鹿児島湾におけるマダイの資源評価と放流計画

宍道 弘 敏,^{1*} 滝 本 鮎 子,² 小 畑 泰 弘,³ 浜 崎 活 幸,² 北 田 修 一²

(2011 年 6 月 23 日受付, 2011 年 10 月 27 日受理)

¹鹿児島県水産技術開発センター, ²東京海洋大学海洋科学部,³独水産総合研究センター瀬戸内海区水産研究所

Stock assessment and release strategy of red sea bream

Pagrus major in Kagoshima Bay, JapanHIROTOSHI SHISHIDOU,^{1*} AYUKO TAKIMOTO,² YASUHIRO OBATA,³KATSUYUKI HAMASAKI² AND SHUICHI KITADA²

¹Kagoshima Prefecture Fisheries Technology and Development Center, Ibusuki, Kagoshima 891-0315, ²Tokyo University of Marine Science and Technology, Minato, Tokyo 108-8477, ³National Research Institute of Fisheries and Environment of Inland Sea, Fisheries Research Agency, Hatsukaichi, Hiroshima 739-0452, Japan

Population sizes of red sea bream (RSB) *Pagrus major* in Kagoshima Bay were estimated both for wild and released fish by cohort analysis from 1990 to 2002 to consider its fishery management and release strategies. The analysis showed that the population size of released fish had decreased while that of wild fish remained stable. The commercial catch of wild fish tended to decrease as that of released fish increased over 50 tons. The results suggested that the RSB enhancement program with the scale of 700–800 thousand seeds released and 50 tons recaptured was appropriate. Predictions of red sea bream catch in 2017 by a simple population dynamics model under various scenarios of fishing regulation and seed release showed that the catch increases under the enhancement program with improved stocking efficiency.

キーワード：鹿児島湾, 漁獲量予測, コホート解析, 栽培漁業, 資源動態モデル, 放流計画, マダイ

マダイ *Pagrus major* は, 朝鮮半島南部・東シナ海・南シナ海・台湾, および北海道東部・北部や琉球列島を除く日本の沿岸域に分布する¹⁾我が国沿岸漁業において最も重要な漁業資源の一つである。

また, マダイは我が国においてヒラメと並ぶ重要な栽培漁業対象種であり, 鹿児島湾においても 1974 年以来 30 年以上にわたって 1,000 千尾規模の人工種苗放流が行われてきた。²⁻⁶⁾ 一方, 宍道・北田⁶⁾は, 鹿児島湾のマダイについて, 近年放流魚の回収率が低下傾向にあることを報告し, その要因として種苗生産から放流に至る技術的な問題が影響していると推察した。この要因についてより詳しく議論するためには, 天然魚・放流魚別にそれぞれ資源量を推定し, 放流魚の添加効率の推移を把握する必要がある。また, 天然資源と栽培資源を含めた包括的な資源管理⁷⁾を進めるためには, 天然魚・放流魚別の資源状態の把握, 加入量の変動, 天然魚の産卵資源量

当たり加入量, 漁獲係数の推移など, 資源学的なモニタリングと評価が不可欠である。栽培漁業技術に関しては, 放流種苗の回収率の向上を図り, 経済的にも成立させると同時に, 天然資源に与える生態的・遺伝的影響を最小限に抑える方策を検討しなければならない。

本論文では, まずコホート解析により鹿児島湾におけるマダイの資源量を天然魚・放流魚別に推定し, 放流魚の添加効率の推移から, 近年の回収率低下の原因を検証する。次に, 資源変動と環境収容力との関係を検討するとともに, 環境収容力の範囲内で放流による漁獲増が最大限期待できる放流尾数の推定を試みる。さらに, 漁獲規制と種苗放流の様々な条件の下で漁獲量予測を行い, 漁獲量を増大させるための資源管理方策を検討する。

なお, 鹿児島湾においては 2007 年以降放流サイズの基準を平均全長 55 mm 以上から 70 mm 以上へと大型化し, 放流魚混獲率が 2006 年の 1.9% から 2009 年に

* Tel : 81-993-27-9212. Fax : 81-993-27-9218. Email : shishidou-hirotoshi@pref.kagoshima.lg.jp

は3.1%とやや回復してきている状況(未発表)であることから, 本論文では, 直近のデータ解析は今後の課題とし, 1990~2002年までのデータに基づいて解析を行う。

試料および方法

天然魚および放流魚の年齢別漁獲尾数 鼻孔隔皮欠損を放流魚の指標として市場調査を実施した結果から年齢組成データが得られている1990~2002年までの, 各年の年齢別天然魚・放流魚別漁獲尾数を, 実道・北田⁶⁾の(1)式, すなわち $\hat{Y}_{ij} = C_j \hat{\theta}_j \hat{P}_{j,i} / \bar{W}_j \hat{D}_i$ を用いて以下の手順で求めた。ここで, $\hat{Y}_{ij}$: i 年放流魚の j 年における漁獲尾数, C_j : j 年における漁獲量, $\hat{\theta}_j$: j 年における鼻孔隔皮欠損魚の重量混獲率, $\hat{P}_{j,i}$: j 年における $j-i$ 歳魚の鼻孔隔皮欠損魚の年齢組成, $\bar{W}_j$: j 年における鼻孔隔皮欠損魚の漁獲物平均重量, $\hat{D}_i$: i 年における鼻孔隔皮欠損率を表す。

①放流魚については, 1990~2002年の1歳から8+歳までの漁獲尾数を算出した。なお, 1990~1997年に1~8+歳として漁獲される1982~1989年放流群の鼻孔隔皮欠損魚出現率⁶⁾は, データが得られていないため, 1990~2002年放流群の平均値である88.9%を用いた。
②天然魚については, 非鼻孔隔皮欠損魚の年齢別漁獲尾数を, 非鼻孔隔皮欠損魚の重量混獲率 $(1 - \hat{\theta}_j)$, 平均重量及び年齢組成を基に①と同様の方法で求めた。さらに, ①において, 鼻孔隔皮欠損魚年齢別漁獲尾数を $\hat{D}_i$ で除して放流魚年齢別漁獲尾数を推定したことによる増加分(放流魚年齢別漁獲尾数 - 鼻孔隔皮欠損魚年齢別漁獲尾数)を非鼻孔隔皮欠損魚の年齢別漁獲尾数から差し引いて, 天然魚年齢別漁獲尾数を推定した。

なお, ここで述べた漁獲尾数の算出の基礎となっている漁獲量には, 遊漁による釣獲量は含まれていない。⁶⁾ また, 本研究においては, 地理的, 生物学的な過去の知見^{3,4,6)}に基づいて, 鹿児島湾のマダイ資源を独立した一つの群であると仮定して解析を行った。

コホート解析 上記で求めた年齢別漁獲尾数を基に, 「平成15年マダイ日本海西・東シナ海系群の資源評価」⁸⁾と同様に, Popeの近似式を用いてコホート解析を行い, 天然魚・放流魚別に資源尾数を求めた。

資源尾数の算定にあたっては, 2002年の1~8+歳については次の(1)式を用いた。

$$N_{i,a} = \frac{C_{i,a} \exp\left(\frac{M}{2}\right)}{1 - \exp(-F_{i,a})} \quad (1)$$

ここで, N は資源尾数, C は漁獲尾数, M は自然死亡係数, F は漁獲係数を表し, 添字の i は年(この場合は2002年), a は年齢(1~8+)を示す。

1990~2001年の7歳と8+歳の資源尾数の算定には

(2)式と(3)式をそれぞれ用いた。

$$N_{i,7} = \frac{C_{i,7}}{C_{i,8+} + C_{i,7}} N_{i+1,8+} \exp(M) + C_{i,7} \exp\left(\frac{M}{2}\right) \quad (2)$$

$$N_{i,8+} = \frac{C_{i,8+}}{C_{i,7}} N_{i,7} \quad (3)$$

1990~2001年の1~6歳の資源尾数は次の(4)式により求めた。

$$N_{i,a} = N_{i+1,a+1} \exp(M) + C_{i,a} \exp\left(\frac{M}{2}\right) \quad (4)$$

漁獲係数(F)については, 2002年の1~7歳の F は1999~2001年の3カ年における各年齢の F の平均値を用い, 1990~2002年の8+歳の F は同一年の1歳若い年齢(7歳)の F と同じとし, 1990~2001年の1~7歳の F は次の(5)式を用いて計算した。

$$F_{i,a} = -\ln \left\{ 1 - \frac{C_{i,a} \exp\left(\frac{M}{2}\right)}{N_{i,a}} \right\} \quad (5)$$

なお, 2002年の最高年齢の F ($F_{2002,8+}$)は平松⁹⁾に従って, $F_{2002,7}$ と同じ値になるまで繰り返し計算を行うことによって求めた。

自然死亡係数(M)は年齢によらず一定とし, 鹿児島湾産マダイ822個体を用いて耳石横断薄層切片読み取り法により確認されている最高年齢27歳[亀田(鹿大院水)未発表, 2003]を寿命として田内・田中の方法で求めた0.0926($=2.5/27$)を用いた。また, 鹿児島湾では, 0歳魚を保護するため, 全長13cm以下のマダイの採捕が禁止されており, さらに漁業者間の自主規制措置として全長15cm以下のマダイを採捕しないようにしている。³⁾ 亀田(前出)により得られている成長式 $L_t = 687.9(1 - \exp(-0.271(t + 0.270)))$ 及び全長-尾叉長関係式 $TL = 1.163FL - 5.555$ から満1歳時の全長は約23cmと推定され, 0歳魚の一部と考えられる全長15~23cmのマダイが水揚げされる実態はあるものの, 本研究では0歳魚を除く1歳以上の尾数を解析した。なおここで L_t は t 歳時の尾叉長(mm)を表す。

放流魚添加効率および天然魚のRPS コホート解析から得られた1歳放流魚資源尾数を基に, 放流魚の添加効率(翌年1歳放流魚資源尾数/放流尾数)を算出した。また, 天然魚と放流魚を合わせた年齢別資源尾数に年齢別平均体重を乗じて年齢別資源重量を求め, これを雌雄別に分け, さらに玄界灘産マダイで得られている雌雄別年齢別成熟割合^{10,11)}を乗じて産卵親魚重量を求め, 天然魚の産卵資源量当たり加入量¹²⁾(RPS = 翌年1歳天然魚資源尾数/産卵親魚重量)を算出した。なお, 年齢別資源尾数を雌雄別に分ける際の性比はMatsuyama *et al.*¹³⁾に従い1:1と仮定した。また, 年齢別平均体重は, 亀田(前出)により得られている成長式 $W_t =$

$5738.0(1 - \exp(-0.319(t + 0.125)))^3$ から、各年齢 + 0.5 歳の時の体重をそれぞれ計算して用いた。なおここで W_i は t 歳時の体重 (g) を表す。

漁獲量予測 過去の加入量変動を考慮した以下の資源動態モデルによる漁獲量予測を行った。

$$N_{i,j} = a + N(0, 1)\sigma + Gk \quad (i=1)$$

$$N_{i,j} = N_{i-1,j-1} e^{-Z_{i-1,j-1}} \quad (i \geq 2)$$

$$C_{i,j} = N_{i,j} \frac{F_{i,j}}{Z_{i,j}} (1 - e^{-Z_{i,j}}) W_{i+0.5}$$

ここで、 $N_{i,j}$: j 年の i 歳魚の資源尾数

$N(0, 1)$: 標準正規乱数

a : 1991~2002 年の加入尾数の平均

σ : 1991~2002 年の加入尾数の標準偏差

G : 放流尾数 (一定)

k : 放流魚添加効率 (一定)

$C_{i,j}$: j 年の i 歳の漁獲量

$W_{i+0.5}$: i 歳魚の平均体重

を表す。

漁獲量予測は、放流計画として、①放流を中止した場合、②放流尾数を 700 千尾とし、添加効率が現状のまま (1997~2001 年の添加効率の平均値 0.0218) である場合、③放流尾数を 700 千尾とし、添加効率を 1990 年代前半当時のように向上させることができた場合 (1990~1994 の添加効率の平均値 0.0830)、の 3 とおり

(以下、放流 1, 2, 3 という)、漁獲規制方策として①現状のまま (全長 15 cm 保護)、②0 歳魚を完全に保護、③0 歳魚完全保護 + 1 歳魚を半分保護、④1 歳魚まで完全に保護、⑤1 歳魚まで完全保護 + 2 歳魚を 25% 保護の 5 とおり (以下、漁獲規制 1, 2, 3, 4, 5 という) を組み合わせ、延べ 13 とおりの条件で、2003 年をスタート、2017 年をゴールとする 15 年間について、各 1,000 回試行した。また、2017 年における 1,000 回試行値の変動係数 (CV) を求めた。なお、漁獲規制方策における“保護”とは“禁漁”を意味し、解析においては、例えば②の場合 0 歳魚の F を 0 とし、③の場合は 0 歳魚の F を 0, 1 歳魚の F を現状の 0.5 倍とした。また“0 歳魚完全保護”とは全長 23 cm まで漁獲しないことと同義である。

結 果

漁獲尾数および資源尾数 放流魚の漁獲尾数は、1990 年代前半は 100 千尾前後であったが、1995 年以降急激に減少し、2002 年には約 7 千尾と推定された (Table 1)。天然魚の漁獲尾数は、1997 年前後に一時的に増加し、1997 年には約 160 千尾となったが、それ以外では 40~60 千尾の水準を維持していると推定された (Table 1)。

放流魚の資源尾数は、1990 年代前半は 200~250 千

Table 1 Estimated annual catch in number for 0-8+ yaer-old wild and released fish in Kagoshima Bay

Wild fish													
Age	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
1	3,602	4,860	9,277	13,329	14,785	15,813	32,923	102,065	50,672	25,447	10,892	15,837	24,413
2	2,035	10,982	12,861	8,724	8,554	16,473	18,607	40,518	46,375	34,680	18,172	19,643	21,658
3	1,620	4,835	6,654	3,551	3,243	4,567	6,922	6,462	11,224	11,313	8,121	9,312	7,100
4	2,415	4,900	6,759	3,792	3,448	3,854	5,434	4,866	7,251	7,676	6,148	7,712	5,675
5	1,786	3,427	4,635	2,556	2,652	2,490	3,388	2,777	4,156	4,280	3,527	4,636	3,473
6	525	897	1,142	537	543	615	576	426	607	625	439	610	471
7	602	1,040	1,337	710	769	754	878	640	811	907	729	933	785
8+	3,761	5,504	7,001	3,448	3,482	3,831	3,821	2,664	3,279	3,480	2,783	3,840	2,824
Total	16,345	36,444	49,666	36,647	37,474	48,397	72,549	160,418	124,376	88,407	50,809	62,524	66,397
Released fish													
Age	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
1	32,900	48,834	37,520	50,483	33,783	12,372	13,921	18,559	19,302	8,456	4,113	2,984	2,188
2	36,471	47,437	28,570	33,885	29,006	17,203	9,216	8,540	8,891	4,928	4,291	2,380	1,755
3	10,520	13,097	7,150	7,805	9,189	7,642	3,856	2,610	2,162	1,510	1,250	1,168	722
4	6,447	8,065	4,804	4,494	6,267	6,025	3,621	2,185	2,278	1,651	1,035	917	821
5	3,319	4,055	2,600	2,265	3,275	3,451	2,301	1,504	1,454	1,334	849	691	453
6	407	366	300	234	305	397	296	227	342	358	262	242	121
7	572	672	486	399	561	656	472	399	496	399	236	233	138
8+	2,268	2,255	1,694	1,286	1,881	2,330	1,705	1,390	2,146	2,219	1,440	1,204	777
Total	92,904	124,782	83,123	100,852	84,266	50,077	35,388	35,414	37,072	20,855	13,476	9,818	6,975

Fig. 1 Estimated stock size (in number) of red sea bream by age (Age 1–8+) and by year (1990–2002) through cohort analysis for wild (upper) and released fish (lower).

尾であったが、1994年以降急激に減少し、2002年には約16千尾と推定された(Fig. 1)。天然魚の資源尾数は、1997年前後の3年間に一時的に増加し、1997年には約360千尾となったが、それ以外では200千尾前後の水準を維持していると推定された。資源尾数の推移を年齢別に詳しくみると、一時的な資源尾数の増加がみられた1996～1998年には、特に1～2歳魚の資源尾数が増加したことが確認された(Fig. 1)。

放流魚の添加効率および天然魚のRPS 放流魚の1歳魚資源尾数は、1990年の104千尾から2002年には5千尾となり、近年減少傾向を示している。特に1994～1995年にかけて急激に減少し、その後は漸減傾向である(Fig. 1)。近年放流尾数も減少しているが、放流尾数の減少の割合より翌年1歳魚資源尾数の減少の割合の方が大きく、両者の比である放流魚の添加効率は1993年放流群以降大きく減少し、1990～1992年放流群

の0.099～0.106から、2001年放流群では0.016と1/5以下にまで低下している(Fig. 2)。

天然魚の1歳魚資源尾数は、1996～1998年に増加し(Fig. 1)、1997年には197千尾となった。RPSは1996年に大きく増加し、0.54となっている。さらに2001年にもRPSは増加し、0.38となっている(Fig. 3)。

産卵親魚量は近年減少傾向を示しており、1990年の508トンから2002年には215トンとなっている(Fig. 3)。

漁獲量予測 2017年における漁獲量の1,000回試行値の平均値(95%信頼区間)は、漁獲規制1のもとで、放流1では69(36～103)トン、放流2では81(50～114)トン、放流3では116(85～149)トンと推定された(Table 2)。変動係数(CV)は、放流1では0.237、放流2では0.203、放流3では0.138となった。放流3では、2017年における平均漁獲量が最も高

Fig. 2 Annual changes in the number of released seeds (open circles) and stocking efficiency (E) (closed circles). $E = (\text{number of one-year-old released fish in the following year}) / (\text{number of released seeds})$.

Fig. 3 Annual changes in the spawning biomass (open circles) and the recruits per spawning biomass (RPS) (closed circles). $RPS = (\text{number of one-year-old wild fish in the following year}) / (\text{spawning biomass})$.

くなると同時に、変動係数が小さくなると示唆された。各放流計画における2017年の平均漁獲量及びCVは、漁獲規制1から4へと規制のレベルを上げるにつれて大きくなると計算された。例えば放流2の場合、漁獲規制1では81(50~114)トン、CV 0.203、規制4では131(70~196)トン、CV 0.244と算定された(Table 2)。

考 察

天然魚と放流魚の資源変動と環境収容力 天然魚は、1996~1998年に1歳魚、1997~1999年に2歳魚資源が増加している(Fig. 1)。1歳魚資源の増加は1997年が最も顕著であること、また1996年にRPSが顕著に増加している(Fig. 3)ことから、本湾内において1995~1997年に卓越年級群が発生し、特に1996年に顕著であったことが示唆される。しかし、それに続く

1998~2000年における3歳魚の資源尾数はわずかしかな増加していない。1997~1999年における1歳魚及び2歳魚の漁獲係数 F は、それぞれそれ以外の年の0.1~0.3から0.4~0.8へ、0.1~0.7から0.8~0.9へと急激に上昇しており(Table 3)、この卓越年級群は1~2歳魚のうちにほとんど漁獲されてしまったと推察される。なお、この卓越年級群が成長に伴って湾外へ逸散した可能性については、鹿児島湾外の周辺海域(佐多~南薩海域及び志布志湾海域)において1997~2000年に顕著な1~3歳魚の漁獲は確認されていない¹⁴⁾ことから、その可能性は低いと考えられる。また、2001年にもRPSが増加しており(Fig. 3)、近年産卵親魚量が減少しているため加入尾数は1996年発生群に及ばないものの、2002年にまとまった量が加入している(Fig. 1)。このように、近年、RPSに年変動がみられる。RPSと海況変動等との関係について、今後検討していく必要がある。

Table 2 Predicted catch of red sea bream (95% confidence interval) (upper) and its coefficient of variation (lower) in Kagoshima Bay in 2017 under various fishing regulations and release strategies

Fishing regulation	Release strategy		
	R1	R2	R3
M1	69(36–103) 0.237	81(50–114) 0.203	116(85–149) 0.138
M2	71(38–108) 0.255	86(52–124) 0.214	121(86–154) 0.143
M3	88(46–135) 0.261	104(62–149) 0.214	149(104–194) 0.151
M4	108(50–168) 0.285	131(70–196) 0.244	185(128–250) 0.170
M5	116(58–176) 0.258	—	—

R1: Stop release

R2: 700 thousand seeds released under present Y/R (yield per release)

R3: 700 thousand seeds released under improved Y/R

M1: Seeds less than 15 cm in total length released

M2: Full protection of 0-yaer-old fish

M3: Full protection of 0-yaer-old fish and 50% protection of 1-yaer-old fish

M4: Full protection of 0- and 1-yaer old fish

M5: Full protection of 0- and 1-yaer old fish and 25% protection of 2-yaer-old fish

—: no prediction

一方放流魚の添加効率近年低下してきている (Fig. 2)。宍道・北田⁶⁾は、1994 年放流群以降の回収率低下の要因として、① 1994～1995 年に鹿児島湾内でイリドウイルス症が蔓延し、海面生簀で中間育成中のマダイ放流種苗が同ウイルスに感染した可能性、② 1996 年からマダイ放流箇所が 29 カ所から 53 カ所へ、放流尾数は 1,600 千尾から 2,650 千尾に拡大され、限られた施設・人員で対応した結果、種苗生産から放流に至るいずれかの過程において技術的に 1993 年以前の放流群に及ばない面が生じた可能性、③ 1999 年から放流サイズの基準が平均全長 60 mm 以上から 55 mm 以上に引き下げられたことが影響した可能性、④ 2000 年から海面生簀での中間育成が中止され、陸上で中間育成された種苗を活魚車で運搬し、馴致なしに直接海に放流する方法に替わったことが影響した可能性など、種苗生産から放流に至る過程における技術的な問題がそれぞれ影響していると推察している。今回明らかにになった放流魚の添加効率低下についても同様の問題に起因していると推察される。さらに、かつては放流後も雑魚ひき肉などの給餌を行い、放流種苗の環境馴化への手助けをしていた地区もあった³⁾が、現在では実施されておらず、このことも、放流魚添加効率低下の一因となっている可能性がある。このほか、放流魚の生残率低下の原因として、継代飼育し

てきた親魚から生産された人工種苗の遺伝的影響の可能性も指摘されている。¹⁵⁾

また放流魚の F は、いずれの年齢においても天然魚の F より大きい (Table 3)。1990 年から 2002 年の各年齢の F について、天然魚と放流魚の間で差があるか Mann-Whitney の U 検定により調べたところ、6 歳魚以外の全ての年齢において有意差が認められた ($p < 0.01$)。これは放流魚が天然魚より漁獲されやすいことを意味し、この特性は累積回収重量や経済効率の増加に寄与していると考えられる。逆に F を天然魚と同水準に近付けることができれば、放流魚由来の親魚資源の増加に寄与できると考えられる。しかし、その具体的解決策については研究例がなく、今後の課題である。

宍道・北田⁶⁾は、1973 年以降天然魚の漁獲量 (C_W) は平均 93.1 トンで長期的にみると 100 トン前後の水準を維持していることを報告している。しかし、放流が開始され全体の漁獲量 C [=放流魚の漁獲量 (C_H) + C_W] が 150 トン前後の水準まで回復したことに伴って産卵親魚量も増加したと考えられるが、 C_W は 1974 年以前の水準には回復していない (Fig. 4)。また天然魚は、上述のとおり年によって卓越年級群の発生が認められるものの、それによる一時的な資源尾数の増加を除くと、長期的には天然資源は安定した水準を維持しているといえる (Fig. 1)。加えて、近年産卵親魚重量は減少傾向である (Fig. 3) ことから、鹿児島湾においては、産卵親魚量の変動に比べ、毎年の加入尾数の変動は大きくないと考えられる。以上のことから、本湾においては、幼魚の生残に有利な何らかの条件が整った場合は卓越年級群が発生できる環境にありながら、それ以外の年には産卵親魚量が増加しても 1 歳魚加入尾数は 50 千尾程度に制限されていると考えられる (Fig. 1)。

天然魚の加入が制限される要因としては、浅海域が少ない鹿児島湾の海底形状が関係している可能性が考えられる。すなわち、鹿児島湾は元々浅海域が限られているうえに、高度経済成長期に鹿児島市沿岸などにおいて大規模な埋め立てが行われた^{16,17)} ことにより、幼魚期に浅海域を主生息場とする天然マダイの加入が制限されると推察される。

鹿児島湾におけるマダイの漁獲量と主な埋立地の延べ埋立面積の推移をみると、天然魚の漁獲量 C_W は 1970 年から 1976 年にかけて大きく減少し、その後は大きく変動していないが、逆に埋立面積は 1970 年から増加し、1978 年には主な埋め立てはほぼ完了している (Fig. 4)。さらに、延べ埋立面積 A_R と C_W の相関関係を調べたところ、両者の間には有意な負の相関 ($C_W = -0.0785 A_R + 181.7$, $R^2 = 0.5465$, $p < 0.05$) が認められた。すなわち、埋立面積の増加に伴い C_W が減少する関係がみられた。以上のことから、鹿児島湾においては、

Table 3 Estimated fishing mortality coefficient of 0–8+ year-old wild and released fish from 1990 to 2002
Released fish

Age	Year													$F_{med.}$
	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	
0	0.020	0.040	0.037	0.070	0.103	0.030	0.091	0.106	0.161	0.060	0.046	0.115	0.074	0.070**
1	0.359	0.607	0.467	0.693	0.748	0.487	0.613	0.822	1.126	0.700	0.612	0.626	0.646	0.626**
2	0.835	1.151	0.767	0.890	0.993	0.971	0.719	0.842	1.109	0.875	0.830	0.768	0.825	0.842**
3	0.490	0.722	0.442	0.424	0.557	0.676	0.517	0.396	0.457	0.475	0.493	0.488	0.486	0.488**
4	0.549	0.758	0.555	0.483	0.625	0.769	0.698	0.546	0.626	0.664	0.612	0.719	0.665	0.626**
5	0.621	0.703	0.512	0.484	0.686	0.744	0.664	0.616	0.756	0.820	0.758	0.963	0.847	0.703**
6	0.110	0.110	0.086	0.068	0.096	0.140	0.110	0.108	0.239	0.363	0.319	0.437	0.373	0.110
7	0.216	0.236	0.185	0.141	0.206	0.273	0.219	0.188	0.318	0.423	0.382	0.457	0.421	0.236**
8+	0.216	0.236	0.185	0.141	0.206	0.273	0.219	0.188	0.318	0.423	0.382	0.457	0.421	0.236**

Wild fish

Age	Year													$F_{med.}$
	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	
0	0.010	0.005	0.022	0.030	0.015	0.010	0.056	0.112	0.040	0.040	0.009	0.021	0.023	0.022
1	0.089	0.127	0.250	0.319	0.270	0.267	0.340	0.780	0.548	0.421	0.216	0.278	0.305	0.278
2	0.078	0.374	0.500	0.347	0.307	0.475	0.501	0.792	0.890	0.795	0.527	0.650	0.657	0.501
3	0.079	0.238	0.359	0.219	0.186	0.236	0.329	0.285	0.457	0.485	0.374	0.494	0.451	0.329
4	0.181	0.321	0.532	0.315	0.302	0.309	0.428	0.358	0.521	0.570	0.465	0.639	0.558	0.428
5	0.199	0.368	0.498	0.345	0.335	0.328	0.430	0.356	0.515	0.584	0.490	0.673	0.582	0.430
6	0.072	0.130	0.178	0.086	0.101	0.107	0.104	0.077	0.108	0.118	0.093	0.128	0.113	0.107
7	0.110	0.176	0.256	0.142	0.151	0.176	0.194	0.143	0.183	0.207	0.175	0.260	0.214	0.176
8+	0.110	0.176	0.256	0.142	0.151	0.176	0.194	0.143	0.183	0.207	0.175	0.260	0.214	0.176

Mann-Whitney's U test to compare the fishing mortality coefficients of released and wild fish by age. $F_{med.}$ shows the median of fishing mortality coefficient of each age from 1990 to 2002.

** $p < 0.01$

Fig. 4 Annual changes in the total area of reclaimed land and commercial catch divided into wild and released fish in Kagoshima Bay. The line chart indicates the total area of reclaimed land. Closed and open bars indicate the commercial catch of wild (C_W) and released fish (C_H), respectively.

埋め立てによる浅海域の喪失により、天然魚の加入が制限されていると考えられた。また、放流尾数の増加に伴って1976年以降マダイの漁獲量が回復し、高い水準で維持することができた。⁶⁾ 埋め立てによる浅海域の喪失を種苗生産施設が肩代わりすることにより漁獲量を増加

させることができたのである。鹿児島湾においては、マダイ幼魚の重要な成育場であるアマモ場^{18,19)}が、1978年の179 haから1999年には22.9 haに減少している（環境省生物多様性センター：http://www.biodic.go.jp/kiso/34/34_higat.html, 2010年7月6日）。鹿児島県

水産技術開発センターによると、2004年にアマモ場が約73haまで回復していることが確認されているが、このような状況下でマダイの漁獲量を増加させ、漁家経営の安定を図るためには、種苗生産施設は今後も引き続き重要な役割を果たすであろう。

天然魚と放流魚の競合

1990～1993年の4年間は放流魚の加入が多い (Fig. 1)。また1990～1992年放流群の添加効率は約0.1と、その後の放流群より高い (Fig. 2)。これらは、1,000千尾以上の人工種苗が放流され、高い放流効果が示された⁶⁾1989～1992年放流群によるものである。すなわち、1989～1992年放流群は、他の放流年群より放流尾数が多く、なおかつ生残がよかったといえる。一方、宍道・北田⁶⁾で得られた1980～2002年における天然魚漁獲量 (C_W) 及び放流魚漁獲量 (C_H) の関係を見ると、 C_H が50トン程度までは C_W は80～130トン程度の水準を維持しているが、それを越えると、 C_H の増加に伴い C_W が減少する傾向がみられた (Fig. 5)。また、 C_H が50トン以上に増えても、全体の漁獲量 $C (= C_H + C_W)$ は150～200トンで頭打ちとなる傾向がみられた (Fig. 4)。さらに、資源量の推定結果から放流魚と天然魚の1歳魚資源尾数の関係を見ると (Fig. 6)、放流1歳魚資源尾数が多かった1990～1993年の天然1歳魚資源尾数の平均値 ($\pm$ SD) は45千尾 ($\pm$ 3.8千尾) で、卓越年級の発生により天然魚の加入が多かったと考えられる1997年を除く1994～2002年の85千尾 ($\pm$ 25.7千尾) より低い。また、放流尾数と天然魚のRPSの関係を見ると (Fig. 7)、放流尾数が多かった1990～1992年のRPSの平均値 ($\pm$ SD) は0.09 ($\pm$ 0.01) で、卓越年級が発生したと考えられる1996年を除く1993～2002年の0.26 ($\pm$ 0.09) より低い。これらのことから、鹿児島湾においては放流魚と天然魚の競合が起きたことが示唆される。具体的には、餌料生物をめぐる密度効果による天然魚の成長低下、あるいは放流魚による天然魚の置き換えの可能性が考えられる。すなわち、鹿児島湾でこれまで実施されてきた1,000千尾規模のマダイ種苗放流は、高い放流効果が示された一方で、湾内のマダイの環境収容力を超えていたことが示唆される。

人工種苗放流を継続していくためには、環境収容力をめぐる天然魚と放流魚の競合の回避に加えて、天然資源への遺伝的影響^{15,20)}の最小化のための方策が重要である。宍道ら²¹⁾は、マイクロサテライトDNA解析の結果、湾奥では、アрил頻度においては種苗放流の影響が示唆されるが、天然魚は外海から湾奥まで全体として任意交配集団であり、湾奥から外海まで相互に交流しているため、現状の遺伝的多様性が保たれていると考えられることを報告している。マダイ放流種苗を生産している鹿児島県栽培漁業協会 (現公益財団法人かごしま豊かな

Fig. 5 Relationship between commercial catches of released (C_H) and wild fish (C_W) in Kagoshima Bay.

Fig. 6 Relationship between stock size of one-year-old released and wild fish.

Fig. 7 Relationship between the number of released seeds and RPS. $RPS = (\text{number of one-year-old wild fish in the following year}) / (\text{spawning biomass})$.

海づくり協会) では約130尾の産卵親魚を飼育しており、2002年以降は毎年その約1割を鹿児島県周辺海域で採集された天然魚と入れ替えて、放流種苗の遺伝的多様性の維持に努めている。放流を継続するには、遺伝的リスクにも配慮したこのような種苗生産現場における努

力を今後も継続していく必要がある。²¹⁾

資源管理における種苗放流の役割 前述のとおり、 C_H が 50 トン程度までは C_W は 80～130 トン程度の水準を維持しているが、それを越えると、 C_H の増加に伴い C_W が減少する傾向がみられた (Fig. 5)。また、 C_H が 50 トン以上に増えても、全体の漁獲量 $C (= C_H + C_W)$ は 150～200 トンで頭打ちとなる傾向がみられた (Fig. 4)。以上のことから、 C_H が 50 トン程度になるような事業規模が、鹿兒島湾におけるマダイの環境収容力を超えない放流規模、²²⁾ すなわち天然魚の漁獲量を減少させない範囲で放流魚の漁獲量が最大限期待できる適切な放流規模であると判断される。また放流尾数と C_H の関係⁶⁾ から、これを実現するためには毎年 700～800 千尾を放流することが必要と考えられる。ただし、これは添加効率が高かった 1990 年代前半のデータを含めて推定した値であることに注意が必要である。今後は放流尾数を 700～800 千尾程度に維持しつつ、放流魚の添加効率を向上させる放流技術の改善が望まれる。なお Fig. 5 は、Kitada and Kishino²²⁾ の Fig. 3A に 2002 年のデータを追加し、合計漁獲量を除いて描きなおしたものである。

加入量変動を考慮した資源動態モデルによる漁獲量予測の結果、漁獲規制が現状のままでも、放流を継続し、かつ放流技術を改善し添加効率を高めることによって漁獲量は高く維持され、さらに漁獲量の変動の幅を抑え、安定的な漁獲が実現できると考えられた。漁獲強度は現状のまま、700 千尾放流を継続し、かつ添加効率を高める方策 (「放流 3+管理 1」) に匹敵する漁獲増を漁獲規制のみで実現するためには、2 歳魚の 25% 保護まで漁獲規制を強化しなければならず現実的ではない (「放流 1+管理 5」)。また、種苗放流に漁獲規制を組み合わせた場合、漁獲量はさらに増加する (Table 2)。

例えば 0 歳魚の完全保護の場合、保護サイズは全長約 23 cm と、現状の全長 15 cm より 8 cm も大きくなる。さらに、1 歳半まで保護するとした場合の保護サイズは全長約 30 cm、1 歳魚の完全保護では約 36 cm となる。「放流 2+管理 3」と「放流 3+管理 1」は、同様に 700 千尾放流を継続し、2017 年の漁獲量が 110 トン前後と同程度の漁獲量になると期待される方策であるが、添加効率を高めることと資源管理を強化する点が異なる。また、「放流 2+管理 1」と「放流 1+管理 3」も同様の漁獲量になることが期待される方策であるが、前者は現状のまま放流を継続する方策、後者は放流を中止し、資源管理の強化によって漁獲量の増加を目指す方策である。鹿兒島湾においてはマダイの遊漁が盛んである²³⁾ が、資源管理について不特定多数の遊漁者と合意形成を図る有効な手段がない現状では、漁業者による資源管理の強化を検討するうえで放流の継続は必須である

う。さらに、鹿兒島湾においては、仮に漁業者間で保護サイズの引き上げが合意され、実施されることになったとしても、遊漁者にその取り組みへの協力を直ちに期待することは難しいであろう。漁業者や関係団体などと十分な協議を重ねつつ放流を継続し、かつ添加効率を高める工夫を施し、漁業者の自主的な資源管理の取り組みの強化を図ることが重要である。具体的には、現状の添加効率と管理方策である「放流 2+管理 1」から「放流 3+管理 1」あるいは「放流 2+管理 2」への引き上げを検討し、さらに、漁業者の栽培漁業と資源管理への取り組みを遊漁者にまで徐々に拡大していくための体制整備が望まれる。

謝 辞

本研究を行うにあたり、貴重な資料と助言を賜った鹿兒島大学水産学部増田育司博士に衷心より厚くお礼申し上げます。鹿兒島市中央卸売市場において長年に渡り市場調査を継続していただいた故川上市正氏と下山正三氏、ならびに鹿屋市魚市場において調査を実施していただいた鹿兒島県鹿屋農林水産事務所 (現大隅地域振興局) と鹿兒島県栽培漁業協会 (現公益財団法人かごしま豊かな海づくり協会) の職員の皆様に厚くお礼申し上げますとともに、調査に協力していただいた同市場、鹿兒島県内各漁業協同組合関係者の皆様に感謝の意を表す。また、本研究に使用したデータの収集に尽力された鹿兒島県水産試験場 (現水産技術開発センター) 歴代担当者の皆様に敬意を表するとともに、本報告をとりまとめる機会を与えていただき、有益なご助言を賜った鹿兒島県関係者の方々に深謝の意を表す。なお、本研究の一部は水産庁補助事業 (地域展開促進事業) 及び鹿兒島県単独事業 (豊かな海づくりパイロット事業) により行われた。

文 献

- 1) 落合 明, 田中 克. マダイ. 「新版魚類学 (下)」 (落合明・田中 克編) 恒星社厚生閣, 東京. 1986; 736-750.
- 2) 矢道弘敏. 鹿兒島湾におけるマダイ *Pagrus major* の栽培漁業と資源管理に関する研究. 博士論文, 東京水産大学, 東京. 2005.
- 3) 椎原久幸. 鹿兒島湾における放流の成果と問題点. 「マダイの資源培養技術」 (田中 克・松宮義晴編) 恒星社厚生閣, 東京. 1986; 106-126.
- 4) 中野正明. 鹿兒島湾におけるマダイの栽培漁業. 放流効果調査事例検討会 資料集, 協会検討資料 79, ㈱日本栽培漁業協会, 東京. 2001; 8-13.
- 5) Shishidou H. Stocking effectiveness of red sea bream *Pagrus major* in Kagoshima Bay, Japan. *Fish. Sci.* 2002; **68**(Suppl. I): 904-907.
- 6) 矢道弘敏, 北田修一. 鹿兒島湾におけるマダイの種苗放流効果. 日水誌 2007; **73**: 270-277.
- 7) 北田修一. 「栽培漁業と統計モデル分析」 共立出版, 東京. 2001.
- 8) 吉村 拓, 鈴木健吾. 平成 15 年度マダイ日本海西・東シ

- ナ海系群の資源評価. 「我が国周辺水域の漁業資源評価第2分冊」, 水産庁増殖推進部, 独立行政法人水産研究センター, 東京. 2004; 846-856.
- 9) 平松一彦. 3. VPA (Virtual Population Analysis). 「平成12年度資源評価体制確立推進事業報告書—資源解析手法教科書—」 (財)日本水産資源保護協会, 東京. 2001; 104-128.
 - 10) Matsuyama M, Matsuura S, Ouchi Y, Hidaka T. Maturity classification and group maturity of red sea bream *Pagrus major*. I. Female maturity. *Marine Biol.* 1987; **96**: 163-168.
 - 11) Matsuura S, Matsuyama M, Ouchi Y, Hidaka T. Maturity classification and group maturity of red sea bream *Pagrus major*. II. Male maturity. *Marine Biol.* 1987; **96**: 169-172.
 - 12) 松宮義晴. 「魚をとりながら増やす」成山堂書店, 東京. 2000.
 - 13) Matsuyama M, Lara RT, Matsuura S. Juvenile bisexuality in the red sea bream, *Pagrus major*. *Environ. Biol. Fish.* 1988; **21**: 27-36.
 - 14) 宍道弘敏. 回遊性資源増大パイロット事業 (マダイ). 平成9~12年度鹿水試事報 (漁業部編) 1999-2002.
 - 15) Kitada S, Shishidou H, Sugaya T, Kitakado T, Hamasaki K, Kishino H. Genetic effects of the long-term stock enhancement programs. *Aquaculture*. 2009; **290**: 69-79.
 - 16) 岩切成郎. 「錦江湾—自然と社会—」南日本新聞開発センター, 鹿児島. 1978.
 - 17) 徳留昭三. 二十八年のあゆみ. 「鹿児島開発事業団史二十八年のあゆみ」(山下清治編)鹿児島開発事業団, 鹿児島. 1993; 97-224.
 - 18) 高間 浩. 神奈川県沿岸における放流の成果と問題点. 「マダイの資源培養技術」(田中 克・松宮義晴編)恒星社厚生閣, 東京. 1986; 127-143.
 - 19) 工藤孝也, 山岡耕作. 天然マダイおよびチダイ稚魚のなわばり形成場所と摂食行動. 日水誌 1998; **64**: 16-25.
 - 20) Hilborn R. Population management in stock enhancement and sea ranching. In: Leber KM, Kitada S, Blankenship HL, Svåsand T (eds). *Stock Enhancement and Sea Ranching*, 2nd edn. Blackwell Publishing, Oxford. 2004; 201-209.
 - 21) 宍道弘敏, 北田修一, 坂本 崇, 浜崎活幸. マイクロサテライト DNA による鹿児島湾のマダイ天然魚と放流魚の遺伝的変異性の評価. 日水誌 2008; **74**: 183-188.
 - 22) Kitada S, Kishino H. Lessons learned from Japanese marine Finfish stock enhancement programmes. *Fish. Res.* 2006; **80**: 101-112.
 - 23) 増田育司. 鹿児島湾におけるマダイの遊漁実態について. 放流効果調査事例検討会 資料集, 協会検討資料 79, (財)日本栽培漁業協会, 東京. 2001; 134-145.