

津軽海峡中央部北東沿岸域におけるマコンブ生産量の変動要因

西田 芳則

Variation Factor of Yields of *Laminaria japonica* at the Northeast Coast in Central Part of Tsugaru Strait

Yoshinori NISHIDA

Laminaria japonica inhabiting the east coast of the Oshima peninsula and the northeast coast of the Tsugaru strait have been cropped in fishery. Yields of *L. japonica* in Hakodate located in the central part of the Tsugaru strait have long-term and short-term periodic variations. The Coastal Oyashio water characterized by low temperature and rich nutrient flows into the Tsugaru strait from the Pacific Ocean during winter and spring. To study a relationship between strength of intrusion of the Coastal Oyashio water and variation in yields of *L. japonica*, current directions and velocities obtained from the ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) mounted in the research vessel Kinseimaru at the east-mouth of the Tsugaru strait were analyzed in relation to the sea-level difference between Fukaura and Hakodate. When sea-level differences were negative, the Coastal Oyashio water flowed into the strait over the cape Shiokubi. Moreover, relationship between sea-level differences averaged from January to March and next-year yields of *L. japonica*, which were removed the periodic variations under 3 years, showed negative correlation. Consequently, survival rates of young sporophytes were probably controlled by the strength of intrusion of the Coastal Oyashio water. Next, year-to-year variation for yields of *L. japonica* were reproduced by using the reproductive model taken the strength of intrusion of the Coastal Oyashio water and the effect of gap regeneration for the kelp forest. From model results, we concluded that the strength of intrusion of the Coastal Oyashio water affected the long-term variation of the yields of *L. japonica*, and the gap regeneration affected the 2 or 3 years variation of the yields of that.

Key words: *Laminaria japonica*, Tsugaru strait, Coastal Oyashio water, sea level difference, gap regeneration

はじめに

北海道の南西に位置する渡島半島沿岸ではマコンブ、ホソメコンブが漁業として採取されている。これら2種の主分布域は津軽海峡の白神岬付近を境にわけられ、日本海側および津軽海峡西部ではホソメコンブが、渡島半島太平洋側および津軽海峡東部ではマコンブがおもに分布している。これら2種の分布域は、日本海沿岸では周年対馬暖流の影響下にあるのに対し、渡島半島太平洋沿岸では、冬～春季にかけて、低水温・高栄養塩で特徴づけられる沿岸親潮水の影響下にある。なお、両海域の中間にある津軽海峡では、対馬暖流起源の津軽暖流が概して東流しているが、海峡を

はさむ日本海と太平洋との潮位差が小さくなる春～冬季にかけては、渡島半島に接岸していた沿岸親潮水が、潮時により、海峡内へ流入している（大谷，1987）。

津軽海峡中央部の函館はマコンブ漁業として成立する西端に位置している。函館市の天然マコンブ生産量は長期的（数十年）な平均でみれば400～500トン year⁻¹ほどで推移し、やや安定しているが、十数年規模の長周期変動がみられている。そのことに加え、年ごとの生産量が2～3年周期で大きく変動することが特徴的である。

コンブ類の生産量の変動する要因について、次のような研究例がある。大谷・大西（1995）はコンブの幼体期の水温に着目し、1912～1985年の1～3月の水温を指数化して日本海のホソメコンブの漁獲量と比較したところ、全体としては各点はばらつき相関関係があるようには見えないが、1930年以降では、コンブ生産量の規模が異なる3群に分けられ相関が得られたことを報告している。また、谷口（1990）は同じコンブ科に属するアラメ群落の更新過程について、成体密度が10個体 m⁻²以上では後継群はあまり形

2002年8月21日受付，2003年2月13日受理

北海道立函館水産試験場室蘭支場

Muroran Branch, Hokkaido Hakodate Fisheries Experimental Station, Funami-cho, Muroran, Hokkaido 051-0013, Japan

現所属：北海道立稚内水産試験場

Present address: Hokkaido Wakkani Fisheries Experimental Station, Suehiro, Wakkani, Hokkaido 097-0001, Japan

nishiday@fishexp.pref.hokkaido.jp

成されないが、5個体未満では顕著に形成され、成体密度が5個体以下に低下し、新たに後継群が形成されるまでには5~6年を要することを報告している。このような群落の更新過程は、陸上森林において林冠のあいた穴（ギャップ）のなかで（光環境が良好になるなどのため）若木が成長し、再び林冠が形成される現象と似ており、ギャップ更新と呼ばれている（例えば谷口，1998）。

本研究では、函館市におけるマコブの生産量変動（長周期・短周期）の要因を探るため、コンブの幼体期にあたる1~3月に焦点を絞り、沿岸親潮水の海峡内への流入の強弱、漁場のギャップ更新の考えを導入したマコブの再生産モデルを作製した。このモデルによって、マコブの生産量変動が再現できたので報告する。

解析方法と資料

沿岸親潮水と津軽暖流水の水温、塩分、栄養塩濃度の比較には、函館海洋気象台が発行する海洋速報（1989~1996）のうち、Fig. 1に示した41°30'N線上の141°40'E, 142°00'E, 143°00'Eの観測点（PH-0, 1, 2）における深度10mの値を引

用した。

津軽海峡内において沿岸親潮水の分布状況を把握するため、1996年2月と1997年3月に函館水産試験場金星丸を用いて、Fig. 1に示した観測点（st. 11~48）においてCTD（conductivity-temperature-depth probe; 米国SBE社製SBE-9 plus）観測を行った。また同時に調査船の船底に設置したADCP（Acoustic Doppler Current Profiler; 日本無線株式会社製JLN-615）による測流を行った。当観測点の最大水深は約300mであり、全ての観測点において対地モードで測流できる。各観測点における流速と流向は、CTD観測のために停船した時間内（約10~15分）において得られたADCPデータ（約20秒毎に受信される）を単純平均して求めた。

力石ら（1987）は津軽海峡西口の海面流速が流れ方向の水位差によって駆動され、コリオリ力により横方向の水位差も生じていることを実証した。海峡内の流れと海峡周辺の潮位変動との比較には、海峡に沿う方向の流れに対してそれぞれ上流右岸側、下流左岸側の位置関係にある深浦と函館を用いた。潮位は函館海洋気象台が実施した潮位観測の資料を、JODC（1973~1998）を通じて提供を受け、東京湾平均海面上の値に補正して使用した。海峡東部海域の流れを潮位差別に集計する際には、当海域において1992~1996年の期間に金星丸のADCPにより観測された深度30mの全流向流速データを用いた。

函館におけるマコブの生産量は、北海道水産現勢（北海道，1962~1997）に記載されている市町村別のコンブ生産量を使用した。このとき、全生産量から養殖生産量を差し引き、天然で採取されるマコブ生産量を見積もり、以下の解析ではこの値を使用した。

結果と考察

道南太平洋に分布する水塊の水温、塩分、栄養塩の特性
1989~1996年の1~2月において、Fig. 1に示したPH-0, 1, 2に分布した水塊のT-SダイアグラムをFig. 2aに示した。なお、Fig. 2aには、津軽海峡から日高沖に至る海域の大谷（1971）による水塊区分をあわせて示した。水温は0~10°C、塩分は32.4~34.0 psuの範囲にあり、津軽海峡東口から襟裳岬にいたる北太平洋には沿岸親潮水（水温2°C以下、塩分33.0 psu以下）、親潮水（水温3°C以下、塩分33.0~33.3 psu）、津軽暖流水（水温6°C以上、塩分33.6 psu以上）が出現していたことがわかる。T-S図上において、これらの範囲に属さない水温4~6°C、塩分33.1~33.5 psuの水塊は、沿岸親潮水と津軽暖流水とを結ぶ直線付近に分布していたことから、両水塊の混合水と考えられる。

ところで、Fig. 2aにおいて、水温2~3°C、塩分33.0~33.3 psuの範囲に分布する水塊は大谷（1971）の区分に従えば親潮水である。しかし、この範囲の水塊は津軽暖流水と沿岸親潮水との混合によっても形成される。大谷（1987）

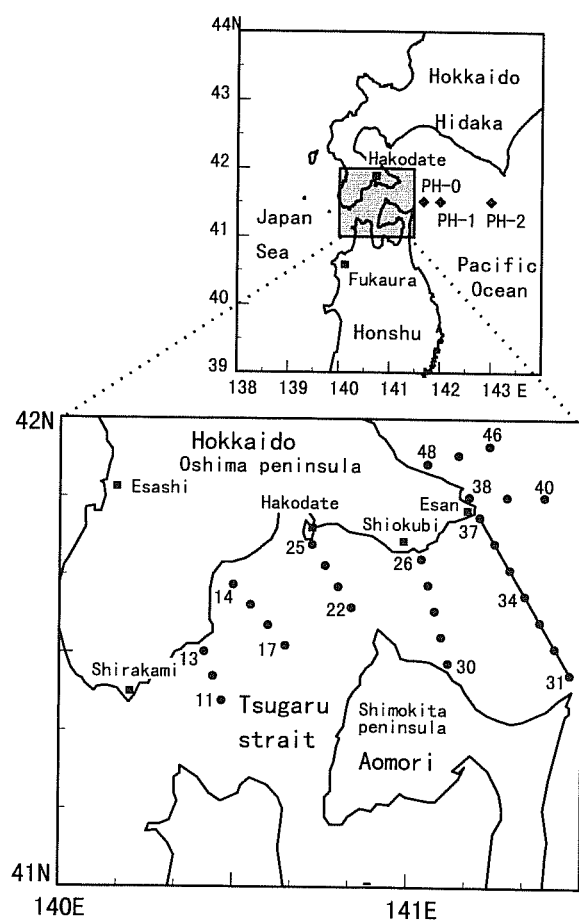


Figure 1. Location of Hakodate, tide stations and hydrographic stations.

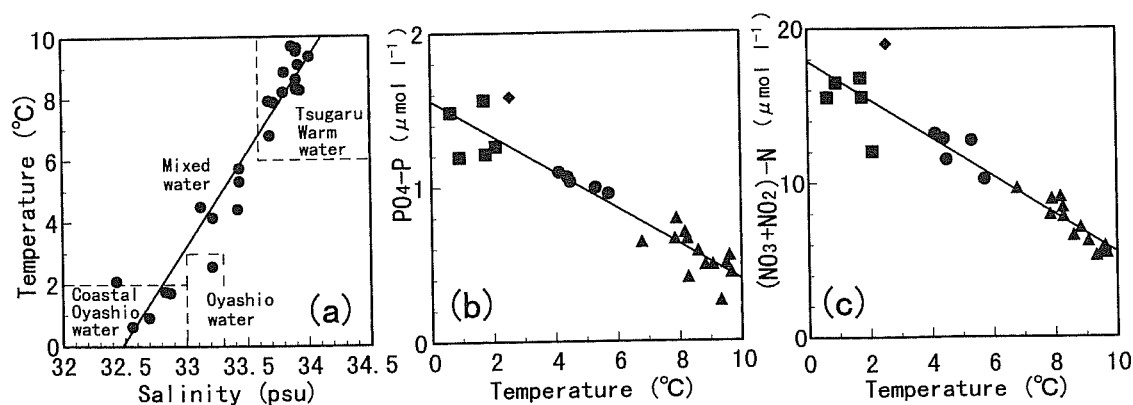


Figure 2. Relationship between (a) temperature and salinity, (b) temperature and $\text{PO}_4\text{-P}$ concentration, and (c) temperature and $(\text{NO}_3+\text{NO}_2)\text{-N}$ concentration at the south (PH-0, 1, 2 in figure 1) of the Hokkaido in the Pacific Ocean. Squares, diamonds, circles and triangles in (b) and (c) denote Coastal Oyashio water, Oyashio water, mixed water and Tsugaru Warm water, respectively.

は津軽海峡内へは沿岸親潮水が流入することを報告している。そこで本研究では、津軽海峡内に出現する水温 $2\sim 3^\circ\text{C}$ 、塩分 $33.0\sim 33.3$ psuの水塊は津軽暖流水と沿岸親潮水との混合水として扱うこととする。

水温と栄養塩濃度（磷酸態磷，硝酸態窒素 + 亜硝酸態窒素）の関係を Fig. 2b, cに示した。磷酸態磷濃度 (P : $\mu\text{mol l}^{-1}$) および硝酸態窒素 + 亜硝酸態窒素濃度 (N : $\mu\text{mol l}^{-1}$) はそれぞれ水温 (T : $^\circ\text{C}$) と負の高い相関関係にあった。回帰式を以下に示す。

$$P = -0.12T + 1.56 \quad (r=0.94) \quad (1)$$

$$N = -1.24T + 17.90 \quad (r=0.94) \quad (2)$$

また水塊別のPおよびNは、沿岸親潮水および親潮水、混合水、津軽暖流水の順に高かった (Fig. 2b, c)。以上の結果は、この時期の津軽海峡内への沿岸親潮水の流入は、水温の低下と同時に高栄養塩をもたらすことを意味している。

津軽海峡東部海域における2~3月の水塊分布

津軽海峡東口における1996年2月と1997年3月の水温、塩分、密度の鉛直断面を Fig. 3に示す。ただし、1997年3月のst. 31, 32は強風のため欠測となった。前述した水塊区分を用いて海峡東口断面における沿岸親潮水と津軽暖流水の分布を以下に比較する。1996年2月には、st. 33~37の100 m深以浅の広い領域を沿岸親潮水 (2°C 以下, 33.0 psu以下) が占めており、津軽暖流水 (6°C 以上, 33.6 psu以上) はst. 31~33の海底に沿ってのみ分布していた。一方、1997年3月には、沿岸親潮水は分布しておらず、混合水の中でも沿岸親潮水の影響を強く受けた水温 3°C 以下、塩分33.2 psu以下の水塊がst. 35~37の100 m深以浅に分布していた。逆に、観測線中央部のst. 33~35では海面から海底までの大部分を津軽暖流水が占めていた。密度の等値線は、1996年、1997年ともに、海峡中央部から北海道側に向け

て分布深度が深くなっており、沿岸親潮水および混合水は沿岸境界流 (花輪, 1984) 的に北海道岸を右手にみるように流れていたことが示唆される。

次に、津軽海峡東部海域における10 m深の水温と流速ベクトルの水平分布を Fig. 4に示す。1996年2月は、津軽海峡東口の大半を沿岸親潮水が占めており、その水塊の先端は汐首岬を超え函館沖近くまで達していた。函館沖では沖側に水温 6°C 以上の津軽暖流水が認められたが、この時の津軽暖流水の流速は1 kt以下の弱い流れであった。一方、1997年3月では、津軽暖流水の分布域である知内から汐首岬にかけての沖合いは流速が2 kt以上の強流域となっていた。沿岸親潮水は、前述したように、海峡内へは流入しておらずst. 40付近に分布していた。しかし、沿岸親潮水の影響を強く受けた水温 $3\sim 4^\circ\text{C}$ の混合水は北海道の沿岸沿いに分布しており、その先端は汐首岬付近まで達していた。このように沿岸親潮水の津軽海峡内への流入状況は観測した2年で大きく異なっているものの、沿岸親潮水の影響を受けた混合水は汐首岬以東では比較的安定して分布していることが示唆される。

海峡東部北海道側の流れと潮位差との関係

1992~1996年の2~3月にかけて、函館水産試験場金星丸が実施したADCP観測で得られた30 m深の流速ベクトルを、深浦と函館の潮位差ごと (20 cm間隔) にまとめて Fig. 5に示した。なお、岩尾 (1992) は海峡中央部の海底に設置したADCPにより得られた各層流速を積算し、この積算流速から推算した流量の変化は深浦-函館の潮位差の変化よりも2~3時間遅れることを報告している。そこで、ここでは、流速ベクトルが得られた時刻よりも3時間前の深浦-函館の潮位差を用いた。潮位差ごとに示した流速ベクトルは各メッシュ (緯度・経度とも3分で区分) 内で得られた流速のベクトル平均値を示している。

潮位差が40 cm以上のときには太平洋へ流出する方向の

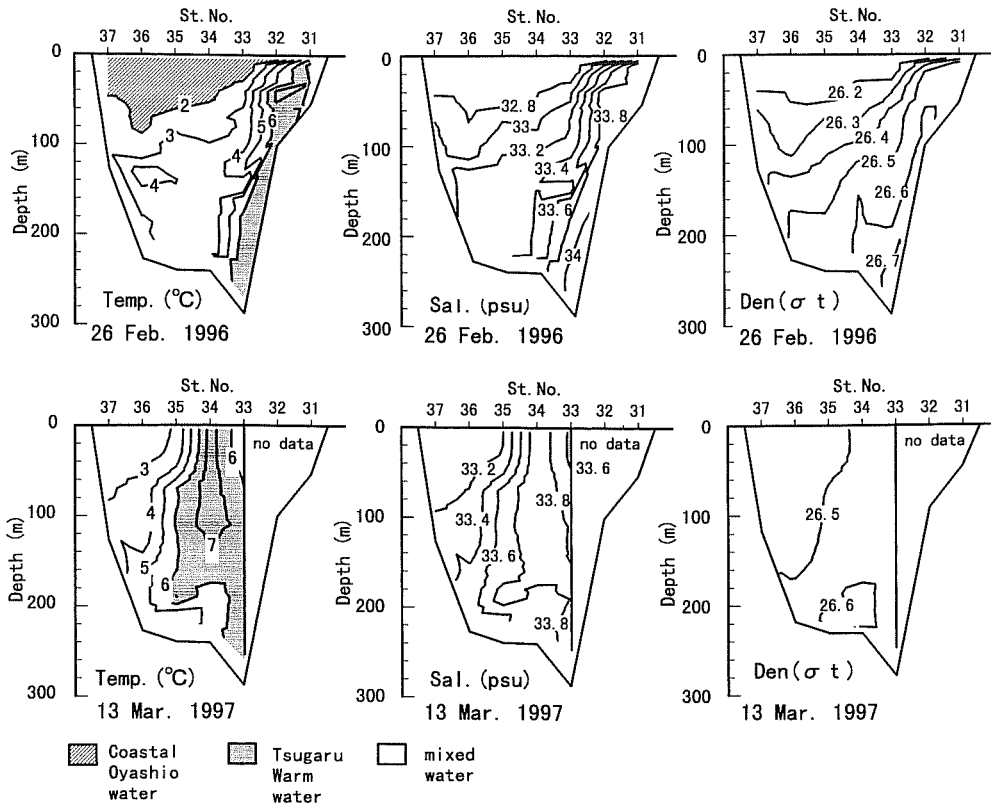


Figure 3. Vertical sections of temperature, salinity and sigma-t at the eastern mouth of the Tsugaru strait.

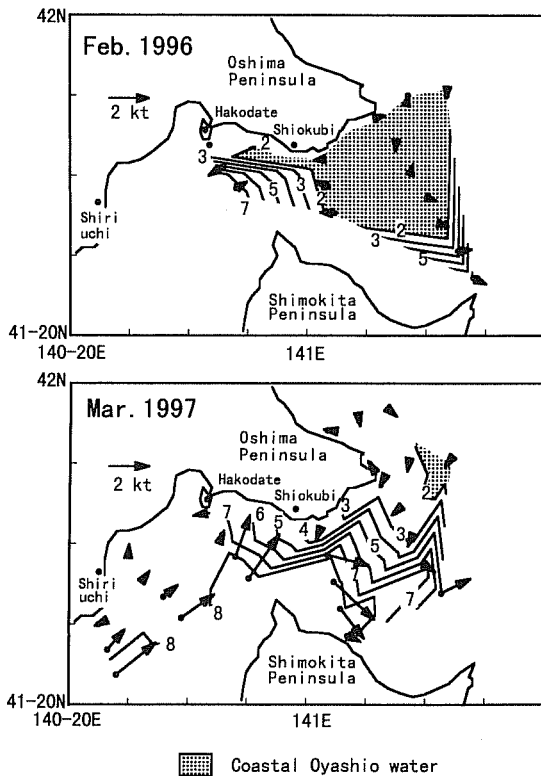


Figure 4. Horizontal distributions of temperature and current vector at 10 m depth.

流れが卓越し、特に汐首岬沖においては約4ktの強流域となっている。潮位差が20~40cmのときには恵山岬から汐首岬にかけては、岸を右手にみる方向の流れが生じているが、汐首岬沖では依然太平洋へ流出する方向の流れが卓越しているため、汐首岬を超えて海峡内部へ流入する流れはみられていない。しかし、潮位差が負になると、汐首岬沖では逆に太平洋から海峡内へ流入する方向の流れが卓越していることがわかる。

ADCPにより得られた汐首岬沖 (Fig. 5の陰影で示した海域) の全流速ベクトルについて、流れの東西成分 (東向きを正) を計算し、この東西流速成分と潮位差 (ADCPによる観測時刻よりも3時間前の値) との相関関係を Fig. 6a に示す。また、流速と同時に得られる海面水温を用いて、東西流速成分と海面水温との相関関係を Fig. 6b に示す。流速ベクトルの東西成分 (V_h : kt) と潮位差 (Δh : cm) との間には高い正の相関 (相関係数 $r=0.97$) があり、潮位差が正のときには東向きの流れが、負のときには西向きの流れが卓越する傾向にある。両者の回帰式を以下に示す。

$$V_h = 0.1\Delta h - 0.2 \quad (3)$$

汐首岬沖における東西流速成分と海面水温の間には相関係数 $r=0.94$ の高い正の相関があり、西向きの流れが生じると海面水温が5°C以下に低下する傾向にあった。以上の

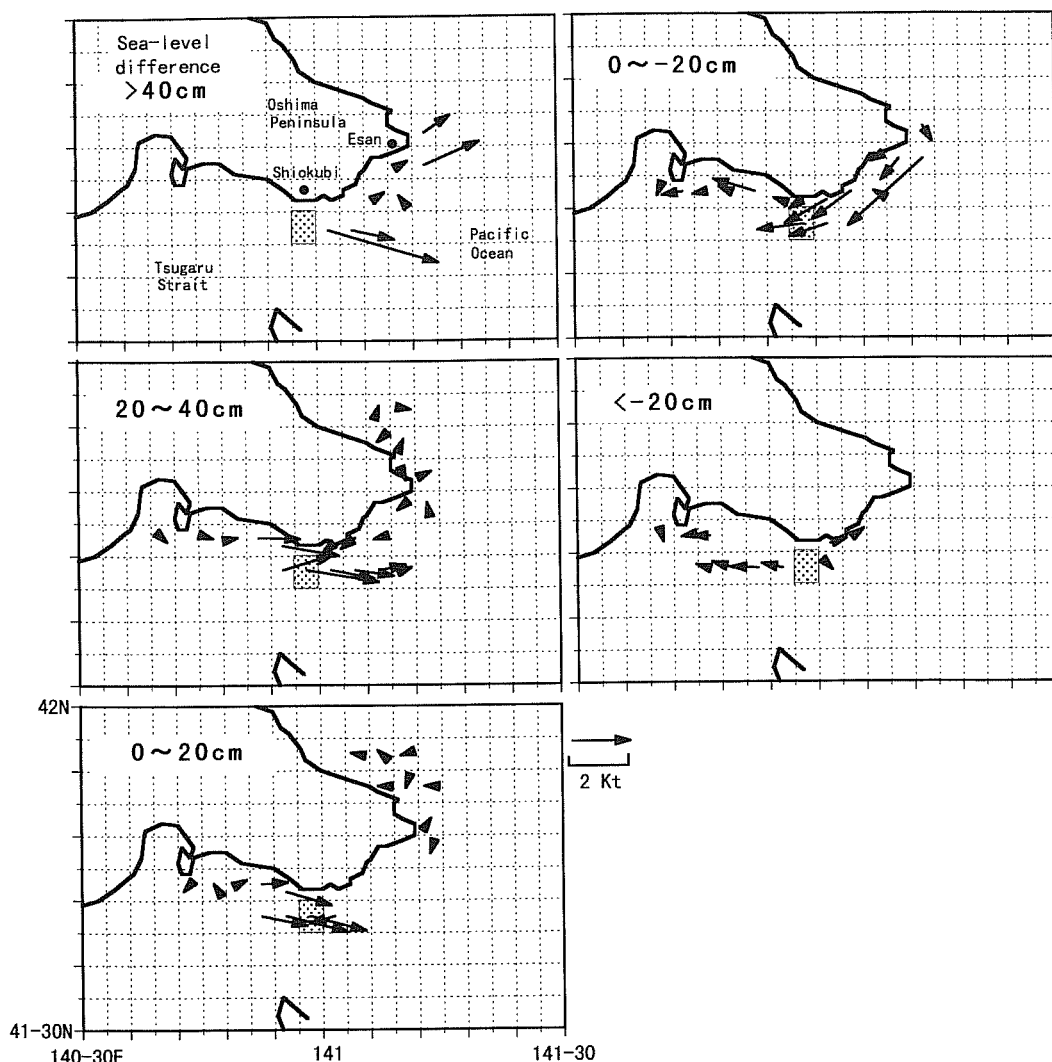


Figure 5. Horizontal distributions of current vector at 30 m depth in the east side of the Tsugaru strait. Those were clarified over each level of the sea-level differences between Fukaura and Hakodate.

ことから、津軽海峡東部海域の流れは太平洋（函館）と日本海（深浦）の潮位差により変動し、深浦と函館の潮位差が負のときには北海道側では西向流が発達することがわかった。この西向流により沿岸親潮水は汐首岬沖をこえて岸沿いに海峡内へ流入すると考える。

ここで、Fig. 4に示した流速分布が得られた時期の深浦－函館の潮位差の時間変化をFig. 7に示した。なおFig. 7に示した陰影部はFig. 4において観測した時間帯を示している。1996年の場合、2月26日3時から約8時間、潮位差が負になっており、潮位差の極小値は約-20cmであった。一方、1997年では潮位差が負になる時間は認められたものの、その持続時間は1996年の場合に比べ短い。また、1997年の潮位差の極小値は1996年に比べ大きいことがわかる。Fig. 4に示した1996年の海峡内の水塊分布において、函館沖のst. 25を観測したのが2月26日10時頃なので、

Fig. 7に示した潮位差の変動から推定すると、st. 25を観測した時は沿岸親潮水および混合水（水温2°C台）の西への張り出しがピークの状況であったと推察される。Fig. 7の潮位差が負になった1996年2月26日3～11時において、(3)式を用いて推算される西向きの流れは23.5 kmである。一方、汐首岬沖から函館沖までは直線距離にすると約23 kmである。したがって、(3)式を用いて推算される西向きの流れと、実際に汐首岬から混合水（水温2°C台）が西に張り出していた位置までの距離（Fig. 4）とはほぼ一致する。

1996年と1997年の1～3月における深浦－函館の日平均潮位差の日変化をFig. 8に示した。深浦－函館の潮位差は正で変動し1日平均でみた場合の汐首岬沖の流れは東向きであることがわかる。一方、Fig. 4に示した観測を行った日の日平均潮位差は、1996年2月26日が約7cmに対し、1997年3月12日が約14cmとなり、1996年2月26日の方が

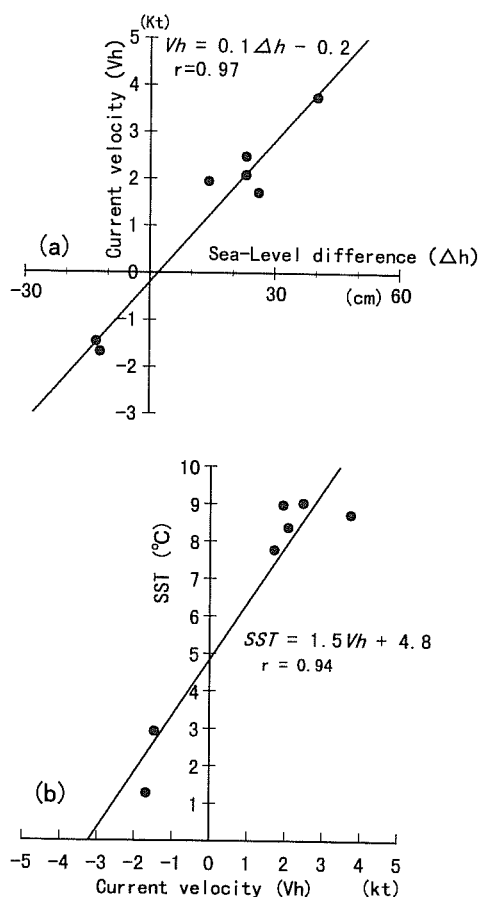


Figure 6. Relationship between (a) sea-level differences (Fukaura-Hakodate) and east-west components of current velocities off cape Shiokubi (30 m depth) and (b) east-west components of current velocities off cape Shiokubi (30 m depth) and sea-surface temperature. Eastward is positive.

小さい。これは、Fig. 7から、周期的に変動する潮位差の極小値が1997年3月12日よりも1996年2月26日の方が小さかったためである。このことを逆に考えれば、日平均潮位差が小さい時は、負の潮位差の絶対値が大きくなるため、西向きの流れが長くなることが予想される。そこで、1982~1996年において、1~3月平均の深浦-函館の潮位差と同期間内において(3)式と負の潮位差(毎時)を用いて計算した西向きの積算流量との関係をFig. 9に示した。1~3月の平均潮位差が小さいほど流量が長くなる関係が得られた。したがって、1~3月の平均潮位差と(3)式を用いて計算される汐首岬沖の流速(V_h)は冬季の沿岸親潮水の海峡内への流入量の指標になると考える。

沿岸親潮水の流入とマコブ生産量との関係

1~3月にかけての深浦-函館での平均潮位差から(3)式により計算した汐首岬沖での流速の東西成分の経年変動をFig. 10aに示した。図中の太い実線は3年以下の周期を以下に示す移動平均法により除去した場合の汐首岬沖流速を

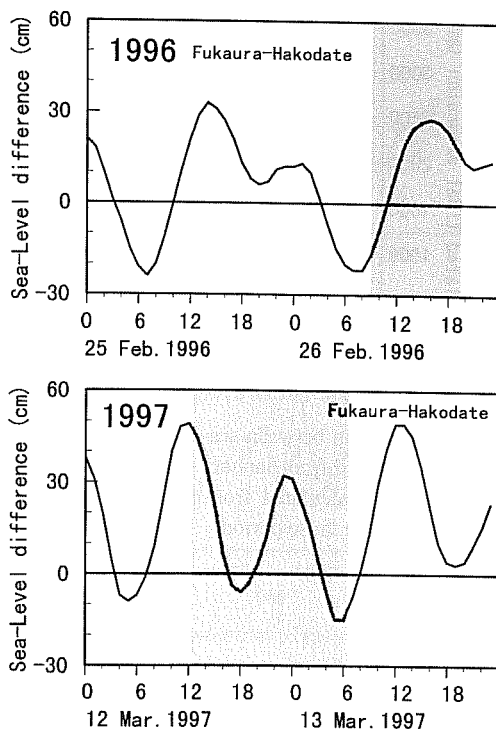


Figure 7. Time series of sea-level differences (Fukaura-Hakodate). The area shaded in figure denote the observation period in fig. 4.

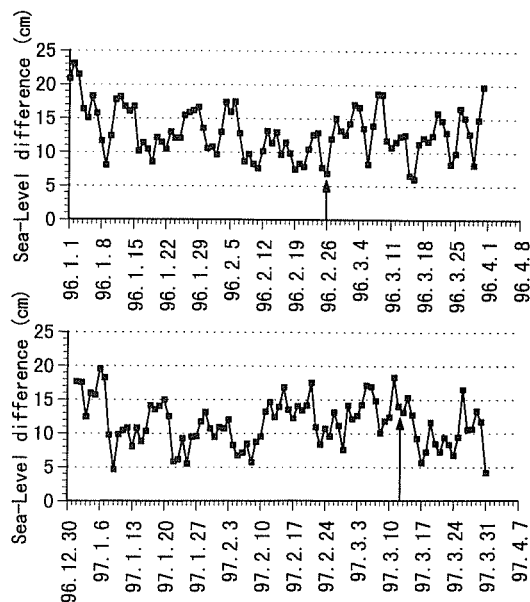


Figure 8. Time series of daily mean sea-level differences (Fukaura-Hakodate). Arrows in figure denote the observation day in fig. 4.

表す。ここで、3年の移動平均法によるフィルター応答係数(FRF)の特性をFig. 11に示した。なお、フィルター応答係数とは単位の振幅をもつ正弦波をフィルターに入力した

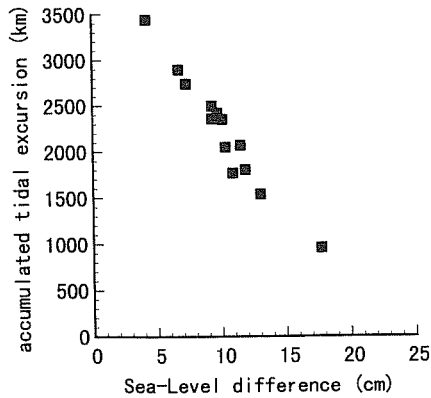


Figure 9. Relationship between sea-level differences (Fukaura-Hakodate) averaged from January to March and accumulated tidal excursions calculated from Eq. (3) and negative sea-level differences in those period.

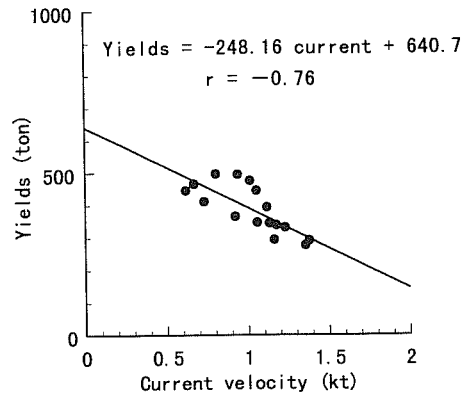


Figure 12. Correlation between current velocities averaged from January to March off cape Shiokubi and next-year yields of *L. japonica* at Hakodate. Plotting data were removed periodical variations under 3 years.

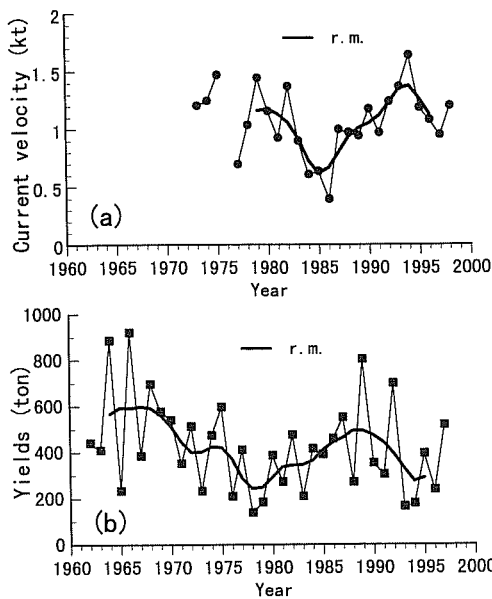


Figure 10. Year-to-year variation of (a) current velocities averaged from January to March off cape Shiokubi and (b) yields of *L. japonica* in natural. Thick solid line (r.m.) denote variations removed periodical variations under 3 years.

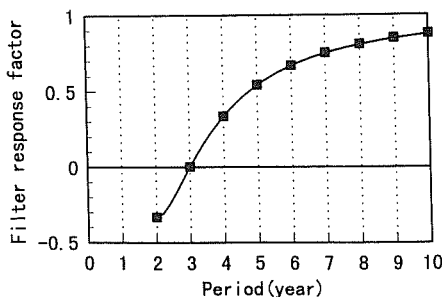


Figure 11. Filter response factor for the 3-point box filter.

時の出力信号の振幅の大きさを示す。3年の移動平均法により、3年周期の変動は完全に除去できるものの2年周期の変動は残り、かつ2年周期の位相は逆位相となって現れることがわかる。そこで、ここでは3年の移動平均を施した後に2年の移動平均をかけて2年周期の変動を消去した。しかし、2年の移動平均をかけると位相が0.5年進むので、さらに2年の移動平均をかけた。このような操作を行い3年以下の周期成分を除去した。

推定流速は1970年代後半から1980年代前半には1~1.5 ktで変動し、1986年には最低の約0.6 ktであった。その後、推定流速は増加して、1994年には最大の約1.6 ktとなった。逆に考えると、津軽海峡内への沿岸親潮水の流入量は、1980年頃から多くなり、1984~86年にピークを迎え1990年代中盤にかけて少なくなっていたと推察される。

函館におけるマコブ生産量の経年変化をFig. 10bに示す。マコブの生産量は推定流速に比べ2~3年周期の変動が卓越しており、この短周期の変動に加えて1960年代半ばおよび1990年前後が極大となり、1980年前後と1990年代半ばが極小となる長周期の変動がみられた。とくに、1980年以降の長周期の生産量変動は、Fig. 10aで示した推定流速が1980年頃から減少するのにもない増加し、推定流速が1985年頃から増加するのにもない1988年頃から減少しており、推定流速の長期変動と逆位相の関係にある。すなわち、栄養塩の高い沿岸親潮水の流入が多い(少ない)時期に生産量が高い(低い)傾向がみられる。そこで、3年以下の変動周期を除去した場合の天然コブ生産量 (Fig. 10bの太実線) と汐首岬沖の流速 (Fig. 10aの太実線) との相関関係をFig. 12に示す。なお、マコブは発芽から2年(発芽した年を1年目とする)で漁獲されるので、Fig. 12には当年の推定流速と翌年のマコブ生産量との関係を示した。天然コブ生産量と汐首岬沖流速との間には、

相関係数 $r = -0.76$ の負の相関関係があった。したがって、1980年以降の函館の天然コンブ生産量は、前年の1~3月に沿岸親潮水が津軽海峡内へ流入した量に伴い増減していると推察された。

マコンブ漁場のギャップ更新と生産量変動との関係以下では、Fig. 10a, bに示した天然コンブの生産量、汐首岬沖の流速を次式により標準化し（それぞれ C_z , V_z ）

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (4)$$

両者の変動を比較する (Fig. 13a)。ここで、 z が標準化値、 x が変数、 μ が平均値、 σ が標準偏差を示す。標準化を行った期間は、生産量が1981~1997年、推定流速は1980~1996年とした。なお、図にはコンブ生産量が得られた年を基準にプロットしているため、推定流速は図に示した年よりも1年前の値となっている。また、推定流速とコンブ生産量との間には逆位相の関係がみられたため (Fig. 10a, b)、標準化した推定流速 (V_z) に -1 をかけて図に示した。したがって、Fig. 13aに示した推定流速が大きい（小さい）年は沿岸親潮水の海峡内への流入が多い（少ない）ことを意味する。1980~1983年では推定流速と生産量の変動は一致しているのがわかる。しかし、1985~1987年では、推定流速がコンブ生産量よりも大きくなっている。また、1988~1990年では、1989年にコンブ生産量は極大になっているが、推定流速はほぼ一定値で推移している。したがって、コンブの生産量変動には沿岸親潮水の海峡内への流入量だけでは説明できない変動成分が含まれていることがわかる。

一般に岩礁域における海藻類の植生は水深により変化している。例えば同じコンブ科に属するマコンブとガゴメの場合、マコンブの主な生育水深はガゴメの生育水深よりも浅い。このことは、種が再生産を繰り返すことのできる水深帯の面積には限りがあることを示している。マコンブの寿命は2年なので、例えば2年目マコンブの生育本数が多い年は、1年目マコンブの発生できる面積が少なくなり、その結果1年目マコンブの発生本数が少なくなることが予想される。そこで、コンブの発生できる面積がその後のコンブ生産量に与える影響について調べるため、汐首岬沖の流速 (V_h) と1年目マコンブの発生可能面積 ($M-A$) を説明変数とした重回帰分析を行った。ここで、 M はコンブ漁場の面積、 A は2年目マコンブの生育面積を表す。なお、ここで用いるコンブ漁場の面積、2年目マコンブの生育面積は以下の仮定のもとに生産量から推定することとした。

2年目マコンブの繊維状根の占有面積を (S)、2年目マコンブの繊維状根あたりの重量を (Q)、2年目マコンブの生育面積を (W) とするとマコンブの生産量 (C) は次式で近似できる。

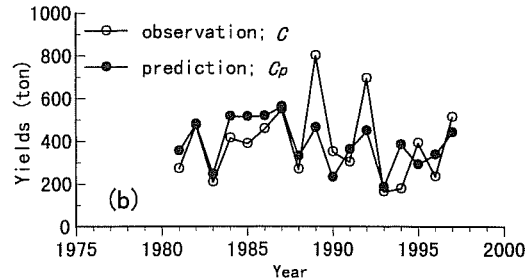
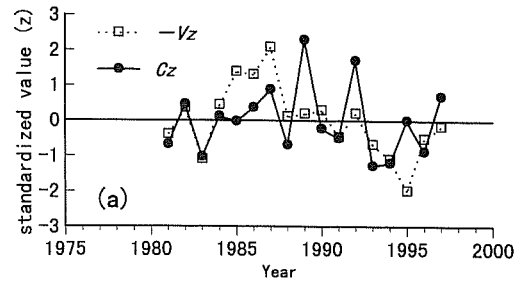


Figure 13. Year-to-year variation of (a) standardized current velocity averaged from January to March and yields of *L. japonica* in natural and (b) yields of *L. japonica* in natural and the prediction calculated from eq. (6).

$$C = S^{-1} \cdot Q \cdot W \quad (5)$$

ここで、本研究では $S^{-1} \cdot Q = 1$ と仮定する。このことによりマコンブ生育面積はマコンブ生産量であらわすことができる。また、コンブ漁場の面積 (M) は、1962年以降の実際のマコンブ生産量の2年積算値の最大が約1300トンなので、 $M = 1300$ とした。

重回帰式を以下に、この回帰式から推定した生産量 (C_p) と実際の生産量 (C) の変動を Fig. 13b に示す。

$$C_p = 304.2 + 0.454(M-A) - 318.5V_h \quad (R=0.63) \quad (6)$$

C_p の1988~1990年の変動は1989年が極大となっており、 C の変動と一致していることがわかる。前述したように、1989年が極大となる変動は汐首岬沖の流速 (Fig. 13a) には現れていない。また、Fig. 13a から1984~1987年では流速の標準化値が大きくなっており、この期間は沿岸親潮水が多量に流入していたことが推察されるが、Fig. 13b に示したこの期間の C_p は沿岸親潮水の流入量から推定されるほど多くはなく、 C に近い値になっている。このような結果が得られたのは、重回帰式に $M-A$ の説明変数を取り入れたためである。

しかし、1990~1991年にかけては、 C は低下していたのに対し C_p は増加していた。また、1993年以降の C と C_p の変動は一致していない。(6) 式の回帰係数の検定を行ったところ、 V_h の係数は危険率5%で有意となったが、 $M-A$ については有意な結果は得られなかった。このような C と C_p

の変動の不一致は、 $M-A$ がコンブ生産量の変動と関連がないことを示しているのではなく、重回帰分析という手法では天然コンブ生産量の変動を十分に再現できないことを示していると考える。

次節では、沿岸親潮水の流入、漁場のギャップ更新の効果を取り入れたマコンブの簡単な再生産モデルを作製し、マコンブ生産量変動の再現を試みる。海中林の維持機構にギャップ更新が重要であることは、既に大型多年生海藻であるアラメやカジメなどで認められている（谷口，1990；前川，1999）。ただし、アラメやカジメの海中林の更新において重要なのは、林冠を形成する大型個体が流出した場所（ギャップ）には明るい光がさしこむという点である。マコンブの場合、2年目マコンブが1年目マコンブの発芽に光障害を与えているかどうかについてはわかっていない。したがって、本研究でのギャップ更新とは、あくまでも、2年目マコンブの流出により生じたギャップは1年目マコンブの発生に利用されるという意味で用いる。

マコンブ生産量変動のモデル解析

1) マコンブの再生産モデル

マコンブの再生産モデルをFig. 14に示した。図中に示した L_n は1年目マコンブの生育面積を、 A_n は2年目マコンブの生育面積を、添字の n は年を表す。モデルでは同一年内に同一年級群が重複するのを避けるため、年の始めを10月にした。したがって、10~12月に遊走子を放出するマコンブは実際は1年目マコンブであるが、モデルでは2年目マ

コンブとして扱っている。

本モデルではマコンブの再生産関係を次のように単純化した。 n 年の10~12月にかけて2年目マコンブは遊走子を放出する。遊走子は拡散によりマコンブ漁場全体に分布するが、発生可能な遊走子は、 n 年のギャップの大きさ $(M-A_n)$ により既定される。また、1年目マコンブの生育本数は、沿岸親潮水の流入の強弱に起因した生残率 $(0 \leq \beta_n \leq 1)$ を通し減少することとした。沿岸親潮水の流入量の強弱は1~3月平均の汐首岬沖の流速を指標とする。最終的に発生できた1年目マコンブの生育面積 (L_n) は、発生可能な生育面積 $(M-A_n)$ と生残率 (β_n) との積であらわされる。 L_n は時化などの物理的な減耗 $(0 \leq \alpha_n \leq 1)$ を受けて減少し、 $n+1$ 年に A_{n+1} となる。ただし、本モデルでは、再生産期のギャップの大きさ、および沿岸親潮水の流入に焦点をあてるため、最終的に発生できた1年目マコンブが占有する面積はマコンブが2年目へ移行しても変化しない $(\alpha_n=1)$ と仮定した。一方2年目マコンブは8月頃から漁獲され、漁獲されずに漁場に残ったマコンブは10月までには枯死し漁場から流出する。以上述べてきたことを式の形で表すと、

$$L_n = (M - A_n) \cdot \beta_n \quad (7)$$

$$A_{n+1} = L_n \quad (8)$$

となる。ここで(7)式の $(M-A_n)$ がギャップ更新の効果を

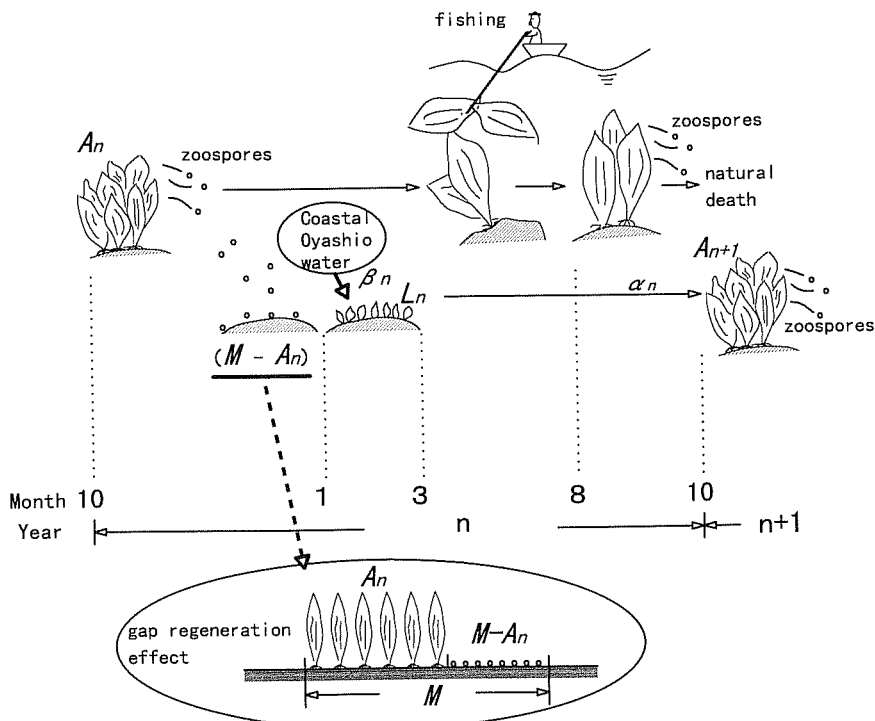


Figure 14. Reproductive model for *L. japonica*.

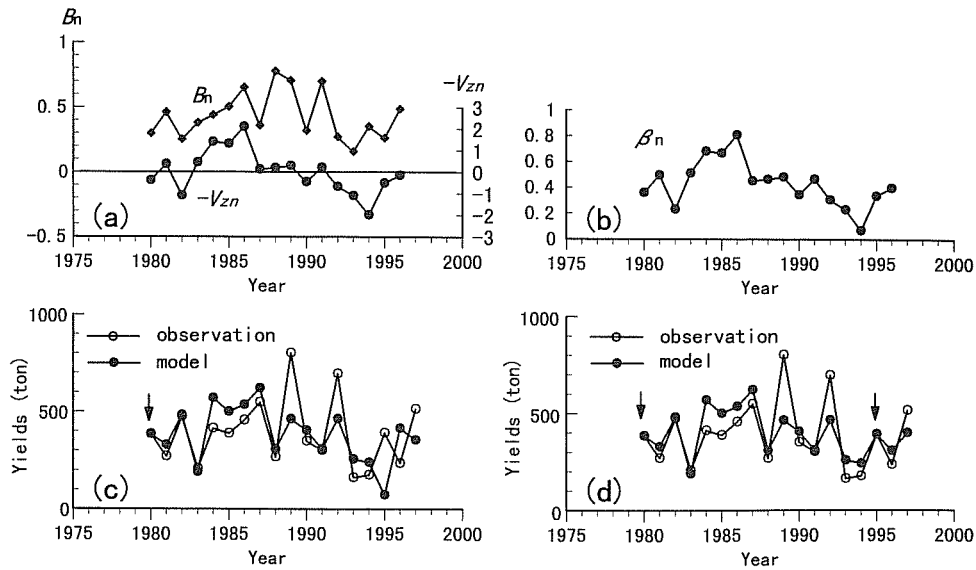


Figure 15. (a and b) Year-to-year variation of B_n , $-V_{zn}$ and β_n and (c) A_{n+1} calculated from eq. (11) and yields of *L. japonica*. The arrow in figure denotes the year putting for the initial value. (d) Same as (c), but for the two years putting for the initial value.

表す。(7)式を(8)式に代入し L_n を消去すると、

$$A_{n+1} = (M - A_n) \cdot \beta_n \quad (9)$$

となる。つまり、 M と β_n が決まれば、初期値(A_0)を代入するだけで L_n の情報なしに A_{n+1} を求めることができる。

2) モデルの生残率

前述したように、本モデルではコンブの発生初期の生残率である β_n を沿岸親潮水の流入量の関数であらわし、沿岸親潮水の流入量は1~3月平均の汐首岬沖の流速を指標とする。汐首岬沖の流速はFig. 13aに示した流速値($-V_{zn}$)を用いることとした。ここで、 β_n の取りうる範囲は $0 \leq \beta_n \leq 1$ なので、 $-V_{zn}$ そのものを β_n として使用することはできない。そこで本研究では、 β_n の平均値・標準偏差は、実際の生産量を(9)式に代入して計算される各年の生残率(ここで計算された生残率を(9)式の β_n と区別するため B_n で表す; Fig. 15a)の平均値・標準偏差と一致することとした。このことにより、 β_n は $-V_{zn}$ に B_n の標準偏差を乗じ、 B_n の平均値を加えることにより求められる。 B_n の変動の平均値、標準偏差はそれぞれ0.43, 0.18であり、 β_n は以下の式で表される。

$$\beta_n = -0.18V_{zn} + 0.43 \quad (10)$$

β_n の変動をFig. 15bに示した。

(10)式を(9)式に代入し変形すると、

$$A_{n+1} = (M - A_n) \cdot (-0.18V_{zn} + 0.43) \quad (11)$$

となる。

3) モデルから推定した生産量変動

(11)式の $M=1300$ 、1980年の生産量を A_n の初期値($A_0=385$)として与えて計算した A_{n+1} の経年変化をFig. 15cに示した。1981~1994年では、モデルと実際の生産量変動は一致していることがわかる。特に1984~1987年のモデルの生産量は、実際の生産量が1985年に低下し、1986年から1987年にかけて増加する変動を再現している。Fig. 13bに示したように、重回帰式ではこの期間の変動を忠実には再現していない。また、重回帰式から推定した生産量は1990~1991年、1993~1994年にかけて増加していたが(Fig. 13b)、モデルで推定した生産量は、1990~1991年では低下し、1993~1994年ではほぼ同じ値になっており、実際の生産量の変動と一致した変動を示した。このように、モデルでは1980年の生産量を初期値として(11)式に代入するだけで、その後14年間の生産量変動をほぼ現わすことができた。

しかし、1989, 1992年の生産量の増加に関して、モデルでは両年の生産量増加を表すことができたものの、ピークの高さまでは再現できなかった。1992年の天然コンブの増産に関して、佐々木(1992)は1991年2月に発生した時化により大型海藻が漁場から流出したため、長期生存配偶体の発芽率が高まったことが原因であると報告している。長期生存配偶体とは光制限などの環境要因により長年発芽できずに存在している配偶体をいう。本モデルでは長期生存配偶体の再生産過程は考慮していないため、1992年の生産量のピークの高さを再現できなかった可能性がある。

(11)式に1995年の実際の生産量を代入して、そのあとの生産量変動を調べた(Fig. 15d)、初期値を代入した年が

1980年の場合 (Fig. 15c) では、1995年以降の生産量変動が実際の生産量変動と逆位相の関係にあったが、1995年の実際の生産量を (11) 式に代入することにより実際の生産量変動と連動した生産量変動を得ることができた。

以上のことから、函館のマコンブ漁場ではギャップ更新による生産量変動が生じていることが考えられた。

本研究ではコンブの幼体期にあたる1~3月の海況に焦点をあて、コンブ生産量との関係を調べた。その結果、幼体期に海峡内へ流入する沿岸親潮水の流入量が多い (少ない) と翌年のコンブ生産量は増加 (減少) することが明らかになった。このことは、沿岸親潮水の流入は幼体の生残を高める役割を果たし、この時期の幼体の生残はその後の生産量にまで影響を及ぼすことを示している。本研究により幼体期の生残に影響を与えていた環境因子は、沿岸親潮水がもたらす低水温、高栄養塩であったと考えられた。コンブは周年、水温、栄養塩、光、ウニ類の摂食圧などの影響を受けながら生長するため、コンブの生産量変動を検討する際には幼体期以外の環境変動も考慮する必要がある。しかし、津軽海峡のように沿岸親潮水の西方への張り出しの末端に相当する海域では、年による水温、栄養環境の変化が大きいいため、この変動の影響が顕著に天然コンブの生産量に現れたものと考え、今後は、コンブの幼体の生残に影響を与えていたのは、水温、栄養塩のどちらなのかについて明らかにする必要があると考える。

謝 辞

本研究をまとめるにあたり、大谷清隆博士には、生前、貴

重なご助言をいただいた。また、北海道大学水産学部 磯田豊助教授には再生産関係におけるモデル作りについて研修を受けた。ここに感謝の意を表す。さらに、原稿の作成に際しご助言をいただいた網走市水産科学センター西浜雄二博士、調査にご協力頂いた函館水産試験場金星丸の乗組員の皆様にお礼申しあげる。そして、原稿に対し有益なコメントを頂いた査読者の方々に感謝する。

引用文献

- 函館海洋气象台 (1989-1996) 海洋速報, 函館海洋气象台。
 花輪公雄 (1984) 沿岸境界流. 沿岸海洋研究ノート, **22**, 67-82.
 北海道 (1962-1997) 北海道水産現勢, 北海道水産林務部。
 岩尾尊徳 (1992) 津軽海峡の流れについて (2). 月刊海洋, **24**, 226-229.
 JODC (1973-1998) 朝夕観測 (毎時潮高) データ, 日本海洋データセンター。
 前川行幸 (1999) 海中林の維持機構. 磯焼けの機構と藻場修復, 日本水産学会編, 恒星社厚生閣, 東京, 38-49.
 大谷清隆 (1971) 噴火湾の海況変動の研究 II. 噴火湾に流入・滞在水の特性. 北大水産彙報, **22**, 58-66.
 大谷清隆 (1987) 津軽海峡西部への沿岸親潮水の流入. 北大水産彙報, **38**, 209-220.
 大谷清隆・大西光代 (1995) 北海道南西沿岸のこんぶ生産量の春ニシン漁獲量と沿岸水温による重回帰分析. 海の研究, **4**, 175-185.
 力石國男・萩原快次・後藤勇二 (1987) 津軽海峡の潮流と潮汐. 月刊海洋, **19**, 26-33.
 佐々木 茂 (1992) 戸井海域のコンブの生活と海洋環境調査報告書. 戸井町。
 谷口和也 (1990) 牡鹿半島沿岸におけるアラメ群落の更新過程. 東北水研研報, **52**, 9-12.
 谷口和也 (1998) 磯焼けを海中林へ. 裳華房, 東京, 145-149.