

日本海北部海域での漁場整備の実現にむけた観測の試み

Field Observation for Planning the Fishing Ground Development in North Japan Sea

山本 潤¹・渡辺光弘²・林田健志³・坂本和佳³・峰 寛明⁴・西田芳則⁵・田中 仁⁶

Jun YAMAMOTO, Mitsuhiro WATANABE, Kenji HAYASHIDA

Kazuyoshi SAKAMOTO, Hiroaki MINE, Yoshinori NISHIDA and Hitoshi TANAKA

In connection with a planning of fishing ground development in the exclusive economic zone around Hokkaido, the authors observed currents, water quality, plankton and the primary productivity in the area surrounding the Musashi Bank in August in 2009. As a result, the primary production rate of summer of this sea area was estimated to be about 36.6 (mg-C/m²/day). It is quite lower than that of other bay area in Japan. The density stratification was observed and it suggests that Tsushima Warm Current along the Hokkaido coast influences the height of the layer. Depth in which it meets the requirement of the photosynthesis is 25-55m. It accounts for about 66% of the primary production of the entire water column here. It was confirmed that the lack of the nutrient salt on the surface limited the primary production of this sea area in summer.

1. はじめに

排他的経済水域の水産資源の生産力を向上させて水産物の安定供給を図る事を目的に、2007年より国直轄の漁場整備事業が開始された。これまでに鳥取・島根沖においてズワイガニ等の保護育成礁が設置され、また、東シナ海においても湧昇流に関する調査が行われ、さらに、北海道周辺における事業実施の可能性についても検討されている。北海道日本海北部沖合の武蔵堆周辺はスケトウダラの優良な漁場であったが、図-1に示すとおりその漁獲量は著しく減少しており、資源管理対象として漁獲が制限されている。当海域が事業の候補地とされている中で、沿岸域での調査事例は多いものの、日本海北部の排他的経済水域における基礎生産構造を研究した例は見られない。著者らは事業計画立案に資する知見を得ることを目的に、武蔵堆周辺において調査を開始した。本稿では、観測の概要を報告するとともに、当海域の夏季の密度成層と対馬暖流の影響および基礎生産に関して観測結果と数値計算に基づく検討を行ったので、それらについて論じる。

2. 事業の基本方針に関する議論のポイント

当海域の漁場整備として考えられる工法に、湧昇流発生マウンドと保護育成礁があり、海域の肥沃化や資源の

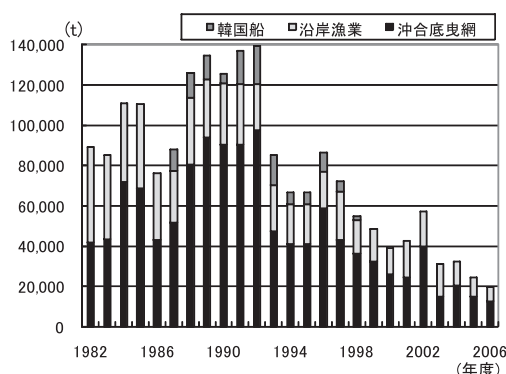


図-1 スケトウダラ日本海北部系群漁獲量
(独法)水産総合研究センター北海道区水産研究所, 2009)

減耗原因の解消がそれぞれの直接の目的となる。前者は、夏季の密度成層によって有光層内の栄養塩が枯渇して基礎生産が抑制されている場合に、底層の栄養塩を供給して基礎生産量を増大させ、対象魚の増肉と減耗率の低下を図るものである。湧昇流発生の外力が存在し、栄養塩枯渇が広範囲で一定の期間継続していれば、この工法が選択される価値がある。この条件が満たされない場合には、後者の工法により、対象魚が生息する海底微地形の回復を図るとともに、親魚や未成魚等の適正な資源管理を促すことが考えられる。その場合、漁場周辺に保護すべき対象魚が分布し、補食生物や違法操業等からの保護効果が期待できることが条件である。これらを満たす適地の選定と工法選択等を行い事業の基本方針を決定するためには、対象魚の資源状況に加えて、漁場周辺の物理環境、生物生息状況と餌料環境、基礎生産の周年の傾向、海底の微地形の状況等の判断材料が必要である。これら

1 正会員 博(工) (独法) 土木研究所, 寒地土木研究所
2 (独法) 土木研究所, 寒地土木研究所
3 環境修 (株) エコニクス環境事業部
4 (株) エコニクス環境事業部
5 水産修 (地方独法) 北海道立総合研究機構水産
研究本部, 中央水産試験場
6 フェロー 工博 東北大学教授工学研究科土木工学専攻

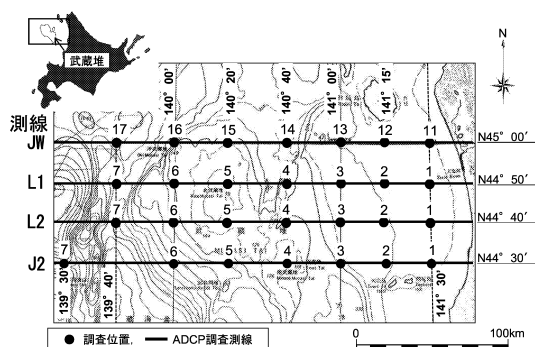


図-2 調査位置図 (武蔵堆周辺)

の主要な項目を今後数年間の調査で補完・追加するため、著者らの研究チームは2009年より調査を開始した。初年度は、夏季の密度成層状態での表層の栄養塩の枯渇が基礎生産を抑制している状況を観測の主な対象とした。

3. 調査方法

調査位置は図-2に示すとおり、スケトウダラの漁場である武蔵堆の通称“天狗の鼻”と呼ばれる測線L1の4番の地点（以下L1-4と表記、他も同様）を中心に、北緯45°から北緯44°30′、東経139°40′から東経141°30′までの区間である。北海道立中央水産試験場等が定期的に行っている調査箇所（JW, J2）に2測線（L1, L2）を追加し、海洋観測船の夏季の航海時に合わせて、8月2～4日にわたり28地点において垂下式水質計（STD）等による計測を行った。漁場直上のL1-4については、より詳細なデータを得るために水深75mまでの6層、L1-5, L2-4, J2-4においては3層において採水による水質分析およびプランクトン層別採取を行った。また、L1-4及びJ2-4地点においては、底層のプランクトンを調査するため、水深135mからノルバックネットの鉛直引きによる試料採取を行った。

同時に、低次生態系計算に用いる光合成パラメーターを得るため、安定同位体 ^{13}C を用いた植物プランクトンの現地培養実験を実施した。L1-4のクロロフィルaの鉛直分布のピークとなる水深38mにおいて採水し、植物プランクトンに $\text{NaH}^{13}\text{CO}_3$ と十分な栄養塩を添加して、海洋調査船船上に設置した水槽にて6時間の培養を行った。照度条件は20から $2800\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ の間の10ケースとした。分析や算出方法は風蓮湖での現地培養実験（山本ら、2008）と同様である。

4. 観測結果

(1) 栄養塩濃度

栄養塩分析の結果、硝酸態窒素は定量下限値の 0.003mg/L 未満～ 0.12mg/L 、アンモニア態窒素は全て定

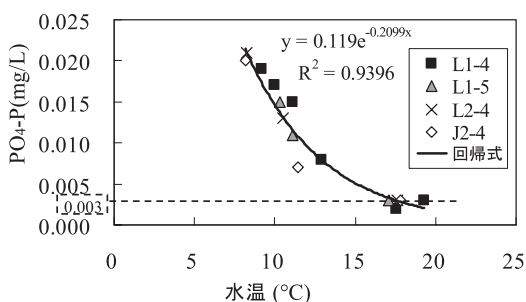
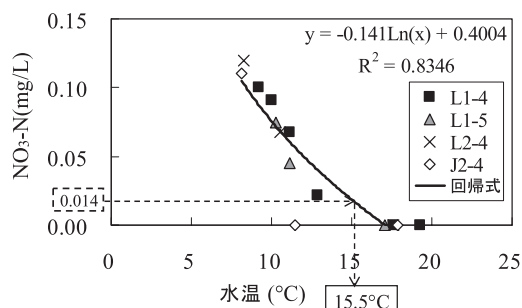


図-3 水温と栄養塩の関係

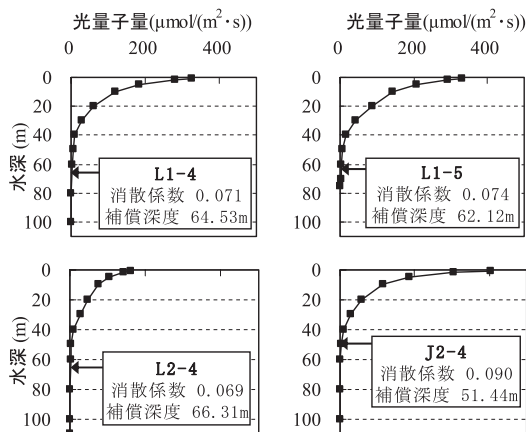


図-4 光量子量観測結果

量下限値の 0.005mg/L 未満、リン酸態リンは 0.002mg/L ～ 0.021mg/L であった。図-3では栄養塩濃度を水温との関係で整理した。栄養塩は水温と負の相関があり、プランクトンの増殖に必要なとされる栄養塩濃度（高橋ら1996等）として、硝酸塩を 0.014mg/L 、リン酸塩を 0.003mg/L とすると、後者は表層でも概ね条件を満たしているが、前者ではそれを満たす水温が 15.5°C 程度と算出され、後述する躍層以浅での硝酸塩の枯渇が確認された。

(2) 光量子量

光量子量の観測結果を図-4に示す。表層の光量子量は $162.7 \sim 403.0\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ であった。補償深度を海面光量の1%とすると、得られた消散係数を用いて水深51～66m程度までが有光層となる。

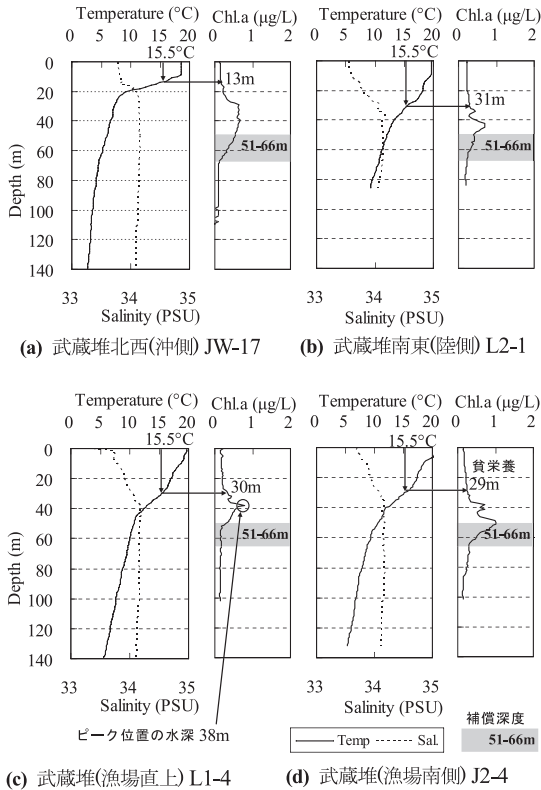


図-5 水温・塩分・Chl-aの鉛直分布

(3) 水温・塩分・クロロフィルの鉛直分布

水温は0.55℃ (L2-7水深503.0m)～21.76℃ (J2-4表層), 塩分は32.28 (JW-11表層)～34.20 (L1-7水深53.0m), クロロフィルaは0.00µg/L～1.29µg/L (L2-3水深45.0m)であった。図-5に代表的な観測結果を示す。密度成層とその直下でのクロロフィルaの増大が認められる。水温が概ね15.5℃以下となる水深から補償深度までの間で基礎生産が集中して行われていることが明らかである。

(4) 武蔵堆周辺の水塊構造

水温と塩分の鉛直分布から、武蔵堆北西の沖側では躍層が比較的高い位置に見られる (図-5(a)) が、南東の陸側付近では低い位置にあり (図-5(b)), 北上する対馬暖流の陸棚縁流の影響が示唆された。図-6に示すT-Sダイアグラムでも、陸側と沖側で異なる密度分布を示し、陸側では表層の塩分低下と中層高塩分の傾向が見られた。こうした傾向は檜垣ら (2008, 2009) の知見と同様である。

5. 当海域の夏季の基礎生産の状況

(1) 光合成速度

L1-4のクロロフィルaのピーク水深で採取したプラン

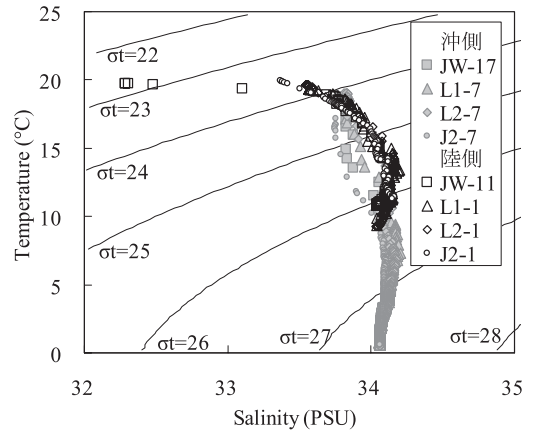


図-6 武蔵堆周辺のT-Sダイアグラム

クトンの培養実験結果と光-光合成曲線を図-7に示す。光-光合成曲線として、他の海域での値と比較するため、低次生態系モデルで一般的に用いられている (1) 式 (Steele, 1962) を用いた。最小二乗法の適用範囲を100 W/m²以下として、0から曲線のピーク位置までの観測値との相関を重視した。曲線は100 W/m²以上で強光阻害が大きく生じ、バルク的に扱っている分析結果に対して過小となるが、本観測で得た同時刻の水中光量子量がこの値に達しなかったため、実験当日の基礎生産量算定には影響が生じないと考えられる。強光阻害領域の扱いについては、図中に示すPlatt式 (Platt, 1980) の方が優れているため、今後の検討課題としたい。(1) 式の P' は一日あたりに換算された比光合成速度、 $I(t)$ は照度 (W/m²), I_{opt} は最適光強度 (W/m²), (2) 式の $\alpha(T)$ は水温 T ℃における最大可能成長速度 (1/day), α_0 は0℃での最大可能成長速度 (1/day) である。主な出現種は、珪藻綱 *Nitzschia pungens* とユグレナ藻綱 *Nephroselmis* sp. であり、組成比率はそれぞれ49.6%と13.8%である。

$$P' = \alpha(T) \times \frac{I(t)}{I_{opt}} \exp \left(1 - \frac{I(t)}{I_{opt}} \right) \dots\dots\dots (1)$$

$$\alpha(T) = \alpha_0 \times \exp(0.0633 \times T) \dots\dots\dots (2)$$

表-1に他の海域の低次生態系計算で使用されている光-光合成曲線のパラメータを示す。得られた最適光強度59 W/m²は、風蓮湖のような道東親潮域より大きく、三河湾や有明海より小さい、ほぼ中間の値となっており、既往文献値の範囲内にあった。最大可能成長速度は这其中で最も低い値を示した。

(2) 基礎生産量の算定

取得したパラメータを用いて、中田 (1993) の低次生

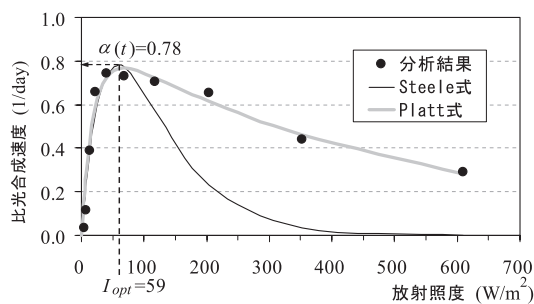


図-7 比光合成速度

表-1 生物パラメーターの他海域との比較

生態系計算の対象水域	0℃での最大可能成長速度	最適光強度
武蔵堆, 8月 (本研究)	0.21 (1/day)	59 (W/m²)
風連湖, 9月 (山本, 2008)	1.07 (1/day)	34 (W/m²)
三河湾 (中田, 1993)	0.59 (1/day)	73 (W/m²)
有明海 (斉藤, 2003)	0.85 (1/day)	97 (W/m²)

態系モデルを実験海域に適用して単位水柱あたりの基礎生産量の算定を行った。物理条件（水温、塩分、栄養塩）は培養実験当日の2009年8月3日の観測値を一定条件で与え、実験日の再現計算を行った。計算結果を図-8に示す。

光合成量では、約20m以浅でクロロフィルaが低く、約40mで最大となっており、実験日の状況を概ね再現している。次に、鉛直方向の日基礎生産量を算出し、この値を鉛直積分した結果を表-2に示す。この海域の基礎生産量は36.6 (mg-C/m²/day)と算定された。また、有光層内で必要な栄養塩濃度の条件を満たす水深25～55mの層で水柱全体の基礎生産の約66%を占めていることがわかった。これは完全な現場法ではなく、クロロフィルaのピーク位置で採取した試料から得たパラメーターを用いて算出した結果であることに留意する必要があるが、その値はKawamiya (1995) による8月の太平洋北東部St.Papaの約45 (mg-C/m²/day)に近い。日本周辺の沖合海域での観測例は少なく、足立ら (2009) による夏季の鹿島灘沿岸で161～1116 (mg-C/m²/day)程度であり、日本全国沿岸海洋誌 (日本海洋学会, 1985) に記載されている同月の噴火湾や伊勢湾等では300～1400 (mg-C/m²/day)程度である。これらと比較し、夏季は当海域の生産力が大幅に劣っていることが確認できた。

この理由として、当海域は陸域から遠く、また、夏季に成層構造が崩れないため夏以前に表層の栄養塩が消費し尽くされ、陸水からも底層からも栄養塩が供給されない状態が続くためと考えられる。この栄養塩が枯渇して

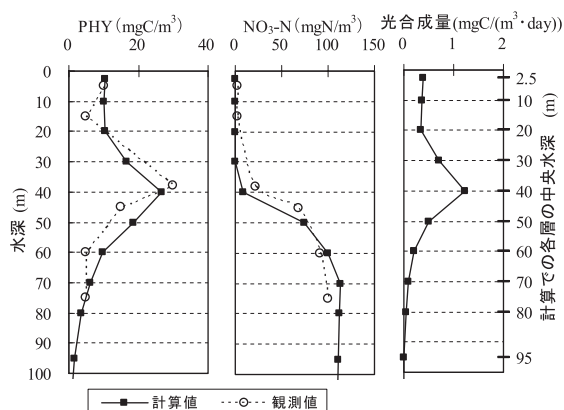


図-8 基礎生産量計算結果

表-2 基礎生産量の算出結果

水深 (m)	0-25	25-55	55-	全層
生産量 (mg/m²/day)	8.971	24.095	3.576	36.642
割合 (%)	24.48	65.76	9.76	100.00

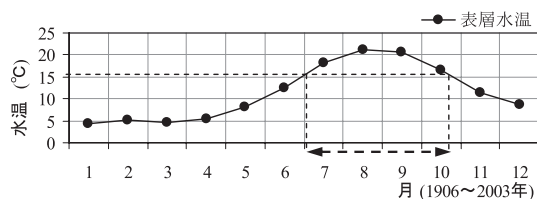


図-9 武蔵堆周辺の表層水温 (日本海洋データセンター)

いる水深帯に栄養塩の豊富な水塊が湧昇すれば生産性が向上する可能性が示唆される。また、前章での議論に基づき、表層の水温が15.5℃以上である期間は表層の栄養塩の枯渇が解消されないと仮定すると、図-9に示す当海域の表層水温の周年の傾向から、その期間は概算で約3.5ヶ月であると推定される。

6. 対象魚の移動経路

対馬暖流が分岐する積丹沖を起点に、武蔵堆周辺を含めた北端の礼文島までを対象に多層密度流計算を行った。対象海域の255km×235kmを1km×1kmの格子に切り、層厚は水深100mまでを図-8右側に示すとおりとし、それ以深は順次拡大した。水温、塩分等の初期値と南端の境界値はJW-17及びL1-4での観測値を使用した。境界の流速は海況予測システムFRA-JCOPE (宮澤ら, 2003) を使用し、培養実験当日の2009年8月3日の値を補間して開境界3方向に与えた。表層熱収支については、気象庁ホームページより羽幌観測所と札幌気象台の特別値をダウンロードして使用した。

再現計算結果を図-10に示す。計算結果から、陸棚縁端部に沿って北上する対馬暖流の挙動を再現した。この

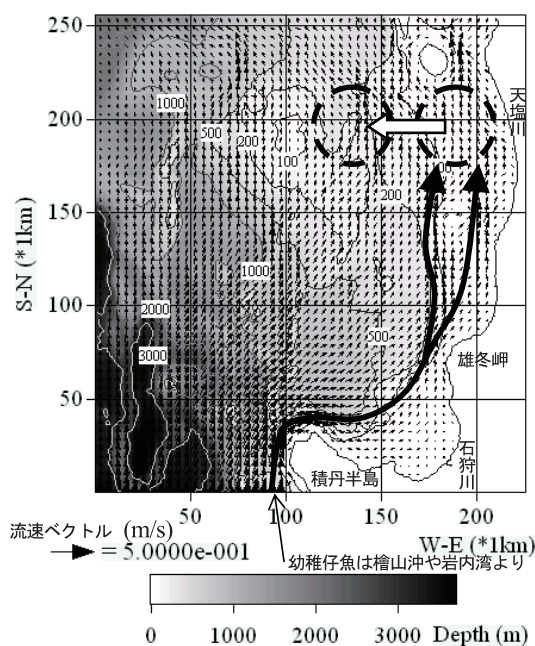


図-10 再現計算結果（表層のベクトル図）

ような流れは中央水産試験場による観測においても確認されている。図中の太い矢印はスケトウダラ幼稚仔魚の移動経路であり、マーカー粒子の追跡計算から推定した。日本海側のスケトウダラは、冬季に桧山沖もしくは岩内湾で産卵し、受精卵から幼稚仔魚期に表層を北上し、秋季に当歳魚の段階で武蔵堆周辺に着底する事が知られている（北海道立中央水産試験場ら，2009）。計算結果はこうした遊泳能力の弱い幼稚仔魚の天塩川沖に至るまでの移動経路とはほぼ一致し、スケトウダラ幼稚仔魚の移送に対馬暖流が深く関わっている事がわかった。ただし、天塩川沖から武蔵堆の漁場までの移動については、当歳魚の能動的な輸送を考慮する必要がある。

7. おわりに

本稿では、主に武蔵堆周辺の夏季の物理環境と基礎生産の状況等について示した。その結果、スケトウダラ稚仔魚の移送に対馬暖流が深く関わっており、その餌料環境として夏季には他海域と比較して生産性が低く、その状態が数ヶ月に及ぶことが明らかとなった。これらの知見は、保護育成か湧昇流発生といった工法の選択や適地選定等の事業計画立案の上で重要である。今後は、周辺の流動環境を詳細に捉えるとともに、密度成層が崩壊する秋季やブルーミングの生じる春季においても同様の調

査を行い、基礎生産構造の周年の傾向を明らかにする予定である。

本研究は寒地土木研究所の交付金一般研究「北方沖合海域の生物生産性向上に関する基礎的研究」、寒地土木研究所と北海道立中央水産試験場の共同研究「武蔵堆周辺の流況・水質観測、低次生態系の動態把握及びモデル化に関する研究」の一環として実施された。本研究を進めるにあたり、北海道大学大学院環境科学院の門谷茂教授、北海道立総合研究機構中央水産試験場の田中伊織研究参事より貴重な御示唆を頂いた。培養実験では工藤勲准教授はじめ研究室の皆様にご協力を頂いた。関係諸氏に厚く御礼申し上げる。

参考文献

- 足立久美子・中山哲蔵 (2009)：開放性沿岸域における基礎生産を制限する環境諸要因について，海岸工学論文集，第56巻，pp. 1131-1135.
- 斉藤 周・北沢大輔・佐藤 徹 (2003)：MECモデルを用いた有明海生態系シミュレーション，第17回流体力学シンポジウム，E9-1.
- 高橋正征・古谷 研・石丸 隆 (1996)：生物海洋学2「粒状物質の一次生成」，東海大学出版会，174p.
- (独法) 水産総合研究センター北海道区水産研究所 (2009)：平成20年度スケトウダラ日本海北部系群の資源評価，317p.
- 中田喜三郎 (1993)：生態系モデル－定式化と未知のパラメータの推定法－，Journal of Advanced Marine Technology Conference, Vol.8, pp. 99-138.
- 日本海洋学会沿岸海洋研究部会 (1985)：日本全国沿岸海洋誌，東海大学出版会，1106p.
- 檜垣直幸・磯田 豊・磯貝安洋・矢幅 寛 (2008)：北海道西岸沖における水系分布と流れパターンの季節変化，海の研究 (Oceanography in Japan), 17 (4), pp. 223-240.
- 檜垣直幸・磯田 豊・本田 聡 (2009)：北海道西方の武蔵堆周辺海域で観測されたモード水，海の研究 (Oceanography in Japan), 18 (6), pp. 335-350.
- 北海道立中央水産試験場・稚内水産試験場・函館水産試験場 (2009)：日本海スケトウダラ資源調査結果，調査速報，<http://www.fishexp.pref.hokkaido.jp/exp/central/kanri/>, 4p.
- 宮澤泰正・山形俊男 (2003)：JCOPE 海洋変動予測システム，月刊海洋，Vol.35, No.12, pp. 881-886.
- 山本 潤・林田健志・峰 寛明・牧田佳巳・山下彰司・田中 仁 (2008)：北方の閉鎖性海域に適した低次生態系モデル構築に向けた現地観測，海岸工学論文集，第55巻，pp. 1196-1200.
- Kawamiya, M., Kishi, M. and Sugimoto, N. (1995)：An ecological - physical coupled model applied to Station Papa, Journal of Oceanography, Vol.51, pp. 635-664.
- Platt, T., Gallegos, C.L. and Harrison, W.G. (1980)：Photoinhibition of photosynthesis in natural assemblages of marine phytoplankton. / Mar. Res., 38, 687-701 (2005 KaiyoSpr.ppt, 2002 MacIntyre J Phycol.pdf)
- Steele, J. H. (1962)：Environmental control of photosynthesis in the sea, Limnology and Oceanography, Vol.7, pp. 137-150.