

のである。東アジア全体に接岸するシラスウナギの約半分が日本の河口域に加入すると推測されているとはいえ（塚本，私信），中国，台湾，韓国に接岸するシラスウナギ資源とこれらの国々の河川の汚染状況との対応関係も見る必要がある。さらに，実際に室内実験により汚染の物質がシラスウナギや親ウナギに与える影響を調べ，その因果関係を確認しなくてはならない。

5. おわりに

今回わずか1地点ではあるが，種子島のシラスウナギ採捕量を7年間にわたり同様の方法で調べたことにより，我が国への接岸量が減少していることを定量的に示すことができた。今後このようなデータを東アジア全体で収集し，資源の動向を正確に把握する必要がある。また，シラスウナギの接岸時期，接岸量と水温・月齢さらには潮汐との関係など生態学的知見が集積されれば，本種の接岸回遊生態の解明が可能となる。これらの知見は，シラスウナギ漁の漁期や採捕量の設定など，適正な資源管理の基礎資料となる。

一方で，シラスウナギの資源管理と保全を目指すならば，元来不透明だといわれているシラスウナギ採捕量の正確な把握が必要不可欠である。そのためには産官学が互いに連携し，信頼できるデータベースを構築していかなければならない。

また本稿では，河川の汚染とシラスウナギ資源の減少の間に何らかの関係がありそうだと示唆された。降河回遊魚のウナギにとって河口はその生活史の中で少なくとも2度は通過しなくてはならない“関所”であり，この場所の汚染と乱獲は資源にとって致命的な打撃を与えることは疑いない（Tsukamoto and Otake, 1994）。今後ウナギ資源の健全な持続的利用を図るには，生息環境の保全とウナギの生態特性を考慮した資源管理の方策を立案することが不可欠である。

最後に，種子島でのシラスウナギ試験採捕の際に多大な御尽力をいただいた中種子町野間在住の松下堅一郎・美智子夫妻に厚くお礼申し上げる。また，本稿中で使用した鹿児島県・徳島県・千葉

県のシラスウナギ採捕量データは，各県の水産課からいただいた。深く感謝の意を表する。

参考文献

- [1] Brusle, J. : The eel (*Anguilla* sp) and organic chemical pollutants. The Science of the Total Environment, **102**, 1-19 (1991).
- [2] Dutil, J. D., Besner, M., McCormick, S. D. : Osmoregulatory and ionoregulatory changes and associated mortalities during the transition of maturing American eels to a marine environment. American Fisheries Society Symposium, **1**, 175-190 (1987).
- [3] 石川智士：オオウナギの集団構造に関する分子遺伝学的研究. 学位論文. 東京大学. 東京. 156pp.
- [4] Jellyman, D. J. : Invasion of a New Zealand freshwater stream by glass-eels of two *Anguilla* spp. New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research, **11** (2), 193-209 (1977).
- [5] Kimura, S., Tsukamoto, K., Sugimoto, T. : A model for the larval migration of the Japanese eel: roles of the trade winds and salinity front. Marine Biology, **119**, 185-190 (1994).
- [6] Martin, M. H. : The effects of temperature, river flow, and tidal cycles on the onset of glass eel and elver migration into fresh water in the American eel. Journal of Fish Biology, **46**, 891-902 (1995).
- [7] 柵瀬信夫：河口周辺水域におけるシラスウナギの行動と漁獲量変動に関する研究. 学位論文. 日本大学. 東京. 96pp (1980).
- [8] Tsukamoto, K. : Recruitment mechanism of the eel, *Anguilla japonica*, to the Japanese coast. Journal of Fish Biology, **36**, 659-671 (1990).
- [9] Tsukamoto, K. : Discovery of the spawning area for Japanese eel. Nature, **356** (6372), 789-791 (1992).
- [10] Tsukamoto, K. and Otake, T. : Japanese eel population and human impact on the resources. Proceedings Fourth LIPI-JSPS Joint Seminar on Marine Science. 85-89 (1994).
- [11] Tsukamoto, K. and Umezawa, A. : Early life history and oceanic migration of the eel, *Anguilla japonica*. La mer, **28**, 188-198 (1990).
- [12] Tzeng, W. N. : Immigration timing and activity rhythms of the eel, *Anguilla japonica*, elvers in the estuary of northern Taiwan, with emphasis on environmental influences. Bulletin of the Japanese Society of Fisheries Oceanography, **47**-48. 11-28 (1985).
- [13] 梅澤彰馬：ウナギの初期生活史と接岸回遊機構に関する研究. 学位論文. 東京大学. 東京. 173pp (1991).





ウナギのライフサイクル
—その解明と制御—

台湾のシラスウナギ 資源と生態研究

曾 萬 年
ツン ワンネン

編集部

筆者：国立台湾大学動物学系 教授

太平洋のマリアナ諸島の西側で生まれたニホンウナギのレプトケファルスは海流に乗って北アジアの沿岸へ輸送されるが、黒潮から離脱して沿岸水にいつ侵入するのか、沿岸までの回遊に要する時間はどのくらいであるか、耳石微細構造の解析から、これらの謎を解明する。一方、台湾沿岸のシラスウナギの漁獲量は黒潮の強く影響される所より、中国大陆沿岸水の影響する所の方が著しく多い。又、漁獲量は周期的に変化し、ニホンウナギと大西洋のウナギのシラスウナギは1979年から同時に激減してきた。これらの資源変動の原因を究明する。

1. はじめに

ニホンウナギ (*Anguilla japonica* Temminck & Schlegel) は温帯性の降河性回遊魚類 (Catadromous fish) である。産卵海域はマリアナ諸島の西側 (15°N , 140°E) (Tsukamoto, 1992)。生まれたレプトケファルスは北赤道海流に乗ってゆっくりと西へ運ばれる。やがて黒潮にとりこまれて東アジアに沿って北上し、台湾、中国、韓国、日本の沿岸にやってくる。レプトケファルスは透明な柳の葉

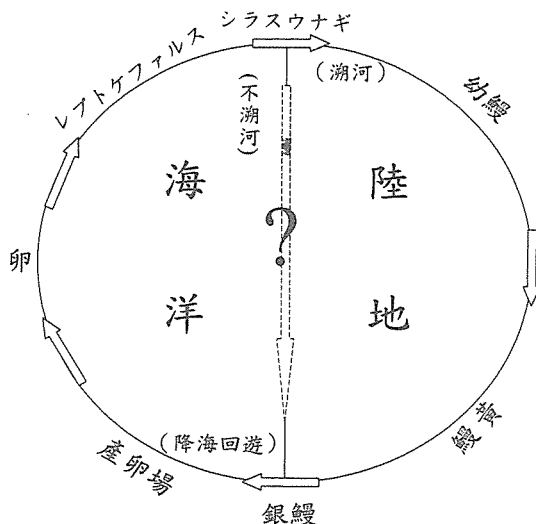


図1 ウナギの生活史の仮説.

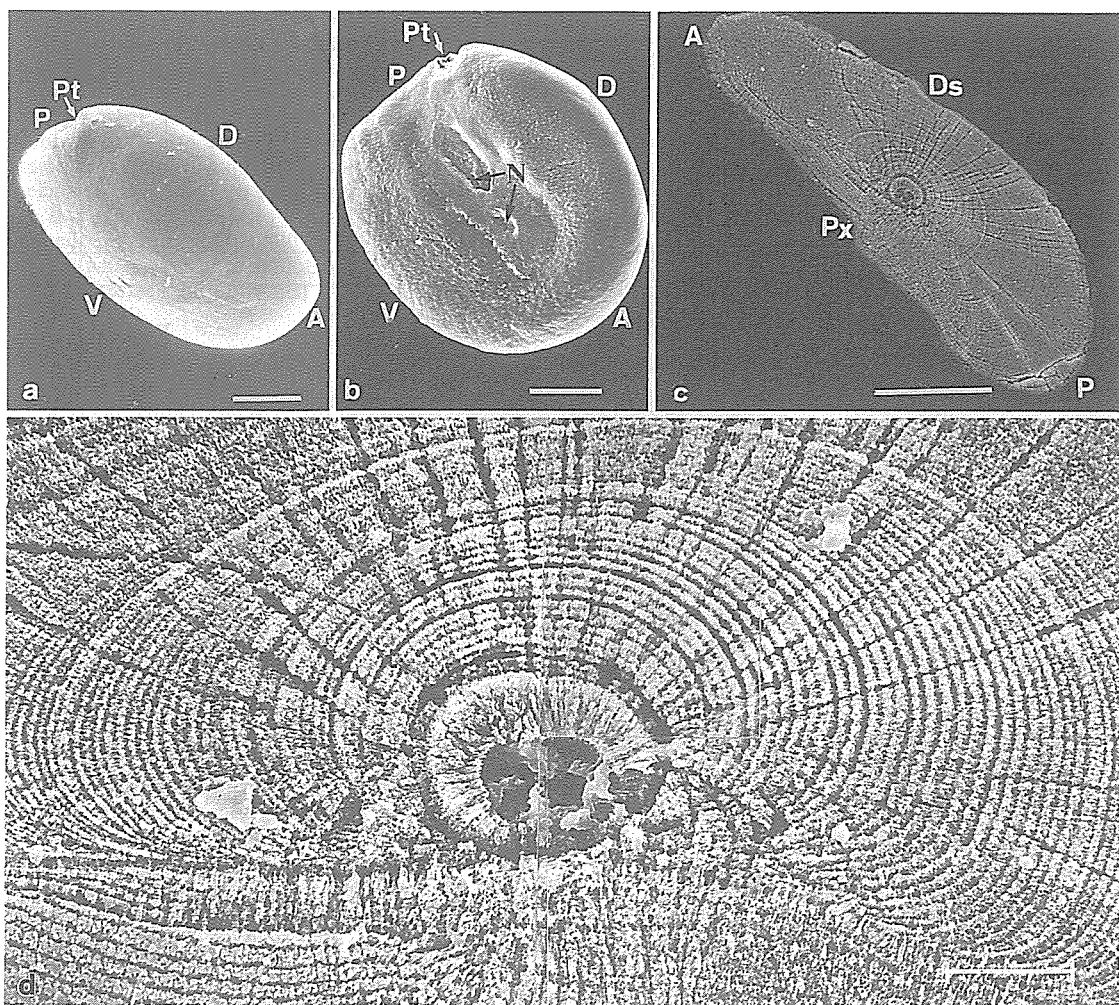


図2 シラスウナギ耳石の外形と日周輪 (Tzeng, 1990). a. distal view ; b. proximal view ; c. cross section ; d. cの拡大, 日周輪を示す.

状であり、長距離の漂流に適している。全長50～60mm程度になると、シラスウナギに変態し黒潮から離脱して沿岸水に侵入する。その後、次第に塩分の減少する方向に移動し、昼間は主に沿岸や河口の底土に生息、夜間に溯河を開始するようになる。溯河するタイミングは水温、潮時刻、月齢などの環境要因に大きく影響される (Tzeng, 1985 ; 曾, 1987)。シラスウナギは河川へ溯上し、淡水域で12～15年すごし、体長40～80cm成長した降

りウナギは秋の増水期に河を下って外洋の産卵場へと旅立つ。最近の研究によると、一部のシラスウナギは溯河せず、沿岸域で降りウナギの発育段階まで成長する (Tsukamoto *et al.*, 1998 ; Tzeng *et al.*, 1998)。つまり、ウナギには海と陸を通して回遊するもの (diadromous eel) と全生活史を海水ですごせる非通し回遊するもの (non-diadromous eel) がある (図1)。

2. 耳石の微細構造から見たシラスウナギの生活史

硬骨魚類の耳石はバイオミネラリゼーションにより炭酸カルシウムからなる高度に石灰化した組織であり、内耳の感覚斑に耳石膜を介して接し、聴覚及び平衡感覚器官として機能している(麥谷, 1996). 内耳には3種類の耳石(通囊内の礫石、小囊内の扁平石、壺内の星状石)がそれぞれ左右一対ずつ、合計6個存在する(Secor *et al.*, 1992). 一般に扁平石が一番大型であるが、骨鰐魚(キンギョ、コイなど)では星状石が最大である。耳石には透明帯及び不透明帯からなる年輪が形成されることは古くから知られており、水産資源学上重要な年齢査定形質として重視されてきた。Pannella (1971) は、耳石に数 μm 単位の微細輪紋が存在することを発見し、これは日周輪であると報告している。日周輪は光を同調因子として確定されたサーカディアン・リズムにより形成されたものであり(Tanaka *et al.*, 1981), 幼稚魚日齢査定と生活史の解明には非常に役立つ。

シラスウナギの耳石(扁平石)は米粒状で(図2のa), 最大軸は体の前後の方向、ついで背腹の方向、最小軸は内外の方向に沿っている。耳石の最大直径は120~190 μm (平均140 μm)である。耳石の内側面は蹄鉄状に似て、2つのくぼみがあり、脳神経末端の接点である(図2のb)。走査電顕の観察によると、耳石の断面には明暗の同心円として現われる日周輪が認められる(図2のcとd)。日周輪から、シラスウナギの日齢が分かる(Tzeng, 1990; Tzeng & Tsai, 1992)。

耳石の中心から、直径の約3分の2の所はSr/Ca比が急に下がる(Otake *et al.*, 1994; Tzeng & Tsai, 1994), これはレプトケファルスの変態が始まる信号である(Tzeng, 1996a)。変態が終了すると、日周輪の幅が急に大きくなり、変態記号(metamorphic check)が現われる。変態に要する時間は20~40日と推測された(Arai *et al.*, 1997)。耳石の中心から変態記号までの日周輪数によって、レプトケファルスの変態日齢が分かる(Tzeng, 1995)。

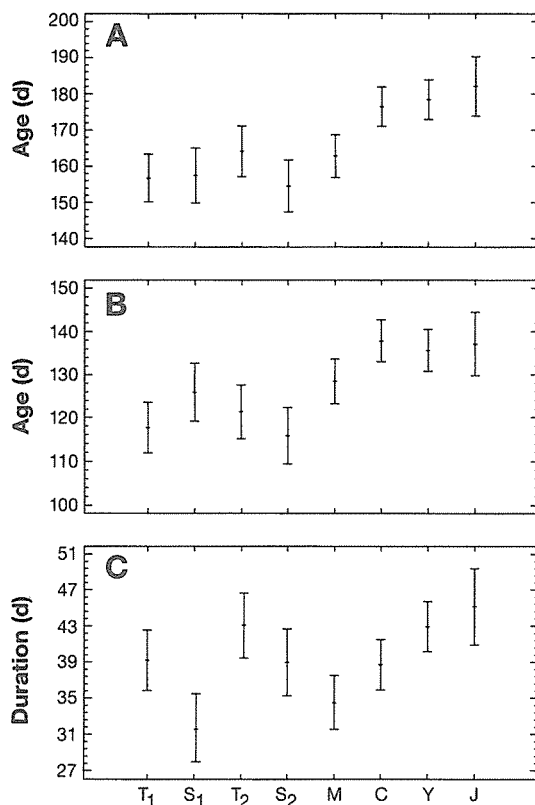


図3 シラスウナギの沿岸に到着する日齢(A)、レプトケファルスの変態する日齢(B)、及び変態から沿岸までの回遊する時間(C)等の地理的な変化(Cheng and Tzeng, 1996から)。T1, T2: 台湾南部の東港溪; S1, S2: 台湾北部の双溪; M: 中国沿岸の門江; C: 中国沿岸の錢塘江; Y: 朝鮮半島の鴨緑江; J: 日本の千葉県沿岸。

台湾、中国、韓国と日本などの河口域で採集したシラスウナギの日齢は155~182日であることが判かった。レプトケファルスがシラスウナギに変態する日齢は116~138日である。変態から河口域までの回遊日数は32~45日である。これらの日齢は地理的な傾斜が見られる(図3)。成長の良い個体ほど早くシラスウナギへの変態が起こり、黒潮から早く降りて、台湾に向って接岸回遊を始める。従って、レプトケファルスに変態する日齢はシラスウナギの接岸する国を決める契機であると考えられる。

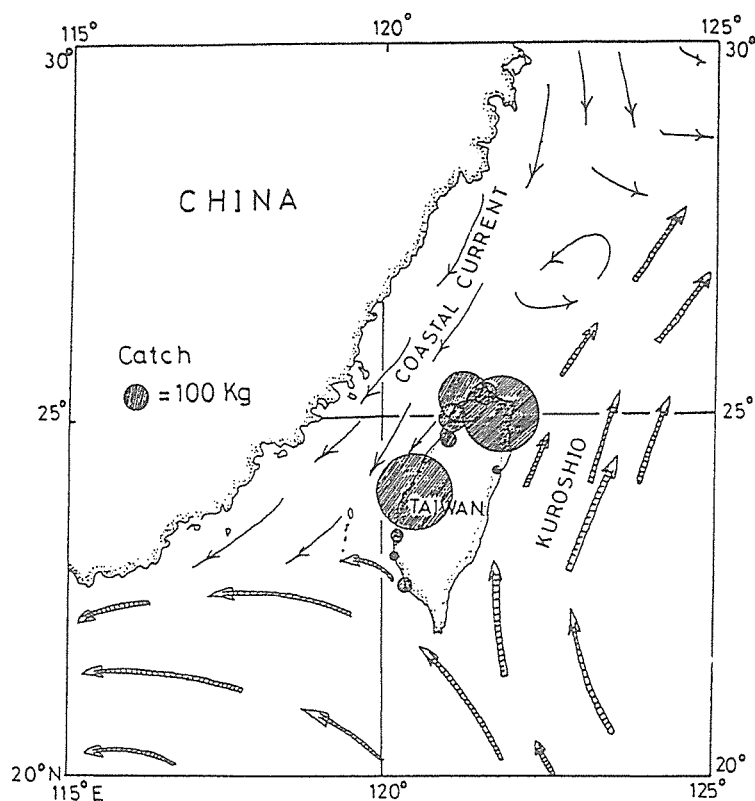


図4 台湾周辺の海流と沿岸におけるシラスウナギの漁獲量分布 (Tzeng, 1996b から)。

レプトケファルスの変態する日齢の時間差によって、漂流距離 (D) を次の式で計算できる。即ち、

$$D = V \times \Delta T$$

ここで、 V は黒潮の平均速度 (2.5 ノット、或は 96 km/d) である (Nitani, 1972)。 ΔT はレプトケファルスの変態日齢の時間差である。例えば台湾と日本間ではこの時間差は約 22 日 (138 日～116 日) (図 3 の B)。これを上式に代入すると、 $D = 2100 \text{ km}$ 、大体台湾から日本までの距離である。黒潮はレプトケファルスの輸送に重要な役割を演じていることがわかる (Cheng & Tzeng, 1996)。

3. シラスウナギの接岸機構

台湾の沿岸におけるシラスウナギの接岸機構を論じたのは郭 (1971) が最初で、彼はシラスウナギがすべて黒潮により輸送されて沿岸に到着すると考え、この現象を説明するため、台湾の南西海

域にウナギの産卵場があると仮定した。しかし、その時点ではウナギの産卵場がまだ不明であり、シラスウナギの生活史の解析も不十分であった。従って、シラスウナギの接岸機構をもう一度検討する必要がある。台湾におけるシラスウナギの来遊する時期は 11 月から 3 月までであり、盛期は 12～1 月に水温が最も低い季節である (Tzeng, 1985)。沿岸におけるシラスウナギの漁獲量の分布は海流と密接に関係がある。図 4 に示したように、黒潮系水の影響の強い東岸、南岸域ではシラスウナギが殆ど漁獲量されず、低温と低塩分の大陸沿岸水の影響を大きく受ける北岸、西岸域ではシラスウナギの漁獲量が著しく多い点が注目される。このことから考えると、シラスウナギの来遊が低温と低塩分の中国大陸沿岸水の動きと密接に関連していることが推察される (曾, 1987)。即ち、レプトケファルスの段階では黒潮に乗ってやってくる

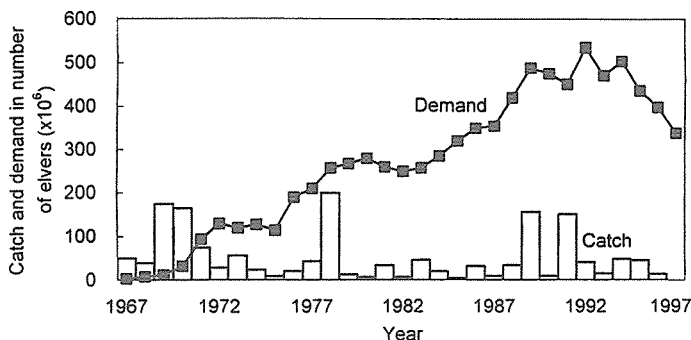


図5 台湾のシラスウナギの漁獲量及びシラスウナギの需要量.

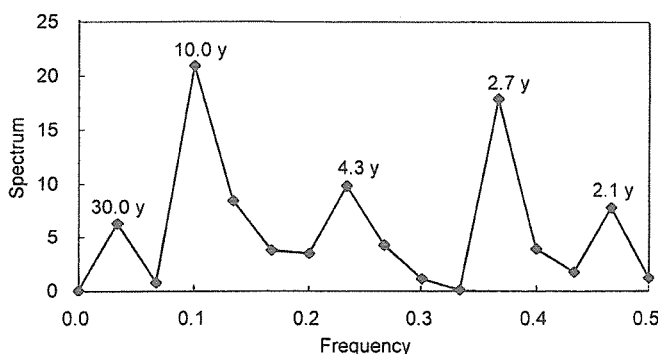


図6 シラスウナギ漁獲量の周期的変化 (図5の資料より).

が、変態した後のシラスウナギは沿岸水に乗って河口域にやってくるものと考えられる。

一方、ウナギの産卵場 (15°N , 140°E) からフィリピンまでの距離、及び北赤道海流の流速 ($20\sim 32\text{cms}^{-1}$) (Kimura *et al.*, 1994) から、レプトケファルスがフィリピンを通過する時の日齢は約55~87日、この日齢はレプトケファルス変態日齢 (116~138日) より小さいため、変態できず、そのまま北へ漂流する。従ってフィリピンにはニホンウナギは殆ど分布していない (Tabeta *et al.*, 1975)。また、台湾の東南海域の黒潮海域で採集した最大のレプトケファルスは体長が55.8mm、日齢が84日 (Tsukamoto *et al.*, 1992)。この大きさでも変態できない。従って、レプトケファルスは台湾を越えた、海域で変態するものと考えられる。その後、シラスウナギは沿岸水にはいり、その一部は台湾の西海岸に沿って南下する。このことは南台湾西海岸のシラスウナギの日齢 (図3CのT1とT2) が北の方 (図3CのS1とS2) より大きいことも示し

ている (Cheng & Tzeng, 1996)。

4. 台湾のシラスウナギ漁獲量の変化

台湾のニホンウナギの養殖は1957年に始まり、その後、シラスウナギの需要量は年々増えてきている。ところで、シラスウナギの漁獲量は需要量に比べて、著しく不足している。不足の部分は日本、中国、韓国から輸入する。最近、シラスウナギの漁獲が全体的に減少したので、輸入が難しくなり、養殖の規模は1991年から縮少した (図5)。

台湾はシラスウナギの地理的分布の縁辺に位置するので、その漁獲量の変動は資源自身の変化のほかに、環境に伴う来遊量の変化にも大きく影響されるものと考えられる。シラスウナギの漁獲量は10年、4.3年と2.7年と2.1年ごとの周期で変化していることが分かる (図6)。10年周期は太陽黒点数の変動周期に対応し、4.3年と2~3年ほどの周期はそれぞれ黒潮とEN-SO (El Nino-Southern Oscillation) の変動周期に対応する。周期性を漁

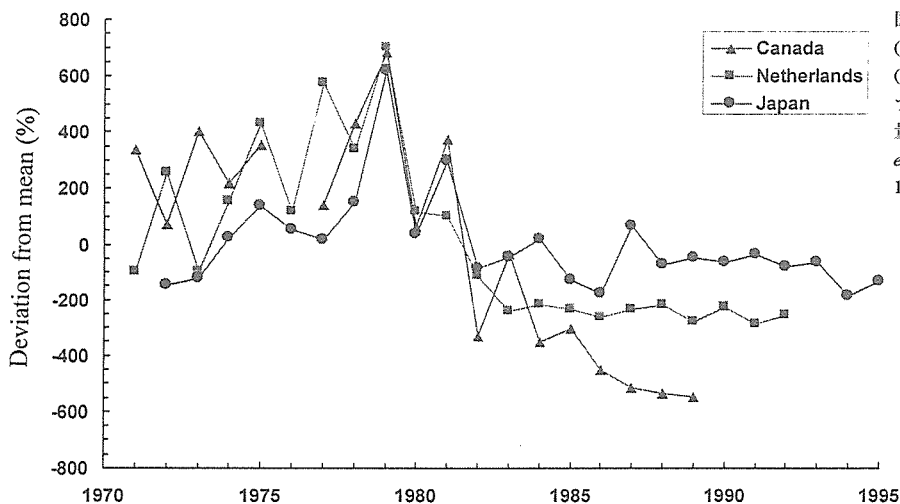


図7 ニホンウナギ (Japan), アメリカウナギ (Canada) とヨーロッパウナギ (Netherlands) の漁獲量の年変化 (Castonguay *et al.*, 1994 及び Tzeng, 1996b の資料より).

獲高の極大の間隔と極小の間隔頻度で表わすと、シラスウナギ漁獲高のピークはそれぞれ1969～1970, 1978～1979, 1989～1991年に現われる。これらの年は太陽黒点数のピークの年に相当する。これらの周期性の検討により、台湾におけるシラスウナギの漁獲量の変化は環境の変化と深く関係あると考えられる。

5. ニホンウナギと大西洋ウナギの漁獲量の同時的な変化

大西洋にはアメリカウナギとヨーロッパウナギの2種類がいる。この2種類のシラスウナギは1979年から同時に激減していることが分かる (図7)。減少する原因は乱獲か、河川的环境汚染か、または地球的な気候変化等が考えられた (Castonguay *et al.*, 1994)。日本はアジアの中でニホンウナギのシラスの漁獲量が最も多い。日本のシラスウナギの漁獲量も同じく1979年から激減している。各国のシラスウナギの利用は異なっており、アメリカウナギは殆ど利用されていない。また、各国の環境汚染問題の始る時間も異っており、乱獲と環境汚染に起因するシラスウナギの同時的な減少は考えにくく、むしろ、地球的な気候変化による可能性があると思われる。即ち、ニホンウナギと大

西洋ウナギは違う海域に分布しているが、同じ北赤道海域に産卵し、シラスウナギはそれぞれ黒潮と湾流によって沿岸まで輸送される。これらの海流の強さは気候変化と密接に関連する。このことはシラスウナギの長期的な変化は地球的な気候変化による可能性が高いことを示唆している。

6. おわりに

台湾の沿岸水域におけるシラスウナギの年漁獲量は周期的に大きく変動している。変動する原因を究明するためには、ウナギの初期生活史と輸送経路を明らかにすることが大切である。シラスウナギが産卵場から沿岸まで回遊するのに要する期間は5～6ヶ月である。レプトケファルスが変態するタイミングは黒潮によって輸送される距離を決定する。シラスウナギに変態した後、黒潮を離脱して中国沿岸水の南下とともに台湾西海岸水域に來遊することが推察される。シラスウナギの漁獲量の変動周期は太陽黒点数、黒潮及びENSO等の環境変動の周期と同調しており、これらの環境要因が影響を及ぼす機構は今後の重要な研究課題である。

本論文をまとめるのに当り、数々の貴重な助言をいただいた台湾省水産試験所廖一久所長、前北

里大学助教授鈴木敬二博士，東大海洋研助教授中田英昭博士，および原稿の作成に御協力をいただいた呉美鈴嬢に深く感謝の意を表し御礼申し上げます。

参考文献

- [1] Arai, T., T. Otake and K. Tsukamoto : Drastic changes in otolith microstructure and microchemistry accompanying the onset of metamorphosis in Japanese eel *Anguilla japonica*. Mar. Ecol. Prog. Ser., **161**, 17-22 (1997).
- [2] Castonguay, M., P. V. Hodson, C. Moriarty, K. F. Drinkwater and B. M. Jessop : Is there a role of ocean environment in American and European eel decline Fish. Ocean., **3** (3), 197-203 (1994).
- [3] Cheng, P. W. and W. N. Tzeng : Timing of metamorphosis and estuarine arrival across the dispersal range of the Japanese eel *Anguilla japonica*. Mar. Ecol. Prog. Ser., **131**, 87-96 (1996).
- [4] Kimura, S., K. Tsukamoto and T. Sugimoto : A model for the larval migration of the Japanese eel : roles of the trade winds and salinity front. Mar. Biol., **119**, 185-190 (1994).
- [5] 郭河 : 台湾におけるシラスウナギの接岸。養殖, **8**(1), 52-56 (1971) .
- [6] 麥谷泰雄 : 硬骨魚類の耳石形成と履歴情報解析. p.185-298. 海洋生物の石灰化と硬組織 (和田浩爾, 小林巖雄 編著), 東海大学出版会, 318pp (1996).
- [7] Nitani, H. : Beginning of the Kuroshio. In H. Stommel and K. Yoshida [ed] Kuroshio-Its Physical Aspects. Univ. Tokyo Press, 129-163 (1972).
- [8] Otake, T., T. Ishii, T. M. Nakahara and R. Nakamura : Drastic changes in otolith strontium/calcium ratios in leptocephali and glass eels of *Japanese eel Anguilla japonica*. Mar. Ecol. Prog. Ser., **122**, 189-193 (1994).
- [9] Pannella, G. : Fish otolith : daily growth layers and periodical patterns. Science, **173**, 1124-1127 (1971).
- [10] Secor, D. H., J. M. Dean and E. H. Laban : Otolith removal and preparation for microstructural examination. p.19-57. In D. K. Stevenson and S. E. Campana [ed] Otolith Microstructure Examination and Analysis. Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci., **117** (1992).
- [11] Tabeta, O., T. Takai and I. Matsui : Record of the Japanese eel from the Philippines. Nippon Suisan Gakkaishi, **41**, 641-644 (1975).
- [12] Tanaka, K., Y. Mugiya and J. Yamada : Effects of photoperiod and feeding on daily growth patterns in otoliths of juvenile *Tilapia nilotica*. Fish. Bull. U. S., **79**, 459-466 (1981).
- [13] Tsukamoto, K. : Discovery of the spawning area for Japanese eel. Nature, **356**, 789-791 (1992).
- [14] Tsukamoto, K., A. Umezawa, K. Tsukamoto and M. Okiyama : A fully grown leptocephalus of Japanese eel collected from the western north Pacific. Nippon Suisan Gakkaishi, **58** (11), 2209 (1992).
- [15] Tsukamoto, K., I. Nakai, W. V. Tesch : Do all freshwater eels migrate Nature, **396**, 635 (1998).
- [16] Tzeng, W. N. : Immigration timing and activity rhythms of the eel, *Anguilla japonica*, elvers in the estuary of northern Taiwan, with emphasis on environment influences. Bull. Jap. Soc. Fish. Oceanogr., **47/48**, 11-28 (1985).
- [17] 曾萬年 : シラスウナギの溯河迴遊の環境要因. p.127-133. 水産海洋環境論 (杉本隆成, 石野誠, 杉浦健三, 中田英昭編集). 恒星社厚生閣, 325pp (1987).
- [18] Tzeng, W. N. : Relationship between growth rate and age at recruitment of *Anguilla japonica* elvers in a Taiwan estuary as inferred from otolith growth increments. Mar. Biol., **107**, 75-81 (1990).
- [19] Tzeng, W. N. : Migratory history recorded in otoliths of the Japanese eel, *Anguilla japonica*, elvers as revealed from SEM and WDS analysis. Zool. Stud., **34** (Suppl), 1, 234-2136 (1995).
- [20] Tzeng, W. N. : Effect of salinity and ontogenetic movements on strontium : calcium ratios in the otolith of the Japanese eel, *Anguilla japonica* Temminck and Schlegel. J. Exp. Mar. Biol. Ecol., **199**, 111-122 (1996a).
- [21] Tzeng, W. N. : Short-and long-term fluctuations in catches of elvers of the Japanese eel, *Anguilla japonica*, in Taiwan. p.85-89. In Proceedings of 2nd World Fisheries Congress, 28 July to 2 August 1996, Brisbane, Australia (1996b).
- [22] Tzeng, W. N. and Y. C. Tsai : Otolith microstructure and daily age of *Anguilla japonica* Temminck & Schlegel elvers from the estuaries of Taiwan with reference to unit stock and larval migration. J. Fish Biol., **40**, 845-857 (1992).
- [23] Tzeng, W. N. and Y. C. Tsai : Changes in otolith microchemistry of the Japanese eel, *Anguilla japonica*, during its migration from the ocean to the rivers of Taiwan. J. Fish Biol., **45**, 671-684 (1994) .
- [24] Tzeng, W. N., C. H. Wang and H. Wickstrom : Can European eel, *Anguilla anguilla* (L.), complete their life cycle in marine environment p.252. In Abstract of International Conference on Fisheries and Food Security Beyond the year 2000, The Fifth Asian Fisheries Forum, Thailand, Nov. 11-14, '98, Chiang Mai, Thailand. Asian Fisheries Society, Chulalongkorn University, Thailand (1998) .

