

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

NEW HASTENING METHOD OF WATER EXCHANGE BETWEEN FISHING
PORT AND OCEAN BY USING COLD WATER DISCHARGE

瀬戸雅文¹・竹内登世子²・風間隆宏³・大竹臣哉⁴

Masabumi SETO, Toyoko TAKEUCHI, Takahiro KAZAMA and Shinya OTAKE

¹正会員 水博 福井県立大学 生物資源学部海洋生物資源学科 (〒917-0003 福井県小浜市学園町1-1)

²福井県立大学 生物資源学部海洋生物資源学科 (〒917-0081 福井県小浜市川崎3-16)

³正会員 理修 株式会社アルファ水工コンサルタンツ東京支店 (〒108-0073 東京都港区三田4-15-35)

⁴正会員 農博 福井県立大学生物資源学部海洋生物資源学科 (〒917-0003 福井県小浜市学園町1-1)

The fishing ports which equipped the pumping system of deep-sea water for the purpose of sanitation control and fish farming of cold water have increased. It considered using a large-scale entrainment process of a buoyant jet for a water quality improvement of the fishing port. We suggested a new hastening method of seawater exchange by discharging the cold water from the bottom layer of the fishing port to the harbor entrance. The jet area formed by the cold-water discharge to the open area turned into stratified region when the distance from the outfall, which is standard by momentum flux and buoyancy flux, got 20~30 times longer, and most of the part of the stratified region vanished when it got 200~400 times longer. Large-scale entrainment process of a buoyant jet was presumed to be what generates $10^1\sim 10^2$ times as much large-scale sea water exchange compared with outflow discharge.

Key Words : seawater exchange, cold discharge, buoyant jet, fishing port

1. はじめに

近年、漁業就業者数や経営体数の減少を背景とした漁船隻数の漸減や高齢化の進行が避けられない状況下で、水産物の流通拠点として海と陸との接点である漁港の果たすべき役割も、漁獲物の蓄養・養殖、地域固有種の栽培・中間育成や陸揚げ後の品質・衛生管理など地域ブランド形成のための拠点、更には、自然と調和し、漁場と一体化した環境創造の拠点としての位置づけなど新たな役割が求められている。これら一連の役割を具現化するための共通課題の一つとして、漁港内における水質・底質の積極的な保全が上げられる。そのため、潮汐エネルギーを利用した潮通し工や波浪エネルギーを利用した海水導入工などが開発・整備されているが、潮通し工においては、潮位差の小さい海域への適応限界性、海水導入工においても、波浪エネルギーが海象条件の変化に呼応して大きく変動することに依存する海水交換量の不安定性など自然エネルギー特有の問題点を包含している。

本研究は、漁港内で魚介類の飼育を実現するために必要不可欠な漁港内外の海水交換を、自然エネルギーの消長に直接依存することなく安定的に確保可能な工法の一つとして、漁港外より揚水された海洋深層水や沿岸底層水などの、漁港内の海水よりも水温の低い清浄海水を、一次使用後に漁港底層部より港口方向に放水し、漁港内の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流れ場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する。

2. 漁港内海水交換促進工法の理論

(1) 本工法の概要

漁港内の底面近傍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流速が急減すると、流れは、次第に密度流的な円状の拡がりに変化するとともに、周辺海水の連行

量も急速に減少し、二成層流的な流れへと遷移してゆく。これら一連の過程における連行領域の到達距離（図-1における海水交換促進領域）が、放水地点より港口までに至る距離よりも長い場合には、密度噴流は漁港内の底面付近の海水を内部に取り込みながら漁港外へ流出し、流出量に相当する外海水が漁港外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ことになる。

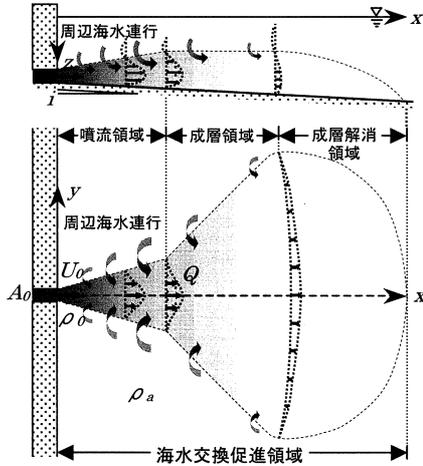


図-1 冷排水放水による密度噴流の連行過程

(2) 冷排水の放水理論

冷排水の放水現象は、噴流域と周囲海水との密度差が微小であると仮定できるため、密度噴流の理論より相似性を検討することが可能である^{1),2)}。密度噴流の基礎式は流下方向にx軸、横方向にy軸、鉛直下向きにz軸をとると、x軸方向に対して、

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \hat{P}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_t}{\partial y} \quad (1)$$

ここに、 u, v はそれぞれx, y方向の平均流速、 ρ および \hat{P} は平均密度、および圧力の変動成分、 τ_t はレイノルズ応力である。静止流体中に放出される密度噴流のx軸方向には、外力が作用しないため、運動量流束が保存される。冷排水の放水水深を h として、密度噴流を水深(z軸)方向および噴流幅(y軸)方向に積分後、 τ_t は軸中心および噴流外縁で共にゼロとなるため運動量流束(M_0)の保存則は

$$M_0 = \int \int \left\{ u^2 + \frac{P - P_\infty}{\rho} \right\} dy dz \quad (2)$$

ここに、 P_∞ は噴流幅方向の無限遠における圧力である。 M_0 は放水口における値で定量化することが可能であり放水後も密度噴流内で保存される。

$$M_0 = U_0^2 A_0 + g' A_0 d_0 \quad (3)$$

ここに、 U_0 は放水流速、 ρ_0 :放水密度、 ρ_a :周囲水密度、 g' は有効重力($=(\rho_0 - \rho_a)g / \rho_a$)、 g :重

力加速度)、 A_0 は放水口の断面積、 d_0 は放水口の高さ(円管の場合には直径)である。密度噴流内では、運動量流束に加えて、断面流量(Q_0)に有効重力を乗じた浮力流束(N_0)も保存されるが、 M_0 と同様に放水口における水理量をもとに次式で表現できる。

$$N_0 = g' Q_0 = g' U_0 A_0 \quad (4)$$

従って、密度噴流に関わる多くの水理量の諸元は、 M_0 と N_0 に支配されることが推定されるが、各水理基本量と M_0 および N_0 の次元量を解析することによって、長さのスケール(L_s)、速度のスケール(U_s)、流量のスケール(Q_s)、浮力のスケール(G_s)は以下のように表現できる。

$$\left. \begin{aligned} L_s &= N_0^{-1/2} M_0^{3/4}, & U_s &= N_0^{1/2} M_0^{-1/4} \\ Q_s &= N_0^{-1/2} M_0^{5/4}, & G_s &= N_0^{3/2} M_0^{-5/4} \end{aligned} \right\} (5)$$

また、(1)式を、 $\hat{P} = P - P_\infty = g'z / \rho$ であることを考慮しながら無次元化すると、右辺第1項より密度フルード数(或いは内部リチャードソン数)、第2項よりレイノルズ数が導出されるが、(2)式と同様に、レイノルズ数の影響は相殺されるため、本稿における冷排水の放水に伴う密度噴流現象は密度フルード数の相似性をもとに、各基準スケールで整理できるものと考えられる。

3. 冷排水の挙動と海水交換能力

(1) 数値モデル

放水に伴う周辺海水の連行特性や、海水交換促進領域を解明するために、水深5mの護岸底部より法線方向(開放領域)に冷排水を放水した場合の、周辺海水の連行量や、噴流領域、成層領域、成層解消領域の形成条件をフル3次元流動モデル(DHI社製MIKE3)を用いて数値解析的に検討した。計算では、放水海域の周辺水温が10℃~20℃、塩分33.3の実海域を想定した上で、水温5℃、塩分33.5~34.0の冷排水が放水された場合の冷排水の挙動を対象とし、放水流量を2500~20000 m³/dayの範囲内で4段階、放水流速を0.25~2.0m/sの範囲内で4段階変化させるとともに5000 m³/day、放水流速0.5m/sについては海底勾配を0, 1/100, 1/50, 1/20の4段階に変化させた。

何れの計算パターンにおいても計算領域は放水口を中心に両側に各々400m、流軸方向に800mをとった上で、全領域を水平格子間隔20m×20m、鉛直層厚25cmに分割し、時間間隔20秒で48時間計算後、解析に供した。

(2) 噴流領域と成層領域

図-2~図-5は、開放領域に底層より放水された冷排

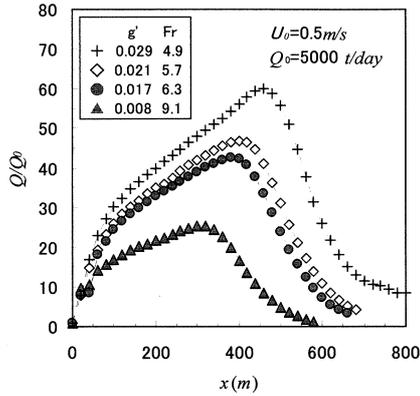


図-2 基準連行量の有効重力による変化

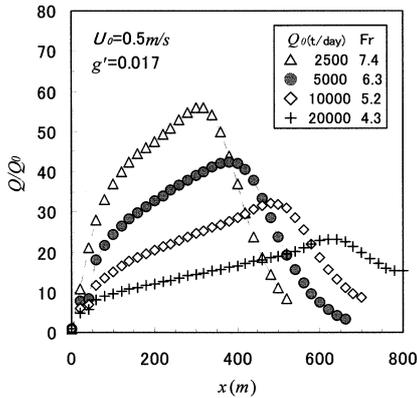


図-3 基準連行量の放水流量による変化

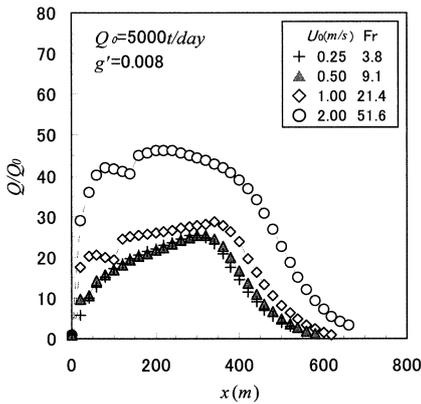


図-4 基準連行量の放水流速による変化

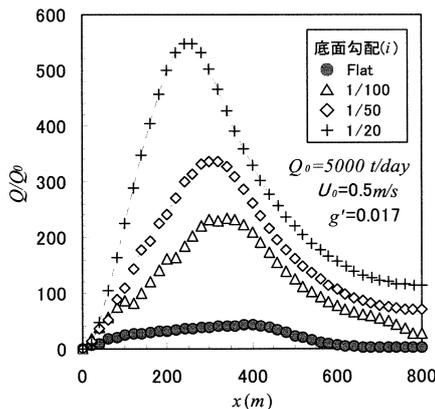


図-5 基準連行量の底面勾配による変化

水の周辺海水の連行量を放水量で基準化して示したもので、図-2は放水流量5000 m³/day、放水流速0.5m/sの一定条件下で水質条件（有効重力 g' ）が変化した場合、図-3は放水流速0.5m/s、有効重力0.017m/s²の一定条件下で放水流量が変化した場合、図-4は放水流量5000m³/day、有効重力0.008m/s²の一定条件下で放水流速が変化した場合、更に、図-5は放水流量5000 m³/day、放水流速0.5m/s、有効重力0.017m/s²の一定条件下で底面勾配が変化した場合について、各流下距離の増加に伴う連行特性を図示したものである。これより、海底勾配のない平面上に放水された冷排水の連行過程は、何れのケースにおいても、放水直後に連行流量を急激に増加させた後に、連行速度を減少させ、比較的長い区間に亘って各ケースごとに一定の連行速度を維持した後に急激に減少し、やがて連行が解消していることがわかる。これらの領域は図-1における、噴流領域、成層領域、成層解消領域に対応するものと考えられるが、各領域の形成状況は放水条件や水質条件によって大きく異なっている。

図-2より、冷排水と周辺海水間における有効重力の増加により、噴流領域、及び成層領域の何れにおいても連行速度の増加が認められるとともに、成層解消領域の形成開始距離も増大しており、有効重力の増加が連行に伴う混合のスケールを拡大するとともに、密度効果の到達範囲も広域化しているためと考えられる。

図-3より、放水量で基準化された連行流量は放水流量の増加に伴い連行速度を低下させる一方で、成層解消領域の形成開始距離は増加させることがわかる。実際の連行量は図中の倍率に連行流量を乗ずるため、放水流量が増加するほど増加するが、例えば、放水流量5000 m³/dayと20000 m³/dayを比較すれば、両者の最大連行量は、各20万m³/dayと40万m³/dayとなり放水流量を4倍にしても連行流量は2倍程度と流量増加率は放水流量に反比例して縮小される。

図-4より、放水流量や水質が同一条件下で放水流速を増加させると、噴流領域における連行速度が大幅に増大し、噴流領域に続く成層領域での連行速度は減少するものの、噴流領域における連行量が利いて一連の連行過程における最大連行量は増加することがわかる。しかしながら、噴流領域における急速な連行減少の影響が次に続く成層領域の不安定性を顕在化させるため、周辺海域の静穏性によっては、成層領域を十分に形成できないまま成層解消領域に達し、急激に連行量が減少し、海水交換促進領域も大幅に縮小することも懸念される。一方、流速0.5m/sと0.25m/sにおける連行過程はほぼ一致し、流速0.5m/s未満であれば安定的に海水交換促進領域

が形成されるものと推察された。

図-5より、底面勾配の増加により冷排水は水平方向のみならず水深方向にも噴流領域や成層領域を拡大できるため、平坦面への放水と比較して最大連行量は大幅（オーダー的）に増大し、海水交換促進領域も延長されることがわかる。更に、成層解消領域の形成開始距離は底面勾配の増加とともに若干縮小されるが勾配による大きな差は認められない。急勾配においては、噴流領域に続く成層領域の下面と斜面の間に大規模な内部渦が形成される。内部渦の形成に伴う成層下面よりの連行流入の影響で成層領域内の流速分布は極めて不安定な状況が形成され、周辺海域の静穏性によっては、海水交換促進領域が大幅に低下する場合も想定される。なお、本稿における放水理論では底面勾配の影響を加味していないため、以降の検討では平坦面について考察した。

(3) 連行特性の推定

密度噴流に関わる相似則(5)式をもとに、流下距離を長さのスケール L_s 、連行流量を流量のスケール Q_s 、放流軸上の最大流速を流速のスケール U_s でそれぞれ基準化した上で、密度フルード数で整理した。

図-6は、有効重力、放水流量、及び放水流速が変化した場合の軸上最大流速の流下に伴う変化を各緒元で無次元表示したものである。これより、放水条件の差に関わらず流速のスケール U_s 及び長さのスケール L_s で無次元化された軸上最大流速は同一曲線上にプロットされ、 U_s および L_s によって統一的に整理できることがわかる。更に、 x/L_s が24付近を境に近似曲線の傾きが変化しており、この付近に噴流領域と成層領域の境界が存在し、変曲点に対応する無次元流速値は0.3程度となることが示された。また、噴流解消領域については x/L_s が100付近を境に軸上流速が急激に減衰を開始し、 x/L_s が200~400程度で最大流速が放水流速の 10^{-2} 以下となり密度噴流が解消しているものと考えられる。なお、 x/L_s が100程度以上における軸上流速の急速な低下領域において、各放水緒元によって減衰過程が異なるのは、計算領域が流下方向に800mで設定されていることに起因していることも考えられるが、成層領域に続く最大流速が短期間一定になる領域の開始をもって成層解消海域と定義すれば、 x/L_s が100程度を成層解消領域の発現距離と考えることも可能である。

図-7は、冷排水の放水に伴う連行流量 Q の流下に伴う変化を各緒元で無次元表示したものである。これより、連行流量においても、放水条件の差に関わらず流量のスケール Q_s 及び長さのスケール L_s で無次元化された連行流量は同一曲線上にプロットされ、 Q_s および L_s によって統一的に整理できることがわ

かる。更に、最大流速の形成過程と同様に x/L_s が24付近（無次元流量で0.85付近）を境に連行特性が変化しており噴流領域と成層領域の差違が明確に区別できる。また、何れの条件においても x/L_s が100付近でピークを示した後、図中の下限以下の値まで急速に低下しており、 x/L_s が100付近以降で成層解消領域となることが推察された。

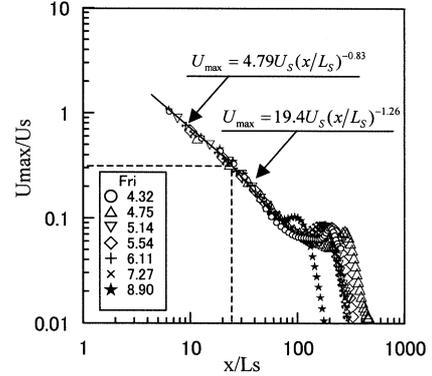


図-6 軸上最大流速の流下特性

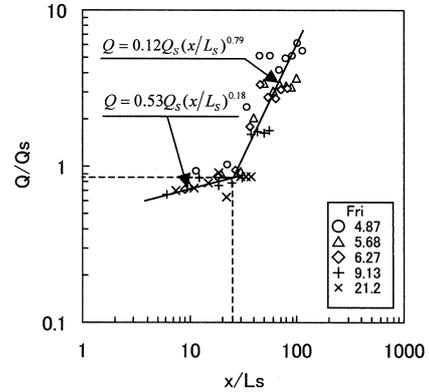


図-7 連行流量の流下特性

以上のように、冷排水の放水に伴う密度噴流の最大流速、及び連行流量は(5)式で導いた長さのスケール L_s 、流速のスケール U_s 、流量のスケール Q_s を用いて統一的に評価され、以下の式で近似的に推定できることがわかった。

噴流領域 ($x/L_s < 24$)

$$U_{\max} = 4.79 \left(\frac{x}{L_s} \right)^{-0.83} U_s, \quad Q = 0.53 \left(\frac{x}{L_s} \right)^{0.18} Q_s \quad (6)$$

成層領域 ($24 \leq x/L_s < 100$)

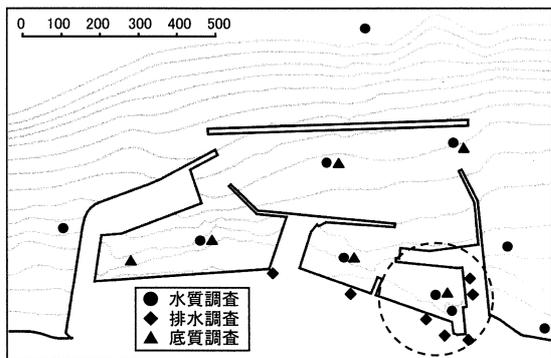
$$U_{\max} = 19.4 \left(\frac{x}{L_s} \right)^{-1.27} U_s, \quad Q = 0.12 \left(\frac{x}{L_s} \right)^{0.79} Q_s \quad (7)$$

4. 羅臼漁港への適用

(1) 漁港環境の概要

北海道の知床半島東側（根室海峡）に位置する羅臼漁港は、平成13年に「環境・衛生管理型漁港づくり」のモデル漁港に指定されるとともに、平成14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の整備が進められている。低温清浄海水導入施設は、平成16年度に取水管の敷設が終了し、平成17年度に陸上施設の整備を完了後、平成18年度より本格取水が開始され、日量4560m³の海洋深層水が水深356.3mより汲み上げられ、取水量の96%が洗浄水や蓄養など水産利用される予定である。羅臼漁港では、2002年10月より2003年3月にかけて港内の20地点において水質調査（排水調査込）、6地点において底質調査、23地点においてヘドロ調査が実施されている（図-8参照）。



(平成14年度羅臼漁港環境調査業務報告書より)

図-8 羅臼漁港調査地点

本調査結果によれば、本港における水質環境はサケ・マス定置網、及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、特に港奥西側港区（図中点線で囲った海域）については、COD_{Mn}がB類型（表層の一部はC類型）、DO濃度がB類型、全窒素がⅢ類型（最奥部はⅣ類型）、全リンがⅣ類型に分類され、水質・底質両面において改善の余地が認められる。一方、その他の港区については調査期間を通して、COD_{Mn}及びDO濃度が共にA類型、全窒素がⅡ～Ⅲ類型、全リンがⅡ～Ⅲ類型に分類され、最奥部と比較して環境負荷の少ない水質性状を維持している。

(2) 水理模型実験および数値実験の概要

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港奥西側港区をケーススタディとして、同港区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。水理模型実験には、福井県立大学所有の平面水槽（縦15m×横8m×水深1m）を使用した。水槽内に図-9に示すように、水平縮尺、および鉛直縮尺が共に1/250の羅臼漁港、および水深32mの等深線までを再現した周辺地形模型を、入射波向がNEに設定されるようにモルタルで試作した。実験では、冷排水の放水管は、現地縮尺で内径25cmと

50cmの2種類を想定し、模型縮尺に基づいて各、1mm及び2mmのステンレスパイプを対象港区に設置した。放水口の配置個所は、図-9に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）を想定し、放水位置が海水交換促進効果（取水相当量を0.5m/sで港内に放水した場合に、200～400 x/L_sに相当する海水交換促進領域は、341～681mと推定され港奥西側港区長に相当する）に及ぼす影響を検討した。なお、放水方向は何れも対象港区港口中央部に設定した。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4ppm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5mmの亚克力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（現地換算で1潮汐（周期T）に相当する模型縮尺時間）放水後、対象港区内の貯水量がほぼ4分割されるように、港口、及び港区内を亚克力板で仕切り、仕切内の水を十分攪拌後、仕切りごとに濁度を計測し冷排水の放水に伴う海水交換速度⁴⁾を算定した。

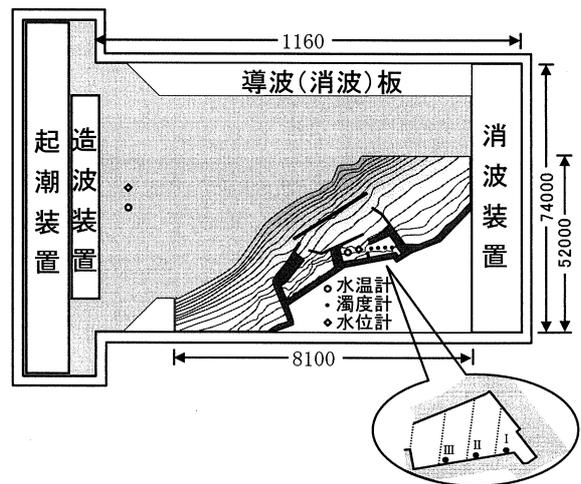


図-9 水理模型実験概要図

水理模型実験では詳細に検討することが困難な流速分布や水温分布を補足するためにフル3次元流動モデルを使用して数値実験を実施した。水平格子間隔20m×20m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0.25m間隔で最大124層に分割した。計算では、漁港内の水質環境、及び羅臼沖の海洋深層水に関わ

る既往調査知見をもとに、港内の水質環境の低下が懸念される10月の平均的な水質条件を設定後、水理模型実験と同様に港奥部の閉鎖性港区内の護岸底層部（水理模型実験と同様に3地点）より港区の港口中央部に向けて冷排水を放水した場合の流況を時間間隔20秒で計算した。

(3) 海水交換促進効果

図-10は対象港区のIの位置より水温12℃の周辺海域へ向けて、水温5℃の冷排水を流速1.2m/sで日量5000m³放水した場合の、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（左図が底層、右図が表層）を示したものである。これより、対象港区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、対象港区の南東側より冷排水が流出し、流出時の最大速度は対象港区の港口部底層付近で約3.0cm/s程度と、密度流としては比較的速い流速で、対象港区外へ流出している。一方、表層部では対象港区外より外海水が港口の南西方向より区内へ流入し、表層流の影響は、対象港区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。

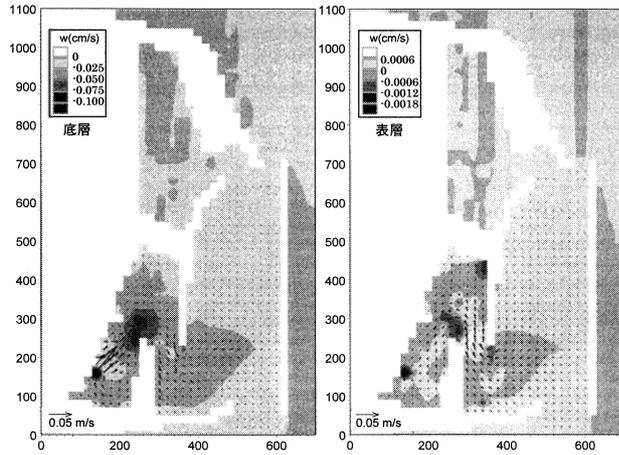


図-10 表層および底層の流速分布

図-11は、水理模型実験より算出された、冷排水の放水に伴う対象海域の海水交換速度を大潮時における値と比較したもので、放水口の位置（I～III）をパラメータとして実験ケース（密度フルード数）ごとに整理して示してある。

これより、冷排水の放水に伴う海水交換促進効果は、今回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（0.054T⁻¹）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、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未満（平均

海水交換速度0.13T⁻¹）と38.2以上（平均海水交換速度0.32T⁻¹）で有意に変化することが確認された。

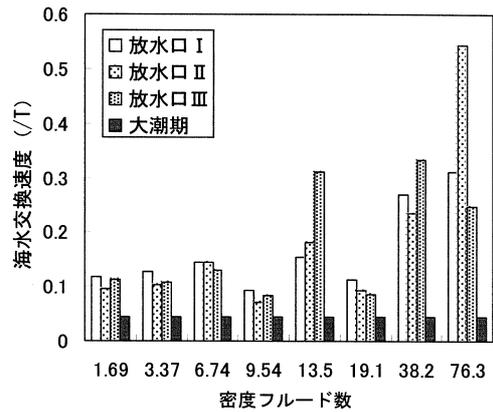


図-11 海水交換速度と促進効果

放水口IIIにおいては密度フルード数が13.5においても比較的大きな促進効果が生じているが、これは放水口IIIが最も対象海域の港口に近いこと、冷排水が直接港口付近より流出し、区内水の連行過程や港区外水の表層水よりの流入過程が他の放水口の場合と若干異なることに起因しているものと考えられる。羅臼漁港における海水交換促進効果が、開放領域に放水した場合と比較して、小さい値で推移したのは、漁港の規模や外郭施設の配置形状が放水後の冷排水の挙動に影響を及ぼした（港内に環流を形成した）ためと考えられるが、本港のように比較的大規模な漁港においても、本工法の利用可能性が認められたことから、更に小規模の一般漁港においては、更に少ない放水量によっても港内海水の外海水との交換促進効果が得られるものと考えられる。今後、波浪や航跡波などの港内静穏度が本工法に及ぼす影響や港内の底層付近に形成される冷水層が底質環境に及ぼす効果、更には、底層の栄養塩類を溶存した密度噴流が周辺生態系に及ぼす効果について研究を進展させる必要がある。

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で実施された。更に解析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。

参考文献

- 1) 中辻啓二, 許再寧, 室田明: 三次元表層密度流の数値実験, 土木学会論文集, No. 434/II-16, pp. 19-28, 1991.
- 2) 水鳥雅文, 首藤啓: 冷排水の拡散特性に関する研究, 海岸工学論文集, 42, pp. 1052-1055, 1995.
- 3) 北海道開発局: 平成14年度羅臼漁港環境調査業務報告書, 75p, 2003.
- 4) 中村充, 改訂水産土木学, 工業時事通信社 1991.