

北海道系サケ稚魚の生残率の算定と 人工ふ化放流事業の効果の評価

渡辺一俊

〒062-0922 札幌市豊平区中の島2-2 水産庁さけ・ます資源管理センター調査課

Estimation of Survival Rate of Juvenile Chum Salmon and Evaluation of Salmon Ranching Practice in Hokkaido, Japan

Kazutoshi Watanabe

Research Division, National Salmon Resources Center, Fisheries Agency of Japan,
2-2 Nakanoshima, Toyohira-ku, Sapporo 062-0922, Japan
(watanabe.kazutoshi@salmon.affrc.go.jp)

Abstract.— Survival rate of juvenile chum salmon (*Oncorhynchus keta*), released from five regions around Hokkaido, was estimated by using the simple deterministic model of survival process. The survival rates of juvenile in each region were higher in the year classes after mid-1980's than in those before mid-1960's. The return rates of adult correspondingly changed with the survival rates. This means that juvenile survival largely contributes the abundance of year class and the adult return in chum salmon. Index of efficiency of salmon enhancement practice (*E*) was derived from relative number of juvenile released and that of adult returning. *E* increased in different manner between regions after the introduction of the program of "release fed juvenile at the period of suitable environmental condition for juvenile" in 1962. In the regions, where the return rates were lower before the start of the program, *E* increased faster and larger. Otherwise, increase in *E* was not so fast or large in the regions of higher return rates. The program was successful in enhancement of chum salmon stocks around Hokkaido, as a whole.

Key words : chum salmon, juvenile survival, adult return, salmon ranching

緒 言

北海道系サケ (*Oncorhynchus keta*) の資源は、人工ふ化放流事業によって維持されている。したがって、事業の成否によって、サケの資源水準は変動することとなる。北海道系サケの回帰尾数と回帰率(年級群の放流尾数当り回帰尾数)は、近年、高い水準にあるが、これは主に、ふ化放流の技術の進歩の結果だとみられている(帰山 1996)。

サケの回帰尾数・率は、生残、成長、あるいは成熟の状況に応じて増減する。なかでも、幼稚魚期の

生残の良否が回帰尾数・率に及ぼす影響は、大きいと考えられている(Parker 1962; Fukuwaka and Suzuki 1998)。我が国のサケ人工ふ化放流事業のなかで、稚魚の餌付けと放流時期の選定が中心的な位置づけにあるのは(Kobayashi 1980; Mayama 1985)、幼稚魚期の生残率を高めることが、回帰尾数・率の向上につながるとの期待があるからである。

高い水準にある北海道系サケの回帰尾数・率が、事業のねらいどおりに幼稚魚期の生残率が高まった結果としてもたらされたか否かは、検証されてこなかった。その主な理由は、幼稚魚期の生残率が明らかでなかったことにある。

人工ふ化放流事業の効果は、サケの回帰尾数・率の向上に対する寄与の割合によって評価を受けるべきである。北海道では、回帰尾数・率をともに上げることがねらって、いわゆる給餌放流・適期放流の

手法が1962年に導入され、現在に至っている。この手法の有効性について、これまでは、回帰尾数・率が過去に比べ上昇したことを以て、肯定的な判断が下されるにとどまっていた。しかし、今後の事業を展開していくうえでは、何らかの尺度に照らして、従来の結果をより厳密に点検することが欠かせない。

本稿では、幼稚魚期のサケの生残率を算定し、親魚の回帰の多寡に及ぼす幼稚魚期の生残の影響を分析する。あわせて、人工ふ化放流事業が、サケの回帰尾数・率の向上に果たした効果の如何を検証する。

材料および方法

用いた資料は、さけ・ます資源管理センターと前身の北海道さけ・ますふ化場が北海道の全域で収集した、稚魚の放流尾数、親魚の沿岸での漁獲尾数および河川での捕獲尾数集計を海域別に集計したものである。海域の区分は、オホーツク(A)、根室海峡(B)、襟裳以東(C)、襟裳以西(D)、および日本海(E)の計5つとした(Fig. 1)。親魚については標本を適宜抽出して鱗による年齢査定をおこない、その結果に基づいて年齢別の回帰尾数を算定した。集計の期間は1950-1998年で、これに対応する年級群は1950-1991年級群であった。

サケの死亡は、産卵によるもの(産卵死亡、以下同じ)と、それ以外の自然の原因によるもの(自然死亡、以下同じ)との、2つの要素から成る。漁獲

は、必ず死亡する産卵群を対象としており、産卵死亡の中に含まれるから、死亡の要素としては無視して差支えない。そして産卵死亡は、産卵群だけで起こり、沖合に残ったサケには起こらないから、産卵死亡と自然死亡は、サケの生残過程において別個に作用するとみなしてよい。

したがって、ある年級群の海洋生活期の生残過程は、

$$N_{t+1} = N_t e^{-M} - R_t \quad (1)$$

と表すことができる。ここで、 N_t は t 歳でのサケの生残尾数、 R_t は t 歳で親魚として回帰したサケの尾数、 M は自然死亡係数である。

幼稚魚期以後の魚類の自然死亡は比較的安定しており(田中 1985; Wootton 1990)、その度合は寿命の長短に応じて変化すると考えられている(田中 1960; Hoenig 1983; 河井 1987; 陳ら 1989)。田中(1960)は、寿命と M との間に、

$$M = 2.5/t_h \quad (2)$$

で表される関係が成立つことを示した。ここで、 t_h は寿命である。サケでは、寿命は回帰した魚の最高年齢に相当する。Table 1に、サケの最高回帰年齢と式(2)から導かれた M を、海域別に示した。

各年級群のサケの、1歳における生残尾数を、式(1)を次のように変形し、

$$N_t = (N_{t+1} + R_t) e^M \quad (3)$$

t_{h+1} を0と置いたうえで、年齢を遡って計算することによって求めた。

1歳魚となった時点でのサケの生残率を、放流尾数に対する生残尾数の百分率として算出した。サケの産卵は秋で、稚魚は春に放流されるから、この生残率は、0.5歳から1歳までのほぼ半年間にわたる海洋生活初期の生残率を表す。

各年級群の回帰率を、放流尾数に対する年齢別回帰尾数の累積値の百分率として算出した。

人工ふ化放流の効果を評価する指標として、年級

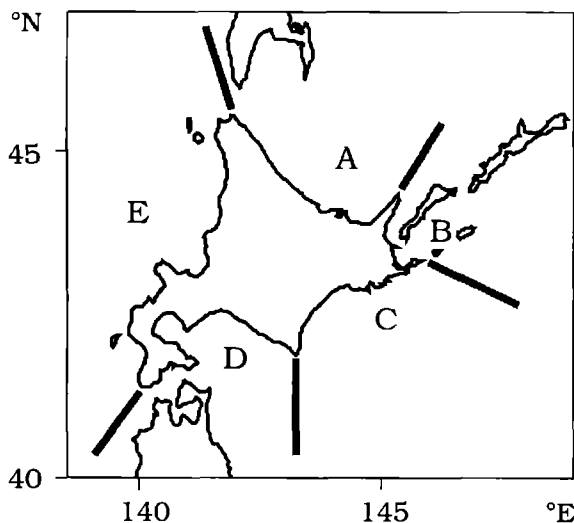


Fig. 1. Statistical regions of release and catch for chum salmon around Hokkaido. A, coast along Okhotsk Sea; B, coast of Nemuro strait; C, east coast of Pacific Ocean; D, west coast of Pacific Ocean; E, coast along Sea of Japan.

Table 1. Maximum age at return and instantaneous natural mortality (M) of chum salmon released from each of five regions. M is the mortality for fish older than one-year-old.

	Maximum age	M
A	7	0.357
B	6	0.417
C	7	0.357
D	6	0.417
E	6	0.417

群ごとの放流効果指数 (E) を次のように定義した.

$$E = A/J \quad (4)$$

ただし, $A = a/a_s$ および $J = j/j_s$ であり, a はある年級群の回帰尾数, a_s は, 給餌放流・適期放流の導入前の, 1950-61年級群の回帰尾数の平均, j は当該年級群の放流尾数, そして j_s は1950-61年級群の放流尾数の平均である. したがって, A は1950-61年級群の回帰尾数に対する, ある年度の回帰尾数の倍率 (相対回帰尾数), また J は1950-61年級群の放流尾数に対する, ある年度の放流尾数の倍率 (相対放流尾数) を表す.

E は, 放流尾数の増減に対する回帰尾数の増減の倍率を表すから, その値の大小によって, 給餌放流・適期放流の手法の導入が, 回帰尾数・率の向上に及ぼした効果の有無とその度合を判定できる. すなわち, E が1より小さければ, 導入の効果はあがらなかったことがわかり, 逆に1より大きければ, 大きいほどその効果の高かったことが明らかとなる.

結 果

放流, 回帰および生残尾数 北海道全域での放流尾数は, 1980年級群まで増加を続けて11.5億尾となった後, 10-11億尾台で推移していた (Fig. 2). 海域ごとの放流尾数は, 根室海峡(B)と襟裳以西(D)では全域でのそれに似た変化を示したが, 日本海(E)では1979年級群から増加の傾向に, オホーツク海(A)と襟裳以東(C)では, 1981年級群以後, 減少の傾向にあった (Fig. 3). 1988年級群以後, 各海域での放流尾数は, 2.0-2.5億尾の範囲にあった.

北海道全域での回帰尾数は, 1960年代中期まで, ほとんどの年級群で5.0百万尾に満たなかったが, 1980年代中期以後の年級群では30.0百万尾を大きく上回り, 過去最高の水準へと増加した (Fig. 2). 海域ごとの回帰尾数は, いずれの海域でも, 1960年代中期までの年級群では2.0百万尾に満たない場合がほとんどだったが, 1980年代中期以後の年級群では5.0百万尾をおおむね上回り, 過去最高の水準となっていた (Fig. 3). 回帰尾数が最も少なかった

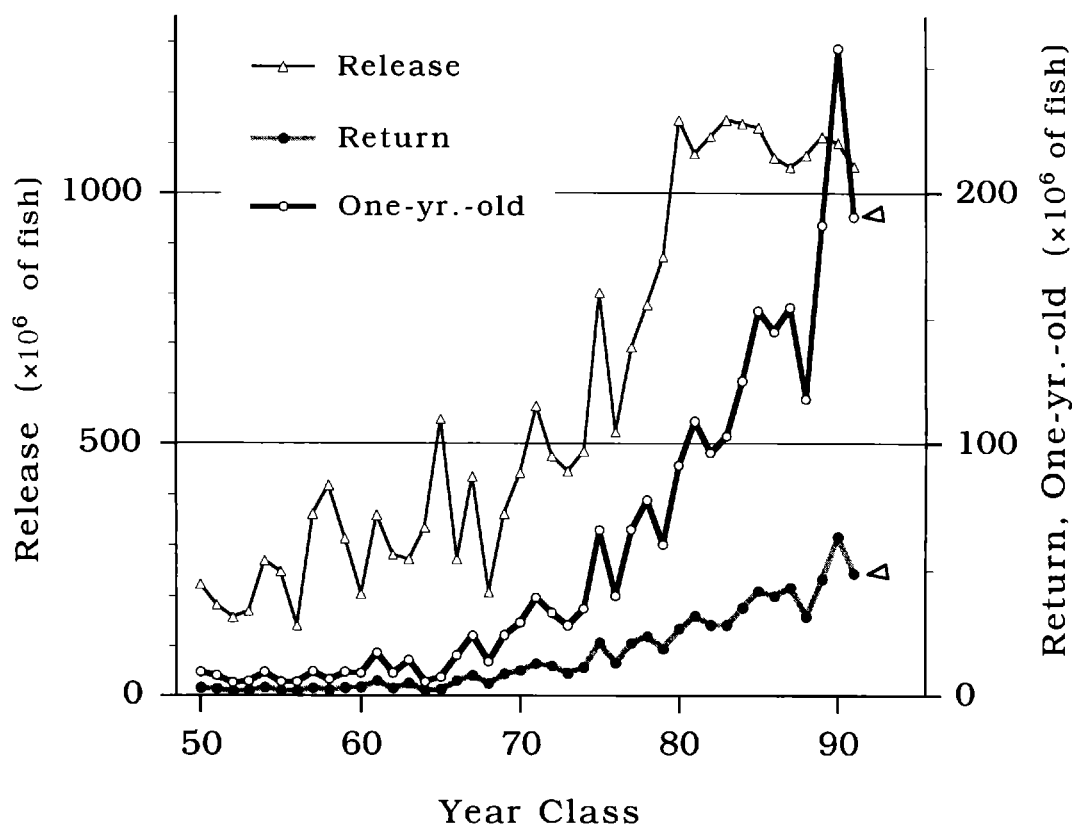


Fig. 2. Number of juvenile released, cumulative number of adult returning, and estimated number of one-year-old fish by year class, total for Hokkaido. <△; Fish of maximum age was not included.

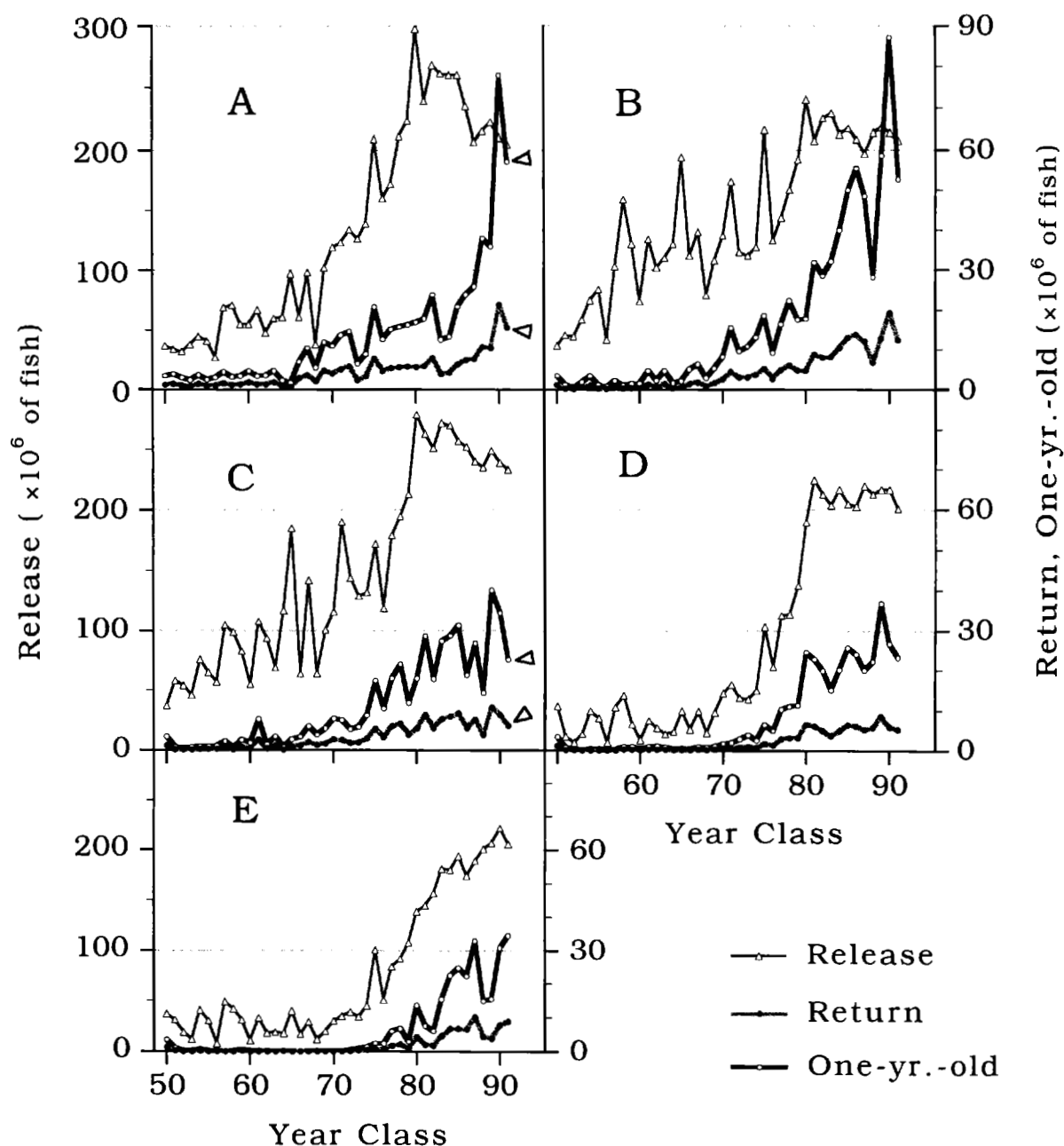


Fig. 3. Number of juvenile released, cumulative number of adult returning, and estimated number of one-year-old fish by year class, in each of the regions. <1; Fish of maximum age was not included.

のは、日本海の1965年級群で0.02百万尾、最も多かったのはオホーツク海の1990年級群で21.4百万尾だった。

北海道全域での1歳魚の生残尾数の推定値は、回帰尾数とはほぼ同じ経過で変化していた (Fig. 2)。すなわち、1960年代中期まで、ほとんどの年級群では生残尾数が100.0百万尾に満たなかったのに対し、1980年代中期からは1990年級群の257.5百万尾を最

高に、すべての年級群で生残尾数が100.0百万尾を上回り、過去最高水準に達していた。海域ごとの1歳魚の生残尾数も、海域ごとの回帰尾数とはほぼ同じ経過で変化していた (Fig. 3)。1960年代中期まで、各海域のほとんどの年級群で、生残尾数は4.0百万尾を下回っていたが、1985年中期以後のほとんどの年級群では、生残尾数は20.0百万尾を越えて、過去最高水準となっていた。生残尾数が最も少なか

ったのは、日本海の1965年級群で0.06百万尾、最も多かったのは根室海峡の1990年級群で87.2百万尾だった。

回帰率と生残率 親魚の回帰率は、いずれの海域でも上昇の傾向にあった (Fig. 4). 上昇が始まったのは、オホーツク海で1984年級群から、他の海域では1964または1965年級群からと異ってはいたものの、回帰率は1960年代中期以前の年級群で0.5-2.6% (平均値) と最も低く、1980年代中期以後の年級群で2.7-8.9% (平均値) と最も高かった (Table 2).

1歳魚の生残率の推定値は、回帰率とほぼ同じ経過で推移し、1960年代中期までの年級群の1.3-6.5% (平均値) から1980年代中期以後の年級群の10.6-33.1% (平均値) へと上昇していた (Fig. 4, Table 2).

人工ふ化放流の効果 各海域での相対放流尾数 (J) は、1980年前後の年級群から、横ばいまたは緩やかな上昇にとどまっていた (Fig. 5). この状態での各海域の J は、オホーツク海で4-6倍、根室海峡で2-3倍、襟裳以東で3-4倍、襟裳以西で9-10倍、そして日本海で6-7倍であった。

海区海域での相対回帰尾数 (A) は、襟裳以東と襟裳以西の2つの海域で横ばい状態に、他の海域で上昇傾向にあって、1987年以後の年級群では、どの海域においても J の伸びを上回っていた (Fig. 5). 各海域における1987年以後の年級群の A は、オホーツク海で6-16倍、根室海峡で13-36倍、襟裳以東で6-17倍、襟裳以西で23-36倍、そして日本海で

5-13倍であった。1986年以前の年級群では、海域によって A の変化の様相に違いがあって、根室海峡、襟裳以東、および襟裳以西では1960年代中期の年級群から A が J を上回るようになったが、オホーツク海では1986年級群まで、日本海では1972年級群まで、 A が J を上回することはほとんどなかった。

放流効果指数 (E) は、 A の変動と同じく、襟裳以東と襟裳以西の2つの海域で横ばい状態に、他の海域で上昇傾向にあった (Fig. 6). 各海域において、 E は A が J を上回り始めた時期の年級群以後、1を越えるようになった。 E の最高は、オホーツク海で4、根室海峡で13、襟裳以東で5、襟裳以西で4、そして日本海で9と、海域によって開きがあった。

考 察

年級群の回帰尾数・率と1歳魚の生残尾数・率との対応した推移は、北海道系サケの回帰の趨勢が、海洋生活初期における幼稚魚の生残の多寡に依存することを表している。Fukuwaka and Suzuki (1998) は、標識放流した稚魚の再捕結果から、本州日本海系サケの回帰の動向が幼稚魚期の生残によって決まる可能性が高いと指摘した。多くの魚類において、生残率は、仔稚魚期までのきわめて低い状態を経て、幼魚期から高く安定した段階へと移っていく (田中 1985; 河井 1987; Wootton 1990). このため、年級群の豊度は、卵から稚魚期にかけての生残率と産卵量の変動によって、おおむね決まると考えられている

Table 2. Return rate of adult (R) and survival rate of one-year-old fish (S) by year class.

		50-54		55-59		60-64		65-69		70-74		75-79		80-84		85-89		90-91	
		R	S	R	S	R	S	R	S	R	S	R	S	R	S	R	S	R	S
A	Mean	3.4	9.1	2.7	7.0	2.6	6.5	3.9	10.1	3.2	8.6	3.0	8.3	2.1	6.4	3.8	12.9	8.9	32.5
	Lowest	2.4	6.4	1.8	4.6	1.6	3.8	0.7	1.7	1.9	5.1	2.6	7.3	1.5	4.8	2.4	8.1	7.7	27.8
	Highest	4.5	11.8	4.3	11.5	3.5	8.5	5.6	14.6	4.3	11.2	3.7	10.0	3.0	8.9	5.0	17.6	10.2	37.2
B	Mean	0.9	3.0	0.4	1.5	0.8	2.8	1.2	3.8	2.6	8.9	2.9	10.0	3.7	13.7	5.6	22.9	7.6	33.1
	Lowest	0.4	1.3	0.2	0.7	0.4	1.3	0.3	1.1	2.0	6.4	2.2	7.5	2.0	7.4	3.2	13.2	6.1	25.4
	Highest	1.4	4.7	0.6	2.2	1.3	4.3	1.6	5.0	3.2	11.1	3.7	13.4	4.9	18.8	6.7	26.8	9.1	40.8
C	Mean	0.5	1.6	0.6	1.9	1.3	3.6	1.6	4.5	1.8	5.1	2.9	9.1	2.7	9.1	3.0	10.6	3.2	12.1
	Lowest	0.5	1.4	0.2	0.7	0.3	0.7	0.5	1.5	1.3	3.6	1.9	5.6	2.0	6.5	1.7	6.1	2.7	9.7
	Highest	0.7	1.9	1.0	3.2	2.5	7.2	2.3	6.1	2.4	6.9	3.4	11.0	3.4	10.9	4.3	16.1	3.7	14.5
D	Mean	1.6	4.5	1.0	3.0	2.0	5.8	2.3	3.7	1.9	5.8	2.4	8.1	2.6	9.9	3.1	12.2	2.7	12.0
	Lowest	0.5	1.6	0.4	1.1	1.3	3.4	0.7	2.2	1.2	3.8	1.9	6.3	1.8	7.4	2.4	9.2	2.7	11.6
	Highest	2.8	8.1	1.7	5.0	2.9	8.1	2.0	5.8	2.7	9.3	2.9	9.7	3.5	13.0	4.0	17.0	2.7	12.4
E	Mean	0.8	2.6	0.4	1.3	0.5	1.4	0.3	1.0	0.5	1.7	1.5	4.9	2.4	8.0	3.3	11.6	3.9	15.3
	Lowest	0.5	1.5	0.1	0.2	0.2	0.7	0.1	0.1	0.2	0.7	0.8	2.4	1.1	3.9	1.9	7.5	3.5	13.9
	Highest	1.5	5.1	0.9	3.0	0.6	1.9	0.8	2.7	0.9	2.8	2.3	7.3	3.7	12.5	5.4	17.4	4.3	16.8

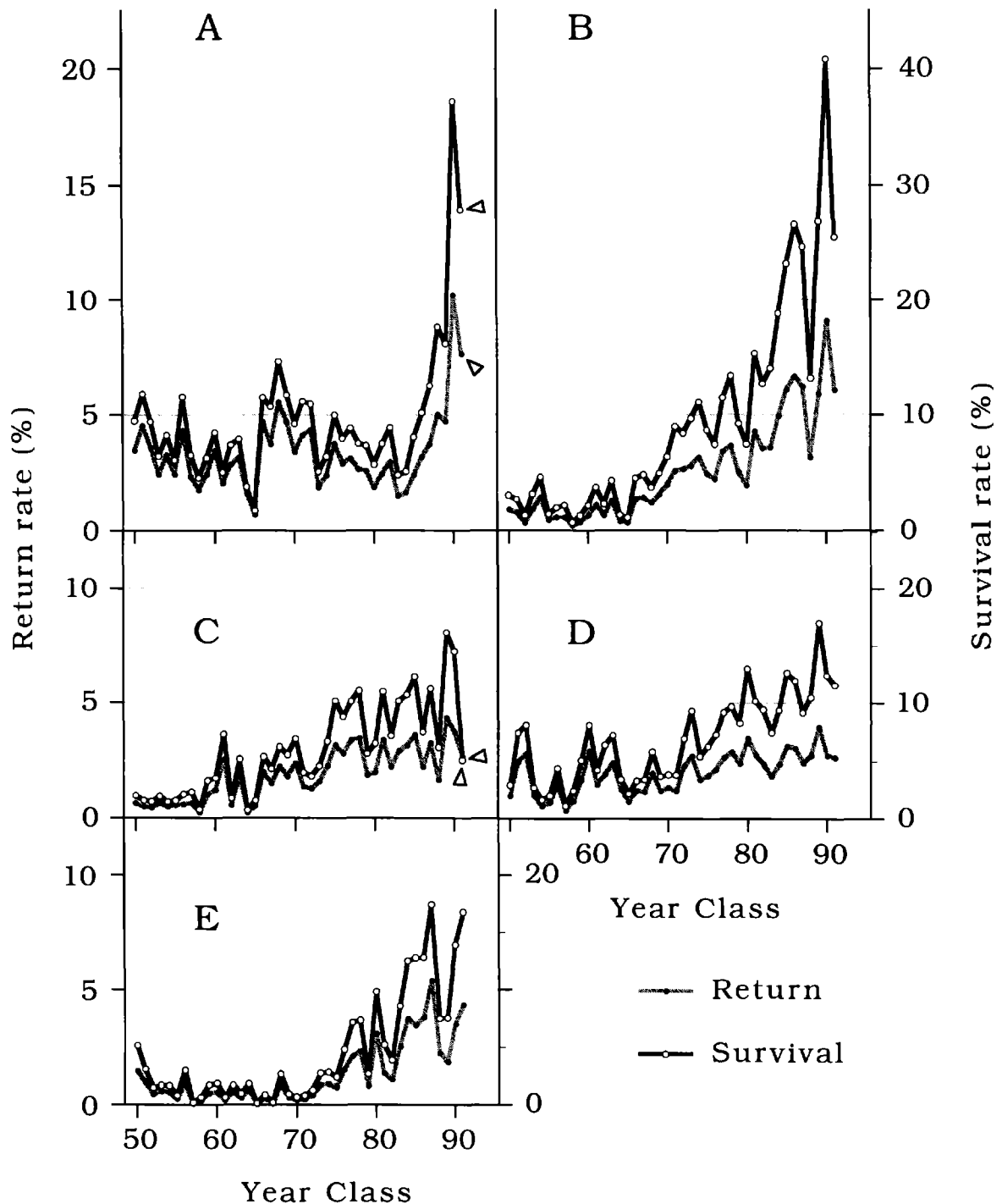


Fig. 4. Return rates of adult and survival rates of 1-year-old fish by year class, in each of five regions. $\triangle$; Fish of maximum age was not included.

(Wootton 1990). 北海道系サケでは、年級群豊度が回帰量に、産卵量が放流量に相当する。北海道ではサケの放流量が人為的に制御されているので、回帰尾数は、稚魚期の生残率の変動に応じて決まることになる。

1歳魚の生残尾数・率の算定に当たっては、1歳より高齢の魚の自然死亡係数 (M) を一定とみなした。式 (3) の性質上、 M が変化すれば、算定結果としての1歳魚の生残尾数・率も動く。サケの M は、沖合で生活する間に、環境の影響を受けて変動する

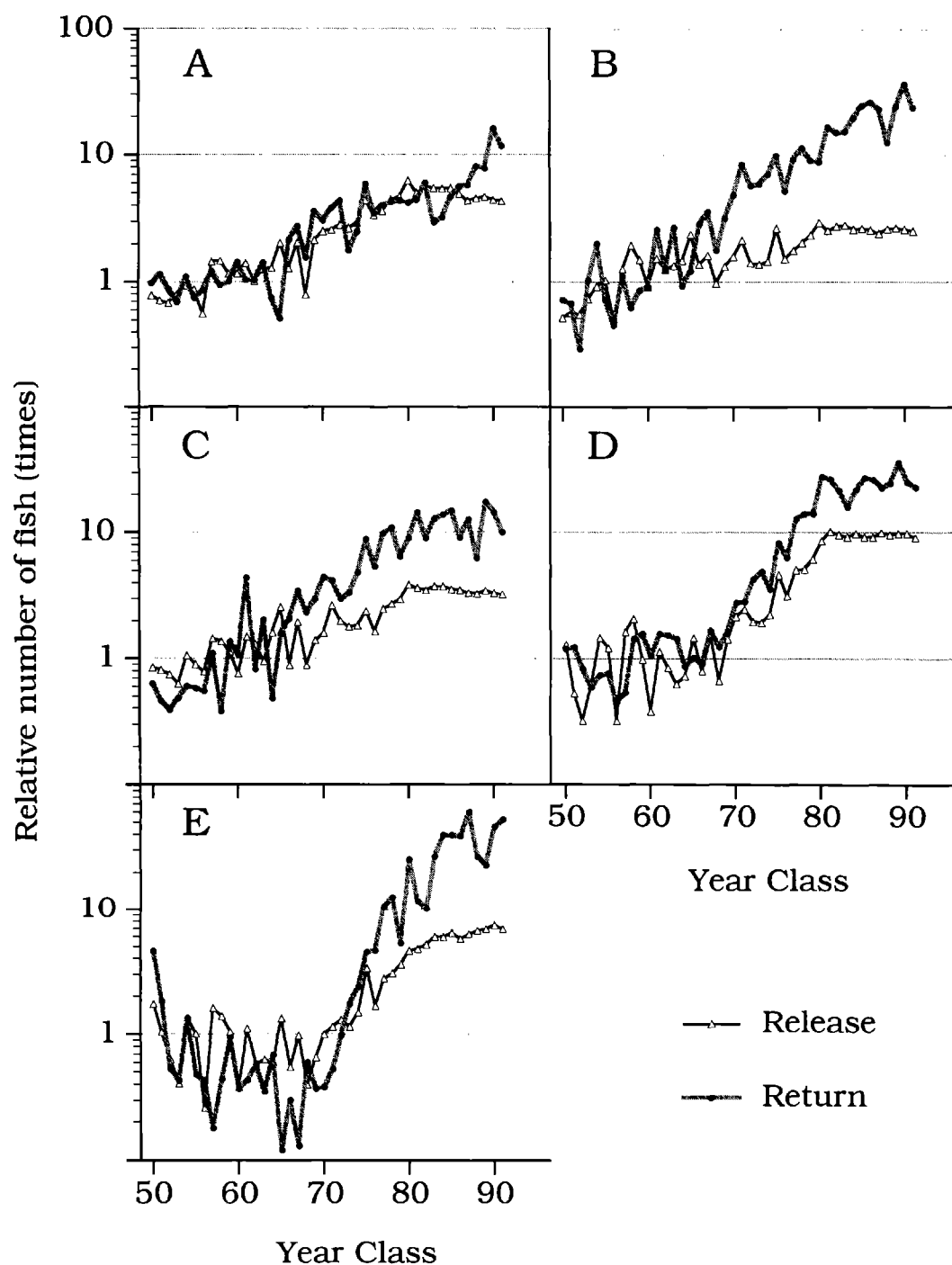


Fig. 5. Number of juvenile released, number of one-year-old fish, and cumulative number of adult returning by year class relative to corresponding averages of year classes before 1961, in each of the regions.

可能性があるが (Peterman 1978; Ishida et al. 1995; Kruse 1998), それは北海道系のサケに, 同時かつ一様に及ぶはずである. しかし, 1 歳魚の生残尾数・率の変動は, 海域によってまちまちであった. 沖合で M は変化する可能性はあるが, その度合は,

おそらく小さいであろう.

本稿では, M の算定に寿命との間の反比例関係を利用した (田中 1960). M の算定法としては, 同様に寿命に着目したもの (Hoenig 1983; 陳ら 1989) のほか, 絶対成長と生息水温 (Pauly 1980), 相対

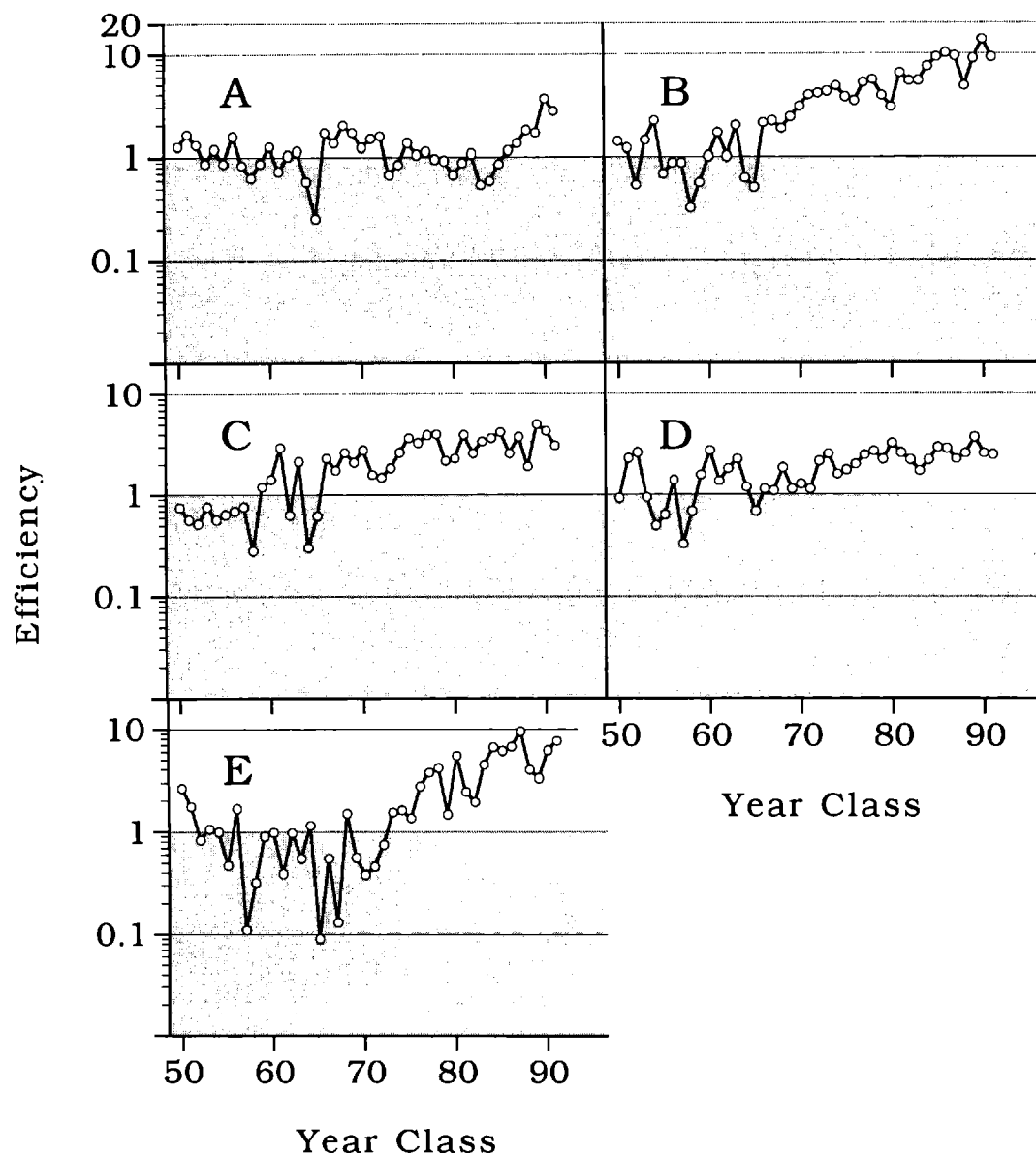


Fig. 6. Efficiency of the salmon ranching practice on the increase in adult returning. In shaded areas, results of the salmon ranching practice are ineffective.

成長 (McGurk 1996), あるいは再生産を中心とする生活史の特性に着目したもの (Myers and Doyle 1983) などがある。魚類の真の M (または生残率) は、サケに限らず明らかではないため (Vetter 1988), どれを M の算定法として用いるべきか、はっきりしない。現状では、いくつかの方法によって算定した M を比較するなかで、より適切と判断できる値を選び出すのが妥当だと考えられる。

給餌放流・適期放流の手法による放流は、1962年に導入された後、1960年代末までに大部分の稚魚を対象におこなわれるようになった。ほとんどの海域で、1歳魚の生残尾数・率の上昇が始まったの

は、この時期に重なる。帰山 (1996) は、給餌した稚魚が放流魚全体に占める割合と放流魚の平均体重が、ともに回帰率に対して正の相関関係にあることをみた。これらから、給餌放流・適期放流の手法の導入によって生残尾数・率が高まった結果、回帰尾数・率が上昇したことがわかる。

本稿では、人工ふ化放流事業による効果の度合を評価する尺度として、放流効果指数 (E) を考案した。 E の意義は、回帰尾数の増減と放流尾数のそれとの比較によって、事業の効果の大きさを測ることができるところにある。効果の有無は、回帰率の変動からおおよそ判断できるが、漁業においては率よ

りも尾数が重視される。したがって、効果の大きさを表す尺度としては、尾数の増減を直接反映したものを必要がある。Eは、この条件にかなう尺度である。

人工ふ化放流事業は、回帰率のより低い海域で、より高い効果を上げるのが望ましい。1960年代前半までの回帰率が低迷していた、根室海峡や日本海で、Eの最高値が高かったことから、事業は十分な効果を上げたかと判断される。オホーツク海では、Eが1を越えて、効果の現れ始めた時期が他の海域に比べて遅く、また最高値も低かったが、これは過去の回帰率が比較的高かったためである。Eの変化としては顕著に現れていないものの、オホーツク海での回帰率と1歳魚の生残率は、最近数年間の年級群では根室海峡と並んで最も高い水準に達している。したがって、この海域についても、事業の効果は上がったと評価できる。

人工ふ化放流事業の主体が、漁業者に移りつつある中、北海道系サケの資源管理を進めるには、放流した稚魚の安定した回帰が求められる。稚魚期のサケの生残率の推定結果に基づいて放流手法の改良を図り、また本稿で提案したような数値で表現できる尺度によって事業の効果を評価したうえで、将来の戦略を立てることが今後重要となってくる。

引用文献

- 陳賽斌・石野誠・平山信夫. 1989. 資源の動的平衡及び生物学的諸特性値の相互関連性. 水産海洋研究, 53: 18-27.
- Fukuwaka, M., and T. Suzuki. 1998. Early mortality of chum salmon juveniles in the Japan Sea coast. (NPAFC Doc. 335) National Salmon Resources Center, Sapporo 062-0922, Japan. 6 p.
- Hoenig, J. M. 1983. Empirical use of longevity data to estimate mortality rates. J. Fish Biol., 82: 898-902.
- Ishida, Y., D. W. Welch, and M. Ogura. 1995. Potential influence of North Pacific Sea surface temperatures on increased production of chum salmon (*Oncorhynchus keta*) from Japan. Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci., 121: 271-275.
- 帰山雅秀. 1996. サケ属足魚類の再生産と最適放流技術. 月刊海洋, 28: 589-594.
- 河井智康. 1987. 比較生態学的視点からみた海産硬骨魚類資源の変動に関する研究. 東海水研報, 122: 49-126.
- Kobayashi, T. 1980. Salmon propagation in Japan. In Salmon ranching (edited by J. E. Thorp). Academic Press, New York. pp. 91-107.
- Kruse, G. H., 1998. Salmon run failures in 1997-1998: a link to anomalous ocean conditions? Alaska Fish. Res. Bull., 5: 55-63.
- Mayama, H. 1985. Technical innovations in chum salmon enhancement with special reference to fry condition and timing of release. NOAA Tech. Rep. NMFS, 27: 83-86.
- McGurk, M. D. 1996. Allometry of marine mortality of Pacific salmon. Fish Bull., 94: 77-88.
- Myers, R. A., and R. W. Doyle. 1983. Predicting natural mortality rates and reproduction-mortality trade-offs from fish life history data. Can. J. Fish. Aquat. Sci., 40: 612-620.
- Parker, R. B. 1962. Estimation of ocean mortality rates for Pacific salmon (*Oncorhynchus*). J. Fish. Res. Bd. Can., 19: 561-596.
- Pauly, D. 1980. On the interrelationships between natural mortality, growth parameters, and mean environmental temperature in 175 fish stocks. J. Cons. Int. Explor. Mer., 39: 175-192.
- Perterman, R. M. 1978. Testing for density-dependent marine survival in Pacific salmonids. Can. J. Fish. Aquat. Sci., 35: 1434-1450.
- 田中昌一. 1960. 水産生物のpopulation dynamicsと漁業資源管理. 東海水研報, 28: 1-200.
- 田中昌一. 1985. 水産資源学総論. 恒星社厚生閣, 東京. 381 p.
- Vetter, E. F. 1988. Estimation of natural mortality in fish stocks. Fish. Bull., 86: 25-43.
- Wootton, R. J. 1990. Ecology of teleost fishes. Chapman and Hall, New York. 404 p.