

湾口シルを伴う成層内湾の海水交流に関する研究

TIDAL WATER EXCHANGE IN AN ENCLOSED STRATIFIED BAY WITH A SILL AT A BAY MOUTH

有田正光¹・中井正則²・山本隆一³・出口義昭⁴

Masamitsu ARITA, Masanori NAKAI, Ryuichi YAMAMOTO and Yoshiaki DEGUCHI

¹正会員 工博 東京電機大学教授 理工学部建設工学科(〒350-02 埼玉県比企郡鳩山町)

²正会員 工博 東京電機大学助手 理工学部建設工学科(〒350-02 埼玉県比企郡鳩山町)

³学生員 東京電機大学大学院 建設工学専攻(〒350-02 埼玉県比企郡鳩山町)

⁴東京電機大学学生 理工学部建設工学科(〒350-02 埼玉県比企郡鳩山町)

This paper presents an experimental study on tidal water exchange and mixing in an enclosed stratified bay with a sill at a bay mouth. The experiment was carried out varying a height of a sill under a fixed tidal condition. A mechanism of tidal water exchange and mixing in a bay was discussed associated with roles of a sill, using temperature distributions obtained from the experiment. It was found that a sill can trap heavier water masses in lower layers in bay and sea areas, and that it plays both positive and negative contributions to mixing in a bay. Whether contributions by a sill are positive or negative depends on a relationship between tidal amplitudes and heights of a sill.

Key Words : *Enclosed stratified bays, sill effect, tidal water exchange, vertical mixing in bays, tidal trapping*

1. まえがき

潮汐による外洋水と湾内水との交流, 交換ならびに混合の評価は環境水理学上の重要な課題であり, これについて従来より多くの研究が実施されてきた。しかし, それらの研究の多くは内湾が成層化していない場合を取り扱ったものであり, 成層化している場合についての研究は数例があるにすぎない。ところで, 内湾は成層化していることがむしろ一般的であり, 成層内湾の現象を明らかにすることは工学的に極めて重要であると考えられる。

中村・萩野¹⁾は成層化した湾の例として高知県・野見湾を取り上げて現地観測を実施し, 内部潮汐波が海水交流に重要な働きをしている可能性があることを指摘している。また, 内部潮汐波の周期が湾の内部固有周期に近づくために共鳴現象が生じ, これが湾内の流動を支配しているものと推測している。萩野^{2), 3)}は同湾を対象にして追加観測, 理論的考察,

数値計算を行い, 同湾では内部潮汐波の共鳴現象が生じている可能性が高いと結論付けている。この場合, 表面潮汐波の位相と内部潮汐波のそれが逆(π だけずれている)であるために内部潮汐波の振幅が大幅に増幅され, また湾内の流れが二層流となり, その流速は表面潮汐によるその5~10倍程度になる。一方, 武内⁴⁾は三重県・五ヶ所湾を対象にして現地観測を行った結果, 内部潮汐波の共鳴現象は生じていないと報告している。

ところで, 湾口にはしばしばシルが形成されている。密度成層した内湾の場合にはこのシルが海水交流に大きな影響を及ぼすと予想される。松田⁵⁾は湾口にシルをもつ成層内湾の海水交流機構について tidal trapping という概念を導入している。彼の言う tidal trapping は上潮時に湾口シルを越流して湾内の底層に潜り込んだ高密度の外洋水が, 下潮時にシルを越流できずに湾内底層に滞留する現象である。この tidal trapping 現象が生ずると, 外洋水と湾内水

との実質の交換が促進されることとなる。また、彼は tidal trapping 現象が顕著になるのは潮差の大きい場合であると報告している。一方、木村ら^{6)・8)}は湾口にシルをもつ高知県・浦の内湾での現地観測とシルを設置した模型実験を実施している。しかし、彼らは tidal trapping 現象に注目しておらず、主として内部潮汐による海水交流、交換について取り扱っている。他にも成層内湾の海水交流を取り扱った事例は幾つかあるが、そのメカニズムについて十分解明されているとは言い難い。

ところで、従来の研究をレビューすると成層内湾の海水交流、交換ならびに混合を支配する主要因として、前述の内部潮汐波、tidal trapping のほかに湾口断面積と湾口流速・流量との関係^{9), 10)}、および湾長スケールの水平循環流、水深スケールの鉛直循環流などが挙げられる。これらの因子の相対的重要性は潮汐の条件および湾の諸元により決まるものと考えられるが、具体的な寄与度についてはほとんどわかっていない。

本研究は既述の4種の要因の中で tidal trapping を取り上げ、それが湾口シルを伴う成層内湾の海水交流、交換ならびに混合に及ぼす効果について実験的に検討し、その物理的メカニズムについて詳細に明らかにすることを目的としている。松田⁵⁾は tidal trapping によってシルは海水交換を促進する、つまり、環境水理の観点からは正の側面を持つと報告しているが、本研究においてはシルと潮汐の条件によってはシルが負の効果を持ち得ることを実験的に明らかにする。

2. 実験

実験にはFig.1に示すような250cm × 603cm × 56cmの平面水槽を使用した。水槽の片側の端には潮汐発生装置が、反対の端には内湾の模型(70cm × 70cm)が取り付けられている。また、内湾の模型端には河川を模擬した流入水路が付設してある。内湾の模型は水槽の底から約40cmの高さに張った水平アクリル板(150cm × 160cm)の上に設置した。模型の湾口開口幅Bは一定(=10cm)とし、また、湾口には高さΔhのシルを設置した。

実験では、まず湾内水深が5.0cmになるように水を張り、水がほぼ静止した後(約20分後)に付設の流入水路より温水を放出して湾内成層を作製した。温水を流量30cc/sで5分間流し込んだ後、湾内の水温鉛直分布をほぼ一様にするために約15分間放置した。その後、起潮機を作動させて実験を第9周期まで続

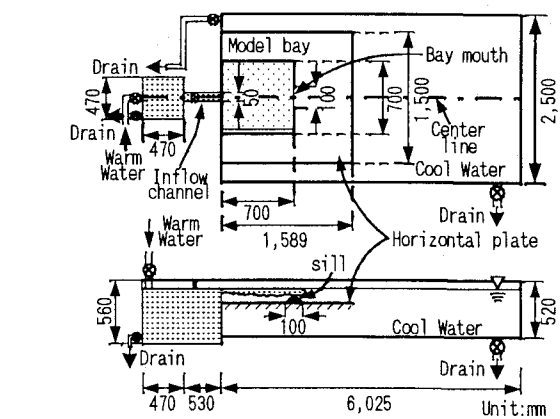


Fig.1 An experimental apparatus

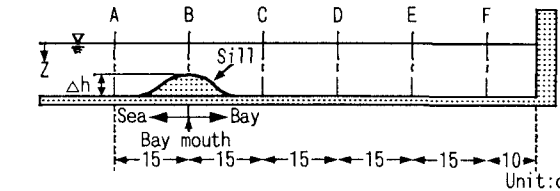


Fig.2 Measuring stations

行した。なお、実験中の温水の供給は行っていない。これは、湾内の混合過程を再現するためである。

実験ではFig.2に示すように、湾の中心線上の6点(A,B,・・・F)において鉛直方向に5点を選んでサーミスタ型水温計により10秒ごとに水温を測定した。

Table 1は今回実施した実験ケースの一覧を示している。同表に示すように湾口に設置するシルの高さΔhは0,H/3,H/2(H=5cm=平均潮位時の湾内水深)の3種類とした。潮汐はいずれの実験ケースにおいても、振幅aおよび周期Tをそれぞれ3mm, 200sに設定した。また、湾内の初期の水温鉛直分布は3ケースともに類似しており、上下層の温度差ΔTは3℃程度であった(Fig.3参照)。要するに、今回の実験は潮汐および成層の条件を一定にし、シルの高さを変化させてシルが現象に与える影響を調べようとするものである。

本実験では湾長L=2km程度、湾内水深h=10m程度の成層内湾を念頭に置いた。従って、模型内湾の縮尺は水平縮尺SH=1/3000、鉛直縮尺SV=1/180程度である。また、時間縮尺STはST=SH/SV^{1/2}~1/230程度である。また、対象としている潮汐は周期T~12.5hr程度、潮差2a~1m程度となる。

3. 実験結果

Fig.4は上潮時の湾内の表層流れを模式的に示している。同図に示すように、上潮時に湾内に流入し

Table 1 Experimental conditions

Run	Tidal wave		Temperature difference ΔT	Height of a sill $\Delta h/H$
	Amplitude a	Period T		
1				0
2	3mm	200s	about 3°C	1/3
3				1/2

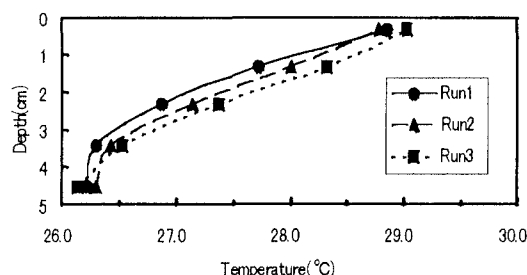


Fig. 3 Initial states of vertical temperature distributions in the model bay

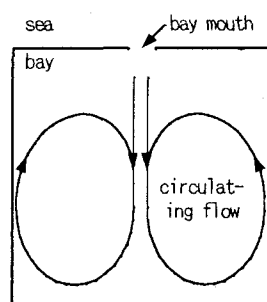


Fig. 4 Surface flow in the model bay (in flood tide)

てきた湾外水は湾奥まで達し、そこで方向を転換して湾の両サイドに沿って流れながら再び湾口側へ向かうような水平循環流を形成していた。従って、今回の実験は潮汐流の効果が強い場合を対象にしていることになる。

Fig. 5は湾口(点B)における水深方向5点の水温の時系列を示している。すべての実験ケースにおいて水温は潮汐に対応して上潮時に低下、下潮時に上昇の変動を繰り返している。また、下潮時の水温の上昇が急激であるのに対して、上潮時の水温の下降は比較的緩やかであることが認められる。さらに、各実験ケースごとの特徴としては、1)Run1では水温の変動幅は上層で大きく、下層ほど小さくなっている、2)Run2, 3では下層の水温変動がRun1に比較して大きい、3)Run2, 3では、底層側の3点において下潮時の水温の時系列が凹型形状を示す、などが挙げられる。

Fig. 6は第3周期の上潮最強時と下潮最強時における水温縦断分布を示す。同図中の数値と点線は、それぞれ水温およびその縦断面内の等密度線を示している。なお、第3周期の結果を取り上げたのは、混合が進む前の状況を議論する方が現象の物理的メカ

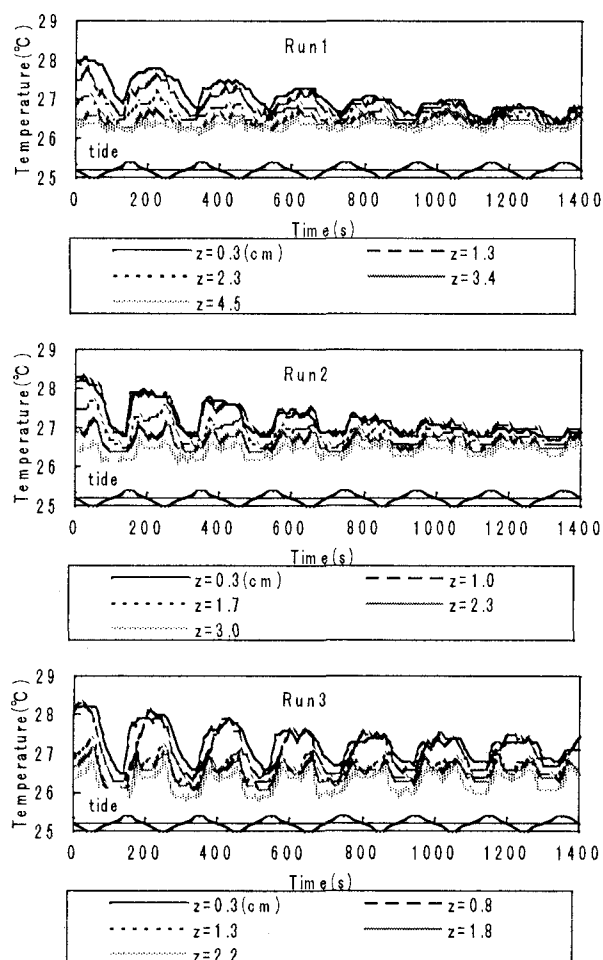


Fig. 5 Time variations of temperature at the bay mouth (Station B)

ニズムを理解し易いと考えたからである。ところで、流れにともなう混合が無視できるとすれば流線と等密度線は一致する。本研究では近似的に両者が一致すると考えて議論を進める。Run1の上潮時における等密度線は全体として僅かに下層へ向きながら楔状に湾内へと延びている。一方、Run2, 3では等密度線がシルの近傍(湾内側)でシルに沿って曲げられた後、湾奥に向かって水平となる傾向がある。これはRun1では湾外水が全層にわたって楔状に侵入するのに対して、Run2, 3では湾外水がシルを越流して侵入するためである。逆に、下潮時にはRun1, 2, 3ともにコンターラインは上潮時と比較して水平に延びており、湾内水がほぼ水平に流出していくと考えられる。

Fig. 7は第8周期における点D, Fの水温鉛直分布を示している。なお、第8周期の結果を選んだのは十分に混合が進んだ段階においてその混合状況を把握するためである。同図より、Run2($\Delta h/H = 1/3$)において最も湾内混合が進んでいる(上下層の水温差 ΔT が最も小さい)ことが認められる。また、Run3

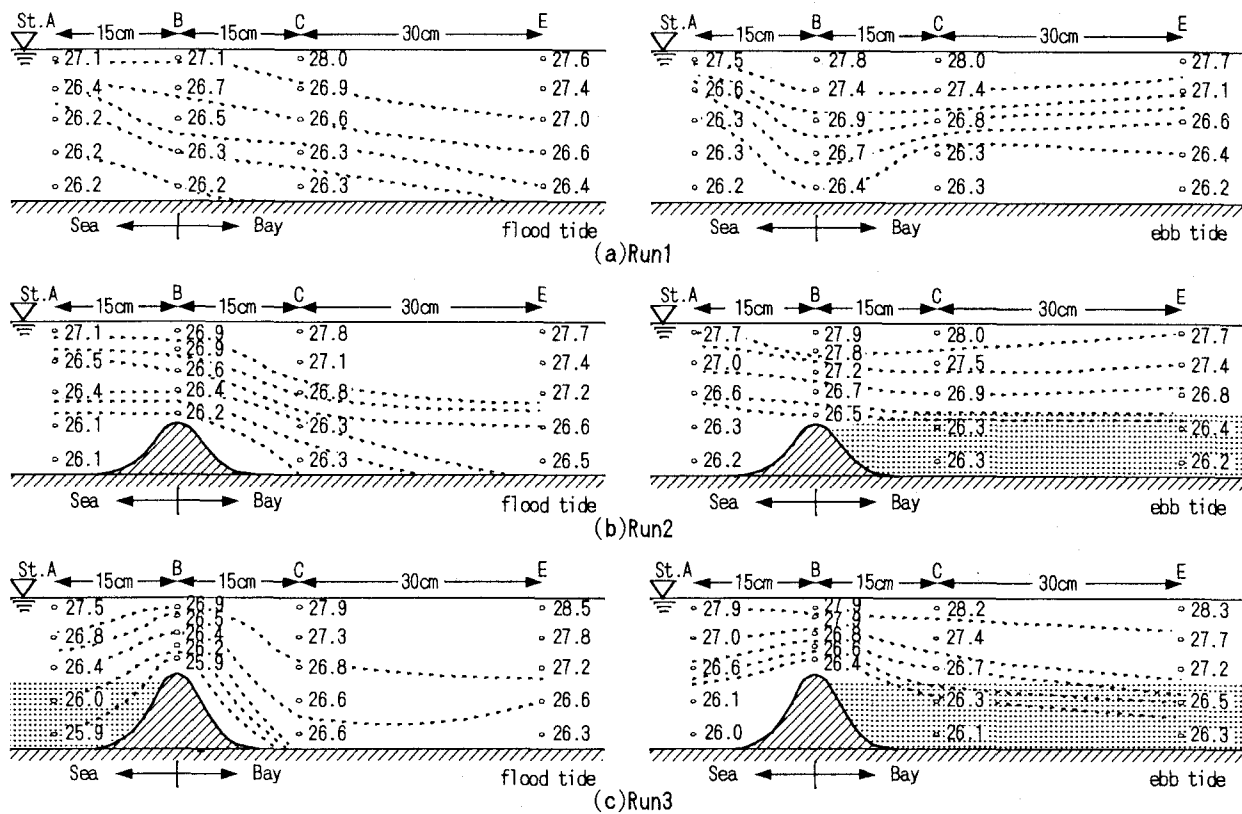


Fig.6 Longitudinal temperature distributions (in the 3rd tidal period)

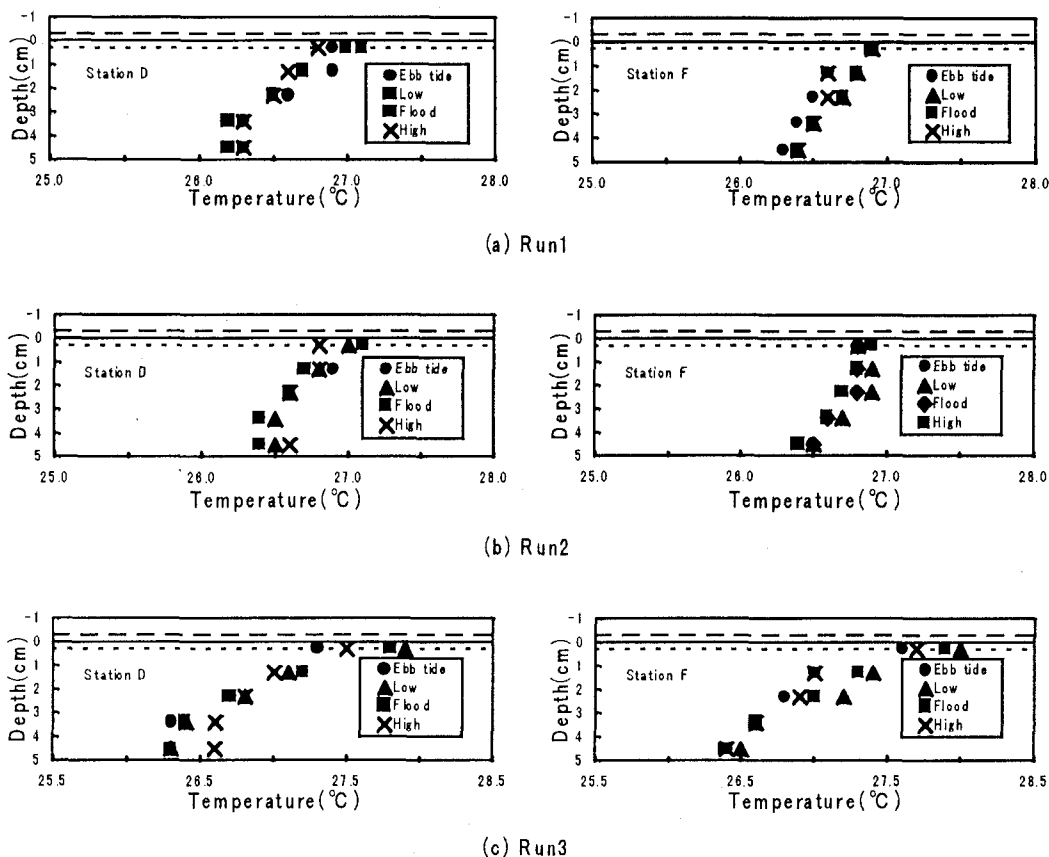


Fig.7 Vertical temperature distributions in the bay (Stations D and F : in the 8th tidal period)

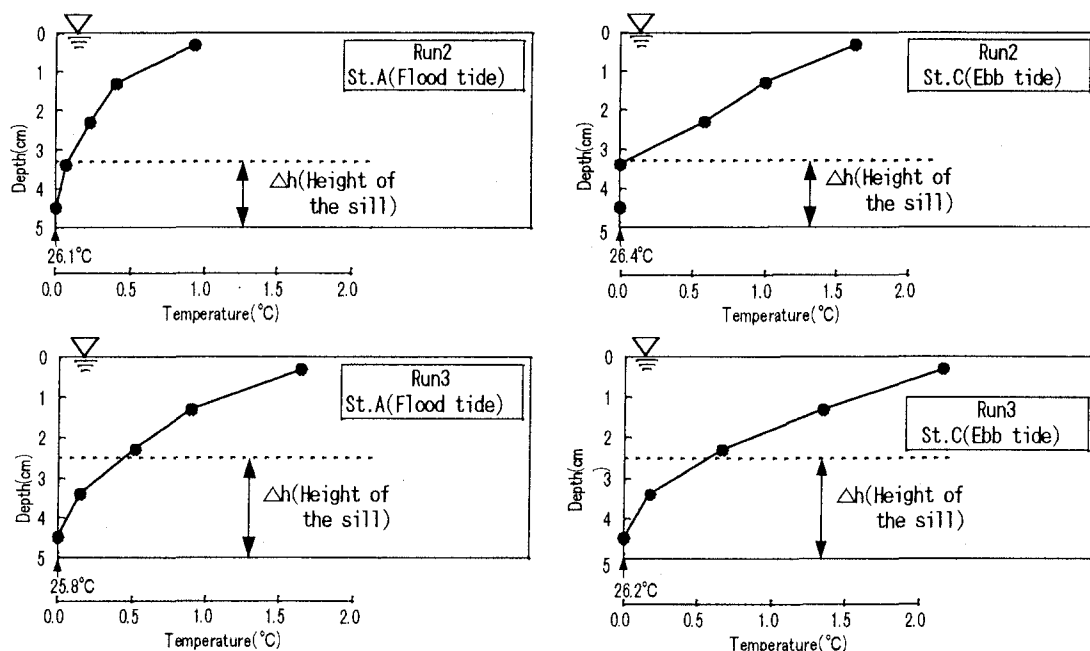


Fig. 8 Vertical temperature distributions near the sill

($\Delta h/H = 1/2$)の湾内混合の程度が最も低いことがわかる。この結果は湾内混合を促進するシルの最適高さが存在することを示しており興味深い。なお、以上の混合のメカニズムについては次章において検討する。

4. 考察

前章で効果的な混合が生じるシルの最適高さが存在することを明らかにした。ここではその理由について考察する。

Fig. 8はRun2, 3の上潮時の点Aおよび下潮時の点Cにおける水温の鉛直分布(第3周期)を示している。同図より、上潮時の点Aにおける水温成層はRun2よりRun3の方が強いことが認められる。これはRun2の方がRun3よりシルによる混合効果が強く、点Aにおいて希釈混合が進んでいることを意味している。下潮時の点Cのデータからも同様なことが言える。つまり、Run3では点Aにおいてほとんど混合が進まず、上層水塊と底層水塊の水温差が大きく、外洋の底層水塊(Fig. 6の陰影部分)がシルを越流できないと推察される。同様に考えれば、Run2, 3の湾内底層にもシルを越流できない水塊(陰影部分)が存在すると言える。以下では、陰影の部分を「準停滞層」とよぶこととする。上述のように準停滞層は湾の内外に形成されるが、湾内のそれは湾内が成層化していることによって生じるものであり、一方、湾外のそれは湾内より流出する低密度の(水

温の高い)水塊によって湾口付近が成層化するために生ずるものである。

Fig. 6のように、下潮時にはRun2, 3の両方で湾内の底層に準停滞層が形成され、湾内の底層水の流出が阻まれている。これは、いわゆるtidal trappingである。一方、上潮時にもRun3においては湾外に準停滞層が形成されており、湾外の底層水の流入が阻止されている。これもシルによって底層水塊がtrapされる現象であるが、松田⁵⁾が検討したtidal trappingと区別するために、ここではblockingとよぶことにする。なお、tidal trappingもしくはblockingによって底層水がシルを乗り越えられないのは、シルの高さに対して潮汐振幅が相対的に小さく(潮汐運動が弱く)、低温の底層水塊が重力に逆らってシルを乗り越えるエネルギーを潮汐運動から得られないためである。

以上より、シルの高さを高くしてゆくとまずtidal trappingが出現し、さらにシルを高くすると、これに加えてblockingが出現すると考えられる。Run2の場合には、上潮時毎に(底層水を含めて)湾外水が湾内に流入し、tidal trappingにより蓄積される。蓄積された外洋水は湾内上層水と混合し、その結果湾内混合が促進される。つまり、湾内混合の観点からみればシルは正の貢献をする。一方、Run3ではblockingによって外洋の底層水の流入が阻止され、上・中層水のみが流入する。従って、湾内での混合が大幅に抑制され、湾内混合の観点からはシルは負の貢献をすることになる。

Table 2 A summary of experimental results

Run	Height of a sill $\Delta h/H$	Blocking	Tidal trapping	Mixing in a bay
1	0	x	x	—
2	1/3	x	O(+)	Promoted
3	1/2	O(-)	O(+)	Suppressed

*) Symbols (+) and (-) express positive and negative contributions due to a sill respectively.

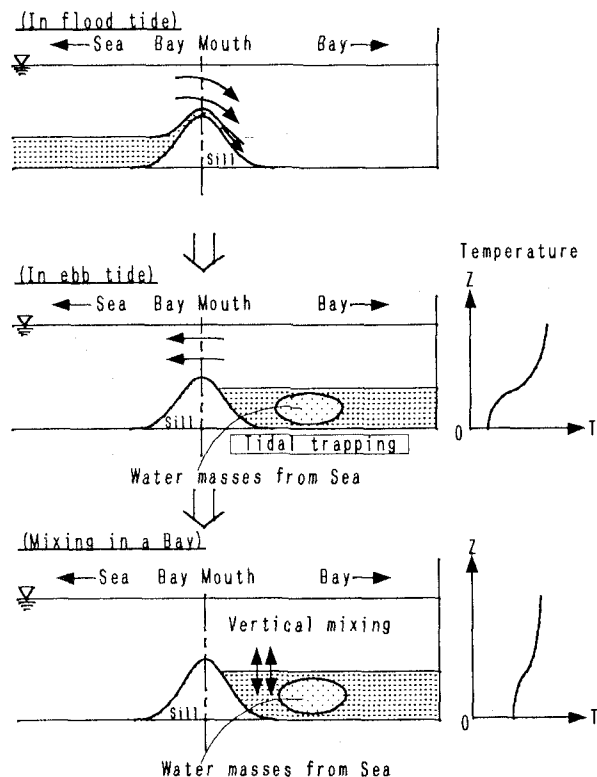


Fig.9 A mechanism on tidal water exchange and mixing in a bay under a positive contribution by a sill

以上の結果を Run1の場合も含めてTable 2にまとめて示す。同表中で、シルが混合に寄与する場合を+で、混合を阻止するように働く場合を-で表示してある。さらに、湾内混合に対してシルの正の貢献が大きい Run2について、海水交流および湾内混合の機構をFig.9に示す。

ところで、Fig.5に示した湾口における下潮時の水温時系列(下層)が凹型形状になる原因は、以下のように推察される。下潮開始と同時に湾内上層の温度の高い水塊が湾外に流出するので、湾口では最初に高温を検出する。その後、上下層の中間層が上層とともに流出することにより湾口水温が低下する。さらに、下潮の継続によって中間層が完全に排除され、再び上層水のみが流出するようになり、湾口水温の上昇が生じる。これが湾口の水温時系列の凹型

形状の原因であると考えられる。

5. まとめ

本研究においては湾口シルが成層内湾の海水交流、交換ならびに混合に及ぼす影響について実験的に検討した。その結果、湾口シルは混合を促進する場合と抑制する場合があることが明らかになり、この現象を tidal trapping と blocking の2種類の概念を導入して説明した。また、潮汐、成層の条件、シルの高さの3種類のパラメータの組み合わせによって混合を促進するための最適な条件が定まると考えられる。

本研究はシルが果たす役割を定性的な側面から検討したものである。工学的には各種パラメータの定量的な寄与を明らかにする必要がある、今後の検討が待たれる。

参考文献

- 1) 中村 充・萩野静也：密度成層流体中の海水交換機構に関する研究，第26回海岸工学講演会論文集，pp. 544-548，1979.
- 2) 萩野静也：高知県野見湾における内部潮汐に関する研究-I，水産工学，Vol.29，No.1，pp.1-8，1992.
- 3) 萩野静也：高知県野見湾における内部潮汐に関する研究-II，水産工学，Vol.29，No.1，pp.9-16，1992.
- 4) 武内智行：三重県五ヶ所湾の成層期の流況と内部潮汐，水産工学，Vol.33，No.2，pp.117-122，1996.
- 5) 松田義弘：密度流による内湾水の更新，水産土木，Vol.23，No.1，pp.19-28，1986.
- 6) 宗景志浩・木村晴保：成層期の浦の内湾の水温変動と海水流動について，水産土木，Vol.19，No.1，pp. 7-13，1982.
- 7) 木村晴保・宗景志浩・渡辺久芳・黒河俊信：浦の内湾の環境特性，水産土木，Vol.23，No.1，pp.29-40，1986.
- 8) 木村晴保・章 守字・伴 道一：内部波による湾の海水混合機構とそのモデル化，水産工学，Vol.31，No.2，pp.87-91，1994.
- 9) 中村 充・萩野静也：海水交流に関する研究，第23回海岸工学講演会論文集，pp.507-511，1976.
- 10) 中村 充：改訂水産土木学，工業時事通信社，pp. 313~343，1991

(1997.9.30受付)