

マガレイ卵・仔魚の沿岸海域への滞留に対する風および鉛直移動の影響

末永慶寛*・藤原正幸**・中田英昭***

1. はじめに

日本海の佐渡海峡沿岸の陸棚海域は、マガレイ (*Pleuronectes herzensteini*) の主産卵場の一つとなっている。この海域は、人工魚礁設置をはじめとして、有用水産資源の一つであるマガレイの資源保護・育成のための様々な方策の検討がなされている。その基礎として、マガレイの生態的特性と現地の物理環境との関係を把握することは極めて重要な課題である。本研究はその一環として、マガレイ卵・仔魚の産卵場から成育場への輸送過程について考察したものである。

佐渡海峡周辺海域には、北ないし北東向きの沿岸流が卓越しており、浮遊期のマガレイ卵・仔魚はこの流れによって新潟沖の産卵場から北方に輸送されるといわれている (金丸ら, 1993)。マガレイの成育場 (着底場) は、この陸棚上の水深 100 m 以浅の海域と推定されており、陸棚から沖合に運ばれることなく着底前にこの成育場に到達することが、資源加入のための必要条件の一つとなっている。

一方、佐渡海峡周辺海域の数値モデルを用いたマガレイ卵・仔魚の輸送過程に関するこれまでの検討結果 (Nakata ら, 1995; 末永ら, 1996; 藤原ら, 1997) から、上述の沿岸流に加えて産卵時期 (盛期は 3 月) の風および卵・仔魚の鉛直移動が、それらの輸送や浅海域への滞留状況に大きな影響を与えている可能性が示されている。しかしこれらの研究においても、現地観測結果から推定された産卵場から着底場までの輸送状況はまだ十分には再現されていない。

そこで、本研究では、マガレイ卵・仔魚を能動的に移動する粒子と想定したオイラー・ラグランジュ型粒子追跡モデルにより、産卵場から着底場までの輸送の再現性を高め、風と卵・仔魚の鉛直移動の重要性をさらに定量的に明らかにすることを目的とした。

2. 対象海域の概要

佐渡海峡周辺海域の流況は、沖合を流れる対馬暖流の流路変動等の影響を受けて複雑に変動しているが、海峡内の陸棚に沿った場所では、北東流ないし北北東流が比較的安定して存在している。また、潮流成分は微弱でこれまでの観測でも有意な調和定数は得られていない。図-1 に 1996 年 3 月に ADCP により観測された流況の一例 (水深 18 m) を示す (山田ら, 未発表)。この図によると佐渡海峡では、佐渡島寄りの海域で流速が速く、本州寄りの海域で遅い。特に新潟市沖は地形的に後流域となり 100 m 以浅の海域では流れは微弱である。

次に卵・仔魚の分布であるが、マガレイの産卵 24 時間以内の発生初期卵は新潟市沖の水深 50 m 等深線を中心として帯状に分布しており、最も密度の高い部分は陸棚域の幅が沖に向かって広がる場所の南端部に位置している (図-2 参照)。仔魚については、着底前の屈曲期のものが産卵場の北側の陸棚浅海域に分布している (金丸ら, 1993)。

風については、産卵盛期である 3 月～4 月には北西～

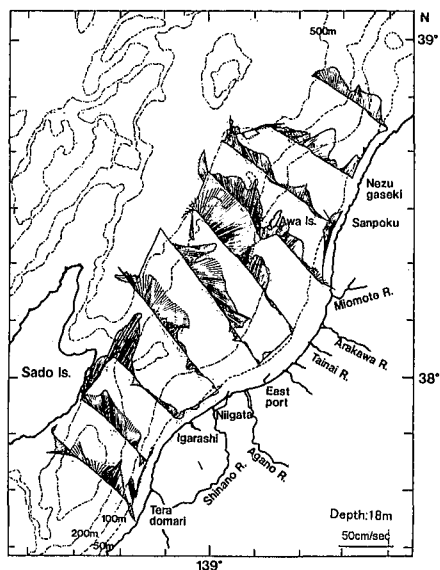


図-1 流況観測結果 (1996 年 3 月: 水深 18 m)

* 正会員 工博 香川大学助手 工学部安全システム建設工学科
** 正会員 農博 愛媛大学助手 農学部生物資源学科
*** 農博 東京大学助教授 海洋研究所資源環境部門

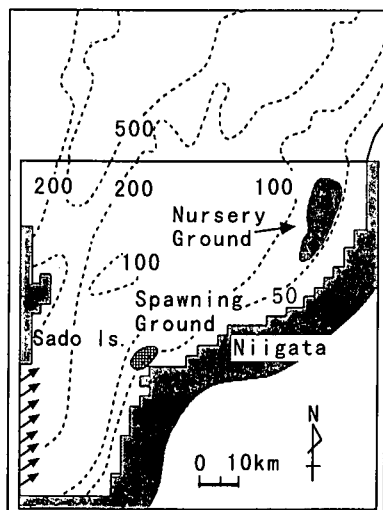


図-2 佐渡海峡の海底地形および計算領域

西南西の風が卓越し、平均風速は 4 m/s 程度である。

3. 数値モデル

本研究で用いた数値モデルは、流場を計算するための流体力学モデルとその流場において粒子を追跡する粒子輸送モデルから構成されている (藤原ら, 1997)。

(1) 流体の基礎方程式

流場の計算には静水圧近似を仮定したマルチレベルモデルを採用した。本モデルで用いる運動方程式、連続式、自由表面の式、水温・塩素の拡散方程式は以下の通りである。ただし状態方程式は Knudsen の式に依った。

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla_h \cdot (\mathbf{u}\mathbf{u}) + \frac{\partial(\mathbf{u}w)}{\partial z} + f\mathbf{k} \times \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nabla_h \cdot (\nu_h \nabla_h \mathbf{u}) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_v \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial z} \right) \quad \dots (1)$$

$$\nabla_h \cdot \mathbf{u} + \frac{\partial(\partial w)}{\partial z} = 0 \quad \dots (2)$$

$$p = \int_z^{\eta} \rho g dz \quad \dots (3)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla_h \cdot \int_{-H}^{\eta} \mathbf{u} dz = 0 \quad \dots (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \nabla_h \cdot (\mathbf{u}T) + \frac{\partial(wT)}{\partial z} = \nabla_h \cdot (K_{Th} \nabla_h T) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{Tv} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad \dots (5)$$

$$\frac{\partial Cl}{\partial t} + \nabla_h \cdot (\mathbf{u}Cl) + \frac{\partial(wCl)}{\partial z} = \nabla_h \cdot (K_{Ch} \nabla_h Cl) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{Cv} \frac{\partial Cl}{\partial z} \right) \quad \dots (6)$$

$$\rho = \rho(T, Cl) \quad \dots (7)$$

ここで $\mathbf{u}$ は水平二次元ベクトル, w は鉛直流速, T は水温, Cl は塩素イオン濃度, ρ は海水の密度, g は重力加速度, η は平均水面を基準とした自由水面位置 (鉛直上方を正), H は水深, ∇_h は水平微分演算子, $\nu_h \cdot \nu_v$ はそれぞれ水平・鉛直渦動粘性係数, $K_{Th} \cdot K_{Tv}$ はそれぞれ水温に関する水平・鉛直乱流拡散係数, $K_{Ch} \cdot K_{Cv}$ はそれぞれ塩素に関する水平・鉛直乱流拡散係数, k は鉛直単位ベクトル (上方を正) である。

これらの基礎方程式をスタッガードメッシュ系の有限差分法により近似した。非定常項には前進差分, 移流項には 2 次精度風上差分, 拡散項には中心差分を採用した。

(2) 粒子輸送の基礎方程式

$$\frac{d\mathbf{X}}{dt} = \mathbf{V} \quad \dots (8)$$

$$\mathbf{X}(0) = \mathbf{X}_0 \quad \dots (9)$$

$$\mathbf{X}^{(n+1)*} = \mathbf{X}^{(n)} + \mathbf{F}^{(n)} \mathbf{X} \Delta t \quad \dots (10)$$

$$\mathbf{X}^{(n+1)*} = \mathbf{X}^{(n)} + \frac{\mathbf{F}^{(n)} \mathbf{F}^{(n+1)*}}{2} \mathbf{X} \Delta t \quad \dots (11)$$

$$\mathbf{F}^{(n)} = \mathbf{V}^{(n)} + \{ (\mathbf{V}^{(n)} \cdot \nabla) \mathbf{V}^{(n)} \} \Delta t \quad \dots (12)$$

ここでは, $\mathbf{X}$ は 3 次元位置ベクトル, $\mathbf{V}$ は粒子位置での流速ベクトル, ∇ は微分演算子, Δt は時間ステップ, 上付き添字は時間レベルを表す。また上付き添字の * はその時間レベルでの仮の値を表す。つまり (8) (9) 式で表される常微分方程式の初期値問題を, 時間積分に 2 段階のルンゲ・クッタ型積分を採用して (10) - (12) 式で近似して解く。計算に必要な粒子位置での流速シアについては粒子を囲む流速成分から距離に反比例させた重みをつけて内挿した。

(3) 対象海域

図-2 に佐渡海峡周辺の海底地形図および計算対象領域を示した。200 m 以深の領域が佐渡島沿いに存在し, 新潟市沖には水深 100 m 以浅の陸棚が広がっている。この対象海域を水平方向に格子幅 2.5 km の正方メッシュに分割し, 鉛直方向には吹送流を適切に表現するため水深 50 m までは 10 m 間隔で, それ以深は海底までの計 6 層に分割して数値計算を行った。

(4) 境界条件

対象海域では, 過去の観測から潮流による振動成分は微弱であることが明らかとなっているため, 佐渡島南方に北東流 (図-2 の矢印) を定常流として与えることとした。流速は過去の ADCP データを参考に水深 50 m 以浅では 0.28 m/s, それ以深では半分の 0.14 m/s を与えた。水温および塩分に関しては, 産卵期である 3 月の観測結果に基づき, 表層から順に水温 (10.5°C, 10.4°C, 10.2°C, 10.1°C, 10.0°C, 9.0°C), 塩分 (33.4 psu, 33.4 psu, 33.5 psu, 33.5 psu, 33.6 psu, 33.7 psu) と設定した。その他の開境界は自由流出の条件を与えた。また陸地境界につ

いては、流動場の計算過程ではノースリップ条件とした。自由水面および海底面では以下の形式の境界条件を与えた。

$$\rho_a \nu \frac{\partial u}{\partial z} = \rho_a \gamma_s^2 W_w |W_w| \dots\dots\dots (13)$$

ここで ρ_a は空気の密度、 γ_s^2 は海面摩擦係数、 W_w は風速ベクトルである。

海底面

$$\nu \frac{\partial u}{\partial z} = \gamma_b^2 u |u| \dots\dots\dots (14)$$

ここで γ_b^2 は海底摩擦係数である。

また、各層間（第 k 層と第 $k+1$ 層）の内部摩擦係数として以下の形式を採用した。

$$\nu \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{k,k+1} = \gamma_i^2 (u_k - u_{k+1}) |u_k - u_{k+1}| \dots\dots\dots (15)$$

ここで γ_i^2 は内部摩擦係数である。

(5) パラメータ

計算に用いたパラメータを表一に示す。

(6) 数値実験ケース

産卵場に卵・仔魚を想定した 25 個の粒子を投入し、それらの浮遊期間に相当する 30 日間の輸送を計算した。鉛直移動のパターンとして以下の 4 種類を設定した（図-3 参照）。

Case-A：能動的な鉛直移動は行わず、流れに対して全く受動的である場合。

Case-B：卵がよく採集される水深である 30 m を維持する場合。

Case-C：仔魚がよく採集される水深である 10 m を維持する場合。

Case-D：産卵後はじめの 5 日間は卵のステージとし、水深 30 m にとどまり、その後仔魚のステージに入り 1 日に 5 m ずつ上昇し、水深 10 m で 12 日間とどまり、その後逆に 1 日に 5 m ずつ下降し、30 m まで到達して、その 6 日後に着底する場合。

最後の Case-D は、過去の観測結果から推定した鉛直移動パターンである。まず以上のすべてのケースについて産卵期の平均風（西風 4 m/s）の条件下で計算を行い、次に Case-A と Case-D の 2 ケースについて風速を変化させ、浅海域への滞留率の変化を調べた。滞留率については、藤原ら（1997）と同様に 25 個の粒子の内、30 日後に 100 m 以浅の浅海域に残留したものの割合と定義した。また、モデル北側領域から流失した粒子については、着底場に加しないものとした。これは、モデル北側海域は図-2 から判るように、100 m 以浅の領域が狭まっていること、そこに着底した仔魚は 3 月に新潟沖で産卵されたものとは異なる群であり（永澤・藤井，1996）、

表一 計算に用いたパラメータ

Parameter	Value
γ_s^2	0.0013
γ_i^2	0.0001
γ_b^2	0.0026
f	$8.98 \times 10^{-5}/s$
ν_h	$10 \text{ m}^2/s$
T_{rh}	$10 \text{ m}^2/s$
K_{rv}	$1 \text{ cm}^2/s$
K_{ch}	$10 \text{ cm}^2/s$
K_{cv}	$1 \text{ cm}^2/s$

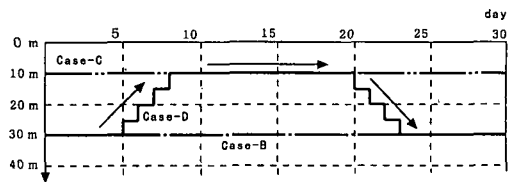


図-3 粒子の鉛直分布パターン

その後の生き残りも悪いこと（永澤，私信）が示唆されているからである。

4. 計算結果

図-4 に表層（水深 0-10 m）の流速ベクトル場を示す。産卵場付近の陸棚浅海域に沿った海域では北東流ないし北北東流となり、また 100 m 以浅ではそれ以深の海域と比べ極端に流速が遅くなっており、図-1 に例示した流況が概ね再現されている。佐渡海峡は佐渡島寄りの方が深い（図-2）、流入してきた海水は佐渡島寄りを 30~50 cm/s 程度の速い流速で流れる。一方、産卵場付近から東側は地形的に後流域になっており、流れは全体に微弱で多数の渦が集まった複雑な流況を呈している。

図-5~8 にそれぞれ Case-A~D において計算された産卵場からの輸送経路を示す。丸印は初期の位置とその後 5 日毎の位置を示している。Case-A では、10 日程度で計算領域から流失してしまう。鉛直的にはまず徐々に下降し、その後上昇しながら流出する。Case-B の場合は、2 週間程度で Case-A と同様にすべて流出してしまう。Case-C の場合はこれまでのケースとは異なり、1 個の粒子も流出せず、すべて産卵場の東側の海岸に集積する。以上のことから、産卵場付近では全体的に見て上層で岸向きの流れが、下層で沖向きの流れがあり、その結果粒子が上層に存在するか下層に存在するかで、その後の輸送経路が決定的に異なることが判る。観測結果から推定した鉛直移動を考慮した Case-D では、図-2 に示された着底場と全く一致するわけではないが、推定された着底場周辺に粒子が輸送されていることが判る。これは、最

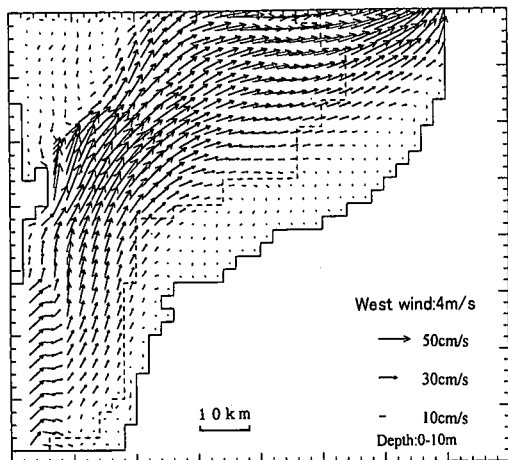


図-4 流況計算結果 (水深 0-10 m)

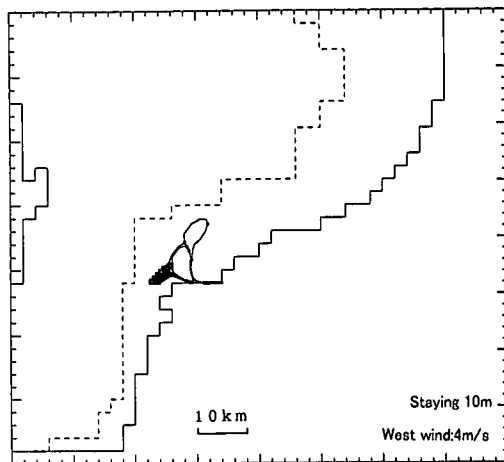


図-7 粒子追跡計算結果 (Case-C)

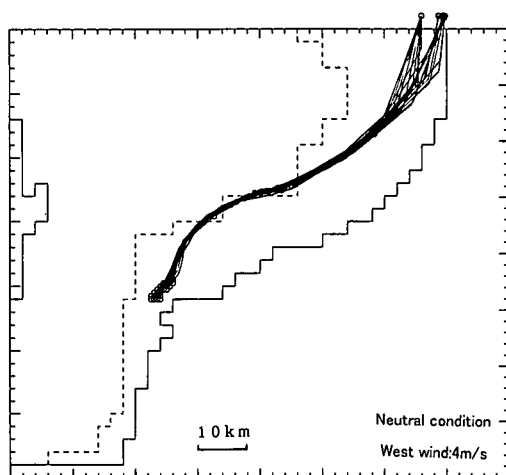


図-5 粒子追跡計算結果 (Case-A)

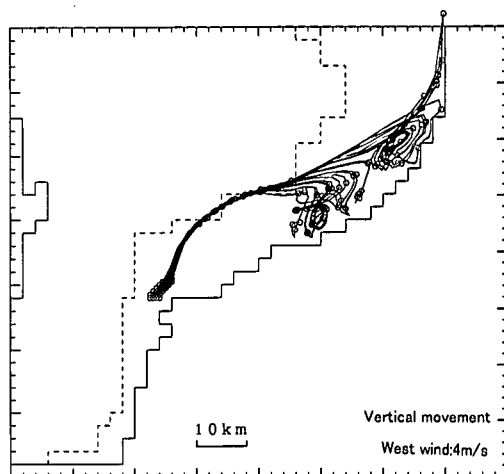


図-8 粒子追跡計算結果 (Case-D)

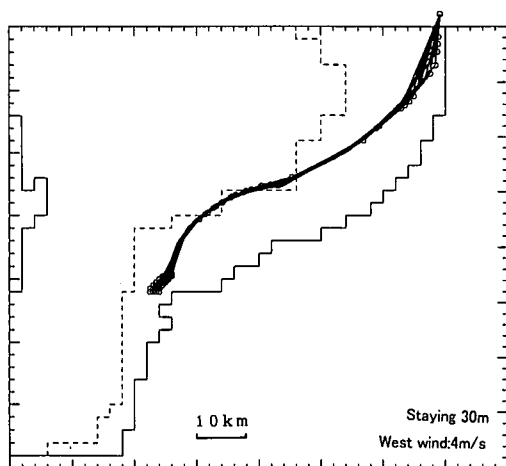


図-6 粒子追跡計算結果 (Case-B)

初の5日間下層に存在することにより沖に流されるが、その後徐々に10mまで上昇することにより、岸に戻ってくることが出来るためである。最終的な着底位置にはかなりのばらつきがあり、それぞれの粒子が産卵場では近接していたことを考慮すると、Case-Dにおける粒子の挙動はカオス的であるといえる。

次に Case-A と Case-D の場合について西風の風速と滞留率との関係を図-9 に示した。流れに対して全く受動的な Case-A では無風状態で滞留率 50%, 2 m/s 以上になると 0% となってしまう。それに対して能動的な鉛直移動を与えた Case-D では、風速 2 m/s までは 100%, 5 m/s ではおよそ 50%, それ以上では急激に低下し、7 m/s 以上では 0% となった。これは西風がある程度以上に強くなると、鉛直移動を考慮しても浅海域への滞留が難しくなることを示している。

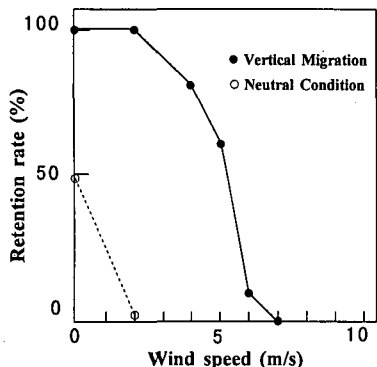


図-9 西風条件下における風速と滞留率の関係

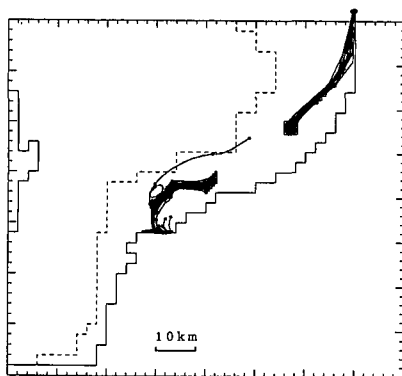


図-10 産卵場所の違いによる輸送経路の相違

5. 考 察

計算で得られた流速ベクトル場(図-4)から、水深 100 m 以深の沖合では急速に流速が速くなるため、その領域に取り込まれると卵・仔魚はすぐに流出してしまうことが予想される。いいかえれば、100 m 以浅の流速が遅い後流域に滞留することが、適切な着底場に到達するための必要条件となる。しかし西風の条件下では、産卵場付近の中・下層は沖向きの流れとなっており、卵・仔魚が流れに対して全く受動的であれば、Case-A の結果のように沖に運ばれ、そのまま流出してしまう。そこで生き残り戦略として後流域にとどまるためには、仔魚の段階で能動的な鉛直移動をして、岸向きの流れとなっている表層に移動することが必要となるものと考えられる。この移動により北東方向に流されながらも徐々に後流域に戻れることになる。ただこのような戦略をとっても、風が強い場合は卵の状態でかなり沖に運ばれてしまうため後流域には戻れなくなってしまう。

次に主産卵場の位置について考察する。産卵場の位置は流速ベクトル場と重ね合わせると、後流域の先端に位置していることが判る。そこで後流域と産卵場との関係を調べるため、産卵場を後流域の中央と後方の水深 50 m 付近に仮定して同様の計算を行った(図-10)。その結果、後流域の後方に産卵場を仮定するとすぐに流去してしまう、中央だと逆に上流に向かい岸沿いに分布することが判った。後流域にとどまることが最優先であるとなると、産卵場は後流域の中央部でも良さそうであるが、Case-D と比較すると 30 日後の粒子の分散が小さい。分散が小さいとそこが着底場としてたまたま悪い条件の場所なら仔魚が全滅してしまう恐れがあるので、生き残り戦略としては出来るだけ広い範囲に広がる方がいいのかも知れない。従って、後流域の先端部を産卵場とすることが生き残りに最も有利であるといえよう。

今回の計算結果から、風速の違いが資源加入量の変動要因になり得ることを指摘した。実際には、佐渡海峡への沖合水の流入条件や風向・風速の変動により短期的に流況が変化し、それらが資源加入に影響を与えている可能性もあり、その点を今後さらに検討する必要がある。

6. 結 論

マガレイの卵・仔魚が流れに対して完全に受動的であるとすると、産卵場から流されたものは 2 週間程度で着底場を通り越し流去してしまうが、現地観測結果から推定した能動的な鉛直移動を考慮することにより、ちょうど浮遊期の終わる 30 日後に着底場付近まで輸送されることを数値モデルにより証明した。マガレイの卵・仔魚の移動特性などに関するデータがさらに蓄積されれば、より詳細な数値シミュレーションが可能となる。また、そのような手法を開発することにより、産卵場や着底場の造成の適地選定など実用面への応用が可能となるものと考えられる。

参 考 文 献

- 金丸信一・梨田一也・永澤 亨・森松郁子 (1993): 異体類の産卵場形成機構と環境特性の解明, 農林水産系生態秩序の解明と最適制御に関する総合研究報告書, 農林水産技術会議事務局, pp. 230-231.
- 末永慶寛・中田英昭・藤原正幸・永澤 亨 (1996): 佐渡海峡周辺におけるマガレイ卵・仔魚の輸送に対する風の影響の数値シミュレーション, 水産工学, Vol. 32, No. 3, pp. 219-228.
- 永澤 亨・藤井徹生 (1996): 異体類の産卵場形成機構と環境特性の解明, 農林水産系生態秩序の解明と最適制御に関する総合研究, 平成 7 年度研究報告, 農林水産技術会議事務局, pp. 222-223.
- 藤原正幸・末永慶寛・中田英昭・永澤 亨・山田東也 (1997): オイラー・ラグランジュ法によるマガレイ卵・仔魚輸送の数値実験, 水産工学, Vol. 34 No. 2, pp. 147-154.
- Nakata H., et al. (1995): Modeling the transport of brown sole eggs and larvae in and around the Sado Strait. ECOSYSTEM 95, Vol. 1, pp. 59-64.