

成層期の浦の内湾の海水混合と水塊形成 に及ぼす内部波の役割

宗 景 志 浩*・木 村 晴 保**

1. ま え が き

夏期の内湾では、定常的な内部波が発達することがよく知られている^{1),2),3)}。本研究では、浦の内湾における内部波を確かにしたのち、水塊分析により内部波湾内の海水混合と水塊形成に重要な役割を果たしていることを明らかにし、あわせて湾内の海水の移流と交換機構を検討した。

2. 観 測 内 容

浦の内湾内に 12~16 の観測点を設け、0.6 m 間隔で水温、塩分、DO を観測した。観測は 1985 年 7 月 26 日、8 月 18 日、30 日、9 月 2 日に行い、それぞれ半潮~1 潮時の間に 3~6 回繰返した。さらに、これと並行して長崎沖水深 17 m では水温の多層連続観測 (2 m おき 8 層、10 分間隔) を実施した。また、7 月 25 日および 9 月 5 日の高知水試による水温、塩分の観測結果も用いた。

3. 観 測 結 果

3.1 海 洋 構 造

図-1 には 7 月 25 日 (上げ潮時) の水温および塩分の水平分布を、図-2 には 8 月 18 日の干潮および満潮時における水温等値線を、海底を基準として同一紙面上にプロットして示した。図-1 によれば、

- ① 水面下 2~2 m には水温と塩分に、10~11 m には水温に強い躍層が見られる。
- ② 湾口部 St. 11 の海水は流入する湾外水と考えられ、これらは湾内中層部海水の水温、塩分値と等しい。
- ③ 上げ潮時、下層部の水温、塩分の等値線には、いずれも湾奥に向って正の傾斜が見られる。

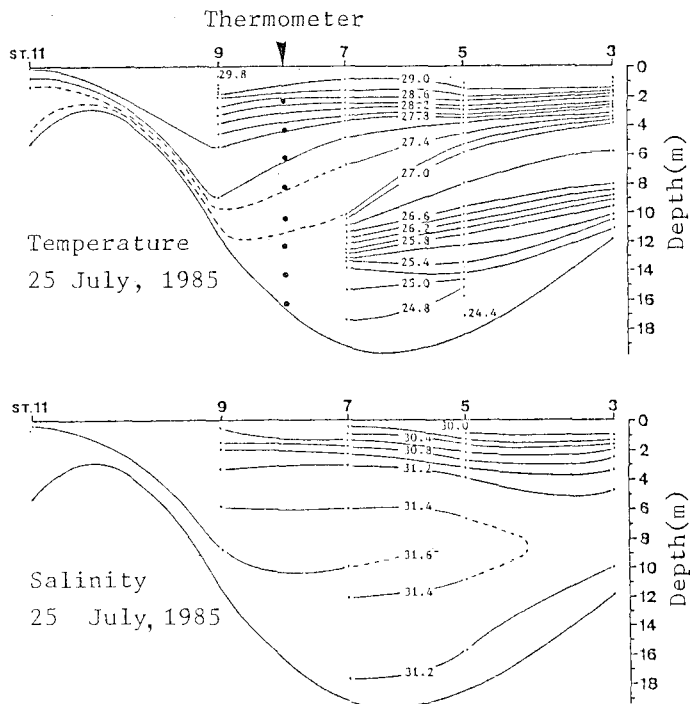


図-1 水温、塩分の水平分布 ('85.7.25)

図-2 によれば

- ④ 水温、密度 (図は略) とともに中層以浅 ($T > 27.6^{\circ}\text{C}$, $\sigma_t < 20.0$) の等値線は湾全域で潮位面に対応した変化を示す。
- ⑤ 一方、下層では例えば $T = 27^{\circ}\text{C}$ の等値線は湾口側で、満潮時には干潮時の位置より低下し、干潮時には上昇する。しかし、湾中央部以奥ではこれと逆位相で変化する。

3.2 水温多層観測

図-3 には長崎沖で行った水温多層観測の記録の一部を示した。これによると、

- ① 7 月 25 日~8 月 20 日の間、水温変化は水面下 9 m 以深で卓越しており、常に潮位変化との対応が見られる。水温は上げ潮時上昇し、下げ潮時低下する。
- ② この水温変化は、7 月 27 日から 8 月 1 日にかけて特に大きく、一潮汐間に 3~4 $^{\circ}\text{C}$ 程度もある。ま

* 正会員 農修 高知大学講師 農学部栽培漁業学科

** 正会員 農博 高知大学教授 農学部栽培漁業学科

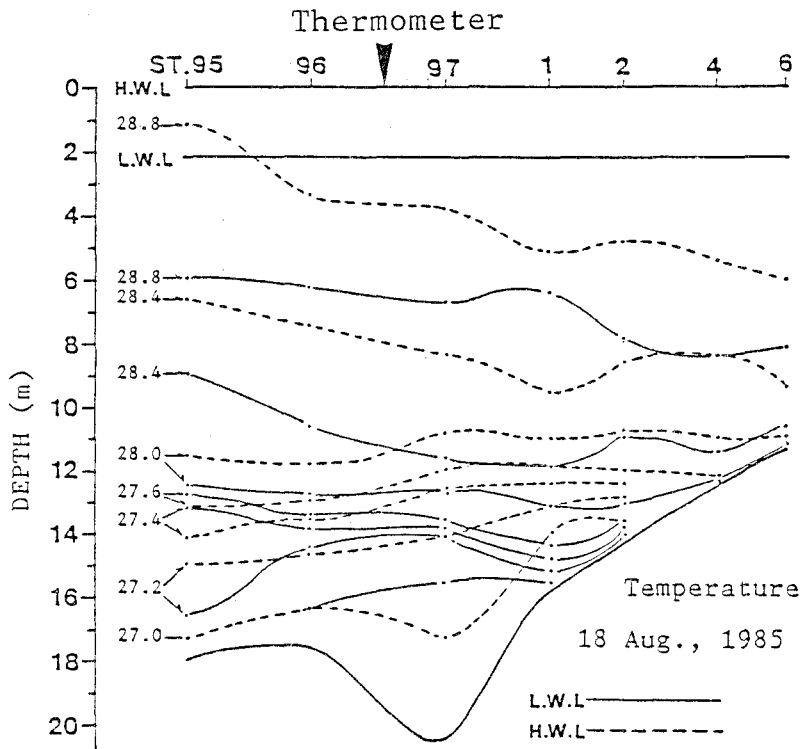


図-2 干潮および満潮時における水温等値線の位置

た、同時期に下層部では水温の急上昇が生じ、その後水温成層は弱くなるものの下層に見られる潮汐と対応した水温変化は8月末まで続く。

3.3 水塊分析

8月18日および9月2日の湾全域における水温、塩分の観測値は図-4に示すT-S図中にプロットされた。水温および塩分の値をいずれも0.5のきざみで区分し、それぞれ数字とアルファベットで統一して表わし、その範囲に入る海水を同一の水塊とみなした。この水塊区分に従って図-5に示す水塊の水平分布図を作製した。図-5によれば、

- ① 8月18日満潮時にはJ10の水塊が湾奥斜面先

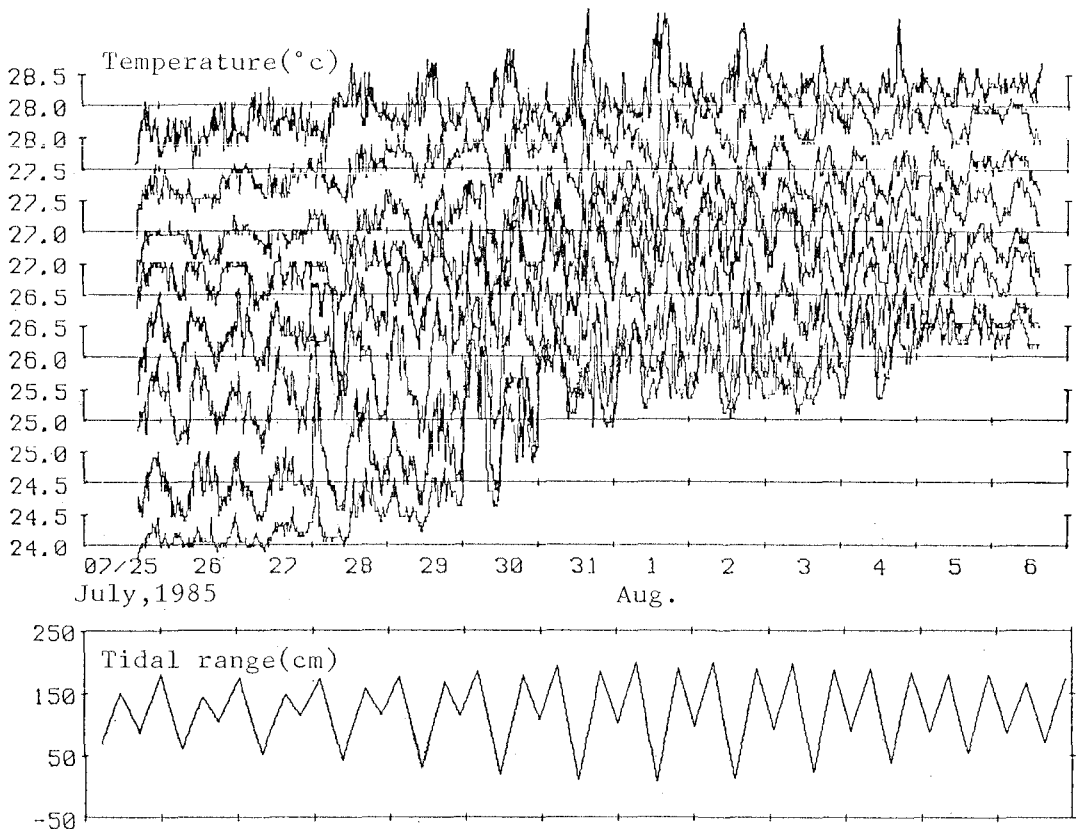


図-3 水温多層観測結果 (長崎沖, '85.7.25~8.6)

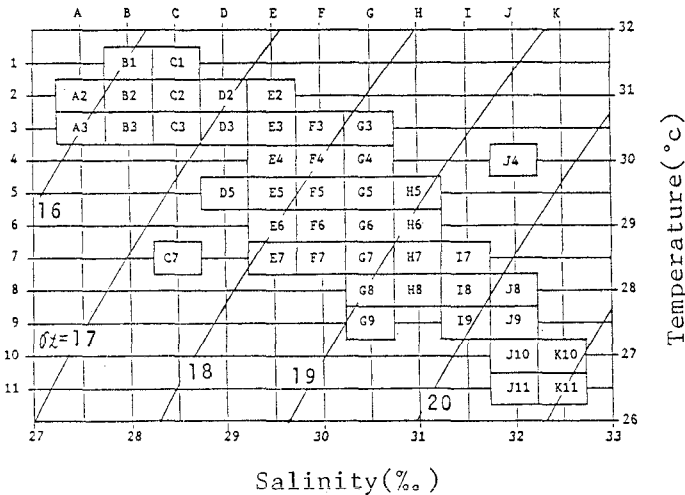


図-4 T-S ダイアグラムと水塊区分

端部の St. 1~3 付近まで盛り上っており、さらに高密度の J11 がその下にわずかながら現われている。しかし干潮時には、斜面上では J10 も J11 も勢力を失い、逆に湾口側で厚さを増す。

- ② 満潮時、I8 は底層の J10, J11 の水塊によって St. 3~6 の間に押し込められたかたちで見られるが、干潮時に底層水が湾口方向に移動するのに伴い、薄い層となって St. 1~6 付近まで細長く拡張する。なお、I8 は湾口および湾奥斜面上の 2 ヶ所に存在するがこれらは連続しない。
- ③ 9月2日には、8月18日に比較し水塊の種類が減少し、湾内水の一様化が見られる。
- ④ 8月18日の最下層部に見られた J10, J11 の水塊は9月2日には消失し、I8 になっていた。
- ⑤ 中層部の水塊 H7, I7 は9月になっても変化しないが、8月の湾奥表層部に見られた低密度水塊は消失し新たな中間密度の水塊が形成されている。

4. 考 察

4.1 成層期の流れ、内部波、水温変化

図-1 によると、水温・塩分のいずれについても、上げ潮時に湾口部 (St. 11) を流入する海水は湾内の中層付近の海水のそれと等しい。特に、St. 7 付近では中層部に高塩な海水が存在し、湾外水と接続していることから、湾外水は上げ潮時湾内の中層付近に卓越して流入する。

図-2 においても、中層以浅で水温等値線は湾内全域ではほぼ同時に上昇あるいは下降しているものの、底層部に位置する 27.6°C 以下の等値線は、満潮時湾中央部を中心に湾口側では、干潮時の位置より低下し、逆に湾奥側では上昇していることが分る。このような等値線の変動は密度についても見られることから、湾内下層部で

は、湾中央部を節、湾口および湾奥部を腹とした定常内部波 (波長 4~6 km, 波高 2~4 m) が発達しているものと考えられる。

図-3 によれば、7月26日から30日にかけて干潮および満潮時における水温差は、中層部で 0.5~1°C、水面下 10 m 付近で 3°C もある。図-1 に示したように、水温センサーは長崎沖水深 17 m の地点の底上 0.5 m から上方 14 m までの層に固定されている。これは水温勾配の小さい中層から第2躍層付近の水温を計測したことに相等する。

上げ潮時には高温高塩水が中層付近に流入し、下げ潮時にはほぼ同じ海水が流出するところから、水温勾配の小さい中

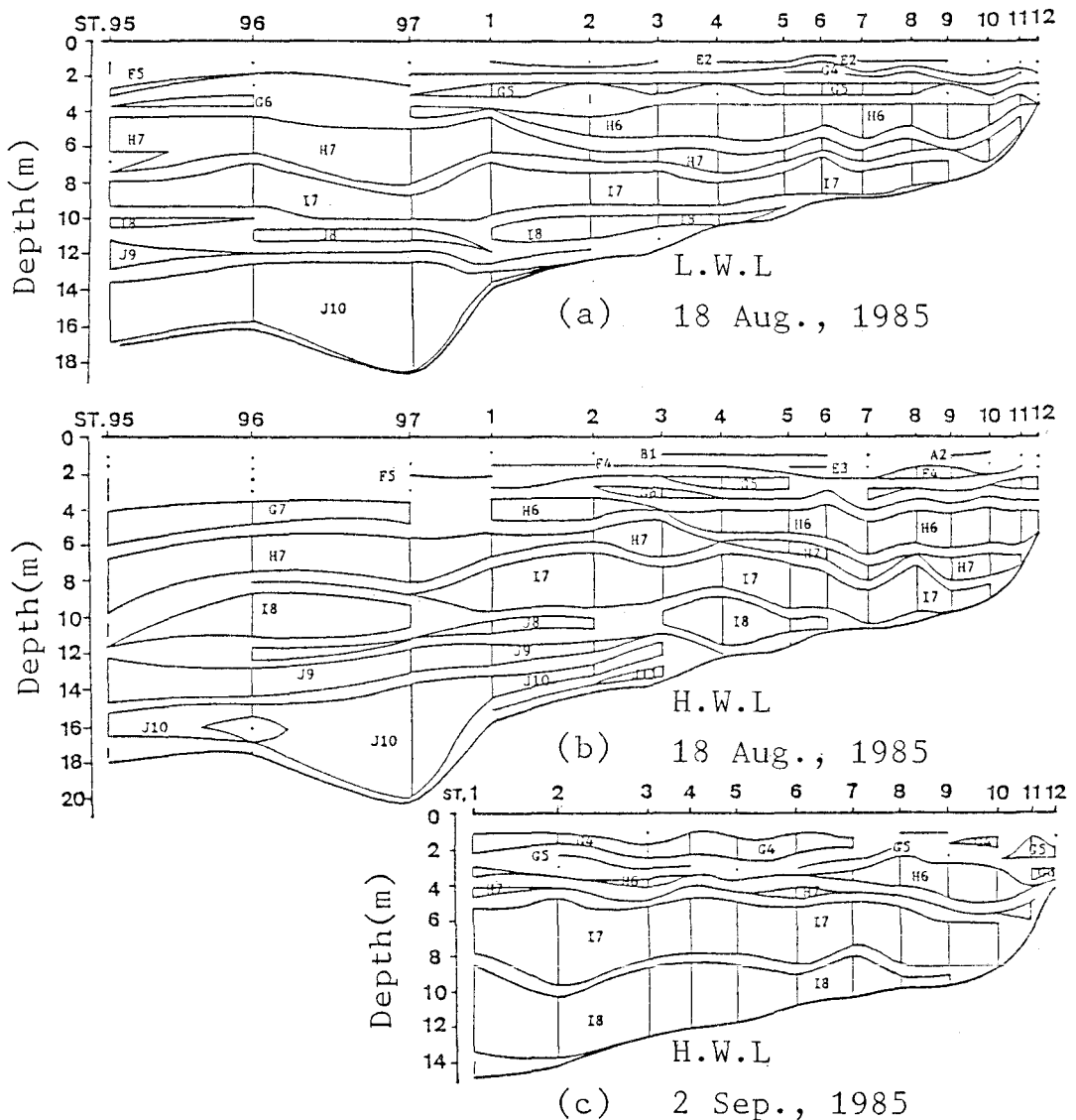
層の水温変化は小さい。一方、湾口下層部では、内部波動があるため、水温等値線は上げ潮時に降下し水温上昇が起るものの、下げ潮時には逆に低温水の上昇により著しい水温低下が生じる。内部波による等値線の鉛直変化は、潮位変化の数倍にも及び、躍層面でもっとも大きいことから、下層部での水温は潮汐に対応して大きく変化する。

4.2 成層期の水塊形成機構

定常内部波の発達する成層期、湾内の水塊がどのように形成され、変化していくのであろうか。ここでは、それらの過程で果たす内部波の役割について考察する。

下層部躍層面に発達する内部波の挙動は、図-5 に示す水塊分布においても知ることができる。すなわち、最下層部に存在する J10 の水塊は、8月18日の満潮時に湾奥斜面上を St. 3 付近までは上っている。また、J10 よりやや低温で高密度水塊である J11 もその下にわずかに見られ、斜面上を遡上している。一方、干潮時には、これらの水塊は斜面上ではほとんど勢力を失って見ることはできないが、逆に湾口に近い St. 95~97 で厚さを増す。これら J10 の水塊の挙動は、図-2 に示した等値線の動きと一致するもので、内部波のそれに他ならない。

底層部でさらに興味ある水塊の挙動を示すものは I8 である。I8 の水塊は、満潮時には St. 96 付近と湾奥斜面上の St. 4 付近に存在するが、① これら二点の中間にやや高密度高塩分の J8 が存在する。② DO の水平分布と重ねて見ると、湾奥部の I8 が 1 ppm 以下であるのに対し、湾口部のものは DO を多く含む。③ 干・満潮時を通じて二つの I8 は連続することはない。——等の理由で、結果的に同一の水塊ではあっても、湾口から湾奥へ移動したものではなく、別々の場所でそれぞれ独自に形成されたものと考えられる。



図—5 水塊の水平分布 (1985.8.18~1985.9.2)

図—5 (b) によれば、二つの I8 の上部には I7, H7 が下部には J9, J10 の水塊が見られる。図—4 の T-S 図によるまでもなく、これらの水塊は I8 を境に低密度と高密度の水塊が上下に比較的厚い層をなしている。これら二つの層の間で鉛直的な混合が生じることによって、中間的な密度をもつ I8 が形成される。しかしながら、密度躍層を越えて上下の水塊が混合し、新水塊の形成が効率的に進行するためには、それぞれの場所で水の活発な動きのあることがさらに必要である。

浦の内湾の場合、二箇所が生じている混合は、Thompson⁴⁾の指摘した定常波の節の位置で生じる砕波によるものとは明らかに異なる。しかし、湾奥斜面上における I8 の形成は Caccioppo⁵⁾が実験的に示した現象に類似するもの

と思われる。すなわち、I8 は上げ潮時に内部波の先端部が斜面上を遡上する時、上層水を巻き込みながら進み、最初の渦が崩壊した後で起る強い mixing に由来するものであろう。また、斜面先端部 (St. 97~St. 1) の海底勾配の急変部での内部波の変形、砕波なども混合の原因となろう。さらに、下げ潮時にはこれらの混合水は躍層面を湾口側に水平に引かれ、新たに薄い層を形成しながら徐々に厚さを増す。

8月18日および30日の塩分分布から湾奥斜面上の各観測点ごとに鉛直拡散係数を求め、その鉛直分布を図—6に示した。この観測期間中は、中層に流入する潮流の水塊の性質に変化がなく、各層で水平的にはほぼ様な水塊分布を示すため、水平移流による拡散は考えない。

図-6によると、概して、斜面底部上1~3m および水面下4m 付近で鉛直拡散係数は大きく、図-5の水塊分布に見られた混合域ともほぼ一致する。

4.3 水塊分布の季節変化

図-5 (b), (c)によると、8月に比較し9月の水塊分布には著しい一様化が見られる。例えば、8月に St. 2~5 付近で形成された I8 は、9月には斜面上一面に厚く広がり、J10, J11 は完全に消失している。これらは内部波に基づく混合機構によって、最下層部の水塊が中層水に取り込まれ、躍層面に新たな水塊が形成され、やがて下層水と置き換ったものである。また、表層部においても、8月に見られた A2, B1, E2, E3 などの低密度水塊は完全に排出され、9月には流入海水である H7, I7 との中間密度である G4, G5 で覆われる。中層部の水塊である H7, I7 は湾口から湾奥部までほぼ連続して存在し、DO も比較的多く(3~5 ppm)、季節的变化も少ない。これらの海水は湾の最奥部斜面上で表層水と混合し新水塊を形成する。湾奥部においても水塊分布、密度構造には内部波的な変化が見られることから、これらの新水塊の形成にも内部波が関与しているものと思われる。

5. む す び

成層期の浦の内湾の海水混合と水塊形成に内部波がどのような役割を果たしているかを調べるため、1985年7月25日から9月5日にかけて海洋観測を行った。それらの結果を整理し、成層期の浦の内湾の物理過程を模式的に表現し、図-7に示した。

(1) 夏期の浦の内湾では、潮汐流は中層に卓越して流入し、下層躍層面に潮汐周期に対応した定常内部波が発達する。

(2) 湾奥斜面上では、内部波の碎波、乱れ等に起因する鉛直混合により水塊の形成が見られる。この水塊は湾口方向に拡張し、徐々に下層水塊と置き換わる。

(3) 湾の最奥部では、表層低塩水と中層水との混合が

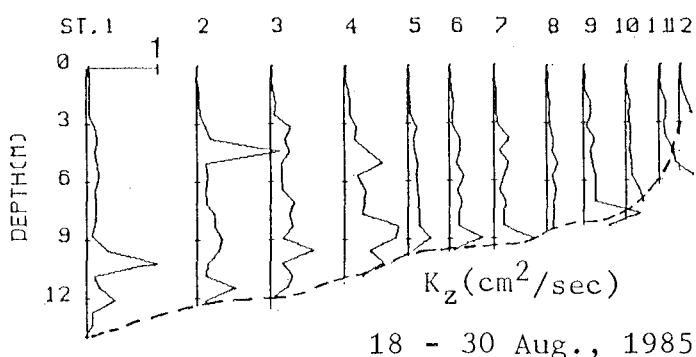


図-6 鉛直拡散係数の分布

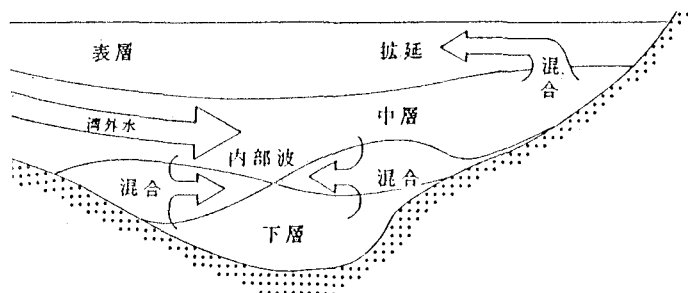


図-7 成層期の流動と混合および水塊形成模式図

盛んで、ここで形成された水塊は湾口方向に拡張する。

最後に、本研究は文部省科学研究費(一般研究B, 研究代表者: 畑幸彦高知大学教授)による研究の一部であることを付記し、謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 宗景志浩・木村晴保: 成層の発達した場合の浦の内湾の海水流動機構について, 第29回海岸工学講演会論文集, pp. 560~564, 1982.
- 2) 宗景志浩・木村晴保: 浦の内湾の夏期成層期における流動特性, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 660~664, 1984.
- 3) 木村晴保・宗景志浩: 湾内で潮汐により励起される二層界面長波の特性, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 727~731, 1985.
- 4) Thope, S. A.: On the standing internal gravity waves in a stratified fluid, J. Fluid Mech., Vol. 32, pp. 693~704, 1968.
- 5) Cacchione, D. A.: Ph.D. thesis. "Experimental study of internal gravity waves over a slope", MIT, and Woods Hole Oceanogr. Inst., WHOI Rep. No. 70-6, 226 p., 1970.