

## 第2章 材料と方法

### 第1節 生息環境

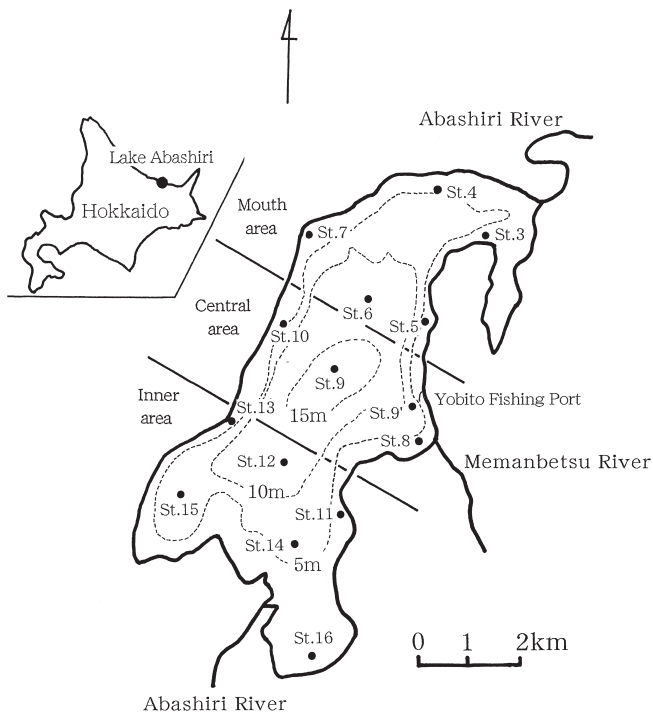
#### 1. 湖沼環境の周年変化

##### 1.1. 物理環境および一次生産環境

網走湖は毎年12月から4月上旬頃まで湖面一帯が結氷する。そこで、調査は1994年から1997年までの4年間の毎年5月から11月までの期間に、湖央域の最深部地点のSt.9 (16.8m, Fig.5)で行った。ただし、1995年は1月から3月の結氷期および解氷直後の4月にも水温と塩分の観測を行った。

水温と塩分は、検定済みのメモリー式STDにより月に1~4回の頻度で観測した。クロロフィルa量は月1回の頻度で観測した(ただし、1994年11月, 1996年11月, 1997年10月は欠測)。基礎生産量は、1995年の7月から11月までの間に、月1回の頻度で現場法により観測した。

クロロフィルa量分析用の試水は、6ℓ容量のバンドン採水器を用いて各層から採水した。採水層は塩分躍層より上層の好気層とし、1994年と1995年は0~5mの間の4~5層, 1996年は0~6mの間の4層, 1997年は0~7mの間の4~5層から採水した。試水は1ℓのポリ



**Fig. 5** Sampling stations in Lake Abashiri, which are the same to those of Torisawa<sup>10)</sup>. The lake was divided into “Mouth” (St.3~St.7), “Central” (St.8~St.10), and “Inner” (St.11~St.16) areas along the downstream to upstream of the lake.

ビンに注入した後、保冷剤を入れたクーラーバッグ内に保存して実験室に持ち帰った。そして、最初に試水50mlを直径47mm, 孔径0.2μmのメンブレンフィルター(Whatman Nuclepore)を用いて濾過した。次に、20μmのメッシュで濾過した試水50mlを同様に直径47mm, 孔径0.2μmのメンブレンフィルターを用いて濾過した。フィルターはアルミ箔で遮光した10mlのチューブに入れ、分析まで-10℃以下で凍結保存した。クロロフィルa量は特級メタノールで24時間抽出後<sup>35)</sup>, 蛍光光度計(Turner Designs, 10-AU Fluorometer)で分析した。クロロフィルa量は0.2μm以上, 0.2~20μm, およびこれらの差から20μm以上の画分に分けて求めた。

基礎生産量の観測は以下の手順で行った。すなわち、最初に0, 1, 2, 4mの各深度から6ℓ容量のバンドン採水器で試水を採取し、100μmのメッシュで大型の動物プランクトンを除去した。その後、それぞれの深度につき4本, 合計16本の500mlポリカーボネイトビンに試水を満たした。このうち、それぞれの深度につき2本, 合計8本のポリカーボネイトビンには10ppmのNaH<sup>13</sup>CO<sub>3</sub>溶液0.5mlを注入した後、もとの深度に戻し約24時間垂下した。残りの各深度別に採水した合計8本のポリカーボネイトビンは、保冷剤を入れたクーラーバッグに保存して実験室に持ち帰った。そして、各深度の試水の一部は、無機炭素量の測定のために20mlのガラスビンに分注し、硫酸銅を葉サジで少量懸濁させた後、アルミ箔で包み遮光し分析まで冷蔵保存した。残りの試水は、1本のポリカーボネイトビンにつき2回, 50mlの試水を直径25mmのWhatmanのGF/Fフィルターで濾過した後、このフィルターを70℃に設定した恒温器で速やかに乾燥した。現場で垂下した試水も回収後、実験室に持ち帰り、同様の処理を行った。これらのすべてのフィルターは、軟膏ケースに入れて分析までデシケーター内で保存した。なお、これらのGF/Fフィルターはあらかじめマッフル炉内(温度を450℃に設定)で処理したものを用いた。無機炭素の分析は、全炭素分析計(嶋津製)で行った。<sup>13</sup>CO<sub>2</sub>の分析はCO<sub>2</sub>分析用赤外分光光度計(日本分光製)で行った。基礎生産量の算出は気象庁編<sup>36)</sup>の「海洋観測指針」に従った。

##### 1.2. 動物プランクトンの採集と処理

動物プランクトンの採集は、湖央域の最深部St.9で、1994年から1997年の4年間、毎年5月から11月まで月1~数回の頻度で行った。ただし、1995年は結氷期の1月から3月, および解氷直後の4月にも動物プランク

トンを探集した。芳賀他<sup>37)</sup>によれば、塩分躍層以深の溶存酸素量は1 ppm以下まで急激に減少する。この嫌気環境のため塩分躍層以深には動物プランクトンはほとんど分布しないことから(浅見未発表資料)、採集層は塩分躍層上部から表面までとした。採集には、ネット口部に濾水計を装着した北原式プランクトンネット(口径30cm, 側長120cm, 網目100 $\mu$ m)を用いて、毎秒約1mで鉛直曳きした。採集時には、毎回濾水計の検定を行った。採集した標本は船上で速やかに5%中性ホルマリンで固定した。標本は実験室に持ち帰った後、適宜分割して実体顕微鏡下で検鏡した。検鏡は、ワカサギ稚魚の餌生物として重要な甲殻類プランクトン<sup>3,5)</sup>を対象に行った。本研究では後述するように、特に優占して出現したカイアシ類1種(*Sinocalanus tenellus*), 枝角類1種(*Diaphanosoma brachyurum*)のみを種別に計数し、他は一括してその他のカイアシ類および枝角類として計数した。

### 1.3. 優占カイアシ類*Sinocalanus tenellus*の個体群動態と生産量の見積もり

1995年のみ、*S. tenellus*についてはコペポダイト1期から成体までを发育段階別に計数した。ノープリウス期は发育段階を区別せずに一括して計数した。さらに、本種の卵は抱卵されることなく水中に放出されるので、内径6.9cm, 長さ57cmの塩ビ管の底部に1ℓのポリビンと錘を取り付けたセジメントトラップを作り、1995年1月から11月まで月に1回の頻度で(ただし、1995年2月と4月は欠測)、口部が塩分躍層上部になるように24~48時間垂下して沈降した卵を採集した。セジメントトラップは回収後、船上で塩ビ管内の湖水をサイホンで静かに除去してからポリビンを取り外し、実験室に持ち帰った。そして、500mlを定量し5%中性ホルマリンで固定後、24時間以上静置沈殿させて上澄み液をサイホンで除去しながら最終容量20mlまで濃縮した。卵の同定はKimoto *et al.*<sup>38)</sup>を参照し、倒立顕微鏡下で計数した。

Kimoto *et al.*<sup>39)</sup>は飼育実験を行い、*S. tenellus*の发育時間と水温の関係を以下の式で示した。

$$DS = 554 \times M \times (T+2.0)^{-1.89}$$

ここで、DSは産卵からある发育段階までの发育時間(日)、Tは生息水温(°C)、Mは发育段階毎に決まる定数であり、Kimoto *et al.*<sup>39)</sup>のTable 2に示されている。

本研究では、観測された生息水温から上式により各发育段階の发育時間を推定し、個体数/发育時間を求めた。そして、累積发育時間と個体数/发育時間との関係から、各年齢での傾きを求め死亡速度を推定した。ただし、本研究ではノープリウス期個体を发育段階別に計数しなかったため、ノープリウス期個体の发育時間の推定には

ノープリウス1期から6期までの定数Mの平均値 $M=2.27$ を用いた。また、本種の成体の寿命は明らかにされていないが、雌で少なくとも70日であることから<sup>38)</sup>、水温に関係なく雌雄ともに70日と仮定した。

本研究では、*S. tenellus*の個体群生産量を以下の二つの方法で推定した。第1の方法は各採集日の個体数から現存量を推定し、これに生息水温から推定される成長速度を乗じることにより行った。手順として、先ず1月から11月まで合計19本の標本について、ノープリウス期、コペポダイト期(1期から5期)および成体の发育段階毎に253~900個体の体サイズ(L; $\mu$ m)を接眼マイクロメーターで測定した。ここでは、ノープリウス期は体長(頭部の先端から尾棘基部まで)、コペポダイト期および成体は頭胸長を測定した。そして、以下に示した換算式<sup>39)</sup>により、体長を炭素重量に換算した。現存量(mgC/m<sup>2</sup>)は、发育段階毎の1月から11月までの平均炭素重量にそれぞれの採集日の個体数(m<sup>2</sup>当り)を乗じて推定した。日間生産量(mgC/m<sup>2</sup>/日)も以下に示した換算式<sup>39)</sup>により生息水温(T;°C)から成長速度(g;/日)を求め、これに現存量を乗じて推定した。

ノープリウス期については

$$\log C = 2.332 \log L - 6.621 \quad (C; \text{炭素重量} \mu\text{g}, L; \text{体長} \mu\text{m}), \quad g = 0.00257(T+2.0)^{1.71} \quad (T; \text{生息水温} ^\circ\text{C})$$

コペポダイト期については

$$\log C = 3.126 \log L - 8.735 \quad (C; \text{炭素重量} \mu\text{g}, L; \text{頭胸長} \mu\text{m}), \quad g = 0.00128(T+2.0)^{2.03} \quad (T; \text{生息水温} ^\circ\text{C})$$

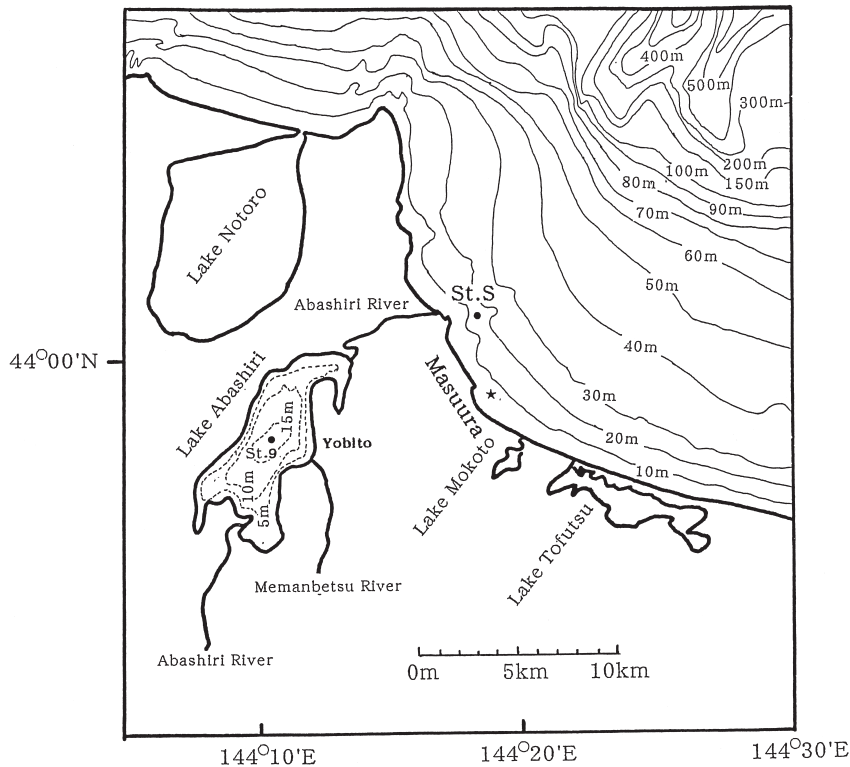
さらに、卵生産量は卵採集量(卵数/m<sup>2</sup>/日)に卵の炭素重量(0.0357 $\mu$ g)<sup>38)</sup>を乗じて推定した。

第2の方法は、先述した各年齢の個体数/发育時間の値から、各年齢間の死亡個体数を求め、これに各年齢の炭素重量を乗じて死亡個体の現存量を推定した。個体群生産量は各年齢間の死亡個体の炭素重量を積算することによって推定した。

## 2. 湖沼環境と沿岸環境の比較

湖沼環境と沿岸環境を同時期に比較するために、1998年5月から12月に月1回の頻度で(ただし、湖では12月、沿岸域では11月が欠測)、網走湖内の湖央域St.9と網走沿岸域のSt.S(水深17m, Fig.6)において、水温と塩分の観測、および動物プランクトンの採集を行った。

水温と塩分は、メモリー式STDを用いて観測した。動物プランクトンの採集は、ノルパックネット(口径45cm, 側長180cm, 網目330 $\mu$ m)を用いて、湖内では塩分躍層上部から、沿岸域では海底直上から表面までの鉛直曳きで行った。ネットには濾水計を装着しなかったため、濾過効率を100%と仮定した。動物プランクトンの



**Fig.6** Sampling stations in Abashiri Bay. Water temperature, salinity and zooplankton abundance were measured at St. S from May to December in 1998. Smelt juveniles were sampled in the coast of Masuura (shown by an asterisk) on 26 August in 1996.

標本は、船上で速やかに5%中性ホルマリンで固定し実験室に持ち帰った後、適宜分割して実体顕微鏡下で分類群毎に計数した。特に、カイアシ類については毎月、50~70個体を無作為抽出して、体長(L;  $\mu\text{m}$ )を接眼マイクロメーターで計測して、体長から1個体当たりの平均乾燥重量(DW;  $\mu\text{g}$ )を弘田<sup>40)</sup>による換算式( $\log DW = -9.07 + 3.66 \log L$ )から推定した。そして、この平均乾燥重量に各採集日の個体数を乗じてカイアシ類の現存量を推定した。

## 第2節 仔魚期の生活様式

### 1. 表層水平分布

仔魚の採集は1995年から1997年までの3年間に亘り、5~6月の期間を2週間に1回の頻度で行った(Table 1)。採集地点は、1995年と1996年は湖口域から湖奥域に向かって、St. 4, 5, 8, 9, 10, 14, 15の7地点(ただし、1995年5月30日のみSt. 10を欠測)、1997年は湖口域から湖奥域に向かって、St. 4, 5, 6, 8, 9, 10, 12, 14, 15の9地点であった(Fig. 5)。採集時刻は、3年間ともに8時から14時の間にあった。採集には、作成した大型のプランクトンネット(口径130cm, 円筒部側長190cm, 円錐部側長230cm, すべて網目330

$\mu\text{m}$ )を用い、リングを水面下まで水没させて、3分間の表層水平曳きを行った。ネット口部には濾水計を装着して、採集時の濾水量を推定した。標本は、船上で5%中性ホルマリンを加えて速やかに固定し実験室に持ち帰った後、すべての採集地点についてワカサギ仔魚を分別・計数した。そして、3ヶ年の共通7地点(St. 4, 5, 8, 9, 10, 14, 15)で採集された個体について採集個体数に応じて、仔魚の全長を万能投影機で10~20倍に拡大して測定した。また、1995年は4地点(St. 4, 8, 9, 14)、1996年と1997年は7地点(St. 4, 5, 8, 9, 10, 14, 15)で採集された仔魚について、発育段階の目安として卵黄嚢を保有しているか否かを全長測定時に観察した。

仔魚の摂餌個体の出現率(調べた個体数に対する消化管内に何らかの餌生物が観察された個体数の割合)と消化管内容物を、1995年は4地点(St. 4, 8, 9, 14)、1996年と1997年はSt. 8またはSt. 9で採集された個体について観察した。仔魚の消化管内容物の観察は以下の手順で行った。すなわち、最初にグリセリン水溶液を数滴滴下したプレパラート上に仔魚1個体を載せ、実体顕微鏡下で解剖針を使って消化管を取り出した。次に、同じくグリセリン水溶液を数滴滴下した新しいプレパラート上に消化管を移して、実体顕微鏡下で解剖針を使って消化管内容物を取り出した。取り出した内容物は40~200倍の

Table 1 Summary of field sampling data during the larval stage of smelt in Lake Abashiri between 1995 and 1997.

Survey items	Year/Month/day (Stations sampled)			
	1995	1996	1997	
Smelt larvae sampling	May 16 (St.4,5,8,9,10,14,15)	May 13 (St.4,5,8,9,10,14,15)	May 12 (St.4,5,6,8,9,10,12,14,15)	
	May 30 (St.4,5,8,9,14,15)	May 27 (St.4,5,8,9,10,14,15)	May 26 (St.4,5,6,8,9,10,12,14,15)	
	June 12 (St.4,5,8,9,10,14,15)	June 10 (St.4,5,8,9,10,14,15)	June 12 (St.4,5,6,8,9,10,12,14,15)	
	June 26 (St.4,5,8,9,10,14,15)	June 24 (St.4,5,8,9,10,14,15)	June 24 (St.4,5,6,8,9,10,12,14,15)	
Body length	May 16 (St.4,5,8,9,10,14,15)	May 13 (St.4,5,8,9,10,14,15)	May 12 (St.4,5,8,9,10,14,15)	
	May 30 (St.4,5,8,9,14,15)	May 27 (St.4,5,8,9,10,14,15)	May 26 (St.4,5,8,9,10,14,15)	
	June 12 (St.4,5,8,9,10,14,15)	June 10 (St.4,5,8,9,10,14,15)	June 12 (St.4,5,8,9,10,14,15)	
	June 26 (St.4,5,8,9,10,14,15)	June 24 (St.4,5,8,9,10,14,15)	June 24 (St.4,5,8,9,10,14,15)	
Yolk larvae ratio	May 16 (St.4,8,9,14)	May 13 (St.4,5,8,9,10,14,15)	May 12 (St.4,5,8,9,10,14,15)	
	May 30 (St.4,8,9,14)	May 27 (St.4,5,8,9,10,14,15)	May 26 (St.4,5,8,9,10,14,15)	
	June 12 (St.4,8,9,14)	June 10 (St.4,5,8,9,10,14,15)	June 12 (St.4,5,8,9,10,14,15)	
	June 26 (St.4,8,9,14)	June 24 (St.4,5,8,9,10,14,15)	June 24 (St.4,5,8,9,10,14,15)	
Feeding larvae and gut contents	May 16 (St.4,8,9,14)	May 13	May 12 (St.8)	
	May 30 (St.4,8,9,14)	May 27 (St.8)	May 26 (St.9)	
	June 12 (St.4,8,9,14)	June 10 (St.9)	June 12 (St.9)	
	June 26 (St.4,8,9,14)	June 24 (St.9)	June 24 (St.9)	
Surface water temperature/salinity / chl.a concentration	May 16 (St.4,5,8,9,10,14,15)	May 13 (St.4,5,8,9,10,14,15)	May 12 (St.4,5,6,8,9,10,12,14,15)	
	May 30 (St.4,5,8,9,14,15)	May 27 (St.4,5,8,9,10,14,15)	May 26 (St.4,5,6,8,9,10,12,14,15)	
	June 12 (St.4,5,8,9,10,14,15)	June 10 (St.4,5,8,9,10,14,15)	June 12 (St.4,5,6,8,9,10,12,14,15)	
	June 26 (St.4,5,8,9,10,14,15)	June 24 (St.4,5,8,9,10,14,15)	June 24 (St.4,5,6,8,9,10,12,14,15)	
Zooplankton sampling	May 16 (St.4,5,8,9,10,14,15)	May 13 (St.4,5,8,9,10,14,15)	May 12 (St.4,5,6,8,9,10,12,14,15)	
	May 30 (St.4,5,8,9,14,15)	May 27 (St.4,5,8,9,10,14,15)	May 26 (St.4,5,6,8,9,10,12,14,15)	
	June 12 (St.4,5,8,9,10,14,15)	June 10 (St.4,5,8,9,10,14,15)	June 12 (St.4,5,6,8,9,10,12,14,15)	
	June 26 (St.4,5,8,9,10,14,15)	June 24 (St.4,5,8,9,10,14,15)	June 24 (St.4,5,6,8,9,10,12,14,15)	



**Table 2** Summary of survey design for the vertical distribution of smelt larvae in 1997 and 1998 (○ : carried out, × : not carried out)

Year	Sampling station	Sampling Date	Sunrise time	Sunset time	Sampling Time	Day (D) or Night(N)	Sampling depth (m)	S.T.D.	Zooplankton sampling	Body length measurement	Yolk observation	Gut contents observation	
1997	St.9'	May. 13	3:59	18:40	11:55-12:05	D	0,2,5	○	X	○	○	X	
					19:35-20:00	N	0,2,5	X	X	○	○	X	
					13:30-13:55	D	0,2,5	X	X	○	○	X	
		May. 26	3:47	18:54	19:50-20:20	N	0,2,5	X	X	○	○	○	X
					12:25-12:50	D	0,2,5	○	X	○	○	○	X
					20:10-20:40	N	0,2,5	X	X	○	○	○	X
	June. 23	3:40	19:10	10:50-11:10	D	0,2,4,6	○	X	○	○	○	X	
				12:45-13:15	D	0,2,4,6	○	X	○	○	○	○	X
	June. 24	3:40	19:10	10:40-11:15	D	0,2,4,7	○	X	○	○	○	○	X
1998	St.9'	May. 15	3:57	18:42	4:45-5:15	D	0,2,5	X	○	○	○	○	
					8:00-8:30	D	0,2,5	X	X	○	○	○	X
					12:00-12:35	D	0,2,5	○	○	○	○	○	○
					15:50-16:15	D	0,2,5	X	X	○	○	○	X
					19:00-19:30	N	0,2,5	X	X	○	○	○	X
					21:02-21:37	N	0,2,5	○	○	○	○	○	○

生物顕微鏡で観察し、可能な限り種を同定し計数した。また、観察された餌生物の頂軸方向の体サイズを可能な限り接眼マイクロメーターで計測した。

仔魚の採集と同時に、水温、塩分、クロロフィルa量の観測、動物プランクトンの採集を行った。水温と塩分はメモリー式STDで行った。クロロフィルa分析用試水の採取、処理および分析方法は第1節1.1で述べたのと同様である。ただし、ここではクロロフィルaの定量は0.2 $\mu$ m以上のみとした。ワカサギ仔魚にとって輪虫類やカイアシ類ノープリウス期などの微小動物プランクトンが主要な餌生物であるので<sup>5)</sup>、仔魚の採集時に各地点で6 $\ell$ 容量のバンドン採水器を2度用いて10 $\ell$ の表層水を採水し、この湖水を船上で直ちに口径30cm、側長50cm、網目40 $\mu$ mのネットで濾過して微小動物プランクトンを採集した。標本は速やかに船上で2%中性ホルマリンで固定し、実験室に持ち帰った後、24時間以上静置沈殿させ、上澄み液をサイホンで除去しながら最終容量20mlまで濃縮した。濃縮試料中の微小動物プランクトンの計数は、個体数密度に応じて数mlを罫線付きのチャンパーに分取し、倒立顕微鏡下で行った。検鏡の対象は、カイアシ類のコペポダイト期個体と成体および枝角類を除く微小動物プランクトンとし、輪虫類は可能な限り属あるいは種毎に、その他は分類群毎に計数した。

## 2. 鉛直分布

調査は、1997年5～6月にかけて合計7回、湖岸のSt.9' (水深約7m, Fig.5) と湖央のSt.9' (水深約16.8m, Fig.5)、また、1998年5月15日に合計6回、湖岸のSt.9'で行った(Table 2)。1997年はSt.9'で昼夜別、St.9'で日中のみ、1998年はSt.9'の1定点で早朝(4:45)から夜間(21:00)まで2～4時間おきに仔魚を採集した。

採集深度は、St.9'で0, 2, 5mの3層、St.9'で0, 2, 4, 6あるいは7mの4層であった。採集にはノルパックネット(口径45cm, 側長180cm, 網目330 $\mu$ m)を用いて、深度別に5分間の水平曳きを行った。この時、ネットリングには長さ8mの竿棒を取り付け、揚網時には竿棒を水面に対して垂直になるように引き上げて、上層の採集物がネットに混入することのないようにした。曳網時の船速は約2ノットであった。

水温と塩分は、メモリー式STDを用いて、1997年はSt.9'で5月13日と6月23日の日中、St.9'では毎回観測した。1998年はSt.9'で日中(12:00)と夜間(21:00)に観測した。さらに、1998年は4時45分、12時、21時に深度別に微小動物プランクトンを採集した。微小動物プランクトンは6 $\ell$ 容量バンドン採水器を2度用いて、10 $\ell$ の湖水を各深度から採水し、これを前述と同様に網目40 $\mu$ mで濾過することによって採集した。微小動物プランクトンの標本の処理と観察方法は、本節1の表層水平分布で述べたのと同様である。採集した仔魚は、船上で5%中性ホルマリンで速やかに固定し実験室に持ち帰った後、ワカサギ仔魚を分別・計数した。標本のすべてあるいは一部については、万能投影機で全長を測定し、同時に卵黄嚢の有無を観察した。1998年は早朝(4:45)、日中(12:00)および夜間(21:00)に採集した個体について、消化管内容物を前述の方法と同様に観察した。

## 3. 飼育下における成長と摂餌

ワカサギ仔魚の飼育を1995年5月に20日間、網走湖岸にあるワカサギ孵化場の屋内で行った。この孵化場では3列の並列した池15面があり、約10億粒の受精卵を收容している。ここでは、湖水を毎分40トンの流量で取水し、流水式によって卵の自然孵化を行っており、孵化仔魚は

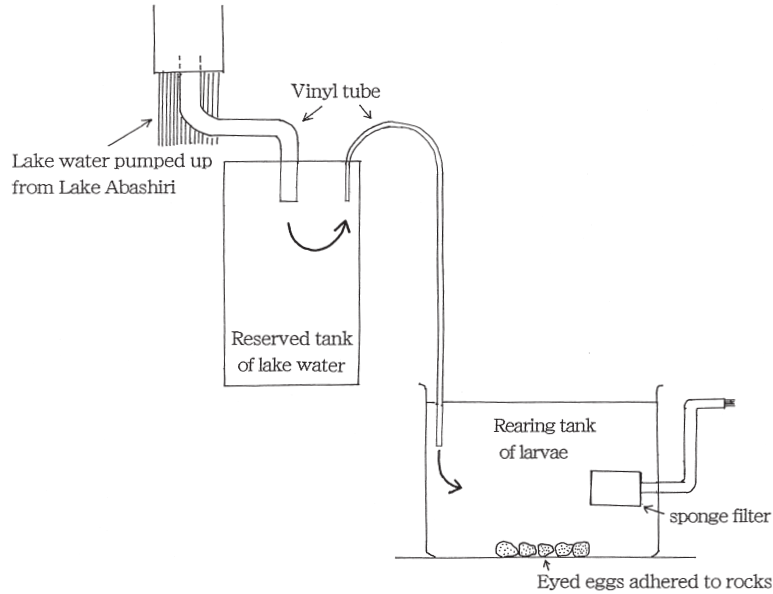


Fig.7 Schematic diagram of rearing system of smelt larvae adopted in the experiments in May 1995. With this system, smelt larvae hatched out on 11 May were reared until May 31 in the Yobito smelt hatchery.

長さ150m, 幅40cm, 深さ40cmの水路を通り湖へ自然流下する。ポンプの口部は湖岸20m, 水深2mにあり, 口径は12cmである。網走湖産ワカサギ仔魚について, これまで実験室内でクロレラとシオミズツボムシとの混合餌料を与えて飼育が試みられてきたが, 孵化後数日で死亡することが確認されている。この原因は明らかではないが, 本研究ではできるだけ飼育環境を天然条件に近付けるために, この湖からの自然取水を用いて人工餌料を与えずに無給餌で行った。飼育には, 直径67.5cm, 高さ45cm, 容量100ℓの透明な円柱状のパンライト水槽を用いた。これにビニールチューブで湖水を導き(毎分約230ml), 水槽内にスポンジフィルターを取り付けて飼育水を排水し, 仔魚の流出が起らないように設定した(Fig.7)。この飼育水槽に, 1995年4月28日に採卵して受精させ, 石に付着させて孵化場の池に収容していた発眼卵約1,400粒を収容した。本研究では, 光環境は特別に設定せず, 孵化場屋内の光環境と同一とした。

1995年5月11日に仔魚の孵化が一斉に確認されたので, これ以降5月31日までの間に合計5回(5月11日, 15日, 17日, 23日, 31日), 飼育水槽から24~188個体の仔魚を採集した。ここで, 17日と31日の両日には, 後述する摂餌の時刻変化を調べるために, 17日には14時30分から17時10分まで約40分おきに, 31日には9時5分から17時まで約2時間おきに15~22個体の仔魚を飼育水槽から採集した。他の調査日はいずれも日中1回のみ採集した。仔魚の採集は, 先太のスポイトを用いて, あらかじめ

め飼育水を満たした10mlのガラスピンにゆっくり移して行った。そして, 速やかに中性ホルマリンを約0.1ml滴下して仔魚を固定した。また, 17日と31日には, 飼育水槽の水深約20cmから飼育水1ℓを採取し, 2%中性ホルマリンで速やかに固定した。この時, 同時に飼育水温を棒状水温計で測定したところ, 17日には10.5℃, 31日には12.0℃であった。

仔魚は実験室に持ち帰った後, 万能投影機で拡大して全長を測定した。同時に卵黄嚢の有無を観察した。飼育水は24時間以上静置沈殿後, 上澄み液をサイホンで除去しながら最終容量20mlまで濃縮し, これから数mlを採取して倒立顕微鏡下で動物プランクトンの同定と計数を行った。

17日と31日の各時刻に採集した個体については, すべて消化管内容物を前述のとおり観察した。また, 仔魚の餌生物への摂餌選択性を知るために, 次式で示されるイブレフの選択指数(Ivlev's electivity index;  $E_i$ )<sup>41)</sup>を求めた。すなわち,

$$E_i = (r_i - p_i) / (r_i + p_i)$$

ここで,  $r_i$ は動物プランクトン*i*種の仔魚の消化管内容物中に占める割合,  $p_i$ は*i*種の飼育水中に占める割合である。また, 消化管内容物は可能な限り, 接眼ミクロメーターで体サイズ( $a$ ; 頂軸方向の長さ $\mu\text{m}$ )を計測した。そして, 輪虫類については, Ruttner-Kolisko<sup>42)</sup>により体積 $V$  ( $\mu\text{m}^3$ )に換算した。また, 輪虫類とカイアシ類の卵は球体と見なして,  $V = 4/3\pi(a/2)^3$ より体積を推

定した。カイアシ類のノープリウス期については、 $V = 1/24\pi r^3$ により体積を推定した<sup>43)</sup>。そして、動物体の比重を1と仮定して湿重量を推定し、湿重量の10%を乾燥重量とした<sup>44)</sup>。ここでは、17日と31日で消化管内容物組成に大きな違いがなかったため、消化管内容物の乾燥重量は17日と31日を合わせた餌生物の平均サイズを求めて推定した。

さらに、17日と31日には、仔魚の摂餌速度( $I_t$ ;  $\mu\text{g}/\text{時}$ )を以下の式により推定した<sup>45,46)</sup>。すなわち、

$$I_t = (S_t - S_0 e^{-ct}) / (1 - e^{-ct}), \quad c = 1/T$$

ここで、 $S_0$ ;  $t=0$ の時の消化管内容物量、 $S_t$ ;  $t$ 時間後の消化管内容物量、 $T$ ; 内容物の消化管通過時間、 $c$ ; 内容物の減少速度である。これより、摂餌速度を求めるには各採集時刻における仔魚の消化管内容物量 $S_t$ と、内容物の消化管通過時間 $T$ を知らなければならない。前者 $S_t$ は、各時刻に採集された仔魚の平均消化管内容物重量を用いた。後者 $T$ については、次のようにして推定した。すなわち、5月17日には、まず最初に、14時45分に飼育水槽から87個体の仔魚を採集した。次に、十分に曝気した湖水を $10\mu\text{m}$ のネットで濾過して動物プランクトンを除去し、この濾過湖水を滅菌済みの5個の $100\text{ml}$ のポリビンに分注した。そして、この中に仔魚を14~15個体ずつ収容した。この時、水温を一定に保つために、仔魚を収容したポリビンを湖水を連続的に流した浅いバット(ウオーターバス)の中に収容した。そして、14時45分から17時までの間に合計5回、一定時間おきに1つずつポリビンをウオーターバスから回収し、仔魚を1%中性ホルマリンで固定した。5月31日も全く同様の方法で、10時に飼育水槽から合計80個体の仔魚を採集し、4個の滅菌済み $100\text{ml}$ のポリビンに19~21個体の仔魚を収容した。そして、ポリビンをバットの中に収容し、10時から12時の間に合計4回、1つずつポリビンを回収して仔魚を固定した。なお、両日ともにポリビン中での仔魚の死亡は観察されなかった。消化管内容物は前述と同様の方法で観察し、種毎に個体数を計数した後、これに平均乾燥重量を乗じて消化管内容物個体数を消化管内容物乾燥重量に換算した。そして、経過時間に対する消化管内容物乾燥重量を直線回帰式で近似させた。内容物の消化管通過時間 $T$ はこの回帰式の傾きの逆数から推定した。摂餌速度はそれぞれの採集時刻間での摂餌量を総和することによって求めた。

### 第3節 稚魚期の生活様式

#### 1. 稚魚の採集と標本の処理

網走湖内で、1994年から1997年の4年間に亘り、7月から10月まで月に1~2回の頻度で曳網を用いて稚魚を

採集した(Table 3)。また、鱒浦沿岸域(Fig. 6)で1996年8月26日に1回、曳網を用いて稚魚を採集した。稚魚の採集に用いた曳網(網の全長約55m、魚捕部の網地の網目幅約2mmのもじ網)および曳網方法は、鳥澤<sup>10)</sup>と同様である。湖内での採集地点は、1994年と1995年は湖央域のSt. 8の1地点のみであったが、1996年と1997年には1~10数地点であった。さらに、1996年10月と1997年9月と10月には標本を漁業者の漁獲物から抽出した。また、1994年7月から10月、1995年7月から9月、1996年8月21日と9月17日、1997年8月21日には、稚魚を同一地点(St. 8)で朝方(7:00-8:30)から夕方(16:00-17:00)にかけて4~6回採集した。

稚魚は採集後、2ℓのポリビンに収容して10%中性ホルマリンで固定した。標本は実験室に持ち帰った後、デジタルノギスを用いて被鱗体長を0.01mmまで測定した(ただし、1994年の測定は1.0mmまで)。体重(湿重量)は電子天秤を用いて0.01gまで測定した。網走湖内の測定個体数は、1994年は157~457個体、1995年は176~882個体、1996年は90~1,103個体、1997年は104~1,051個体であった。また、沿岸域では全採集個体数の80個体について測定した。さらに、体長(mm)と体重(mg)により肥満度(Condition factor; CF)を次式により求めた。

$$CF = (\text{体重mg}) / (\text{体長mm})^3 \times 1000$$

1997年7月14日と8月21日に湖内のSt. 8で採集された60個体および67個体の合計127個体については、次のように水分含量を測定した。体表面の水分を濾紙で取り除いて体長と湿重量を測定した後、70℃の恒温器で24~48時間乾燥した。その後、デシケーター内に収容した。そして、湿重量に対する湿重量と乾燥重量の差との割合から水分含量を求めた。湖内で採集された個体については、各採集日ともに最少6個体から最大651個体について胃内容物重量を測定し、胃充満度指数(Stomach fullness index; SFI)を次式によって算出した。沿岸域で採集された個体は、全採集個体80個体の胃充満度指数を同様に次式により算出した。すなわち、

$$SFI (\%) = \text{胃内容物重量 (mg)} / \text{体重 (mg)} \times 100$$

網走湖内で同一日に同一地点(St. 8)で数回採集した1994年、1995年、1996年8月21日と9月17日、1997年8月21日には、時刻毎に稚魚の胃充満度指数を求めて、摂餌の時刻変化を調べた。

稚魚の胃内容物の観察を湖内で採集した個体については、1994年と1995年に行った。すなわち、1994年は7月から9月の各採集日の各時刻に採集した個体、それぞれ約30個体ずつ合計122個体、1995年は7月から9月までの各採集日の9時に採集した個体、それぞれ10個体ずつ

Table 3 Summary of survey design for smelt juveniles from July to October in Lake Abashiri and Abashiri Bay (○ : carried out, × : not carried out)

Year	Date	Station in Lake Abashiri	Station in Abashiri Bay	No. of samplings	Body length and weight measurement	Moisture content	Stomach fullness index	Stomach contents	Food consumption
1994	July. 15	St.8		4**	○	X	○	○	X
	Aug. 19	St.8		4**	○	X	○	○	X
	Sep. 22	St.8		4**	○	X	○	○	X
	Oct. 25	St.8		4**	○	X	○	X	X
1995	July. 19	St.8		6***	○	X	○	○	○
	Aug. 8	St.8		6***	○	X	○	○	○
	Aug. 22	St.8		6***	○	X	○	○	X
	Sep. 26	St.8		6***	○	X	○	○	X
	Oct. 24	St.8		1	○	X	○	X	X
	July. 16	St.14,15,16		1	○	X	○	X	X
1996	July. 16	St.14,15,16		1	○	X	○	X	X
	Aug.5	St.3,4,8,9,10,14,15,16		1	○	X	○	X	X
	Aug. 21	St.8		6***	○	X	○	X	X
	Aug. 26****				○	X	○	○	X
	Sep. 2	St.3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16	St. S	1	○	X	○	X	X
	Sep. 17	St.8		6***	○	X	○	X	X
	Oct. 3	Fishing grounds*		1	○	X	○	X	X
	Oct. 14	Fishing grounds*		1	○	X	○	X	X
	July. 14	St.8,14,15,16		1	○	○	○	X	X
	Aug. 4	St.3,4,8,9,10,14,15,16		1	○	X	○	X	X
1997	Aug. 21	St.8		6***	○	○	○	X	X
	Sep. 8	St.3,4,5,6,7,8,9,11,12,13,14,15,16		1	○	X	○	X	X
	Sep. 24	Fishing grounds*		1	○	X	○	X	X
	Oct. 13	Fishing grounds*		1	○	X	○	X	X
	July. 14	St.8,14,15,16		1	○	○	○	X	X

\* Samples were not from stations but for autumn smelts fisheries.

\*\* 4 consecutive samplings between 7:00 and 17:00 at St.8.

\*\*\* 6 consecutive samplings between 7:00 and 17:00 at St.8.

\*\*\*\* Smelt juveniles collected only from Abashiri Bay.



合計40個体について胃内容物を観察した。また、1996年8月26日に沿岸域で採集された個体についても、15個体の胃内容物を観察した。胃内容物は実体顕微鏡下で観察し、湖内で採集された個体の胃内容物は分類群あるいは種毎に同定と計数を行った。一方、沿岸域で採集された15個体の胃内容物は分類群毎に計数を行った。

## 2. 摂餌量の推定

1995年7月19日と8月8日の2回、湖内での稚魚の摂餌量を推定した。ある時間内の摂餌量 $C_t$ は次式で表される<sup>45)</sup>。すなわち、

$$C_t = (S_t - S_0 e^{-rt}) / (1 - e^{-rt})$$

ここで、 $S_0$ と $S_t$ はそれぞれ、時刻 $T_0$ と $T_t$ での胃内容物量、 $r$ は消化速度である。そして、ある時間内での総摂餌量は、それぞれの時間間隔での $C_t$ の総和として得られる。上式より総摂餌量を知るには、各時刻での胃内容物量と稚魚の消化速度を知る必要がある。前者については、1995年7月19日と8月8日の野外で得られた資料があるので、ここでは消化速度 $r$ の推定が必要となる。本来、魚類の消化速度は給餌による飼育実験で推定されることが多いが<sup>47,48)</sup>、本研究ではある時刻に野外で採集された個体を数時間無給餌の状態に置くことによって、その胃内容物量の減少から消化速度を推定した。このような野外採集による消化速度の推定のように供試魚の体サイズがランダムである場合、胃内容物重量を用いるよりも体サイズの影響を取り除くことができる胃充満度指数を用いる方が妥当とされている<sup>49)</sup>。そこで本研究では、ある時刻に採集した個体の胃充満度指数の時間経過に伴う減少速度を消化速度とした。消化速度を表す代表的なモデルとして、指数関数モデル $W_t = W_0 \exp^{-rt}$  ( $W_0$ は給餌直後の胃充満度指数、 $W_t$ は $t$ 時間後の胃充満度指数、 $r$ は消化速度)が魚類の消化速度を推定するのに適当であり<sup>49,50)</sup>、本研究では胃充満度指数の経時変化を指数関数式に適合させた。さらに、消化速度 $r$ は水温 $T$ の関数であり、 $r = a \exp^{bT}$ で示される<sup>51,52)</sup>。本研究では、調査を行った1995年7月19日と8月8日の水温はともに約22℃であったことから、両日の調査結果を合わせて消化速度を推定した。消化速度を推定するまでの具体的な手順は以下の通りであった。

まず、船上で曳網を用いて稚魚を採集し(7月19日、8月8日ともに採集時刻は7:00)、曳網の最後部の魚捕部を縛ってあるロープをほどき、稚魚を水面下に沈めた大きなザルに移した。そして、ザルの中に収容した稚魚を、できるだけ手で触れないように注意しながら、あらかじめ酸素を十分に供給した湖水を満たした72ℓのコンテナに素早く移した。コンテナは20分以内に港の岸

壁に運んだ後、酸素を充分供給した湖水で満たした20ℓのバケツ4~6個それぞれに、約40~50個体の稚魚を収容した。それぞれのバケツは、水温の上昇を抑えるために、連続的に港内の湖水をポンプアップしたコンテナの中に収容した。さらに、直射日光を避けるために、すべてのバケツを青いビニールシートで覆った。そして、約1時間おきに1つずつバケツを取り出し、稚魚を10%中性ホルマリンで固定した。このようにして一定時間毎に固定した稚魚を実験室に持ち帰った後、被鱗体長、体重および胃充満度指数を前述のように測定した。そして、消化速度 $r$ は時間経過 $t$ に伴う胃充満度指数(SFI)をプロットし、これに指数関数式( $SFI = a e^{-rt}$ )を適合させて、係数 $r$ から推定した。

## 第4節 研究に用いた資源量指数

本研究では鳥澤<sup>10)</sup>による以下に示す5つの資源量指数(Table 4)を随時参照し、ワカサギ初期生活の生態と環境要因との関係について考察した。

1. 有効産卵数  
網走湖ワカサギ孵化場収容卵数と自然産卵数との合計
2. 稚魚分布指数  
毎年7月から9月までに月1回の頻度で、湖内の10数地点で曳網を用いて稚魚を採集し、1曳網当たりの平均採集個体数を求め、その最大値を稚魚分布指数とする。
3. 生残指数  
有効産卵数と稚魚分布指数との比で、その年の卵から稚魚までの生残を指数化した値である。
4. 降海移動群量指数  
流出河川である網走川で、毎年7月から9月まで設置する「ふくべ網」で採集されるワカサギ稚魚の1日当たりの平均採集個体数で、その年の降海した稚魚の多寡を指標する。
5. 秋季曳網漁業前期初期資源量  
秋漁が開始されてからの漁獲量の推移を基に、Deruly法により推定される漁期開始前の資源量推定値である。秋漁前期は湖中残留群を漁獲対象とし、この資源量指数はその年の湖中残留群の資源量を表す。

Table 4 Various basic data of smelt resource indices used in this study.

Resource index	Unit
Effective number of spawned eggs	X10 <sup>8</sup> inds.
Density index of juveniles	inds. /tow
Survival index	x10 <sup>-8</sup>
Sea - run index	inds. /day
Initial stock abundance in the first half of autumn fishing season	tons

Resource indices are referred from Torisawa<sup>10)</sup>

### 第3章 結果と考察

#### 第1節 仔魚期の生活様式

##### 1. 生息環境

##### 1.1. 水温、塩分およびクロロフィルa量の鉛直的季節変化

Fig. 8に、1995年～1997年までの5月から6月の湖央域のSt. 9における水温、塩分、クロロフィルa量の鉛直分布の季節変化、および0～2mの平均クロロフィルa量とそのサイズ組成を示した。水温はどの年も5～6mまでは鉛直的に一様であった (Fig. 8a)。3ヶ年の5～6m以浅の水温は、1995年は5月上旬から中旬が12～14℃、5月下旬から6月上旬が14～16℃、6月中旬以降は18℃以上となった。1996年は5月上旬から中旬には6～10℃と低く、5月下旬から6月上旬は12～14℃、6月中旬以降は16℃となり、水温の上昇は1995年よりも1旬遅れて推移した。1997年は5月上旬から中旬には8～12℃、5月下旬から6月上旬は12～14℃、6月中旬以降は16～18℃となった。

塩分は3ヶ年ともに明瞭な塩分躍層が発達しており、1995年と1996年は5～6m、1997年は6～8mで塩分が鉛直的に大きく変化した (Fig. 8b)。これ以浅では塩分は一様であり、1995年は1～2 psu、1996年は5月に1～2 psu、6月は1 psu以下、1997年は5月中旬に4 psu、これ以降は3～4 psuであった。

クロロフィルa量も鉛直的にはほぼ一様であり、1995年と1996年は5月から6月にかけて20μg/lから30～40μg/lへと増加した (Fig. 8c)。一方、1997年には表層で80μg/l、4m以浅では60μg/lと高濃度のクロロフィルaが観測された。そして、クロロフィルa量は6月には減少したものの、2m以浅では40μg/l以上、4～7mでは20～40μg/lの濃度を維持していた。0～2m

の平均クロロフィルa量は、3ヶ年ともに約10μg/l以上で推移し、1995年と1996年は10～40μg/l、1997年は40～80μg/lであった。クロロフィルa量のサイズ組成は1996年6月を除き、0.2～20μm画分が62～91%を占めて卓越していた (Fig. 8d)。

以上、3ヶ年の湖沼環境の特徴を整理すると、1996年は最も低水温・低塩分の傾向があり、1995年は高水温、1997年は高塩分であった。クロロフィルa量はどの年も約10μg/l以上の高濃度で存在し、特に高塩分であった1997年のクロロフィルa量は高濃度であった。クロロフィルa量のサイズ組成は、0.2～20μm画分が優占するが、低水温・低塩分であった1996年には、20μm以上の大型サイズも優占した。

##### 1.2. 水温、塩分、クロロフィルa量および微小動物プランクトンの水平分布

網走湖の水温、塩分から見た物理環境の鉛直分布は、塩分躍層以浅では均一な水塊構造を示した。そこで、1995年から1997年の3年間に亘り、湖内に7～9地点を設定して、表層の環境を調べることにより仔魚期の湖沼環境を詳しく把握した。ここでは、湖を3つの湖域、すなわち、湖口域 (Mouth area; St. 4, 5, 6)、湖央域 (Central area; St. 8, 9, 10)、湖奥域 (Inner area; St. 12, 14, 15) のそれぞれに区分し (Fig. 5)、各湖域区分に属するそれぞれの調査地点の表層の水温、塩分、クロロフィルa量、および微小動物プランクトン総個体数密度の平均値を求めて、湖域区分毎に5月から6月までの季節変化を示した (Fig. 9)。また、湖央域のSt. 9で5月から7月に、網目100μmの北原式プランクトンネットの鉛直曳採集によって得られた甲殻類プランクトンの季節変化も示した。

水温と塩分は各湖域ともに同様の値で変動し、春季の