

1. 2 ホタテガイ成長モニタリング調査（受託試験研究費）

担当者 調査研究部 栗原 康裕・多田 匡秀

(1) 目的

北海道におけるホタテガイ漁業は、本道水産業の中核であり、生産量および生産額が魚種別で第 1 位である。オホーツク海海域では種苗放流・輪採区制漁業が行われているが、1989 年以降、貝柱歩留まりが平年よりも低く推移する現象が数回観測されている（西浜 1994；品田ら 2005；品田 2006）。貝柱歩留まりが低い現象は、ホタテガイ価格低下の原因となる。よって、その要因を明らかにすることはホタテガイ漁業の安定化を図る上で重要である。

本事業は、ホタテガイの成長と海洋環境をモニタリングして長期間のデータを蓄積して、貝柱歩留まりの低下等の諸問題に対応することを目的としている。今回は 2010 年の結果と、研究成果として、経年データから構成した統計的確率モデルに基づくホタテガイ貝柱歩留不良警報システムについて報告する。

(2) 経過の概要

調査は 2010 年 3 月から 12 月に常呂および紋別漁場で実施した。ホタテガイ試料はホタテガイ桁網により採集して（図 1）、30～40 個体のホタテガイ試料について殻高、殻重量、粗重量、軟体部重量、貝柱重量および生殖巣重量を測定した。これとは別に 5 個体の貝柱を摘出し、貝柱グリコーゲン含有率の分析に供した（アンスロン-硫酸法：Osborne & Voogt 1980）。常呂漁場では放流 3 年貝、紋別漁場では放流 4 年貝をそれぞれ用いた。

水温および塩分は、STD（アレック電子 AST-1000）により測定した。クロロフィル a 用試水は、バンドン採水器で表面から底層まで 5～10 m 間隔で採水し、GF/C フィルターでろ過したのち分析まで凍結保存した。クロロフィル a の抽出は、n,n-ジメチルホルムアミド（DMF）で行い、ターナー蛍光度計を用い Welschmeyer 法（Welschmeyer

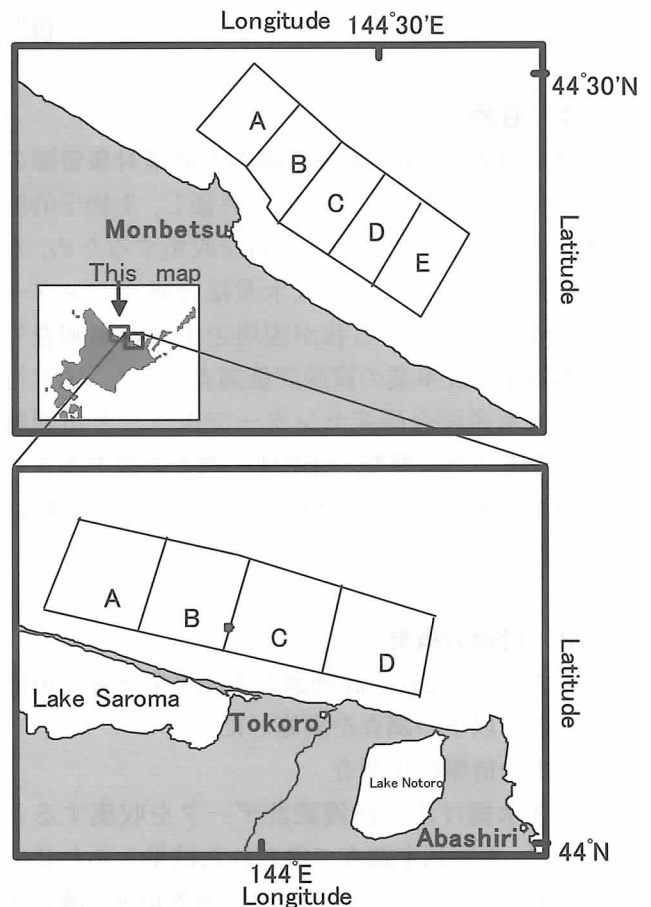


図 1 調査地点

1994) で濃度を測定した。

(3) 得られた結果

ア 常呂

(ア) 海洋環境

2010 年における底層水温は、4,5 月に平年値（1992 年から 2009 年までの算術平均）より 0.5℃ほど高かったが、6～8 月は低い値であった。底層のクロロフィル a 濃度は、4 月から 6 月に平年値を大きく下回っていた（図 2）

(イ) ホタテガイの測定値

ホタテガイの殻高、粗重量および貝柱重量は、調査期間を通じて平年値を下回った（図 3）。また、貝柱歩留まりおよび貝柱グリコーゲン含有率についても平年値を下回った。

イ 紋別

(ア) 海洋環境

底層水温は 4 月下旬から 5 月下旬に 0.5～1.8℃ 高く、それ以降も 9 月まで高めに推移した(図 2)。底層クロロフィル a 濃度は、春季から低く、6 月まで平年値を大きく下回り、低めに推移した。

(イ) ホタテガイの測定値

ホタテガイの殻高、粗重量は夏季までは平年値を超えることもあったが、夏季以降平年値となった(図 3)。貝柱重量は春先に低かったが、夏季までは平年値であった。しかし夏以降は平年値を下回った。貝柱歩留まりおよび貝柱グリコーゲン含有率については、調査期間を通じて平年値を下回った。

ウ 経年変化

2010 年夏季における常呂と紋別漁場の貝柱歩留まりは、平年値よりも 1～2 ポイントほど低かった(図 4)。紋別漁場では春先と夏以降、常呂漁場では周年、ホタテガイの成長および肥大に良い

環境ではなかったといえる。

(4) 考察

2010 年は 2009 年に引き続き、両漁場で貝柱歩留まり不良年となった。また、常呂漁場では、貝柱だけでなく、貝の大きさ自体も 1 年を通して成長がみられなかった。2010 年の餌の指標となるクロロフィル a 濃度は、特に春先に低く、このことが貝の成長および歩留まりに影響したものと思われる。この傾向は 2000, 2006 年と似ていた。一方、紋別は夏季まで、貝柱のサイズは平年値並または上回っていたが、貝柱歩留まり等の内容充実を伴っていなかった。また、夏以降は、成長がみられておらず、貝が大型の年に起こった 2005, 2009 の歩留まり不良現象に似ていた。本年は特に春季の餌不足が歩留まり不良の主な要因と考えられたが 2009 年の紋別漁場のように春に餌濃度が高くても不良年となることもあるため、貝および貝柱の成長を監視し、歩留まり予測につなげるために、さらなるモニタリングの積み重ねと新たな解析が必要となる。

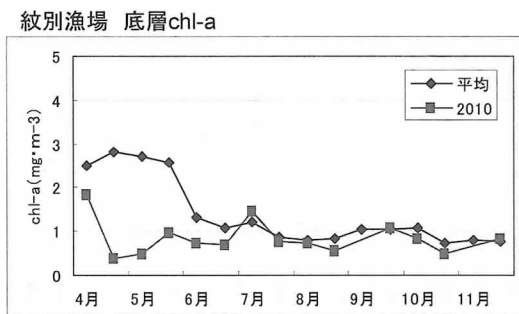
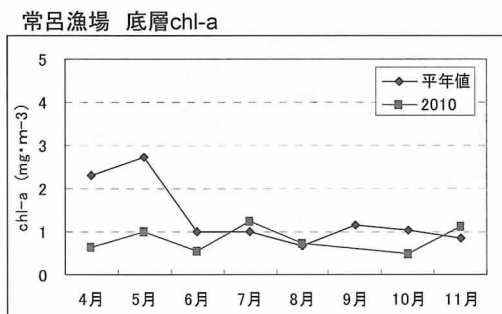
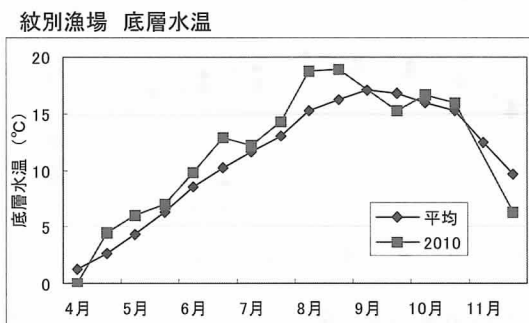
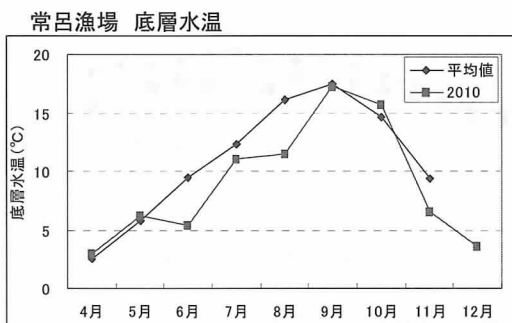


図2 常呂漁場及び紋別漁場における底層水温および底層クロロフィルa

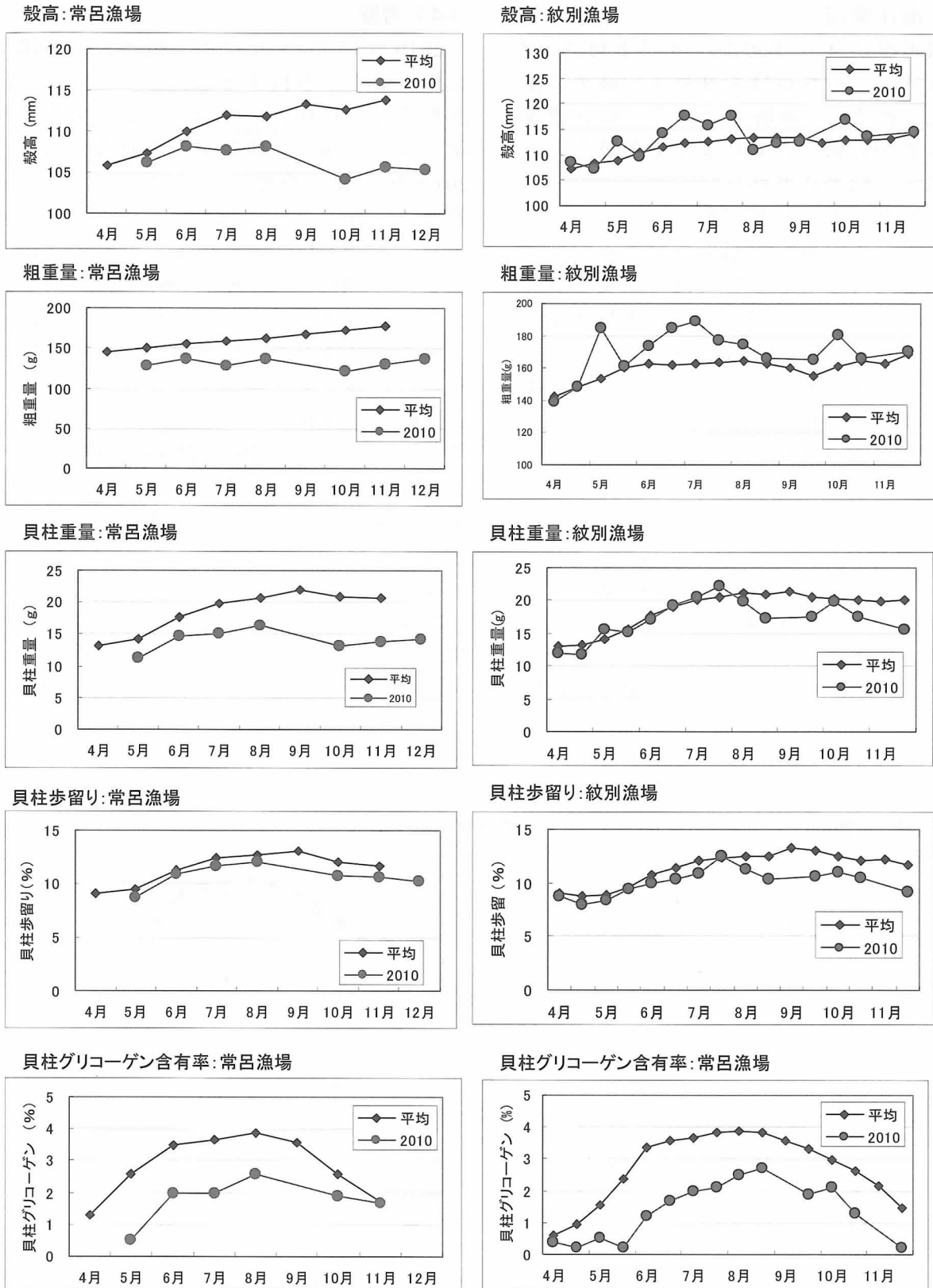
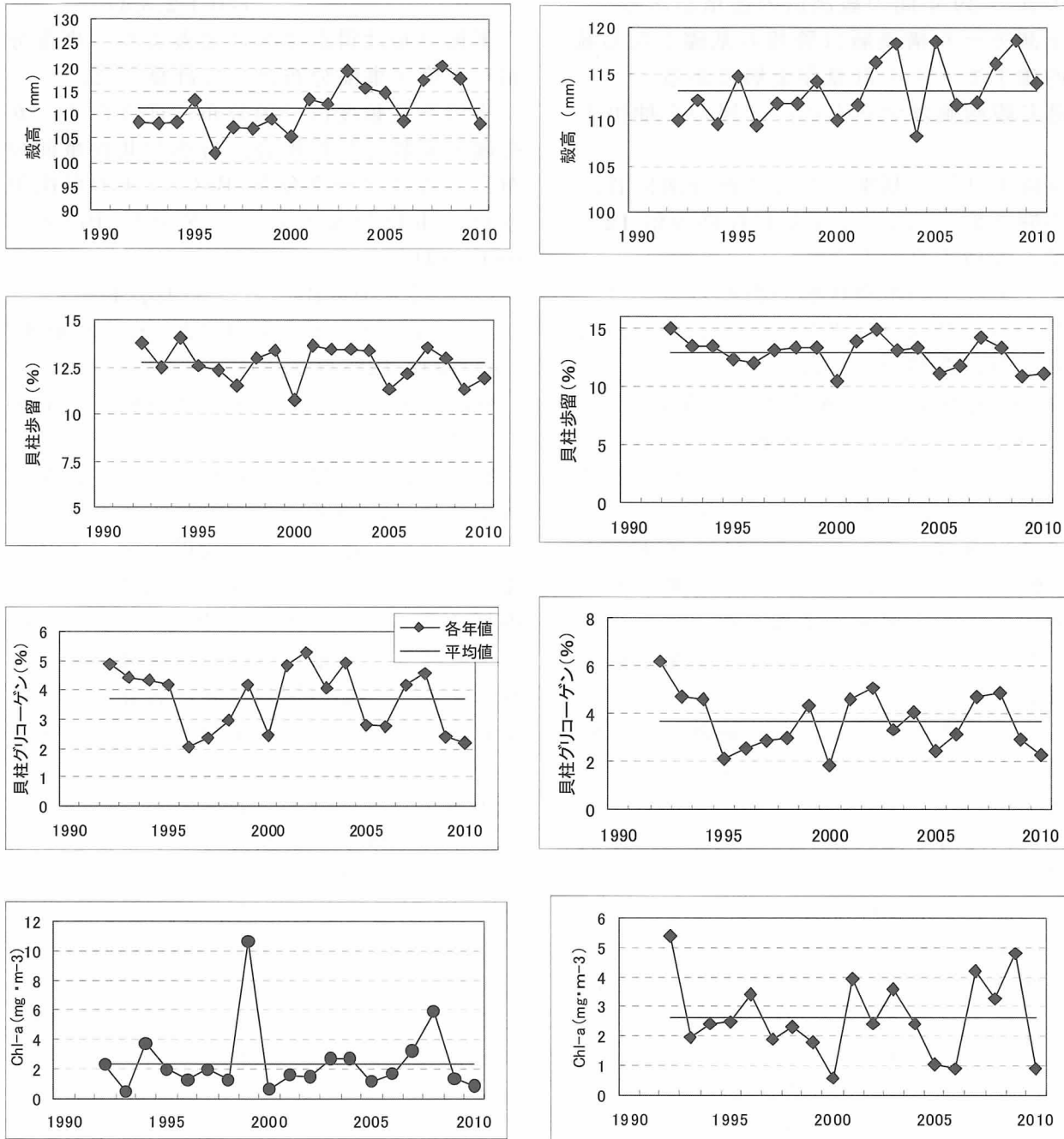


図 3 常呂および紋別漁場におけるホタテガイ測定値 (2010 年)



a) 常呂漁場

b) 紋別漁場

図4 常呂および紋別漁場における殻高, 貝柱歩留, 貝柱グリコーゲンおよびクロロフィルa濃度の経年変化(7~9月の平均値, 横線は平年値)

(5) ホタテガイ貝柱歩留不良警報システム

ホタテガイ貝柱歩留不良警報システムは統計的確率モデルを中核に構築した。

作業内容により, 観測層, データベース層, 予測モデル構築層, 予報層の 4 層に区分される (図 5)。

観測層は, 紋別・常呂海域でのホタテガイ成長モニタリング調査を中心とした観測業務層である。

データベース層は観測層によって得られた観測値を集計し, 観測値データベースを維持する作業層である。紋別海域は 1992 年から 2010 年, 常呂海域では 1991 年から 2010

年の延べ 39 年間の観測値の蓄積がある。

予測モデル構築層は警報の基礎となる統計的確率モデルの計算作業層である。

過去観測値はデータベース層から抽出する。

歩留不良年の基準としては組合関係者からの聞き取りにより、平均貝柱筋歩留 12%未満を歩留不良とした。

ホタテガイの生理状態の指標として最大平均歩留、最大貝柱グリコーゲン濃度の 2 項目、海洋環境としては最大クロロフィル濃度、最大海水温差(最高水温-最低水温)の 2 項目の合計 4 項目を使用した。

4, 5 月の観測データセットの項目ごとに閾値を設定し、0 または 1 の 2 値化をすることで、海域・年ごとに 0 と 1 を要素とする 39 個の 4 元二値ベクトルに変換する。二値ベクトルを要素の総和を得点とし、それぞれの得点に対応した歩留不良発生確率を評価する。

二値化基準となる 4, 5 月の観測値の閾値は、歩留不良年の得点が 2 以上になるよう決定した。

分析に使用した 4 項目の二値化基準は次の通り。

1. 最大平均貝柱歩留

10%未満 = 1

10%以上 = 0

2. 最大貝柱グリコーゲン濃度

1.5%以下 = 1

1.5%より大きい = 0

3. 最大クロロフィル濃度

3.0 mg m⁻³以下 = 1

3.0 mg m⁻³より大きい = 0

4. 最大海水温差(最高水温-最低水温)

3.0℃以上 = 1

3.0℃未満 = 0

歩留不良発生確率は条件付確率と事後分布から計算される事後確率の 2 つにより評価した。

条件付確率は得点ごとに分割表を作成し、定義より、条件付確率 = 同時確率 / 周辺確率として計算した。

$P(\text{歩留不良} | \text{得点 } i) =$

$$P(\text{歩留不良} \cap \text{得点 } i) / P(\text{得点 } i)$$

($i=0,1,2,3,4$)

事後分布は得点ごとに定義より、事後分布 = 尤度 × 事前分布として計算した。

歩留不良頻度は二項分布に従うため、 θ を確率変数とした場合、自然な共役事前分布としてはベータ分布 $Be(\theta ; 1,1)$ が採用され、事後分布 π もベータ分布 $Be(\theta ; p+1, q+1)$ となる。

$$\pi(\theta | \text{得点 } i) = Be(\theta ; p+1, q+1)$$

(得点 i の時、 p : 歩留 12%未満の頻度、 q : 歩留 12%以上の頻度)

事後確率はベータ分布の期待値 $p/(p+q)$ として求めた。

歩留不良発生警報は得点と歩留不良発生確率により段階的に設定し、得点 0 および 1, 2, 3, 4 に対応した 4 段階の歩留不良警報レベルを設定した。さらに紋別・常呂両海域の警戒レベルがいずれも 3 以上の場合、最高度の警報レベル 5 に設定した。これにより、一部の例外を除き警報レベルの数値が大きいほど歩留不良が発生しやすいレベル設定となっている。警報レベルごとの歩留不良発生確率は表 1 に示す。

警報的中確率は事後分布により評価した(表 2)。事後分布はベータ分布であり、 $\theta = 0.5$ 以上の定積分値から評価した。

この結果、警報レベル 2~4 の短期予測と、警報レベル 5 の長期予測の警報的中確率は 50%以上あり、歩留不良警報の短期予測は長期予測よりも信頼性が高い傾向を示した。

予報層はデータベース層から抽出した新規の 4, 5 月の観測値を利用して警報を発表する作業層である(図 5)。予報層の概略は図 6 に示す。予測層により、4, 5 月の新規観測値から、歩留不良になりやすい観測項目を数え上げて、点数化し、条件付確率と事後確率を利用して、6, 7 月の短期予報と 6~10 月の長期予報を出すことが可能となった。

予測モデル構築層で採用した統計的確率モデルの利点は、歩留不良を過去のデータに基づいた確率を介在して、客観的な判断ができ点である。もう一つの利点は、毎年成長モニタリング調査によって蓄積される

測定値を蓄積したデータベース層を維持することで、モデルを更新・改良することが容易な点である。これまで蓄積された観測値はベイズ決定の一種である、MAP決定（最大事後確率決定）を応用することで、単純なスコアよりも、予測精度改善の可能性があり、今後の課題となる。

（6）文献

- 西浜雄二 1994. オホーツクのホタテ漁業. 北海道大学図書刊行会. 札幌. 218pp.
- Osborne, D. R. & P. Voogt 1980. 食品栄養分析(監訳 吉川誠次). 講談社. 東京. 282pp
- 品田晃良, 栗原康裕, 宮園 章 2005. 北海道オホーツク海側沿岸域における地まきホタテガイの成長不良年の予測. 北水試研報 69: 123-128.
- 品田晃良 2006. 地まきホタテガイの成長不良に対する水温および餌濃度の影響. 日本ベントス学会誌 61: 41-44.
- Welschmeyer, N. A. 1994. Fluorometric analysis of chlorophyll *a* in the presence of chlorophyll *b* and pheopigments. Limnol. Oceanogr. 39: 1985-1992.

表2 警報レベル毎の警報中確率の事後分布による評価

| 予報期間 | 警報レベル | | | | |
|-------|-------|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 6, 7月 | 0.00 | 0.50 | 1.00 | 1.00 | - |
| 6~10月 | 0.00 | 0.01 | 0.21 | 0.29 | 0.94 |

表1 警報レベル毎の貝柱歩留不良発生確率

| 予報期間 | 警報レベル | | | | |
|-------|-------|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 条件付確率 | | | | | |
| 6, 7月 | 0.00 | 0.50 | 1.00 | 1.00 | - |
| 6-10月 | 0.00 | 0.14 | 0.63 | 0.71 | 0.83 |
| 事後確率 | | | | | |
| 6, 7月 | 0.06 | 0.50 | 0.90 | 0.89 | - |
| 6-10月 | 0.06 | 0.18 | 0.40 | 0.43 | 0.75 |

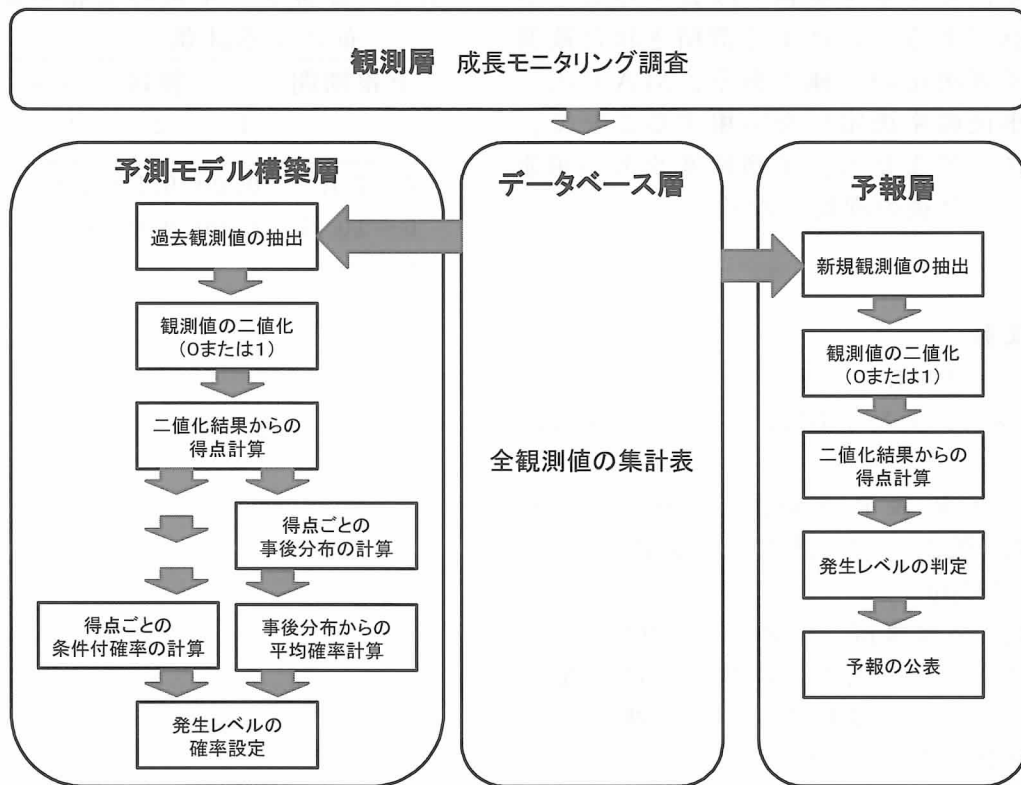


図 5 ホタテガイ貝柱歩留不良予報の仕組み

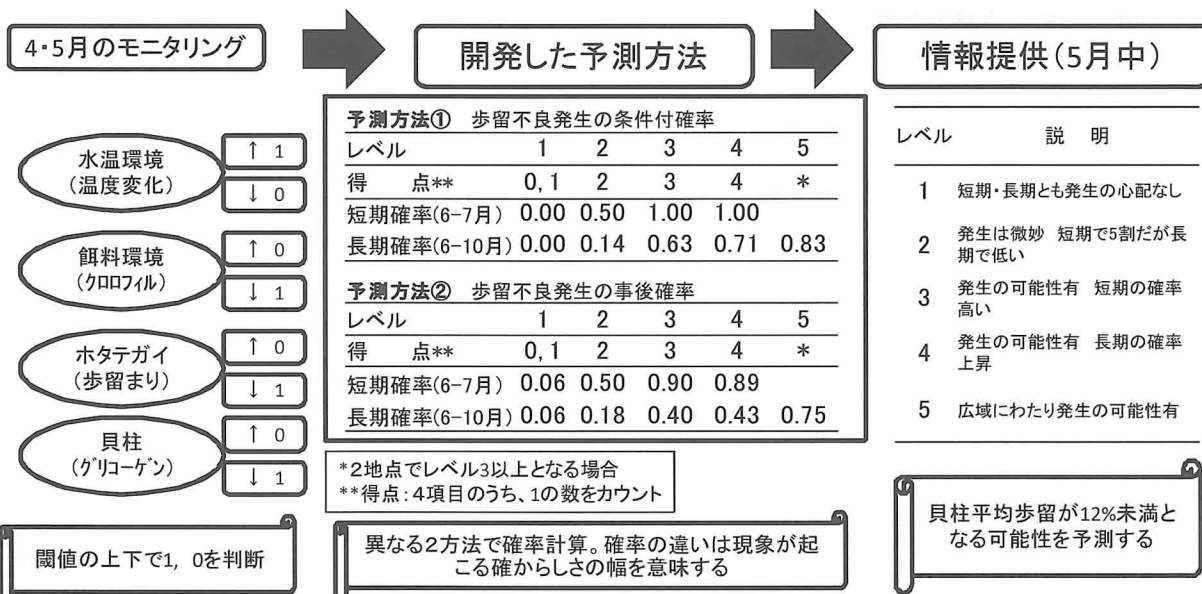


図 6 ホタテガイ貝柱歩留不良予報の予報層の流れ

付表1 常呂漁場ホタテガイ測定データ(2010年)

| 場所と年齢 | | 常呂B区・放流3年貝 | | | | | | | | | |
|-------------|------|------------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 調査年月日 | | '10 | 3/31 | 4/10 | 5/10 | 5/13 | 6/24 | 7/20 | 8/19 | 10/14 | 11/17 |
| 殻高 | mm | - | - | - | 106.1 | 108.2 | 107.7 | 108.1 | 104.1 | 105.7 | |
| 殻長 | mm | - | - | - | 108.1 | 110.9 | 110.1 | 112.8 | 106.3 | 107.5 | |
| 粗重量 | g | - | - | - | 128.3 | 136.3 | 129.0 | 136.3 | 121.8 | 130.2 | |
| 殻重量 | g | - | - | - | 56.7 | 59.6 | 61.4 | 65.5 | 57.2 | 61.7 | |
| 軟体部 | g | - | - | - | 53.9 | 55.2 | 50.6 | 52.0 | 45.4 | 47.9 | |
| 貝柱 | g | - | - | - | 11.1 | 14.7 | 15.1 | 16.3 | 13.1 | 13.9 | |
| 生殖巣 | g | - | - | - | 10.9 | 5.5 | 3.7 | 3.9 | 3.7 | 3.9 | |
| 中腸腺 | g | - | - | - | 5.8 | 5.6 | 4.7 | 4.2 | 3.6 | 3.9 | |
| その他 | g | - | - | - | 26.0 | 29.3 | 27.0 | 27.5 | 24.9 | 26.1 | |
| 生殖巣指数 | % | - | - | - | 20.2 | 9.9 | 7.4 | 8.1 | 8.0 | 8.1 | |
| 貝柱グリコゲン含有率 | W% | - | - | - | 0.5 | 2.0 | 2.0 | 2.6 | 1.9 | 1.7 | |
| 貝柱水分含有率 | W% | - | - | - | 78.6 | 77.6 | 76.8 | 75.3 | 75.8 | 77.6 | |
| 貝柱歩留 | % | - | - | - | 8.7 | 10.9 | 11.7 | 12.0 | 10.8 | 10.7 | |
| 水温 | °C | -0.5 | 3.0 | 6.2 | 5.4 | 11.1 | 11.5 | 17.3 | 15.7 | 6.5 | |
| 底層クロロフィルa濃度 | μg/L | 0.4 | 0.6 | 1.0 | 1.0 | 0.5 | 1.2 | 0.7 | 0.5 | 1.1 | |

付表2 紋別漁場ホタテガイ測定データ(2010年)

| 場所と年齢 | | 紋別・放流4年貝 | | | | | | | | |
|-------------|------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|
| 調査年月日 | | '10 | 3/15 | 3/31 | 4/19 | 4/30 | 5/14 | 6/1 | 6/15 | 7/1 |
| 殻高 | mm | 108.1 | 109.7 | 108.6 | 107.3 | 112.6 | 109.7 | 114.3 | 117.6 | |
| 殻長 | mm | 112.5 | 113.1 | 111.6 | 111.7 | 116.9 | 111.9 | 116.6 | 121.4 | |
| 殻幅 | mm | 27.1 | 27.5 | 26.6 | 26.9 | 28.2 | 27.5 | 28.4 | 28.8 | |
| 粗重量 | g | 152.3 | 154.5 | 138.9 | 148.1 | 185.0 | 160.9 | 173.8 | 184.8 | |
| 殻重量 | g | 69.4 | 70.0 | 66.8 | 66.1 | 79.1 | 75.4 | 78.0 | 82.8 | |
| 軟体部 | g | 51.6 | 55.3 | 47.8 | 53.3 | 68.8 | 56.9 | 61.7 | 66.6 | |
| 貝柱 | g | 13.0 | 14.0 | 11.9 | 11.7 | 15.6 | 15.1 | 17.1 | 19.2 | |
| 生殖巣 | g | 7.3 | 8.1 | 7.7 | 10.2 | 16.8 | 8.8 | 7.1 | 6.9 | |
| 中腸腺 | g | 6.1 | 6.3 | 6.1 | 6.0 | 7.1 | 6.2 | 6.8 | 6.7 | |
| その他 | g | 19.6 | 19.5 | 17.6 | 18.3 | 21.9 | 18.9 | 21.4 | 22.5 | |
| 生殖巣指数 | % | 14.1 | 14.4 | 16.0 | 19.3 | 24.4 | 15.5 | 11.6 | 10.4 | |
| 貝柱グリコゲン含有率 | W% | 0.3 | 0.5 | 0.4 | 0.2 | 0.5 | 1.2 | 1.7 | 2.0 | |
| 貝柱水分含有率 | W% | 78.6 | 78.4 | 78.0 | 77.9 | 78.5 | 77.5 | 77.0 | 76.8 | |
| 貝柱歩留 | % | 8.5 | 9.1 | 8.7 | 7.9 | 8.4 | 9.4 | 9.9 | 10.4 | |
| 水温 | °C | -0.1 | 0.0 | 4.5 | 4.5 | 6.0 | 7.0 | 9.8 | 12.8 | |
| 底層クロロフィルa濃度 | μg/L | 0.5 | 0.4 | 1.8 | 0.4 | 0.5 | 1.0 | 0.7 | 0.7 | |

| 調査年月日 | | '10 | 7/15 | 7/30 | 8/11 | 8/30 | 9/17 | 10/1 | 10/20 | 11/17 |
|-------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 殻高 | mm | 115.9 | 117.6 | 111.1 | 112.4 | 112.7 | 116.8 | 113.6 | 114.4 | |
| 殻長 | mm | 119.5 | 121.3 | 114.4 | 117.7 | 117.1 | 121.3 | 117.5 | 118.3 | |
| 殻幅 | mm | 28.9 | 29.0 | 25.3 | 28.3 | 28.5 | 29.2 | 28.6 | 28.8 | |
| 粗重量 | g | 188.7 | 176.7 | 174.3 | 166.3 | 165.6 | 180.2 | 166.4 | 170.2 | |
| 殻重量 | g | 85.8 | 86.8 | 80.1 | 75.5 | 87.7 | 83.3 | 75.7 | 78.5 | |
| 軟体部 | g | 66.2 | 66.1 | 61.5 | 56.0 | 53.3 | 62.2 | 56.7 | 56.6 | |
| 貝柱 | g | 20.6 | 22.2 | 19.8 | 17.4 | 17.6 | 19.9 | 17.5 | 15.7 | |
| 生殖巣 | g | 6.6 | 5.9 | 5.8 | 5.5 | 4.8 | 5.8 | 5.1 | 5.0 | |
| 中腸腺 | g | 6.6 | 6.5 | 5.8 | 4.7 | 4.9 | 5.5 | 4.9 | 5.1 | |
| その他 | g | 21.8 | 21.8 | 20.2 | 18.6 | 17.1 | 20.1 | 19.1 | 19.3 | |
| 生殖巣指数 | % | 9.9 | 8.9 | 9.4 | 9.7 | 9.0 | 9.2 | 9.0 | 8.9 | |
| 貝柱グリコゲン含有率 | W% | 2.1 | 2.5 | 2.7 | 2.3 | 1.9 | 2.1 | 1.3 | 0.2 | |
| 貝柱水分含有率 | W% | 76.9 | 76.7 | 75.6 | 76.3 | 76.2 | 76.5 | 77.0 | 79.4 | |
| 貝柱歩留 | % | 10.9 | 12.5 | 11.3 | 10.4 | 10.6 | 11.0 | 10.5 | 9.2 | |
| 水温 | °C | 12.2 | 14.7 | 18.8 | 18.9 | 15.2 | 16.7 | 15.9 | 6.3 | |
| 底層クロロフィルa濃度 | μg/L | 1.5 | 0.8 | 0.7 | 0.6 | 1.1 | 0.9 | 0.5 | 0.8 | |