

水温・塩分濃度の変化がコマイ卵の後期卵発生過程とふ化に及ぼす影響

陳 二郎^{*1}, 吉田英雄², 桜井泰憲³

¹北海道伊達市旭町7-34

²元北海道立総合研究機構水産研究本部

³(一財) 函館国際水産・海洋都市推進機構函館頭足類科学研究所 (北海道大学名誉教授)

Effects of various temperature-salinity conditions on post embryonic-hatching process of Saffron cod (*Eleginus gracilis*)

ARE-LANG CHEN^{*1}, HIDEO YOSHIDA² and YASUNORI SAKURAI³

¹ 7-34 Asahi-machi, Date, Hokkaido 052-0034

² Formerly: Fisheries Department, Hokkaido Research Organization, Hamanaka-cho, Yoichi, Hokkaido 046-8555

³ Hakodate Cephalopod Research Center, Fisheries and Ocean Hakodate, 20-5, Benten-cho, Hakodate 040-0051, Japan
(Professor Emeritus, Hokkaido University)

The post embryonic-hatching process of saffron cod *Eleginus gracilis* was examined at 28 different temperature-salinity conditions ranging from -1.3 to 3.3°C and from 10 to 33‰. Our results indicate that the relationship between temperature and the number of days to 50% hatching was exponential. The hatching process observed at constant conditions (< 0°C, 32~35‰) as well as increasing temperatures (1.3~3.3°C) or decreasing salinities (10~20‰) indicate that the advanced developmental stages were acclimated to higher temperatures rather than salinity dilution. Complete yolk absorption of hatched larva occurred within 19 days at 1°C and 13 days at 3°C. Artificially fertilized eggs incubated in suspended basket and transplantation in Lake Saroma, developed up to stage IV~V in 43~51 days in the beginning of March, and up to stage V in 66 days by late March. Natural water temperature gradually increased from below zero and abruptly reached around 3°C in the middle of April. Their normal hatching period was supposed to 80 to 100 days. Laboratory analysis and field results indicate that increase in water temperature triggers early hatching of saffron cod and occurs simultaneously with melting of ice.

キーワード：塩分希釈, ふ化率, 地蒔き, コマイ, 卵発生, 卵収容バスケット, 水温, 水温上昇

陳ら (2018) は、厚岸湖で採取したコマイ親魚を活魚輸送し、実験室内で人工受精した卵を用いて、水温と卵の発生速度および水温、塩分と発生卵の生残との関係を調べた。その結果、卵の正常発生に適切な水温は2°C以下、塩分は20~25以上であることを明らかにした。また、コマイのふ化日数は長く、卵の発生後期の期間がスケトウダラに比べて長いことが明らかになった。しかし、自然海水の「かけ流し」を使用したことにより、実際の結氷下の安定した氷点下水温 (-1.8~-1.5°C) を想定した飼育実験を行えなかった。また、結氷環境下から融氷時にかけての水温と塩分の変化がふ化に与える影響は不明のままである。

そこで本研究では、安定した氷点下水温を維持できる実験装置を用いることで氷点下環境にごく近似した状態を再現し、氷点下水温と発生速度、発生卵の生残と水温および塩分濃度と発生卵の生残との関係を調べた。さらに、発生卵の後期ステージにおいて卵に様々な組み合わせによる水温、塩分変化を与えて、卵発生からふ化までの間の最適な水温と塩分を調べた。これと並行して、経時的に環境測定が可能なサロマ湖で、冬期 (12月) から春期 (4月下旬) にかけての産卵場の環境調査、人工受精卵の氷下における垂下バスケットへの収容および地蒔きによる現場での発生試験を行った。

試料および方法

水温, 塩分の調査および塩分測定方法 コマイの産卵場における冬季から春季間の水温, 塩分濃度の推移について, 1987年12月から1988年4月までの期間, サロマ湖北東部の栄浦沖の水深10~12mの地点の深度8m (Fig. 1) に垂下された海況調査用の設置型自記流向流速計 (型式MTCM-5, ACM-4) からデータを取得し水温, 塩分の経日変化を求めた。塩分測定値は電気伝導度を介しているため無単位であるが, 後述する室内実験においては, 赤沼式比重計を用いたため%で表示した。

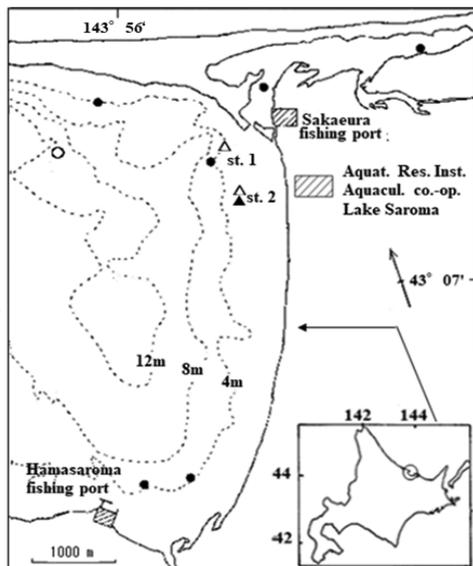


Fig. 1 Sampling and experiment stations in Lake Saroma.
 ● : Sampling stations (Set net)
 ○ : Water temperature, salinity and current meters
 ▲ : Experiment station (incubation baskets st. 2)
 △ : Experiment station (transplantation st. 1 and 2)

親魚の採集, 輸送, 受精方法および卵の輸送 採卵用の親魚は, 1988年1月20日および26日にサロマ湖北東部の栄浦, 南東部の浜佐呂間の氷下待網から得た (Fig. 1)。なお, 親魚の輸送方法は, 前報 (陳ら, 2018) における実験と同様に行った。

コマイの人工受精は, サロマ湖養殖漁業協同組合サロマ湖養殖調査研究センターにおいて, 搬入した雌親魚から必要量の完熟卵を1L容量のプラスチック製ボールに搾出し, 精液を少量振りかけて鳥羽で混合する乾導法により行った。これらの受精卵を, 濾過海水を満した10L容器に収容し, 卵同士が粘着して卵塊にならないよう十分かき混ぜ, 数回の換水を繰り返して, 余分な精子や汚れを取り除いた。

洗浄した受精卵を, 海水で湿らせた20×30cmのガー



Fig. 2 Devices of captive experiment in Faculty of Fisheries Hokkaido University.
 Water and cooling bath were covered by styrofoam board to keep the stable water temperature.

ゼに付着させて4~5層に重ね, 発泡スチロール箱に収容した。受精卵の周囲を氷または雪で覆うことで温度を0~2℃に保ちながら, 航空機または車で函館の北海道大学水産学部まで輸送した。なお, 本実験に使用した1月20日および26日に得られた受精卵について, 前者を“A卵”, 後者を“B卵”と呼称する。

卵・仔魚の飼育実験

1. 卵のふ化と水温, 塩分との関係 氷点下水温における卵の飼育と実験には, エチレングリコールを冷媒とした水冷式恒温槽1台 (Fig. 2) を用いた。卵を水温-1.8~-1.5℃, 塩分32~35%の止水条件で曝気を加えながら胚体形成途中 (受精後32~38日の2月27日) まで飼育し, 正常発生している卵を選別した。選別は, 卵に温度変化を与えないように, 外気を入れて室温を下げた状態で行った。選別した卵は, 1Lビーカー28個にそれぞれ360~450個の範囲で収容し, 水温-1.8~-1.5℃, 塩分32~35%の条件下で, さらに20日間かけて胚体形成の後期まで飼育した。その後, 対照区となるビーカーを除く実験区では設定した水温もしくは塩分濃度となるように加温と希釈操作を加えた。実験の手順を, Table 1, Fig. 3に示した。加温操作は, ビーカーを2基の空冷式恒温器に移し, 3日かけて (3月20日~23日) -1.3℃からそれぞれ1.3℃もしくは3.3℃まで水温を上げた。また, 希釈操作は加温操作途中から3~7日かけて (3月22日~29日), 20, 10%前後および3%以下の濃度になるまで, ピペットを用いて毎日全量の1/10あるいは1/5を脱塩素水に交換することで行った。加温・希釈後は, それぞれ実験区の水温, 塩分を維持した。対照区と希釈を行ったビーカーの塩分は, 実験終了後に比重計にて測定し, ほぼ所定の塩分にあることを確認した。なお, 換水は加温, 希釈操作を行う前

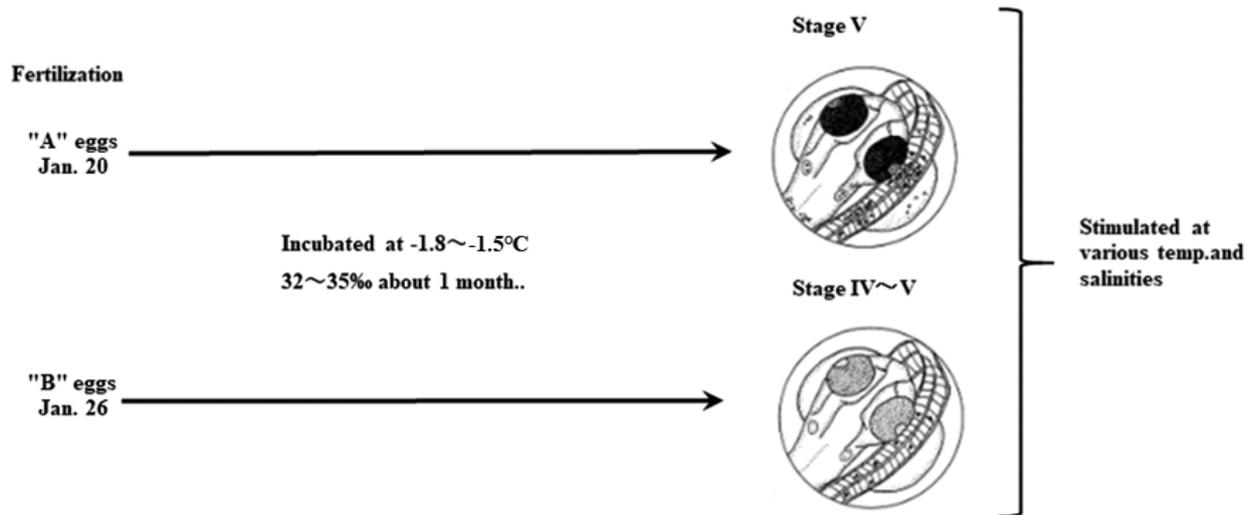


Fig. 3 Summary of experimental method for temperature-salinity combinations.

Table 1 The conditions and results of the experiments to find the relation between saffron cod hatching and temperature salinity relationships. Salinity was measured by hydrometer.

Sample & Stage	Acclimated Temp. (range)	Acclimated Sal.(‰)	No. of eggs	No. of hatching	Integrated hatching rate(%)	Days for 50% hatch from acclimation (from fertilization)		
Sample A	V	33.7	417	131	31.4	34(96)		
		-1.3	19.7	407	249	61.8	47(109)	
		(-1.7~-0.4)	9.4	391	1	0.3	-	
	V	1.3	34.4	406	317	78.1	13(75)	
			34.2	360	311	86.4	14(76)	
			(0.8~2.4)	22.5	442	334	75.6	13(75)
			12.0	404	334	82.7	15(77)	
	V	3.3	32.9	417	304	72.9	8(70)	
			32.4	435	409	94.0	6(68)	
			(2.0~4.7)	20.8	411	74	18.0	8(70)
			11.7	403	271	67.2	7(69)	
			33.8	424	2	0.5	-	
Sample B	IV~V	33.6	399	116	29.1	38(96)		
		-1.3	19.4	417	212	50.8	58(114)	
		(-1.7~-0.4)	20.3	395	256	64.8	49(105)	
	IV~V	1.3	10.3	430	323	75.1	43(109)	
			34.8	415	134	32.3	21(77)	
			33.2	394	213	54.1	21(77)	
			22.0	415	186	44.8	22(78)	
	IV~V	3.3	(0.8~2.4)	21.2	405	129	31.9	21(77)
			11.6	432	225	52.1	22(78)	
			2.5	429	0	0	-	
			33.4	406	267	65.8	14(70)	
			33.7	398	182	45.7	14(70)	
IV~V	(2.4~4.7)	21.4	451	232	51.4	14(70)		
		21.1	408	276	67.6	16(72)		
		11.2	403	225	55.8	14(70)		
		2.3	410	0	0	-		

には週1回程度行っていたが、操作終了後は蒸発分の補充にとどめた。西浜雄二氏（当時網走水産試験場増殖部魚介科長私信）によると、1987年2月5日快晴のサロマ湖水下（氷雪層70cm）水深3mにおける照度は161Luxであった。そこで、照明器具をビーカー表面が100-160Lux程度になるよう設置し、明暗周期は12L-12Dとした（明状態、9:00~21:00）。氷点下における水温は、エチレングリコールを含む自動車エンジン冷却液を入れた恒温槽の水温を - 2.0~-1.8℃程度に保ち、循環させることで調整した（Fig.4）。ふ化率は、日毎のふ化数を加算する積算ふ化率として設定した。さらに、全体の25%がふ化してから75%がふ化を終えるまでの期間に着目し、この期間をふ化日数とした。この実験でふ化した仔魚は、毎日午前中にビーカー毎に取り上げ、その個体数、奇形の有無を調べ、体長を測定した。



Fig.4 Photograph of 1L beakers in cooling bath. Liquid in cooling bath is automobile engine coolant.

2. 卵黄吸収過程および行動等の観察 ふ化後0~2日目の仔魚を、32~35%の塩分で、1℃もしくは3℃に保った1Lビーカー内に、それぞれ100~130尾収容して無給餌で飼育した。卵黄吸収過程および吸収日数を調べるため、数日おきにビーカーから10~15尾取り上げて、体長と卵黄の長径および短径を測定した。卵黄の体積は、卵黄を楕円形にみたてた視認面積として計算した（円周率×卵黄長径×卵黄短径）。また、10~20個体の仔魚を長径30cmのガラス製水槽に収容し、外気を取り入れて水温を2~3℃に保った状態で、1~2日間隔で遊泳行動を観察した。

現場における受精卵の垂下試験および地蒔き調査 1988年の冬期、結氷したサロマ湖において本調査を行った。受精卵の収容箱は養殖生け簀用のプラスチックメッシュバスケット（内径35×52×27cm、以下バスケットと略称）であり、この中に2個の角型バスケット（26×37×12cm）を収容した。この角型バスケットは底面と側面

に目合約0.3mmのナイロン製網地を張ったものであり、その内部に受精卵を付着させた後、上からやや浅めの角型バスケット（26×37×6cm）をかぶせて卵の散逸を防いだ（Fig.5）。垂下試験のための媒精は、1988年1月16日および19日の計2回行い、それぞれ1個のバスケット（2個の角形バスケット）に受精卵を収容後、直ちにFig.1に示した地点（st.2 水深3m前後）まで運び、氷に穴を開けて箱の位置が海底から1m弱になるように、また、融氷時に流されないように浮きと沈子で固定して設置した。2個のバスケットの設置間隔はおおよそ5~6mであった。バスケット内の2個の角形バスケットのうちの1個は、3月3日に引き上げて、すべての卵を回収した。なお、残りの1個は3月24日に引き上げて、200~300個の卵を採取した。その後、再び垂下し、完全に融氷が終了した4月27日に最終的に回収した。卵数は角形バスケット1つあたり15,000~20,000粒であった。卵を採取した後、これを実験室に持ち帰り発生段階を観察した。



Fig.5 Basket used for incubation experiment at Lake Saroma.

一方、地蒔き調査は1月13日にFig.1に示した地点（st.1）で氷に穴を開けて、数時間前に媒精した30,000~40,000粒の受精卵を水表面から直接海底へ沈降させた（水深3m前後）。また、続く1月21日にも垂下されたバスケットから5~6m離れた地点（Fig.1 st.2）へ同様に地蒔きした。3月3日の角形バスケット回収と並行して、地蒔きした受精卵を、Fig.6に示したように、内径6cm、長さ6mのテフロン製ホースの先端に細いビニール製のエアチューブをさしこみ、氷上の潜水用ポンベから空気を送るエ

アリフト装置を用いて、海底の卵と砂礫を海水と共に吸い上げ、NORPACネット（目合0.33mm）で濾して回収した。なお、地蒔き前に、同様の方法で砂礫を吸い上げて自然卵がないことを確認した。これらの採集物は実験室に持ち帰り、砂礫中から卵を選別し、発生段階を観察した。



Fig.6 Sampling method of fertilized eggs sucked up by aeration in a suction hose.

サロマ湖とその周辺におけるコマイ産卵期は、1月16日から26日までの間に得られた採卵用親魚の他に、1月11日の能取湖、18日のサロマ湖から得た漁獲物の生殖腺の状態から推測した。

結果

発生と水温との関係 サロマ湖養殖漁協研究センターで1月20日と26日に媒精した卵を、北海道大学水産学部にて飼育し、前報（陳ら，2008）で示された7発生段階に至る所要日数のデータを得た。前報の厚岸における飼育水温条件（0.0, 2.0, 4.0℃）に、本実験の-1.3℃（実験開始からふ化に至るまでの平均水温）における50%所要ふ化日数（Table 2）を対応させた結果をFig.7に示した。この図から、発生速度はこの水温範囲内においては高水温ほど速くなることがより明らかとなった。また、-1.3℃から4.0℃までの計11実験区における平均水温と50%所要ふ化日数（Table 2）の関係を基に、日暮・田内（1925）の実験式を適用して、50%ふ化日数と飼育水温との関係を求めた結果、以下の指数関係が導きだされた（Fig.8）。

$$D=75.06e^{-0.17T}$$

D: 50%ふ化に必要な日数

T: 飼育平均水温（℃）

$$r^2=0.965$$

Table 2 Summary of hatching and temperature for 50% hatching. Salinity was measured by hydrometer.

Experimental condition	Mean temp.from fertilization to 50% hatching	Salinity (‰)	Days for 50% hatching
This study	-1.3	33.7	96
	-1.3	33.6	96
	-0.2		80
	-0.4		72
	0.3		73
	0.0	32.0~	76
	0.0	34.0	78
Chen <i>et al.</i> 2018	2.0		50
	2.0		55
	4.0		39
	4.0		43

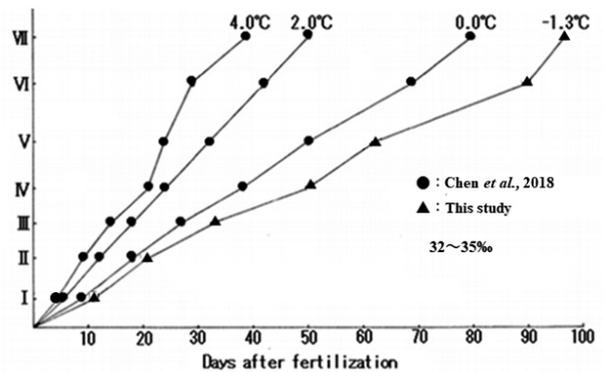


Fig.7 Relation between the embryonic developmental stages and the days after fertilization at different temperature conditions at 32~35‰. stage I : Gastrula, II : Appearance of optic vesicle, III : Embryo at the yolk circumference, IV : Appearance of pigments, V : Head height as the radius of egg, VI : 1st hatching, VII : 50% hatching, Salinity was measured by hydrometer.

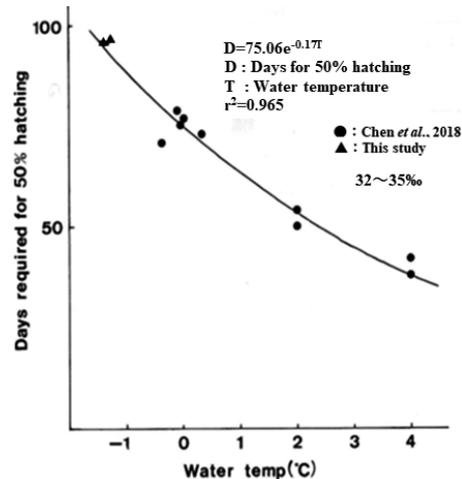


Fig.8 Relation between water temperature and time in days required for 50% hatching. Salinity was measured by hydrometer.

この式から算出した50%ふ化日数は、おおよそ-1℃で89日、0℃で75日、2℃で53日、4℃で38日であった。ふ化仔魚の形態と行動および水温と卵黄吸収日数の関係塩分32~35‰下でふ化した仔魚の形態を観察した。前報(陳ら, 2008)で記したように、顕鏡下で加温されたことにより茶褐色の卵膜が透明化し、仔魚は頭部よりふ出した(Fig.9)。仔魚はふ化直後から数日後まで通常水底に横たわるか鉛直方向に遊泳し、水面近くから沈む行動を繰り返した。しかし、卵黄吸収が進むと次第に水面直下を浮遊するか、時々表面を遊泳するようになった。卵黄吸収が進んだ仔魚あるいは完全に吸収した仔魚の平均体長は5.94mm (range 5.68~6.21)で、尾部の2ヶ所の色素叢は発達し、腹面で色素胞が連続している個体も認め

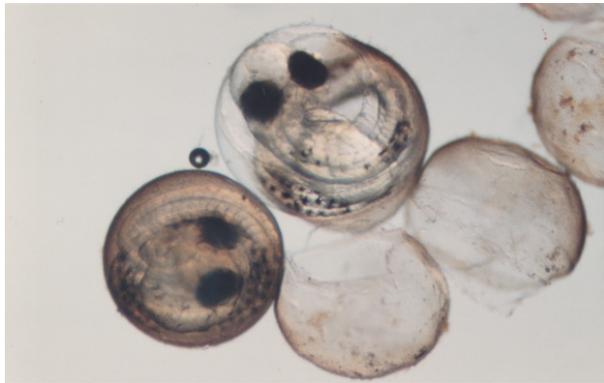


Fig.9 Larvae just after hatching, which was triggered with increasing temperature by strong light under microscope.

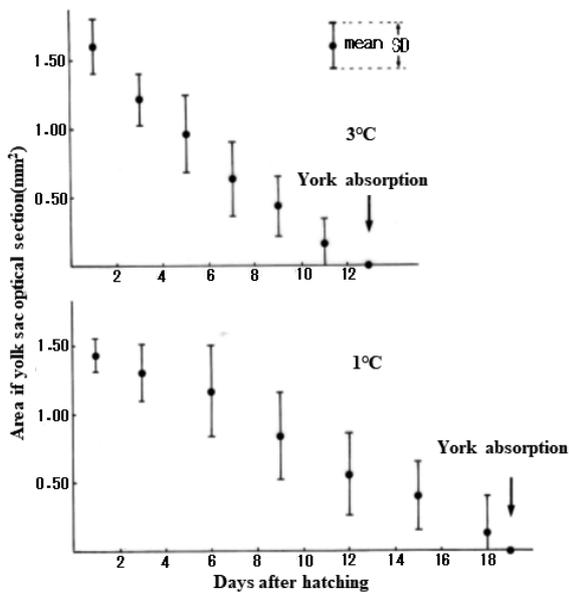


Fig.10 Changes in the size of yolk sac with the lapse of time after hatching at 1 and 3°C and at 32~35‰. Salinity was measured by hydrometer.

られた。ふ化後の卵黄は徐々に吸収され、完全に消失するまでの日数は1℃もしくは3℃の飼育条件で、それぞれ19日、13日と高温ほど短縮された(Fig.10)。

卵のふ化と水温、塩分濃度との関係 本実験では2個体の親魚から得た受精卵(それぞれA卵, B卵)を用いた。A卵, B卵の加温と希釈操作開始時の発生段階は、それぞれstage Vおよびstage IV~V(胚は卵黄を約1.5周)であった(Fig.3)。

Table 1に示した全実験28例のうち、水温の対照区(-1.3℃)、加温後1.3および3.3℃に設定した区をそれぞれ-1.3℃区、1.3℃区、および3.3℃区とした。また、塩分については33.2‰以上を33‰区、19.4~22.5‰を20‰区、9.4~12.0‰を10‰区、2.5‰以下を0‰区とした。たとえば、A卵の飼育条件を-1.3℃、33.7‰に設定した実験区の場合、A卵-1.3℃ 33‰と表した。

2つの0‰区は、ふ化の限界値を探るためのものであり、卵は全てふ化せず死亡したため解析から除外し、3~9‰をふ化に要する塩分の下限と認めた。A卵-1.3℃ 10‰区では、実験途中で凍結を起こして卵が死亡し、またA卵3.3℃ 20‰区とB卵対照区(B卵-1.3℃ 33‰区)の1例では、死卵が多くふ化率が低かったため解析から除外した。これら5区以外の23実験区ではふ化率に幅がみられたものの、奇形はほとんど認められず、正常な状態でふ化したものとみなした。ふ化は、A卵1.3℃、3.3℃区の一部において希釈操作が完了しないうちに始まった以外、大部分は操作終了後3日以上過ぎてから始まった。

Fig.11に、それぞれA卵, B卵について水温、塩分の組合せ毎に積算ふ化率の推移を示した。なお、Table 1のピーカーを2個ずつ設定した実験区のうち、一方が死亡もしくは低いふ化率のため除去した実験区(B卵-1.3℃ 33‰区)以外の7実験区(A卵1.3℃ 33‰区、3.3℃ 33‰区、B卵-1.3℃ 20‰区、1.3℃ 33‰区と20‰区、3.3℃ 33‰区、および20‰区)については、2つの実験区で得られた数値を平均して表した。以下にA卵およびB卵のふ化の概要を記した。

ふ化は、A卵およびB卵とも水温が高い区ほど早く始まった。A卵の対照区(-1.3℃ 33‰区)ではふ化率が31.4%と最も低く、かつふ化日数は12日と比較的長かった。これに対して、水温あるいは水温、塩分両方の変化を加えた区では、その変化の程度に無関係に、ふ化率は67.2(3.3℃ 10‰区)~83.5%(1.3℃ 33‰区平均)と高くなり、かつふ化日数は2および4日と極めて短縮されていた。しかし、塩分のみを変えた区(-1.3℃ 20‰区)ではふ化率が61.8%と上昇したものの、ふ化日数は15日と対照区と比べて大きな変化はみられなかった。

B卵の対照区(-1.3℃ 33‰区)におけるふ化率は29.1%

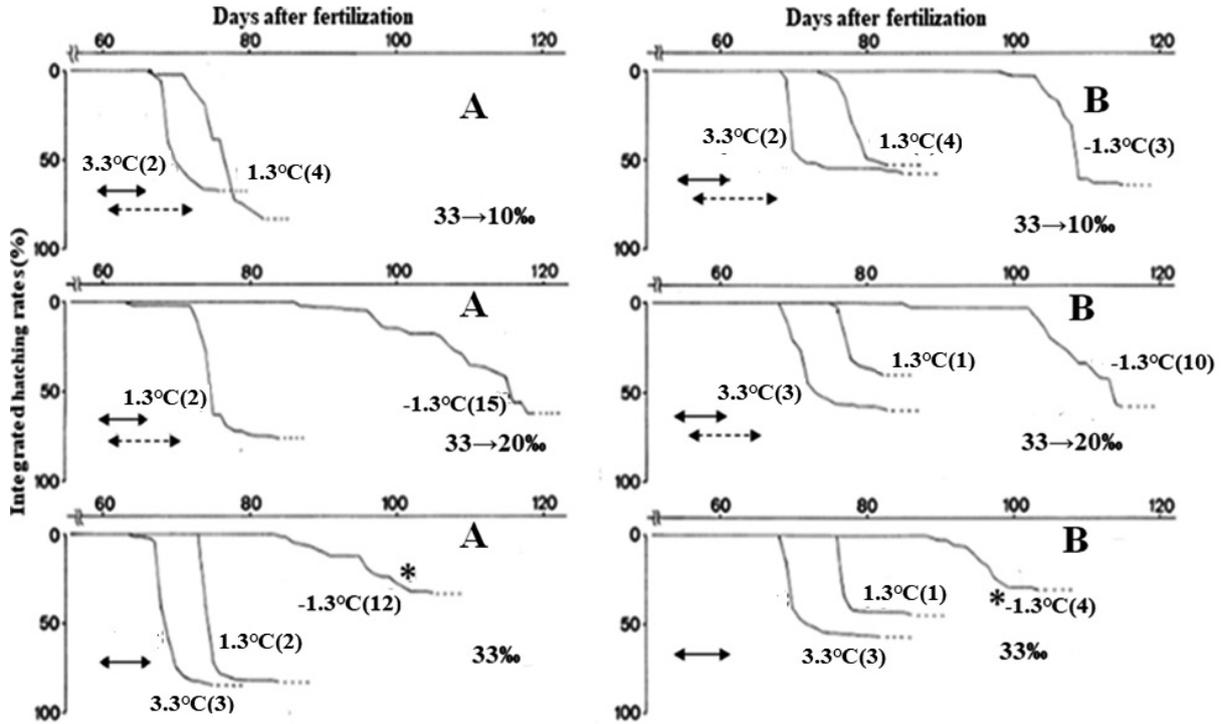


Fig. 11 The hatching process of eggs incubated at a constant condition (below 0°C , 32~35‰) to higher temperature or lower salinities. The each arrow line and broken arrow line indicate temperature and salinity acclimation. The eggs were about stage V (A) and stage IV (B) when acclimated. *:No acclimation. Numbers in the parenthesis indicate incubation days. Salinity was measured by hydrometer.

と最も低かったが、ふ化日数は4日とA卵に比べて短かった。また、水温と塩分の両方の変化を加えた区では、ふ化日数は1~4日と短かったもののふ化率は38.4 (1.3°C 20‰区平均) ~59.5% (3.3°C 20‰区平均) と、A卵ほど高い値を示さなかった。塩分のみを変えた区 (-1.3°C 20‰区および-1.3°C 10‰区) では、ふ化率が57.8~75.1%と上昇したが、ふ化日数は10日および3日と一定にならなかった。以上のことから、A卵を用いた実験区では、加温により短期間のうちに大量にふ化する傾向がみられたが、B卵においてはそれほど顕著でなかった。

A卵、B卵の水温、塩分変化に対するふ化率の差異を検討するため、A、Bともにふ化が認められた実験区のふ化率を、水温-塩分の組合せ毎にχ²検定で比較した (Fig. 12)。この検定で有意差がみられなかったのは、対照区 (-1.3°C 33‰区)、-1.3°C 20‰区および3.3°C 10‰区の3区であった。これ以外の水温変化を加えた実験区ではいずれも、より発生が進んだA卵のふ化率がB卵のそれを有意水準1%で上まわった。

現場における受精卵の垂下試験および地蒔き調査 冬期から春期にかけての、サロマ湖内における水温、塩分の記録を、Fig. 13に示した。水温は12月上旬の0~1°Cから急激に下がり、中旬以降3月下旬まで-1°C以下で推移した。さらに3月下旬以降、水温は徐々に上昇して4月中旬

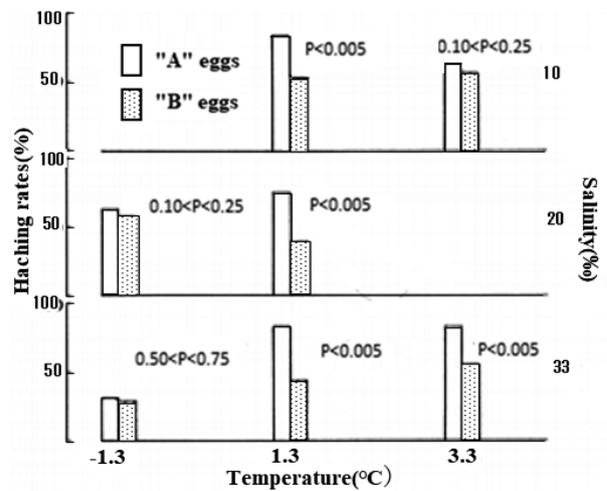


Fig. 12 Comparison between hatching rates of "A" eggs and "B" eggs within the same temperature-salinity conditions. Salinity was measured by hydrometer.

にはプラスに転じ、それ以後は大きく変動を繰り返しながら上昇した。塩分は33程度で一定していたが、4月中旬より30~33の範囲で上昇、下降を繰り返していた。特に、4月13日から16日頃までの水温は、0°C前後から3°C程度まで急上昇し、また塩分は33から30.5程度まで低下するなど顕著な環境変化を示した。

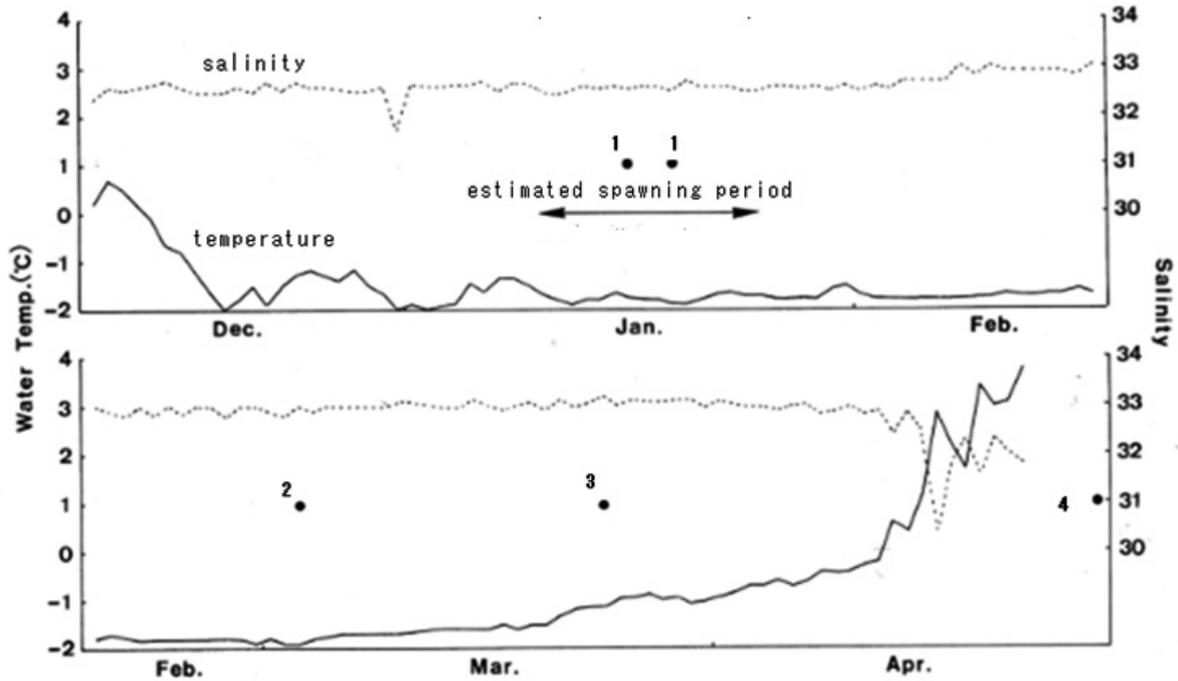


Fig. 13 Daily changes of temperature and salinity in Lake Saroma from Dec.1987 to Apr.1988.

Dots indicate investigation of artificially fertilized eggs.

1: Setting of the baskets and transplantation. 2 and 3: Sampling from the basket and bottom. 4: The end of the investigation. Salinity was measured by electric conductivity.

地蒔きを行った地点 (Fig.1) の底質は, 外観的には砂質でその粒度は, st.1では粒径0.5~1.0mmの粗粒砂, st.2では0.25~0.50mmの中粒砂がほとんどを占めており, 0.125mm以下の極粗粒砂やシルトはわずかであった。Table 3に, サロマ湖自然環境下における卵の発育状況を示した。

受精後43~51日目の3月3日に地蒔き, およびバスケットから回収した卵は, いずれの発生段階においても胚体の長さは卵黄の1.5周以上あり, 眼胞の色素は沈着が進んでいるなど, 胚体形成の後期 (stage IV~V) に相当していた。さらに, 3月24日に一部回収した卵 (受精後66日目) では, 眼胞色素がほぼ完全に沈着しているなど, stage Vの段階に達していた。融氷後の4月27日 (受精後100日) には, バスケット内からは卵も仔魚も発見されなかった (Table 3)。

サロマ湖を含むオホーツク海東部におけるコマイ産卵期の推定 能取湖とサロマ湖から得られた漁獲物について, 雌の成熟度を外観から調べた。能取湖の雌46個体のうち, 1月11日にはほぼ2/3が完熟期・放卵期であった。一方, 67個体を調べた1月18日のサロマ湖では成熟期のものが多く, 完熟・放卵個体はわずかであった。このうち, 未成熟の個体は, 体長が小さいため1齢の未成魚とみなした (Fig.14)。1月11日から 26日までの期間中に媒精のための親魚採集を行った結果, すべての採集標本の中に完熟

Table 3 Summary of the investigation carried out at Lake Saroma in 1988.

A:transplantation, B:incubation baskets

Method and st.	Measured materials	Percent of fertilization	Dates of testing	Incubation period(day)	Observed stage
A-1(st.1)	Not measured	Not measured	Jan.13-Mar.3	51	stage IV~V
A-2(st.2)	311	84.1	Jan.21-Mar.3	43	stage IV~V
B-1(st.2)	375	88.3	Jan.16-Mar.3	48	stage IV~V
B-2(st.2)	341	86.9	Jan.19-Mar.24	66	stage V
B-2(st.2)			Jan.19-Apr.27	100	Eggs or larvae were not found

個体と排卵個体が混ざっていた。

考 察

本研究では, 飼育実験によって水温と発生速度, ふ化仔魚の動態, さらに, 卵発生後期の卵に様々な組み合わせによる水温と塩分の変化を与えて, ふ化までの間に, どのような水温と塩分変化が最適なのかを調べた。前報 (陳ら, 2018) の実験と合わせて50%所要ふ化日数と水温の関係式が導き出され, 発生がより進んだ段階ほど水温上昇の影響を受けてふ化が促進されやすいことがわか

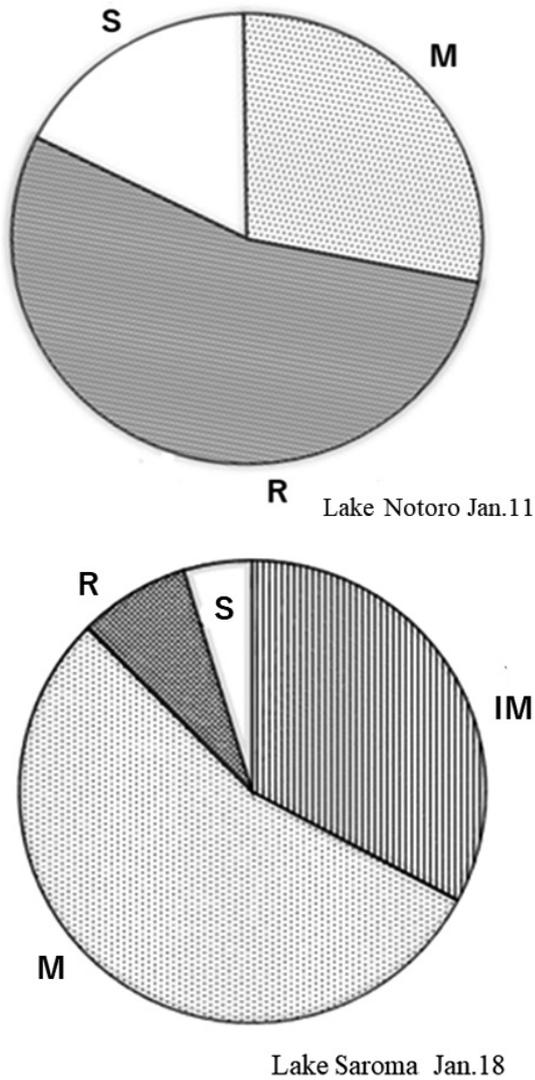


Fig. 14 Matured ratio of saffron cod captured from Lake Notoro and Lake Saroma in 1988. I M:Immature stage, M:Maturating stage, R:Ripe stage, S:Spent stage.

った。Fig. 11における対照区の発生傾向から、発生が進んだ状態のまま氷点下の低水温にさらされ続けると、卵のふ化が抑制されてふ化率が低下する。前報（陳ら，2018）で報告したように、水温上昇が非常に緩やかもしくは一定である実験環境においては、ふ化が抑制され、ふ化率も低下すること、さらに、低温条件が継続すると、卵中で卵黄を吸収したままで死亡する可能性が高まると考えられた。

一般に、沈性卵を産む多くの海産魚類の繁殖場および卵・稚仔の発育場としての沿岸環境は、外洋に比べて1次生産量が高く、かつ初期の餌料環境が好適であることが知られている。一方、天候の長期的あるいは短期的な変化に伴う水温、塩分、溶存酸素量などの急激な変化、

あるいは波浪や潮汐などの物理的変動にさらされる海域でもある。このため、沿岸産卵種の中には、各々の産卵期もしくはふ化時期に特有な海況変動に対応して、その生残を有利にする適応的側面を持つものが多い（Dando, 1984）。Pokrovskaya（1960）は、長年にわたるコマイの産卵場調査において、初冬の気温低下が早く、結氷もその影響で早く始まる年には産卵期も早まること、逆に暖冬傾向の年には産卵期が遅れることを報告している。この知見は、コマイの卵発生が氷点下近くの水温条件下で進行することを裏付けている。つまり、コマイの産卵が行われる厳冬の亜寒帯域から極域にかけての浅海域や汽水域では、結氷によってその下の環境が低温で安定した状態に保たれている。例えば、サロマ湖における冬季の結氷下の水温と塩分は、その経日変化にみられるように物理的に極めて安定した環境であった。このような環境は、コマイのような沈性卵で多産型のタラ科魚種にとって、その卵の生残を高める方向に寄与しているものと考えられる。また、本種の血漿中には、マイナスの水温条件下で生息する極域の魚類に特有な不凍結性糖タンパクが存在し、しかもこの成分は冬季に限り濾過排出されず、高い濃度を保っていることが知られている（Kitagawa et al., 1990）。これらのことから、本種が極域に適応した再生産機構を有しているとみなすことができる。

冬期（12月）から春期（4月下旬）にかけての産卵場の環境調査、地蒔きおよび卵飼育バスケットによる現場での卵発生試験を行い、野外における結氷条件下での卵発生を調べた。その結果、地蒔きおよび卵飼育バスケット中の発生卵は、いずれも受精後約50日前後でstage IV～Vに、66日でstage V（胚は卵黄を1.7～1.8周し、眼胞には色素が完全に沈着している）に達しているなど、飼育実験と類似した発生過程を示した。さらに、調査終了日には卵や仔魚が認められず、全てふ化したと推定された。したがって、仔魚のふ化時期は、4月上旬から中旬にかけてのプラスの水温への上昇変動期に合致していたと考えられる。これらのことから、コマイの卵からふ化に至るまでの発生は、結氷下の安定した環境下で卵の時期を過ごし、春の水温上昇期に一斉にふ化すると考えられる。本研究の飼育実験からも、コマイが融氷に伴う水温の急激な上昇とともに一斉にふ化することが示唆された。また、前報のように、コマイのふ化直後の仔魚の中には口と肛門が開き、かつ胸鰭が発達している個体が確認されるなど、自発的な摂食に移行できる段階にあるとみなすことができる。このような本種の卵の発生や仔魚のふ化のメカニズムを含む繁殖様式は、他の外洋性タラ科魚類とはかなり異なることから、サロマ湖や厚岸湖などの環境変化を利用した戦略をとっていると考えられる。

漁獲物や採卵用親魚の成熟度調査の結果から、オホーツク海東部湖沼においても、産卵期は根室湾や厚岸湖(陳ら, 2005)と大差なく、1月中旬を中心に10~20日程度であると推定された。また、サロマ湖内における受精卵の垂下および地蒔き調査の結果からも、サロマ湖内におけるコマイのふ化日数は、この海域の産卵期の長さを考慮に入れて80~100日程度と推算された。主な産卵場である根室湾では、融氷後の4月27日と28日に卵黄吸収直後とみられる仔魚が採集されている(北海道区水産研究所, 1986)。水温と卵黄吸収過程との関係を調べた実験による卵黄吸収日数(Fig. 10)と現場海域の推定水温が4月下旬で2~3℃、および体長5~7mmであることなどから、この根室湾で採集された仔魚はふ化後10~20日以降のものと考えられた。このことと根室湾海域の産卵期間(陳ら, 2005)を考慮にいと、ふ化に要する日数は、サロマ湖と同様80~100日程度と推測された。また、根室湾では5月下旬には、おおよそ4℃で8~12mmに達しており、十分な摂餌可能なサイズまで成長していることがうかがわれる(Dunn and Vinter, 1984)。

Cushing (1975) は、亜寒帯沿岸域における春季の一次生産の急激な増大と、それに続く動物プランクトン幼体の出現がほぼ一致することを指摘している。また、一般に海水が発達すると、しばしばその下部にice algae群集の増殖がみられるが、これらの群集が融氷時に流出して春季の一次生産の増大をもたらす可能性が指摘されてきた(Smith, 1985)。特にオホーツク海沿岸は、海水中のice algaeが春季の融氷期に海水中に放出され、クロロフィルaを増大させspring bloomを引き起こす(西野, 2009; 西野ら, 2014)。コマイ仔魚も、生残を高めるため、春季の海況変化に伴う一次生産増大、摂餌環境の出現にタイミングを合わせてふ化し、ふ化直後から摂餌できるように、その発育とふ化の機構を発達させているものと思われる。しかしながら逆に、このような春季における環境変動にともなう餌生物の出現と仔魚のふ化のずれが生じた場合、その後の年級群の多寡に影響を与える可能性も考えられる。例えば、繁殖群の多くが2齢魚の単一年級群で支えられている道東海域(陳・桜井, 1993)における年間の漁獲量は、1970年から1981年にかけて170~4,500tの間で変動している(金丸, 1982)など、年級群による発生量の違いが漁獲量に顕著に反映されていることがうかがわれる。したがって、春季の海況変動と仔魚の出現における時期的なずれの有無を調べることは、今後本種の資源変動などの特性を解明する上で重要と思われる。

本研究から、コマイのような沿岸性の多産型タラ科魚類が、ただ単に大量の卵を産出することによってのみ次

世代の生残を高めているのではなく、海況変動の少ない環境での繁殖様式と、春季におけるふ化様式などの環境適応機構を働かせていることを示唆する結果が得られた。特に、水温の変化がふ化を左右する主な要因であることを明らかにした。ただし、春季の融氷や日長が長くなることにともなう底層における照度の増大や、海水中に存在する高塩分水であるブラインによる塩分濃度の一時的増大(西野, 2009)もふ化に対して影響をおよぼす可能性があり、興味ある課題として残されている。また、卵バスケットの垂下と地蒔きを行った地点は、シルトよりも砂礫の多い場所である(西浜・干川, 1992)。コマイのような弱粘着性沈性卵を産む種類にとって、産卵基質となる底質の物理的性質は水温と共に卵の生残を左右する重要な意義をなすと考えられ、この点に関しても今後明らかにする必要がある。

謝 辞

本研究を実施するに当たり、資料採集等にご協力いただいたサロマ湖養殖漁業協同組合、サロマ湖養殖漁業協同組合サロマ湖養殖調査研究センターの職員の方々、および英文校閲と貴重な助言をいただいたDharmamony Vijai博士に深く感謝の意を表す。

引用文献

- 陳 二郎, 桜井泰憲. コマイの年齢と成長. 北水試研報 1993; 42: 251-264.
- 陳 二郎, 吉田英雄, 桜井泰憲. 北海道周辺海域におけるコマイの成熟, 生殖周期及び産卵期の特徴. 北水試研報 2005; 68: 45-64.
- 陳 二郎, 吉田英雄, 桜井泰憲. コマイ卵及び仔魚の正常発生過程. 北水試研報 2018; 93: 59-67.
- Cushing DH. *Marine ecology and fisheries*. Cambridge, Oxford, 1975.
- Dando PR. Reproduction in estuarine fish. In: Potts GW, Wootton RJ (eds). *Fish reproduction, Strategies and tactics* Academic Press, 1984; 155-170.
- Dunn JR, Vinter BM. Development of the Saffron cod, *Eleginus gracilis*, with comments on the identification of Gadid larvae in Pacific and Arctic Waters contiguous to Canada and Alaska. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 1984; 41: 304-318.
- 日暮 忠, 田内森三郎. 魚卵の孵化日数と温度との関係. 水講誌報 1925; 21: 21-28.
- 北海道区水産研究所. 北海道周辺海域に分布するスケ

- トウダラ並びに底魚類の資源量調査報告（昭和57,58年度）。1986：276pp.
- 金丸信一. 根室湾海域のコマイ (*Eleginus gracilis*)資源の特性. 根室湾海域総合開発事業調査報告書. 北海道区水産研究所. 1982：93-98.
- Kitagawa Y, Ogawa M, Fukuchi M. On the kidney of the saffron cod, *Eleginus gracilis* and its cold adaptation. *Proc. NIPR Symp. Polar Biol.* 1990：3：71-75.
- 西浜雄二, 干川 裕. サロマ湖における底泥の粒度組成と有機炭素含有率の分布. 北水試研報 1992：39：1-9.
- 西野康人. オホーツク海の氷海生態系 ～海水がもたらす恵み～. 養殖2009；4：62-64.
- 西野康人, 佐藤智希, 谷口 旭. オホーツク海沿岸能取湖の2008年結氷期における海洋環境とクロロフィルaの動態. 東京農大集報 2014：59(3):177-183.
- Pokrovskaya TN. Geographic variability in the biology of the navaga. *Trudy Inst. Okeanol.* 1960：31:19-110 (in Russian) .
- Smith WO, Nelson DM. Phytoplankton bloom produced by a receding ice edge in the Ross Sea. Special coherence with the density field. *Science* 1985；227：163-166.