

## 北西太平洋におけるサンマ資源の長期変動特性と気候変化

田 永軍<sup>†</sup>, 赤嶺達郎, 須田真木

### Long-term Variability in the Abundance of Pacific Saury in the Northwestern Pacific Ocean and Climate Changes during the Last Century

Yongjun TIAN<sup>†</sup>, Tatsuro AKAMINE and Maki SUDA

Long-term variability in the abundance of Pacific saury (*Cololabis saira*) in the northwestern Pacific was examined using catch data during 20th century. SOI (Southern Oscillation Index), NPI (North Pacific Index) and MOI (Monsoon Index) were used as climate indices to examine effects of climate changes on the abundance of Pacific saury. Abundance indices of saury both in weight and in number exhibit decadal variations with large interannual fluctuations, suggesting effects of long-term climate changes on saury. Power spectral analysis showed that the abundance of saury has cycles around 4–7 and 16–17 years, tending to respond to decadal scale variations in atmospheric-ocean systems in the North Pacific. Significant negative correlations were found between the abundance index of large size group saury and SOI, indicating that El Niño-Southern Oscillation (ENSO) have marked impacts on the saury. MOI also showed high correlation with abundance index of large size group saury, indicating winter monsoon affects the abundance of saury. Linkages between sea surface temperature (SSTs) and SOI, and between SSTs and MOI demonstrated that the large size group saury is directly forced by the SST fields through large-scale climate/oceanic interactions. Whereas there is no evident relationship between NPI and large group saury, abundance index of medium size group saury is significantly correlated with NPI, indicating that Aleutian Low maybe affect medium size group saury in decadal scale. Inter-annual and decadal variations in the abundance of saury seemed to respond to ENSO and oceanic regime shifts, respectively. It is important to determine decadal-interdecadal oceanic/climate changes in understanding the mechanism of fluctuation in the abundance of Pacific saury.

**Key words:** Pacific saury, abundance, long-term variability, decadal variation, ENSO, NPI, MOI, climate change

#### はじめに

サンマ *Cololabis saira* (Brevoort) は北太平洋に広く分布する浮魚で、日本では1670年頃から漁獲されてきた重要な水産資源である(福島, 1979)。Fig. 1に1894年~2000年までのサンマ漁獲量の経年変化を示した。1940年代の終わりに漁法が棒受網に移行してから漁獲量が流網時代に比べて飛躍的に増加したが、激しい年変動を示しながら、長期的に大きい山と谷を描く特徴が見られる。サンマは現在マイワシなどとともに、「漁獲可能量制度」(TAC制度)の対象種に指定されており、漁獲可能量(TAC)をもとにした資源管理が実施されている。より確実な資源管理には、サンマの資源変動のメカニズムを解明し、資源変動予測技術の開発が求められている。

サンマの漁場形成に海況要因が大きく関係することは知られているが(例えば, Yasuda and Watanabe, 1994), 資源変動の原因についてはよくわかっていない。Matsumiya and Tanaka (1978) はサンマ資源の大きな年々変動は再生産の成否に関係し、資源の急激な減少は過獲ではないと指摘している。1990年代においてサンマの漁獲努力が安定しているにも関わらず、1998年の漁獲量は前年の半分以下に急減し、環境要因の影響を強く示唆している。近年の研究でイワシ類やサケ類などの浮魚資源の長期変動は気候と海洋環境に支配されることがわかってきた(例えば, Francis *et al.*, 1998; Beamish *et al.*, 1999, 2000; Yasuda *et al.*, 1999)。気候レジームシフトやエルニーニョ現象に象徴される気候と海洋環境の長期変動はプランクトンから魚類までの海洋生態系に影響を及ぼすことが報告されている(Sinclair and Tremblay, 1985; McGowan *et al.*, 1998; Sugimoto and Tadokoro, 1998; Welch *et al.*, 1998; Zhang *et al.*, 2000; Reid *et al.*, 2001; Sugimoto *et al.*, 2001)。サンマは北西太平洋の亜熱帯北部から亜寒帯南部に広く分布する資源量の高い魚種

2001年8月10日受付, 2002年1月24日受理

中央水産研究所生物生態部

Marine Bioecology Division, National Research Institute of Fisheries Science, Fukuura 2-12-4, Kanazawa-ku, Yokohama 236-8648, Japan

<sup>†</sup> yjtian@fra.affrc.go.jp

として、日本、ロシア、韓国の漁業を支えている。漁獲量の大部分は日本による。さらにサンマは多くの大型魚食性魚類や海鳥類及び鯨類の餌にもなっており、その資源変動機構の解明はサンマの資源管理方策の構築及び北西太平洋生態系の動態把握に重要であると考えられる (Chikuni, 1985; Tamura *et al.*, 1998; Spring *et al.*, 1999).

太平洋では近年 ENSO (El Niño-Southern Oscillation) の数年周期の変動以外に 10 年～数 10 年規模の長期変動が存在することが明らかになり (Trenberth and Hurrell, 1994; Nakamura *et al.*, 1997; Minobe, 1999), 気候のレジームシフトに対する海洋生態系の応答が生態学・水産海洋学の重要な課題となっている (Mantua *et al.*, 1997; Beamish *et al.*, 1999; Hare and Mantua, 2000; Zhang *et al.*, 2000; Sugimoto *et al.*, 2001). 小達 (1994) はサンマの漁獲量と動物プランクトンバイオマスの長期間の時系列から動物プランクトンバイオマスがサンマ資源を支える餌料環境の指標になると指摘した。日本南方及び東北海域の動物プランクトンバイオマスは長期的に海洋・気象環境に影響されていることが報告されている (友定・小達, 1995; Sugimoto *et al.*, 2001). しかし、サンマの資源変動についてはこれまでに気候と海洋環境の影響が推測されているものの、具体的な環境要因及び気候指数を用いて検討された例が見られない。サンマの寿命が 1～2 年と短いことから (小坂, 2000), 気候と海洋環境の変動の影響は短いタイムラグで見られると考えられる。本研究は、過去 1 世紀に及ぶサンマの漁獲量データ及び日本周辺の気象・海洋環境に深く関係するいくつかの気候指数を用いて、北西太平洋におけるサンマ資源の長期変動特性を把握するとともに、その変動に及ぼす気候変化の影響について検討を行うものである。

## 資料と方法

### 資源量指数

サンマの漁獲データは比較的よく整備されているが、漁法及び漁場が時代によって大きく変化しているため (福島, 1979), 直接に同じレベルの資源量指数として用いることができない。そこで、Fig. 1 に示すサンマ漁獲量について、漁法と漁場の変遷及び戦争の影響を考慮して、1894–1906 年の旋網期、1907–47 年の流網期と 1948–2000 年の棒受網期に分けて、各期間における漁獲量の平均値 ( $A$ ) と標準偏差 ( $S$ ) から下式を用いて  $t$  年の漁獲量 ( $C_t$ ) の規格化を行い、資源重量指数 ( $AI_t$ ) とした。

$$AI_t = (C_t - A) / S$$

以上に算出した資源量指数は漁獲重量によるもので、サンマの回遊、発生群、個体群構造などの生物学的要素を考慮していない。一方、サンマの漁獲物については 1951 年以後体長組成が調べられ、体長別漁獲尾数データが利用可能である。体長によって漁獲物が便宜的に大 (体長 29 cm 以上)・中 (体長 24–29 cm)・小 (体長 24 cm 未満) の 3 銘柄に区分されてきた。大・中の 2 つの銘柄の割合が平均 91% 以上を占め、漁獲物の体長組成は殆どの年でおよそ 27 cm と 31 cm にピークを持つ二つのモードが卓越する (小坂, 2000)。ここで各年の体長別漁獲尾数データを大型群と中型群の 2 つのグループに正規分解し (相澤・滝口, 1999), 両群の漁獲尾数を推定し、上述した漁獲重量指数に加えて資源量指数として用いた。サンマ個体群の年齢組成はわからないが、大型群と中型群の漁獲尾数が異なるコホートと考えられる。なお、体長別漁獲尾数データは東北水研から提供されたものである。

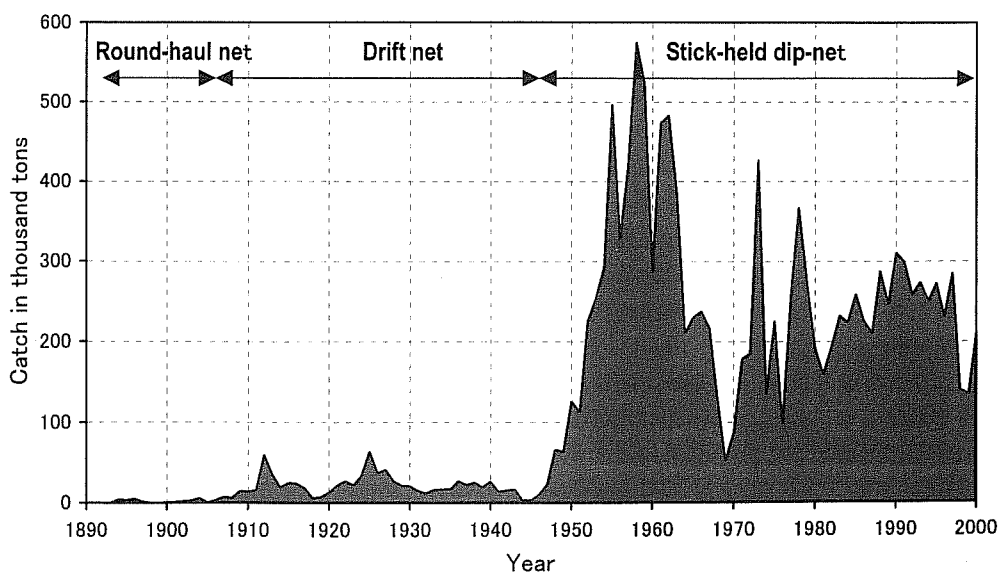


Figure 1. Yearly change in the catch of Pacific saury in Japan from 1894 to 2000.

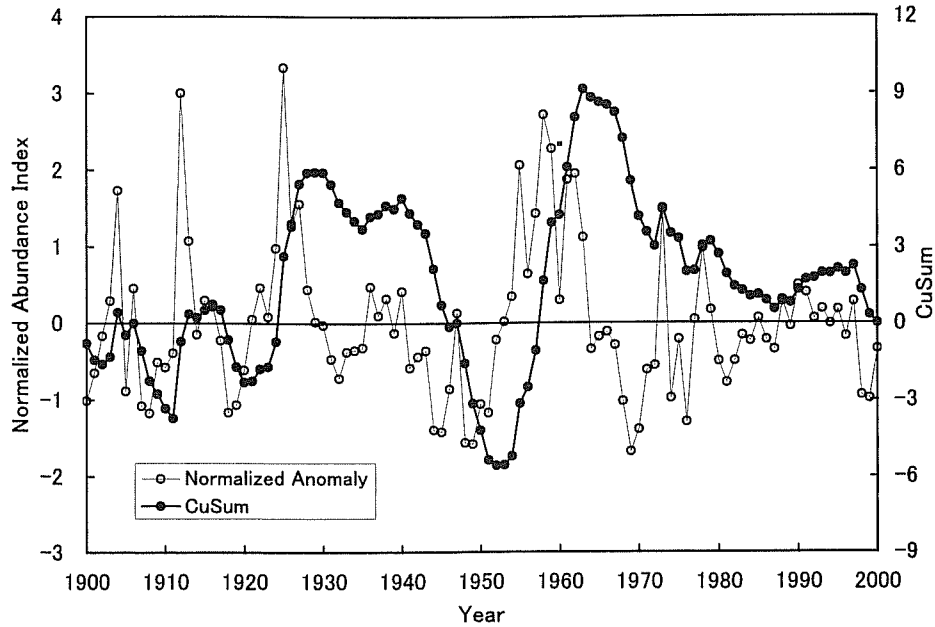


Figure 2. Anomalies (open circles) and cumulative sums (CuSum: solid circles) of the normalized abundance index in weight for Pacific saury from 1900 to 2000.

### 周期解析

以上に述べたサンマの資源量指数についてパワースペクトル解析を行い (Tsai *et al.*, 1997; Yndestad, 1999), 各指数の変動周期を調べた. なお, データの全個数の約10% (資源重量指数では9年, 群別資源量指数では5年) に相当するスパンでスペクトル密度のピリオドグラムを平滑化を行った.

### 気候指数

気候指数として長期間の時系列としての利用可能性及び北太平洋ならびに日本周辺の気候システムの代表性を考慮して SOI, NPI と MOI を選んだ. SOI (Southern Oscillation Index) はタヒチとダーウィンの海面気圧差 (規格化された平年偏差の差) として定義され, ENSO の指標で, 強い負 (正) の偏差はエルニーニョ (ラニーニャ) 傾向を表す. ここで用いられた SOI は, オーストラリアの CSIRO Atmospheric Research により提供されたものである (<http://www.dar.csiro.au/nino/SOItable.htm>). NPI (North Pacific Index) は北太平洋の中央域 (160E-140W, 30N-65N) における海面気圧の平均値で定義され, アリュウシャン低気圧の指標となる (Trenberth, 1990; Trenberth and Hurrell, 1994). また, MOI (Monsoon Index) はイルクーツクと根室の海面気圧差で, 極東域における北風 (冬季季節風) の強さの指標である. 冬季季節風は北太平洋の西端での鉛直混合に及ぼす影響が大きく, 日本周辺の気象・海況に密接な関係がある (杉本, 1998). サンマの資源量指数との対応関係を検討するに当たって, NPI と MOI について冬季 (前年12月-当年2月) の指数, SOI について ENSO イベントの発達から消

滅までの過程から5月-翌年4月の平均値を年平均として用いた (西森・吉野, 1990). なお, 3つの指数はいずれも1900-2000年までの101年間の値である.

各時系列について, その変動傾向を視覚的に捕らえるために, 対象期間の偏差累積和 (Cumulative Sum, CuSum) 曲線を作成した (Beamish *et al.*, 1999). また, サンマ資源量指数との関係を見るために, 交差相関解析を行った.

### 結 果

#### 漁獲量の長期変動特性と周期

Fig. 2には漁獲重量を規格化して得られた資源重量指数及びその偏差累積和 (CuSum) を示した. 資源重量指数からは1910年代の初めと1920年代半ば及び1950年代末の3つの大きいピーク以外に, 1940年代, 1970年代及び1990年代にも小さいピークが見られる. CuSum曲線からサンマの資源量は大きい年変動を示しながら, 1905-11年, 1917-20年, 1931-35年, 1941-52年, 1964-72年, 1980-87年の期間に低く, 1912-16年, 1921-30年, 1936-40年, 1953-63年, 1988-97年の期間に高く, 概ね5-10年規模で豊凶を繰り返している傾向が明瞭に見られた.

1951-2000年における体長別漁獲尾数データによる分布解析では, 体長がそれぞれ24.0-28.5 cm (平均26.9 cm) と28.9-32.4 cm (平均30.7 cm) にモードをもつ中型群と大型群の2グループに分解され, 推定された群別資源量指数を Fig. 3に示した. 大型群指数は同期間の資源重量指数の変動傾向とほぼ一致するが, 大型群と中型群の指数が異なる変動パターンを示している. 大型群では, 1954-64年の増

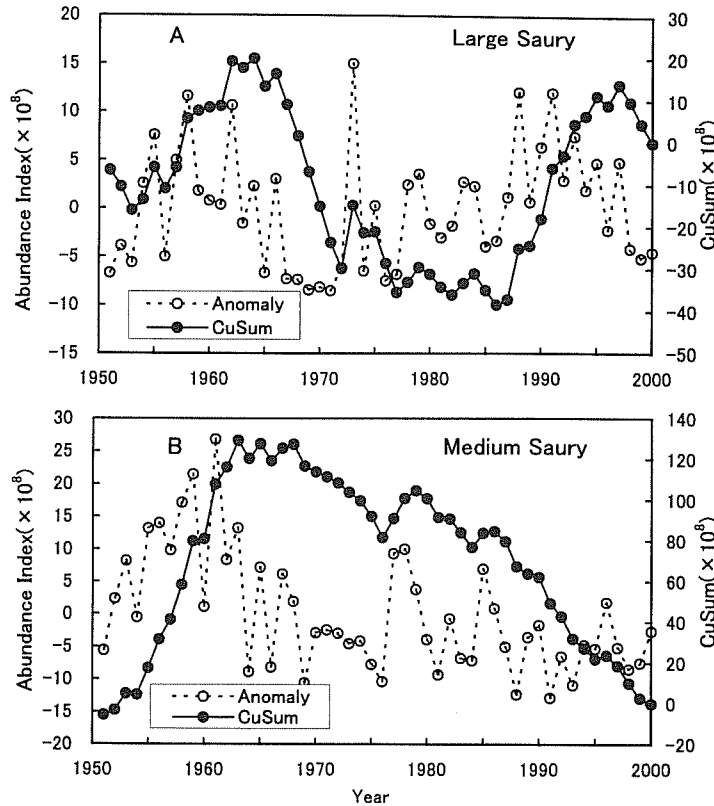


Figure 3. Anomalies (open circles) and cumulative sums (CuSum: solid circles) of abundance index in number for Pacific saury by size group from 1951 to 2000. (A) Large size group saury, (B) Medium size group saury.

加期, 1966–76年の減少期 (1973年に著しい回復が見られたが), 1977–87年の安定期, 1988–97年の増加期のようにほぼ10年規模の変動パターンを明瞭に示している。一方, 中型群については, 1960年代の前半まで増加し, それ以後低水準期が続いているが, 1951–63年の増加期, 1966–76年の減少期, 1977–87年の安定期, 1988–2000年の減少期のように大型群と同様ほぼ10年規模の変動を示している。

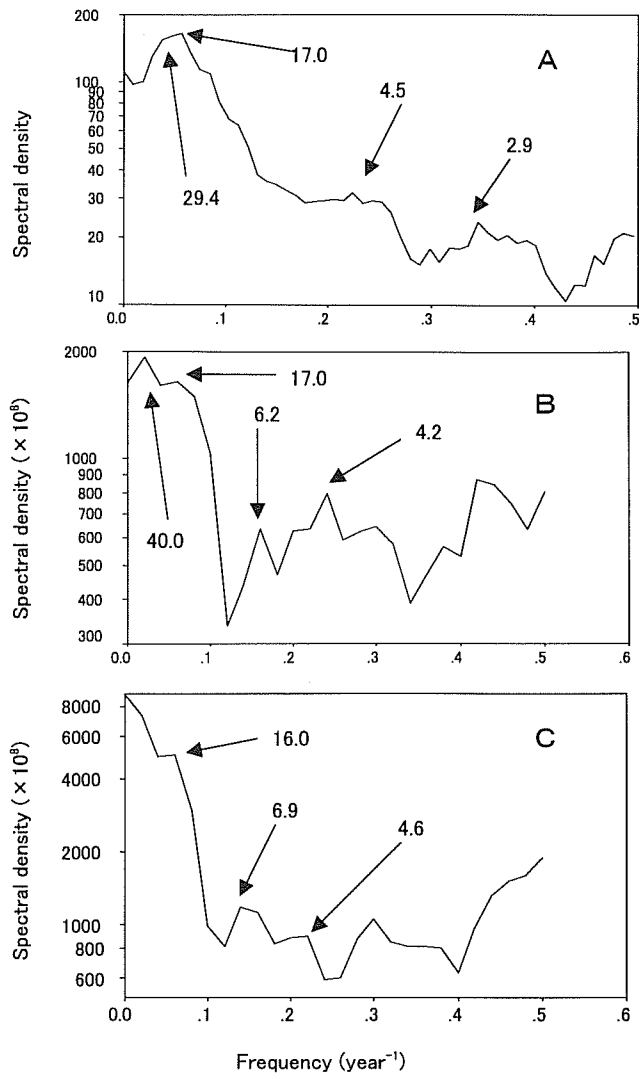
Fig. 4にパワースペクトルによる周期解析の結果を示した。1900年~2000年の資源重量指数のスペクトル密度は, 4.5年, 17.0年及び29.4年の周期にピークが見られ, 特に17.0年周期が最も卓越する。また, 1951–2000年の群別資源量指数では, 大型群は4.2年, 6.2年, 17.0年と40.0年, 中型群は4.6年, 6.9年と16.0年の周期をそれぞれ示す。資源重量指数と群別の資源量指数は互いに類似した結果を示している。以上からサンマ資源には概ね4–7年, 16–17年及び30–40年周期の変動が卓越すると考えられる。4–7年と16–17年の周期はそれぞれ2–3年及び7–9年の規模で豊凶を繰り返す年々変動と10年規模 (decadal) の変動にそれぞれ相当すると考えられる。

気候変化の影響

Fig. 5に過去1世紀におけるSOI, NPIとMOIの偏差及びそ

の偏差累積和を示した。SOIは1976年を境に正の偏差傾向から負の偏差傾向へ変わり, ラニーニャからエルニーニョが卓越する傾向に転じている。1911–14年, 1939–41年, 1990–94年に強いエルニーニョ傾向, 1915–17年, 1973–75年, 1998–2000年には強いラニーニャ傾向がそれぞれ3年以上続けて見られた。NPIは1920年代の前半までの期間と50年代から70年代の半ばまでの期間に強く, 1930–40年代及び1980年代以後に弱くなる傾向が見られ, 20年規模の長期変動パターンを示している。NPIは20世紀に1900–24年, 1925–46年, 1947–76年及び1976–99年の4つの気候レジームを示すと指摘されている (Minobe, 1999)。1976/77年頃を境に, エルニーニョ傾向が卓越することに伴い, アリュウシアン低気圧が強まった傾向が見られる。一方, MOIは1916年まで, 1950–60年代及び1988年以後の期間に小さく, 1920–40年代及び1970–80年代に高く, 1987/88年頃から冬季季節風が弱まる傾向を示している。この3つの気候指数はいずれも大きい年々変動を示しているが, スペクトル解析からはSOIは4–7年の周期, MOIは6–8年周期の短期変動, NPIは15年以上の中長期変動が卓越する。

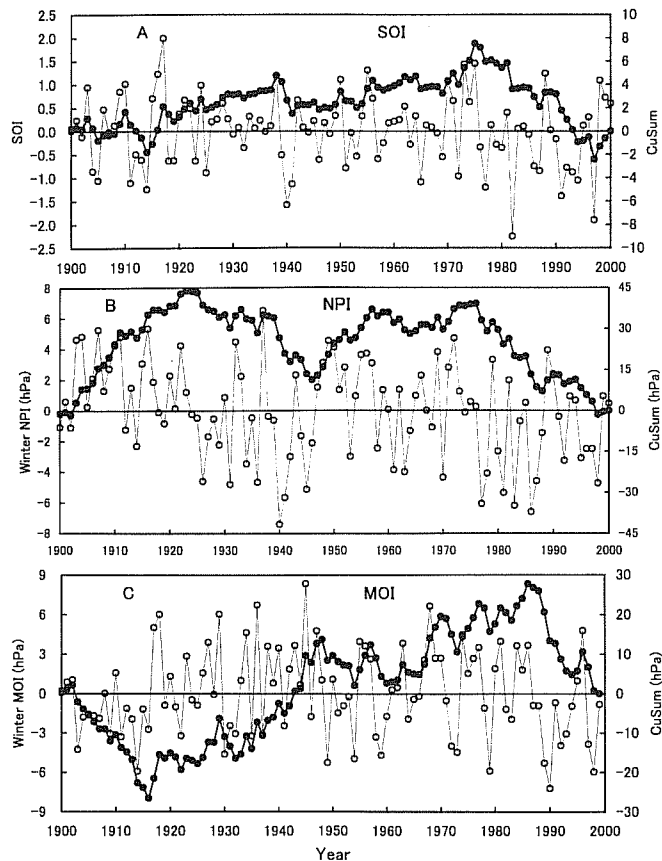
Fig. 6に各気候指数とサンマの資源重量指数との交差相関を示した。サンマの資源重量指数はそれぞれ, 6年前のNPI, 5年前のSOIと前年のMOIとの間に有意な相関を示



**Figure 4.** Power density spectrum of the abundance index series of Pacific saury. (A) Normalized abundance index in weight during 1900–2000, (B) Abundance index of large size group saury in number during 1951–2000, (C) Abundance index of medium size group saury in number during 1951–2000.

し、特にNPIは中期的にサンマの資源変動に関係することを示唆する。なお、SOIは負の偏差（エルニーニョ傾向）が卓越する期間にサンマの資源重量指数が高くなる傾向が見られるが（Fig. 2, Fig. 5A）、両者の間に1年のタイムラグでの相関が有意ではなかった。

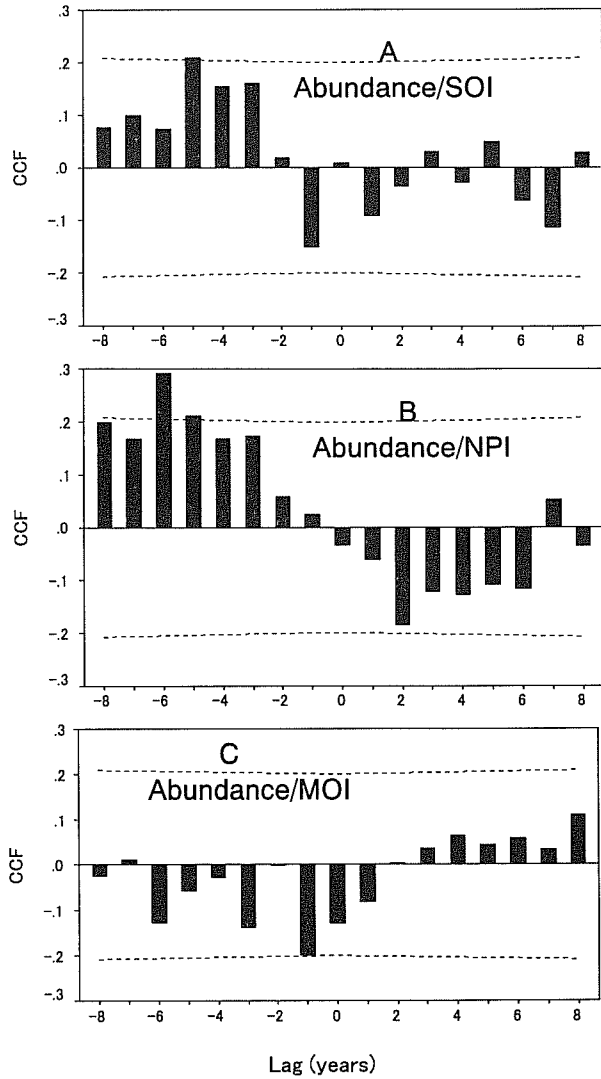
一方、群別資源量指数と気候指数との関係では、大型群は前年のSOIと当年のMOIとの間に負の有意の相関（Fig. 7）、中型群は6年前のNPIと正の有意の相関をそれぞれ示している。これに対して、大型群とNPI、中型群とSOI及びMOIとの間に明瞭な関係が当年以前には見られなかった。この結果から、大型群の資源量は前年のENSOイベント及び当年の冬季季節風の強弱に影響されるが、中型群は



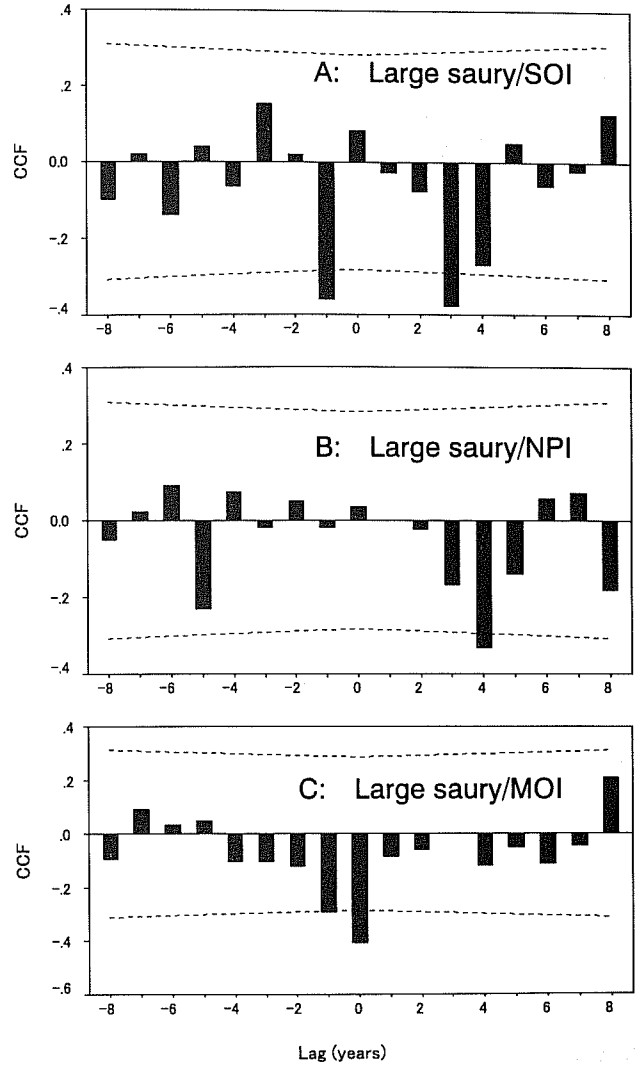
**Figure 5.** Anomalies (open circles) of three climate indices and their cumulative sums (CuSum: solid circles) from 1900 to 2000. (A) Southern Oscillation Index (SOI), (B) Winter North Pacific Index (NPI), (C) Winter Monsoon Index (MOI).

中期的にNPIの変動に関係し、大型群と中型群に影響を及ぼす気象要因が異なることを示唆する。

SOIと大型群の資源量指数との間に1年のタイムラグで負の相関関係が見られたことから、ここでSOIの絶対値が標準偏差より大きいときENSO年と定義し、過去1世紀についてエルニーニョ年、ラニーニャ年、平常年に区分し、翌年の資源量指数との関係を求めた（Fig. 8）。このように、大型群資源量指数と資源重量指数はともに、エルニーニョ年には高く、ラニーニャ年に低い結果を示している。資源重量指数について戦前データの不確実性があるため、絶対値の比較は望ましくないが、1951年以後の大型群資源量指数は、エルニーニョ年がラニーニャ年の約3倍、平常年の約1.5倍と高く、エルニーニョ（ラニーニャ）の発生が大型群サンマ資源に正（負）の影響があることを強く示唆する。また、1950–2000年における計25回のENSOイベントのうち、エルニーニョ（ラニーニャ）に対して翌年の大型群の資源量指数は平均より高い（低い）値を示したのが20年（80%）で、大型群の資源変動が高い割合でENSOに左



**Figure 6.** Cross Correlation Function (CCF) between the normalized abundance index of saury (dependent variable) and three climate indices (A–C, independent variable) during 1900–2000. Dashed lines indicate significant level at 5%. (A) Southern Oscillation Index (SOI), (B) North Pacific Index (NPI), (C) Monsoon Index (MOI).



**Figure 7.** Cross Correlation Function (CCF) between the abundance index of large size group saury (dependent variable) and three climate indices (A–C, independent variable) during 1950–2000. Dashed lines indicate significant level at 5%. (A) Southern Oscillation Index (SOI), (B) North Pacific Index (NPI), (C) Monsoon Index (MOI).

右されることを示し (Table 1), サンマの資源変動を予測する上で ENSO が重要な指標になると考えられる。

### 考察

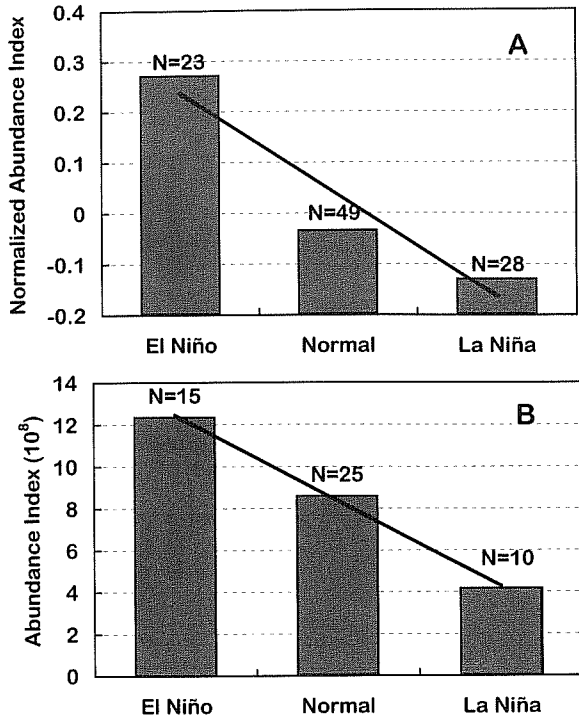
北西太平洋のサンマ資源は大きな年々変動を示しながら、中長期的に 10 年～数 10 年規模の変動が見られた。その変動には 4–7 年、16–17 年及び 30–40 年の周期が存在する。データの個数から、30 年以上の周期について議論の余地が残るが、4–7 年と 16–17 年の周期の変動が卓越すると考えられる。また、サンマの資源量指数と気候指数との関係から、サンマの資源変動は気候要因に支配されることが示

唆された。ここで、気候変化がサンマの資源変動に至るプロセスについて考察する。

### エルニーニョの影響

サンマの資源重量指数及び大型群の資源量指数がともにエルニーニョ (ラニーニャ) 年に大きく (小さく)、エルニーニョ (ラニーニャ) の発生がサンマ資源変動に正 (負) の影響を及ぼすことが示唆され、サンマ資源変動の原因解明及び資源変動の予測をするうえで重要な手がかりを得たと考えられる (Fig. 8)。

全体の資源重量指数よりも大型群のみの資源量指数の方が SOI と相関が高いのは、群別の資源量指数が全体の重量



**Figure 8.** Distribution of abundance index of saury by ENSO events. Three bars represent the average of abundance index during El Niño (SOI $\leq$ -SD), La Niña (SOI $\geq$ SD) and normal years (-SD<SOI<SD), respectively. *N* represents the number of ENSO years. The solid line indicates the regression curve. (A) Normalized abundance index in weight during 1900–2000, (B) Abundance index of large size group saury in number during 1951–2000.

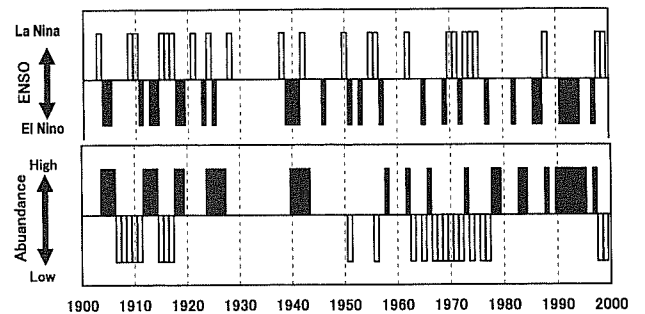
指数より年級群強度をよく反映しているからと考えられる。戦前の流し網時期におけるサンマの漁場が沿岸に限られるため、漁獲重量指数が過小評価される可能性がある。1918–19年には市場要因、または1940–47年には戦争の影響があって、実際の資源量水準がFig. 2より高いと指摘されている(福島, 1979)。戦前におけるこうした要因を考慮したうえ、さらに1951年以後について大型群の資源量指数(Fig. 3A)を基準にサンマ資源の豊凶パターンを模式化し、ENSOと比較した(Fig. 9)。強いエルニーニョ状況が2年以上続く1904–05年, 1911–14年, 1918–19年, 1923–25年, 1939–41年, 1986–87年と1991–94年はそれぞれサンマ資源量水準の高い時期と一致する。特に1988–97年における高い資源水準は、記録史上最長と言われる1990–95年のエルニーニョ傾向とよく一致する(Trenberth and Hoar, 1996)。また、1973年における大型群指数の最も高い値も、1972/73年の強いエルニーニョに対応する。1973年を除けば、サンマの大型群指数は1960年代の半ばから1970年代の半ばまで最も低い時期であるが、これは同時期での強いラニーニャ傾向とよく対応する。さらに、サンマの資源量

**Table 1.** Catalogue of independent ENSO events and the response of catch for large size group saury during 1950–2000.

El Niño Events	La Niña Events	Abundance Index in Next Year	
		Number ( $\times 10^8$ )	Trend
	1950	2.13	—
1951		4.96	—
1953		11.43	+
	1955	3.84	—
	1956	13.80	+
1957		20.43	+
1963		11.10	+
	1964	2.14	—
1965		11.86	+
1969		0.68	—
	1970	0.31	—
	1971	2.68	—
1972		23.79	+
	1973	2.34	—
	1975	1.34	—
1977		11.25	+
1982		11.57	+
1987		20.93	+
	1988	9.52	+
1991		11.80	+
1992		16.37	+
1993		10.79	+
1994		13.61	+
1997		4.71	—
	1998	3.71	—

15 events    10 events    20/25=80%

The “+” (“-”) represents above (below) average catch ( $8.84 \times 10^8$ ) over 1951–2000. The shaded “+” (“-”) represents the years in which the catch level were not corresponding with the trend predicted from ENSO events.



**Figure 9.** Schematic diagram showing the response of the abundance of Pacific saury to ENSO events during the last century. The black (white) bars indicate El Niño (La Niña) for ENSO and high (low) level for saury abundance, respectively.

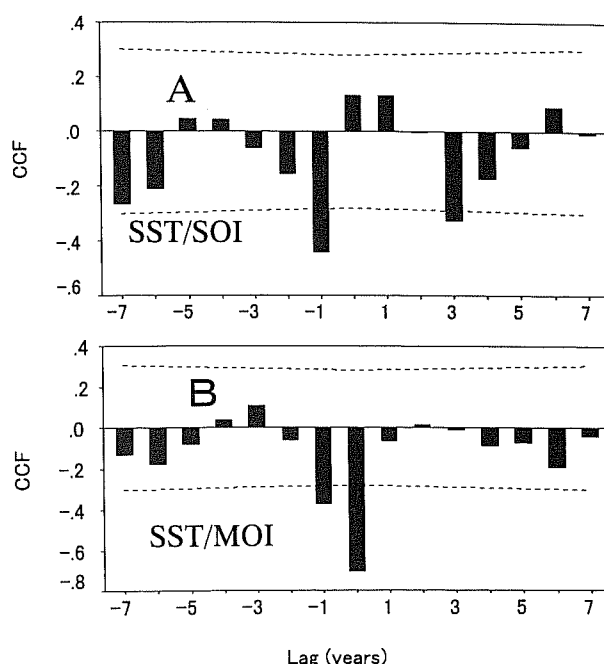
水準が1998年から低水準期に移行しているのも、ENSOが1998年以後エルニーニョ傾向からラニーニャ傾向に転換したことと一致する。また、大型群の資源量指数は1953/54年、1963/64年、1972/73年、1987/88年、1997/98年のような強いエルニーニョ/ラニーニャ発生時に変動傾向が転換することも注目し値する (Fig. 3A)。以上からエルニーニョの発生はサンマ資源の年々変動に影響を及ぼすだけでなく、その長期的な変動傾向にも関係することを示唆する。なお、サンマ資源変動に卓越する4-7年の周期がENSOに対応するものであると考えられる。

サンマは黒潮水域での冬季発生群及び混合水域での春季と秋季発生群の3つのコホートが知られ、各コホートの成長と生残が大きく異なると報告されている (福島ほか, 1990; Watanabe *et al.*, 1997)。資源加入への各コホートの寄与の割合がわかっていないが、最新の研究では黒潮水域での冬季発生群が大きい役割を果たしていると報告されるうえ (栗田, 2001)、大型群が黒潮水域の冬季発生群に相当すると指摘されている (Tian *et al.*, unpublished)。

気象庁が作成した北太平洋の表面水温 (SST) データセットを用いた解析では、サンマの大型群資源量指数が黒潮水域 (28-35°N, 128-145°E) の冬季 (1-3月平均) SSTと高い正の相関を示したのに対して、中型群が混合域以北のSSTに関係し、大型群と中型群の資源量水準がそれぞれ亜熱帯フロント域と亜寒帯フロント域の海洋環境に大きく関係することが明らかになった (Tian *et al.*, unpublished)。ENSOは冬季の亜熱帯フロント域の水温変動に大きい影響を及ぼすことがよく知られており、黒潮水域の水温はエルニーニョ (ラニーニャ) 年には正 (負) の偏差を示す (Hanawa, 1989)。1950-2000年におけるSOIは黒潮水域の冬季SSTとの間に負の高い相関関係が見られ (Fig. 10A)、エルニーニョ (ラニーニャ) 年にはサンマの冬季産卵海域の水温が高く (低く) なる傾向を示している。このようにENSOは亜熱帯フロント域の水温に及ぼす遠隔作用によって大型群サンマの資源変動に影響を及ぼすものと推察される。

カタクチイワシやマイワシやマサバなどの浮魚資源及び鳥類の個体群変動にもENSOの影響が指摘されている (Sinclair and Trembley, 1985; Tsai *et al.*, 1997; Kim and Kang, 2000; Sillett *et al.*, 2000; Yatsu *et al.*, 2000)。ENSOの遠隔作用に対して、物理環境の応答パターンが時空間的に異なるため、魚種別に及ぼす影響のメカニズムが違うが、亜熱帯水域に生息するカタクチイワシやマサバに対するエルニーニョの影響はサンマと同じく亜熱帯フロント域の水温変動またはそれに伴う餌プランクトンの変動をもたらすことによると推察される (Tsai *et al.*, 1997; Kim and Kang, 2000; Sugimoto *et al.*, 2001)。

一方、大型群サンマに対するMOIの影響 (Fig. 7C) については、前年及び当年の冬季MOIが黒潮水域における水温変動の約64%を説明できることから (Fig. 10B)、ENSOの



**Figure 10.** Cross Correlation Function (CCF) between the sea surface temperature in Kuroshio Region (28-35°N, 128-145°E) in winter (Jan.-Mar.) (SST, dependent variable) and two climate indices (A-B, independent variable) during 1950 to 2000. Dashed lines indicate significant level at 5%. (A) Southern Oscillation Index (SOI), (B) Monsoon Index (MOI).

遠隔作用のようにサンマの冬季産卵場である黒潮水域のSSTを介して及ぼすものであると推察される。冬季季節風は北太平洋の西端での鉛直混合と低次生産に影響することが指摘されている (杉本, 1998)。冬季季節風の弱 (強) まりは黒潮水域の水温の増加 (低下) をもたらすことでサンマ資源の増加 (減少) に至ったと考えられる。

大型群に対してNPIの影響が見られなかったことは、大型群が亜熱帯フロント域の気候環境に影響されることを間接的に示していると考えられる。NPIはアリューシャン低気圧の指数で、アリューシャン低気圧の影響を強く受けるのは亜寒帯フロント域であると考えられるからである。これと対照的に中型群についてENSOとMOIの影響が見られなかったのに、NPIによる影響を示したことは、黒潮水域のSSTによって大きく支配される大型群と異なり、中型群は亜寒帯の気候・海洋環境に影響されると推察される。この結果はENSOの遠隔作用が亜熱帯フロント域に限られ、亜寒帯フロント域の水温の変動を説明できないという報告からも裏付けられる (Nakamura and Yamagata, 1999)。

#### 10年規模の変動とレジームシフト

近年、北太平洋ではENSOの数年周期変動以外に、10年から数10年規模の変動が存在することが明らかになり (Nakamura *et al.*, 1997; Minobe, 1999; Nakamura and Yama-



gata, 1999), 生態系への影響が指摘されている (Francis *et al.*, 1998; McGowan *et al.*, 1998; Zhang *et al.*, 2000; Sugimoto *et al.*, 2001). サンマ資源に卓越する10年規模の変動は気候-海洋環境のレジームに対応することを示唆する.

気候指数によってレジームシフトのパターンが異なる. NPI (Fig. 5B)から20世紀における1924/25年, 1947/48年と1976/77年の3つのレジームシフトを確認でき (Minobe, 1999), MOIでは1916/17年, 1947/48年, 1986/87年に変動傾向の転換が見られる. 海洋生態系への影響が広く知られている1976/77年のレジームシフトについては, SOIとMOIでも確認できる (Fig. 5). 最近, 北太平洋では1988/89年頃にもレジームシフトが発生したと指摘されている (Minobe, 1999; Hare and Mantua, 2000; Zhang *et al.*, 2000). これについては, SOIでは不明瞭であるが, MOIとNPIでは確認でき, 中緯度域において気候のレジームシフトが発生したことを示唆している. さらに1998/99年にもレジームシフトが発生した可能性が高いと報告されている (McFarlane *et al.*, 2000; Beamish *et al.*, 2000).

20世紀前半までにおけるサンマの資源重量指数では1911/12年, 1916/17年, 1920/21年, 1928/29, 1940/41年頃に転換点が見られた (Fig. 2). 1950年以後における大型群の資源量指数では (Fig. 3A), 1963/64年, 1976/77年, 1987/88年及び1997/98年に変動傾向が変わり, 10年規模の変動が卓越し, 1976/77年と1987/88年及び1997/98年におけるレジームシフトが見られ, MOIの変動パターンと概ね一致する. これはMOIがサンマの発生水域の水温レジームとよく対応しているからと考えられる (Fig. 10B). サンマに見られた1987/88年のレジームシフトが韓国沿岸の生態系にも認められ, イワシ類やサバ類資源への影響が指摘されている (Zhang *et al.*, 2000). サンマと同じく寿命が短いスルメイカの資源変動も水温のレジームに同調する (桜井, 1998). また, 1988年の北海のレジームシフトが大西洋マアジとニシンの資源量及び分布域の変化をもたらしたと報告されている (Corten, 2001; Reid *et al.*, 2001).

漁獲統計データの信頼性が高い1950年以後の北東太平洋の魚類生態系について, Beamish *et al.* (2000) は1950-76年, 1977-88年 1989-97年の3つのレジームが存在すると主張し, さらに1998/99年頃にもレジームシフトが発生した可能性が高いと指摘した. サンマの資源変動, 特に最近の大型群の資源量指数がこの漁業レジームとよく一致することは注目に値する.

一方, NPIと大型群の資源量指数との間に相関が見られないものの, 中型群に対して中期的に影響が見られたうえ, 1976/77年と1987/88年のようにNPIに見られるレジームシフトがサンマの変動傾向と一致する場合もあり, 中高緯度域における気候のレジームシフトがサンマの資源変動の及ぼす影響を考えると, NPIは重要な指標であると考えられる. サケ類の資源変動がNPIによって表される気候のレ

ジームシフトによく対応することが指摘されている (Mantua *et al.*, 1997).

以上のことから, 海洋環境の10年規模の変動及び気候のレジームシフトを把握することがサンマ資源の中長期的変動特性を解明する上で重要であると考えられる. Beamish *et al.* (1999) はサケ類の資源変動傾向を表すのに, アリュースク低気圧, 光周期, 気温を統合したレジーム指数を提案した. サンマは発生群が複数あるうえ, 発生海域が異なり, 亜熱帯フロント域から亜寒帯フロント域にわたって海洋構造の著しく変化する海域を広域に回遊することから, 特に生息水域の水温変動をよく表す気候指数を用いることが望ましいと考えられる.

最後に本研究の結論をまとめると, 1) サンマの資源変動は大きい年々変動とともに10年規模の変動が卓越し, 気候と海洋環境のレジームシフトに対応する. 2) 大型群と中型群はそれぞれ異なる海洋システムに影響される. 3) エルニーニョ (ラニーニャ) は大型群サンマ資源に正 (負) の効果が見られ, ENSOは大型群サンマの資源変動に大きい影響を及ぼす. 4) ENSOまたは冬季季節風は大気-海洋循環の遠隔作用によってサンマの生息と発生海域の水温を介してサンマの資源変動に影響を及ぼす. 5) サンマの資源変動に卓越する数年周期と10年規模の変動は, それぞれENSO及び海洋のレジームシフトに対応するもので, サンマの資源変動の解明にはさらに10年規模以上の長期変動をもたらす海洋要因の解明が重要である.

## 謝 辞

本論文の初稿について東北区水産研究所の上野康弘室長から丁寧かつ有益なコメントをいただいた. また漁獲量データのご提供など多くのご協力をいただいたことに深く感謝します. 中央水産研究所谷津明彦室長にはご校閲していただき, 原稿の改善に多くのコメントを頂いた. 東北区水産研究所の渡邊朝生室長からMOIデータのご提供及びMOIと日本の気象との関係についてご教示を頂いた. Fig. 10に用いたSSTデータは気象庁海洋課により提供されたものである. 本研究は農林水産省プロジェクト研究「太平洋漁業資源」(VENFISH)の一環として行われた研究成果の一部である (中央水産研究所業績B-285).

## 引用文献

- 相澤 康・滝口直之 (1999) MS-Excelを用いたサイズ度数分布から年齢組成を推定する方法の検討. 水産海洋研究, 63, 205-214.
- Beamish, R. J., G. A. McFarlane and J. R. King (2000) Fisheries climatology: understanding decadal scale processes that naturally regulate British Columbia fish populations. In: Fisheries Oceanography: An Integrative Approach to Fisheries Ecology and Management, ed. P. J. Harrison and T. R. Parsons, Blackwell Science, London, 94-139.
- Beamish, R. J., D. J. Noakes, G. A. McFailane, L. Klyashtorin, V. V. Ivanov, and V. Kurashov (1999) The regime concept and natural trends in the production of Pacific salmon. Can. J. Fish. Aquat. Sci.,

- 56, 516–526.
- Chikuni, S. (1985) The fish resources of the northwest Pacific. FAO Fish. Tech. Pap. No. 266, 190 pp.
- Corten, A. (2001) Northern distribution of North Sea herring as a response to high water temperatures and/or low food abundance. *Fish. Res.*, **50**, 189–204.
- Francis, R. C., S. R. Hare, A. B. Hollowed, and W. S. Wooster (1998) Effects of interdecadal climate variability on the oceanic ecosystems of the NE Pacific. *Fish. Oceanogr.*, **7**, 1–21.
- 福島信一 (1979) 北西太平洋系サンマの回遊機構の綜観的解析. 東北水研研報, **41**, 1–70.
- 福島信一・渡邊良朗・小川嘉彦 (1990) 北西太平洋におけるサンマの季節別発生群と大型魚, 中型魚, 小型魚との対応. 東北水研研報, **52**, 17–27.
- Hanawa, K. (1989) Long-term variations in the physical environments in the Pacific Ocean. In: Long-term variability of pelagic fish populations and their environment, ed. T. Kawasaki, S. Tanaka, Y. Toba and A. Taniguchi, Pergamon Press, London, 19–28.
- Hare, S. R. and N. J. Mantua (2000) Empirical evidence for North Pacific regime shifts in 1977 and 1989. *Prog. Oceanogr.*, **47**, 103–145.
- Kim, S. and S. Kang (2000) Ecological variations and El Niño effects off the southern coast of the Korean Peninsula during the last three decades. *Fish. Oceanogr.*, **9**, 239–247.
- 小坂 淳 (2000) 北西太平洋におけるサンマの生活史とそれにもとづく資源変動の考察. 東北水研研報, **63**, 1–96.
- 栗田 豊 (2001) サンマの産卵場および産卵量の季節変化. 第49回サンマ資源研究会議報告, 東北水研, 青森, 203–205.
- Mantua, N. J., S. R. Hare, Y. Zhang, J. M. Wallace and R. C. Francis (1997) A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **78**, 1069–1079.
- Matsumiya Y. and S. Tanaka (1978) Dynamics of the saury population in the Pacific Ocean off northern Japan—III. Reproductive relations of large and medium sized fish. *Bull. Jpn. Soc. Sci. Fish.*, **44**, 451–455.
- McFarlane, G. A., J. R. King and R. J. Beamish (2000) Have there been recent changes in climate? Ask the fish. *Prog. Oceanogr.*, **47**, 147–169.
- McGowan, J. A., D. R. Cayan and L. M. Dorman (1998) Climate-ocean variability and ecosystem response in the Northeast Pacific. *Science*, **281**, 210–217.
- Minobe, S. (1999) Resonance in bidecadal and pentadecadal climate oscillations over the North Pacific: Role in climate regime shifts. *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 855–858.
- Nakamura, H., G. Lin and T. Yamagata (1997) Decadal climate variability in the North Pacific during the recent decades. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **78**, 2215–2225.
- Nakamura, H. and T. Yamagata (1999) Recent decadal SST variability in the Northwestern Pacific and associated atmospheric anomalies. In: Beyond El Niño: Decadal and Interdecadal Climate Variability, ed. A. Navarra, Springer, Berlin, 49–72.
- 西森基貴・吉野正敏 (1990) ENSO現象と台風の発生・発達・経路との関係. 地理学評論, **63**, 530–540.
- 小達和子 (1994) 東北海域における動物プランクトンの動態と長期変動に関する研究. 東北水研研報, **56**, 115–173.
- Reid, P. C., M. F. Borges and E. Svendsen (2001) A regime shift in the North Sea circa 1988 linked to changes in the North Sea horse mackerel fishery. *Fish. Res.*, **50**, 163–171.
- 桜井泰憲 (1998) 気候変化に伴うスルメイカ資源変動のシナリオ. 月刊海洋, **30**, 424–435.
- Sillett, T. S., R. T. Holmes and T. W. Sherry (2000) Impacts of a global climate cycle on population dynamics of a migratory songbird. *Science*, **288**, 2040–2042.
- Sinclair, M. and M. J. Tremblay (1985) El Niño events and variability in a Pacific mackerel (*Scomber japonicus*) survival index: support for Hjort's second hypothesis. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **42**, 602–608.
- Spring, A. M., J. F. Piatt, V. P. Shuntov, G. B. Van Vliet, V. L. Vladimirov, A. E. Kuzin and A. S. Perlov (1999) Marine birds and mammals of the Pacific Subarctic Gyres. *Prog. Oceanogr.*, **43**, 443–487.
- 杉本隆成 (1998) 海洋生態系の長期変動に対する気象・海洋変動の影響. 月刊海洋, **30**, 379–388.
- Sugimoto, T. and K. Tadokoro (1998) Interdecadal variations of plankton biomass and physical environment in the North Pacific. *Fish. Oceanogr.*, **7**, 289–299.
- Sugimoto, T., S. Kimura and K. Tadokoro (2001) Impacts of El Niño events and climate regime shifts on living resources in the western North Pacific. *Prog. Oceanogr.*, **49**, 113–127.
- Tamura, T., Y. Fujise and K. Shimazaki (1998) Diet of minke whales *Balaenoptera acutorostrata* in the northwestern part of the North Pacific in summer, 1994 and 1995. *Fish. Sci.*, **64**, 71–76.
- 友定 彰・小達和子 (1995) 動物プランクトンバイオマスと環境の長期変動. 海と空, **71**, 1–7.
- Trenberth, K. E. (1990) Recent observed interdecadal climate changes in the Northern Hemisphere. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **71**, 988–993.
- Trenberth, K. E. and T. J. Hoar (1996) The 1990–1995 El Niño–Southern Oscillation event: Longest on record. *Geophys. Res. Lett.*, **23**, 57–60.
- Trenberth, K. E. and J. W. Hurrell (1994) Decadal atmosphere-ocean variation in the Pacific. *Climate Dynamics*, **9**, 303–319.
- Tsai, C. F., P. Y. Chen, C. P. Chen, M. A. Lee, G. Y. Shian, and K. T. Lee (1997) Fluctuation in abundance of larval anchovy and environmental conditions in coastal waters off south-western Taiwan as associated with the El Niño–Southern Oscillation. *Fish. Oceanogr.*, **6**, 238–249.
- Watanabe, Y., Y. Oozeki, and D. Kitagawa (1997) Larval parameters determining preschooling juvenile production of Pacific saury (*Cololabis saira*) in the northwestern Pacific. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **54**, 1067–1076.
- Welch, D. W., Y. Ishida and K. Nagasawa (1998) Thermal limits and ocean migrations of sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*): long-term consequences of global warming. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **55**, 937–948.
- Yasuda I. and Y. Watanabe (1994) On the relationship between the Oya-shio front and saury fishing grounds in the north-western Pacific: a forecasting method for fishing ground locations. *Fish. Oceanogr.*, **3**, 172–181.
- Yasuda, I., H. Sugisaki, Y. Watanabe, S. Minobe and Y. Oozeki (1994) Interdecadal variations in Japanese sardine and ocean/climate. *Fish. Oceanogr.*, **8**, 18–24.
- Yatsu, A., T. Watanabe, J. Mori, K. Nagasawa, Y. Ishida, T. Meguro, Y. Kamei and Y. Sakurai (2000) Interannual variability in stock abundance of the neon flying squid, *Ommastrephes bartramii*, in the North Pacific Ocean during 1979–1998: impacts of driftnet fishing and oceanographic conditions. *Fish. Oceanogr.*, **9**, 163–170.
- Yndestad, H. (1999) Earth nutation influence on the temperature regime of the Barents Sea. *ICES J. Mar. Sci.*, **56**, 381–387.
- Zhang, C. I., J. B. Lee, S. Kim and J. H. Oh (2000) Climatic regime shifts and their impacts on marine ecosystems and fisheries resources in Korean waters. *Prog. Oceanogr.*, **47**, 171–190.