

発電所冷却用海水の取水で取り込まれた生物量についての
資源影響評価の試み
— 福島県沿岸域における事例 —

横田瑞郎*

A trial of impact estimation of power plant entrainment or impingement on
coastal fisheries resources
— A case study on the coastal fishing resources of Fukushima Prefecture —

Mizurou Yokota*

要約：火力発電所や原子力発電所では、冷却用の海水を大量に取水するため、取水とともに魚卵や仔稚魚などが発電所内に取り込まれることによる発電所周辺資源への影響が懸念されている。また、取り込み量の発電所周辺海域資源への影響評価については、欧米では検討されているが、我が国では検討事例が少なく、汎用的な評価手法も確立されていないのが現状である。本報告では、発電所周辺漁業資源への影響を評価するための簡便で、かつ、他の海域にも応用可能な生残モデルを作成し、漁業資源への影響評価を試みた。モデルの作成に当たり、通常、実態を把握することが難しい発育初期の自然死亡率をパラメータとして使うことなく、計算が行えるように工夫した。実際の評価については、福島県沿岸域に立地する3つの大容量発電所を対象として行った。それらの3発電所において、冷却用海水と一緒に取り込まれた漁業生物の卵や仔魚、稚魚、幼魚の量を調査した結果、イカナゴ、イシガレイ、マガレイ、マコガレイの仔魚や、アイナメ稚魚、シロザケ幼魚などの漁業対象種が、冬～春季にかけて3発電所に共通して取り込まれた。それらの6種類について、生残モデルにより、取り込み影響を過小評価することのないように配慮して解析を行った結果、福島県沿岸域における平均的な漁獲量に対する3発電所の総取り込み量の割合（漁獲量、取り込み量ともに漁獲開始年齢での相当量に換算）は、漁獲開始年齢時点の資源が1年間に自然死亡で減少する割合（20%程度）と比べて十分に小さいことから、取り込みによる資源量への影響は小さいと考えられた。

キーワード：影響，漁業，発電所，評価，資源，冷却海水，生物，取り込み，連行，衝突

Abstract : Fossil fuel and nuclear power plants take a large quantity of seawater for cooling. Because fish eggs and larvae in seawater are taken in these power plants cooling system, the entrainment or impingement influence on the fisheries resources in the vicinity sea area of power plants has been concerned about. In Europe and America, there has been many studies evaluating the entrainment or impingement influence on the resources, however, in Japan, quite a few studies has been done, so far, and techniques to estimate the influence on Japanese native species is not established. In this study, a survival model was developed to estimate the entrainment or impingement influence on the coastal fisheries resources. This model could be applied more easily in another seawater areas, because this model was devised to evaluate the influence without using the natural mortality of larval stage, which could not be grasped easily. Quantity of eggs, larvae, juvenile, and young fishes taken in the cooling system of three large-scale power plants sited in the coastal area of Fukushima Prefecture with seawater was investigated. As a result, some commercial fish species, such as larvae of Japanese sand lance (*Ammodytes personatus*), larvae of stone flounder (*Kareius bicoloratus*), larvae of brown sole (*Pleuronectes herzensteini*), larvae of marbled sole (*Pleuronectes yokohamae*), juveniles of fad cod (*Hexagrammos otakii*), young fishes of chum salmon (*Oncorhynchus keta*), and so on, were found to be taken in the three power plants, during winter to spring season. The

(2005年2月15日受付, 2005年3月9日受理)

* 財団法人 海洋生物環境研究所 中央研究所 (〒299-5105 千葉県夷隅郡御宿町岩和田300)
E-mail: yokota@kaiseiken.or.jp

rate of the entrained or impinged number (converted to the number of first captured age) of each species to the number (converted to the number of first captured age) of catch on the coast of Fukushima Prefecture was small enough in comparison with the natural death ratio of the resources of first captured age during one year (around 20%). Therefore, it would be considered that the influence of the entrainment or impingement of 3 power plants on the fishing resources would be small.

Keywords: Impact, Fishery, Power plant, Estimation, Resource, Cooling seawater, Organism, Intake, Entrainment, Impingement

まえがき

我が国における電力量の大部分は、火力、原子力発電所によって供給されている。それらの発電所は大量の冷却用水を必要としているが、我が国の場合には自然的条件等により、これを海水に依存している。冷却用海水の取水時には、浮遊している魚卵や、遊泳力の小さい仔魚、稚魚、幼魚などが海水ともに発電所内へ取り込まれる。

Horst (1975) や Saunders (1978) は、発電所取水に伴う卵、稚魚、幼魚などの取り込みの資源影響を評価するため、それらの取り込み量を親魚相当量に換算し、その換算量と親魚量を比較して評価する考え方を提案している。また、深滝 (1983) や水産庁研究部 (1991) は、特定地域での漁業重要種を対象として、取り込み量を資源量等と比較して影響を評価しているが、種によって評価手法が異なっている。

本研究では、資源影響評価について、様々な海域への応用が可能な簡便モデルを作成し、実際の漁業資源への影響評価を試みた。影響評価を行うにあたり、福島県沿岸域をモデル海域として、そこに立地している大容量の3発電所（東京電力株式会社の福島第一原子力発電所、福島第二原子力発電所、広野火力発電所）を対象に、取水取り込みによる減耗量を調査した。

なお、3発電所の取水取り込みによる減耗量調査は、農林水産省水産庁委託「発電所取放水広域漁業影響調査」の一環として実施したものである。

方 法

1. 資源影響評価のための生残モデル作成

発電所取水による生物取り込みの資源影響評価の基本的な考え方は、取り込み量と発電所周辺海域の資源量（または漁獲量、種苗放流量等）を比較・評価することである。

実際に評価を行う場合、取り込み量と資源量を直接比較する方法（直接比較法）が最も望ましい。しかし、資源量（特に卵仔稚期の資源量）については、拡散や移動の影響により、精度良く把握することが難しいので、評価方法として直接比較法を使うことができないケースが多い。それ以外の方法としては、取り込まれて死亡した卵や仔稚魚が、もし取り込まれることなく自然界で生息したとすれば、漁獲開始年齢時等にはどのくらいの量になっているのかを解析・計算し、その計算値を漁獲開始年齢時等での総漁獲量などと比べて評価する方法（間接比較法）が考えられる。

本調査におけるモデル海域である福島県沿岸域は開放性海域であることから、発電所周辺における漁業生物の卵仔稚期の資源量を容易には把握できない。しかし、漁業生物の生態、発電所周辺における漁獲に関する知見が整理されているので、それらの知見を基にして取り込み量を漁獲開始年齢時等での相当量に換算することが可能であると考え、本調査では、上記の間接比較法で評価を行うこととした。

以下に、発電所取水による生物取り込み影響を間接比較法で評価するために作成した生残モデルの概要を示した。

1) 取り込み量の漁獲開始年齢時への換算

未利用資源状態における生き残り過程について、以下の仮定条件を設定してモデル化を行った (Fig. 1)。

- 仮定条件 1 卵から成魚までの自然死亡は密度に依存すると仮定。
- 仮定条件 2 発育初期（卵～稚魚期）は、通常、幼魚期、未成魚期や成魚期と比べて遊泳力が小さいので、捕食等の影響を受けやすい。従って、発育初期（卵～稚魚期）の自然死亡率は幼魚期、未成魚期

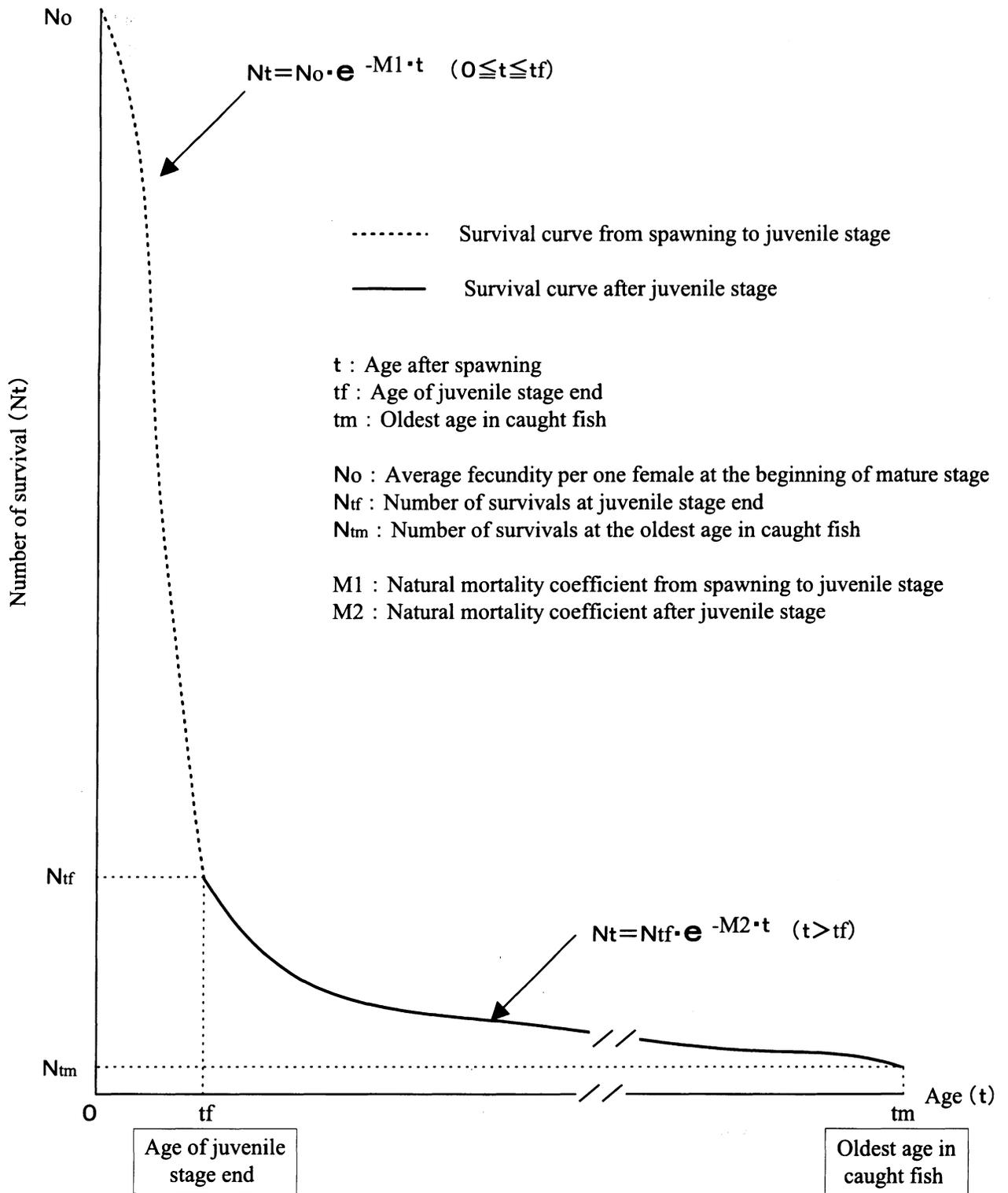


Fig. 1 Outline of a survival model assuming the unused resources state.

や成魚期と比べて高いと仮定。

これらの条件を設定すると、成熟開始年齢時の1個体の平均産卵数 (N_0) について、生き残り過程を以下のように示すことができる。

○産卵後～稚魚期末 $N_t = N_0 \cdot e^{-M1 \cdot t}$
(ただし, $0 \leq t \leq tf$)

○稚魚期後 $N_t = N_{tf} \cdot e^{-M2 \cdot (t-tf)}$
(ただし, $tf < t \leq tm$)

t : 産卵後の経過年齢

N_t : 産卵後の経過年齢 (t) での生残数

N_0 : 成熟開始年齢時の1個体の平均産卵数

tf : 稚魚期末の年齢

tm : 最高出現年齢

M1 : 稚魚期末までの自然死亡係数

M2 : 稚魚期後の自然死亡係数

ここで、漁獲と取水取り込みに関するパラメータを以下のとおり定める。

○漁獲に関するパラメータ

tc : 漁獲が開始される年齢

N_{tc} : 未利用資源状態 (漁獲や取水取り込み等の人為的インパクトのない状態) において、年齢がtcのときの生残数

○取水取り込みに関するパラメータ

・仔稚魚の取り込みについて

tu : 取り込まれた仔稚魚の年齢

N_{tu} : 未利用資源状態において、年齢がtuのときの生残数

ru : 未利用資源状態において、年齢tu～tcまでの生残率

U : 取り込まれた仔稚魚の個体数

U_{tc} : 取り込まれた仔稚魚の個体数を漁獲開始年齢時に換算した個体数

・幼魚、未成魚、成魚の取り込みについて

tu' : 取り込まれた幼魚、未成魚、成魚の年齢

$N_{tu'}$: 未利用資源状態において、年齢がtu'のときの生残数

ru' : 未利用資源状態において、年齢tu'～tcまでの生残率

U' : 取り込まれた幼魚、未成魚、成魚の個体数

U'_{tc} : 取り込まれた幼魚、未成魚、成魚の個体数を漁獲開始年齢時に換算した個体数

その結果、未利用資源状態における、仔稚魚取り込み時点 (tu) から漁獲開始時点 (tc) までの生残率 (ru) は、①式のように表わすことができる。

$$ru = N_{tc} / N_{tu} = (N_{tf} \cdot e^{-M2 \cdot (tc-tf)}) / (N_0 \cdot e^{-M1 \cdot tu})$$

$$= [(N_0 \cdot e^{-M1 \cdot tf}) \cdot e^{-M2 \cdot (tc-tf)}] / (N_0 \cdot e^{-M1 \cdot tu})$$

$$= e^{-M2 \cdot (tc-tf)} \cdot e^{-M1 \cdot (tf-tu)}$$

---- ①

ここで、最高出現年齢 (tm) での生残数 (N_{tm}) は、②式で示される。

$$N_{tm} = N_{tf} \cdot e^{-M2 \cdot (tm-tf)} = (N_0 \cdot e^{-M1 \cdot tf}) \cdot e^{-M2 \cdot (tm-tf)}$$

---- ②

そこで、②式を①式に代入してM1を消去すると、仔稚魚取り込み時点から漁獲開始時点までの生残率 (ru) を、③式として表わすことができる。

$$ru = e^{-M2 \cdot (tc-tf)} \cdot e^{[(tf-tu)/tf] \cdot \{1 + \ln(N_{tm}/N_0) + M2 \cdot (tm-tf)\}}$$

---- ③

一方、未利用資源状態における、幼魚や未成魚、成魚の取り込み時点 (tu') から漁獲開始時点 (tc) までの生残率 (ru') は、④式のように表わすことができる。

$$ru' = N_{tc} / N_{tu'} = e^{-M2 \cdot (tc-tu')}$$

---- ④

以上のことから、仔稚魚の取り込み量を漁獲開始年齢時に換算した量については⑤、⑥式、幼魚、未成魚、成魚の取り込み量を漁獲開始年齢時に換算した量については⑦、⑧式で示すことができる。

○仔稚魚の換算量

・個体数換算

$$U_{tc} = ru \times U$$

$$= e^{-M2 \cdot (tc-tf)} \cdot e^{[(tf-tu)/tf] \cdot \{1 + \ln(N_{tm}/N_0) + M2 \cdot (tm-tf)\}} \times U$$

---- ⑤

・重量換算

$$UW_{tc} = U_{tc} \times W_{tc}$$

---- ⑥

(ただし, W_{tc} : 漁獲開始年齢時の推定体重)

○幼魚、未成魚、成魚の換算量

・個体数換算

$$U'_{tc} = ru' \times U' = e^{-M2 \cdot (tc-tu')} \times U'$$

---- ⑦

・重量換算

$$U'W_{tc} = U'_{tc} \times W_{tc}$$

---- ⑧

(ただし, W_{tc} : 漁獲開始年齢時の推定体重)

2) 漁獲量の漁獲開始年齢時への換算

漁獲重量 (CW), 漁獲物の年齢 (t) 別の個体数比 (α_t , ただし $\sum \alpha_t = 1$, $t = 0 \sim tm$, tm は最高出現年齢), Bertalanffy 成長式による大きさ ($L_t = L_\infty [1 - e^{-K(t-t_0)}]$), ただし L_∞ , K , t_0 は定数), 相対成長式による体重 ($W_t = a \cdot L_t^b$, ただし a , b は定数) が把握されれば, 総漁獲尾数 (CN), 年齢別漁獲尾数 (CN_t), 年齢別漁獲重量 (CW_t) を推定できる (⑨~⑪式)。

$$CN = CW / (\sum W_t \cdot \alpha_t) \quad (t = 0 \sim tm) \quad \text{--- ⑨}$$

$$CN_t = \alpha_t \cdot CN \quad \text{--- ⑩}$$

$$CW_t = CN_t \cdot W_t \quad \text{--- ⑪}$$

さらに, 稚魚期後の自然死亡係数 (M2) が把握されれば, 以下の⑫, ⑬式によって漁獲開始年齢時における換算漁獲尾数 (CN_{tc}) と換算漁獲重量 (CW_{tc}) を推定できる。

$$CN_{tc} = \sum CN_t \cdot e^{-M2(t-tc)} \quad \text{--- ⑫}$$

$$CW_{tc} = CN_{tc} \cdot W_{tc} \quad \text{--- ⑬}$$

($t = tc \sim tm$, tc は加入年齢, tm は最高出現年齢)

3) 取り込み量の漁獲量に対する割合

以上1), 2) の漁獲開始年齢時に換算した, 取り込み個体数 (U_{tc} , U'_{tc}) 及び漁獲尾数 (CN_{tc}) から, 漁獲尾数 (重量) に対する取り込み個体数 (重量) の割合を以下の⑭, ⑮式によって推定できる。

① 仔稚魚

$$U_{tc} / CN_{tc} (= U_{tc} \cdot W_{tc} / CW_{tc}) \quad \text{--- ⑭}$$

② 幼魚, 未成魚, 成魚

$$U'_{tc} / CN_{tc} (= U'_{tc} \cdot W_{tc} / CW_{tc}) \quad \text{--- ⑮}$$

4) 計算に必要なパラメータの一覧

計算に必要なパラメータは以下に示したとおりである。

これらのパラメータの値は, 海上調査を行うことなく, 既往情報の収集, 取水口での取り込み生物調査, および市場での漁獲物調査によって取得可能である。

(1) 生物取り込み関係

① 取り込まれた個体の年齢 (日齢) (仔稚魚: tu , 幼魚・未成魚・成魚: tu')

② 取り込まれた個体数 (仔稚魚: U , 幼魚・未成魚・成魚: U')

(2) 生物生態関係

① 稚魚期末の年齢 (日齢) (tf)

② 稚魚期後の自然死亡係数 (M2)

③ 大きさ ($L_t = L_\infty [1 - e^{-K(t-t_0)}]$), ただし L_∞ , K , t_0 は定数)

④ 体重 ($W_t = a \cdot L_t^b$, ただし a , b は定数)

⑤ 成熟開始年齢時の1個体当たりの産卵数 (N_0)

⑥ 最高出現年齢時の生残数 (N_m)

(3) 漁獲関係

① 漁獲重量 (CW)

② 漁獲開始年齢 (tc)

③ 最高出現年齢 (tm)

④ 漁獲物の年齢 (t) 別の尾数比 (α_t , ただし $\sum \alpha_t = 1$, $t = 0 \sim tm$, tm は最高出現年齢)

⑤ 漁獲開始時推定体重 (W_{tc})

2. モデル計算に必要なパラメータの取得

1) 生物取り込み関係

影響評価を行うにあたり, 福島県沿岸域をモデル海域として, そこに立地している大容量の3発電所 (東京電力株式会社の福島第一原子力発電所, 福島第二原子力発電所, 広野火力発電所) を対象に (Fig. 2), 取水による生物の取り込み量を調査した。

福島第一原子力発電所については1~6号機 (総定格出力: 469.6万kW, 総取水量: 270.8m³/秒) のうちの2号機取水口, 福島第二原子力発電所については1~4号機 (総定格出力: 440.0万kW, 総取水量: 311.7m³/秒) のうちの3号機取水口, 広野火力発電所については1~4号機 (総定格出力: 320.0万kW, 総取水量: 139.0m³/秒)* のうちの1, 2号機取水口において, 3発電所同時期に, 取水とともに取り込まれる魚卵や仔魚, 稚魚, 幼魚等の採集調査を実施した。

福島県沿岸域では冬季に産卵する漁業生物種が多く, その時期にそれらの卵や仔魚, 稚魚, 幼魚などが出現するので, 1997年11月~1998年6月の各月に1回, 1昼夜にわたる採集調査を行った。

卵仔稚については, 各発電所ともに, 取水口に稚魚ネット (口径: 57cm, 網目幅: 約0.3mm) を設置して, 2時間間隔で計12回 (1回の採集時間は約20分間) の採集を行った。また, 幼魚等については, 各発電所ともに, 除塵スクリーン洗浄時 (4時間間隔で実施) の流出物を集める塵芥処理槽

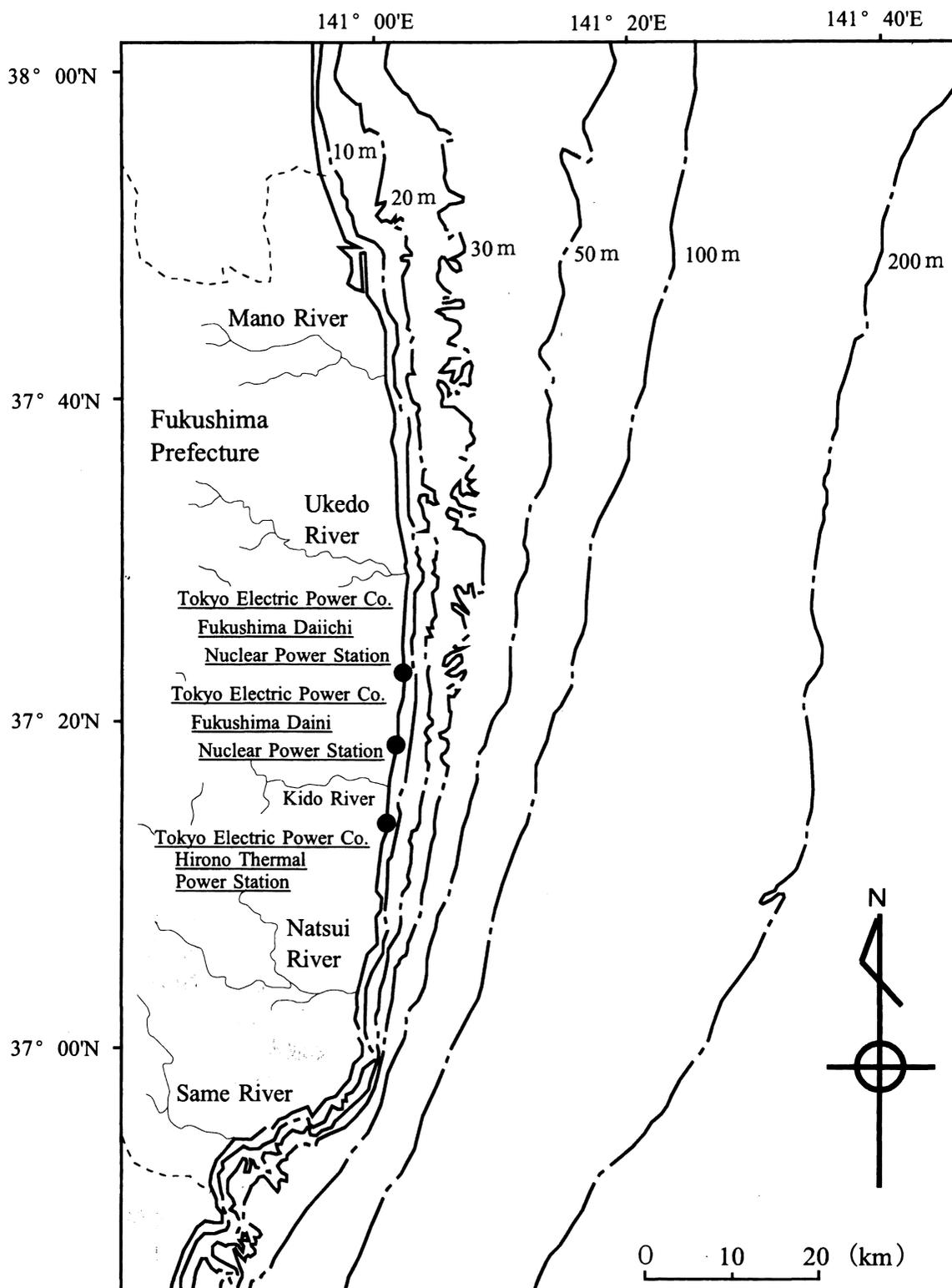


Fig. 2 The position of 3 power station located in the coastal area of Fukushima Prefecture.
*From "Fukushima Prefectural Committee for Investigation and Control of Warm Waste Water" (1995), partially revised.

に網（網目幅：約5mm）を設置して、4時間間隔で計6回（1回の採集時間は約4時間）の採集を行った。

取り込み調査で採集された生物の個体数と大きさを種類別に計数・計測した。そして、調査時の取り込み個体数と取水量のデータから調査期間中の総取り込み量を推定した。

また、取り込まれた個体の年齢（日齢）については、取り込まれた個体の大きさと既往知見から概算で求めた。

* 広野火力発電所は平成16年7月より5号機の運転を開始しているが、ここでは、取り込み調査実施時の運転状況を示している。

2) 生物生態、漁獲関係

評価の対象となる生物について、福島県沿岸域を中心として、発育段階、成長、生殖などに関する既往知見や漁獲統計資料を収集し、モデル計算に必要なパラメータを整理した。

なお、魚類の一般的発育段階については、岡村・尼岡（1997）に基づき、以下のとおり区分した。

仔魚：孵化した後、すべての鰭の条数が成魚と同じ数になるまでの個体

稚魚：すべての鰭条数が成魚のものと同数になってから、鱗が形成されるまでの個体

未成魚：鱗が形成されてから、最初の成熟に達するまでの個体

成魚：最初の成熟に達した個体

ただし、シロザケについては、帰山・文谷（1982）に従って、鱗が形成されてから、川を下って沿岸海域に滞留している個体を幼魚とし、沖合へ移動してから成熟に達するまでの個体を未成魚とした。

3. 資源影響評価の対象生物種と対象エリア

福島県沿岸漁業（刺網、延縄、船曳網、定置網）の対象種であり、卵や仔稚魚、幼魚が福島県沿岸全域で冬季に出現するイカナゴ、イシガレイ、マコガレイ、マガレイ、シロザケ、アイナメの6種をモデル評価の対象種とした。

また、3発電所（福島第一、福島第二、広野）の取水による漁業生物（卵や仔稚等）の総取り込み量が、福島県沿岸漁業に及ぼす影響を評価するために、福島県沿岸漁業（刺網、延縄、船曳網、定置網）の漁獲対象エリアである福島県沿岸全域

をモデル評価の対象エリアとした（Fig. 2）。

結 果

1. モデル計算に使用するパラメータ値

1) 生物取り込み関係

(1) 取り込まれた個体の大きさと年齢

生物取り込み調査で採集された評価対象種の平均全長、産卵後の推定経過日数を Table 1 に示した。

イカナゴ、イシガレイ、マコガレイ、マガレイは全長で数mmから10mm程度までの仔魚期の個体が1～3月を中心として取り込まれていた。また、シロザケは全長5～8cm程度の幼魚期の個体、アイナメは全長5cm前後の稚魚期の個体が、それぞれ4、5月を中心として取り込まれていた。

日水資（1981）、および海生研（1991）によると、水温10℃前後の条件下では、イカナゴ仔魚では、産卵から孵化までの期間が20日程度、孵化から取り込まれた大きさになるまでの期間が10日程度、イシガレイ仔魚では、産卵から孵化までの期間が10日程度、孵化から取り込まれた大きさになるまでの期間が30日程度、マコガレイ仔魚とマガレイ仔魚では、産卵から取り込まれた大きさ（孵化直後）になるまで10日程度の期間を要する。シロザケ幼魚の場合には、産卵から孵化までの期間は60日程度、孵化から取り込まれた大きさになるまでの期間は、全長5cmで60日程度、全長6cmで90日程度、全長8cmで120日程度である。また、アイナメ稚魚では、産卵から孵化までの期間は20日程度、孵化から取り込まれた大きさになるまでの期間は120日程度である。

従って、福島県沿岸域において、上記評価対象種の卵～稚幼魚の出現期にあたる冬～春季の水温が8～10℃前後であることから（福島県温排水調査管理委員会、1995）、取り込まれた個体の年齢（日齢）については、イカナゴ仔魚では0.08歳（30日）、イシガレイ仔魚では0.11歳（40日）、マコガレイ仔魚とマガレイ仔魚では0.03歳（10日）、アイナメ稚魚では0.38歳（140日）、シロザケ幼魚では全長5cmで0.33歳（120日）、6cmで0.41歳（150日）、8cmで0.49歳（180日）とみなした。

(2) 取り込み個体数

各調査月の取り込み率（Table 1）と総取水量から推定した、1産卵シーズンの総取り込み量を Table 2 に示した。

Table 1 Entrainment or impingement rate, average total length, and estimated value of days after spawning of the target species

	Investigation month							
	1997/11	12	1998/1	2	3	4	5	6
Japanese sand lance larva								
Fukushima Daiichi (Unit2)								
Entrainment rate (individuals/1000m ³)	-	-	1284.01	2671.19	22.42	-	-	-
Average total length (mm)	-	-	4.6	5.4	8.4	-	-	-
Passage days after spawning*	-	-	20+10	20+10	20+10	-	-	-
Fukushima Daini (Unit3)								
Entrainment rate (individuals/1000m ³)	-	-	469.84	14044.98	143.10	-	-	-
Average total length (mm)	-	-	4.6	5.4	8.0	-	-	-
Passage days after spawning*	-	-	20+10	20+10	20+10	-	-	-
Hirono (Unit1,2)								
Entrainment rate (individuals/1000m ³)	-	-	26986.38	2898.38	19.53	-	-	-
Average total length (mm)	-	-	6.5	4.7	8.5	-	-	-
Passage days after spawning*	-	-	20+10	20+10	20+10	-	-	-
Stone flounder larva								
Fukushima Daiichi (Unit2)								
Entrainment rate (individuals/1000m ³)	-	-	-	-	0.38	-	-	-
Average total length (mm)	-	-	-	-	13.3	-	-	-
Passage days after spawning*	-	-	-	-	10+30	-	-	-
Fukushima Daini (Unit3)								
Entrainment rate (individuals/1000m ³)	-	-	-	0.20	1.20	-	-	-
Average total length (mm)	-	-	-	8.6	13.8	-	-	-
Passage days after spawning*	-	-	-	10+30	10+30	-	-	-
Hirono (Unit1,2)								
Entrainment rate (individuals/1000m ³)	-	-	-	-	1.62	-	-	-
Average total length (mm)	-	-	-	-	12.9	-	-	-
Passage days after spawning*	-	-	-	-	10+30	-	-	-
Marbled sole larva								
Fukushima Daiichi (Unit2)								
Entrainment rate (individuals/1000m ³)	-	-	4.68	8.73	-	-	-	-
Average total length (mm)	-	-	3.4	3.7	-	-	-	-
Passage days after spawning*	-	-	10+0	10+0	-	-	-	-
Fukushima Daini (Unit3)								
Entrainment rate (individuals/1000m ³)	-	-	1.10	1.77	1.81	-	-	-
Average total length (mm)	-	-	3.2	3.6	3.9	-	-	-
Passage days after spawning*	-	-	10+0	10+0	10+0	-	-	-
Hirono (Unit1,2)								
Entrainment rate (individuals/1000m ³)	-	-	18.95	0.55	0.52	-	-	-
Average total length (mm)	-	-	3.4	3.1	5.0	-	-	-
Passage days after spawning*	-	-	10+0	10+0	10+0	-	-	-
Brown sole larva								
Fukushima Daiichi (Unit2)								
Entrainment rate (individuals/1000m ³)	-	-	3.24	51.17	16.28	-	0.62	-
Average total length (mm)	-	-	2.8	3.3	3.0	-	2.5	-
Passage days after spawning*	-	-	10+0	10+0	10+0	-	10+0	-
Fukushima Daini (Unit3)								
Entrainment rate (individuals/1000m ³)	-	-	2.36	1.95	12.26	-	-	-
Average total length (mm)	-	-	2.6	3.2	3.1	-	-	-
Passage days after spawning*	-	-	10+0	10+0	10+0	-	-	-
Hirono (Unit1,2)								
Entrainment rate (individuals/1000m ³)	-	-	30.62	1.62	-	-	-	-
Average total length (mm)	-	-	3.0	2.9	-	-	-	-
Passage days after spawning*	-	-	10+0	10+0	-	-	-	-

* The left of + : Estimated days after spawning to hatching. (Water temperature about 10°C)
The right of + : Estimated days after hatching to reach the total length shown in the table.

Table 1 Entrainment or impingement rate, average total length, and estimated value of days after spawning of the target species (Continued)

	Investigation month							
	1997/11	12	1998/1	2	3	4	5	6
Chum salmon young fish								
Fukushima Daiichi (Unit2)								
Impingement rate (individuals / 1000m ³)	-	-	5.36	-	0.54	1.88	0.27	-
Average total length (mm)	-	-	5.3	-	5.3	6.3	8.0	-
Passage days after spawning*	-	-	60+60	-	60+60	60+90	60+120	-
Fukushima Daini (Unit3)								
Impingement rate (individuals / 1000m ³)	-	-	-	-	2.22	2.37	3.71	-
Average total length (mm)	-	-	-	-	4.5	5.9	8.0	-
Passage days after spawning*	-	-	-	-	60+60	60+90	60+120	-
Hirono (Unit1,2)								
Impingement rate (individuals / 1000m ³)	-	-	-	-	-	0.87	-	-
Average total length (mm)	-	-	-	-	-	6.5	-	-
Passage days after spawning*	-	-	-	-	-	60+90	-	-
Fad cod juvenile								
Fukushima Daiichi (Unit2)								
Impingement rate (individuals / 1000m ³)	-	-	-	-	-	4.29	2.41	0.54
Average total length (mm)	-	-	-	-	-	5.5	5.9	5.8
Passage days after spawning*	-	-	-	-	-	20+120	20+120	20+120
Fukushima Daini (Unit3)								
Impingement rate (individuals / 1000m ³)	-	-	-	-	0.15	2.67	0.59	-
Average total length (mm)	-	-	-	-	4.2	5.5	5.5	-
Passage days after spawning*	-	-	-	-	20+120	20+120	20+120	-
Hirono (Unit1,2)								
Impingement rate (individuals / 1000m ³)	-	-	-	-	-	-	-	0.44
Average total length (mm)	-	-	-	-	-	-	-	5.1
Passage days after spawning*	-	-	-	-	-	-	-	20+120

* The left of + : Estimated days after spawning to hatching. (Water temperature about 10°C)
The right of + : Estimated days after hatching to reach the total length shown in the table.

3発電所の合計で、イカナゴ仔魚は約213億個体、イシガレイ仔魚は約150万個体、マコガレイ仔魚は約1,620万個体、マガレイ仔魚は約5,590万個体、アイナメ稚魚は約6,700個体を取り込まれたと推定された。また、シロザケ幼魚は3月以前に全長5cm程度(0.33歳)の個体が約4,530個体、4月には全長6cm程度(0.41歳)の個体が約2,910個体、5月には全長8cm程度(0.49歳)の個体が約2,770個体、合計で約10,210個体を取り込まれたと推定された。

2) 生物生態関係

(1) 稚魚期末の年齢

日水資(1981)、および海生研(1991)によると、水温10°C前後の条件下での産卵後から稚魚期末までの経過日数については、イカナゴでは産卵～孵化が20日程度、孵化～稚魚が90日程度、イシガレイでは産卵～孵化が10日程度、孵化～稚魚が

80日程度であり、マコガレイでは産卵～孵化が10日程度、孵化～稚魚が140日程度である。マガレイについては、産卵～孵化が10日程度であるが、稚魚期に関する知見が少なく、孵化～稚魚の経過日数は明らかでない。しかし、孵化から約60日経過した稚魚が砂浜域で確認されており、この頃から遊泳力を持つと考えられている。また、シロザケでは産卵～孵化が60日程度、孵化～稚魚が60日程度であり、アイナメでは産卵～孵化が50日程度、孵化～稚魚が150日程度である。

従って、福島県沿岸域において、上記種の卵～稚魚の出現期にあたる冬～春季の水温が8～10°C程度であることから(福島県温排水調査管理委員会, 1995)、産卵後から稚魚期末までの年齢については、イカナゴでは0.30歳(110日)、イシガレイでは0.25歳(90日)、マコガレイでは0.33歳(150日)、マガレイでは0.19歳(70日)、シロザケでは0.33歳(120日)、アイナメでは0.55歳(200日)

Table 2 Total number of monthly entrained or impinged individuals of target species

	Year/Month								
	1997/11	12	1998/1	2	3	4	5	6	
① Total quantity of water intake [10,000m³]									
Fukushima Daiichi (All unit)	47,048	48,613	48,662	44,826	49,177	45,690	64,953	67,992	
Fukushima Daiichi (All unit)	80,716	78,601	80,865	65,201	74,726	80,733	69,995	60,788	
Hirono (All unit)	19,205	29,627	32,932	30,527	20,561	15,811	20,777	27,687	Total
Japanese sand lance larva									
② Average of entrainment rate [individuals/1,000m³]									
Fukushima Daiichi (Unit2)	0	0	1284.01	2671.19	22.42	0	0	0	
Fukushima Daiichi (Unit3)	0	0	469.84	14044.98	143.10	0	0	0	
Hirono (Unit.1,2)	0	0	26986.38	2898.38	19.53	0	0	0	
③ Total quantity of entrainment [nindividuals × 10⁷] (②×10×①)									
Fukushima Daiichi (All unit)	0	0	62.48	119.74	1.10	0	0	0	
Fukushima Daiichi (All unit)	0	0	37.99	915.75	10.69	0	0	0	
Hirono (All unit)	0	0	888.72	88.48	0.40	0	0	0	
Total of three power stations	0	0	989.19	1123.97	12.19	0	0	0	2125.35
Stone flounder larva									
② Average of entrainment rate [individuals/1,000m³]									
Fukushima Daiichi (Unit2)	0	0	0	0	0.38	0	0	0	
Fukushima Daiichi (Unit3)	0	0	0	0.20	1.20	0	0	0	
Hirono (Unit1,2)	0	0	0	0	1.62	0	0	0	
③ Total quantity of entrainment [individuals × 10⁷] (②×10×①)									
Fukushima Daiichi (All unit)	0	0	0	0	0.02	0	0	0	
Fukushima Daiichi (All unit)	0	0	0	0.01	0.09	0	0	0	
Hirono (All unit)	0	0	0	0	0.03	0	0	0	
Total of three power stations	0	0	0	0.01	0.14	0	0	0	0.15

横田：発電所取水による生物取り込み量の影響評価

Table 2 Total number of monthly entrained or impinged individuals of target species (Continued)

	Year/Month								Total
	1997/11	12	1998/1	2	3	4	5	6	
① Total quantity of water intake [10,000m³]									
Fukushima Daiichi (All unit)	47,048	48,613	48,662	44,826	49,177	45,690	64,953	67,992	
Fukushima Daiichi (All unit)	80,716	78,601	80,865	65,201	74,726	80,733	69,995	60,788	
Hirono (All unit)	19,205	29,627	32,932	30,527	20,561	15,811	20,777	27,687	
	Marbled sole larva								
② Average of entrainment rate [nindividuals/1,000m³]									
Fukushima Daiichi (Unit2)	0	0	4.68	8.73	0	0	0	0	
Fukushima Daiichi (Unit3)	0	0	1.10	1.77	1.81	0	0	0	
Hirono (Unit1,2)	0	0	18.95	0.55	0.52	0	0	0	
③ Total quantity of entrainment [nindividuals × 10⁷] (②×10×①)									
Fukushima Daiichi (All unit)	0	0	0.23	0.39	0	0	0	0	
Fukushima Daiichi (All unit)	0	0	0.09	0.12	0.14	0	0	0	
Hirono (All unit)	0	0	0.62	0.02	0.01	0	0	0	
Total of three power stations	0	0	0.94	0.53	0.15	0	0	0	1.62
	Brown sole larva								
② Average of entrainment rate [nindividuals/1,000m³]									
Fukushima Daiichi (Unit2)	0	0	3.24	51.17	16.28	0	0.62	0	
Fukushima Daiichi (Unit3)	0	0	2.36	1.95	12.26	0	0	0	
Hirono (Unit1,2)	0	0	30.62	1.62	0	0	0	0	
③ Total quantity of entrainment [nindividuals × 10⁷] (②×10×①)									
Fukushima Daiichi (All unit)	0	0	0.16	2.29	0.8	0	0.04	0	
Fukushima Daiichi (All unit)	0	0	0.19	0.13	0.92	0	0	0	
Hirono (All unit)	0	0	1.01	0.05	0	0	0	0	
Total of three power stations	0	0	1.36	2.47	1.72	0	0.04	0	5.59

横田：発電所取水による生物取り込み量の影響評価

Table 2 Total number of monthly entrained or impinged individuals of target species (Continued)

	年月								
	1997/11	12	1998/1	2	3	4	5	6	
① Total quantity of water intake [10,000m³]									
Fukushima Daiichi (All unit)	47,048	48,613	48,662	44,826	49,177	45,690	64,953	67,992	
Fukushima Daiichi (All unit)	80,716	78,601	80,865	65,201	74,726	80,733	69,995	60,788	
Hirono (All unit)	19,205	29,627	32,932	30,527	20,561	15,811	20,777	27,687	Total
Chum salmon young fish									
② Average of impingement rate [individuals/1,000m³]									
Fukushima Daiichi (Unit2)	0	0	5.36	0	0.54	1.88	0.27	0	
Fukushima Daiichi (Unit3)	0	0	0	0	2.22	2.37	3.71	0	
Hirono (Unit1,2)	0	0	0	0	0	0.87	0	0	
③ Total quantity of impingement [individuals × 10⁷] (②×10×①)									
Fukushima Daiichi (All unit)	0	0	2608	0	266	859	175	0	
Fukushima Daiichi (All unit)	0	0	0	0	1659	1913	2597	0	
Hirono (All unit)	0	0	0	0	0	138	0	0	
Total of three power stations	0	0	2608	0	1925	2910	2772	0	10215
Fad cod juvenile									
② Average of impingement rate [individuals/1,000m³]									
Fukushima Daiichi (Unit2)	0	0	0	0	0	4.29	2.41	0.54	
Fukushima Daiichi (Unit3)	0	0	0	0	0.15	2.67	0.59	0	
Hirono (Unit1,2)	0	0	0	0	0	0	0	0.44	
③ Total quantity of impingement [individuals × 10⁷] (②×10×①)									
Fukushima Daiichi (All unit)	0	0	0	0	0	1960	1565	367	
Fukushima Daiichi (All unit)	0	0	0	0	112	2156	413	0	
Hirono (All unit)	0	0	0	0	0	0	0	122	
Total of three power stations	0	0	0	0	112	4116	1978	489	6695

横田：発電所取水による生物取り込み量の影響評価

とみなした。

(2) 稚魚期後の自然死亡率

評価対象種の稚魚期後の年間自然死亡係数 (M) の推定値と、その値から求めた年間自然死亡率 (e^{-M}) をみると、イカナゴではM=0.3 [年間自然死亡率：0.26] (江部ら, 1991), イシガレイでは雌がM=0.2 [年間自然死亡率：0.18], 雄がM=0.3 [年間自然死亡率：0.26] (福島水試, 1987), マコガレイでは雌がM=0.2 [年間自然死亡率：0.18], 雄がM=0.3 [年間自然死亡率：0.26] (福島水試, 1987), マガレイでは雌がM=0.4 [年間自然死亡率：0.32], 雄がM=0.5 [年間自然死亡率：0.39] (福島水試, 1987) である。また、シロザケではM=0.5 [年間自然死亡率：0.39] (水産庁未公表資料), アイナメではM=0.3 [年間自然死亡率：0.26] (福島県, 1998) である。

(3) 大きさと体重

評価対象種について、年齢と大きさの関係式、大きさと体重の関係式をそれぞれ Table 3, 4 に示した。

イシガレイ, マコガレイ, マガレイ, アイナメ

については、成長過程の雌雄差が明確であり、同じ年齢で比較した場合、4種ともに雌が雄よりも大きい。

(4) 成熟開始年齢と産卵数

既往の文献をもとに、評価対象種について、大きさと抱卵数の関係を Table 5 表に示した。年齢とサイズの関係式 (Table 3) によって成熟開始年齢時の大きさを計算すると、イカナゴは全長約10cm (1歳), イシガレイ雌は体長約25cm (2歳), マコガレイ雌は体長約20cm (2歳), マガレイ雌は体長約19cm (2歳), シロザケは尾叉長約68cm (4歳), アイナメ雌は体長約27cm (2歳) であった。

従って、サイズと抱卵数の関係式 (Table 5) によって成熟開始年齢時の抱卵数を計算すると、イカナゴは約4千個 (1歳), イシガレイは約75万個 (2歳), マコガレイは約30万個 (2歳), マガレイは約50万個 (2歳) であった。また、海生研 (1991) によると、シロザケが約3千個 (4歳) であった。アイナメについては、海生研 (1991), 泉 (1999) によって約5千個 (2歳) と推定された。

なお、魚類の場合、雌が体内で卵を次々と生成

Table 3 Formula showing the relation between age (t) and length (L) of the target species

Species	Formula of the relation between age and length	Length measurement part	Count start (month)	Remarks
Japanese sand lance	$L_t = 181.3 (1 - e^{-0.561(t+0.481)})$	Total length (mm)	1	Ebe, etc. (1989)
	$L_D = 0.7071 \times D - 27.16$ (D: Days, $D \leq 120$)	Total length (mm)	1	Fukushima Prefecture (1994)
Stone flounder	♀ $L_t = 506.5 (1 - e^{-0.3329(t+0.09721)})$	Body length (mm)	1	Fukushima prefectural fisheries experimental station (1987)
	♂ $L_t = 320.3 (1 - e^{-0.3075(t+1.675)})$	Body length (mm)	1	
Marbled sole	♀ $L_t = 517.0 (1 - e^{-0.1672(t+0.9212)})$	Body length (mm)	1	Fukushima prefectural fisheries experimental station (1987)
	♂ $L_t = 375.7 (1 - e^{-0.158(t+2.086)})$	Body length (mm)	1	
Brown sole	♀ $L_t = 320.6 (1 - e^{-0.393(t+0.0268)})$	Body length (mm)	5	Fukushima prefectural fisheries experimental station (1987)
	♂ $L_t = 198.1 (1 - e^{-0.771(t-0.0634)})$	Body length (mm)	5	
Chum salmon	$L_t = 83.6 (1 - e^{-0.4156(t+0.01505)})$	Fork length (cm)	1	Estimated by the data of Fukushima Prefecture (1999)
Fad cod	$L_t = 51.8 (1 - e^{-0.41(t+0.25)})$	Total length (cm)	1	Izumi (1999)
	$L_t = 44.0 (1 - e^{-0.56(t+0.26)})$	Total length (cm)	1	
※ (Body length) = 0.8428 × (Total length) + 0.2619				

Table 4 Formula showing the relation between length (L) and body weight (W) of the target species

Species	Formula showing the relation between length and body weight	Length measurement part	Remarks
Japanese sand lance	$W = 4.28 \times 10^{-6} \times L^{2.95}$	Total length (mm)	Ebe, etc. (1989)
	$W = 3.32681 \times 10^{-7} \times L^{3.55154}$ ($L \leq 80$)	Total length (mm)	Fukushima Prefecture (1994)
Stone flounder	$W = 5.9225 \times 10^{-5} \times L^{2.8219}$	Body length (mm)	Fukushima prefectural fisheries experimental station (1987)
	$W = 3.1369 \times 10^{-5} \times L^{2.4976}$	Body length (mm)	
Marbled sole	$W = 1.9407 \times 10^{-2} \times L^{3.059}$	Body length (mm)	Fukushima prefectural fisheries experimental station (1987)
	$W = 3.3073 \times 10^{-2} \times L^{2.883}$	Body length (mm)	
Brown sole	$W = 2.598 \times 10^{-2} \times L^{2.913}$	Body length (mm)	Fukushima prefectural fisheries experimental station (1987)
	$W = 4.9876 \times 10^{-2} \times L^{2.629}$	Body length (mm)	
Chum salmon	$W = 3.119 \times 10^{-3} \times L^{3.288}$	Fork length (cm)	Estimated by the data of Fukushima Prefecture (1999)
Fad cod	$W = 1.18 \times 10^{-2} \times L^{3.0158}$	Total length (cm)	Izumi (1999)

Table 5 Formula showing the relation between length (L) and fecundity (E) of the target species

Species	Formula showing the relation between length and fecundity	Mature age	Remarks
Japanese sand lance	$E = 0.354 \times L^{4.038}$ (L, Total length : cm)	Age 1	Tominaga (1988)
Stone flounder	$E = 7.91 \times L^{3.56}$ (L, Body length : cm)	Age 2	Fukushima prefectural fisheries experimental station (1987)
Marbled sole	$E = 0.015 \times L^{3.18}$ (L, Body length : mm)	Age 2	Fukushima prefectural fisheries experimental station (1987)
Brown sole	$E = 9.3 \times L^{3.7}$ (L, Body length : cm)	Age 2	Fukushima prefectural fisheries experimental station (1987)
Chum salmon	Fecundity of fork length about 70cm (Age 4) : about 3,000 eggs	Age 4	Marine ecology research institute (1991)
Fad cod	Fecundity of body length about 27cm (Age 2) : about 5,000 Fecundity of body length about 32cm (Age 3) : about 10,000	Age 2	Izumi (1999), Marine ecology research institute (1991)

しながら産卵するケースや、体内に産み残すケースが想定され、抱卵数（産卵直前の雌体内に存在する成熟した卵の数）と産卵数（雌の体外に産み出される卵の数）は、必ずしも一致した数になるとは限らないが、評価対象の6種については、産卵数が抱卵数と比べて極端に異なるという報告はなされていない。従って、6種の産卵数については、抱卵数にほぼ等しいものとして扱い、このことによって産卵数が過大または過小に見積もられることはないと思なした。

3) 漁獲関係

(1) 漁獲重量

評価対象種の福島県沿岸漁業による総漁獲重量を Table 6 に示した。福島県の船曳網、刺網、定置網、延縄などの沿岸漁業は、福島県内の沿岸海域で操業を行う。従って、福島県沿岸漁業による評価対象種の漁獲重量は、福島県沿岸海域で漁獲されたものの重量である。

福島県沿岸では、イカナゴの稚魚（こうなご）と未成魚・成魚（めろうど）は船曳網、イシガレ

イ、マコガレイ、マガレイは刺網、シロザケは刺網と定置網、アイナメは刺網と延縄によってそれぞれ漁獲されている。1994～1998年の5年間の年平均漁獲重量は、イカナゴ稚魚が2,402トン、イカナゴ未成魚・成魚が6,163トン、イシガレイが298トン、マコガレイが270トン、マガレイが237トン、シロザケが782トン、アイナメが245トンであった。

(2) 漁獲物の年齢組成

評価対象種の漁獲尾数の年齢組成を Table 7 に示した。

福島県沿岸では、イシガレイ、マコガレイ、マガレイは1歳、シロザケは2歳、イカナゴとアイナメは0歳から漁獲対象となっていた。ただし、イカナゴについては、福島県沿岸域における産卵期が1月前後であること（日水資，1981）、さらに、福島県沿岸漁業のイカナゴ漁の期間は、稚魚（こうなご）が4月前後、未成魚・成魚（めろうど）が5月前後に限定されていることから（Fig. 3）、稚魚の漁獲年齢は0.25歳程度、未成魚（1歳未満）

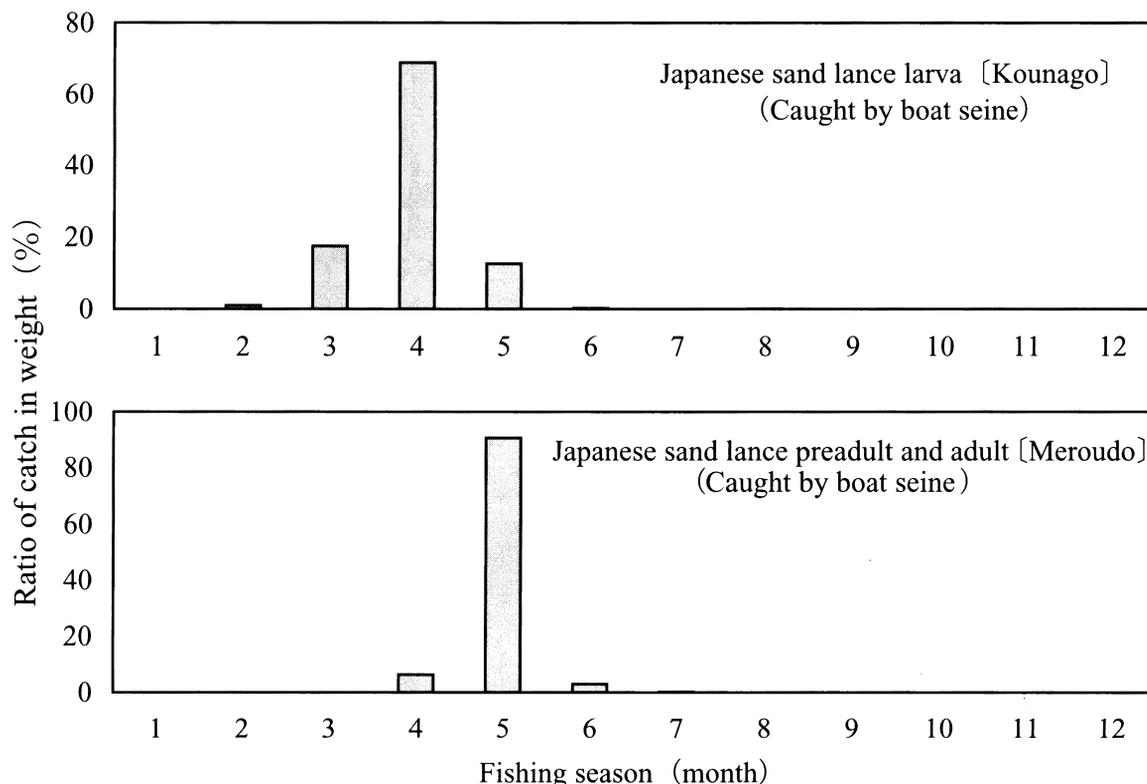


Fig 3 Monthly changes in the ratio of catch in weight of Japanese sand lance by boat seine fishery. (Average values during 1994-1998.)

* This figure was made from the data compiled by Fishery Section, Agriculture Forestry and Fishery Department, Fukushima Prefecture (1995～1999).

Table 6 Total catch of target species in weight (kg) by the coastal fishery of Fukushima Prefecture

Year	Japanese sand lance (Boat seine)		Stone flounder (Gill net)	Marbled sole (Gill net)	Brown sole (Gill net)	Chum salmon (Gill net, Fixed shore net fishery)	Fad cod (Gill net, Longline)
	Juvenile	Preadult, Adult					
1994	3,712,341	5,097,995	169,691	316,483	73,578	405,419	346,563
1995	1,568,501	5,787,382	331,293	258,126	178,735	1,047,321	178,900
1996	2,853,594	9,068,081	336,577	270,814	309,603	1,206,154	182,099
1997	2,554,962	3,699,720	370,064	336,245	255,253	658,150	360,999
1998	1,323,069	7,165,874	281,939	169,969	366,267	590,958	158,193
Average	2,402,493	6,163,810	297,913	270,327	236,687	781,600	245,351

* Data collected by the Fishery Section, Agriculture Forestry and Fishery Department, Fukushima Prefecture during 1995-1999 were analyzed.

Table 7 Age composition (% in number) of target species caught in the coastal area of Fukushima Prefecture

Age (*1,2)	Japanese sand lance (*3)		Stone flounder	Marbled sole	Brown sole	Chum salmon	Fad cod (*4)
	Juvenile	Preadult, Adult					
0	100	1.48	0.03				10.17
1		27.73	34.17	27.94	22.99		67.83
2		36.07	44.02	47.05	44.86	4.62	19.27
3		17.53	13.96	19.52	26.99	34.82	2.68
4		11.67	5.05	4.18	4.71	44.96	0.04
5		4.1	2.09	0.76	0.44	14.81	
6		1.35	0.57	0.20	0.01	0.79	
7			0.09	0.19			
8			0.03	0.07			
9				0.04			
10				0.05			
Investigation year		1994~1998	1975~1985	1975~1985	1979~1985	1979~1997	1995~1996
Remarks		Fukushima (1995~1999)	Fukushima (1987)	Fukushima (1987)	Fukushima (1987)	Fukushima (1999)	Fukushima (1998)

*1 Age was counted from the spawning season.

*2 Year average (%) is shown.

*3 The target stages for fishing are 0.25 year old juvenile fish, and 0.33 year old preadult fish, and adult fish of 1 year old or more.

*4 Fish over 0.75 year old are the target for fishing.

の漁獲年齢は0.33歳程度とみなせる。アイナメについては、福島県沿岸域における成熟期が12月頃であること（泉，1999），0歳魚については9月頃から漁獲されることから（福島県，1998），漁獲開始年齢は0.75歳とみなせる。

また，Table 7の漁獲尾数の年齢組成をみると，福島県沿岸域においては，イカナゴでは7歳以上，イシガレイでは9歳以上，マコガレイでは11歳以上，マガレイでは7歳以上，シロザケでは7歳以上，アイナメでは5歳以上の個体はほとんど出現しないと判断される。従って，評価対象種の最高出現年齢については，イカナゴが6歳程度，イシガレイが8歳程度，マコガレイが10歳程度，マガレイが6歳程度，シロザケが6歳程度，アイナメが4歳程度とみなせる。

(3) 漁獲物の年齢別推定体重

評価対象種の年齢別推定体重を Table 8 に示した。各年齢の体重は，Table 3の年齢と大きさの関係式，および Table 4の大きさと体重の関係式より算出された。ただし，雌雄別に関係式が求められているイシガレイ，マコガレイ，マガレイ，アイナメの4種については，雌雄の平均値で示した。

評価対象種の漁獲開始年齢時の推定体重は，イカナゴの稚魚が0.16 g（0.25歳），未成魚・成魚が0.7 g（0.33歳），イシガレイが112 g（1歳），マコガレイが69 g（1歳），マガレイが44 g（1歳），シロザケが1,010 g（2歳），アイナメが75 g（0.75歳）であった。

4) 計算に使用するパラメータ値の一覧

生残モデルに使用するパラメータ値について整理した結果を，Table 9に示した。

パラメータ値が雌雄別に把握されている場合，雌雄の平均値で示した。

なお，1個体の雌の産卵数は成熟開始年齢時に最も少なく，年齢を重ねるに従って多くなる傾向にあるが（Table 3，5参照），成熟開始年齢の雌1個体から産出されたものが最高出現年齢まで生き残る数は，極めて少ないと考えられる。ここでは，最高出現年齢の生残数（ N_m ）については，1個体と設定した。

2. 生残モデルによる計算結果

福島県の特定沿岸漁業による年間平均漁獲量に

対する1998年総取り込み量（福島第一，福島第二，広野の合計）の割合を評価対象種別に生残モデルで計算した結果は，Table 10に示したとおりである。また，モデル計算に使用したパラメータの値については，Table 9に示したとおりである。

考 察

1. 評価手法について

発電所取水による生物取り込み量の資源影響評価のため，生残過程についてモデル化を行った。

開発したモデルでは，産卵数と最高出現年齢の生残数を大まかに決めて，生残過程をモデル化しているため，計算に使うパラメータ値は，影響を過小評価することのないよう吟味した安全側の値を使用すべきである。例えば，資源が増減することなく平衡状態にある場合には，以下の関係式が成り立つ。

$$N_0 = \sum [N_m \times e^{-M_2(t-t_a)} \times F_t \times A_t \times R_t] \quad (t=t_a \sim t_m)$$

$$\text{<----> } N_m / N_0 =$$

$$1 / [\sum e^{-M_2(t-t_a)} \times F_t \times A_t \times R_t] \quad (t=t_a \sim t_m)$$

t : 年齢

t_a : 成熟開始年齢

t_m : 最高出現年齢

A_t : 年齢 t の成熟率

R_t : 年齢 t の雌の割合

N₀ : 個体群産卵数

N_m : 成熟開始年齢時の生残個体数

M₂ : 成魚期間中の死亡係数

F_t : 年齢 t の雌1個体の産卵数

N_m/N₀ : 成熟開始年齢時の生残率

上式より，資源が平衡状態（増減しない状態）を維持している場合，成熟開始年齢時の生残個体数（N_m）が1個体のとき，個体群産卵数（N₀）が平衡状態での値（= $\sum e^{-M_2(t-t_a)} \times F_t \times A_t \times R_t$ ）よりも大きくなると，産卵時から成熟開始年齢時までの生残率の値が小さくなる。さらに，個体群産卵数（N₀）が平衡状態での値（= $\sum e^{-M_2(t-t_a)} \times F_t \times A_t \times R_t$ ）に等しいとき，成熟開始年齢時の生残個体数（N_m）が平衡状態での値（=1）よりも小さくなると，産卵時から成熟開始年齢時までの生残率の値が小さくなる。一方，生残率の値が小さくなると，仔稚等の取り込み量を成熟開始年齢時や漁獲開始年齢時の相当量に換算した値は小さくなるので，仔稚等取り込みによる漁業影響は小さく評価される。

Table 8 Estimated weight (g) of target species

Age (*1)	Japanese sand lance		Stone flounder	Marbled sole	Brown sole	Chum salmon	Fad cod
	Juvenile	Preadult,Adult					
0	(*2) 0.16	(*3) 0.7	(*4) 112				(*5) 75
1		3.6	112	69	44		124
2		8.5	289	160	115	1010	386
3		12.5	510	284	184	2157	661
4		15.3	728	432	241	3279	887
5		17.1	918	593	284	4210	
6		18.2	1075	757	315	4917	
7			1197	920	337		
8			1291	1074	353		
9				1219			
10				1351			

*1 Age is counted from the spawning season.

*2 Estimated weight of 0.25 year old juvenile was shown.

*3 Estimated weight of 0.33 year old preadult was shown.

*4 Since 0 year old fish caught was almost 1 year old, weight of 1 year old was used.

*5 Since 0 year old fish caught was 0.75 year old or more, weight of 0.75 year old was used.

Table 9 List of parameter values used for the survival model calculation

Target species for assessment	Japanese sand lance	Stone flounder	Marbled sole	Brown sole
① Parameters related to entrainment				
a. Age of the entrained individuals (tu)	0.08	0.11	0.03	0.03
※Developmental stage	Larval stage	Larval stage	Larval stage	Larval stage
※Size (Total length)	About 5mm	About 10mm	About 3mm	About 3mm
b. Total number of entrainment (U)	21,253,500,000	1,500,000	16,200,000	55,900,000
② Parameters related to the life history				
a. Age at the end of juvenile stage (tf)	0.30	0.25	0.33	0.19
b. Natural mortality coefficient after juvenile stage (M2) *	0.3	0.25	0.25	0.45
c. Formula for size calculation ($L_t=L_\infty(1-e^{-K(t-t_0)})$)				
L_t	Total length at age t (mm)	Body length of at age t (mm)	Body length at age t (mm)	Body length at age t (mm)
L_∞	181.30	♀ : 506.5 ♂ : 320.3	♀ : 517.2 ♂ : 375.7	♀ : 320.6 ♂ : 198.1
K	0.561	♀ : 0.3329 ♂ : 0.3075	♀ : 0.1672 ♂ : 0.1580	♀ : 0.393 ♂ : 0.771
t_0	-0.481	♀ : -0.09721 ♂ : -1.675	♀ : -0.9212 ♂ : -2.086	♀ : -0.0268 ♂ : 0.0634
d. Formula for weight calculation ($W_t=a \cdot L_t^b$)				
W_t	Body weight at age t (g)	Body weight at age t (g)	Body weight of age t (g)	Body weight at age t (g)
L_t	Total length at age t (mm)	Body length at age t (mm)	Body length of age t (cm)	Body length at age t (cm)
a	4.28×10^{-6}	♀ : 5.9225×10^{-5} ♂ : 3.1369×10^{-5}	♀ : 1.9407×10^{-2} ♂ : 3.3073×10^{-2}	♀ : 2.598×10^{-2} ♂ : 4.9876×10^{-2}
b	2.95	♀ : 2.8219 ♂ : 2.4976	♀ : 3.059 ♂ : 2.883	♀ : 2.913 ♂ : 2.629
e. Average number of spawning eggs per one individual at the first spawning season (N_0)	4,000	750,000	300,000	500,000
f. Number of survivals at the oldest age in catch (N_{tm})	1	1	1	1
③ Parameters related to fishery	Juvenile	Preadult, Adult		
a. Average of catch in weight for one year (CW : kg)	2,402,493	6,163,810	297,913	270,327
b. Age at first capture (t_c)	0.25	0.33	1	1
c. Oldest age in caught fish (t_m)		6	8	10
d. Age composition of fish catch (α_t : %)				
Age 0	100	1.48	0.03	
Age 1		27.73	34.17	27.94
Age 2		36.07	44.02	47.05
Age 3		17.53	13.96	19.52
Age 4		11.67	5.05	4.18
Age 5		4.10	2.09	0.76
Age 6		1.35	0.57	0.20
Age 7			0.09	0.19
Age 8			0.03	0.07
Age 9				0.04
Age 10				0.05
e. Estimated weight at the age of first capture (W : g) *	0.16	0.7	112	69

* When the estimated weight of both male and female were available, the average value of male and female was shown.

Table 9 List of parameter values used for the survival model calculation (Continued)

Target species for assessment	Fad cod		Chum salmon	
① Parameters related to impingement				
a. Age of the impinged individuals (tu) ※Developmental stage ※Size (Total length)	0.38 Juvenile atage About 5cm	0.33 Young stage About 5cm	0.41 Young stage About 6cm	0.49 Young stage About 8cm
b. Total number of impingement (U)	6,695	4,533	2,910	2,772
② Parameters related to the life history				
a. Age at the end of juvenile stage (tf)	0.55	0.33	0.33	0.33
b. Natural mortality coefficient after juvenile stage (M2) *	0.3	0.5	0.5	0.5
c. Formula for size calculation ($L_t=L_{\infty}(1-e^{-K(t-t_0)})$)				
L_t	Fork length at age t (cm)	Fork length at age t (cm)	Fork length at age t (cm)	Fork length at age t (cm)
L_{∞}	♀: 51.8 ♂: 44.0	83.6	83.6	83.6
K	♀: 0.41 ♂: 0.56	0.4156	0.4156	0.4156
t_0	♀: -0.25 ♂: -0.26	-0.01505	-0.01505	-0.01505
d. Formula for weight calculation ($W_t=a \cdot L_t^b$)				
W_t	Body weight at age t (g)	Body weight at age t (g)	Body weight at age t (g)	Body weight at age t (g)
L_t	Total length at age t (cm)	Fork length at age t (cm)	Fork length at age t (cm)	Fork length at age t (cm)
a	1.18×10^{-2}	3.119×10^{-3}	3.119×10^{-3}	3.119×10^{-3}
b	3.0158	3.288	3.288	3.288
e. Average number of spawning eggs per one individual at the first spawning season (N_0)	5,000	3,000	3,000	3,000
f. Number of survivals at the oldest age in catch (N_{tm})	1	1	1	1
③ Parameters related to fishery				
a. Average of catch in weight for one year (CW : kg)	245,351	781,600	781,600	781,600
b. Age at first capture (tc)	0.75	2	2	2
c. Oldest age in caught fish (tm)	4	6	6	6
d. Age composition of fish catch (l_i : %)				
Age 0	10.17			
Age 1	67.83			
Age 2	19.27	4.62	4.62	4.62
Age 3	2.68	34.82	34.82	34.82
Age 4	0.04	44.96	44.96	44.96
Age 5		14.81	14.81	14.81
Age 6		0.79	0.79	0.79
Age 7				
Age 8				
Age 9				
Age 10				
e. Estimated weight at the age of first capture (W : g) *	75	1,010	1,010	1,010

* When the estimated weight of both male and female were available, the average value of male and female was shown.

Table 10 Estimation of rate of entrainment or impingement to fish catch of target species by a survival model

1. Influence of larva entrainment

Target species for assessment	Japanese sand lance	Stone flounder	Marbled sole	Brown sole
Conversion rate (ru) ^{*1}	0.00793	0.00126	0.0000799	0.0000997
Entrainment in 1998 (converted value) ^{*2}				
• Number of the entrained individuals (converted number, U _{tc})	168,506,411	1,887	1,294	5,574
• Weight of the entrained individuals (converted weight, U _{tc} ×W _{tc} :kg)	26,961	211	88	245
Average catch for 1 year (converted value) ^{*2}				
• Average catch in number (converted number, CN _{tc})	16,510,371,190	1,316,328	2,028,993	3,448,314
• Average catch in weight (converted weight, CW _{tc} :kg) (Period of data collection : year)	2,641,659 (1994~1998)	147,429 (1994~1998)	140,001 (1994~1998)	151,726 (1994~1998)
Entrainment / Catch (%) (U _{tc} / CN _{tc} or U _{tc} ×W _{tc} / CW _{tc})	1.02	0.14	0.06	0.16

*1 Ratio to convert from the entrainment quantity of larval fish to the fish quantity of the age of first capture.

*2 Converted to the fish quantity of the age of first capture.

2. Influence of juvenile impingement

Target species for assessment Age of the entrained individuals (tu')	Fad cod	Chum salmon		
		0.33	0.41	0.49
Conversion rate (ru') ^{*1}	0.0932	0.434	0.452	0.470
Impingement in 1998 (converted value) ^{*2}				
• Number of the impinged individuals (converted number, U' _{tc}) (Total)	624	1,967	1,314	1,303
• Weight of the impinged individuals (converted weight, U' _{tc} ×W _{tc} :kg) (Total)	47	1,986	1,327	1,316
Average catch for 1 year (converted value) ^{*3}				
• Average catch in number (converted number, CN _{tc})	2,051,917		683,104	
• Average catch in weight (converted weight, CW _{tc} :kg) (Data period : year)	153,894 (1994~1998)		689,935 (1994~1998)	
Impingement / Catch (%) (U' _{tc} / CN _{tc} or U' _{tc} ×W _{tc} / CW _{tc})	0.03		0.67	

*1 Ratio to convert from the impingement quantity of juvenile fish to the fish quantity of the age of first capture.

*2 Converted to the fish quantity of the age of first capture.

以上のことから、影響を過小評価しないためには、産卵時から成熟開始年齢時までの生残率を過小に見積もらない配慮が必要であり、そのためには、産卵数を過大に見積もらない（例えば、成熟開始年齢時の個体の産卵数を使う）、成熟開始年齢時の生残個体数を過小に見積もらない（例えば、生き残りのほとんどみられない年齢〔最高出現年齢等〕での個体数を1とする）などが考えられる。また、この評価手法では、取り込み量を漁獲量と比較して評価を行うので、漁獲量の小さい種について評価するのは妥当でないと考えられる。

2. 資源影響評価について

計算に際しては、影響が過小に評価されないようにパラメータの値を配慮した。例えば、総取り込み量の漁獲開始年齢時への換算値については、取り込み年齢時から漁獲開始年齢時の間の生残率を小さく見積もると換算値が小さく見積もられ、その結果、影響が過小に評価される。従って、安全側に立ち、生残率を過小に見積もらないように、最小産卵数で最大限生き残るような条件設定を行い、計算に使用する産卵数を成熟開始年齢時の産卵数とし、最高出現年齢まで生き残るものとした。

評価対象種（6種）について、福島県沿岸域における漁獲量（1994～1998年の年間平均）および3発電所における取り込み量（1998年）を、それぞれ漁獲開始年齢時の相当量に換算（モデルによる計算）した結果、年間の平均的な漁獲量に対する取り込み量の割合は0.03～1.02%の範囲にあった。なお、1%台の値を示した種はイカナゴのみであり、取り込み量についてもイカナゴは6種の中で最も多かった。福島県沿岸域では、イカナゴの漁獲量は評価対象種（6種）の中で突出して多く、他の種と比べて10倍以上の漁獲があることから、6種の中では資源量が最も大きいと判断される。従って、評価対象種6種の中で取り込み量が最も多かったことについては、資源量の大きさが反映されたものと考えられる。さらに、福島県沿岸域のイカナゴについては、資源量が卓越して多い年がみられたり、分布に流況が関与していたり、資源量調節機能（資源状態によって1個体産卵数が変わる）を有することが知られている（橋本、1991）。このようなイカナゴの生態特性を考えると、発電所周辺海域における仔稚魚の分布状況は、年によって異なり、それに伴って発電所内に取り込まれる量も異なることが想定される。以上のこ

とから、イカナゴの取り込み量が他の評価対象種と比べて多かったことについては、資源量の大きいことや生態特性が関与していると考えられる。

また、評価対象種（6種）について、漁獲量に対する取り込み量の割合が1%以下の値であったことは、福島県沿岸の資源量に対する3発電所の総取り込み量の割合が、1%を下回ることを意味する。一方で、福島県沿岸域における評価対象種の漁獲開始年齢時の年間自然死亡率（資源量に対する自然死亡量〔捕食等による死亡量〕の割合）は、既往知見によると20%程度以上と見積もられている（江部ら；1991, 福島水試；1987, 福島県；1998）。従って、取り込まれた個体が100%死亡すると仮定しても、取り込みによる死亡量は、自然死亡量に比べて非常に小さいと考えられる。

なお、水産庁研究部（1991）でも同様の結果が得られている。すなわち、シロザケ、イシカワシラウオ、カサゴを対象として、外海に立地する単一発電所による取り込み量の周辺資源量等に占める割合について推定計算を行った結果、3種ともに自然死亡率に比べて小さい値であった。この結果から、水産庁研究部（1991）は、調査対象とした外海立地発電所のケースでは、周辺資源への影響は小さいものと評価している。

謝 辞

本報告に当たり、査読を頂いた当研究所顧問の東京大学名誉教授 清水 誠博士、沖山宗雄博士にお礼申し上げます。また、本報告執筆の際にご助言を頂いた当研究所の中央研究所所長代理の清野通康博士、当研究所のコーディネーターの城戸勝利博士にお礼申し上げます。

現地調査でご協力頂いた東京電力株式会社、文献調査でご協力頂いた福島県水産試験場の各位に深謝する。

引用文献

- 江部健一・立花一正・平川英人・石田敏則・松本育夫・水野拓治（1989）. イカナゴ親魚調査、福島県水産試験場 昭和63年度事業報告書、120-126.
- 江部健一・立花一正・平川英人・石田敏則（1991）. 福島県沿岸域におけるイカナゴの資源動向. 福島県水産試験場研究報告, 7, 141-146.

- 深滝弘 (1983). スケトウダラ資源に及ぼす発電所取放水影響の予測. 海生研研究報告, 83101, 1-54.
- 福島県 (1994). 平成5年度 資源管理型漁業推進総合対策事業報告書 (地域重要資源), 1-47.
- 福島県 (1998). 平成9年度 資源管理型漁業推進総合対策事業報告書 (沿岸特定資源), 1-28.
- 福島県 (1999). 平成9年度 さけ資源管理推進調査報告書, 1-48.
- 福島県農林水産部水産課 (1995). 平成6年版 福島県海面漁業漁獲高統計, 1-105.
- 福島県農林水産部水産課 (1996). 平成7年版 福島県海面漁業漁獲高統計, 1-105.
- 福島県農林水産部水産課 (1997). 平成8年版 福島県海面漁業漁獲高統計, 1-105.
- 福島県農林水産部水産課 (1998). 平成9年版 福島県海面漁業漁獲高統計, 1-105.
- 福島県農林水産部水産課 (1999). 平成10年版 福島県海面漁業漁獲高統計, 1-105.
- 福島県温排水調査管理委員会 (1995). 温排水調査総合報告書, 1-226.
- 福島県水産試験場 (1987). 昭和61年度 沿岸漁業管理適正化方式開発調査委託事業 福島県沿岸域海域別調査事業報告書, 1-313.
- 福島県水産試験場 (1995). イカナゴ親魚調査. 平成6年度事業報告, 30-31.
- 福島県水産試験場 (1996). イカナゴ成魚年齢別漁獲尾数調査. 平成7年度事業報告, 45-46.
- 福島県水産試験場 (1997). イカナゴ成魚年齢別漁獲尾数調査. 平成8年度事業報告, 34-35.
- 福島県水産試験場 (1998). イカナゴ成魚年齢別漁獲尾数調査. 平成9年度事業報告, 57-58.
- 福島県水産試験場 (1999). イカナゴ成魚年齢別漁獲尾数調査. 平成10年度事業報告, 39-40.
- 橋本博明 (1991). 日本産イカナゴの資源生態学的研究. J. Fac. Appl. Biol. Sci., Hiroshima Univ., 30, 135-192.
- Horst, T. J. (1975). The assessment of impact due to entrainment of ichthyoplankton: A Symposium. S. B. Saila(ed.), Fisheries and Energy Production. D. C. Heath and Company, Lexington, MA, 107-118.
- 泉 茂彦 (1999). 常磐北部海域におけるアイナメの成長と成熟. 福島県水産試験場研究報告, 8, 41-49.
- 海洋生物環境研究所 (1991). 沿岸至近域における海生生物の生態知見 魚類・イカタコ類, 1-594.
- 帰山雅彦・文谷俊雄 (1982). サケ稚魚期から幼魚期への発育段階における形態的生態的特徴. 日本水産学会誌, 48, 1537-1544.
- 日本水産資源保護協会 (1981). 水生生物生態資料, 1-361.
- 岡村 収・尼岡邦夫 (1997). 日本の海水魚, 1-783.
- Saunders, W. P., Jr. (1978). A simple model for assessing the potential loss of adult fish resulting from ichthyoplankton entrainment. Thorp, J. H. and Gibbons, J. W. (eds.), Energy and Environmental Stress in Aquatic Systems, Technical Information Center U. S. Department of Energy, CONF-771114, 49-61.
- 水産庁研究部 (1991). 発電所の大量取水が漁業資源に及ぼす影響について (大量取水漁業資源影響調査検討会報告書), 1-10.
- 富永 裕 (1988). 茨城県沿岸海域におけるイカナゴについて 第1報 (生物学的特性). 茨城県水産試験場研究報告, 26, 99-110.