

## 気候変動が北太平洋の低次生産過程に及ぼす影響

誌名	日本プランクトン学会報
ISSN	03878961
巻/号	481
掲載ページ	p. 34-40
発行年月	2001年2月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター  
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council  
Secretariat



## 気候変動が北太平洋の低次生産過程に及ぼす影響

田所和明<sup>1)</sup>・杉本隆成<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>地球フロンティア研究システム 〒105-0013 東京都港区浜松町1-18-16 住友浜松町ビル4F

<sup>2)</sup>東京大学海洋研究所 〒164-0014 東京都中野区南台1-15-1

### Variations of biological productivity related to the global climate changes in the North Pacific Ocean

KAZUAKI TADOKORO<sup>1)</sup> AND TAKASHIGE SUGIMOTO<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Frontier Research System for Global Change, Sumitomo Hamamatucho bldg. 4F, 1-18-16 Hamamatucho, Minato-ku, Tokyo 105-0013, Japan

E-mail: [denden@frontier.esto.or.jp](mailto:denden@frontier.esto.or.jp)

<sup>2)</sup>Ocean Research Institute University of Tokyo, 1-15-1 Minamidai, Nakano-ku, Tokyo 164-0014, Japan

E-mail: [sugimoto@ori.u-tokyo.ac.jp](mailto:sugimoto@ori.u-tokyo.ac.jp)

---

**Abstract** Variations of the biological productivity related to the ENSO (El Niño Southern Oscillation) events and interdecadal climatic changes in the North Pacific Ocean is reviewed. El Niño events lead to decrease in biological productivity in coastal upwelling regions of the eastern North Pacific, due to enhanced stability of upper layer and change in wind direction. Large scale El Niño events also affect productivity of the eastern subarctic Pacific. Whereas the El Niño events cause significant increase in primary productivity by elevating nutricline in the western equatorial Pacific. Many studies suggested that climatic regime shift (intensification of the Aleutian Low Pressure) occurred at 1976/77 induced doubling of plankton biomass in the eastern North Pacific Ocean. Intensification of vertical mixing or decrease of mixed layer depth is a hypothesis to the cause of the increase. On the other hand, the plankton biomass of the central subarctic Pacific and Oyashio water decreased after the climatic regime shift. The regional differences in the interannual variation of sea surface temperature or the environments may cause the east-west differences in biological productivity in the subarctic north Pacific Ocean.

**Key words:** Aleutian Low Pressure, climate change, climatic regime shift, El Niño, ENSO, phytoplankton, zooplankton

---

#### はじめに

大規模な気候・海洋変動が海洋生態系に大きな影響を及ぼすことが分かってきた。エルニーニョ・南方振動 (ENSO) は北太平洋における数年(3~7年)スケールの気候・海洋変動のなかで最も大規模な現象で、太平洋赤道域の海洋生態系に大きな影響を与えている。一方、アリューシャン低気圧の勢力は10年スケールで変動し、北太平洋中高緯度水域の海洋生態系に影響を与えている。アリューシャン低気圧の勢力は1976/77年に非常に強くなり (柏原1987, Nitta & Yamada 1989, Trenberth 1990), この現象は気候のジャンプまたはレジームシフトと呼ばれている。北太平洋の10年スケールの気候変動は熱帯太平洋の海面水温の変動に関連していることが示唆されている (Nitta & Yamada 1989, Trenberth 1990, 花輪 1993)。大気大循環モデルを用いた結果でも、熱帯域の海面水温の変化が

大気循環を変化させ、北太平洋の中高緯度域の大気・海洋へ影響を与えていることが示されている (Lau & Nath 1994, Graham 1994)。さらに、北太平洋中部の海面水温の変化に伴い低気圧の移動経路に南北変位が生じ、これがアリューシャン低気圧の勢力を強める、あるいは持続されるという仮説 (Trenberth & Hurrell 1994) や、アジアモンスーンとの関連も考えられている (Yamagata & Masumoto 1992)。

ENSOに対する生態系の応答については長期間のモニタリングによって多くの知見が得られている。一方、アリューシャン低気圧の変動に対する生態系の応答については、対象水域が外洋であるため資料は少なく、変動周期も長いこと事象の検出が難しかった。しかし近年、歴史的な資料等を掘り起こすことによって海洋生態系に及ぼす影響についても明らかになりつつある。そこで本論では、北太平洋における、ENSOおよび1976/

77年のアリューシャン低気圧の勢力の強化に関連した生物生産の変動に関する研究を総括し変動のメカニズムについて論議する。

## 1. ENSOの影響

### 低中緯度水域への影響

エルニーニョはエクアドル・ペルー沖からカルフォルニア沖の沿岸環境に影響を与え、さらにその水域の生態系に対して大きな影響を与えている。一般に、エルニーニョ現象は、生物生産に対してマイナスの影響を与えられている。1982-83年のエルニーニョの期間中にペルー沖の基礎生産量は通常年の30-39%に低下し (Barber & Chavez 1983), 硝酸塩とアンモニアの同化速度はそれぞれ通常年の25%, 69%にまで減少したことが報告されている (Wilkerson et al. 1987)。同様に Dessier & Donguy (1987) も基礎生産量の低下を示している。東部北太平洋中緯度域ではバハカリフォルニア (Torres-Moye & Alvarez-Borrego 1987), カルフォルニア沿岸 (Johnson et al. 1999) の植物プランクトン現存量や一次生産量の低下が示されている。さらに、モンレー湾のジャイアントケルプの資源量もエルニーニョに関連して減少したことが報告されている (Tegner et al. 1996)。

エルニーニョ期間中の基礎生産量が減少する要因としては、栄養塩類の供給量の減少が考えられる。通常、東部太平洋赤道域の表層生態系へは湧昇によって下層から大量の栄養塩類が供給されている。しかし、エルニーニョの期間中には西部太平洋赤道域から暖水が張り出してくることにより、東部太平洋赤道域の広い範囲で水温が上昇し、その結果、西部太平洋赤道域との温度差が小さくなり貿易風が弱まる。そして北向きの沿岸風も弱まることによって、湧昇が弱まり下層からの栄養塩類の供給量が減少してしまう。さらに暖水が表層を覆い、温度躍層が深くなることによって、湧昇したとしても栄養塩類濃度の低い水が有光層内へ供給されてしまう (Huyer et al. 1987, Dessier & Donguy 1987)。その結果、下層から供給される栄養塩類に依存する植物プランクトンの生産量が減少すると考えられている。

カルフォルニア沿岸でも、南向きの風が弱まることによって沿岸湧昇が弱まる。さらに暖水の流入も加わって上層部の水温が上がり、温度躍層が深くなることによって栄養塩類の供給量が減少する (Lynn et al. 1995, Tegner et al. 1996, Miller 1996)。カルフォルニア海流域では植物プランクトンの増殖に必要な鉄は海底付近に存在し、湧昇によって有光層内へ運ばれることによって、植物プランクトンが利用できることが最近の研究で示されており、エルニーニョの年には、北風が弱まり湧昇が無くなるため、鉄の供給も無くなり、クロロフィル濃度も減少する可能性がある (Johnson et al. 1999)。

東部太平洋、赤道域では、エルニーニョの期間中の植物プランクトンの減少に伴い、植食性の動物プランクトン現存量も減少することが示されている (Dessier & Donguy 1987, Carrasco & Santander 1987)。カルフォルニア・モンレー湾でも1991-1993年のエルニーニョに関連して、冬季の動物プランクトン現存量の減少が報告されている (Baduini 1997)。

一方で、ハワイ島の北方水域 (22° 45' N, 158° W) では、1991-93年のエルニーニョの期間中、一次生産速度はそれ以前と比べ約40%上昇したことが報告されている (Karl et al. 1995)。その原因として上部混合層内の成層が強まったことにより植物プランクトン (*Trichodesmium* spp.) の栄養塩類の利用効率が上がったことが指摘されている。また西部北太平洋熱帯域に広がる暖水プール (Warm Pool) でもエルニーニョの期間に、栄養塩類躍層の上昇に伴い基礎生産量が増加したことが示されている (Barber 1992)。数値モデルはこの栄養塩類躍層の上昇により基礎生産量が約30-40%増加したことを示している (McPhaden et al. 1990)。

エルニーニョ現象に伴う海洋環境の変動はプランクトンの種組成へも影響を与えている。ペルー沖では通常、亜熱帯性の渦鞭毛藻類が多く分布するが、エルニーニョの期間中には水温の上昇によって熱帯性の種類が多く分布ようになる (Ochoa & Gomez 1987)。鉄は特に大型の植物プランクトンの増殖にとって必要不可欠な元素であることが指摘されており (Martin & Fitzwater 1988)、エルニーニョ期間中にカリフォルニア沿岸域の湧昇が弱まることによって、海底付近の鉄の供給量が減少し、増殖に鉄を必要とする大型の植物プランクトンが減少した可能性もある (Johnson et al. 1999)。バハカリフォルニア沖でも、1983年のエルニーニョの年に、小型の植物プランクトンが卓越し、大型のケイ藻や渦鞭毛藻が減少したことが報告されている (Torres-Moye & Alvarez-Borrego 1987)。動物プランクトンでも種組成の変化が見られ、東部太平洋赤道域でエルニーニョ期間中に亜熱帯性の群集から熱帯性の群集へ変化し、特に肉食性・雑食性のカイアシ類の増加が報告されている (Carrasco & Santander 1987)。バハカリフォルニア沖でも、熱帯水域のカイアシ類が多く分布するようになったことが報告されている (Trujillo 1999)。

### 亜寒帯水域への影響

大規模なエルニーニョ現象はアラスカ湾の海洋環境・生態系へも影響を与える (Enfield & Allen 1980)。最近では1982-83年、1992-93年および1997-98年に大規模なエルニーニョが観測され、アラスカ湾の生態系へ大きな影響を与えたことが確認されている。アラスカ湾沿岸域は、カルフォルニア沿岸と同様に沿岸湧昇域であるため、北風の減衰によって湧昇が弱まることによって、栄養塩類の供給量が低下し基礎生産量も低下する

(Manson & Bakun 1986, Schoener & Tufts 1987). さらに、上層への南方からの移流 (Reed 1984, Tabata 1984) や亜表層を北進するカリフォルニア潜流の流量が増加することにより貧栄養の暖水が亜熱帯水域から供給され、基礎生産が減少すると考えられている (McLain 1984, McLain et al. 1985).

その結果、オレゴンからアラスカ沿岸域では1982-83年のエルニーニョの間、表面のクロロフィル *a* (Chl-*a*) 濃度の低下が示されており (Percy & Schoener 1987), さらに、オレゴン沿岸では、夏季の動物プランクトン現存量が通常の約70%にまで減少し (Miller et al. 1985), バンクーバー島沖ではほぼ半減した (Sefton et al. 1984) と報告されている。

1982-83年のエルニーニョは外洋域であるアラスカ循環 (Alaskan Gyre) の生態系へも影響を及ぼしている。セディメントトラップを用いた観測により定点P (50° N, 145° W) のケイ藻の生産量はエルニーニョの期間中に減少したことが示され、その原因として上部混合層内の水温の上昇により成層が強まり、栄養塩類の供給量が減少したことが挙げられている (Takahashi 1987). 1992-93年のエルニーニョに関連して、定点Pでは硝酸塩濃度の濃度が30%減少し、新生産が40%減少したとされている (Whitney et al. 1998). 1989年のエルニーニョ期間中のアラスカ循環における動物プランクトンの減少も報告されている (Bailey et al. 1995).

さらに、エルニーニョの期間中に亜熱帯性の動物プランクトン (Fulton & LeBrasseur 1985, Brodeur & Percy 1986) や魚類 (Fulton & LeBrasseur 1985, Percy et al. 1985, Dinnel & Rogers 1986, Karinen et al. 1985) が亜寒帯水域へも分布を広げた。こうした生物の種組成の変化は、1) 南方からの移流によって、生物が輸送されたため、2) 分布に適した水域が広がることによって自発的に分布域を広げたためと考えら (Percy & Schoener 1987), エルニーニョに関連して生態系構造の変化が起こっているようである。

## 2. 1976/77年のアリューシャン低気圧の勢力の強化の影響

### 東部北太平洋

1976/77年のレジームシフトによって、東部北太平洋の生物生産量は増大したと考えられている。夏季のハワイ諸島北方水域 (26.5~31.0° N, 150.5~158.0° W) のChl-*a*濃度は1970年代半ばを境に倍増したことが報告されている (Venrick et al. 1987). 夏季の東部北太平洋亜寒帯水域 (アラスカ湾) でも同様に、マクロ動物プランクトンの現存量が1976/77年以降に倍増したことが示されている (Brodeur & Ware, 1992). その他にも1976/77年以降に動物プランクトン (Brodeur & Ware 1995, Brodeur et al. 1996, McFarlane & Beamish, 1992), 魚類 (McFarlane & Beamish, 1992, Beamish & Bouillon 1993, Beamish 1994, Hare & Francis 1995) の増加が報告

されている。基礎生産速度を年代別に比較した結果でも、1980年代の定点Pの基礎生産速度は1960-70年代に比べ高いことが示されているが、これは測定方法の改良に伴うものと考えられている (Welschmeyer et al. 1991, Wong et al. 1995).

気候のジャンプに関連した東部北太平洋の生物生産の増加の要因にはいくつかの仮説が示されている。Venrick et al. (1987) はハワイ諸島の北方水域におけるChl-*a*濃度の増加の要因として、70年代半ば以降に風が強まったことにより上部混合深度混が深くなり、栄養塩類の供給量が増加した可能性があるとしている。Brodeur & Ware (1992) は夏季の動物プランクトンの経年変動は冬季の風速と有意な相関関係を示すことから、風の強化に伴うエクマン輸送量の増大によって下層から有光層内への鉄の輸送が促進され、または鉛直混合が活発になったため春に温度躍層が生じるタイミングが遅れ基礎生産が効率的に二次生産に転換される可能性があるとしている。

アリューシャン低気圧の強化は南からの移流の強化を促し、アラスカ湾の水温を上昇させる (Trenberth & Hurrell 1994, Minobe 1997). 定点Pにおける観測でも1970年代後半以降、水温は上昇している (Wong et al. 1995). 従って、1970年代後半の東部北太平洋亜寒帯水域における鉛直混合深度が浅くなるのは暖水の移流によるものと考えられる (Freeland et al. 1997). 上部混合層内の水温の上昇に伴い成層が強まり下層からの栄養塩類の供給も減少したことが示されている (Freeland et al. 1997, Whitney & Freeland 1999). 従って、栄養塩類の供給量の増大が生物生産の増加を促したとは考えにくい。Polovina et al. (1995) は北太平洋亜寒帯水域では光が一次生産の制限要因となり、亜熱帯水域では栄養塩類が基礎生産の制限要因となつた上で、1977年以降、暖水の移流によって東部北太平洋亜寒帯水域では上部混合層が薄くなり植物プランクトンは光を十分に利用できるようになり、亜熱帯水域では風の応力が強まることによって上部混合層が厚くなったため利用可能な栄養塩類が増加しこれらの水域の基礎生産を増加させたと考えている。

東部北太平洋亜寒帯水域では鉄が植物プランクトンの増殖にとって制限要因になっていると考えられている (Martin & Fitzwater 1988). 鉄は主に中国のゴビ砂漠で4月~5月に巻き上げられ偏西風によって北太平洋へ供給される (Duce & Tindale 1991). Wong et al. (1995) は1970年代後半以降の基礎生産が増加した確たる証拠は無いとしながらも、もし1970年代後半以降に基礎生産が増加したとするならば、それは大気の循環が活発になることにより、大気を介した鉄の供給量が増加したためではないかと推測している。

1970年代後半以降、生物生産の増大を示す知見が多く得られたが、逆に減少を示す報告もある。Roemmich & McGowan (1995) は水温の上昇に伴い成層が強化され、湧昇しにくくなっ

たため、東部亜熱帯循環に位置する、カリフォルニア海流域の動物プランクトン現存量は1970年代半ば以降減少したと報告している。Brodeur et al. (1996) も定点Pとカリフォルニア海流域の動物プランクトン現存量が逆相関関係となることを示し、1970年代半ばまでは亜寒帯海流がアラスカ湾からカリフォルニア沿岸へ向かって南進していたのに対し、1970年代半以降は亜寒帯海流がアラスカ湾の縁辺部に沿って北進したと関連があるとしている。

Macks et al. (1998) は *Neocalanus Plumchrus* の現存量がピークとなるタイミングは、1970年代初めには非常に遅く、気候のジャンプの影響で表層水温が暖かくなった1970年代半ば以降から1990年代には早いことを示している。 *N. Plumchrus* は北太平洋亜寒帯水域における動物プランクトンのなかで最も現存量の大きな種であるため、年代によるピークのタイミングの変化は *N. Plumchrus* をとりまく生物に少なからぬ影響を与えていると思われる。

#### その他の水域

東部（アラスカ湾）以外の北太平洋亜寒帯水域では、1970年代以降のプランクトン現存量の増加は報告されていない。中部・西部北太平洋およびベーリング海の夏季の現存量プランクトン現存量は、1970年代半ば以降に減少していることが示されている（Sugimoto & Tadokoro 1997）。亜寒帯循環の西端に位置する親潮水域でも1970年代半ば以降にプランクトン現存量は減少傾向を示している（小達 1994）。日本海の動物プランクトン現存量は明確な10年スケールの変動を示さないものの、1970年代半ばにピークを示した後、1990年に至るまで緩やかな減少傾向を示している（Hirota & Hasegawa 1999）。これらの水域のプランクトン現存量が1970年代半ば以降に減少した原因は明らかにされていない。考えられる点をあげるならば、アリューシャン低気圧の勢力の強化が海洋環境へ与える影響の相違が挙げられる。北太平洋亜寒帯循環は風成循環であるため（関根 1989）、1976/77年のアリューシャン低気圧の強化により風が強まり、循環が促進されたと考えられる。関根・鈴木（1991）はアリューシャン低気圧が南偏したときに、親潮の異常南下が見られ、風の応力は南東向きが強くなる。その結果、中部北太平洋（Trenberth & Hurrell 1994）および西部北太平洋（Sekine 1988, Minobe 1997）では北からの移流が強まることによって水温が低下したと考えられている。同様に、日本海においても、1976年～1989年の間に低水温期が続いたことが示されている（南ほか 1999）。

従って、上部混合層内の水温の変動パターンが東と西では逆になるために、水温変化もしくは、それに付随して生じる何らかの海洋環境の変化に影響を受け、東西のプランクトンの経年変動パターンが逆位相となる可能性も考えられる。友定・小達

（1995）は親潮域の動物プランクトン現存量と環境データを比較し、水温との正の相関関係を示したうえで、低水温が植物プランクトンの増殖を妨げるため、1970年代半ば以降に、植物プランクトン生産が減少し、結果として植物プランクトンを捕食する動物プランクトン現存量も減少したのではないかと述べている。

親潮水域では1970年代には暖水種のケイ藻が優占したが、1980年代では冷水種が優占したと報告されている（久保 1992）。同様の傾向は、日本海でも報告されており（南ほか 1999）、気候のジャンプはプランクトンの群集構造へも影響を与えていると考えられる。

西部亜熱帯循環では、1970年代半ば以降アジアモンスーンの影響により冬季の鉛直混合が活性化し下層からの栄養塩類の供給が増え、その結果植物プランクトン現存量が増加したことも示されている（Limsakul et al. 印刷中）。

#### 3. 今後の課題

スクリップス海洋研究所などにより50年以上にわたり重点的な調査が続けられた結果、海洋環境や生態系へ対するENSOの影響について多くの知見が得られている。一方で、観測資料の少ない中部～西部北太平洋への影響については未だ良く分かっていない。ENSOは大気循環を介して、北太平洋の中高緯度域の気候・海洋環境へ影響を及ぼすことから（川合 1989, 関根・鈴木 1991, 関根 1992, 岩尾・長徳 1995, Tanimoto et al. 1997）、これらの水域の生態系へも何らかの影響を与えている可能性がある。近年重要視されている、海洋の二酸化炭素収支の経年変動を明らかにするためにも、観測が粗なこれらの水域におけるENSOの影響を詳しく調査することが必要である。

海洋生態系に対してアリューシャン低気圧の勢力の変化がどのようなメカニズムで影響を与えるのか、現在のところ明確な答えは得られていない。その主な原因の一つにデータの不足が挙げられる。従って、さらなる解析を進めるためには、歴史的データ・プランクトン試料の掘り起こしを行う必要があると思われる。日本周辺の水域は過去100年の間、多くの調査が行われてきている。しかしながら、その観測結果の多くは日の目を見ぬままに埋もれてしまっている。それらを掘り起こし活用することが重要である。

また、北太平洋亜寒帯の沖合域は、一部の水域を除いて、HNLC (High Nutrient Low Chlorophyll) 水域が広がっている（Banse & English 1999, 田所 2000）。HNLC水域ではChl-*a*濃度は基礎生産量を反映しないため、衛星画像等によって得られるChl-*a*濃度の情報を解析するだけでは基礎生産の経年変動を明らかにすることは難しいと思われる。従って、現在、北海道大学が行っている経度180°線上でのモニタリングや、定点KNOT (45°N, 155°W) において、基礎生産、プランク

トン採集および海洋観測を継続していくことが重要である。

1976/77年に始まったアリュースシャン低気圧の勢力の強い期間は1988/89年に終結し、1990年代は新たな段階に移行したと考えられている (Beamish et al. 1999, Overland 1999, Watanabe & Nitta 1999). その影響のためか、東部北太平洋サケ属魚類の成長や生残率は1989年以降下がっているようである (Beamish et al. 2000, Welch et al. 2000). また、ベーリング海陸棚域では1990年代初頭からクラゲ類の急激な増加が報告され、気候変動との関連が示唆されている (Brodeur et al. 1999). さらに、1999/2000年に気候のジャンプが起こった可能性も指摘されており (Minobe 1999), これらの気候変動と海洋の生物生産の関係を明らかにしていくためには、過去10年間のデータの解析および今後10年単位での継続的モニタリングが重要であろう。

### 謝 辞

本論をまとめるにあたり貴重なご意見を頂いた、地球フロンティア研究システム、才野敏郎博士、千葉早苗博士、小笠恒夫博士に感謝いたします。

### 引用文献

- Baduini, C. L. 1997. Spatial and temporal patterns of zooplankton biomass in Monterey Bay, California, during the 1991-1993 El Niño and an assessment of the sampling design. *CalCOFI Rep.* 38: 193-198.
- Bailey, K. M., J. F. Piatt, T. C. Royer, S. A. MacKlin, R. K. Reed, M. Shima, R. C. Francis, A. B. Hollowed, D. A. Somerton, R. D. Brodeur, W. J. Ingraham, P. J. Anderson & W. S. Wooster 1995. ENSO events in the northern Gulf of Alaska, and effects on selected marine fisheries. *CalCOFI Rep.* 36: 78-96.
- Banse, K. & D. C. English 1999. Comparing phytoplankton seasonality in the eastern and western subarctic Pacific and the western Bering Sea. *Prog. Oceanogr.* 43: 235-288.
- Barber, R. T. & F. P. Chavez 1983. Biological Consequences of El Niño. *Science* 222: 1203-1210.
- Barber, R. T. 1992. Geologic and climatic time scales of nutrient variability, pp.89-106. In *Primary productivity and Biogeochemical Cycles in the Sea* (ed. Falkowski, P. G. & A. D. Woodhead). Plenum, New York.
- Beamish, R. J. & D. R. Bouillon 1993. Pacific salmon production trends in relation to climate. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 50: 1002-1016.
- Beamish, R. J. 1994. Climate and exceptional fish production off the west coast of North America. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 50: 2270-2291.
- Beamish, R. J., D. J. Noaks, G. A. McFarlane, L. Klyashtorin, V. V. Ivanov & V. Kurashov 1999. The regime shift concept and natural trends in the production of Pacific salmon. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 56: 516-526.
- Beamish, R. J., D. J. Noakes, G. A. McFarlane, W. Pinnix, R. Sweeting & J. King 2000. Trends in coho marine survival in relation to the regime concept. *Fish. Oceanogr.* 9: 114-119.
- Brodeur, R. D. & W. G. Pearcy 1986. Distribution and relative abundance of pelagic nonsalmonid nekton off Oregon and Washington 1979-1984. *NOAA Tech. Rep. NMFS* 46: 85pp.
- Brodeur, R. D. & D. M. Ware 1992. Long-term variability in zooplankton biomass in the subarctic Pacific Ocean. *Fish. Oceanogr.* 1: 32-38.
- Brodeur, R. D. & D. M. Ware 1995. Interdecadal variability in distribution and catch rates of epipelagic nekton in the Northeast Pacific Ocean, pp.329-356. In *Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci.* (ed. Beamish, R. J.). National Research Council of Canada, Ottawa.
- Brodeur, R. D., B. W. Frost, S. R. Hare, R. C. Francis & W. J. I. Jr. 1996. Interannual variations in zooplankton biomass in the Gulf of Alaska, and covariation with California Current zooplankton biomass. *CalCOFI Rep.* 37: 80-99.
- Brodeur, R. D., C. E. Mills, J. E. Overland, G. E. Walters & J. D. Schumacher 1999. Evidence for a substantial increase in gelatinous zooplankton in the Bering Sea, with possible links to climate change. *Fish. Oceanogr.* 8: 296-306.
- Carrasco, S. & H. Santander 1987. The El Niño event and its influence on the zooplankton off Peru. *J. Geophys. Res.* 92: 14405-14410.
- Dessier, A. & J. R. Donguy 1987. Response to El Niño signals of the epipelagic copepod populations in the eastern tropical Pacific. *J. Geophys. Res.* 92: 14393-14403.
- Dinnel, P. A. & C. W. Rogers 1986. Northern range extension of California tonguefish, *Symphurus articauda*, to Washington State. *Calif. Fish. Game* 72: 119-121.
- Duce, R. A. & N. W. Tindale 1991. Atmospheric transport of iron and its deposition in the ocean. *Limnol. Oceanogr.* 36: 1715-1726.
- Enfield, D. B. & J. S. Allen 1980. On the structure and dynamics of monthly sea level anomalies along the Pacific coast of North and South America. *J. Phys. Oceanogr.* 10: 557-578.
- Freeland, H., K. Denman, C. S. Wong, F. Whitney & R. Jacques 1997. Evidence of change in the winter mixed layer in the Northeast Pacific Ocean. *Deep-Sea Res.* 44: 2117-2129.
- Fulton, J. D. & R. J. LeBrasseur 1985. Interannual shifting of the Subarctic Boundary and some biological effects on juvenile salmonids, pp.237-252. In *El Niño North: Nio effects in the eastern subarctic Pacific Ocean* (ed. Wooster, W. S. & D. L. Fluharty). University of Washington, Seattle.
- Graham, N. E. 1994. Decadal-scale climate variability in the tropical and North Pacific during the 1970s and 1980s: observations and model results. *Climate Dyn.* 10: 135-162.
- Hare, S. R. & R. C. Francis 1995. Climate change and salmon production in the Northeast Pacific Ocean, pp.357-372. In *Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci.* (ed. Beamish, R. J.). National Research Council of Canada, Ottawa.
- 花輪公雄 1993. 海洋の長周期変動と大気大循環. *海と空* 68: 167-180.
- Hirota, Y. & S. Hasegawa 1999. The zooplankton biomass in the Sea of Japan. *Fish. Oceanogr.* 8: 274-283.
- Huyer, A., R. L. Smith & T. Paluszkievicz 1987. Coastal upwelling off Peru during normal and El Niño times, 1981-1984. *J. Geophys. Res.* 92: 14297-14307.
- 岩尾尊徳・長徳英晶 1995. 北海道南方41° 30' N線断面における長期変化傾向とENSOと関連した変動. *海と空* 71: 25-32.
- Johnson, K. S., F. P. Chavez & G. E. Friederich 1999.

- Continental-shelf sediment as a primary source of iron of coastal phytoplankton. *Nature* **398**: 697-699.
- Karinen, J. F., B. L. Wing & R. R. Straty 1985. Records and sightings of fish and invertebrates in the eastern Gulf of Alaska and oceanic phenomena related to the 1983 El Niño event, pp.253-267. In *El Niño North: Niño effects in the eastern subarctic Pacific Ocean* (ed. Wooster, W. S. & D. L. Fluharty). University of Washington, Seattle.
- Karl, D. M., R. Letelier, D. Hebel, L. Tupas, J. Dore, J. Christian & C. Winn 1995. Ecosystem changes in the North Pacific subtropical gyre attributed to the 1991-92 El Niño. *Nature* **373**: 230-234.
- 柏原辰吉 1987. 北太平洋を中心とした最近の冬季の冷化について. *天気* **34**: 777-781.
- 川合英夫 1989. 東北海区近海の黒潮続流軸北限と親潮水南限の長期変動. *水産海洋研究* **53**: 353-363.
- 久保直・榎原資嗣 1992. 北海道南沖・日本海のケイソウ分布と海況の長期変動. *研究時報* **44**: 107-117.
- Lau, N. & M. J. Nath 1994. A modeling study of the relative roles of tropical and extratropical SST anomalies in the variability of the global atmosphere-ocean system. *J. Climate* **7**: 1184-1207.
- Limsakul, A., T. Saino, T. Midorikawa & J. I. Goes. Temporal variations in lower trophic level biological environments in the northwestern North Pacific Subtropical Gyre from 1950 to 1997. *Prog. Oceanogr.* (in press).
- Lynn, R. J., F. B. Schwing & T. L. Hayward 1995. The effect of the 1991-1993 ENSO on the California Current System. *CalCOFI Rep.* **36**: 57-71.
- Mackas, D. L., R. Goldblatt & A. G. Lewis 1998. Interdecadal variation in developmental timing of *Neocalanus plumchrus* populations at Ocean Station P in the subarctic North Pacific. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **55**: 1878-1893.
- Manson, J. E. & A. Bakun 1986. Upwelling index update, U.S. west coast, 33° N-48° N Latitude. *NOAA Tech. Memo. NMFS* **67**: 81pp.
- Martin, J. H. & S. E. Fitzwater 1988. Iron deficiency limits phytoplankton growth in the north-east Pacific subarctic. *Nature* **331**: 341-343.
- McFarlane, G. A. & R. J. Beamish 1992. Climatic influence linking copepod production with strong year-classes in sablefish, *Anoplopoma fimbria*. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **49**: 743-753.
- McLain, D. R. 1984. Coastal ocean warming in the northeast Pacific, pp.61-86. In *The influence of ocean conditions on the production of salmonids in the North Pacific* (ed. Pearcy, W. G.). Oregon State University, Corvallis.
- McLain, D. R., R. E. Brainard & J. G. Norton 1985. Anomalous warm events in eastern boundary current systems. *CalCOFI Rep.* **26**: 51-64.
- McPhaden, M. J., S. P. Hayes, L. J. Mangum & J. M. Toole 1990. Variability in the Western Equatorial Pacific Ocean during the 1986-87 El Niño/Southern Oscillation Event. *J. Phys. Oceanogr.* **20**: 190-208.
- Miller, A. J. 1996. Recent advances in California Current modeling: decadal and interannual thermocline variations. *CalCOFI Rep.* **37**: 69-79.
- Miller, C. B., H. D. Batchelder, R. D. Brodeur & W. G. Pearcy 1985. Response of the zooplankton and ichthyoplankton off Oregon to the El Niño event of 1983, pp.185-187. In *El Niño North: Niño effects in the eastern subarctic Pacific Ocean* (ed. Wooster, W. S. & D. L. Fluharty). University of Washington, Seattle.
- 南秀人・河江訓・長井直樹・地福淳一 1999. 日本海PM線の長期変動. *測候時報特別号* **66**: 63-80.
- Minobe, S. 1997. A 50-70 year climatic oscillation over the North Pacific and North America. *Geophys. Res. Lett.* **24**: 683-686.
- Minobe, S. 1999. Resonance in bidecadal and pentadecadal climate oscillations over the North Pacific: Role in climatic regime shifts. *Geophys. Res. Lett.* **26**: 855-858.
- Nitta, T. & S. Yamada 1989. Recent warming of tropical sea surface temperature and its relationship to the Northern Hemisphere circulation. *J. Meteor. Soc. Japan* **67**: 375-383.
- Ochoa, N. & O. Gomez 1987. Dinoflagellates as indicators of water masses during El Niño, 1982-1983. *J. Geophys. Res.* **92**: 14355-14367.
- 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 No.56*: 115-173.
- Overland, J. E., J. M. Adams & N. A. Bond 1999. Decadal variability of the Aleutian Low and its relation to highlatitude circulation. *J. Climate* **12**: 1542-1548.
- Pearcy, W., J. Fisher, R. Brodeur & S. Johnson 1985. Effects of the 1983 El Niño on coastal nekton of Oregon and Washington, pp.188-204. In *El Niño North: Niño effects in the eastern subarctic Pacific Ocean* (ed. Wooster, W. S. & D. L. Fluharty). University of Washington, Seattle.
- Pearcy, W. G. & A. Schoener 1987. Changes in the marine biota coincident with the 1982-83 El Niño in the Northeastern subarctic Pacific Ocean. *J. Geophys. Res.* **92**: 14417-14428.
- Polovina, J. J., G. T. Mitchum & G. T. Evans 1995. Decadal and basin-scale variation in mixed layer depth and the impact on biological production in the Central and North Pacific, 1960-88. *Deep-Sea Res.* **42**: 1701-1716.
- Reed, R. K. 1984. Oceanographic observations off the Pacific Northwest following the 1982 El Niño event. *Mar. Fish. Rev.* **46**: 7-12.
- Roemmich, D. & J. McGowan 1995. Climatic warming and the decline of zooplankton in the California Current. *Science* **267**: 1324-1326.
- Schoener, A. & D. F. Tufts 1987. Changes in oyster condition index with El Niño-Southern Oscillation Events at 46° N in an eastern Pacific Bay. *J. Geophys. Res.* **92**: 14429-14435.
- Sefton, M. A., D. L. Mackas, J. Fulton & H. Ashton 1984. Zooplankton abundance and composition off British Columbia during the 1983 El Niño. *Eos. Trans. AGU* (abstract) **65**: 909.
- Sekine, Y. 1988. Anomalous southward intrusion of the Oyashio east of Japan 1. Influence of the seasonal and interannual variations in the wind stress over the North Pacific. *J. Geophys. Res.* **93**: 2247-2255.
- 関根義彦 1989. 親潮・亜寒帯循環の流量について. *海と空* **65**: 85-94.
- 関根義彦・鈴木善光 1991. 親潮の異常南下の発生と大気循環の変動. *海と空* **67**: 11-23.
- 関根義彦 1992. 1975年を境としたグローバルな大気・海洋循環の変化. *海と空* **68**: 211-220.
- Sugimoto, T. & K. Tadokoro 1997. Interannual-interdecadal variations in zooplankton biomass, chlorophyll concentration and physical environment in the subarctic Pacific and Bering Sea. *Fish. Oceanogr.* **6**: 74-93.

- Tabata, S. 1984. Anomalously warm water off the Pacific coast of Canada during the 1982-83 El Niño. *Trop. Ocean Atmos. Newslett.* **24**: 7-9.
- 田所和明 2000. 北太平洋亜寒帯水域におけるChl-a濃度の季節変動の地理的差異とその要因. 日本プランクトン学会報 **47**: 111-115.
- Takahashi, K. 1987. Response of subarctic Pacific diatom fluxes to the 1982-1983 El Niño disturbance. *J. Geophys. Res.* **92**: 14387-14392.
- Tanimoto, Y., N. Iwasaka & K. Hanawa 1997. Relationships between sea surface temperature, the atmospheric circulation and air-sea fluxes on multiple time scales. *J. Meteor. Soc. Japan* **75**: 831-849.
- Tegner, M. J., P. K. Dayton, P. B. Edwards & K. L. Riser 1996. Is there evidence for long-term climatic change in southern California kelp forests? *CalCOFI Rep.* **37**: 111-126.
- 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.
- Torres-Moye, G. & S. Alivarez-Borrego 1987. Effects of the 1984 El Niño on the summer phytoplankton of a Baja California Upwelling Zone. *J. Geophys. Res.* **92**: 14383-14386.
- Trenberth, K. E. 1990. Recent observed interdecadal climate changes in the northern hemisphere. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **71**: 988-993.
- Trenberth, K. E. & J. W. Hurrell 1994. Decadal atmosphere-ocean variations in the Pacific. *Climate Dyn.* **9**: 303-319.
- Trujillo, S. H. 1999. Variability of community structure of Copepoda related to El Niño 1982-83 and 1987-88 along the west coast of Baja California Peninsula, Mexico. *Fish. Oceanogr.* **8**: 284-295.
- Venrick, E. L., J. A. McGowan, D. R. Cayan & T. L. Hayward 1987. Climate and chlorophyll a: long-term trends in the Central North Pacific Ocean. *Science* **238**: 70-72.
- Watanabe, M. & T. Nitta 1999. Decadal changes in the atmospheric circulation and associated surface climate variations in the Northern Hemisphere winter. *J. Climate* **12**: 494-510.
- Welch, D. W., B. R. Ward, B. D. Smith & J. P. Eveson 2000. Temporal and spatial responses of British Columbia steelhead (*Oncorhynchus mykiss*) populations to ocean climate shifts. *Fish. Oceanogr.* **9**: 17-32.
- Welschmeyer, N., R. Goericke, S. Strom & W. Peterson 1991. Phytoplankton growth and herbivory in the subarctic Pacific: A chemotaxonomic analysis. *Limnol. Oceanogr.* **36**: 1631-1649.
- Whitney, F. A., C. S. Wong & P. W. Boyd 1998. Interannual variability in nitrate supply to surface waters of the Northeast Pacific Ocean. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **170**: 15-23.
- Whitney, F. A. & H. J. Freeland 1999. Variability in upper-ocean water properties in the NE Pacific Ocean. *Deep-Sea Res.* **II** **46**: 2351-2370.
- Wilkerson, F. P. & R. C. Dugdale 1987. Effects of El Niño on new, regenerated, and total production in eastern boundary upwelling systems. *J. Geophys. Res.* **92**: 14347-14353.
- Wong, C. S., F. A. Whitney, K. Iseki, J. S. Page & J. Zeng 1995. Analysis of trends in primary productivity and chlorophyll-a over two decades at Ocean Station P (50° N, 145° W) in the Subarctic Northeast Pacific Ocean, pp.107-117. In *Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci.* (ed. Beamish, R. J.). National Research Council of Canada, Ottawa.
- Yamagata, T. & Y. Masumoto 1992. Interdecadal natural climate variability in the Western Pacific and its implication in global warming. *J. Meteor. Soc. Japan* **70**: 167-175.

2000年9月14日受付, 2000年11月15日受理