布を示したものである。これより、湖内底層近傍で高濃度の溶存態リンが出現していることがわかる。なお、8 月 25 日にも同様の採水・分析を行ったが、水路・湖内とも、その特性は上記の 8 月 17 日のものと類似していた。

4. ボックスモデルによる平均流量の推定

(1) ボックスモデル

夏期における湖内の平均的な流動および物質輸送特性を調べるために、ボックスモデルを利用した。陸ら (2006) は猪鼻湖を一つの二層ボックスとして夏期の平均流量の推定を試みたが、実測値とのずれが大きかった。そこで、今回

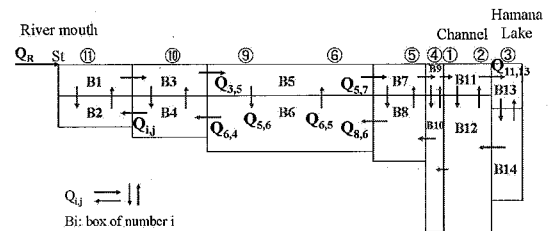
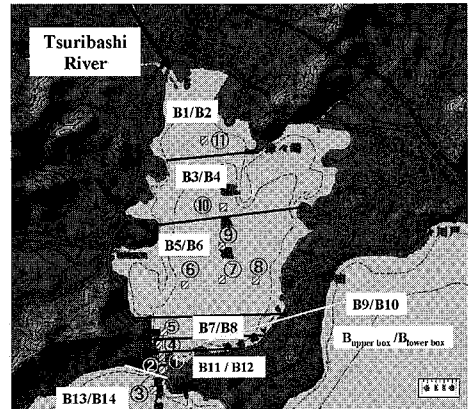


図-8 ボックスモデルの概念図：平面図(上)と断面図(下)

は、ボックス数を増やす等モデルを若干修正した。これまでの観測結果により、猪鼻湖は夏期に強い密度成層が形成されており (青木ら, 2001, 2002, 2004; 陸ら, 2006), 2006 年の観測期間中でも、猪鼻湖では、水深 0 ~ 2 m, 浜名湖 (St. 3) では水深 -3 m 付近までに塩分、密度の強い躍層が存在していた。したがって、湖内と水路は水深 -2 m, 浜名湖側は水深 -3 m を境界として上下 2 層に分け、平面的にも湖北側 (St. 11) から浜名湖側 (St. 3) までを CTD の観測地点を考察して 7 個のボックスに分けて、上下 2 層の全 14 個のボックスに分割した (図-8)。実測塩分をトレーサーとして、水と塩分の保存式をもとに、鉛直方向には移流と拡散を、水平方向には移流のみを考慮した。式 (2) ~ (5) は図-8 のボックス B1 および B2 での算定式の例である。

$$Q_R + Q_{2,1} - Q_{1,2} - Q_{1,3} = 0 \quad (2)$$

$$Q_{1,2} + Q_{4,2} - Q_{2,1} = 0 \quad (3)$$

$$V_1 \frac{dS_1}{dt} = -S_1 Q_{1,3} - S_1 Q_{1,2} + S_2 Q_{2,1} \quad (4)$$

$$V_2 \frac{dS_2}{dt} = -S_2 Q_{2,1} + S_1 Q_{1,2} + S_4 Q_{4,2} \quad (5)$$

ここに、 $Q_{i,j}$ はボックス i からボックス j への流量、 S_i 、 V_i はボックス i の平均塩分、体積、 Q_R は河川流入量である。また、エスチュアリー循環を考慮して、上層ボックスでは下流側への流れ、下層ボックスは上流側への流

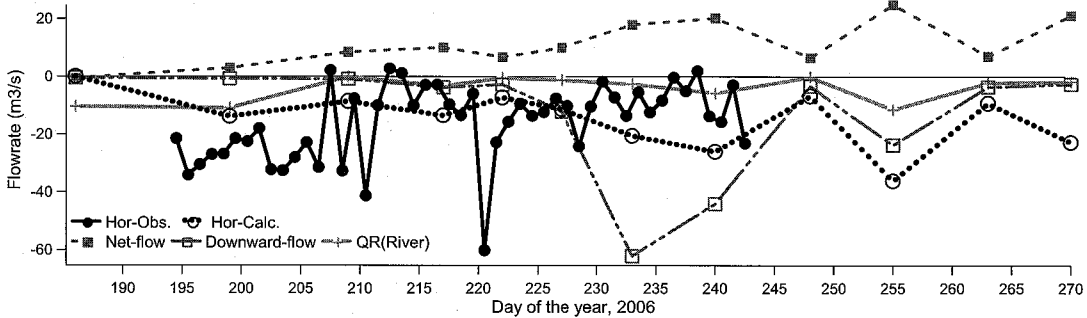


図-9 ボックスモデルによる平均流量と観測値の比較

れを仮定している。計算では、まずボックス1～4で塩分と河川流入量を用いてボックス間平均流量を計算し、この値を用いて次の4個のボックス3～6での計算をするというように、順次隣接するボックス間の平均流量の計算を行った。ボックスモデルの計算は、およそ1週間ごとに得たCTDの観測結果を用いて、各観測インターバルごとに行った。このとき、ボックス内の塩分は、連続する2回の観測を平均したものであり、河川流入量は釣橋川からの流入のみを考慮し、計算対象期間中の降雨量と流域面積から求めた。これより、ほぼ1週間の観測インターバルごとにボックス間の平均流量を算定した。

(2) 平均流の特性

図-9は、ボックスモデルの解析結果を示したものである。図中には、淡水流入量(Q_R)、水路内でのADCPによる平均流の実測結果を示してある。観測期間中の瀬戸表層での平均流量の観測値(Hor-Obs)とボックスモデルによる解析結果(Hor-Calc)を比較すると、風によって短期的に生じる大きな変動は再現できていないが、オーダー的には同程度であり、平均量としてはほぼ妥当な結果を得ている。図中には水路内での水平方向の移流量の他に、ボックスモデルの結果を猪鼻湖全体で平均して求めた鉛直方向の移流量(Net-flow)および拡散に関する鉛直方向の交換流量(Downward-flow)の計算結果を同時に示してある。これより、鉛直方向の湖水の移流量および交換流量は、瀬戸での交換流量と同程度であることがわかる。これは、前述のように、淡水流入量の数倍に及んでいる。図-9の鉛直方向移流量(Net-flow)は猪鼻湖全体でのものであるが、図-10には上下に隣接するボックスごとに全期間で平均して求めた流量、すなわち期間平均流量の空間分布(釣橋川から水路までの変化)を示したものである。図には、上方向流量、下方向流量、およびその差であるnet鉛直流量を示している。これより、鉛直方向の平均流量は、釣橋川河口近傍のボックスで大きいことがわかる。すなわち、水路の下層を通じて浜名湖側から流入した水は、湖内の

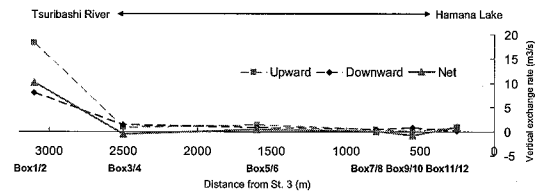


図-10 上下ボックス間の平均鉛直流量の空間分布

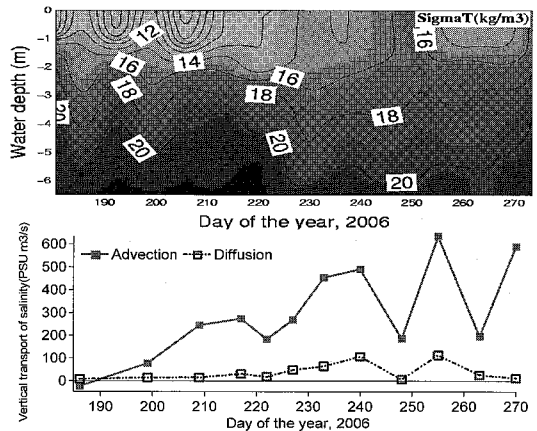


図-11 密度変動のコンター図(上)、塩分の移流量と拡散による輸送量(下)

強い密度成層のためにあまり鉛直混合せずに北側まで達し、河口付近で上昇するエスチュアリー循環の構造が推察された。

図-11は、湖内の密度分布の変化と対比して、猪鼻湖内で平均した塩分の鉛直方向移流量と拡散による鉛直方向輸送量の変化を示したものである。これより、塩分の鉛直方向輸送への寄与は、拡散よりも移流が大きく、輸送量は220日頃の強風によって密度成層が弱くなる時期に対応して大きくなっていることがわかる。この混合状態は、淡水流入が少なければ長期間続く。

(3) 湖内のリンの輸送特性

リン濃度の観測日を含む期間(8.12～8.17)のボッ

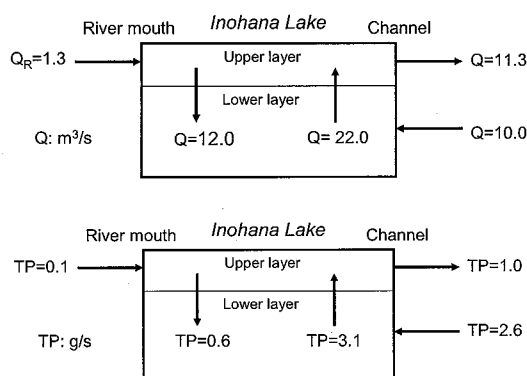


図-12 ボックスモデルによる平均流量の収支(上)および全リンのフロー(下)

クスモデルの計算結果を用いて、猪鼻湖内でのリンのフローをおおまかに把握することを試みた。図-12は、ボックスモデルによる期間中の平均流量の収支および平均流量から求めた全リンのフローを示したものである。この期間中は降雨が少なく、河川流入量(1.3)に比較して水路を介しての湖水交換(上層流出量11.3, 下層流入量10.0)が相対的に大きくなっている。また、湖内上下層間の混合についても、底層から上層への移流量が $22.0 - 12.0 = 10.0$, 交換量が12.0と大きな値となっている。

一方、全リンのフローについては、図-12(上)の流量にリン濃度を乗じて求めたもので、上層から下層、底泥への懸濁態リンの沈降や底泥からのリンの溶出は含まれていない。したがってリンの収支はとれていないが、流動によるリンの輸送特性が推察できる。すなわち、猪鼻湖へ流入するリンは、水路底層を通して浜名湖側から流入するリン(ほとんどは溶存態リン)が卓越しており、また上層で一次生産に利用されるリンは、そのほとんどが下層から供給されていることがわかる。以上より、夏期の密度成層に伴って生じる流れとリン濃度の明確な2層構造が、リンのフローに大きく関係していることがわかった。

5. あとがき

観測データの分析およびボックスモデルを用いて、夏期の猪鼻湖における流動および物質(塩分, リン)の輸送特性を明らかにした。以下に得られた主要な知見を列記する。

- 1) 浜名湖と猪鼻湖を結ぶ狭水路の平均流れは明確な2層構造を有しており、これが湖水交換に大きく寄与している。この湖水交換は主として風の影響を受けて生

じているが、日平均の表層流量は、風速・風向データから高い精度で予測が可能である。

- 2) 水路内および湖内のリン濃度についても、鉛直の方向に明確な2層構造を有している。特に、溶存態リンは下層で高濃度を示す。
- 3) 移流・拡散を考察した簡易なボックスモデルを用いて湖水交換流量、湖内での上下層の交換流量を推定した。その結果、水路表層での平均的な流量として実測値に近いほぼ妥当な結果が得られた。また、下層から上層への平均流は、エスチュアリー循環的に河口近傍で生じていることがわかった。
- 4) 塩分の鉛直方向への輸送形態については、拡散よりも移流が卓越しており、輸送量は風が強く密度成層が弱くなる時期に対応して大きくなっていった。
- 5) リンについては、水路底層を通して溶存態リンが浜名湖側から流入する量が多いこと、湖内上層へは下層からのリン供給が支配的であることが示唆された。

本研究により、夏期の密度成層形成期の湖水流動とそれに伴う物質輸送のメカニズムは概ね把握できた。リンの挙動については、懸濁態リンの沈降、底泥からのリンの溶出についてさらに検討し、リンの収支を明らかにする必要がある。また、貧酸素水塊についても、今回浜名湖側からの流入が大きいことがわかったので、適切な酸素収支のモデル化とそれに基づく対策につなげていく予定である。

参 考 文 献

- 青木伸一・福本直樹・岡本光雄(2001): 猪鼻湖における底層貧酸素水のエアレーション効果の検討, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 1066-1070.
- 青木伸一・水野 亮・岡本光雄(2002): 猪鼻湖における貧酸素水塊の消長に及ぼす気象擾乱の影響, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 1036-1040.
- 青木伸一・水野 亮・有田 守(2004): 潮汐の影響を受ける汽水湖での夏期の貧酸素水塊の形成と栄養塩収支に関する研究, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 921-925.
- 陸 真姫・青木伸一・大谷 聡(2006): 閉鎖性内湾における夏期密度成層形成時の海水交換と鉛直混合に関する研究, 海岸工学論文集, 第53巻, pp. 981-985.