

海洋深層水の放水による海水交換促進工法の 羅臼漁港への適用性

Applicability to Rausu fishing port of
the seawater exchange hastening method by using deep-sea water discharge

瀬戸 雅文

Masabumi SETO

Abstract

A technology of hastening the seawater exchange using deep seawater (DSW, known as clean and cold seawater) was tested in a case study on Rausu Fishing Port using a hydraulic model and a numerical simulation. The technology was proposed by the authors as follows in 2006. When cold seawater is continuously emitted in the state of a buoyant jet along the bottom of an anchorage in a port, the jet increases its width in the shape of a fan immediately by entraining the surrounding seawater. Although the jet flow velocity decreases with the increase in the entrainment velocity, the buoyant jet expands in the shape of a concentric circle. When the buoyant jet flows out through the lower layer of the port, outside fresh seawater flows into the port through the upper layer in order to compensate the flux. At Rausu Fishing Port, Hokkaido, water quality was reported to be worsened particularly at the west anchorage in autumn, but 4,560 ton/day of DSW has been pumped from a depth of 350 m for industrial use since 2006. In the present study, a hydraulic model (1.5×8×1 m, with topography in the port and its vicinity of 1/250 in scale) was used with a wave producer assuming the use of emission pipes with inner diameter 25 or 50 cm. The numerical simulations were conducted using a 3-dimension fluid analysis model in the case of emission of 5,000 t/day of DSW (5°C, 33.3 psu) as a buoyant jet at an initial velocity of 1.18 m/s into the west anchorage (12°C, 33.5 psu representing the autumnal condition) toward its center. The amount of seawater exchange was calculated to be 2 to 12 times larger than that obtained at the spring tide. The validity of the technology was discussed.

Key Words: fishing port, seawater exchange, buoyant jet, hydraulic model test, numerical simulation

要 旨

漁港泊地内の海底面に沿って海洋深層水を噴流状態で放出すると、周辺の海水を大規模に連行しながら流れの幅を扇状に増大させる。連行による流量の増加とともに噴流内の流速は減少し、流れは次第に密度流的な同心円状の拡がりに変化しながら、下層密度流として港口の下層部より流出し、流出量に相当する外海水が表層より漁港内へ流入し海水交換が促進される。本研究は、2006年より海洋深層水の本格取水が開始された羅臼漁港をモデルケースとして、港内で最も閉鎖性が高く水質低下が認められる、西側澗内より海洋深層水を放出した場合の海水交換促進効果を数値解析および水理模型実験より検討した。その結果、海洋深層水の放水による当該海域の海水交換速度は、大潮時における海水交換速度と比較して2～12倍の促進効果が、密度フルード数で評価される放出条件に依存して発現することがわかった。

キーワード：漁港，海水交換，密度噴流，水理模型実験，数値実験

1. 緒 言

近年、衛生管理型漁港づくり事業の進展に伴い、漁港内の清浄性向上や漁獲物の鮮度保持、冷水性魚類の蓄養などを目的に、海洋深層水などの低温清浄海水の取水施設を計画・整備する自治体が増えている。一方、外郭施設で囲まれた漁港内の水質は、荷捌き排水や船上洗浄水の還流などによって水産用水基準を下回るケースも認められ、積極的な保全が求められている。瀬戸ら（2006）は、衛生管理や蓄養利用後においても、漁港内海水と比較して低温性や清浄性が認められる冷排水を対象として、冷排水を漁港底層部より港口方向に放水し、漁港内海水を連行しながら底層より漁港外へ流出する大規模な密度噴流を形成することによって、漁港内の海水交換を促進させる新たな水質改善工法を提案した。

漁港の護岸底面より密度噴流として放出された冷排水は、放出直後は噴流として漁港内底面近傍の海水を大規模に連行し、扇状に流れの幅を増大させる。噴流領域における大規模な連行に伴い冷水性や流軸方向の流速成分が急減すると、噴流は次第に密度流的な同心円状の拡がりに変化するとともに、周辺海水の連行量も減少して成層流的な流れへと遷移してゆく。これら一連の密度噴流過程における連行領域の到達距離を海水交換促進領域と定義すれば、海水交換促進領域が放水地点より港口に至る距離よりも長い場合には、密度噴流は漁港内底面付近の海水を内部に取り込みながら下層より漁港外へ流出し、流出量に相当する外海水が上層より流入することによって漁港内の海水交換が促進される。

本研究は、冷排水の放水による新たな漁港内海水交換促進工法を北海道に位置する羅臼漁港に適用し、水理模型実験および数値実験を実施して、冷排水の放水条件や漁港周辺の波浪条件を変化させながら、海洋深層水の放水による海水交換促進工法の羅臼漁港への適用性を検討した。

2. 方 法

海洋深層水の漁港内放水条件

北海道の知床半島東側（根室海峡）に位置する羅臼漁港（図1）は、2001年に環境衛生管理型漁港づくり推進事業のモデル漁港に指定されるとともに、2002年度より始まった特定漁港漁場整備計画にもとづいて全天候型埠頭や、海洋深層水の低温安定性や清浄性を活用した低温清浄海水導入施設が整備された。低温清浄海水導入施設においては、2004年度に取水管の敷設が終了し、2005年度に陸上施設の整備を完了後、2006年度より本格取水が開始され、日量最大4560tの海洋深層水が水深350mより汲み上げられ、取水量の大半が洗浄水や蓄養など水産分野に利用されている。

羅臼漁港では、2002年10月より2003年3月にかけて港内の水質調査、底質調査、ヘドロ調査が実施されている（北海道開発局、2003）。これより、本港における水質環境はサケ・マス定置網、およびイカ定置網による漁獲量がピークを向かえる10月～11月に最も低下し、特に西側澗内（図1で点線で囲った海域）における水質悪化が懸念されている。一方、その他の港区については調査期間を通して環境負荷の少ない水質性状を維持していることが確認されている。本研究では、羅臼漁港で最も水質環境の低下が懸念される西側澗内をケーススタディとして、同海域より冷排水を放水した場合の海水交換促進効果について検討した。

水理模型実験

水理模型実験には、福井県立大学所有の平面水槽

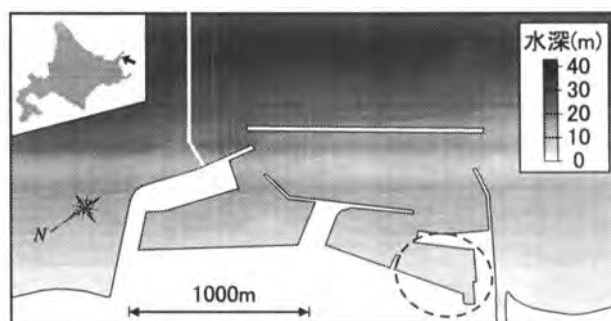


図1 羅臼漁港と放水対象海域（点線で囲った西側澗内）

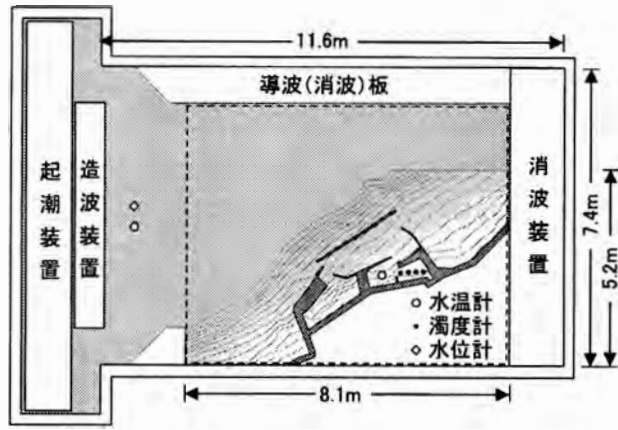


図2 平面水槽による水理模型実験の概要図

(L 15 m × W 8 m × H 1 m) を使用した。水槽内に図2に示すように、水平縮尺、及び鉛直縮尺が共に 1/250 の羅臼漁港および周辺海域の水深 32 m までの海底地形を再現した地形模型を、入射波向が NE に設定されるようにモルタルで試作した（北海道港別沖波波浪推算諸元，2000）。西側澗内の拡大図を図3に示す。放水口の配置箇所は、図3の△印で示すように護岸に沿って最奥部よりほぼ等間隔で3箇所（Ⅰ～Ⅲ）に設定し、放水方向は何れの放水口においても対象海域の港口中央部に設定した上で、放水位置の差違が海水交換促進効果におよぼす影響について検討した。実験では、冷排水の放水管は、現地換算で内径 25 cm と 50 cm の2種類を想定し、模型縮尺に基づいて各 1 mm および 2 mm のステンレスパイプにより再現した。

水槽内に平均水面に相当する水深まで真水を流入し、対象港区内全域の濁度が約 4 ppm 程度になる量に相当する染料（メチレンブルー溶液）を対象港区最奥部に注入後、染料が対象港区の港口部に達する前に厚さ 5 mm のアクリル板で対象港区の港口部を仕切った後に、対象港区内の濁度が均一になるまで攪拌し、攪拌に伴う対象港区内の乱れが十分収束したことを確認した上で港口の仕切板をゆっくりと撤去した。

実験では、調温装置により冷却された冷水を定量ポンプで放水口より港区底層部に一定時間連続放水後、対象海域内をアクリル板で4区画に仕切り、仕切内の水を十分攪拌後、区画ごとに濁度を計測し、

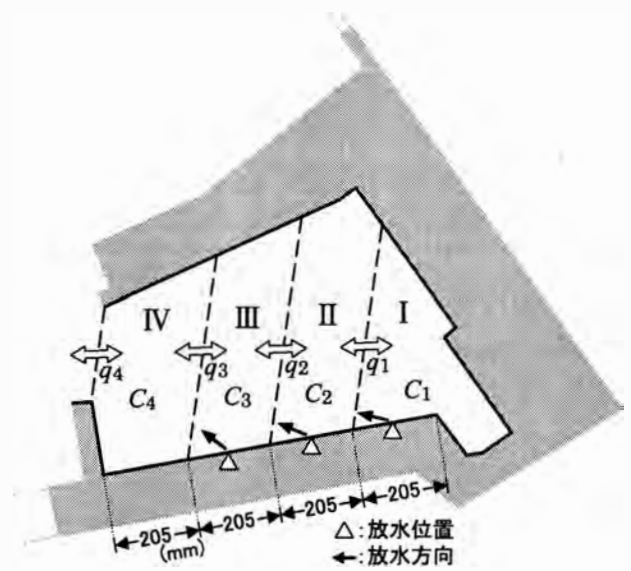


図3 西側澗内における放水口および解析区画

以下の手順で冷排水の放水に伴う海水交換速度を算定した。

実験開始時の西側澗内の濁度を C_0 、実験終了後の各区画内の濁度を $C_1 \sim C_4$ 、区画内外の海水流量を $q_1 \sim q_4$ 、各区画の貯水量を $V_1 \sim V_4$ とすると、各区画内水の交換過程は次式で定式化できる。

$$\left. \begin{aligned} V_1 \frac{dC_1}{dt} &= -K_1 q_1 C_1 \\ V_2 \frac{dC_2}{dt} &= -(K_1 q_1 + K_2 q_2) C_2 \\ V_3 \frac{dC_3}{dt} &= -(K_2 q_2 + K_3 q_3) C_3 \\ V_4 \frac{dC_4}{dt} &= -(K_3 q_3 + K_4 q_4) C_4 \end{aligned} \right\} (1)$$

ここに、 $K_1 \sim K_4$ は各区画間の海水交換率で上式を解くと以下のようになる。

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= C_0 \exp(-\alpha_1 t) \\ C_2 &= C_0 \exp \left\{ \left(-\alpha_1 \frac{V_1}{V_2} - \alpha_2 \right) t \right\} \\ C_3 &= C_0 \exp \left\{ \left(-\alpha_2 \frac{V_2}{V_3} - \alpha_3 \right) t \right\} \\ C_4 &= C_0 \exp \left(-\alpha_3 \frac{V_3}{V_4} - \alpha_4 \right) t \end{aligned} \right\} (2)$$

ここに、 $\alpha_1 \sim \alpha_4$ は海水交換速度で海水交換率とは以下の関係がある。

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 &= \frac{K_1 q_1}{V_1}, & \alpha_2 &= \frac{K_2 q_2}{V_2}, \\ \alpha_3 &= \frac{K_3 q_3}{V_3}, & \alpha_4 &= \frac{K_4 q_4}{V_4}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

潮汐周期 T を単位時間とする場合、海水交換速度 (T^{-1}) は 1 潮汐内に区画外へ流出する区画内溶存物質の湾内に残る溶存物質質量に対する割合を意味しており、(2)式に基づく次式をもとに実験より得られる諸元から直接的に算定することができる。

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 &= -\ln\left(\frac{C_1}{C_0}\right)t^{-1} \\ \alpha_2 &= -\ln\left(\frac{C_2}{C_0}\right)t^{-1} - \alpha_1 \frac{V_1}{V_2} \\ \alpha_3 &= -\ln\left(\frac{C_3}{C_0}\right)t^{-1} - \alpha_2 \frac{V_2}{V_3} \\ \alpha_4 &= -\ln\left(\frac{C_4}{C_0}\right)t^{-1} - \alpha_3 \frac{V_3}{V_4} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

更に、西側澗内全体の海水交換速度 α は以下のようになる。

$$\alpha = -\ln\left(\frac{\sum_{i=1}^4 C_i V_i}{C_0 \sum_{i=1}^4 V_i}\right)t^{-1} \quad (5)$$

水理模型実験の各種設定諸元を表 1 に示す。水底より水平方向に放出される密度噴流の挙動（長さ、速度、流量、浮力の各スケール）は運動量流束と浮力流束で記述され、これらのスケールを用いて基準化された運動方程式は、レイノルズ数と密度フルード数の相似則に支配される（瀬戸ら，2006）。噴流現象においては、乱流状態に達していればレイノルズ数相似則の概念によって粘性による影響が無視できることが検証されている（水鳥ら，1988）。噴流の限界レイノルズ数については、2次元噴流で約 4（Tatsumi, 1958）、3次元噴流で約 11（Villu, 1962）など、実験的手法による知見の集積が認められ、何れの報告においても概ね 30 以上においては乱流に遷移することが確認されている。板東ら（2005）は、海洋深層水の海中放水による海域肥沃化装置の開発に際して、レイノルズ数 120 の放水条件で模型実験を実施し、3次元数値計算結果との

表 1 水理模型実験諸元

	現場海域	模型実験
密度 Fr 数	1.69～76.3	
放水流量	1000～20000 t/day	0.24～3.43 L/h
放水流速	0.15～4.72 m/s	0.04～1.21 m/s
放水管径	0.25 m, 0.5 m	1.0 mm, 2.0 mm
計測時間	24 h	22.4 min

整合性を確認している。これらの既往知見をもとに、本実験条件における密度噴流においても、乱流が十分発達しているものとして、レイノルズ数相似性の概念を適用した。従って、本模型実験における放水条件は、密度フルード数 $(v_i(gd(\rho_i - \rho_a)/\rho_a)^{-1/2})$ 、 v_i ：放水流速、 g ：重力加速度、 d ：放水管径、 ρ_i ：放水密度、 ρ_a ：周囲水密度）の相似則に基づき設定し、密度フルード数を 1.69～76.3 まで段階的に変化させて西側澗内における静水時の海水交換速度を求めた。

さらに、羅臼漁港周辺海域における既往波浪観測資料や沖波波浪推算諸元（2000）をもとに、平面水槽に配備された造波装置を用いて、波周期 0.3 秒～0.5 秒（現場換算周期 5 秒～8 秒）の規則波を作用させ、各周期に対する波形勾配を 0.01～0.04（現場換算波高 0.7 m～3.9 m）まで段階的に変化させて波浪作用下における当該海域の海水交換速度を算定した。また、平面水槽に配備された起潮装置を用いて羅臼漁港周辺海域における 10 月の大潮時の水位変動を再現し、潮汐に伴う西側澗内の海水交換速度を求めた上で、放水時の海水交換速度を大潮時の潮汐による海水交換速度で基準化することによって海洋深層水の放水による海水交換促進効果を評価した。

数値実験

水理模型実験では詳細に検討することが困難な密度噴流内の流速分布や水温分布を推定するために、フル 3 次元流動解析モデル（DHI 社製 MIKE3）を使用して数値実験を実施した。本モデルは放水条件として放水流量と放水流速を同時に与えることによって、各計算格子における平均流速と流速分布を計算することが可能である。数値実験は図 4 に示す

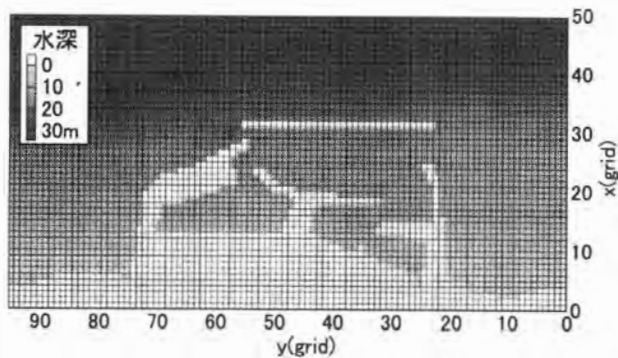


図4 数値実験における水平分割条件

ように、水平格子間隔 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ で南東、北東方向に各 51、及び 96 格子を設定し、鉛直方向には 0.25 m 間隔で最大 124 層に分割した。計算では、漁港内の水質環境、および羅臼沖の海洋深層水に関わる既往調査知見をもとに、表 2 に示すように、港内の水質低下が懸念される 10 月の平均的な水質条件として水温 12°C 、塩分 33.5 に設定後、水理模型実験と同様に西側澗内の護岸底層部（水理模型実験と同じ 3 地点）より対象澗内の港口中央部に向けて水温 5°C 、塩分 33.3 の冷排水を日量 5000 トン、初速度 1.18 m/s で放水した場合をケーススタディとして時間間隔 1 秒（最大 Courant 数 0.83）で計算した。なお、数値計算における乱流モデルは水平方向に Smagorinsky モデル、鉛直方向に $k-\varepsilon$ モデルを使用し、渦動粘性係数を動的に与えた。

3. 結果および考察

静水場における密度噴流の可視化状況

図 5 は、西側澗内の区画 I の放水口（図 5 A）、及び区画 II の放水口（図 5 B）より管径 1 mm の排水管用いて密度フルード数で 38.2 に相当する流量 1.72 L/h の冷排水を放水した場合に、周辺海域に拡大する密度噴流の発達状況をメチレンブルー溶液で可視化するとともに、密度噴流が西側澗内の港口より流出を開始した時点における底層部の水温分布を数値実験結果より示したものである。

これより、西側澗内に放出された冷排水は、噴流領域に続いて成層領域を形成し、染料が同心円状に海域内に拡大している状況が確認される。区画 I の

表 2 数値実験諸元

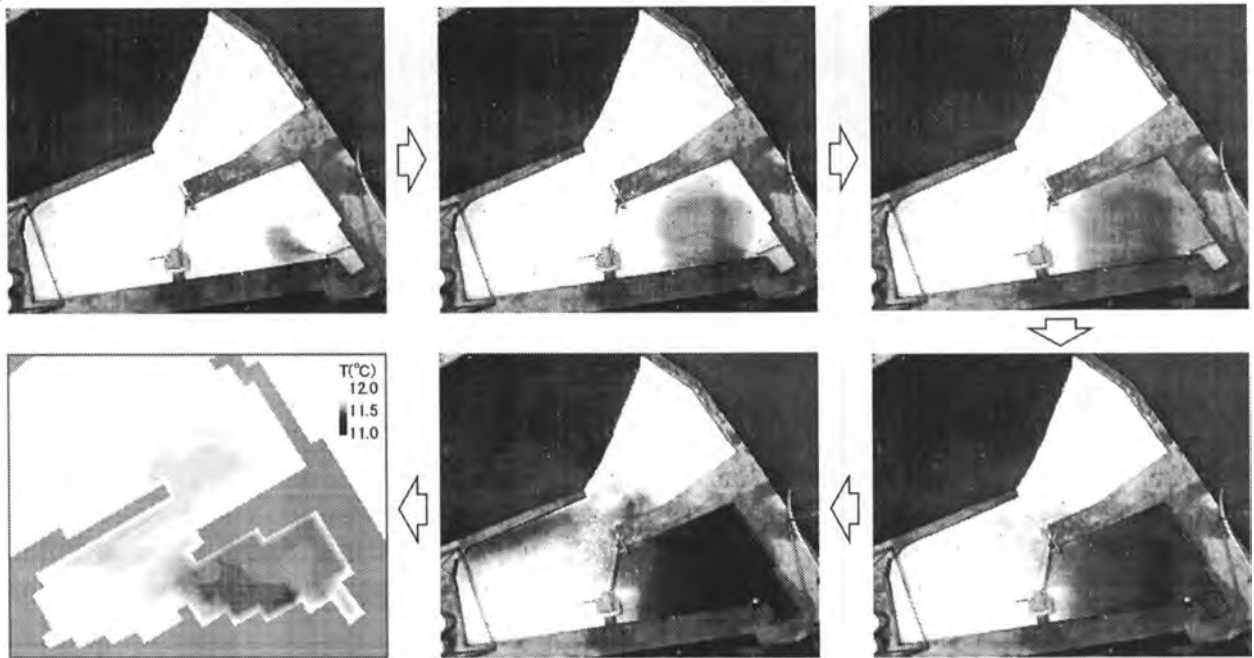
初期条件	港内水温	12°C
	港内塩分	33.5
放水条件	水温	5°C
	塩分	33.3
	流量	5000 t/day
	流速	1.18 m/s
計算条件	密度 Fr 数	25.4
	格子セル	$51 \times 96 \times 124$
		$20 \times 20 \times 0.25\text{ m}$

放水口より放出された冷排水は、同心円状に成層領域を最大規模まで発達させた後、西側澗内を時計回りに循環しながら底層の一円に拡大し、西側澗内の最奥部より下層密度流として西側澗内の港口より流出している。港口より流出した下層密度流は、一旦、北東側（写真では左側）に位置する港区の南東部（写真では上側）に流入後、南東側の港区へと移動しながら羅臼漁港外へと流出してゆく状況が観察された。一方、区画 II の放水口より放出された冷排水においても、噴流領域や成層領域の形成過程は同様であるが、区画 I より放水された場合と比較して放水口が港口に近い場合、港口より直接流出する冷排水と西側澗内を循環後、下層密度流として流出する冷排水に分岐する状況が観察され、放水口の位置に依存した冷排水の分岐過程が西側澗内の海水交換に影響を及ぼす可能性が示唆された。冷排水の放水に伴い、周辺海水より 1°C 以上の水温低下が認められた底層海域は放水口の極近傍に限定され、今回の実験ケースにおいては、冷排水の放水による極端な水温低下は確認できなかった。しかしながら、数値実験では、鉛直方向の分割幅を 0.25 m に設定しているため、数値計算における底層の平均水温差が 1°C 未満であっても、さらに海底面に近い底層部においては水温が低下する領域が拡大していることも考えられる。今後、底質の性状に及ぼす冷排水の影響を検討する場合には、さらに鉛直格子数を増やした数値実験を実施する必要がある。

密度噴流の流速分布特性

図 6 は、西側澗内における区画 I の放水口より水

A



B

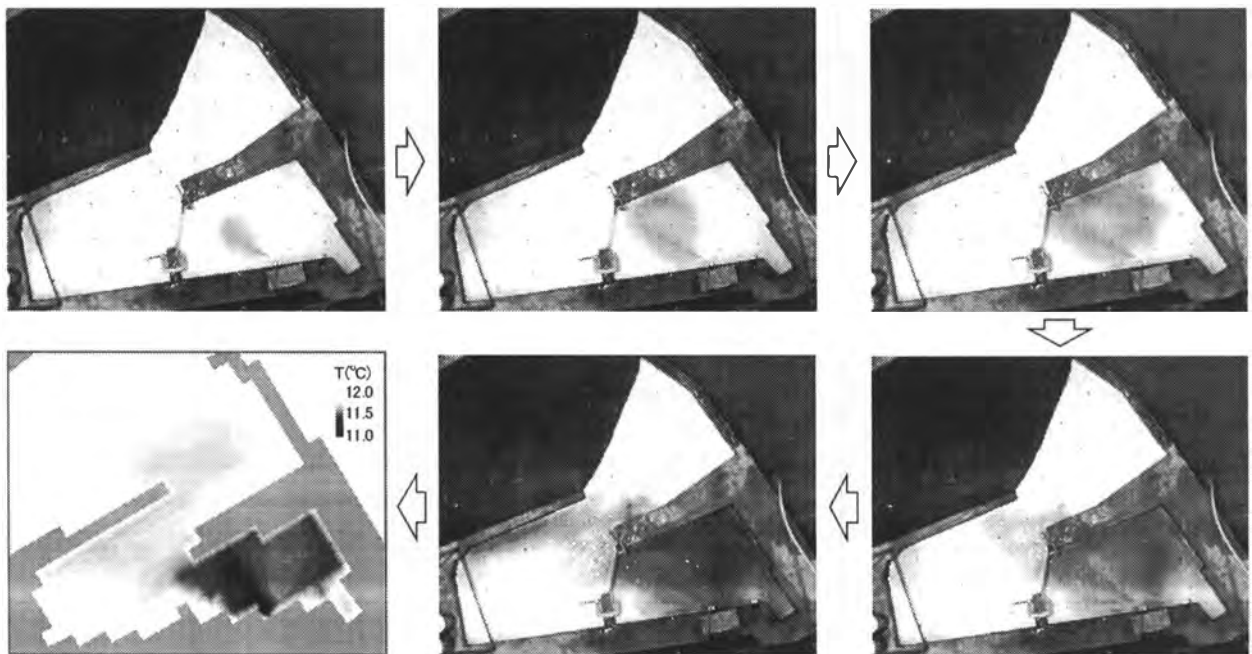


図5 密度噴流形成状況の可視化写真の一例
(A) 区画Ⅰに放水口を設定した場合 (B) 区画Ⅱに放水口を設定した場合

温 12℃の周辺海域へ向けて、水温 5℃の冷排水を流速 1.18 m/s で日量 5000 t 放水した場合の数値実験において、放水開始後 24 時間経過した時点で形成された水平流速分布を示したものである。さらに図 7 は、同時点において算出された西側澗内の港口周辺の 2 断面（図中の a-a' 及び b-b'）における断面流速分布を示したものである。これらより、西

側澗内の底層部には冷排水に起因する時計回りの循環流が形成されるとともに、西側澗内の南東側より冷排水が流出している状況が確認できる。また、流出時の港口部底層付近の最大流速は約 3.0 cm/s 程度と、下層密度流としては比較的速い速度で西側澗内の外部へ流出していた。一方、表層部では港口の南西方向より西側澗内へ流入し、表層流の影響は、

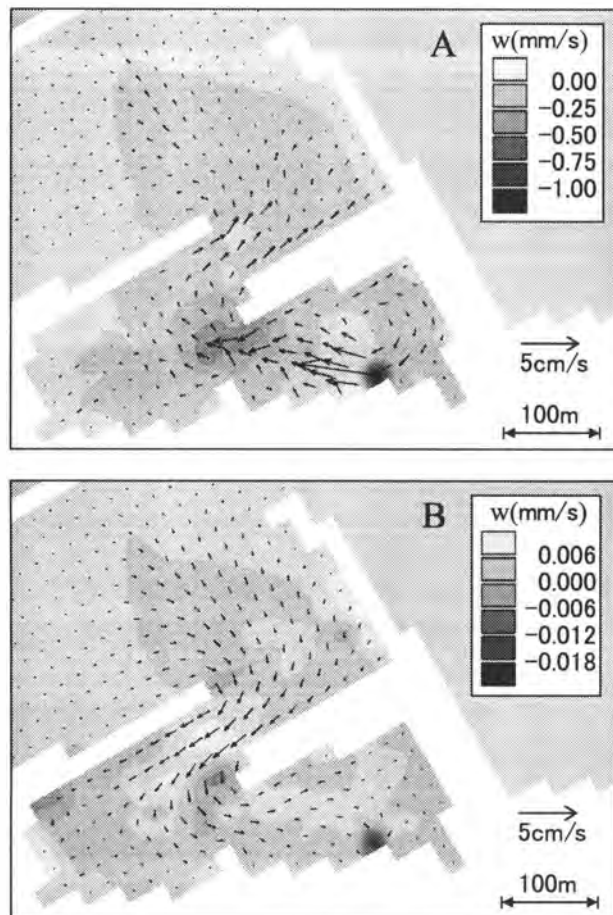


図6 密度噴流により形成される西側澗内の水平流速分布の一例
(A) 底層流速分布 (B) 表層流速分布

西側澗内の北東に位置する港区の海水交換の促進にも大きく寄与していることが示唆された。

波浪場における密度噴流の可視化状況

図8は、沖波周期0.3秒、沖波波高0.56 cmの規則波がNE方向より漁港模型に作用した状況下で、密度フルード数で38.2に相当する流量1.72 L/hの冷排水を放水した場合に、周辺海域に形成される密度噴流の発達状況を可視化したものである。これより、同一放水条件の図5Bと比較すると、波浪作用下における密度噴流の形成過程は、噴流領域の縮小や、成層領域における同心円状の広がり幅の短縮（楕円状の広がり）など波浪に伴う密度噴流領域の縮小が認められるものの、水平循環流や下層密度流の形成過程など、一連の諸過程を経過しながら港口より流出している状況が確認された。なお、本研究で発生させた沖波条件に対する西側澗内の波浪静穏

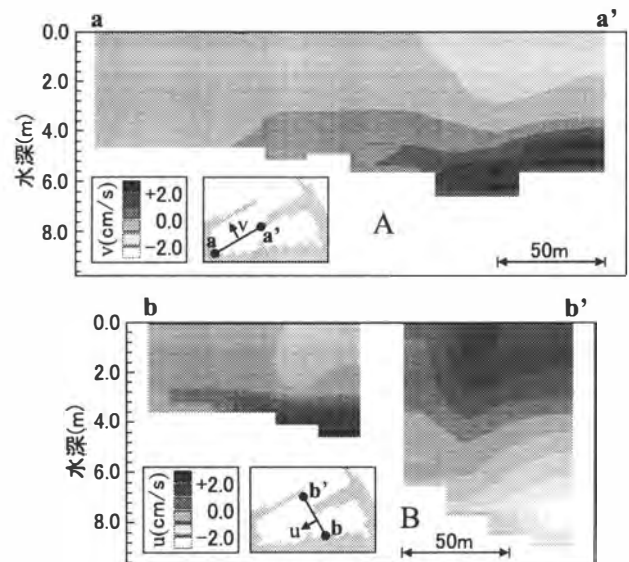


図7 密度噴流により形成される西側澗内周辺の断面流速分布の一例
(A) a-a'断面流速分布 (B) b-b'断面流速分布

度は0.2未満であった。

潮汐による海水交換速度

図9は、西側澗内に設定された区画I～IVの各領域および西側澗内全領域の、大潮時における海水交換速度を(4)式及び(5)式より算出し、作用させた潮汐の波数をパラメータとしてプロットしたものである。本論文では、予め西側澗内の水を染料で着色した上で、対象海域内外の海水交流によって染料が希釈される割合をもとに海水交換速度を算出しているが、実験開始時に着色領域と領域外との仕切を除去した際に生ずる攪乱で、着色水のごく一部が領域外へ流出し、海水交換速度が実際より大きめに算定される可能性が示唆される。本実験では、実験開始時の仕切板の除去に起因する影響を抑制するために、潮汐波の作用波数を増加させて平均処理を行った。図9より、潮汐波を3波以上作用させれば、各区画ともにほぼ一定の海水交換速度に収束しており攪乱の影響が排除できていることが確認された。収束値をもとに西側澗内における海水交換速度は、最奥部の区画Iおよび区画IIで顕著に低く（平均で 0.0054 T^{-1} ）、西側澗内全領域においても、大潮時の1潮汐で交換される海水量が当該海域における貯水量の4.5%程度と極めて閉鎖性の高い海域である

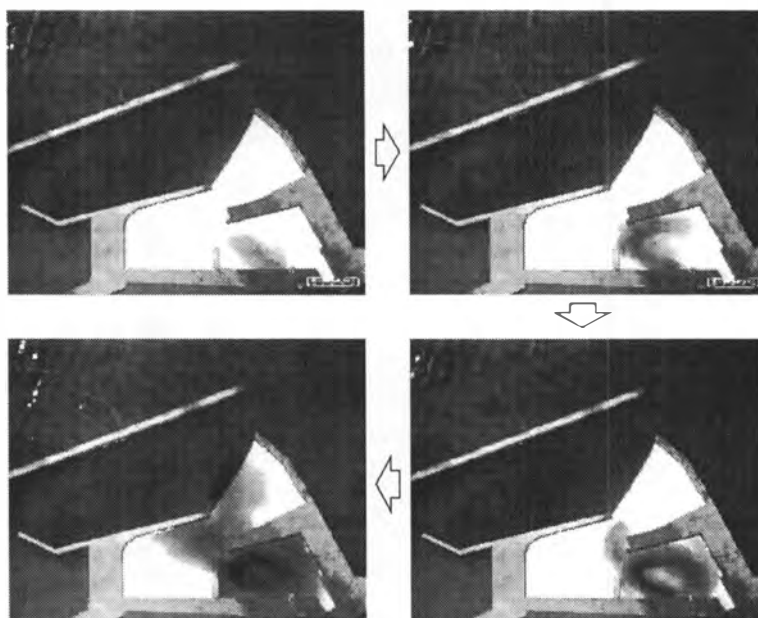


図8 波浪場における密度噴流形成状況の可視化写真の一例

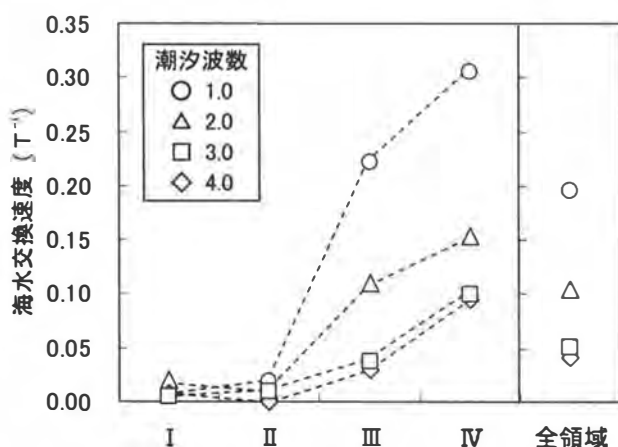


図9 潮汐（大潮時）による海水交換速度の波数による変化

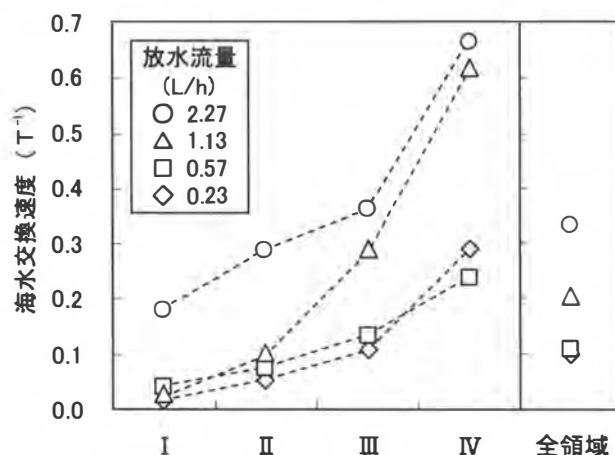


図10 密度噴流による海水交換速度の放水流量による変化

ことがわかった。なお、(1)式より、大潮時の1潮汐で交換される海水量は、西側澗内の内外を交流した海水量の約23%に相当していた。

静水場における海水交換速度

図10は、西側澗内における区画Ⅱの放水口より港口中央に向けて放水された冷排水による区画Ⅰ～Ⅳの各領域および全領域の海水交換速度を、放水流量をパラメータとしてプロットしたものである。これより、港口に近い区画ほど海水交換速度が増加する傾向は何れの放水流量においても共通に認められた。さらに、放水流量が0.57 L/h以下の2ケース

は、各区画ともほぼ同様の変動傾向を呈し、海域全体の海水交換速度も0.1 T^{-1} 程度に留っていた。一方、放水流量が2.27 L/hのケースにおいては、海域全体の海水交換速度が0.34と放水流量が0.57 L/h以下のケースと比較して3倍以上増加していた。また、放水流量1.13 L/hのケースにおいては、湾奥の港区Ⅰ、Ⅱは放水流量0.57 L/h以下のケースに、湾口に近い港区Ⅲ、Ⅳでは放水流量2.27 L/hのケースに漸近しており、前者より後者への移行過程に対応していることが伺えた。このような放水流量による海水交換速度の遷移は、図5で示唆された放水口より港口に達した密度噴流の分岐過程

に依存して発生し、区画Ⅱに放水口を設置した場合には、放水流量 1.13 L/h（密度フルード数 38.15）程度が、密度噴流として港口より直接流出する流れパターンと西側澗内に滞留後に下層密度流として港口より流出する流れパターンの遷移流量に対応していることがわかった。

波浪場における海水交換速度

図 11 は、波浪状況下（沖波周期 T_w 、沖波波高 H_w ）の西側澗内において、区画Ⅱの放水口より放水流量 1.13 L/h で冷排水を放出した場合の、区画Ⅰ～Ⅳの各領域および全領域における海水交換速度をプロットしたものである。これより、沖波周期および沖波波高の増加とともに各区画とも海水交換速度に減少傾向が認められ、今回の実験ケースにおいては静水時の最大 60% 程度まで低下しているが、大潮時の潮汐による海水交換速度と比較すれば、依然として 2 倍以上の海水交換促進効果を維持していた。

海水交換促進効果

図 12 は、本研究で実施した全ケースにおける海水交換促進効果を、密度フルード数をパラメータとして、放水口を設置した区画ごとにプロットしたものである。

これより、冷排水の放水に伴う海水交換促進効果は、本研究で実施した何れの放水条件においても、

大潮時の海水交換速度を 2 ～ 12 倍上回る促進効果が期待できることが明らかとなった。また、海水交換促進効果は密度フルード数の増加とともに増大する傾向を呈し、特に、密度フルード数が 19.1 以下（海水交換速度と海水交換促進効果の平均値はそれぞれ $0.13 T^{-1}$ 、および 2.78）と 38.2 以上（海水交換速度と海水交換促進効果の平均値はそれぞれ $0.32 T^{-1}$ 、および 7.15）で港口による分岐過程に依存して大きく変化している状況が認められた。なお、区画Ⅲに放水口を設置した場合の海水交換促進効果については、密度フルード数が 13.5 のケースにおいても比較的大きな値をとり、区画Ⅰや区画Ⅱに放水口を設置した場合と比較しても西側澗内全体としての海水交換促進効果は同等のレベルで推移している。しかしながら、対象海域内の各区画毎の海水交換速度にばらつきが認められるとともに、西側澗内の最奥部における海水交換には寄与しづらいため、港口付近に放水口を設置する場合には更に慎重に検討する必要性が認められた。本研究で対象とした羅臼漁港のような比較的大規模な漁港においても、海洋深層水の放水による海水交換促進工法の妥当性や利用可能性が認められたことから、さらに小規模の一般漁港においては、より小規模な放水によっても海水交換促進効果が発現できるものと考えられた。

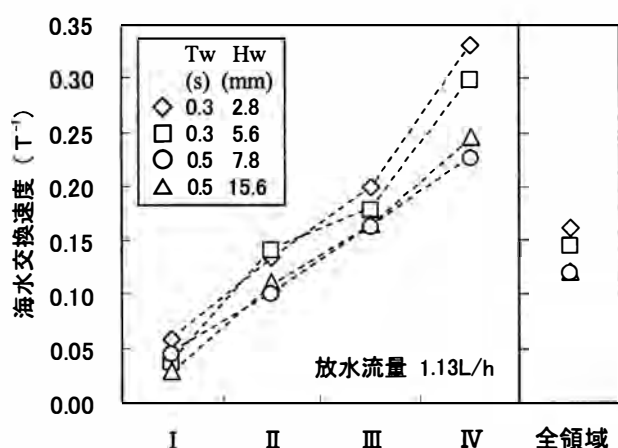


図 11 密度噴流による海水交換速度の沖波条件による変化

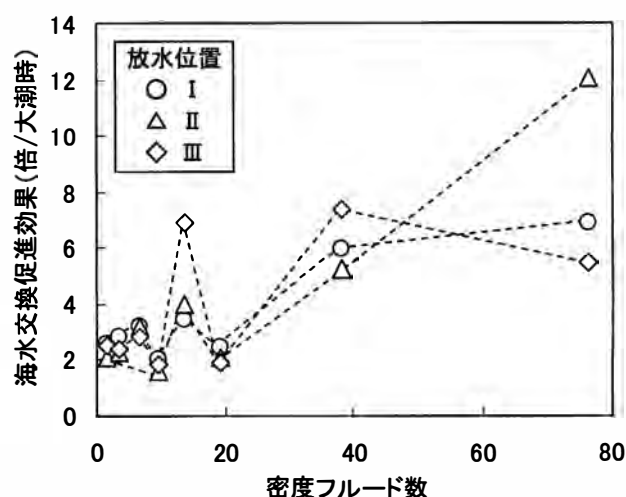


図 12 海水交換促進効果の密度フルード数による変化

謝 辞

本研究の一部は(財)漁港漁場漁村技術研究所の研究助成によって実施された。また、数値実験に使用した数値モデルは DHI 社より提供されたものであることを記して謝意を表します。

文 献

瀬戸雅文・竹内登世子・風間隆宏・大竹臣哉（2006）冷排水の放水による漁港内海水交換促進工法に関する基礎的研究。海洋開発論文集，22，367-372。
水島雅文・片野尚明・仲敷憲和（1988）鉛直重力噴流拡散予測モデルの開発。電力中央研究所報告，U88051，1-77。

Tatsumi, T. and T. Kakutani (1958) The stability of a two-dimensional laminar jet. J. Fluid Mech., 7, 433-441.

Villu, A. (1962) An experimental determination of the minimum Reynolds number for instability in a free jet. Transaction of the ASME. J. Appl. Mech., 29, 506-508.

板東晃功・桜澤俊滋・梅木雅之・大内一之・池上康之（2005）温度成層条件における海洋肥沃化装置「拓海」の放流水貫入深度。日本船舶海洋工学会論文集，1，9-15。

北海道開発局（2003）平成 14 年度羅臼漁港環境調査業務報告書，p. 75。

北海道（2000）北海道港別沖波波浪推算諸元 p. 226。

（2008. 7.31 受付，2008.10. 9 受理）