

CO₂固定量評価に係わる貝類代謝モデルの開発

—ホタテガイ—

中村義治* ・奥出壮** ・寺澤知彦***
関根幹男**** ・三村信男*****

温室効果ガスによる地球温暖化の予測には生物資源による炭素循環の定量的評価が不可欠である。本研究では特に有用貝類個体群に着目し、その一環としてホタテガイによる炭素固定量と排出に関する評価を行なうためホタテガイ個体群動態モデルを開発した。ホタテガイ個体群動態モデルの構築には①炭素収支を考慮した部位別の個体成長、②代謝の環境条件に対する応答、③養殖と地蒔き別・海域別の計算条件、④漁獲死亡や自然死亡による減耗を考慮した。モデルを漁場に適用し、養殖形態による炭素収支の違いや、ホタテガイの生産量および生物資源量と炭素収支の定量的関係を明らかにした。

1. 緒 言

地球温暖化の原因となる大気中 CO₂の動向を定量評価するためには、海域における炭素循環の多様なプロセスを把握する必要がある。その各プロセスは様々な研究によって明らかになりつつあるが、物理的循環に比べ生物学的循環は複雑であり、高い生産性と多様性を有する沿岸域における炭素循環の解明が課題となっている。中でも沿岸域に高密度に分布する貝類は、個体群への炭素固定、濾水による懸濁物浄化、水揚げによる固形炭素の系外除去等の生物過程により重要な役割を果たしている。しかし水産有用種といえども、これまで漁獲統計以外の全国的な生物量に関するデータベースはなく、さらに生産性や浄化機能、物質固定能といった生物機能を全国的に評価した研究例も見当たらない。

著者らは我が国沿岸域の主要な有用貝類8種について分布範囲、生物量、代謝特性等についてデータベースを作成し、炭素収支の全国評価を行なった(中村・金網ら, 2003)。本研究ではその一環として行なった養殖マガキに関する検討報告(中村・奥出ら, 2003)に引き続いて、ホタテガイ(養殖および地蒔き)について個体群モデルを構築し日本沿岸漁場に適用した結果を報告する。この個体群モデルは現存資源量の推定や資源動態予測にも応用でき資源管理上有用なツールにもなりうる。

ホタテガイは有用貝類の中で水揚げ量がもっとも多く、1998年度には約51万トンの水揚げがあり全有用貝類の4割を占める。主に北海道や東北地方で養殖されている。個体群モデルの構築に当たっては①エネルギー(炭素)収支を考慮した部位別の個体成長、②代謝の環境条件(水温・餌料濃度)に対する応答、③養殖および地蒔きの

別、海域別の計算条件④漁獲死亡や自然死亡による減耗を考慮した。

2. 個体群動態モデル

(1) モデルの概要

個体群動態モデルの構築にあたり、前報の養殖マガキと同様に代謝(摂餌、同化、呼吸、身肉殻成長、成熟、産卵放精)を考慮して個体成長を解析した(中村・奥出ら, 2003)。個体数増減に及ぼす因子は自然死亡、漁獲死亡、稚貝加入のみとし、移動(移入移出)による個体数増減は考慮しなかった。殻長組成モデル(明田ら, 2002)を採用し、殻長もしくは身肉重量の関数で表わした代謝モデル式を個体群モデルに適用した。

個体の体重は部位毎に考慮し、全体重は $W_t = W_f + W_g + W_s$ と書かれる。ここで W_g : 卵・精子細胞重量(以下生殖巣と称する)、 W_s : 殻重量、 W_f : その他軟体部(以下身肉重量と称する)。単位は全て mgC であり、全ての代謝フラックスは炭素量で計算する。エネルギー代謝は $I = E + Pg + Pr + R$ と表わせる。ここで I : 摂餌量、 E : 排泄量、 Pg : 身肉成長量、 Pr : 生殖巣成長量、 R : 呼吸量である。同化量は $A = I - E = r_a \cdot C \cdot F$ と表わせる。ここで r_a : 同化率、 C : 餌料濃度 [mgC/l]、 F : 濾過速度 [l/day]。計算手順としては、まず現地測定値から設定した水温および餌料濃度から摂餌量 I 及び同化量 A を求め呼吸量 R 及び生殖巣成長量 Pr を差し引くことで身肉成長量 Pg を計算する。なお今回はマガキに倣い、摂餌により同化した炭素は殻成長に配分せず、殻成長量は漁場における身肉重量一般長関係式を用いて身肉増加量から計算した。

代謝モデルに適用するパラメータは原則として現地漁場における観測・実験値を適用したが、入手できない場合は近隣漁場における値で代用した。

(2) 濾水および同化

蔵田ら(1991)による北海道サロマ湖におけるホタテガイの濾水量および摂餌量の実験結果を図-1に示す。

* 水博 (独法)水産工学研究所水産土木工学科長
** 理博 (株)中電シーティーアイ環境情報部
*** (株)中電シーティーアイ環境情報部
**** (株)フィスコ
***** 正会員 上博 茨城大学教授 広域水圏環境科学教育研究センター

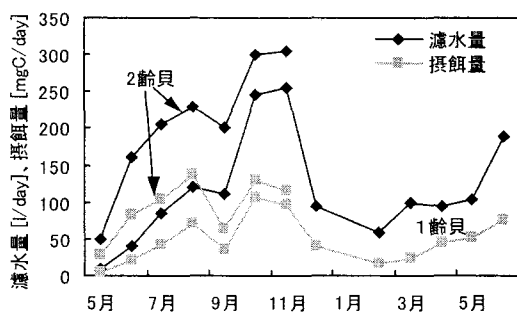


図-1 ホタテガイの濾水速度と摂餌量

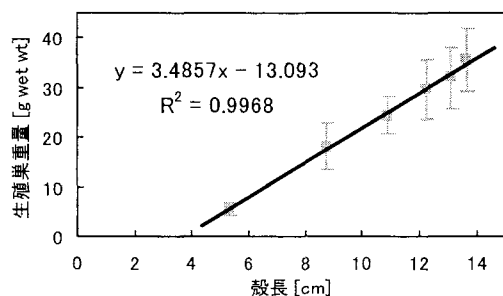


図-2 生殖巣重量と殻長の関係

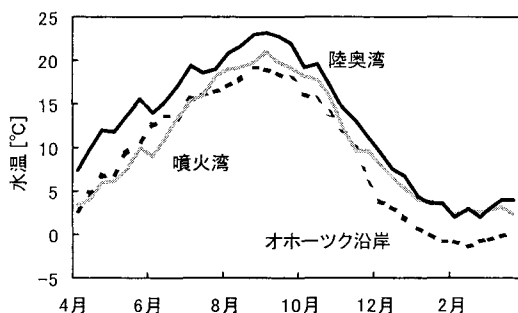


図-3 3海区で適用した水温

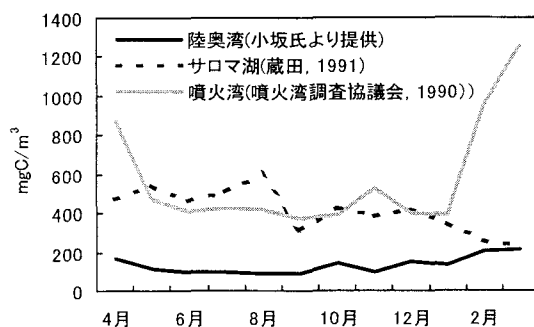


図-4 餌料濃度の現地観測値

ホタテ貝の濾水速度 $F(T, W_f)$ [l/day] が水温 T [°C] および身肉重量 W_f [mgC] のみに依存すると仮定し、以下のような定式化を行なった。

$$F(T, W_f) = a_F \cdot \exp(b_F T) \cdot (W_f)^{C_F} \quad (1)$$

図-1 のデータを式 (1) に代入して重回帰分析を行ない $a_F = 0.33$, $b_F = 0.053$, $C_F = 0.68$ を得た。

同化率は蔵田ら (1991) による実験結果を参考に設定した。同化率は季節により 60~90% の間で変動するが今回は単純に平均値 77% とした。

(3) 呼 吸

蔵田 (1996) により呼吸速度 R と身肉乾燥重量 W_f^{dry} [g dry wt] の関係式は

$$R = \alpha \cdot (W_f^{\text{dry}})^c \quad (2)$$

と表わされ、定数 α および c は季節ごとに与えられている。式 (2) に水温依存性を導入して次式のように改良した。

$$R(T, W_f^{\text{dry}}) = a_R \cdot \exp(b_R T) \cdot (W_f^{\text{dry}})^{C_R} \quad (3)$$

これから重回帰分析により $a_R = 1.97$, $b_R = 0.078$, $C_R = 0.78$ を得た。

(4) 成熟と産卵

同化 A から呼吸 R を差し引いた量が身肉成長および生殖巣成長 (成熟) となる。成熟期には $r_g(A - R)$ が成熟に配分される。成熟と産卵のアルゴリズムは中村・奥出ら (2003) のマガキモデルと同様に設定した。成熟期

における生殖巣配分比 r_g を

$$r_g = r_g^{\max} \cdot \Gamma(L) \quad (4)$$

$$\Gamma(L) = W_g^{\text{wet}}(L) / (W_g^{\text{wet}})^{\text{std}} \quad (5)$$

の関数形で仮定した。ここで $W_g^{\text{wet}}(L)$ [g wet wt] は殻長 L [cm] のときの産卵直前の卵細胞重量、 $(W_g^{\text{wet}})^{\text{std}}$ [g wet wt] は生殖巣配分比が $r_g = r_g^{\max}$ となる卵細胞重量。サロマ湖における年齢別生殖巣重量 (丸, 1985) および年齢 t [y] - 殻長 L [cm] 関係式 (丸・小原, 1967) を用いて、図-2 のように生殖巣重量と殻長の関係を求めた。これを見るとほぼ直線で近似できることがわかる。

$$W_g^{\text{wet}}(L) = a_g L + b_g \quad (6)$$

ここで $a_g = 3.49$, $b_g = 13.1$ 。

非成熟期および式 (6) < 0 となるような殻長のときは $r_g = 0$ (生殖巣は成長しない) とする。生物学的最小形はサロマ湖においては殻長 3.9 cm (ホタテガイ研究グループ, 1962) とされるが、式 (6) から殻長が約 3.8 cm で $r_g = 0$ となるのでこの条件を自然に満たす。また $(W_g^{\text{wet}})^{\text{std}} = 25$ g wet wt と設定し、 $r_g^{\max}$ は検証計算によって調整し 1.0 とした。成熟期は現地最低水温から放卵放精までの期間とした。

(5) アロメトリ式

殻長 L [cm] と殻重および身肉重 W [g wet wt] の関係式は、 $\log W = a \log L - b$ で表わされる。表-1 に

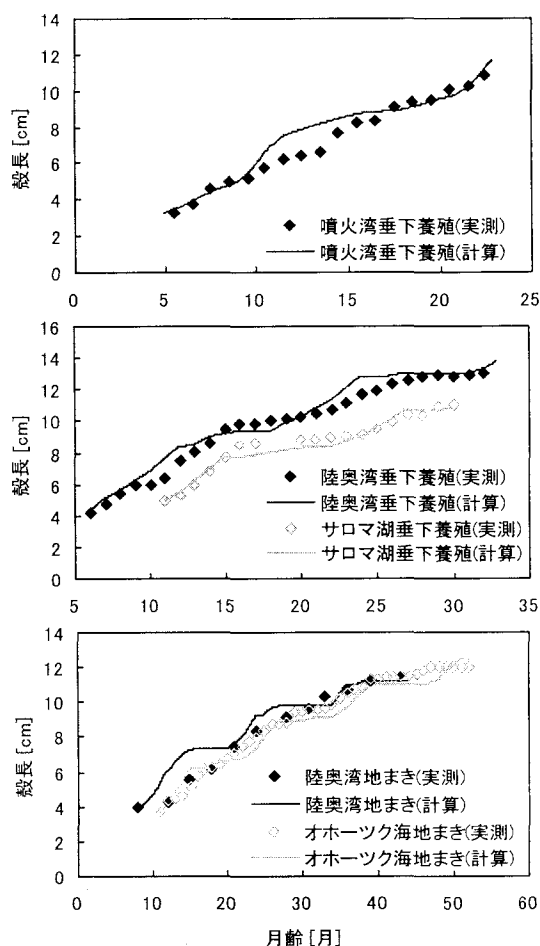


図-5 個体成長モデルの検証

示す漁場における値を適用した（蔵田，1991；小坂，1997；宮園ら，1992）。

（6）個体成長の検証

a) 個体成長の計算条件

以上の個体代謝モデルを用いて複数漁場を対象として養殖法の違いを考慮しながら成長実測値との比較により検証を行なった。比較検討対象としたのは、陸奥湾における垂下養殖および地蒔き養殖のホタテ、サロマ湖における垂下養殖およびオホーツク海における地蒔き（青森県水産増殖センター小坂善信氏提供）、および噴火湾（噴火湾胆振海区漁場環境調査協議会，1990）での成長推移である。

現地における水温観測値および餌料濃度（POC 濃度）から環境条件を設定した。水温は日本海洋データセンターから取得した1998年度観測値を三角関数で近似して毎日の水温を設定した。水温観測値を図-3に示す。

餌料濃度は図-4に示した現地 POC 観測値に対し生育

法や海域で異なる定数を乗じた値を設定した。生育法による成長速度の差は異なる水深における餌料の濃度，フラックスおよび質の違いが主な原因と考えられる。今回漁場や水深による餌料環境について十分な資料を収集できなかったため，この餌料環境の差を一定比率（POC 倍率）に集約して表わし，成長計算が観測値と一致するように調整した。なおサロマ湖とオホーツク沿岸は同じ観測値を用いた。餌料濃度の設定について表-1にまとめた。

表-1 各漁場のアロメトリ及び餌料濃度の設定

設定漁場	サロマ湖	オホーツク	噴火湾	青森県陸奥湾	
生育法	垂下養殖	地蒔き	垂下養殖	垂下養殖	地蒔き
調査漁場	サロマ湖	湧別沖	サロマ湖	陸奥湾	湧別沖
身肉重 a	3.43	2.83	3.43	3.16	2.83
身肉重 b	1.76	1.25	1.76	1.54	1.25
殻重 a	3.29	2.92	3.29	2.94	2.92
殻重 b	1.39	1.11	1.39	1.13	1.11
観測漁場	サロマ湖	サロマ湖	噴火湾	陸奥湾	陸奥湾
観測年度	1987	1987	1988～89	不明	不明
POC 倍率	0.7	0.62	0.7	2.75	2.4

b) 個体成長の計算結果

図-5に個体成長計算の結果と殻長観測値の比較を示す。いずれの海域・生育法でも成長曲線はよく一致している。垂下養殖では地蒔きに比べほぼ2倍程度の速さで成長している。

以後この個体代謝モデルを殻長組成モデル（中村ら，2001）に適用して各漁場における炭素収支の定量評価を行なった。

3. 全国炭素収支評価

（1）計算条件

a) 検討対象期間と対象海区

評価対象期間は他種の有用貝類に関する炭素収支評価と同じ1998年度とした。98年度には全国における垂下養殖によるホタテガイ水揚げ量のうち84%に相当する19万トンが北海道道南（主に噴火湾）および青森（主に陸奥湾）において水揚げされている。一方地蒔き（天然含む）の場合は北海道オホーツク海（主に宗谷，網走等）における水揚げが25万トンで全国の86%を占める。そこで簡単のため先に挙げた3海区についてのみ炭素収支計算を行い，全国の炭素収支はその水揚げ量の比を乗じて算出する。

b) 初期資源量

垂下養殖（道南および青森県）に関しては，個体群動態シミュレーションを行い，月間水揚げ量（青森県漁業

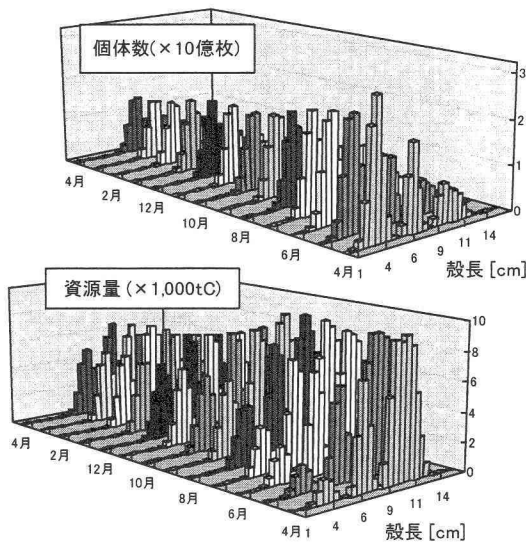


図-6 殻長組成モデル計算結果例(オホーツク海)

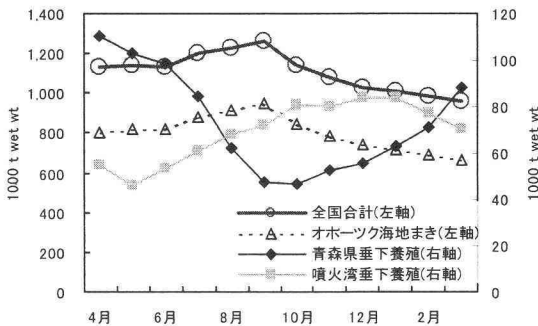


図-7 ホタテガイ資源量計算結果

共同組合連合, 2001) を与えて年度末の資源量が初期資源量にほぼ等しくなるように初期資源量を調整した。

地蒔き(オホーツク海)については, 現地水産技術普及所や漁協から提供された月間水揚げ量および推定資源量に関する資料を基に算定した。入手した資料における水揚げ量はオホーツク海全体のほぼ半分に相当するため, オホーツク海区全体の資源量もそのほぼ2倍であると仮定した。

なお本研究では殻長組成モデルを用いるためある幅を持った殻長分布の個体群を取り扱う。そこで北海道立雅内水試(1986)による殻長組成調査を参考に殻長と殻長分布の関係を算出し適用した。

c) 自然死亡率

垂下養殖では地蒔きに比べて餌料環境が良好で, さらに他生物による食害が軽減されていることなどから, 自然死亡率は低いと考えられる。噴火湾の垂下養殖では年死亡率がおおよそ10~50%/yと見積もられている(中

川・吾妻, 1982)。ここでは専門家の意見を取り入れ, 1998年度の自然死亡率を20%/yとした。

地蒔きについてはオホーツク海における水産技術普及所などによる漁場調査から生残率が86~88%/yと推定される。しかしこの値には天然由来のホタテガイが考慮されておらず, 実際はこれより低いと考えられる。ここでは専門家の意見を参考に, 常識的な値として死亡率を50%/yと仮定した。

d) 産卵期

産卵期間はいずれも30日間とし, 産卵開始時期はオホーツク海, 噴火湾および陸奥湾についてそれぞれ伊藤(1967), 川真田(1983)および佐藤(1991)を参考に設定した。

以上の計算条件を表-2にまとめた。水温および餌料濃度については先の個体成長計算条件を適用した。

表-2 ホタテ個体群動態シミュレーション計算条件

地 域	オホーツク	道 南	陸 奥 湾
養殖方法	地蒔き	垂下養殖	垂下養殖
水揚げ量[t/y]	248,021	104,516	85,828
初期資源量[百万枚]	17,628	1,942	966
産卵開始	5/1	4/15	4/1
水揚げ開始年齢	4歳	1歳半	1歳2ヶ月
主な漁期	4~11月	12~3月	4~9月
自然死亡率[年間]	50%	20%	20%

(2) ホタテガイによる炭素収支評価

a) 3海区における計算結果

図-6に殻長組成モデルによる計算結果例としてオホーツク海地蒔きホタテの個体数および資源量(炭素重量)の推移を示す。また3海区および全国漁場におけるホタテガイの資源量(湿重量)推移の計算結果を図-7に示した。オホーツク海区ではおおよそ70~90万t, 道南・青森では5~10万tで推移している。表-3に炭素量で表わした。P/B比は垂下養殖が地蒔きの2倍程度となっており, 垂下養殖の生産能力の高さを示している。

図-8に海区別の炭素収支推移を示した。ホタテガイについてもこれまでの他種有用貝類に関する炭素収支評価と同様に, 呼吸, 排泄, 産卵および分解(死亡)を炭素排出(正值), 摂餌および殻形成を系からの炭素除去(負値)として合計した。これを見ると垂下養殖においてはほぼ年間を通して負(炭素除去)となっているがオホーツク海の地蒔きでは4~8月の成長期に炭素除去, 9~3月の停滞期には炭素排出となっている。年合計ではオホーツク海でも炭素除去側となる。8~9月の急激な変化は餌料濃度の影響が大きい。

b) 全国炭素収支

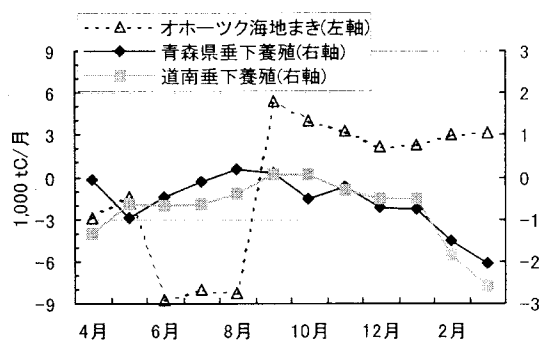


図-8 海区ごとの炭素収支

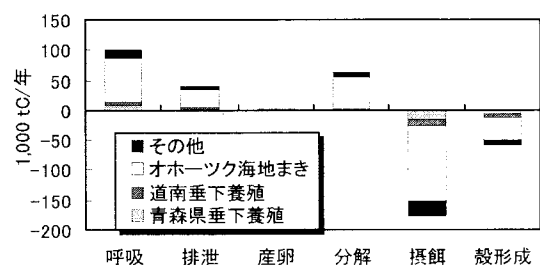


図-9 項目別炭素収支の比較

表-3 生物量と生産力、水揚げ量

項目	単位	青森県	道南	オホーツク	全国
資源量(B)	tC	6,816	6,415	73.173	101,299
生産力(P)	tC/y	9,296	10,933	58,711	92,548
P/B比		1.36	1.70	0.80	0.91
水揚げ量	tC/y	8,030	10,331	22,973	48,460

前述したように、3海区の資源量および炭素収支が水揚げ量に比例すると考え全国値を推定した。図-9に項目別の炭素収支計算結果を示す。炭素除去合計が234 ktC/y、炭素排出合計が207 ktC/yであり、全体で炭素除去となった。生産力は93 ktC/yであり、そのうち48 ktC/yが水揚げにより海域から除去される。殻形成による海水中の炭素固定は57 ktC/yである。海水中では石灰化に伴うCO₂生成が見込まれるため地球環境の面からは貝殻形成の機能は評価されていないが、大気中CO₂への寄与については海域の基礎生産を含めた生態系での評価を待たなければならない。

4. あとがき

現在水産業界では水産業の本来の役割（魚介資源生産）に留まらない多面的な機能が論議されている。中でもホタテガイは漁獲量・資源量が膨大で、濾水による懸

濁物除去機能や漁獲による炭素・窒素等の海中からの取り上げ効果が注目されている。また、大量に水揚げされた貝殻も陸上で加工され、漁場周辺の農地に肥料として使われ環境保全のみならず循環型社会形成にも貢献している。さらにホタテガイは垂下養殖だけでなく天然貝が多く含まれる地蒔き生産の占める割合が比較的多いため、高密度養殖に見られるような海底への環境負荷が少なく、環境浄化におけるホタテガイ漁業の役割は大きい。本研究における個体群動態モデルの開発によりその定量評価が可能となった意義は大きい。

なお本研究は農林水産技術会議プロジェクト研究の一環として実施した。

参考文献

- 青森県漁業共同組合連合(2001)、ほたて漁業の概況平成13年度版
 明田定満・桑原久美・中村義治・奥出 壮・寺澤知彦(2002): エゾアワビの個体群動態モデルの開発, 第49回海講論文集, pp. 1171-1175.
 伊藤 繁(1967): オホーツク沿岸におけるホタテガイ漁業, 水産増殖養殖叢書, pp. 7.
 川真田憲治(1983): 噴火湾海域における放流ホタテガイの生殖周期, 北水試報告, 25号, pp. 15-20.
 蔵田 護・干川 裕・西浜雄二(1991): サロマ湖における垂下幼生ホタテガイの摂餌量, 北水試研報, 第37号, pp. 37-57.
 小坂善信(1997): Genetic studies on scallop culture in Mutsu Bay, 青森県水産増殖センター研究報告 第8号
 佐藤恭成(1991): 報文ホタテガイ養殖における環境情報の利用—陸奥湾を例として—, 水産工学, 27(1), pp. 57-64.
 中川義彦, 吾妻行雄(1982): 噴火湾養殖ホタテガイ斃死原因究明調査, 北海道立函館水試事業報告, pp. 108-125.
 中村義治・奥出 壮・寺澤知彦・関根幹雄・三村信男(2003): CO₂固定量評価に係る貝類代謝モデルの開発—養殖カキ—, 第50回海講論文集, pp. 1166-1170.
 中村義治・金網紀久恵・磯野良介・三村信男(2001): 生活史に沿った二枚貝個体群の生物機能評価法, 第48回海講論文集, pp. 1231-1235.
 中村義治・金網紀久恵・磯野良介・三村信男(2003): 我が国における主要貝類の生物量と生物機能の分布特性, 第50回海講論文集, pp. 1296-1300.
 噴火湾胆振海区漁場環境調査協議会(1990): 噴火湾胆振海区漁場環境調査報告書, pp. 1-24.
 ホタテガイ研究グループ(1962): 最近のホタテガイ調査から得られた知見について, 北水試月報, 19(11), pp. 368-379.
 北海道立雅内水試(1986): 地蒔き漁場調査, 昭和60年度北海道立雅内水試事業報告, pp. 151-157.
 丸 邦義・小原昭雄(1967): ホタテガイ *Patinopecten yessonesis* (Jay) の生態に関する研究. 1. 成長と年輪形成について, 北水試報告, 7号, pp. 72-83.
 丸 邦義(1985): ホタテガイの種苗生産に関する生態学的研究, 北水試報告, 27号, pp. 1-53.
 宮園章, 横山信一, 西浜雄二(1992): 1990年湧別沖における種苗放流ホタテガイの成長, 北海道立網走水試事業報告, 平成2年度, pp. 162-175.