潮境域におけるカツオ回遊魚群の行動生態および生理に関する研究

誌名	東北区水産研究所研究報告 = Bulletin of Tohoku Regional Fisheries Research Laboratory
ISSN	0049402X
著者名	二平,章
発行元	東北区水産研究所
巻/号	58号
巻号補足	
掲載ページ	p. 137-233
発行年月	1996年3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

Bull. Tohoku Natl. Fish. Res. Inst. (東北水研研報) No. 58, 137-233, 1996

潮境域におけるカツオ回遊魚群の行動生態および生理に関する研究*

二平　章

Studies on the Behavioral Ecology and Physiology of Migratory Fish Schools of Skipjack Tuna (*Katsuwonus pelamis*) in the Oceanic Frontal Area

Akira NIHIRA

Abstract Frontal areas are one of the most important fishing grounds for migratory fishes. There have been many reports on the relationship between oceanographic features of fronts and the distributions of migratory fishes. However, most of these reports have just described the apparent relationship between them and not investigated the behavioral and physiological aspects essential to understand the mechanism behind this relationship. Studies on these aspects will contribute to clarify the interactions between the expansions and contractions of migratory areas and fluctuations in population sizes. A clearer understanding is also essential to forecast fishing ground locations and available stock abundances. This study aims to clarify the behavior and the thermal physiology of the skipjack tuna *Katsuwonus pelamis* which migrates to the frontal area off the northeastern coast of Japan.

Results are summarized as follows:

1. Biological characteristics of skipjack tuna migrating to the frontal area off the northeastern coast of Japan.

Biological characteristics such as the fork length, gonad index, condition factor, condition factor except internal organs, liver index and index of fat deposition of the stomach of skipjack tuna were investigated during 1971-1993 to clarify the stock structure and the mechanism of the formation of the fishing ground around the oceanic front. Recovered data from skipjack tunas tagged and released in the Kuroshio-Oyashio transitional area in autumn during 1978-1992 were used to detail their northward and southward migrations.

1) Five size groups (A～E) are identified among skipjack tunas migrating to the area off the northeastern coast of Japan. The size group, "A" 51～54 cm mean fork length, migrates to this area in April. The size groups "B" and "C" appear from May to June, mean fork lengths vary from 45～48 cm for group "B" and 42～44 cm for group "C". The size groups "D" and "E" appear after August, with a mean fork length varying from 41-45 cm and below 40 cm respectively. Results of tagging experiments indicate that the "E" group which appears in autumn, increases in size to become the "C" group in the following year and further to the "A" group after two years, while the "D" group becomes the "B" group in the following year. It is also suggested that the "E" group is spawned in the area between the North Equatorial Current to the Equatorial Current during winter, and that the "D" group is spawned in the area of the Subtropical Counter Current in summer.

2) Fish belonging to the "A" group and some of the "B" group seem to mature in spring because their sizes exceed the minimum size of maturation, 45 cm fork length. For this reason, after migrating to the southern edge of the Kuroshio Extension, they migrate back to subtropical area for spawning.

3) Only immature fish belonging to the "B" and "C" groups migrate northward and pass through the Kuroshio Front. Biological indices (fork length, condition factor, condition factor except internal organs, liver index and index of fat deposition on the stomach) are higher for individuals collected in the northern area than those collected in the southern area of the Kuroshio

* 東京大学審査学位論文

Front.

4) After the northward migration for feeding, the "B" and "C" groups begin to migrate southward in autumn and remain in the tropical area to overwinter. On the other hand, the "D" and "E" groups spend the winter in the Kuroshio area.

2. Behavior of skipjack tunas tagged in the frontal area

Tagged skipjack tunas were released at a secondary Kuroshio Front in August, 1981 and at the Kuroshio Front in May and June, 1986 to investigate the relationship between the oceanographic features of these areas and the biological conditions of fish migrating northward.

1) Skipjack tunas migrating to the Kuroshio Extension area in spring, before arriving at the southern edge of the warm core, decide whether they turn back to the subtropical area or continue their migration northward. All of the fish which migrates to the Kuroshio Front passes through the front and enters into the Kuroshio-Oyashio transitional area.

2) In June, when the surface water temperature of the warm streamers is lower than 20°C, only large size skipjack tunas, above 45 cm in fork length, are able to migrate northward by this route.

3) In September, large size skipjack tunas pass through the secondary Kuroshio Front and enter into the cold water area with an increase in their condition factor. However, small size skipjack tunas turn back from the front to the warm water area. The phenomenon by which large and small size fish are separated at the oceanic front is termed "size-screening" hereafter.

3. Distribution of skipjack tunas caught by floating gill nets in the Kuroshio Front

Distributions of skipjack tunas in the Kuroshio area and warm streamers were investigated using floating gill nets in June during 1987-1988.

1) Both large and small size skipjack tunas inhabit in the southern area of the Kuroshio Front, while only large size fish were collected in the northern area of the front in 1987. "Size-screening" was clearly recognized at the front.

2) Skipjack tunas sampled at the front of the western edge of a warm streamer, 20.4°C surface water temperature, mainly fed on Euphausiacea and larval anchovy. On the other hand, skipjack tunas caught in the colder water side of the front, 18.3°C the surface water, mainly fed on Euphausiacea and sardine. The weight of the stomach contents of skipjack tunas caught near the front of the warm streamer was twice to five times higher than those caught at the center of the warm streamer. From this, the frontal area seems to be the most suitable feeding place for the skipjack tunas.

4. Behavior of skipjack tunas in the frontal area from a thermal ecological point of view.

Fat content and body temperature of skipjack tunas in the western Pacific Ocean from the tropical area to the Kuroshio-Oyashio transitional area were investigated.

1) The fat contents of skipjack tunas increase when they pass through the Kuroshio Front and enter into the transitional area in spring. The fat contents also increase when they enter into the warm streamer protruding into the Oyashio water from the secondary Kuroshio Front in autumn. Fat is accumulated under the skin and around the stomach. Large size skipjack tunas, over 45 cm in fork length, accumulate more fat than smaller ones. The fat accumulation seems to contribute to the maintenance of the high body temperature when they enter into colder water.

2) When skipjack tunas of 30~55 cm in fork length migrate to the transitional area, they maintain their body temperature above 22°C in spite of the drop in the ambient water temperature. Since skipjack tunas below 45 cm in fork length can not continuously maintain their body temperature over 22°C in ambient water temperature below 20°C, they decrease their metabolic rate and can not sufficiently feed and accumulate fat. This seems to be the main cause of the "size-screening" at the front.

3) During the southward migration period, large size skipjack tunas raise their body temperature in the transitional area and smoothly pass through the Kuroshio Front southward, and migrate to the southern area of the Subtropical Counter Current, where the ambient water temperature is 26~27°C. On the other hand, since small size skipjack tunas, below 42~43 cm in fork length, can not raise their body temperature like the larger size fish, they can not migrate southward over long distances and tend to remain within the Kuroshio area even in winter.

5. Conclusions

Putting together the above results on the ecological and physiological characteristics of skipjack tunas sampled from in and adjacent areas to the frontal area of the Kuroshio Extension, the

following are concluded:

1) In the Kuroshio Front and the transitional area, fish below 45 cm in fork length can not maintain their body temperature above 22°C, which may be the lowest limit of body temperature for skipjack tuna. Therefore, they stay in waters with temperature above 20°C. On the other hand, fish above 45 cm in fork length are able to accumulate fat under the skin and around the stomach which helps avoid excessive cooling, thus they can pass through the front and enter into the cold waters of the transitional area. This could be a possible mechanism for the "size-screening" at the front.

2) Skipjack tunas passing through the Kuroshio Front migrate further north into the warm streamer protruding into the Oyashio area, and succeed in exploiting the abundant food available. This makes it possible for them to accumulate much fat and to migrate southward over long distances to the tropical area for spawning.

3) Possible mechanisms for fishing ground formation based on these characteristics are proposed.

Skipjack tunas which are maturing during the period of their northward migration in the Kuroshio area in spring, turn back from the southern edge of the Kuroshio Extension to the subtropical area. Therefore, only immature skipjack tunas pass through there and migrate to the Kuroshio Front. In large stock size years, as the result of relatively slow growth of the skipjack tunas due to density effects, the rate of immature and small size individuals with low condition factors increases during the northward migration period. This subsequently decreases the quantity of fish which turns back from the southern edge of the Kuroshio Extension and promotes the aggregation of the northward migration fish with a low condition factor which can not immediately enter into the warm streamer by "size-screening" effects at the Kuroshio frontal fishing grounds. In small stock size years, on the other hand, the opposite situation occurs and the fish aggregation is less favorable at the Kuroshio frontal fishing grounds, leading to a large scale turn back from the southern edge of the Kuroshio Extension to the subtropical area and consequently to poor fisheries at the Kuroshio Front.

Keywords body temperature, front, *Katsuwonus pelamis*, migration, skipjack tuna, tagging.

目　次

第1章　緒言
1-1　本研究の背景と意義
1-2　本研究の目的
1-3　本研究の方法
1-4　本論文の構成
第2章　調査海域に来遊するカツオの生物特性
2-1　体長組成解析による来遊群の区分
2-1-1　目的
2-1-2　方法
2-1-2-1　海域区分
2-1-2-2　体長測定データ
2-1-2-3　多峰型の体長頻度分布の分解
2-1-3　結果
2-1-3-1　月別体長組成の分解例
2-1-3-2　成長
2-1-3-3　1971年から1993年までの月別体長組成の分解と体長群の区分
2-1-4　考察
2-1-4-1　東北海域に来遊する5つの体長群
2-2　各体長群の南北回遊と黒潮前線
2-2-1　目的
2-2-2　方法
2-2-3　結果
2-2-3-1　B・C群の南下移動と再来遊
2-2-3-2　D群の南下移動と再来遊
2-2-4　考察
2-2-4-1　標識再捕獲魚からみた5群の成長過程
2-2-4-2　B・C・D群の再来遊と黒潮前線の乗り越え
2-3　カツオの生物特性値の変化と黒潮前線との関係
2-3-1　目的
2-3-2　方法
2-3-3　結果
2-3-3-1　体長組成
2-3-3-2　北上期における生殖腺熟度指数と黒潮前線
2-3-3-3　生殖腺熟度指数と水温環境
2-3-3-4　生物特性値と黒潮前線
2-3-3-5　平均肥満度別魚群の水平分布と黒潮前線位置
2-3-3-6　秋期における生息環境水温と肥満度
2-3-3-7　南下期における生物特性値の変化
2-3-4　考察

2-3-4-1 北上期における成熟個体と未成熟個体の行動差
2-3-4-2 黒潮前線における生物特性値の不連続性
2-3-4-3 南下回遊へのswitchingと栄養蓄積
第3章 標識放流調査による潮境海域におけるカツオの行動生態
3-1 黒潮前線付近で放流した標識魚の暖水ストリーマ内への移動
3-1-1 目的
3-1-2 方法
3-1-3 結果
3-1-3-1 黒潮前線域で放流した標識魚の移動
3-1-3-2 黒潮水域で放流した標識魚の移動
3-1-4 考察
3-1-4-1 北上期における黒潮前線乗り越えの行動決定
3-1-4-2 北上個体と南下個体の相違
3-1-4-3 移動行動と水温環境選択
3-2 肥満度の異なるカツオ魚群における回遊行動の相違
3-2-1 目的
3-2-2 方法
3-2-3 結果
3-2-3-1 3標識放流群間の平均体長，肥満度の差
3-2-3-2 3標識放流群の移動状況
3-2-3-3 3標識放流群の再捕獲率の相違
3-2-3-4 群構成魚の分離
3-2-4 考察
3-2-4-1 黒潮前線南側水域における肥満度差による群形成
3-2-4-2 高肥満度魚の南下移動
3-2-4-3 潮境域におけるカツオの行動分離と群構造の再編成
3-3 温度前線においてサイズスクリーニングされた標識魚の行動変異
3-3-1 目的
3-3-2 方法
3-3-3 結果
3-3-3-1 放流点付近の海洋環境
3-3-3-2 フロント付近に分布したカツオの体長組成
3-3-3-3 標識魚の移動
3-3-3-4 北上魚と南下魚の体長差
3-3-4 考察
3-3-4-1 放流魚の移動経路
3-3-4-2 フロント域におけるサイズスクリーニング現象
第4章 黒潮前線域から暖水ストリーマ内におけるカツオの分布とフロント
4-1 黒潮前線域へのカツオの集積と暖水ストリーマ内への侵入
4-1-1 方法
4-1-2 結果
4-1-2-1 調査域の海洋環境
4-1-2-2 流し刺網による採集生物種
4-1-2-3 カツオの体長と肥満度
4-1-3 考察
4-1-3-1 海洋構造
4-1-3-2 カツオの移動
4-1-3-3 黒潮前線域から暖水ストリーマ内への移動と体サイズ
4-2 暖水ストリーマ内に侵入したカツオの水温適応と採餌生態
4-2-1 方法
4-2-2 結果
4-2-2-1 調査域の海洋環境
4-2-2-2 カツオ魚群の目視観測位置
4-2-2-3 流し刺網による採集生物種
4-2-2-4 カツオの体長と肥満度
4-2-2-5 胃内容物
4-2-3 考察
4-2-3-1 海洋構造
4-2-3-2 生物分布の特徴
4-2-3-3 暖水ストリーマ内におけるカツオ分布
第5章 温度生態学的視点からみた潮境域におけるカツオの行動
5-1 カツオの脂肪蓄積と低水温環境に対するその適応的意義
5-1-1 方法
5-1-2 結果
5-1-2-1 粗脂肪量と水分量との関係
5-1-2-2 腸間膜脂肪量指数と3部位の粗脂肪量との関係
5-1-2-3 3部位の粗脂肪量の月別・漁場位置別変化
5-1-2-4 体長と粗脂肪量との関係
5-1-2-5 生息環境水温と粗脂肪量との関係
5-1-3 考察
5-1-3-1 腸間膜脂肪量指数の指標性
5-1-3-2 漁獲位置と水温分布
5-1-3-3 脂肪蓄積の部位
5-1-3-4 腸間膜脂肪の蓄積と環境水温
5-2 体温と環境水温の関係から考察した魚群の潮境通過と回遊
5-2-1 目的
5-2-2 方法
5-2-3 結果
5-2-3-1 体長・体重と体温値との関係
5-2-3-2 体長別の体温と外部環境水温との関係

5-2-3-3 「小型個体」と「大型個体」の体温と環境水温との関係
5-2-3-4 環境水温と肥満度との関係
5-2-3-5 「小型個体」と「大型個体」の肥満度と環境水温との関係
5-2-3-6 北上期と南下期における体温の相違
5-2-4 考察
5-2-4-1 代謝維持のための最低体温
5-2-4-2 代謝補償
5-2-4-3 成熟・産卵場と索餌場における環境水温とカツオの栄養代謝
5-2-4-4 南下時期における体温調節と前線通過
第6章 総合考察
6-1 はじめに
6-2 北方低水温域環境のもつ二つの側面
6-3 低水温域侵入魚の生活史上の位置
6-4 フロントにおけるサイズスクリーニング現象
6-5 体温と生息水温および体長との関係
6-6 蓄積脂肪量と体長，生息水温の関係
6-7 暖水ストリーマ内におけるカツオの分布と採餌生態
6-8 低水温域侵入とカツオの産熱機構
6-9 フロント付近におけるカツオの行動
6-10 前線漁場形成の生物的要因
6-11 漁獲量予測手法への応用
6-11-1 目的
6-11-2 方法
6-11-3 結果
6-11-3-1 来遊密度と成長量の逆相関関係からの予測
6-11-3-2 黒潮前線の北限位置と漁獲量の関係
6-11-3-3 前年秋季の平均体長と漁獲量の関係
6-11-3-4 推定産卵量と漁獲量の関係
6-11-3-5 重回帰式による予測法の検討
要約
謝辞
引用文献

第1章 緒　　言

1-1 本研究の背景と意義

潮境域は陸棚や湧昇域とともに回遊性浮魚類の重要な漁場となることが多い．潮境がしばしば回遊魚群の好漁場となる事は漁業者によって古くから知られていたが，学問的にはじめて着目したのは北原（1913）で，「カツオ，マグロ，サンマ，イワシ，クジラ類の大群で最も多き場所は二海流の衝突線（潮合線）付近なり．」と報告している．その後，北原（1918）は「① 魚族は二海流の衝突線に多きこと．② 洋流の圧迫は沿海の魚群を濃厚ならしむること．③ 水道においてはその通ずる二海より来襲する海流の圧迫によりその魚群を濃厚ならしむること．」という，いわゆる「北原の漁況に関する法則」を発表するが，宇田（1936）はこの第一法則を拡張して「魚群は一般に潮境に集群する傾向をもっており，特に潮境の凹凸出入の大きい場所に偏在する傾向がある．」とした．さらに宇田は「潮境には海洋生物の濃集を見，好漁場を形成し，海面に現れる潮目がその指標となる．」ことを，漁場一般について実証した（宇田，1960）．これがいわゆる北原，宇田の「潮境漁場論」である．

以来，多くの研究者によって潮境への魚群の集合現象に関する研究がなされた．（たとえば中井 1939，川合 1955，辻田ら 1958，川崎 1960，川合・佐々木 1962，川合ら 1969, 1970，Roden 1972，Williams 1972，福島 1973, 1979，松宮・田中 1976，中村 1979，三島 1979，辻田 1979，小坂 1980，Kosaka 1986，Sugimoto・Tameishi 1992，為石 1994a, b，為石・杉本 1994）．しかし，これまでの回遊魚群と潮境との関係に関する研究の大半は，潮境と漁場の位置関係を示す事実記載的な研究を中心として展開されてきており，潮境に集結する魚群の生態学的な研究や行動学的な研究はほとんどない．わずかに，小坂（1980），Kosaka（1986）が北西太平洋におけるサンマの回遊と海洋前線との関連を研究し，サンマの発育段階と温度前線とは密接な関係を持つことを明らかにしているだけである．

宇田（1960）の「潮境漁場論」は，潮境漁場形成の要因として ① 障壁効果，② 浮遊生物の集積効果，③ 渦動による高生産の維持をあげている．しかし，杉本ら（1988）も述べているように，これらの要因は環境面からの考察であり，集積する生物側の特性を充分に配慮した集合論にはなっていない．とくに，移動能力の大きい回遊魚群の潮境域への集合や「乗り越え」を論ずる場合には，魚群側の生理学的，行動学的，生態学的研究によるアプローチが重要な意味を持つ．

潮境漁場論においては，潮境の海洋構造に関する研究と，潮境における回遊魚群の生理学的，行動学的研究の両方にまだ未解明な課題が多く残されており，それぞれの分野で一層の研究の進展が期待されている．

また，研究をすすめるにあたっては両者の時空間スケールを一致させた総合化，つまり生態学的な研究の組み立てへの努力が必要とされ(杉本ら 1988)，このような潮境における生態学的な研究展開によって北原・宇田の「潮境漁場論」を一層発展させることが水産海洋学の重要な課題の一つとして期待されている．

1-2 本研究の目的

本研究は，魚群と潮境の関係を単なる「潮境における漁場形成論」の枠内にとどめることなく，水産海洋学における生物と環境の相互作用の課題として位置付け，潮境域における回遊魚群の生態学的な研究を行うことを目的とする．そして，生物と環境条件との関係を「生物はいつもその基礎構造である無機の世界と交互作用を営なむ存在で，生物は環境条件からの刺激に対して反応し，環境条件を生物体内にとりいれ，生物自身を変化させ，この反応をくりかえすことによって，環境条件に応化した形質を次第に形成していく．」(井尻 1977) ものとしてとらえ，潮境と魚群の関係をこの視点から解析することを試みる．

研究対象は沖合回遊性魚であるカツオとし，典型的な潮境海域である東北海域を調査海域とした．沖合海域は沿岸海域に比較して複雑な環境要素を持たず，異なる二つの水塊の接点として顕著な潮境が発達しやすいことから，生物と環境の関係がより単純化された形で実在すると考えられること，個体の行動追跡のための標識放流調査を実施する上でカツオは最適であることが上記を選定した主な理由である．

1-3 本研究の方法

潮境と回遊魚群の関係を調査するには，

第1に潮境域周辺に来遊する魚群の生物特性を把握すること，

第2に潮境域における個体の移動行動を環境選択的視点から追跡調査すること，

第3に潮境域において生物分布調査と海洋環境調査を同時的な時空間スケールで実施し，生物と海洋環境の対応関係をより具体的に明らかにすること，

などが重要な課題であると考えられる．

そこで，本研究では以下の4つの手法によって解析をすすめる．

① 調査海域に来遊するカツオの体長群構造を長期間の体長データから明らかにし，また，カツオの生物特性値を調査海域の南側である伊豆・小笠原海域まで含めて調査し，生物特性値と潮境の関係を検討する．

② 標識再捕法を用いて潮境周辺海域に来遊する魚群の行動をできるだけ具体的に明らかにすることを試み，異なる環境選択行動を示した個体間の生物特性値と選択した海洋環境を比較検討することにより，その行動生態を論じる．

③ 同じ時空間スケールで潮境域の海洋構造と分布魚種を調べるために，黒潮水域から暖水ストリーマ内および親潮水域にかけて流し刺網調査と海洋観測調査を同時的に実施し，潮境域における生物分布と海洋構造の関係を明らかにする．

④ 潮境を水温環境の異なる水塊の接点とし，カツオによる潮境の「通過」「乗り越え」を北上時期は低水温環境への侵入，南下時期は高水温環境への回帰ととらえ，温度生態学および温度生理学的視点から，個体の行動解析を試みる．

1-4 本論文の構成

第1章では，本研究の背景，目的と方法，意義について述べる．

第2章では，日本近海に来遊するカツオの一般的な生活史を述べるとともに，長期にわたる生物測定資料をもとに，調査海域への来遊体長群構造について新たな見解を示す．また，調査海域に来遊するカツオの生物特性値を整理し，その生物特性値の変化と黒潮前線の位置関係および標識放流結果からカツオの回遊生態と黒潮前線の関係を論じる．

第3章では，潮境周辺海域に来遊する魚群の行動調査のために標識放流実験を行い，北上期における南下移動個体の存在，暖水ストリーマ内への侵入行動，フロントにおけるサイズスクリーニング現象など，標識魚の潮境に対する行動の具体例に基づいて解析する．

第4章では，潮境におけるカツオの分布と海洋構造の同時的観測を目的として実施した流し刺網調査結果について述べ，潮境における集群実態，潮境域における生物特性の不連続性，潮境における採餌生態について論及する．

第5章では，潮境水域に来遊するカツオの脂肪蓄積状況を調査し，潮境と脂肪蓄積の関連性をさぐり，回遊魚の低水温環境への適応機構としてのその意義について考察する．また，北西部太平洋の全域からカツオの体温と環境水温データを集め，それらの関係をカツオの体サイズごとに整理し，温度生態学的な視点から

カツオの潮境に対する行動や回遊生態について考察する．

第6章では，各章における調査結果をふまえ，回遊モデル，潮境におけるサイズスクリーニング現象，回遊と体温調節，前線漁場形成機構など，潮境と回遊魚群の関係について総合的考察を行う．

第2章　調査海域に来遊するカツオの生物特性

2-1　体長組成解析による来遊群の区分

2-1-1　目的

熱帯から亜熱帯海域で成育したカツオは成長に伴って北方に回遊し，4月には日本近海にまで来遊する．5月頃になると野島崎沖の黒潮前線南側漁場に出現し，その後6月から7月にかけて黒潮前線を越えて混乱水域に北上回遊して，11月まで三陸沖から道東海域で近海竿釣や旋網漁業の漁獲対象になる（Fig. 1）．日本近海への北上経路については，これまでの標識放流結果から黒潮の流路に沿って北上するルート，小笠原から伊豆諸島沿いに北上するルート，伊豆諸島の東側，東経145度付近を北上するルート，さらに，その沖合東経155度付近を北上するルートの4つがあると推定されている（Fig. 2）．

日本近海に来遊するカツオの魚体組成についてはこれまで，1965年以前の測定資料を用いた山中（1950），川崎（1952, 1955），安楽・川崎（1966）らの報告がある．川崎（1952, 1955）によれば東北海域に現われるカツオは，一般に5月から10月にかけて尾叉体長(以後は体長）が45 cmから54 cmに成長する2歳魚が主群であり，9•10月には1歳魚のうちの発生時期の早いグループが現われるとされている．しかし，山中（1950）は1939年から1948年までの5ヵ年におけるカツオの体重組成の季節変化を検討し，これら2つの群のほかに別な群の存在を示唆している．特に6月上旬のものについては体長組成の差を検定して平均体長45.5 cmと49.5 cmの2つの体長群に分れているとした．

川崎（1952, 1955）は1949年，1950年，1951年の8月の体長組成から東北海区には体長51～53 cmの大型群の近海グループと体長47～49 cmの小型群の沖合グループが出現するとした．しかし，これら両グループは毎年出現するとはいえず，1952年には156°Eの沖合まで近海グループ（大型群）が出現し，沖合グループ（小型群）は出現しなかったと述べている（川崎1955）．また，安楽•川崎（1966）は1951年および1958年にはどの年にも出現する2年魚の他に，これよりはほぼ4 cm小さいところにモードをもつ群があわせて出現し，特に，1958年には7月から終漁期までの間，沿岸・沖合の区別なく出現し，主群の2年魚と同じ程度漁獲されたとしている．

このように，東北海域に出現するカツオの体長群構造については，不明な点が残されているにもかかわらず，1960年代以降，東北海域への来遊体長群についてはほとんど論議されていない．そこで，本章では東北近海域に来遊するカツオの体長測定データを整理し体長群構造について検討する．

2-1-2　方法

2-1-2-1　海域区分

東北近海域を川崎（1955）および東北水研（1957）に従って，野島崎SE線，北緯28度，45度線，東経160度線で囲まれる海域とし，その海域をFig. 3に示した．

2-1-2-2　体長測定データ

1971年から1993年までの23年間に東北近海域およびその周辺海域で漁獲されたカツオの体長測定データ361,217尾を月別に整理し検討した．年別月別の測定尾数をTable 1に示した．体長測定は茨城県那珂湊港において毎年4月から11月の期間実施した．

2-1-2-3　多峰形の体長頻度分布の分解

水産動物を対象とした研究では，個体群の多峰形の体長頻度分布を同時出生集団別（コホート別）の体長頻度分布に分解して，それらの時間的な変化から個体群の諸特性値を推定する方法が広く用いられてきている（堤・田中1988，松宮・田中1974）．その一つにグラフ化法によるCassie（1954）の方法がある．堤・田中（1988）はグラフ化法のCassie（1954）およびTaylor（1962）をプログラム化した．ここではこのプログラムを用いて体長階級幅1 cmの月別体長階級別測定尾数を分解して各体長コホートの平均体長，標準偏差，出現比率を求めた．計算された体長コホートの比率を9.9%以下，10.0～29.9%，30.0～49.9%，50.0%以上に区分し，各月別に出現体長コホートの特徴を明らかにし，それをもとにこの海域に来遊するカツオの成長過程を体長群別に検討した．

2-1-3　結果

計算した23年間の各体長コホートの平均体長の月

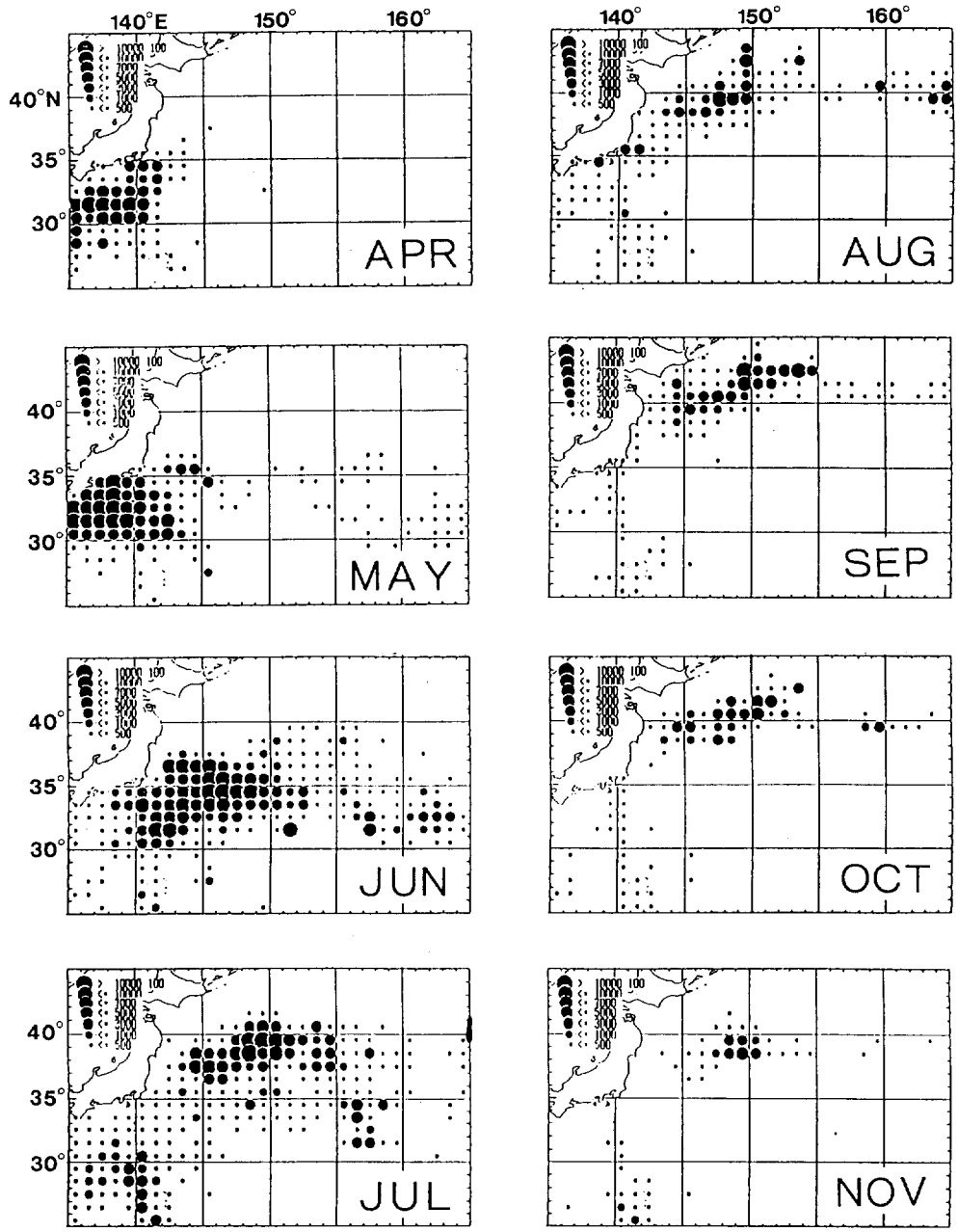

Fig. 1 Monthly distributions of skipjack tuna catch in 1980 by pole and line fisheries in adjacent waters of Japan.

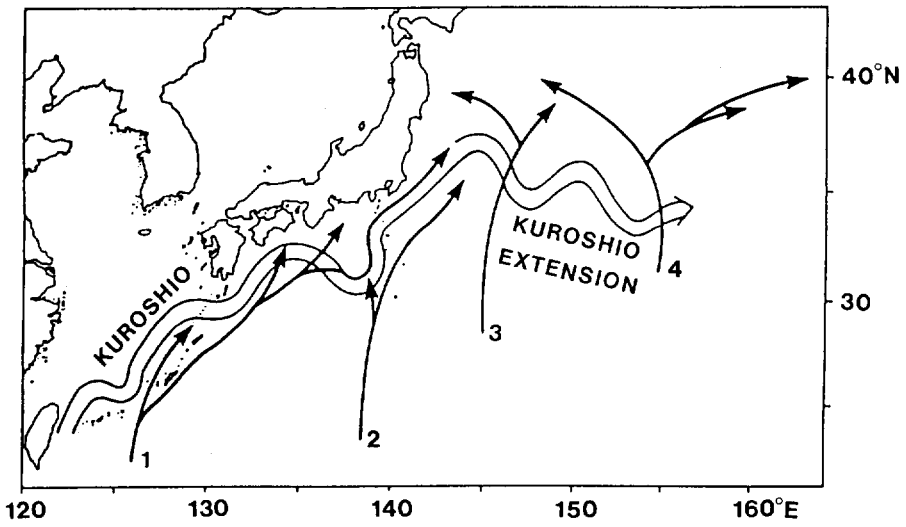

Fig. 2 Northward migratory routes of skipjack tuna estimated from tagging data (After Kawai, 1991).

別推移を Fig. 4 に示した.

2-1-3-1 月別体長組成の分解例

23 年間の体長組成の中で比較的多くの体長コホートが確認される 1981 年を例にして月別体長組成の分解例を示した (Fig. 5).

5 月の体長組成は 43 cm をモードとする体長群と 47 cm をモードとする体長群の双峰型となった. 体長組成の分解を行った結果では, 小型体長群は平均体長 42.9 cm (標準偏差 (以下略) ±1.3 cm) となり大型体長群は平均体長 47.3 cm (±1.6 cm) となる. 比率は小型体長群が 52.0%, 大型体長群が 48.0% とほぼ同じ割合を示した.

6 月の体長組成には 35 cm と 44 cm, 46 cm, わずかではあるが 56 cm の 4 つのモードが認められた. 体長組成の分解結果では平均体長 35.2 cm (±1.4 cm), 平均体長 45.4 cm (±2.4 cm), 平均体長 56.2 cm (±1.9 cm) の 3 つのコホートが得られ, 小型群の方から 8.6%, 90.3%, 1.0% の比率を示した.

7 月の体長組成は 6 月と似た組成を示し, 体長組成の分解結果では比率が 23.4% を示す平均体長 38.2 cm (±2.3 cm) 群, 71.7% を示す平均体長 46.9 cm (±2.6 cm) 群, 4.9% を示す平均体長 52.6 cm (±2.4 cm) 群

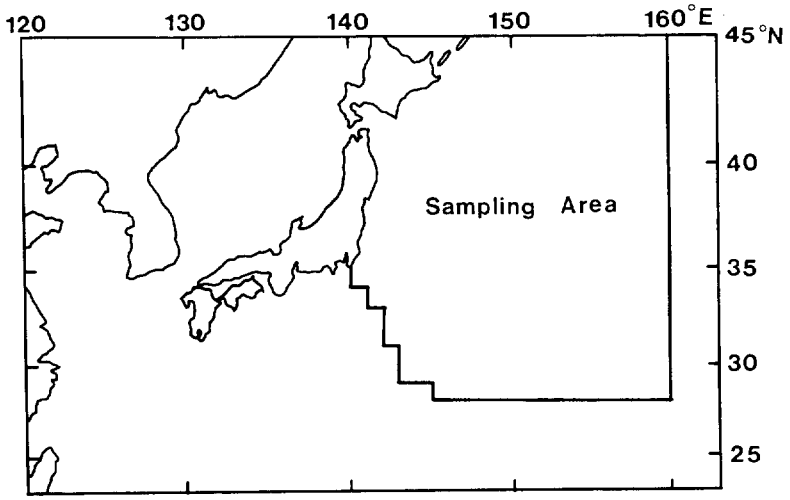

Fig. 3 Sampling area of skipjack tuna in this study 1971 to 1993.

Table 1 Number of sampled skipjack tunas obtained from the northeastern sea area of Japan.

Year	Month								Total
	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	
1971	427	1,346	1,789	1,813	1,558	1,095	460		8,488
1972		1,963	2,259	2,173	1,553	1,976	827		10,751
1973		500	950	2,050	2,003	1,610	1,225		8,338
1974		1,380	1,950	2,002	698	1,000	647	200	7,877
1975	161	800	951	1,300	427	399	350		4,388
1976		800	639	1,509	1,120	961	300		5,329
1977	794	585	1,784	1,915	875	550	875	200	7,578
1978	100	1,249	3,021	2,358	1,883	1,200	1,320		11,131
1979		651	700	1,100	700	799	350	100	4,400
1980	250	1,902	1,750	700	699	450	300		6,051
1981		450	2,126	2,014	848	1,017	1,350	350	8,155
1982	147	1,923	2,781	3,264	4,625	3,535	840		17,115
1983		3,304	7,733	7,230	3,576	3,321	1,916	466	27,546
1984	651	3,170	8,032	10,381	5,168	5,143	1,623	1,002	35,170
1985		2,981	4,829	5,803	2,474	4,434	1,501	198	22,220
1986	497	5,987	4,956	5,365	2,266	2,434	1,647	536	23,688
1987	284	3,105	5,735	5,122	3,265	1,783	1,748	276	21,318
1988		100	2,967	2,640	3,753	1,787	788	174	12,209
1989		1,040	3,059	2,363	2,247	3,981	2,615	766	16,071
1990		884	1,186	2,732	1,304	2,159	1,615	246	10,126
1991		4,899	7,329	4,685	5,942	3,934	2,034	1,474	30,297
1992		1,118	6,483	7,277	7,277	6,150	2,742	2,145	33,192
1993		3,582	7,345	6,864	4,377	3,663	2,796	1,152	29,779
Total	3,311	43,719	80,354	82,660	58,638	53,381	29,869	9,285	361,217

の3群が認められた．

8月の体長組成の分解結果では平均体長39.7 cm (±2.0 cm) 群，48.5 cm (±2.1 cm) 群，52.9 cm (±1.2 cm) 群の3群が認められ，それぞれの比率は44.7%, 52.3%, 3.0% であった．

9月の体長組成では平均体長36.2 cm (±1.9 cm) 群，42.0 cm (±2.0 cm) 群，49.2 cm (±2.8 cm) 群の3群，10月には平均体長42.6 cm (±1.7 cm) 群，49.7 cm (±2.5 cm) の2群，11月には平均体長37.0 cm (±2.2 cm) 群，51.6 cm (±2.0 cm) 群の2群が認められた．

2-1-3-2 成長

1981年の月別体長組成の分解から得られた体長コホートから成長を検討した．5月に平均体長42.9 cmの体長コホートは6月には45.4 cm, 7月には46.9 cm, 8月には48.5 cm, 9月には49.2 cm, 10月には49.7 cm, 11月には51.6 cmの平均体長をもつ体長コホートとしてその成長を追うことが出来る．また，それよりも7～10 cm小型で6月に平均体長35.2 cm, 7月に38.2 cm, 8月に39.7 cm, 9月に42.0 cm, 10月に42.6 cmの平均体長を示すグループも比較的明瞭に追跡することができる．その他では9月に36.2 cm, 11月に37.0 cmの平均体長を示すグループ，5月に47.3 cm, 7月に52.6 cm, 8月に52.9 cmグループも確認することができる．

2-1-3-3 1971年から1993年までの月別体長組成の分解と体長群の区分

前項の1981年の例と同様にして，1971年から1993年までの月別体長組成の分解と体長群の区分を行った．分解された各体長コホートの出現比率を9.9%以下，10.0～29.9%, 30.0～49.9%, 50.0%以上に分けてFig. 4に示し，各体長グループの成長を推定し，出現時期の早いグループからA, B, C, D, Eの名前をつけて区分した．

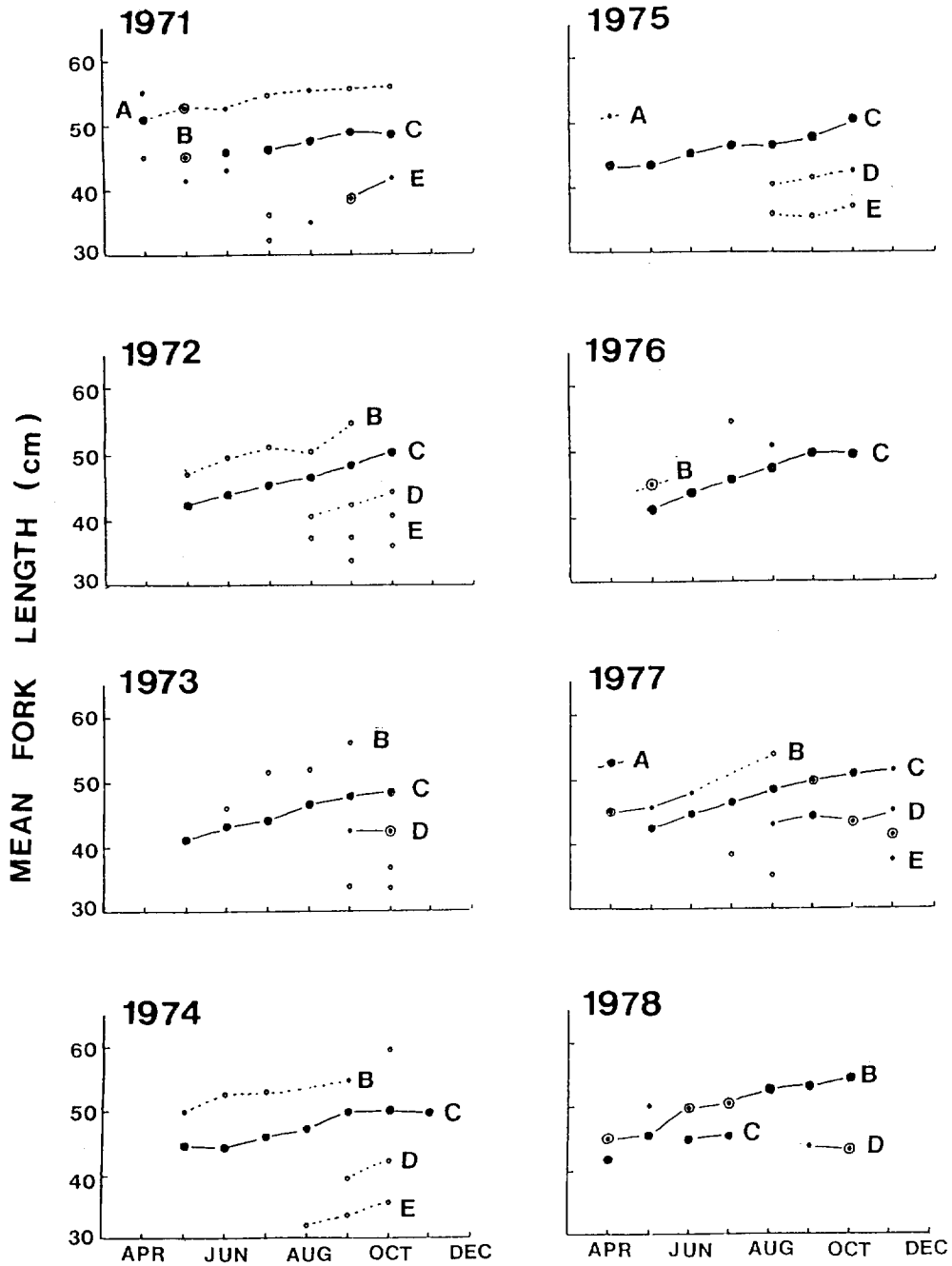

Fig. 4a Monthly changes in the mean fork length of skipjack tuna and the cohorts (A-E) classified by fork lengths (Ratio of length cohort ; • : below 9.9%, ◎ : 10.0-29.9%, ◉ : 30.0-49.9%, ● : above 50.0%).

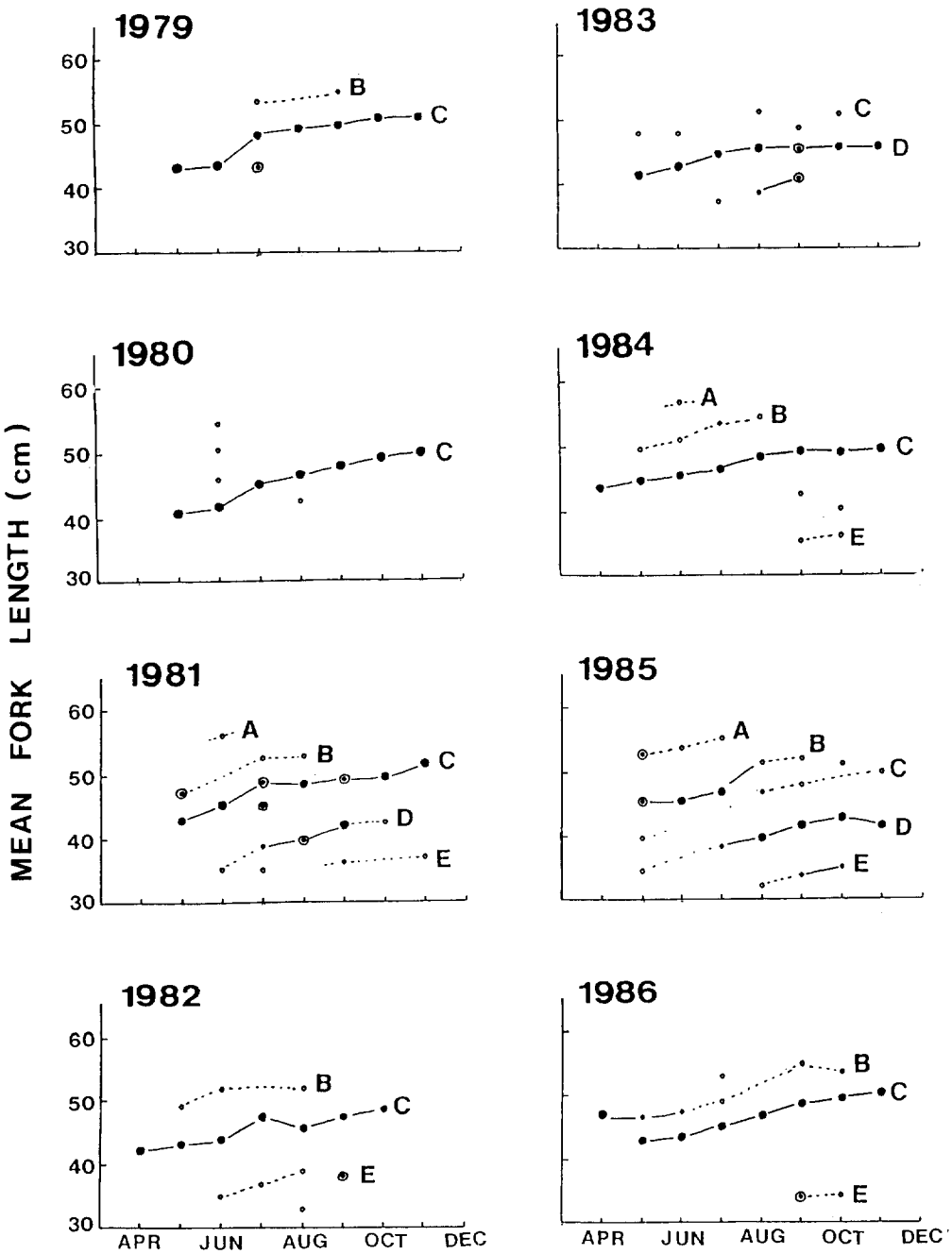

Fig. 4b (Continued)

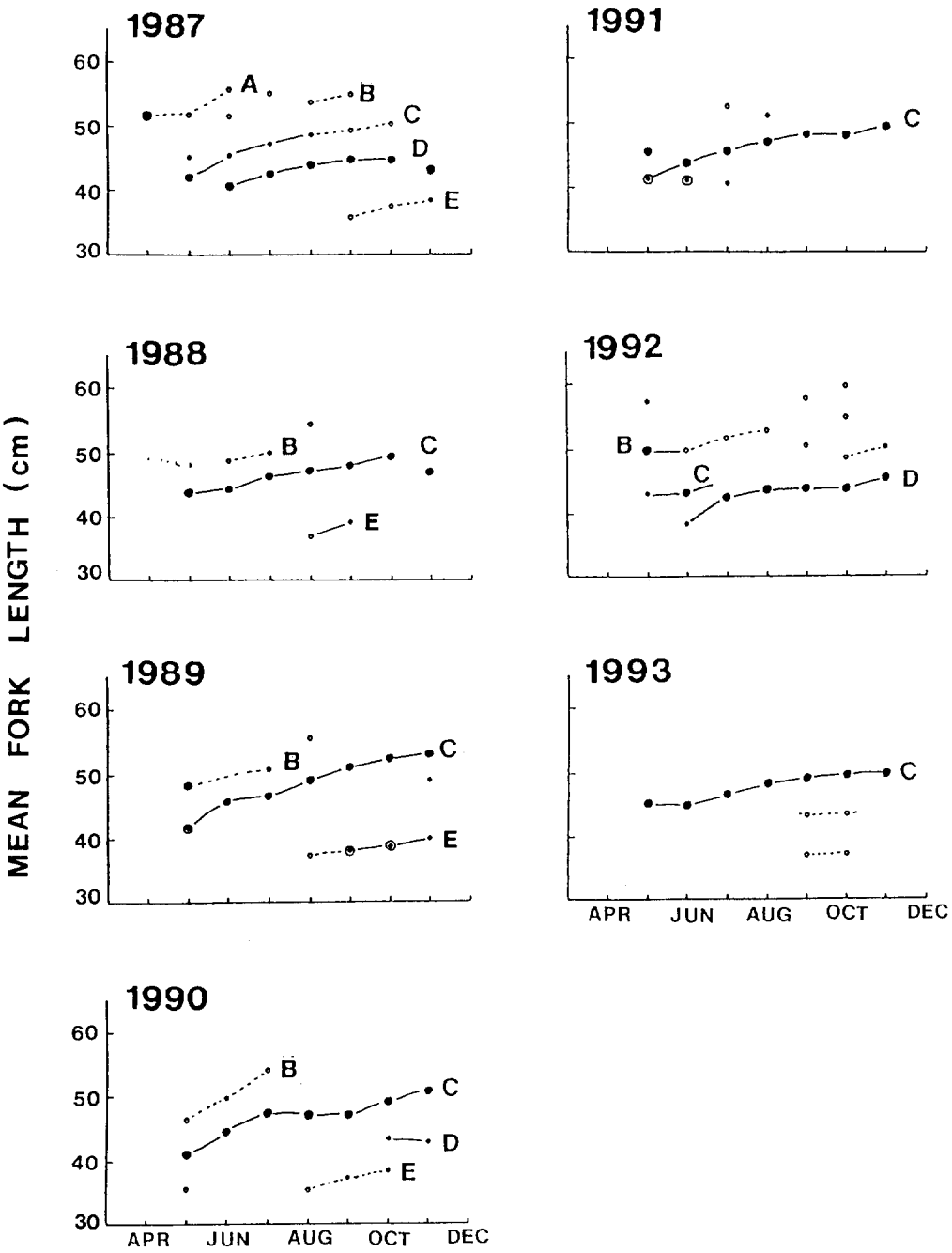

Fig. 4c (Continued)

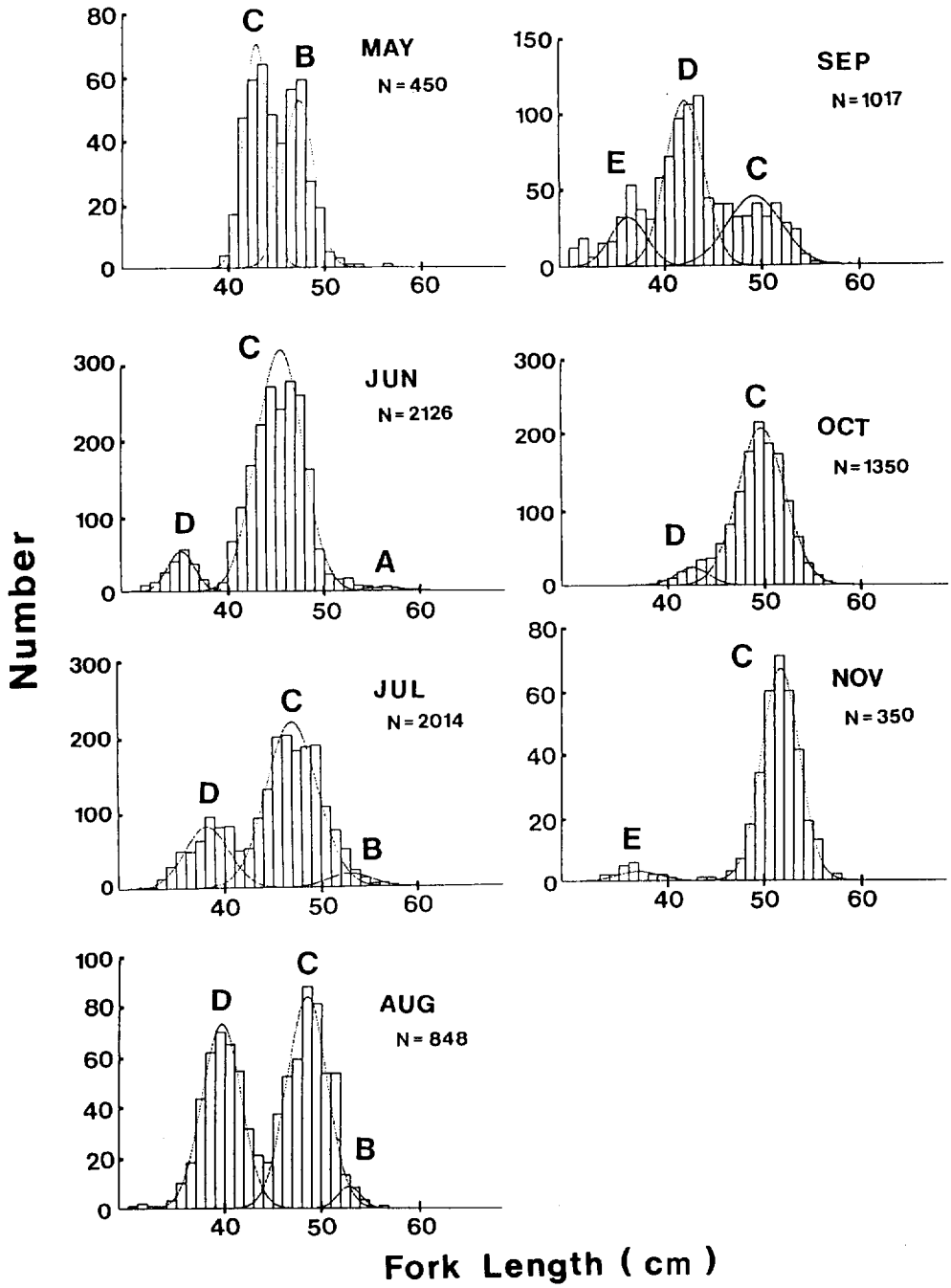

Fig. 5 The cohorts (A-E) classified by fork length.

2-1-4　考察

2-1-4-1　東北海域に来遊する5つの体長群

23年間の月別体長組成を検討した結果，東北海域に来遊するカツオには発生時期を異にする次の5つの体長群が存在すると考えられた（Fig. 6）．

A群：4月に顕著に出現する年が多く，すでに平均体長51～54 cmの群である．4月から8月までそのモード推移から成長を追う事が出来る年もあるが，夏季以後はほとんど出現が認められないことから，早期に東北海域から姿を消すと考えられる．この群にあたる個体のなかには生殖腺がやや発達した個体が認められることから(後述)，他の群と異なり成魚としての性格を持っている可能性が高い．また，この群は体長モードの推移から，前年のC群に引続く群であろうと思われる．東北海域に出現するこの群の数量はごく少ないことから，前年のC群のうち，そのごく一部が翌年A群としてふたたび東北海域に来遊するものと考えられる．

B群：4, 5, 6月に45～48 cmの体長モードを示し，10月には53～54 cmにまで成長すると考えられる．1978年にこの群が来遊の主群となっている．この年にもC群に相当する魚群は並行して出現している．前年の1977年にD群の出現が顕著な時には，次年の1978年にB群が比較的多く出現していることなどから，B群は前年のD群が成長したものであり，B群はC群とは相対的に独立した成長過程をもつ群であろうと思われる．川崎（1965）は1951年から1959年の期間の東北海区の体長モードを検討し，体長モードの増加の模様が年によって非常に異なることを報告している．しかし，B, C群の存在を仮定すれば，この体長モードの増加の著しい変動は，B群とC群の体長モードを混同することによって起因したものであると思われる．

C群：5, 6月に42～44 cmの体長モードを示す群であり，10月には50～52 cmにまで成長すると考えられる．1970年代以降での主群として漁獲対象となっている．この群の来遊水準が高い年(たとえば1979年, 1980年）にはしばしば6月から7月にかけて，この群の体長モードの月別推移に不連続性が認められる．この不連続性は主黒潮前線南側から混乱水域に漁場が移動する際に起っている．

D群：この群は8月以降出現し，9月で41～45 cmモードを示す．この群が主群となる年は少ないが，1977, 1981, 1983, 1985, 1987, 1992年に比較的顕著な出現を示している．体長モードの推移から，この群は翌年のB群につながる群と思われる．標識再捕魚の成長追跡でもこのことは確かめられる（後述）．

E群：この群も8月以降に出現が認められる．この群の体長モードはばらつきが大きく成長過程を単純に追うことは難しいが，9月でおよそ37～39 cmモードを示す．

30 cm台に出現する体長モードにばらつきが多いことに関連して，川崎（1964）は，40 cm以下の若年魚の場合は発生時期の違いによって群が分離されており，それが異なる時期に来遊し，まとまって漁獲されるためとしている．また森（1972）は，仔稚魚の出現状況からカツオは少なくとも体長15 cmに達する以前の稚魚期には表面水温24°C等温線よりも高温側の海域に滞留しており，その後，体長35 cmに達しないある段階で急に，あるいは成長に伴って徐々に同等温線よりも低温側の海域へもその分布を拡大するとしている．おそらく，冬季から夏季にわたる産卵(永沼, 1979)に由来する多様な体長組成をもつカツオのうち，ある発育段階に達した魚群から徐々に北方へ回遊し，その一部が東北海域へ姿を現すものと考えられる．

以上，東北海域に出現するカツオの成長について，5つの群に分けて考察をした．冬季は夏季ほど大きな成長はしないと考えると，体長モードの推移および後述

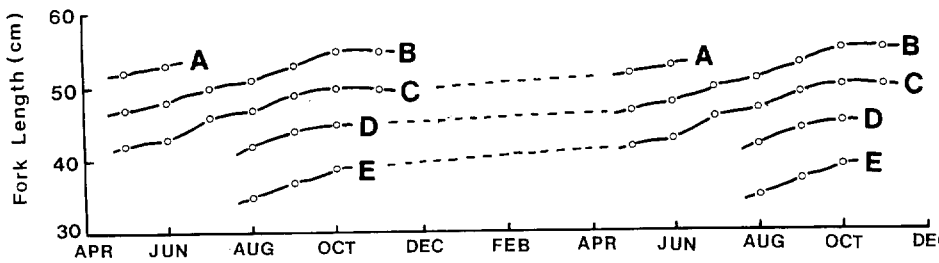

Fig. 6　Growth model of the five cohort groups (A-E) of skipjack tuna classified by fork length.

の標識再捕魚の成長追跡から，年を越えてD群→B群，E群→C群→A群という成長過程を通ると考えられる．この推定が正しいとすると，一つの年級内には少なくとも成長過程を異にする2つのグループが存在することになる．カツオについて，同一年令内におけるいくつかの発生群の存在と，それぞれの成長過程を論じた報告は見当らない．しかしカツオの産卵期が夏季から冬季にわたる長期のものであることは，成熟度および仔稚魚の出現状況などから，これまでに何人かの研究者によって指摘されてきた（丹羽1973，永沼1979，森1972，浅野・田中1972）．今回示した同一年令内における2つのグループの存在は，おそらくカツオの冬季発生グループ，夏季発生グループに由来するものであろう．このように東北海域には同一年令内における2つの発生グループに由来すると思われる5つの体長群が時期をずらせながら来遊しており，これらの体長群の来遊を想定すると山中（1950）および安楽・川崎（1966）が示した2つの体長群，川崎（1952）がその存在を指摘した近海群および沖合群は，すべてB群とC群に相当する群として矛盾無く説明することができる．

2-2 各体長群の南北回遊と黒潮前線

2-2-1 目的

西部太平洋におけるカツオ漁場は赤道周辺水域から混乱水域まで季節的な相違はあるものの連続して形成される．亜熱帯反流域付近から日本近海へカツオが北上回遊する過程は漁場推移や標識放流調査で次第に明らかになってきている．しかし，夏季に混乱水域まで北上したカツオが南下移動回遊する過程については，不明な点が多く，しかも来遊体長群ごとにその南北回遊生態を検討した報告はない．

カツオの標識放流は1967年より水産庁の委託事業として各県水産試験場や水産高校の調査船などによって年間数千尾の単位で実施され，移動回遊生態の解明に貴重な資料を提供してきた．しかし，そこではおもに春の北上回遊時期に放流されるものが多く，南下回遊の実態については不明のままであった．東北海域に来遊する各体長群の南北回遊生態を明らかにすることは，カツオの成長，発育とくに成熟過程と回遊機構が黒潮前線域や混乱水域における漁場形成とどの様な関連性を持っているかを明らかにするうえで重要な課題であるといえる．

ここでは，秋季の標識放流事例を解析し，各体長群の南北回遊過程と黒潮前線乗り越えの関係を検討する．

2-2-2 方法

B・C群の標識放流調査は1978年から1981年の4年間に茨城県水産試験場調査船水戸丸で実施した．放流時期は8月から10月で，延べ15回1,588尾を標識放流した．標識は長さ140 mm，直径3 mmのダート型標識を用いた．放流魚の大きさは放流時に同時に釣獲された魚体をできるだけ50尾以上測定して推定した．再捕獲はおもに民間漁船によってなされ，各水揚げ市場や各県水産試験場を経由して再捕獲年月日，再捕獲位置，体長，体重値などが報告された．

D群の移動状況の解析には，1992年9月に静岡県水産試験場調査船駿河丸によって行われた標識放流結果（静岡水試1993東北水研1993, 1994）を使用した．

2-2-3 結果

2-2-3-1 B・C群の南下移動と再来遊

水戸丸を用いて実施した標識放流位置，放流尾数，放流時の平均体長・体重，放流群別再捕獲率をTable 2, Fig. 7に示した．4年間の合計放流尾数は1,588尾で再捕獲尾数は80尾，再捕獲率は5.0%であった．

Table 2 Release and recapture data from 1978 to 1981 of skipjack tuna which seemed to belong to the "B" and "C" size groups.

Date		Location		N	Body size		Recapture	
		Lat (N)	Long (E)		F.L. (cm)	B.W. (kg)	N	%
Sep. 23.	1978	41°01′	161°02′	100	52.9	3.1	4	4.0
Sep. 24.		40°01′	164°12′	7	—	—	—	—
Sep. 27.		42°42′	176°31′	93	—	—	—	—
Oct. 2.		40°20′	159°28′	300	55.9	3.5	1	0.3
Sep. 5.	1979	43°01′	156°14′	119	57.0	3.5	2	1.7
Sep. 5.		43°06′	156°23′	141	54.5	3.2	1	0.7
Sep. 8.		40°44′	166°18′	24	51.0	2.7	—	—
Sep. 8.		40°46′	166°10′	100	51.0	2.7	1	1.0
Sep. 26.		40°46′	167°06′	6	—	3.3	—	—
Sep. 14.	1980	40°42′	178°30′	60	49.0	2.5	1	1.7
Sep. 18.		40°02′	167°50′	40	50.0	2.5	1	2.5
Aug. 25.	1981	39°45′	146°11′	497	47.0	2.1	65	13.1
Aug. 25.		39°44′	146°10′	69	40.0	1.3	4	5.8
Sep. 8.		41°15′	175°41′	2	48.0	2.1	—	—
Sep. 20.		42°09′	166°14′	30	44.0	1.9	—	—
				1538			80	5.2

放流群で最も多く再捕獲された群は1981年の8月25日放流群で放流尾数497尾に対し再捕獲尾数は65尾，再捕獲率は13.1%に達し，時期的に連続した再捕獲結果が得られた．放流魚の大きさは放流群によりやや異なるが，1978, 1979年では体長50～60cm, 1980年では48～53 cm, 1981年では146°Eの近海域放流群が35～49 cm, 160°E以東の沖合域放流群が43～51 cmの体長群であった(Fig. 8)．1981年放流魚には一部D群に相当する魚も含まれるが，ほぼ大半がBおよびC群に相当する魚であった．

短距離，短期間での再捕獲例を除き，再捕獲結果，移動状況をTable 3, Fig. 9, Fig. 10に示した．混乱水域で秋期に放流された標識魚は放流年の10月から翌年の1月には亜熱帯反流域にまで南下し，さらに，2～3月には南赤道反流域にまで南下して再捕獲された．4～6月の北上時期には30°39′Nから34°25′Nの範囲の

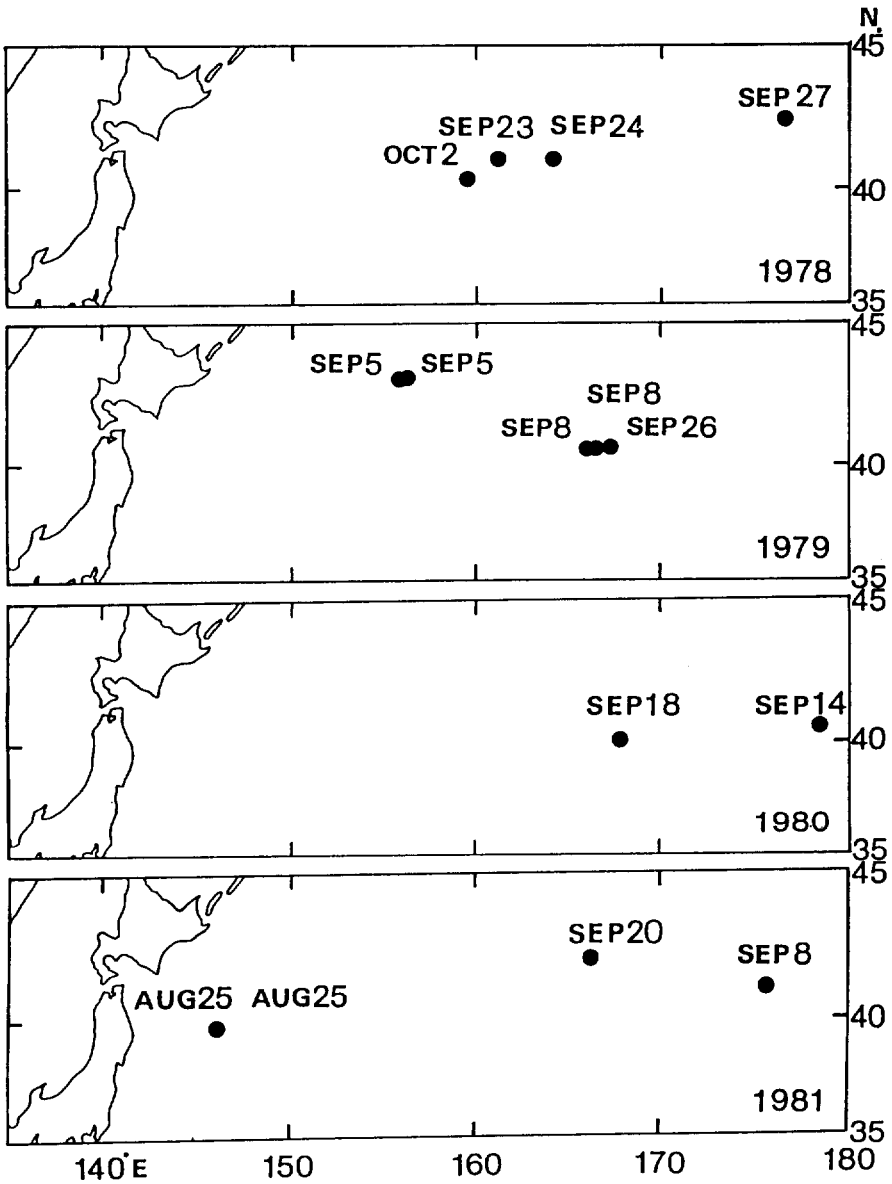

Fig. 7 Locations of release of skipjack tuna (1978-1981).

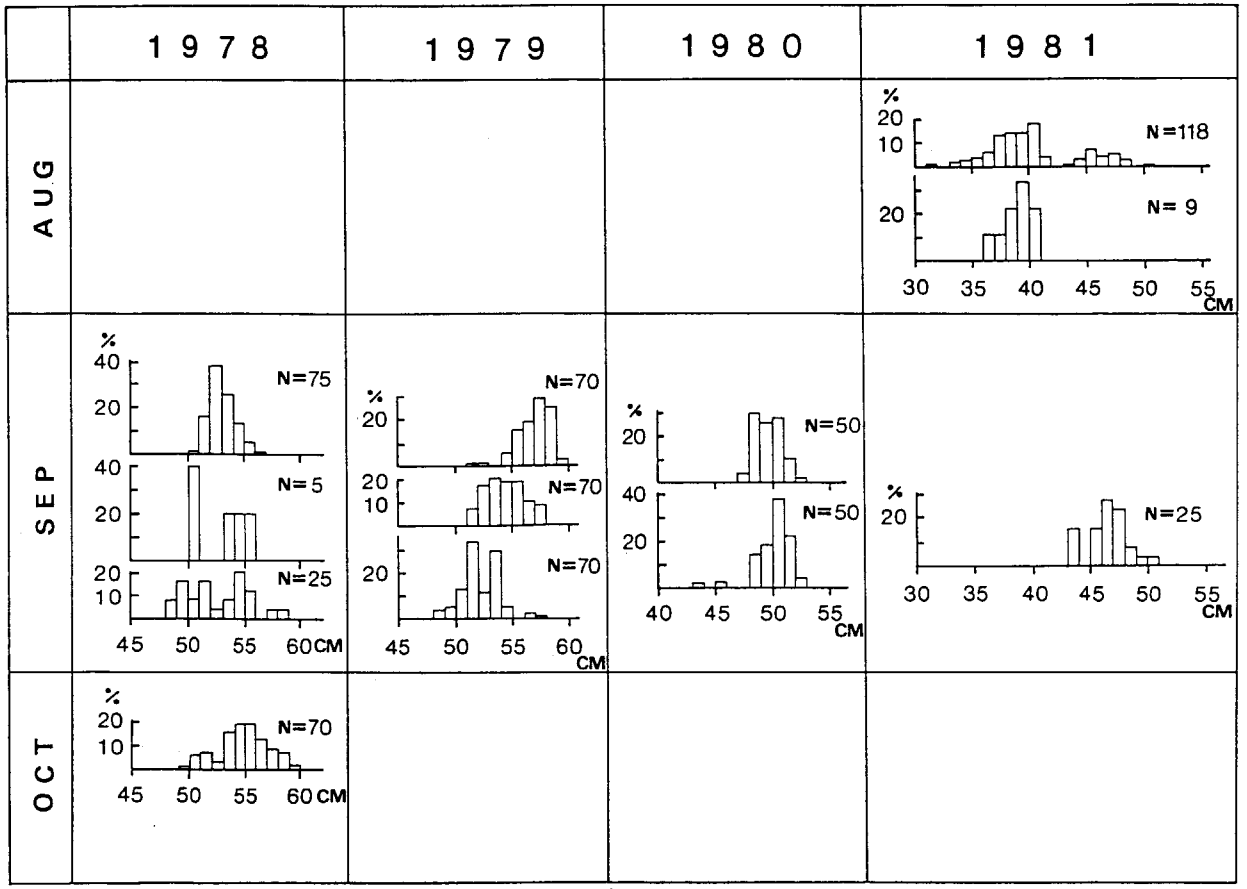

Fig. 8 Length composition of skipjack tuna tagged and released from 1978 to 1981. Most of the fish tagged belong to the "B" and "C" size groups except for some fish released in August 1981.

Table 3 Recapture data of skipjack tuna after more than 30 days from release.

Release			Recapture					
Date	Lat. (N)	Long (E)	Date	Lat. (N)	Long (E)	F.L (cm)	B.W (kg)	Days after release
Sep. 23. 1978	41°01′	161°02′	Apr. 6. 1979	33°09′	139°25′	53.0	3.2	196
			Jun. 20. 1979	21°15′	164°52′	58.0	3.4	271
			Jul. 6 1979	18°20′	144°50′	42.5	3.0	287
			Sep. 27. 1979	17°36′	170°48′	70.0	8.0	370
Oct. 2. 1978	40°20′	159°28′	Jun. 23. 1979	19°16′	165°07′	58.0	3.2	265
Sep. 5. 1979	43°01′	156°14′	Oct. 13. 1979	41°38′	155°56′		3.5	39
			Apr. 19. 1980	30°39′	140°36′	66.5	5.7	228
Sep. 5. 1979	43°06′	156°23′	Oct. 7. 1979	41°52′	152°30′	51.5	2.4	33
Sep. 8. 1979	40°46′	166°10′	Jun. 4. 1980	33°38′	146°10′	54.2	2.8	271
Sep. 14. 1980	40°42′	178°30′	Jun. 15. 1981	34°25′	178°26′		3.0	275
Sep. 18. 1980	40°02′	167°50′	Jun. 11. 1981	05°14′	143°02′	57.9	4.2	267
Aug. 25. 1981	39°45′	146°11′	Oct. 13. 1981	18°07′	142°55′	44.5	1.8	50
			Nov. 18. 1981	18°28′	144°21′	47.0	1.8	86
			Nov. 27. 1981	15°35′	135°31′		3.0	95
			Jan. 15. 1982	17°45′	145°04	57.0	3.6	144
			Feb. 20. 1982	00°24′	142°45′	49.7	2.6	180
			Mar. 20. 1982	02°11′	148°17′	55.1	3.6	208
			Mar. 30. 1982	18°32′	151°40′		4.0	218

黒潮前線南側海域に再来遊し，6月から9月には再び亜熱帯反流域で再捕獲がなされている．黒潮前線を越えて北側での再捕獲例はなかった．

2-2-3-2 D群の南下移動と再来遊

駿河丸が実施した標識放流位置，体長・体重範囲，放流尾数をTable 4に示した．標識放流魚は体長43 cmにモードをもつ典型的なD群主体の放流群であった(Fig. 11)．再捕獲魚の経過日別の体長変化をFig. 12に示した．放流時に43 cmの体長モード群であった標識魚は翌年の春季北上期にあたる5～6月にはB群に相当する体長45～50 cmの個体として再捕獲された．放流当年は大半が東北海域において再捕獲されたが，10月に伊豆近海，11月に高知県沿岸で再捕獲され，列島線沿いに西側に移動した個体も認められた．翌年になると4月までは房総沖から日向灘沖の黒潮内側域で再捕獲され，5月には伊豆諸島の西側域で多数再捕獲された．6月には黒潮前線付近で集中して再捕獲された後，7月，8月，9月には前線北側まで北上して再捕獲された．B・C群主体に放流した水戸丸放流群と比較して30°N以南での再捕獲は少なく，また，水戸丸放流群が放流翌年に黒潮前線を越えて北上した個体がなかったのに対し，駿河丸放流群は，前線北側への顕著な北上傾向が認められた (Fig. 13, Fig. 14)．

2-2-4 考察

2-2-4-1 標識再捕獲魚からみた5群の成長過程

放流翌年に多量の再捕獲魚が得られた駿河丸の放流魚の成長追跡によれば，秋に体長43 cmほどのD群は翌年の春期北上期となる5～6月には体長45～48 cm

Table 4 Data on the release of skipjack tuna belonging to the "D" size group.

Date of release	Location		N	Body size	
	Lat (N)	Long (E)		F.L (cm)	B.W (kg)
Sep. 20. 1992	39°44′	143°35′	300	42-51	1.6-2.7
21.	38°23′	143°31′	140	41-47	1.5-1.8
21.	38°23′	143°34′	867	42-46	1.4-1.8
		Total	1307		

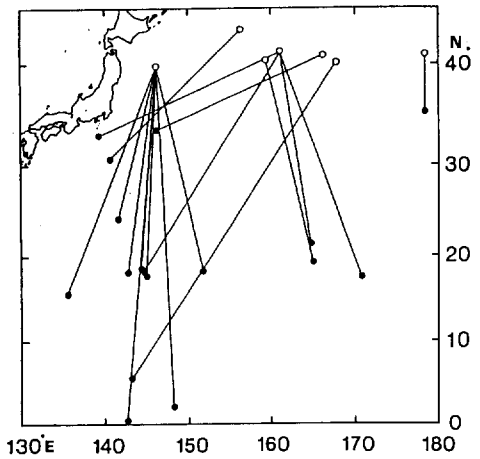

Fig. 9 Southward migration of tagged skipjack tunas released off the northeastern coast of Japan (○: Location of release, ●: Location of recapture).

となったことから，D群は翌年にはB群に成長するとして良いであろう．したがって前項で推定したとおり，5つの体長群はE群→C群→A群，D群→B群の成長過程をとると考えられる．

2-2-4-2 B・C・D群の再来遊と黒潮前線の乗り越え

B・C群では冬季から翌年の春季にかけて亜熱帯反流域から南赤道海流域まで南下回遊した個体が顕著に認められたのに対して，D群では冬春季にそれらの海域まで南下回遊した個体は認められなかった．B•C群は秋季に体長はすでに生物学的最小形を越えて成魚の範疇に入っているのに対し，D群は生物学的最小形を越えた体サイズには完全になっていない．成魚の体サイズに達した秋季のB・C群は長距離の南下回遊を行って高水温域に入り，おそらく冬季から春季に産卵活動に加わるものと思われる．C群の一部の個体は翌春，A群として黒潮前線の南側海域にまで再来遊するが，成熟過程に入る個体が多いことから，黒潮前線を越えて低水温域である混乱水域には北上移動しないものと思われる．

それに対してD群は未成魚として日本の近海域において越冬生活を送り，翌年春季にB群となって前線南側水域に出現し，さらに前線を越えて北上回遊するものと考えられる．また，D群では10月から翌年4月までの南下，越冬期に西日本の黒潮内側域，それもごく近海域における再捕獲がめだった．このことから未

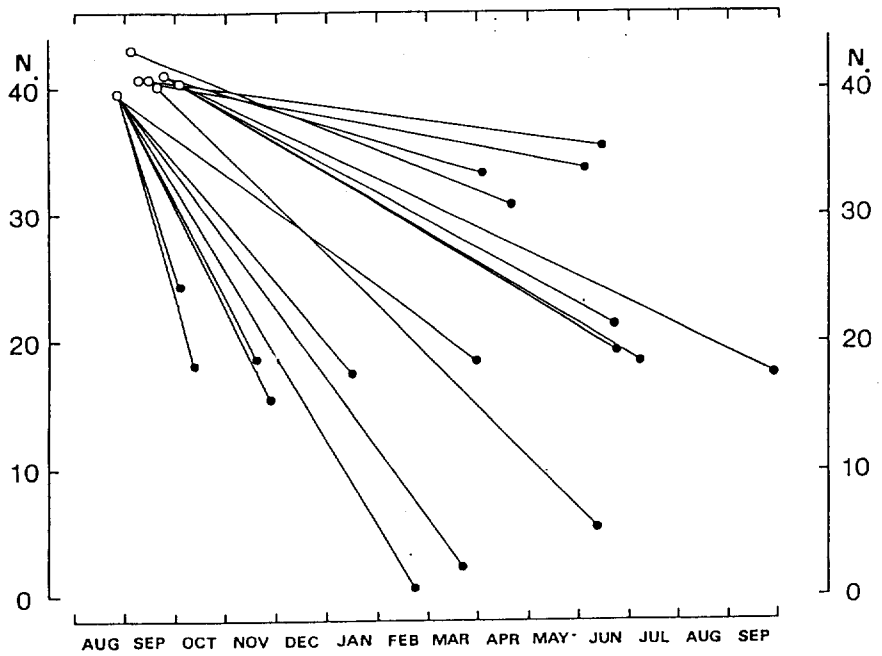

Fig. 10 Location of recapture in degrees latitude against month of tagged skipjack tunas released off the northeastern coast of Japan (○: Location of release, ●: Location of recapture).

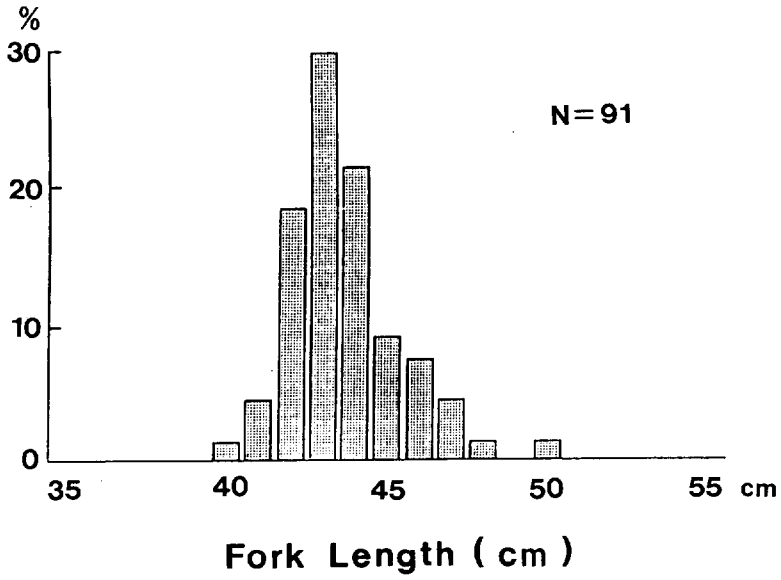

Fig. 11 Fork length composition of tagged skipjack tuna.

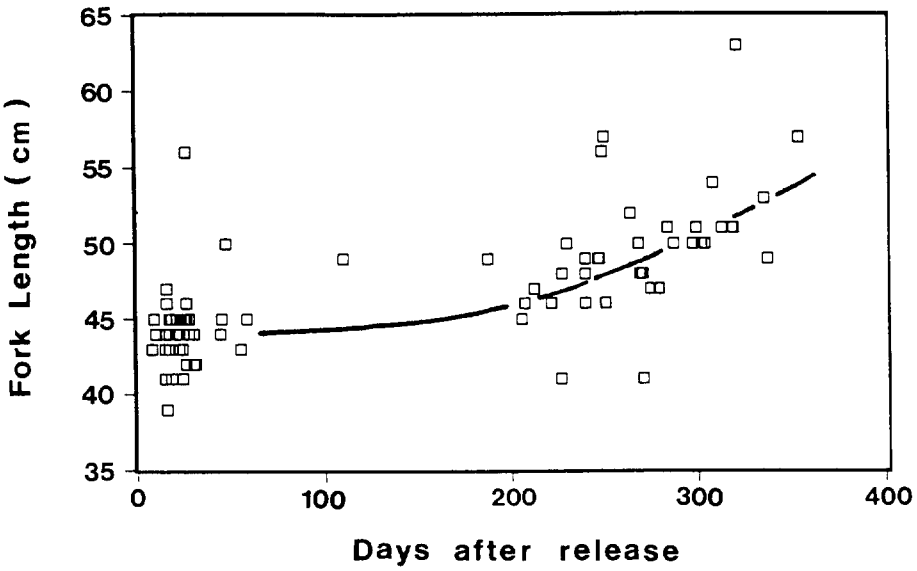

Fig. 12 Growth estimate of tagged skipjack tunas. It is noted that the skipjack tuna belonging to the "D" size group grew to the "B" size group by the following year.

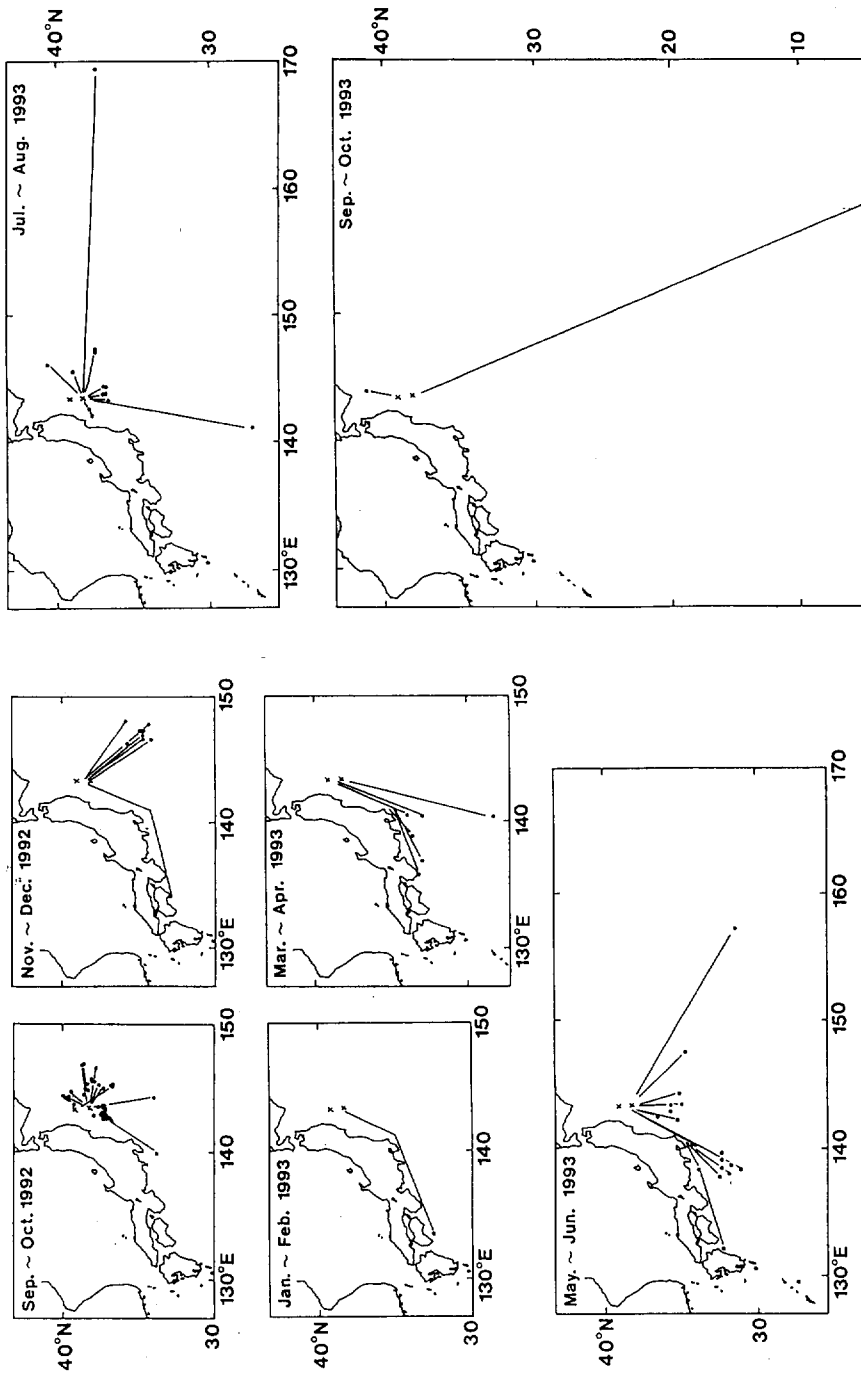

Fig. 13 Results of the tagging experiment for skipjack tuna belonging to the "D" size group (×: Location of release, ●: Location of recapture).

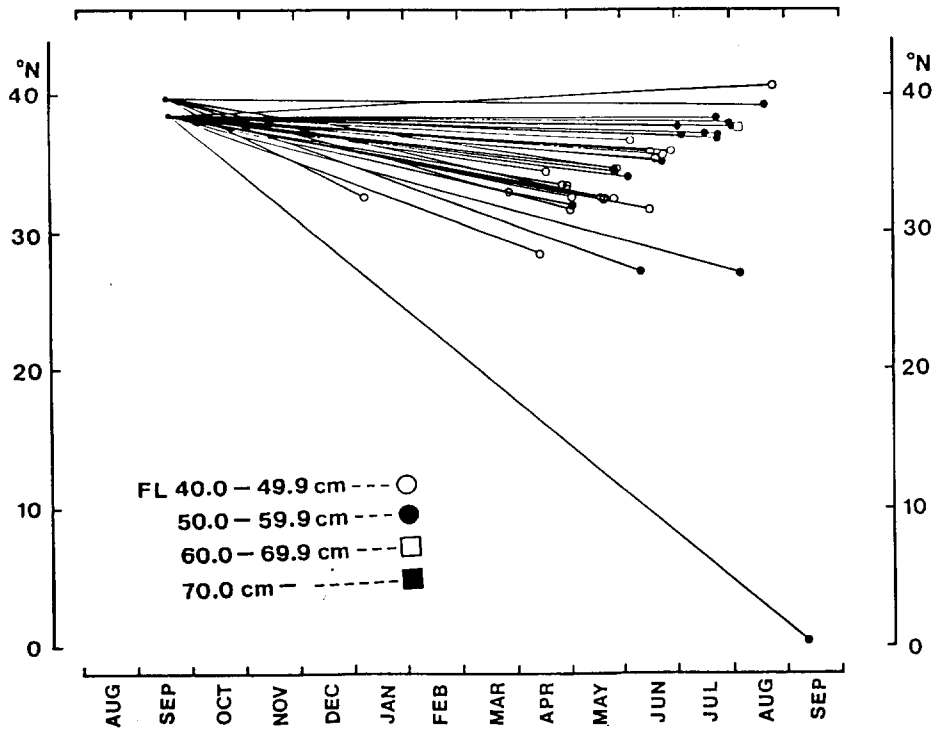

Fig. 14 Location of recapture in degrees latitude of the "D" size group skipjack tuna tagged and released off the northeastern coast of Japan.

成魚の一部は南下回遊経路として黒潮内側域を選択している可能性が高い．この海域はマイワシ，カタクチイワシ，サバなどの越冬，再生産域であることからも，捕食者としてのカツオ未成魚にとって好適な越冬域であると考えられる．

2-3　カツオの生物特性値の変化と黒潮前線との関係

2-3-1　目的

魚群の回遊行動はしばしば，その生理的な要求によって規定される．同じ物理的な環境であっても生理的に異なる魚群によっては異質なものとしてとらえられ，したがって，異なる行動が選択される．回遊行動には，偶然的なものと生理的な要求にもとづいた必然的なものが認められる．生理的な要求の表現形式としては，しばしば生物特性値 (Biological index) が用いられる．東北海域に来遊するカツオの回遊行動について，その生物特性値の季節的，位置的変化や潮境環境との関係において論じられた報告は少ない．そこで，本項では，東北近海域および伊豆諸島海域に来遊するカツオの生物特性値と前線との関係について検討する．

2-3-2　方法

生物測定調査を 1991 年および 1992 年に茨城県那珂湊港において実施した．市場での測定調査は両年で体長 64,642 尾，体重 6,829 尾について実施し，他に 996 尾の標本魚を採集して体長，体重，内臓除去体重，生殖腺重量，腸間膜脂肪重量，肝臓重量を測定した．1992 年の生物データには伊豆近海における測定資料（森ら 1994）を加えた．各生物特性値は以下の式に従って計算し，月別，体長別，緯度別に比較検討した．

生殖腺重量指数 (gonad index : GI)

$$GI = 10^4 \times GW / FL^3$$

肥満度 (condition factor : $CF(a)$)

$$CF(a) = 10^3 \times BW(a) / FL^3$$

内臓除去肥満度 (condition factor : $CF(b)$)

$$CF(b) = 10^3 \times BW(b) / FL^3$$

肝臓重量指数 (liver index : LI)

$LI = 10^3 \times LW/BW$

腸間膜脂肪重量指数（fat index：FI）

$FI = 10^4 \times FW/BW$

FL	：尾叉長	fork length (cm)
BW_a	：体重	body weight (g)
BW_b	：内臓除去体重	body weight (g)
GW	：生殖腺重量	gonad weight (g)
LW	：肝臓重量	liver weight (g)
FW	：腸間膜脂肪重量	fat weight (g)

黒潮前線の位置は気象庁海洋旬報の水深100 m層水温図から村上（1993）の月別基準水温に従って位置を読み取った．

2-3-3 結果

2-3-3-1 体長組成

前節に従い東北海域に来遊するカツオの体長群をA～Eまでの5つの群に区分した．1991年の体長組成は5月にはB•C群の双峰型の組成を示し，その後は典型的なC群主体の組成を示した．1992年は5月にはA群が，6月にはC群が主であり，7月以後はD群が主体となった．

2-3-3-2 北上回遊期における生殖腺熟度指数と黒潮前線

1991年5月から8月において伊豆海域と東北海域から得られた生殖腺熟度指数を緯度別に整理してFig. 15に示した．図には概略的な黒潮前線の位置と最も北上して漁獲されたカツオの位置を示した．永沼（1979）によれば，雌ではGI：4.0以上が半熟，GI：6.0以上が成熟，GI：8.0以上が完熟と区分される．5月，6月では31°N以南の海域に分布するカツオではGIが6.0以上を示す個体の出現が認められるが，黒潮前線近くまで北上した個体については4.0以下が大半である．6月にはすでに黒潮前線を越えて混乱水域に北上

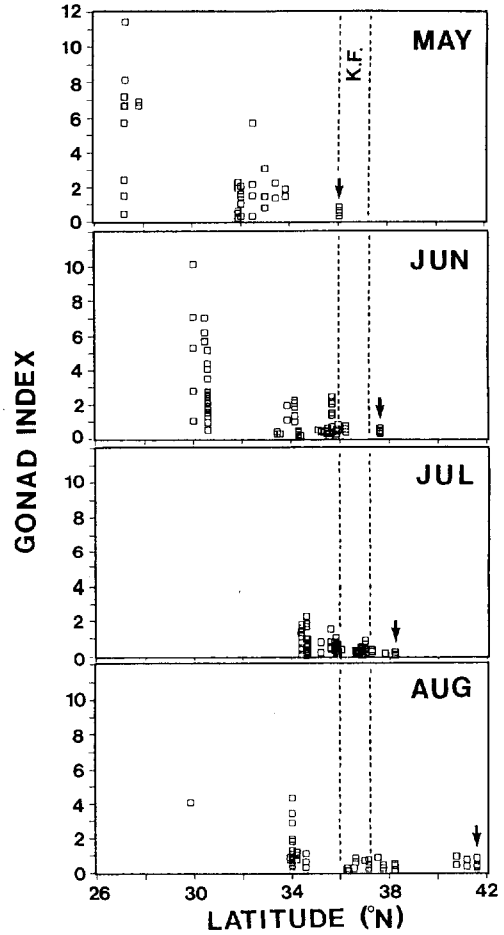

Fig. 15 Gonad index of northward migrating skipjack tuna. Only immature skipjack tunas passed through the Kuroshio Front (↓: The closest location of north in latitude of northward migrating skipjack tuna).

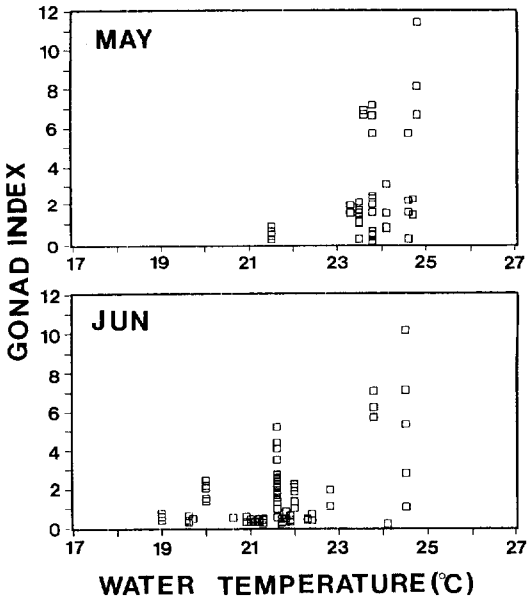

Fig. 16 Relationship between gonad index and surface water temperature of fishing grounds for northward migrating skipjack tuna.

した個体が認められ，7月にはさらに北上して38°N付近に達し，8月には42°N付近まで北上している．黒潮前線を越えて混乱水域に北上した個体のGIはすべて1.0以下を示した．

2-3-3-3　生殖腺熟度指数と水温環境

GIが4.0以上の個体が出現した5月と6月の生殖腺熟度指数と表面水温の関係をFig. 16に示した．GIが4.0以上となるのは5月では23°C以上，6月では21°C以上であり，GIが8.0以上の完熟個体が出現する水温域は5月，6月とも24°C以上であった．

2-3-3-4　生物特性値と黒潮前線

黒潮前線の「乗り越え」時期にあたる6・7月の生物特性値を緯度別に整理し，分布緯度の変化にともなう生物特性値の変化を明らかにした．とりあげた生物特性値は体長，肥満度，内臓除去肥満度，肝臓重量指数，腸間膜脂肪量指数である（Fig. 17）．

体長（FL）

6月では35°N付近に体長45 cm以上の個体の出現が認められるが，38°N以南では大半が体長40～44 cmである．38°N以北では体長45～47 cmとやや大きな個体である．詳細に検討すると36°N付近の個体よりも37°N付近の個体の方がやや大きい傾向が認められる．7月における緯度別体長では37°N付近を境に南側が小型，北側が大型と明瞭に差が認められる．

肥満度（CFa）

6月，37°N以南ではCF：20以下の個体，以上の個体の両方とも広く分布するのに対し，37°N以北ではCF：20以下の個体はきわめて少なく大半がCF：20以上の個体である．7月も同様の傾向が認められ，37°N付近を境に北側ではCF：20以上の個体の割合が極めて多い．

内臓除去肥満度（CFb）

6月，37°N以南ではCF：18以下の個体，以上の個体とも広く分布するのに対し，37°N以北ではCF：18以下の個体はきわめて少なく大半がCF：18以上の個体である．7月も同様の傾向が認められ，37°N付近を境に北側ではCF：18以上の個体の割合が極めて多い．

肝臓重量指数（LI）

6・7月とも37°N以南ではLI：12以下の個体，以上の個体とも出現するのに対し，37°N以北ではLI：12以下の個体は出現していない．

腸間膜脂肪量指数（FI）

6月，37°N以南ではFI：3以下の個体，以上の個体とも出現するのに対し，37°N以北ではFI：3以下の個体の割合は減少し，大半がFI：3以上の個体である．7月には37°N以南では大半がFI：3以下であるのに対し，37°N以北では逆に大半がFI：3以上である．

以上のように6・7月に漁獲されたカツオの各生物特性値はともに37°N付近を境として南側と北側で明らかな差が認められた．

2-3-3-5　平均肥満度別魚群の水平分布と黒潮前線位置

魚群の肥満度平均値の水平分布と黒潮前線位置との関係を調べるために，気象庁海況旬報の6月における100 m層水温図上に群平均肥満度を19.9以下と20.0以上に分けてプロットした．村上（1993）によれば6月の黒潮前線の指標水温は18°Cであることから，これを黒潮前線とすると，群平均肥満度19.9以下の魚群は前線の南側，20.0以上の魚群は前線の北側に明瞭に分れた（Fig. 18）．

2-3-3-6　秋季における生息環境水温と肥満度

6・7月にかけて黒潮前線を越えて混乱水域にまで北上したカツオは，南下を始める秋までしばらくこの水域において滞留生活をおくる．この間にカツオは第2次黒潮前線や親潮前線付近から派生する暖水ストリーマにそって，より北方の水域へ北上回遊することがしばしば見受けられる．その時に第2次黒潮前線や親潮前線付近の表層部に形成される温度前線は20～22°C，カツオが分布し漁獲される暖水ストリーマ内の水温は17～19°C付近である（後述）．そこで，温度前線を越えて20°C以下の水温域に進入する個体の肥満度と表面水温の関係をFig. 19に示した．

8, 9月にはカツオは19.8～26.0°Cの水温域で漁獲され，その肥満度の範囲はおよそ15～25と比較的幅広い．しかし，10月に18～20°Cの水温域に分布したカツオの肥満度は1尾を除きすべて20以上の値を示した．

2-3-3-7　南下期における生物特性値の変化

混乱水域において滞留生活をおくったカツオは10～11月に南下移動を開始する．南下移動の開始に当たっては一斉に移動行動を行っているのか，あるいは栄養の蓄積度によって南下移動の時期に違いがあるのか，明らかとされてはいない．そこで，肥満度，内臓除去肥満度，肝臓重量指数を取上げて，その月別推移を検討した（Fig. 20）．肥満度，内臓除去肥満度には9月と10月で大きな変化は認められなかったが，11月には肥満度で22以上，内臓除去肥満度で20以上の個体は姿を消しており，高い肥満度の個体の割合が減少

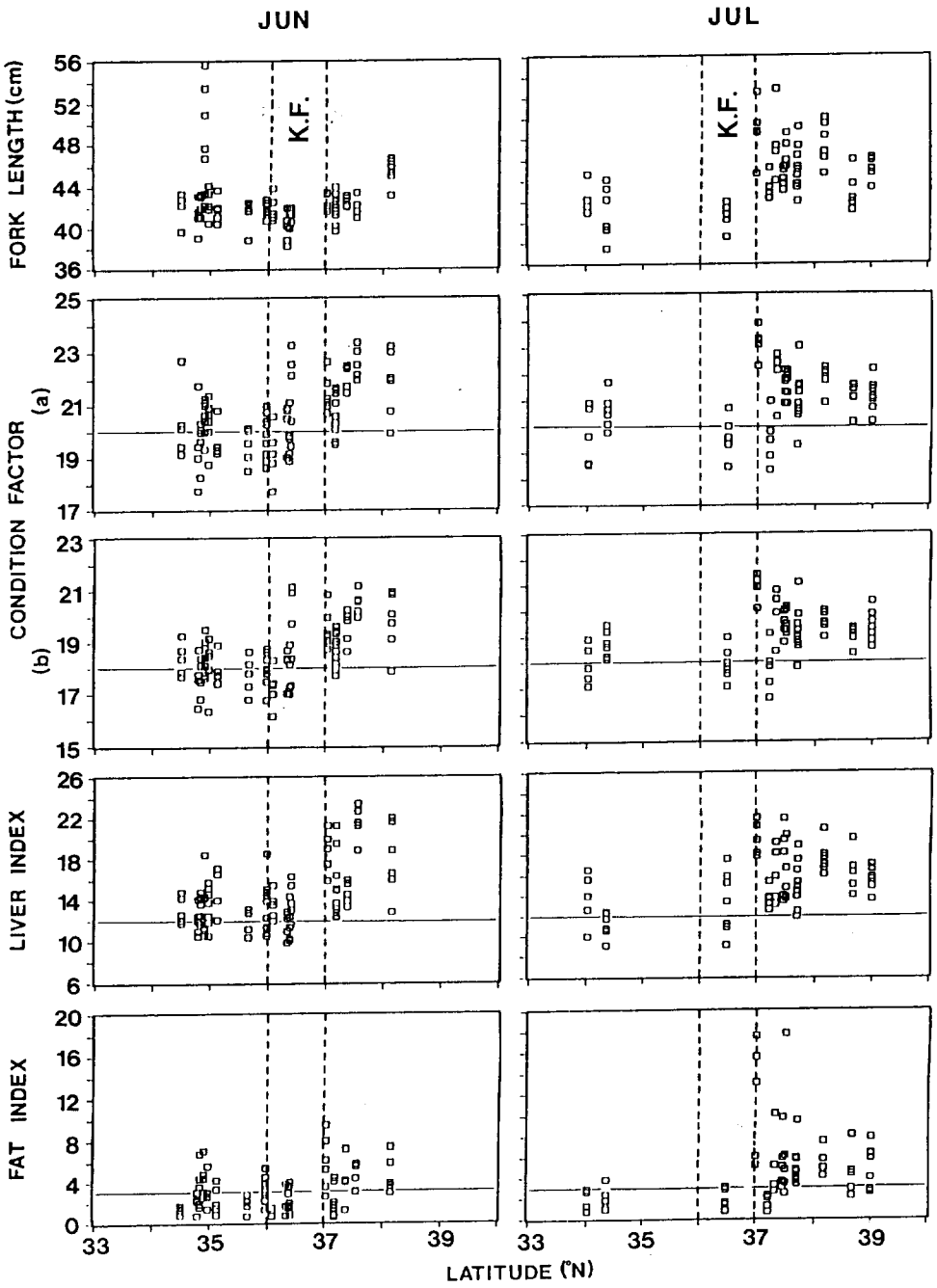

Fig. 17 Latitudinal changes in some biological indices (fork length, condition factor, liver index and fat index) for northward migrating skipjack tuna.

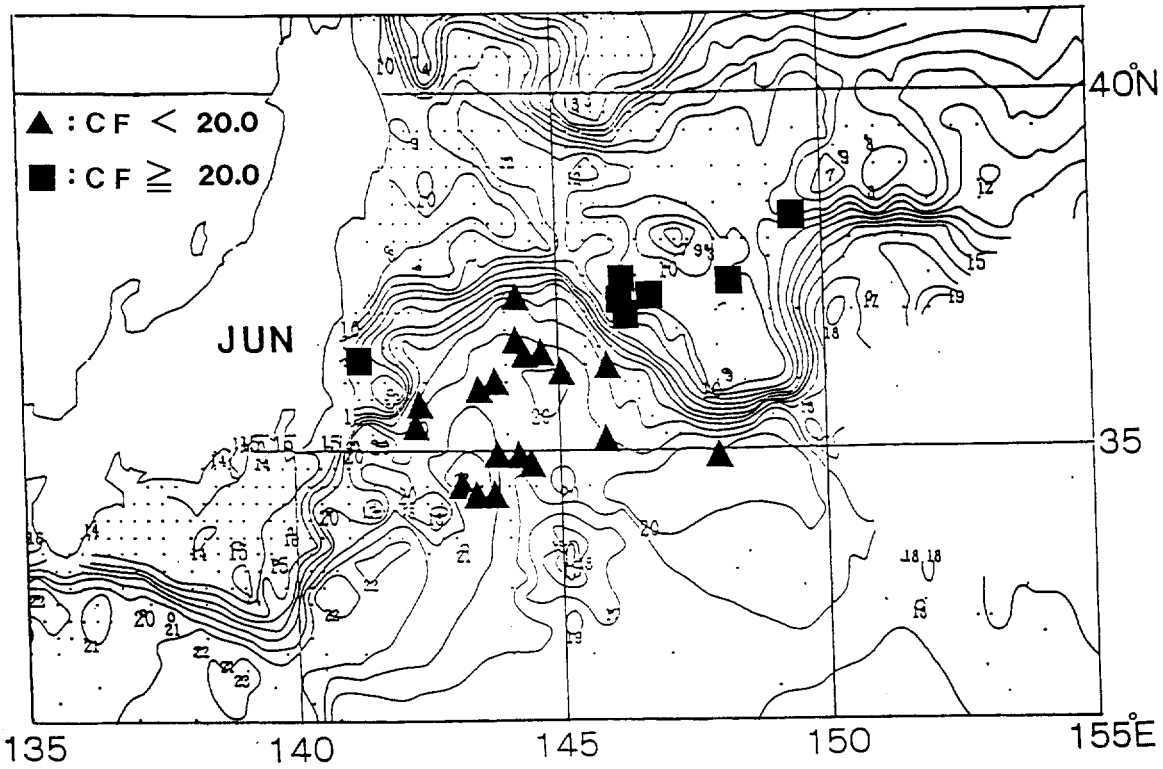

Fig. 18 Distribution of northward migrating skipjack tunas and their condition factor (CF) in June 1986. Condition factors of skipjack tuna in the northern area of the Kuroshio Front were higher than those in the southern area (▲: CF≦19.9, ■: ≧20.0). Solid lines indicate the temperature (°C) at a depth of 100 m.

していた．肝臓重量指数でも9月から11月にかけて，高い指数の個体の割合が徐々に低くなっている．

2-3-4　考察

2-3-4-1　北上期における成熟個体と未成熟個体の行動差

5～8月における緯度別のGIの値から，日本近海の北上時期にあたる5月から6月にかけて黒潮水域にはGIの低い個体から高い個体まで混在していることが分る．しかし，黒潮前線の北側では高い成熟度指数を持つ個体は1尾も出現しなかったことから，成熟度の高い個体は表面水温が21°Cより低い混乱水域内へ北上することはないものと考えられる．GI 8.0以上の完熟個体は30°N以南で，しかも24°C以上の水温域にのみ出現したことから，成熟個体は，黒潮前線南側の34°N付近の水域までは北上し，その後Uターンして高水温域まで南下して産卵活動に加わるものと考えられる．その一方，北上個体は早いものでは5月には黒潮前線域にまで達し，その後6月から7月にかけて黒潮前線を越えて混乱水域に侵入する．それらの個体のGIはすべて1以下であることから，完全な未成熟個体のみが黒潮前線を越えて北上移動しているものと思われる．

2-3-4-2　黒潮前線における生物特性値の不連続性

体長，肥満度，肝臓重量指数，腸間膜脂肪量指数など栄養蓄積指標のすべてが，37°N付近から北側で高いことから，黒潮前線付近まで北上回遊した個体は前線付近で急速な栄養蓄積を行っている可能性が高い．また，前線の北側には生物特性値の低い個体の出現が認められなかったことから，生物特性値がある水準に達していない個体は混乱水域に侵入することができないものと思われる．

2-3-4-3　南下回遊へのswitchingと栄養蓄積

10月から11月にかけて，東北近海域に分布するカツオでは肥満度や肝臓重量指数が高い個体の割合が徐々に減少した．Shul'man (1972) はカタクチイワシ

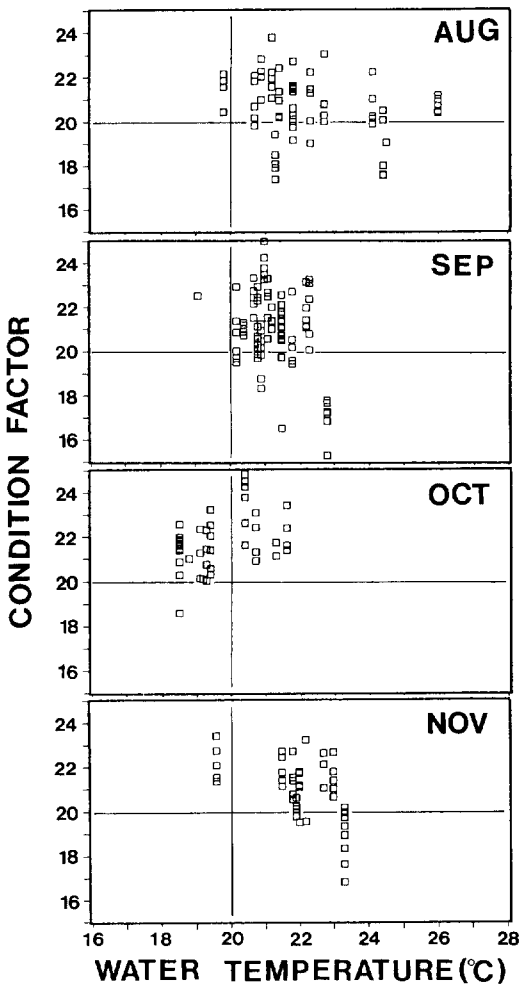

Fig. 19 Relationship between the surface water temperature of fishing grounds and the condition factor of skipjack tuna in the Kuroshio-Oyashio transitional area, August to November 1986. Skipjack tunas whose condition factor are lower than 20 did not enter into water of a lower temperature than 20°C.

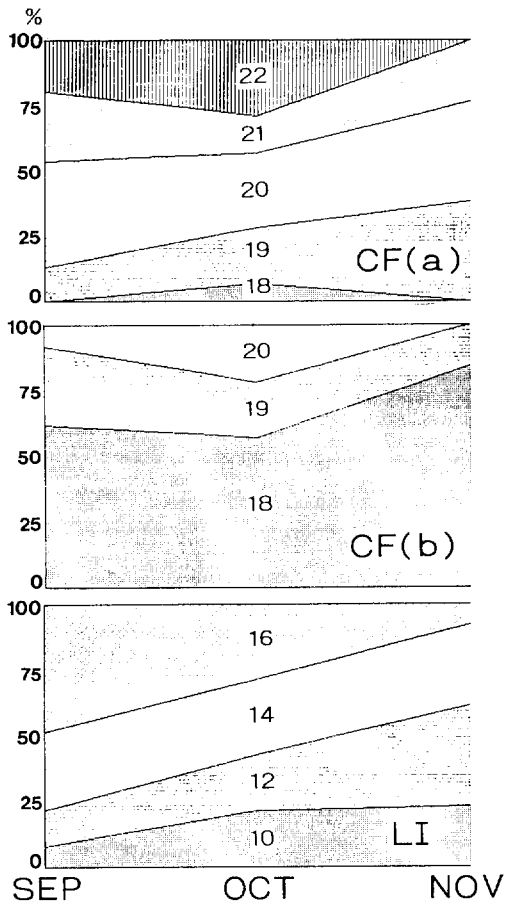

Fig. 20 Monthly changes of the condition factor (a, b) and liver index of skipjack tuna, September to November 1986.

の回遊について，脂肪含有量 14% 以下の群は，どんな水温低下に対しても南下回遊を始めることはなく，脂肪含有量 14～17% の群は回遊開始のためには，温度が 9～14°C に降下することが必要であるのに対し，脂肪含有量が 22% に達している群は，どのような温度低下に対しても一斉に南下回遊をはじめるとしている．ニコルスキー（1963）も回遊への移行は，魚の肥満度，脂肪含有量，生殖腺の発育度などと結びついているとしている．カツオの場合，南下回遊への switching が栄養蓄積度の高い個体ほど早いために，各個体の栄養蓄積の進行にもかかわらず，秋季に東北近海域に分布する魚群では肥満度や肝臓重量指数が高い個体の割合が徐々に減少しているものと推察される．

第 3 章　標識放流調査による潮境海域におけるカツオの行動生態

3-1　黒潮前線付近で放流した標識魚の暖水ストリーマ内への移動

3-1-1　目的

標識再捕法は，資源のなかに人工的な部分集団をこ

しらえ，これが再捕獲あるいは発見された時の状況から，その魚種の生態や資源の状況を推定しようとする方法である．標識再捕法からは個体の成長，移動速度，季節的移動生態，回遊経路，系群構造，魚群の混交状況，資源量の推定など多くの情報が得られる（田中 1985）．カツオにおいても，これまで移動回遊（Fink and Bayliff 1970, Bayliff 1984，笠原 1977，笠原ら 1971，安井・森 1985, Hilborn 1990，中川ら 1990），成長（Bayliff 1988），自然死亡率の推定（Fink 1965, Bayliff 1977），資源量の推定（Kleiber *et al.* 1983, 1987），群の交流（Bayliff 1988, Hilborn 1991）などを目的として標識放流調査が行われている．しかし，カツオに限らず他の魚においても移動行動による水温環境選択や再捕獲時の魚の生物特性値から移動行動生態について論じた報告は少ない．

熱帯から亜熱帯海域において成育したカツオは成長にともなって，北方に回遊し，春には日本近海にまで来遊し，5月には伊豆諸島の東沖から房総半島沖合のいわゆる黒潮前線南側漁場海域に出現する．その後6月から7月にかけて黒潮前線を越えて混乱水域内に北上移動し，秋まで活発な索餌活動をする．春期に黒潮前線の南側海域にまで来遊したカツオにはそのまま混乱水域へ北上する個体と，南または西に移動して伊豆，小笠原海域に入る個体があるとされる（笠原ら 1971）．しかし，北上，南下の行動決定がおこる海域の検討や，黒潮前線から暖水ストリーマ内への移動行動生態について生物側から検討した例は見られない．これらの課題は，黒潮前線を越えて混乱水域に入る魚群量の多少が日本近海の主要な漁場である混乱水域での漁獲量を左右する点からも，また，カツオの代表的な漁場である前線域での漁場形成機構を明らかにする上でも，重要な課題である．

ここでは黒潮前線域およびその南側の黒潮水域に分布する魚群に標識放流をして，その移動行動，再捕獲時の体サイズ，水温環境選択の違いについて比較検討した．

3-1-2　方法

標識放流は1986年の5月と6月に房総半島の南東および東沖合海域で実施した．放流群は3群，尾数は合計710尾である．5月21日放流群をA群，6月13日放流群をB群，6月19日放流群をC群とし，黒潮前線付近で放流したA, C群と黒潮水域で放流したB群の移動状況を比較検討した．放流は茨城県水産試験場調査船水戸丸（260トン）で行った．放流作業は竿釣りで漁獲したカツオを釣獲者がすばやく脇腹に抱え，標識者がカツオの背部附近に標識を装着して放流した．用いた標識は長さ140 mm，直径3 mmのダート型タグである．放流魚の大きさは標識放流の際に同時に釣獲した魚を測定して推定した．各放流群の放流位置，尾数，平均体長，平均肥満度をTable 5に示した．放流群の平均体長は45.0～46.4 cm，平均肥満度は18.6～19.6で，例年に比較して肥満度が低い傾向にあった．5, 6, 7月の黒潮前線の位置は気象庁海況旬報の100 m層水温図から村上（1993）の基準水温に従って示した．再捕獲は主に民間漁船によって行われ，再捕獲月日，位置，体長，体重データが水揚市場，各県水産試験場を経由して報告された．漁獲位置表面水温データは再捕獲報告にはないので，あとから漁船間の無線交信記録（QRY）によって調べた．

3-1-3　結果

3-1-3-1　黒潮前線域で放流した標識魚の移動

5月21日に35°N, 148°Eの黒潮前線域で放流したA標識放流群の移動状況をFig. 21に示した．再捕獲は放流後24日目の6月14日から始まり11月2日までに合計27尾が再捕獲された．再捕獲率は14.1%であった．標識魚は放流後39日目に1尾が放流点付近で再捕獲された他は，すべて黒潮前線を越えて西北西から北方向に移動し，南下移動した個体は認められなかった．7月末までに再捕獲された魚の内，再捕獲時の体長体重値が報告された9尾の体長，肥満度，再捕獲位置表面水温を再捕獲月別にFig. 22に示した．

6月に黒潮前線の北側で再捕獲されたカツオの体長範囲は48.2～50.5 cm，肥満度範囲は19.4～21.1であった．漁獲位置水温は18.0～20.0°Cであり，放流点の水温（21.7°C）よりも1.7～3.7°C低い水温環境下に移動していた．それに対し，放流点付近で滞留傾向を示し再捕獲された個体は，体長が47.0 cm，肥満度17.3と前線北側へ移動した個体に比べ，体長ではさほど違いは無かったが，肥満度では明らかに低い値を示した．この個体の再捕獲位置の環境水温値は21.5°Cで，放流時との差は0.2°Cであった．

一方，7月に黒潮前線の北側で再捕獲された個体の体長範囲は43.0～51.5 cm，肥満度範囲は19.4～21.1，漁獲位置水温は20.0～22.4°Cであった．6月に比較し再捕獲位置水温は高く，体長43.0 cmの小型個体も再捕獲された．

Table 5 Data on the skipjack tunas released in 1986.

Tagging group	Date of release	Location		W.T. (°C)	Total No. of fish released	Body size			
		Lat (N)	Long (E)			F.L. (cm)	S.D.	C.F.	S.D.
A	May 21	35°06′	148°00′	19.7	192	46.1	2.07	18.9	0.86
B	Jun. 13	32°47′	143°32′	21.0	264	45.0	1.15	19.6	0.68
C	Jun. 19	36°09′	146°14′	19.2	254	46.4	1.42	18.6	1.10

C.F. $= 1000 \times BW(g)/FL^3(cm)$

同様に，6月19日に36°N, 146°Eの黒潮前線域で放流したC標識放流群の移動状況をFig. 23に示した．再捕獲は放流後2日目から始まり，10月11日までに51尾が再捕獲され，再捕獲率は20.1%であった．南下した個体は認められず，放流点付近から西北西から北方向への移動を示した．6月の再捕獲魚5尾の体長範囲は44.0～47.0 cm，肥満度範囲18.4～20.0，漁獲位置表面水温は18.4～20.0°Cであった．7月の再捕獲魚10尾の体長範囲は45.0～49.0 cm，肥満度範囲17.0～21.7，漁獲位置水温は19.5～22.6°Cであった．5月に放流したA標識放流群に比較してC放流群は，おなじ黒潮前線の北側での再捕獲魚でも，全体的に体長は小さく，肥満度にはばらつきが多かった．また再捕獲位置水温は高い傾向があった（Fig. 24）．

3-1-3-2 黒潮水域で放流した標識魚の移動

6月13日に32°N, 143°Eの黒潮続流南縁のさらに南側の黒潮水域で放流したB標識放流群の移動状況をFig. 25に示した．放流後15日目の6月27日から10

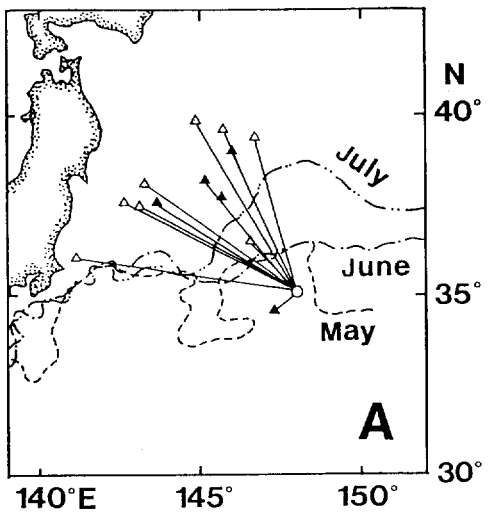

Fig. 21 Migrations of skipjack tunas (Tagged group A) released near the Kuroshio Front in 1986 (○: Location of release, ▲: Location of recapture in June, △: Location of the recapture in July). Dashed lines indicate the mean position of the Kuroshio front in May (·····), June (– · –) and July (– · · –).

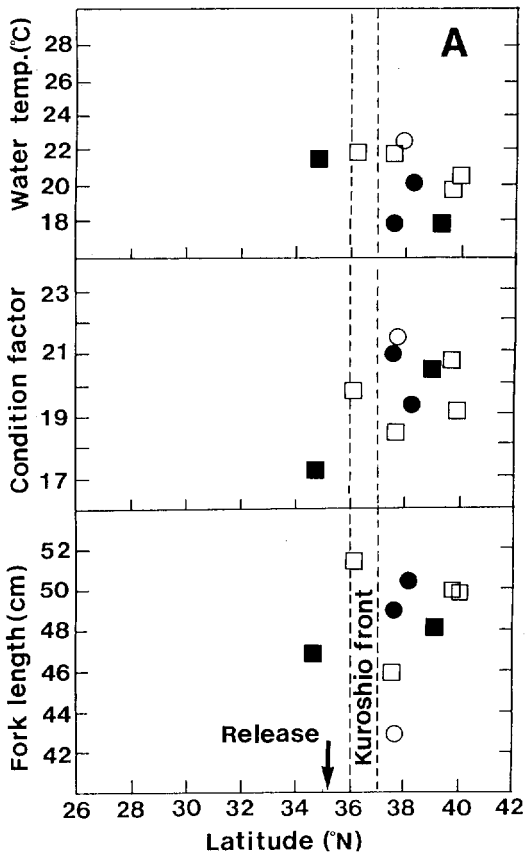

Fig. 22 Recapture Locations in degrees latitude of tagged skipjack tunas (Tagged group A) and their fork lengths and condition factors at recapture in 1986 (●: Middle of June, ■: Late June, △: Early July, ○: Middle of July, □: Late July).

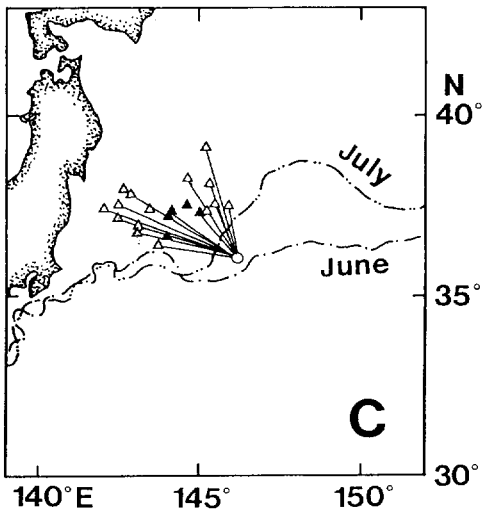

Fig. 23 Migrations of skipjack tunas (Tagged group C) released near the Kuroshio Front (○: Location of release, ▲: Location of recapture in June, △: Location of recapture in July). Dashed lines indicate the mean position of the Kuroshio Front.

月7日までに50尾が再捕獲され，再捕獲率は18.9%であった．再捕獲魚のうち放流点緯度よりも北側で17尾が，南側で11尾が再捕獲された．再捕獲魚のうち4尾は，7月に26～29°N, 140～142°E付近にまで南下して再捕獲された．

放流点付近を含む34°Nから南側をS区域，34～36°Nの範囲の黒潮前線南側をM区域，37°N以北の黒潮前線北側をN区域として区分し，7月31日までの再捕獲魚の体長，肥満度，漁獲位置表面水温を，再捕獲までの経過日数を付してFig. 26に示した．S区域で再捕獲されたカツオの体長は45.0～48.0 cm（平均46.5 cm），M区域の魚は45.0～46.0 cm（平均45.0 cm），N区域の再捕獲魚は44.6～48.8 cm（平均47.3 cm）の大きさであった．黒潮前線南側のM区域のカツオと北側のN区域のカツオでは，経過日数がほぼ等しい個体間にあっても前線を越え北上移動したN区域の個体の方が体長が大きい傾向にあった．また，平均肥満度では，M海区，N海区はそれぞれ19.4, 19.7と放流時の19.6と大差がなかったのに対し，S海域での再捕獲魚は17.3と低い肥満度を示した．

再捕獲位置の表面水温は放流点周辺では22.0～25.0°C，前線の北側へ北上した個体では19.0～22.0°Cであった．それに対して，30°N以南への南下個体は

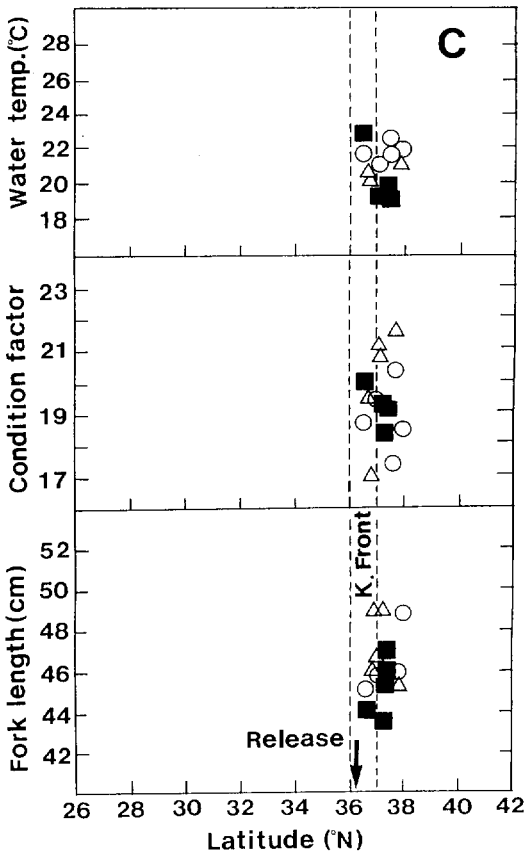

Fig. 24 Recapture locations in degrees latitude of tagged skipjack tunas (Tagged group C) and their fork lengths and condition factors at recapture in 1986 (●: Middle of June, ■: Late June, △: Early July, ◭: Middle of July, □: Late July).

28.1～29.2°Cの水温域で再捕獲された．放流時に同一魚群として同じ水温環境下に分布していた個体がわずか40日あまりの間に19.0°Cと29.2°Cと温度差10.2°Cの異なる水温環境を選択する移動行動を示した．

3-1-4 考察

3-1-4-1 北上期における黒潮前線乗り越えの行動決定

黒潮前線の南側海域において放流したB群が南北に分れて移動行動を示したのに対して，黒潮前線付近で放流したA, C群のカツオでは1尾が滞留傾向を示したほかは，すべての個体が北上移動をした．このことから，5, 6月に黒潮前線付近まで北上したカツオはすでに北上移動の行動決定を行っている個体である可

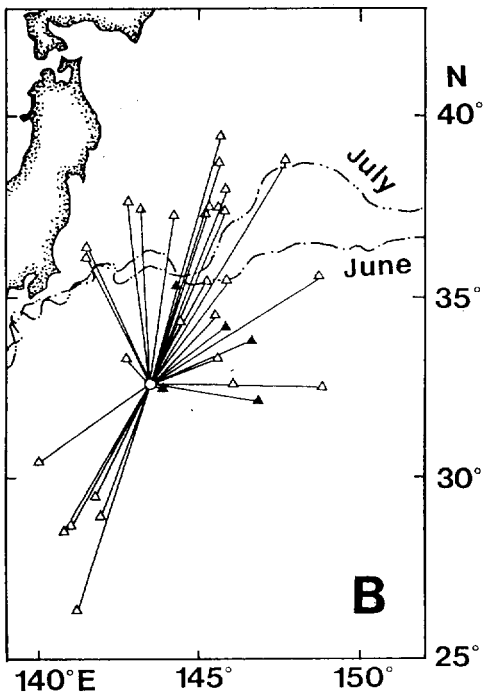

Fig. 25 Migrations of skipjack tunas (Tagged group B) released at the southern area of the Kuroshio Front in 1986 (○: Location of release, ▲: Location of recapture in June, △: Location of recapture in July).

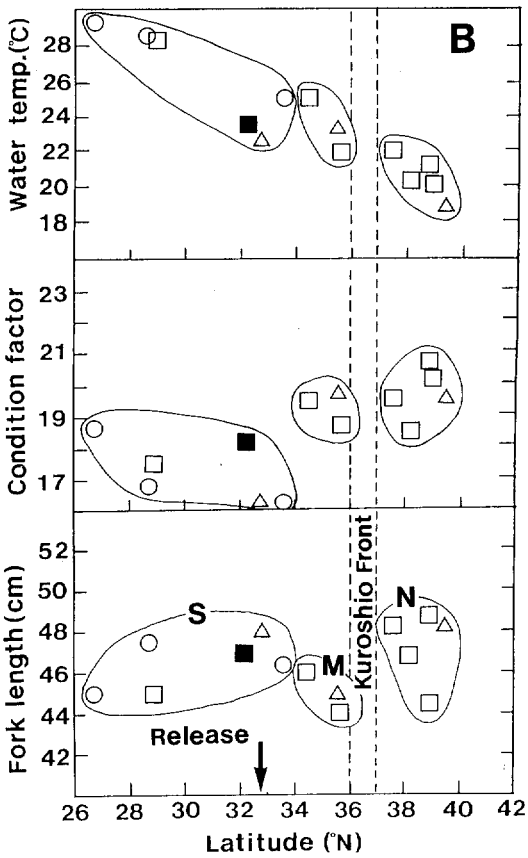

Fig. 26 Recapture locations in degrees latitude of tagged skipjack tunas (Tagged group B) and their fork lengths and condition factors at recapture in 1986 (●: Middle of June, ■: Late June, △: Early July, ○: Middle of July, □: Late July).

能性が高い．また，黒潮前線付近から南下行動を示した個体が無かったことから，黒潮水域から南下行動をおこした個体は，黒潮外側低温帯（川合 1972）内においてUターンをして，南下移動したと思われる．北上個体と南下個体は黒潮外側低温帯までは混合して群を形成しているが，黒潮続流南縁に至らない範囲において次第に分離して異なった群形成を行いながら，それぞれ別々の移動行動をとったものと考えられる．

3-1-4-2 北上個体と南下個体の相違

黒潮前線を越えて北上移動した個体と 34°N 以南への南下個体の間では，再捕獲時における体長には大きな違いは認められなかったのに対して肥満度には平均値で 2.4 の差が認められた．混乱水域におけるカツオの主要な餌生物はマイワシ，カタクチイワシ，サバ，オキアミ類である（堀田・小川 1955，飯塚ら 1989）．小達（1986）によれば，この時期における「親潮水域」と「混乱水域」の動物プランクトン量は「黒潮水域」の 2～6 倍と推定されている．これら動物プランクトンを餌とするマイワシ，カタクチイワシ，サバなどの浮魚類は漁獲水温値からみて，この時期にはカツオよりも先行して北上回遊し混乱水域内へ進入している．また，オキアミ類の分布量は黒潮水域よりも混乱水域で多い傾向がある（小達 1991）．これらのことからカツオが餌生物とするこれらの生物群と遭遇する確率は，「混乱水域」の方が「黒潮水域」に比較してはるかに高いと考えられる．

前章で明らかにしたように，黒潮前線北側のカツオの生殖腺は未熟であるのに対して，23～27°N，表面水温 28°C 台の黒潮水域で漁獲された魚の熟度指数は非常に高い値を示した．このことから，今回の調査において 7 月に 26～29°N，表面水温 28～30°C の水域で再捕獲された南下個体はおそらく産卵群に加入する個体であろうと推察される．また，北上個体は餌生物との

遭遇確率が高い混乱水域に入って活発な摂餌活動をして栄養蓄積を行っているものと思われる．すなわち，同一の魚群を構成していたカツオのうち，一部は北上して食物の豊富な混乱水域へ進入するという「索餌回遊」を選択し，一部は餌濃度よりも再生産を重視した「産卵回遊」を選択したと考えられる．

3-1-4-3　移動行動と水温環境選択

調査時期であった5月から7月は水温上昇期にあることから，ほぼ同じ水温もしくは高い水温で再捕獲された個体は海洋環境の変動に受動的な移動行動をとったと考えられ，より低い水温環境へ移動した個体は，いくつかの水温フロントを能動的に越えながら積極的に新たな環境下への移動行動をとったと考えることができる．

そこで，時間経過にともなう標識魚の緯度別移動状況と再捕獲位置表面水温の変化を検討した（Fig. 27）．北上移動個体のうち放流位置水温環境よりも1°C以上低い水温環境において再捕獲された個体はA放流群で2尾，B放流群で1尾であり，大半はほぼ同じ水温もしくは高い水温環境で再捕獲されている．このことは本調査における放流個体のうち北上移動個体の大半が水温上昇に沿いながら北上回遊したことを示している．

笠原（1977）は，緯度経度1度ごとの旬別漁獲量分布の時期別推移と表面20°C等温線の位置の変化との対応を検討し，春から夏の北上時期には20°C等温線の変化で示される水温上昇過程が，カツオ漁場の移動を促す原動力となっているとした．また，川合・佐々木（1962）はカツオ主群が主黒潮前線を越えて，北側の混乱水域内へ移動する際の水理条件として，主黒潮前線から分岐する2次的黒潮前線の北寄りの強流帯が大きい役割を演じているとした．

おそらく，C群を構成していた魚はこの様な強流帯に添って黒潮前線の北側への移動を行ったと考えられる．しかし，A群を構成していた魚のうち表面水温18°Cで再捕獲された2尾とB放流群のうち19°Cで再捕獲された1尾はそれぞれ水温差1.7～2.0°Cの低水温環境下へ移動していることから，これらの個体は水温上昇に受動的に対応しながら北上したのではなく，黒潮前線附近に形成される表層水温フロントを積極的に乗り越えながら北上移動したものと思われる．

すなわち，5月に黒潮前線にまで来遊したA群構成魚は黒潮前線より派生する暖水ストリーマ内の水温上昇をまたずに，一部の大型個体から順次，水温フロントを越えてより低い水温環境に「能動的に」進入していったと考えられる．それに対して，約1カ月後に，同じ黒潮前線付近で放流したC放流群の前線北側での再捕獲位置水温は放流位置水温より高い値であったことから，C放流群は6月に発達したと思われる暖水ストリーマ 内を水温フロントを乗り越えることなく，群構成魚すべてがスムースに北側へ移動したと考えられる．

表層水温フロントを越え低い水温域へ移動したと考えられる3個体と水温上昇に受動的に対応しながら北上した他の個体との違いを検討するために，すべての再捕獲魚についてその再捕獲位置水温値と体長および肥満度の関係を調べた（Fig. 28）．それによると水温19°C付近を境にして高水温域では広い範囲の体長と肥満度の魚が出現したのに対して，18～19°Cの低水温域で再捕獲された3個体は体長，肥満度のいずれも大きな値を示した．体長と肥満度はカツオが黒潮前線付近の水温フロントを越えて低水温域に進入するか，あるいは，高水温域側にとどまるかを決定する重要な因子になっていると考えられる．このような，表層水温フロントを通過するかしないかという北上移動回遊過程の相違がA放流群とC放流群との間に認められるような再捕獲魚の体長，肥満度，再捕獲位置水温の違いに反映されているのであろう．今回の放流個体の大半が水温上昇に沿いながら北上回遊し，能動的に低水温域に侵入した個体が少なかったことは，後節で述べるように，放流群が低肥満度であるため前線付近で滞留せざるをえなかったためであると思われる．

以上から，混乱水域への北上来遊量は黒潮水域に来遊する魚群内の産卵回遊選択魚と索餌回遊選択魚との出現比率の変動に大きく左右されること，また，前線漁場の形成には前線域に来遊するカツオの肥満度と黒潮続流から派生する暖水ストリーマの形成など表層水温フロントの挙動が大きな影響を与えていることが推論できる．

3-2　肥満度の異なるカツオ魚群の回遊行動の相違

3-2-1　目的

Lebedev（1967）は魚の種内構造について論及し，局地的群のなかでも個体は無秩序に分布しているのではなく，要素個体群（Elementaly population）とよぶもっとも類似した体長・成長のテンポ・性的成熟度・肥満度・その他の特徴をそなえた，相対的に時空的に

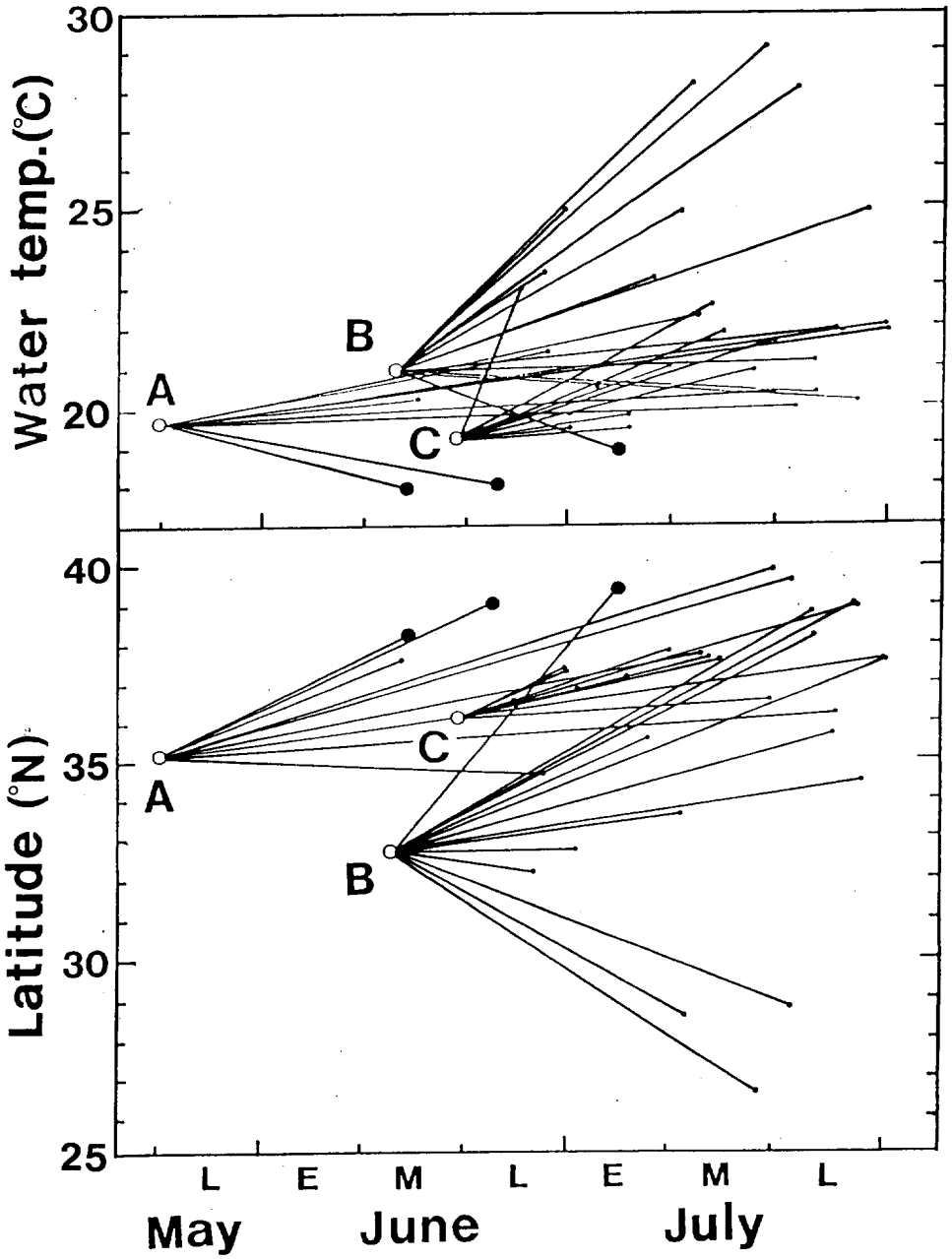

Fig. 27 North and southward migrations of tagged skipjack tunas released in May and June, 1986 in relation to surface water temperature at the recaptured locations.

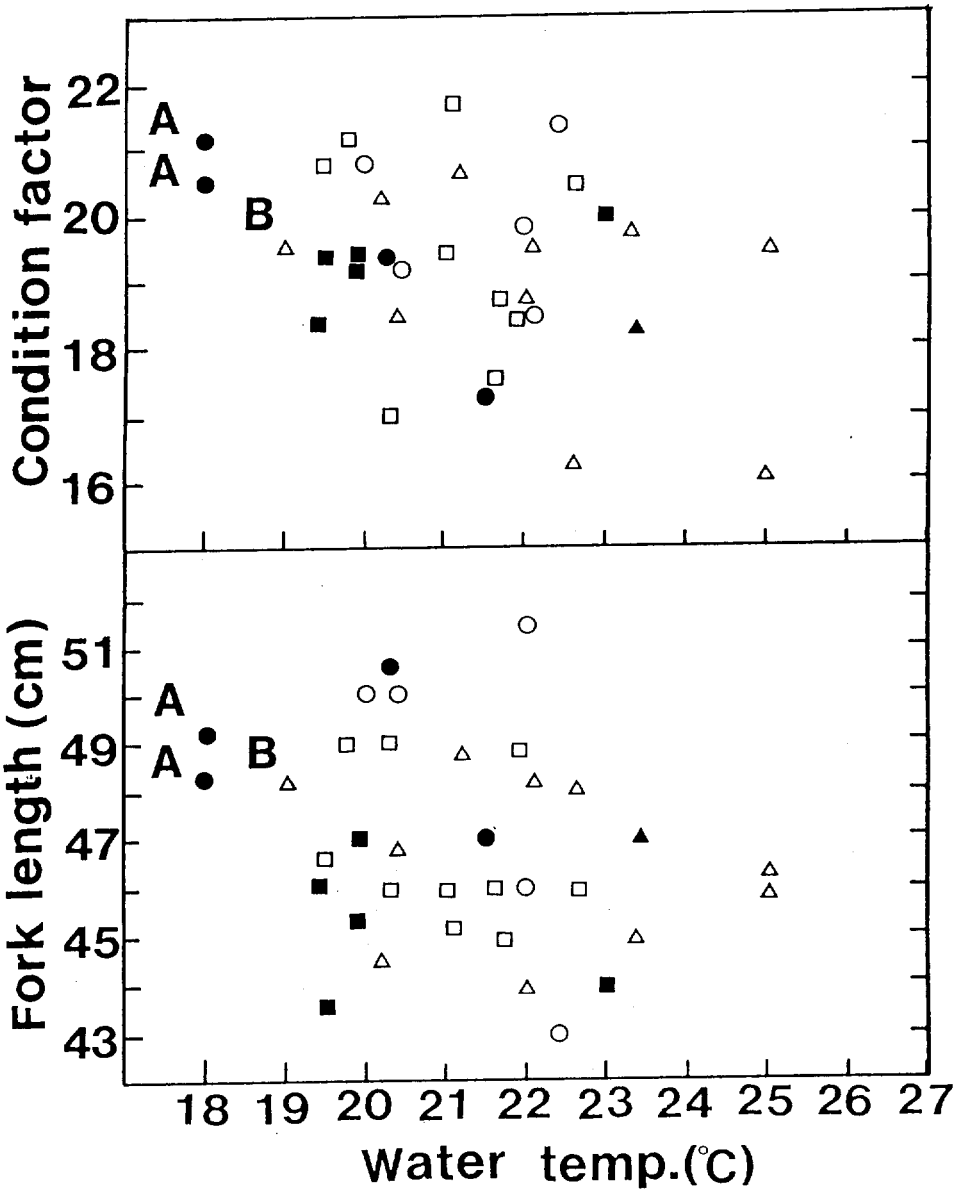

Fig. 28 Relationships between the fork length and condition factor of recaptured skipjack tuna and surface water temperature at the recapture locations. Tagged group A recaptured in June (○) and July (●), tagged group B recaptured in June (△) and July (▲), tagged group C recaptured in June (□) and July (■).

孤立したグループを形成するとしている．つまり，Lebedevは生理的同質性を保持した多数の群(School)の集合体を要素個体群とよんでいる．群と要素個体群の関係についての研究は小川・中原（1978）以外ほとんどなく，また標識放流を用いた解析が試みられた例はない．

黒潮前線南側漁場に来遊するカツオには，そのまま北上して黒潮前線を越える個体とUターンして南下移動する個体があり，異なる行動を示す個体同士が一時期同じ魚群を構成していることを前項で明らかにした．成群性の強い浮魚において，同一群内構成魚がどのような行動をとりながら分離回遊していくのかにつ

いては未知の部分が多い．そこで，同一な要素個体群内における複数魚群に対し標識放流を試み，分離回遊過程における個体と群と要素個体群の関係について考察した．

3-2-2 方法

標識放流はカツオが日本近海を北上する時期に当たる1982年の5月13日に千葉県野島崎沖のカツオ漁場においてA, B, Cの3群に対して実施した．3群の放流位置，尾数，放流群の平均体長(尾叉体長)，平均肥満度をTable 6に示した．放流は茨城県水産試験場所属調査船「水戸丸」にて行い，標識には長さ140 mm，直径3 mmのダート型タグを用いた．放流したカツオの大きさは同時に釣り上げた魚を測定して推定した．再捕獲は民間漁船によって行われ，再捕獲月日，再捕獲位置，再捕獲時の体長，体重値が報告された．再捕獲位置の表面水温値は再捕獲報告には無いため，後から船間無線交信記録（QRY）により調べた．

3-2-3 結果

3-2-3-1 3標識放流群間の平均体長，肥満度の差

A, B, Cの各放流群の体長と肥満度の頻度分布をFig. 29に示した．各放流群それぞれについて2群間の体長と肥満度の差についてt検定を行い平均値の差を検討した．体長では3群の間に差は認められなかったのに対し，肥満度ではA群とB群の間で2.5%，A群とC群の間で1%の有意水準で差が認められ，明らかにA群は他の2群より低い肥満度を示した．B, C群間の肥満度には差は認められなかった（Table 6）．

3-2-3-2 3標識放流群の移動状況

A, B, Cの3群の再捕獲位置を放流後30日間ごとに5期に分けてFig. 30に示した．第1期(5月14日から6月13日)では，A群は放流点の北方向から東北東方向に主に移動した．B群はA群と同様に北方向から東方向での再捕獲が認められたが，放流点の南東方向や伊豆諸島の西側域へ移動した個体も認められた．C群は放流点の北西と東北東方向で再捕獲された．この期には，いずれも36°N以北での再捕獲はなく，まだ黒潮前線を越えての北上移動はしていない．

第2期(6月14日から7月15日)では第1期に比較してA, B, C群とも北東方向に大きく移動し，A, B群では三陸沖の39°N, 151°E附近に達した個体もある．また，B群の1尾ははるか東沖の37°N, 170°E附近で再捕獲された．しかし，この期にまだB, C群の一部は放流点の付近に分布し，さらにB群の2尾は26～27°N, 141°E附近まで南下して再捕獲された．

第3期（7月16日～8月17日）にはA, B, C群とも黒潮前線の北側である三陸沖の38～40°N, 144～153°E附近に東西に広がる形で再捕獲された．

第4期（8月18日～9月16日）にはA, B群が第3期と同様39～42°N附近で再捕獲されたが，その東側への広がりは160°E付近まで達していた．この期にB群の1尾は南下して27°N, 145°E附近で再捕獲された．

第5期（9月17日～10月16日）にはA, B, C群が41°N以北で再捕獲され，またB群の1尾が34°N, 139°Eの伊豆半島東側の近海域で再捕獲された．

他の2群より肥満度の低かったA群は全部の個体が放流後，北ないし北東方向に移動し，黒潮前線を越えて北上して再捕獲され，伊豆海域への移動個体は認められなかった．それに対して，肥満度の高かったB, C群はA群と同様に北上移動した個体があるものの，A群よりも放流後やや放流点近くに滞留する傾向と，また南下移動して伊豆海域で再捕獲される傾向が認められた．

3-2-3-3 3標識放流群の再捕獲率の相違

標識魚の再捕獲は放流後2日目からはじまり，150日までの年内に83尾が再捕獲された．合計の再捕獲率は16.3%であった．放流群別ではA群が27.13%，B群が12.60%，C群が11.53%の再捕獲率を示した．そのうち東北海域における再捕獲率はA群が27.13%，B群が10.43%，C群が10.58%を示した．伊豆およびその南側の海域での再捕獲率はA群では0%，B群では2.16%，C群では0.96%であった．

30日間ごとに区分した各期間別の東北海域における再捕獲率はいずれの期間もA群が最も高い値を示した．しかし，B, C群に対するA群の割合は期間によって異なり，第1, 4, 5期が対B, C群比で1.44～1.89倍であるのに対し，第2, 3期では2.22～7.90倍の高い値となった（Table 7, Fig. 31）．

3-2-3-4 群構成魚の分離

放流は同じ漁場内の異なる群に対して行ったが，同一な群に放流されたカツオがその後どのような群の構成魚となったかを調べるために，比較的同時期に再捕獲されたデータをとりだして検討した．経過日数が38～40日(a期)，58～65日(b期)，91～97日(c期)の再捕獲データを代表的に取上げてFig. 32に示した．図中の数字は経過日数，アルファベットは放流群の名

Table 6 Test for equality between the mean body sizes of the three tagged skipjack tuna groups.

Group of released	Release Date	Location		W.T (°C)	Number of release	Mean size of tagged fish				
		Lat (N)	Long (E)			FL	SD	CF	SD	
A	May 13. 1982	33°19′	142°34′	21.2	129	44.98	1.52	19.36	1.21	*
B	—	33°17′	142°36′	12.2	278	45.09	1.48	20.27	0.99	**
C	—	33°18′	143°00′	21.2	104	45.62	1.61	20.27	1.10	

*: Significant at 2.0% level **: Significant at 1% level

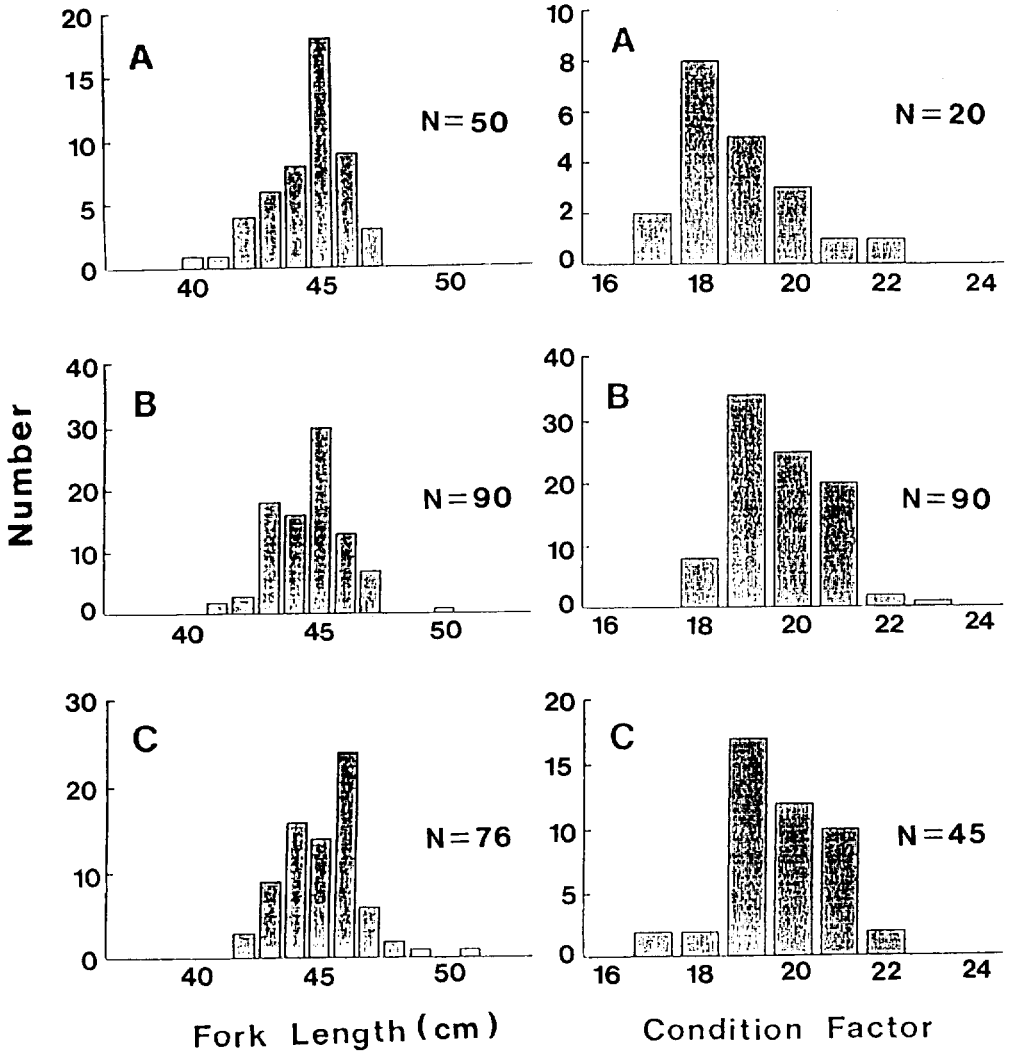

Fig. 29 Fork lengths and condition factor compositions of the three tagged skipjack tuna groups.

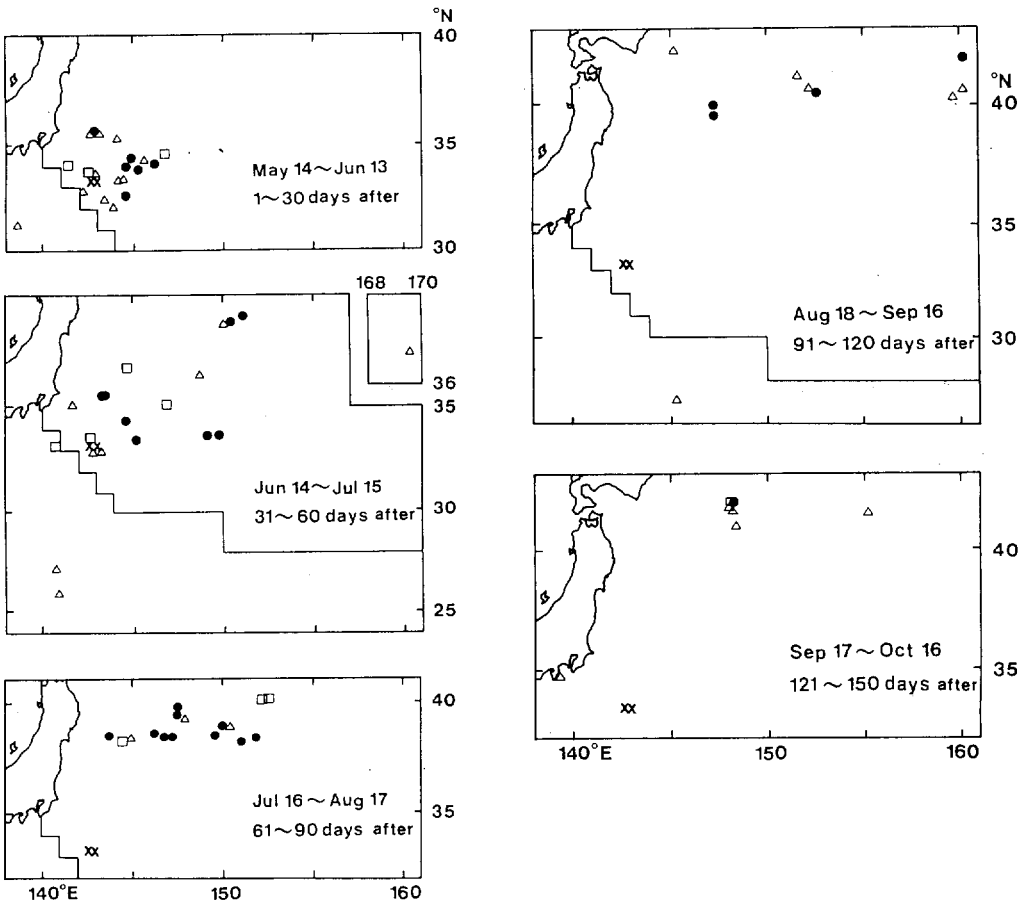

Fig. 30 Migrations of tagged skipjack tunas for 30 day intervals after release (●: tagged group A, △: tagged group B, □: tagged group C, ×: Location of release).

前である．再捕獲は竿釣，まき網漁船によって，ある魚群中の構成魚として再捕獲された．

6月中旬にあたるa期ではすべての個体が黒潮前線の南側で再捕獲された．ここで区分した数日間の期間内では移動する同一群から繰り返し再捕獲がなかったものと仮定すると，A, C群構成魚はそれぞれ2つ，および4つの別群に分れて再捕獲されたことになる．まき網で漁獲された35°N, 143°Eの魚群からは別群として放流されたA, C群構成魚が同一の群構成魚として5尾まとめて再捕獲された．7月中旬にあたるb期では前線南側から北側まで広い範囲で再捕獲された．B群構成魚が伊豆沖から三陸沖の比較的近海域において南北4群から再捕獲されたのに対し，C群構成魚は小笠原近海，三陸沖150°E付近と170°E付近と東西に大きく離れて分布した3群から再捕獲された．A群は三陸沖150°E付近で再捕獲された．8月中旬にあたるc期では黒潮前線北側でのみ再捕獲された．A群構成魚が金華山沖の3群から，B群構成魚が40°N, 151°Eに分布した2群から，C群構成魚が40°N, 159°Eに分布した1群からそれぞれ再捕獲された．

3-2-4 考察

3-2-4-1 黒潮前線南側水域における肥満度差による群形成

実験放流に選定した野島崎沖漁場は5月の春季北上時期のカツオ漁場としては典型的な漁場である．一般的にカツオ魚群は単独群で存在することはほとんどなく，ある群の周辺には体長組成がほぼ等しい数群から数十群あるいはそれ以上の群が分布し，それらの群を追って竿釣漁船が集合して操業するのが常である．そ

Table 7 Recapture data for the three tagged skipjack tuna groups.

Days after release	Period	Northeastern sea area						Izu and it's southern area			Emperor chain sea area		
		Number of recapture			Recapture rate (%)			Number of recapture			Number of recapture		
		A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
1～ 30	May 14-Jun. 13	7	10	3	5.43	3.60	2.88	0	1	0	0	0	0
31～ 60	Jun. 14-Jul. 15	11	7	4	8.53	2.52	3.85	0	3	1	0	1	0
61～ 90	Jul. 16-Aug. 17	11	3	3	8.53	1.08	2.88	0	0	0	0	0	0
91～120	Aug. 18-Sep. 16	4	5	0	3.10	1.80	0	0	1	0	0	0	0
121～150	Sep. 17-Oct. 16	2	3	1	1.55	1.08	1.00	0	1	0	0	0	0
	Total	35	29	11	27.13	10.43	10.58	0	6	1	0	1	0

れらの魚群の集合体の一般的な水平スケールは，おおむね緯経度1～2度以内であることが多い．

今回，標識放流した3群は緯経度30分以内の同一漁場内に分布した魚群であったこと，体長組成に差が認められなかったことなどから，同一な要素個体群(Lebedev 1967)内の群れであったと考えられる．A群とB･C群間の肥満度には差が認められたが，おそらく群構成魚の交流（Hilborn 1991）による肥満度を指標とした群の再編成が要素個体群内において徐々におこっていたと考えることができる．

3-2-4-2 高肥満度魚の南下移動

東北海域における3群の再捕獲率は放流時の肥満度が低かったA群がB, C群に比較して，およそ2.6倍の値を示した．B・C群構成魚よりもA群構成魚の方が高い割合で黒潮前線を越えて三陸沖へ北上したものと思われる．伊豆およびその南側の海域での再捕獲率が0～2.16%と低かったことは民間漁船が伊豆およびその南側の海域からはなれ，漁獲効率の高い三陸沖に操業海域を変えることに起因しているものと思われる．しかし，B群構成魚の内の一部は第1期および第2期にはすでに伊豆海域やその南側海域に移動して再捕獲

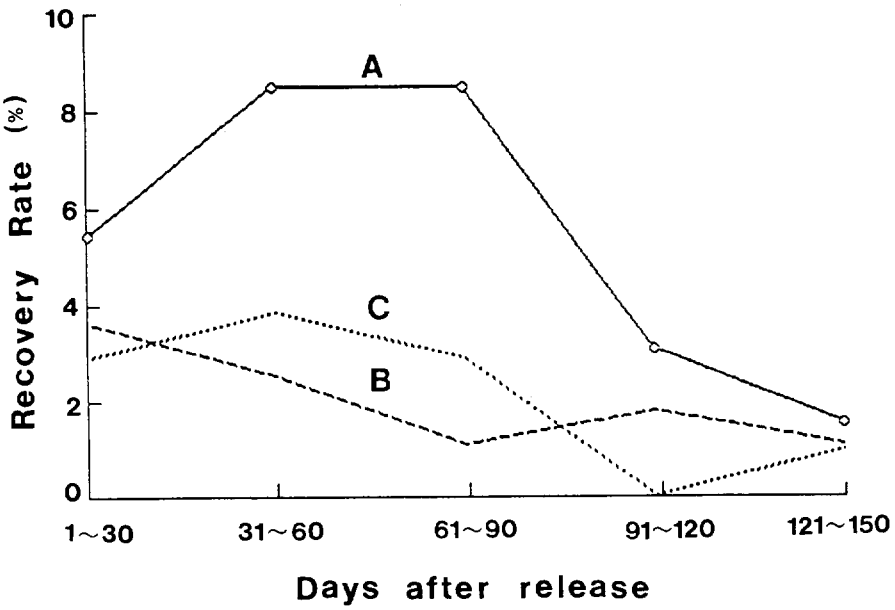

Fig. 31 Change in the recapture rate of skipjack tuna for 30 day intervals after release.

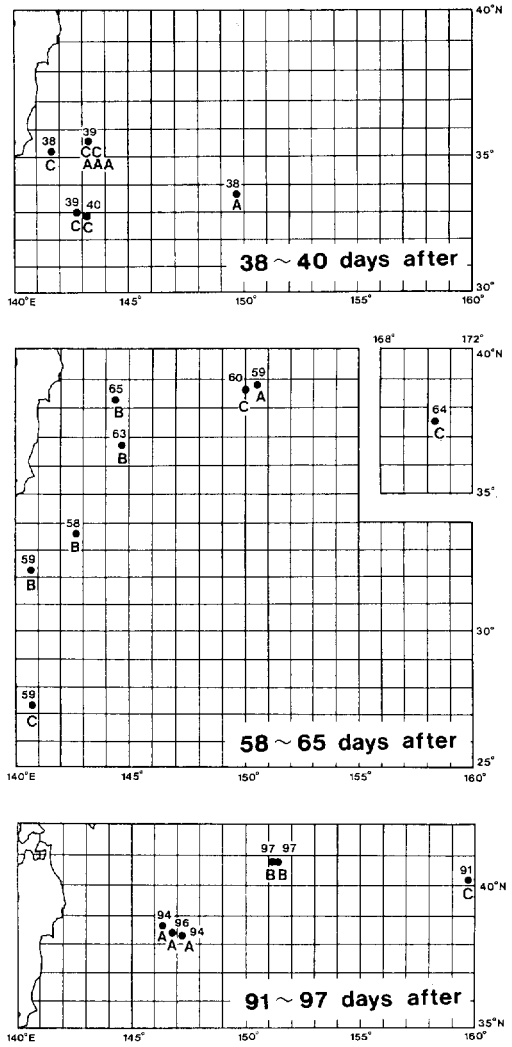

Fig. 32 Recapture locations from 38 to 40, 58 to 65 and 91 to 97 days after the release of the three tagged groups (A, B, C) of skipjack tuna.

されていること，黒潮前線の乗り越え時期である第2期，および三陸沖の漁場形成が活発化する第3期にB, C群はA群の様な再捕獲率の高まりを示さなかったことから，肥満度の高いこれらB, C群の構成魚の多くは第2期に黒潮前線を越えることなく，東北海域から逸散して南下移動したものと思われる．5月に野島崎沖の黒潮前線南側漁場に来遊する魚群の平均肥満度と黒潮前線を通過する時期における6, 7月の35°N以北のカツオ漁獲量との間には負の相関関係（Fig. 33）があることからも，肥満度が低い魚群は北上傾向が強く，肥満度が高い魚群は黒潮前線を越えずに逸散する傾向が強いと考えることができる．

B, C群の放流時の平均体長は45.09 cmと45.62 cmであった．生物学的最小形がおよそこの体長付近であることから，これらの魚群は体長だけを指標とすると未成魚から成魚への移行時にあたると考えられる．黒潮前線を越えて北上する個体は未成熟であるのに対し，前線南側海域では成熟度指数が高い個体の分布が認められることは前章で明らかにした．標識群のうち東北海域から逸散南下移動する傾向が強い群は5月段階ですでに成熟度が高い可能性も考えられる．そこでB, C群の生殖腺熟度指数を整理検討したが，両群とも生殖腺はすべて未熟であった．このことから北上行動を抑制する要因として働くのは第1に生殖腺の熟度であり，つぎに肥満度であるといえる．つまり，日本近海に北上してきた魚群のうちまず成熟個体は北上移動をやめ，つぎに未成熟個体でも肥満度が高い個体の多くが黒潮前線の南側海域から逸散南下すると考えられる．

3-2-4-3 潮境域におけるカツオの行動分離と群構造の再編成

同じ要素個体群内の群と推定されるA, B, Cの3つの群において，A群とB, C群は異なる行動様式を示した．この調査結果から，Fig. 34に潮境域におけるカツオの行動分離と群構造の再編成について，モデル的に図示した．第2段階で同質な個体の集合体である要素個体群内に肥満度の異なる個体が出現し，第3段階で群構成魚の交流をくりかえす中で肥満度を異にする群が要素個体群内に生まれ，第4段階で要素個体群は肥満度を指標とした別々な要素個体群に別れたと考えられる．そして肥満度の低い個体で構成される要素個体群は前線を越えて北上し，肥満度の高い個体で構成される要素個体群はUターンして南下回遊を選択したものと思われる．黒潮前線南側水域においてはおそらく常にこの様な要素個体群の再編成が行われて，北上個体と南下個体の行動分離がなされているものと思われる．

3-3 温度前線においてサイズスクリーニングされた標識魚の行動変異

3-3-1 目的

前節では，黒潮前線付近にまで来遊してくるカツオに，そのまま前線を越える個体とUターンして南下す

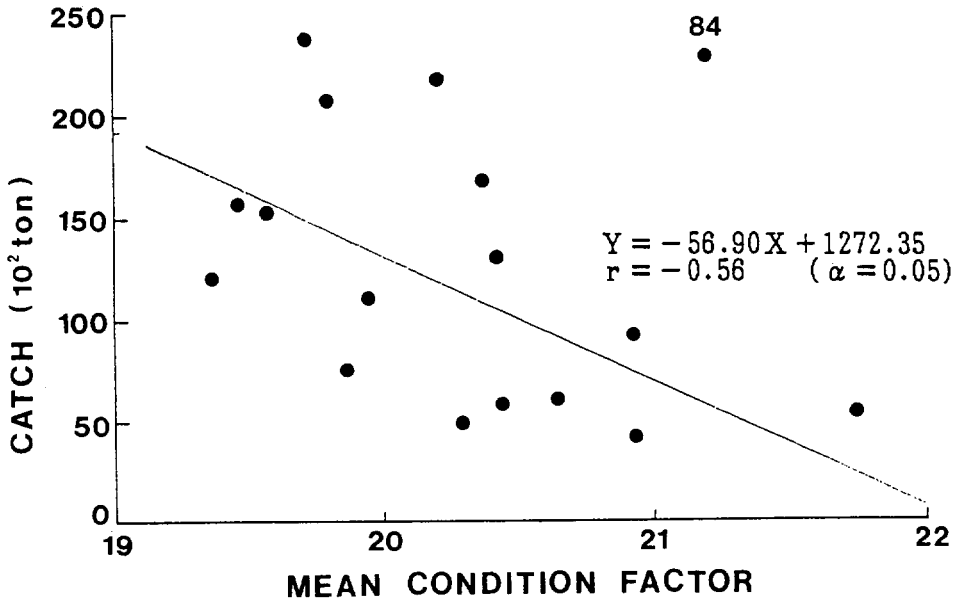

Fig. 33 Relationship between the mean condition factor of skipjack tuna in May and the catch in the area north of 35°N in June and July.

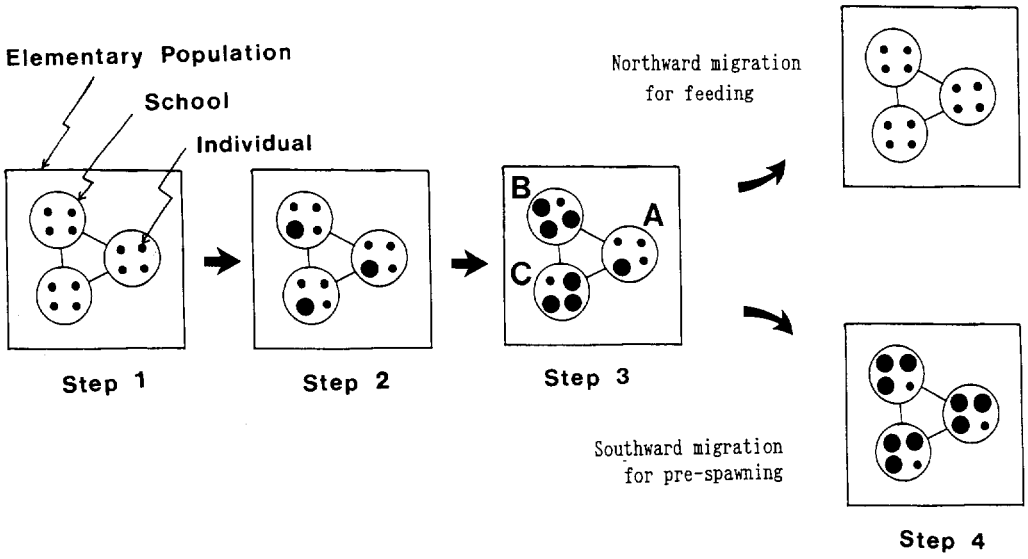

Fig. 34 Schematic model of the separation into two different groups according to the condition factor (C.F.) of skipjack tuna by the exchange of individual fish between schools in the southern area of the Kuroshio Front. Schools with low C.F. migrate northward and aggregate at the Kuroshio Front and schools with high C.F. migrate southward to the Subtropical area for spawning (●: High C.F. fish, • : Low C.F. fish).

る個体があり，その異なった行動をおこす要因の一つに体長や肥満度が関連している可能性を示した．しかし，春季の黒潮前線付近における放流実験では漁船の操業実態から南下個体の追跡が不十分にならざるをえない．前線における北上通過個体とUターン南下個体の違いを明らかにするためには，漁船の操業が黒潮水域から混乱水域全域にかけて行われている秋季に，第2次黒潮前線付近において同様な放流実験を取り組むことが望ましい．本節では第2次黒潮前線付近におけるフロントに遭遇したカツオ魚群の構成魚がその体サイズの違いによって，フロント通過に際しどの様な異なる移動行動を示すかを明らかにする．

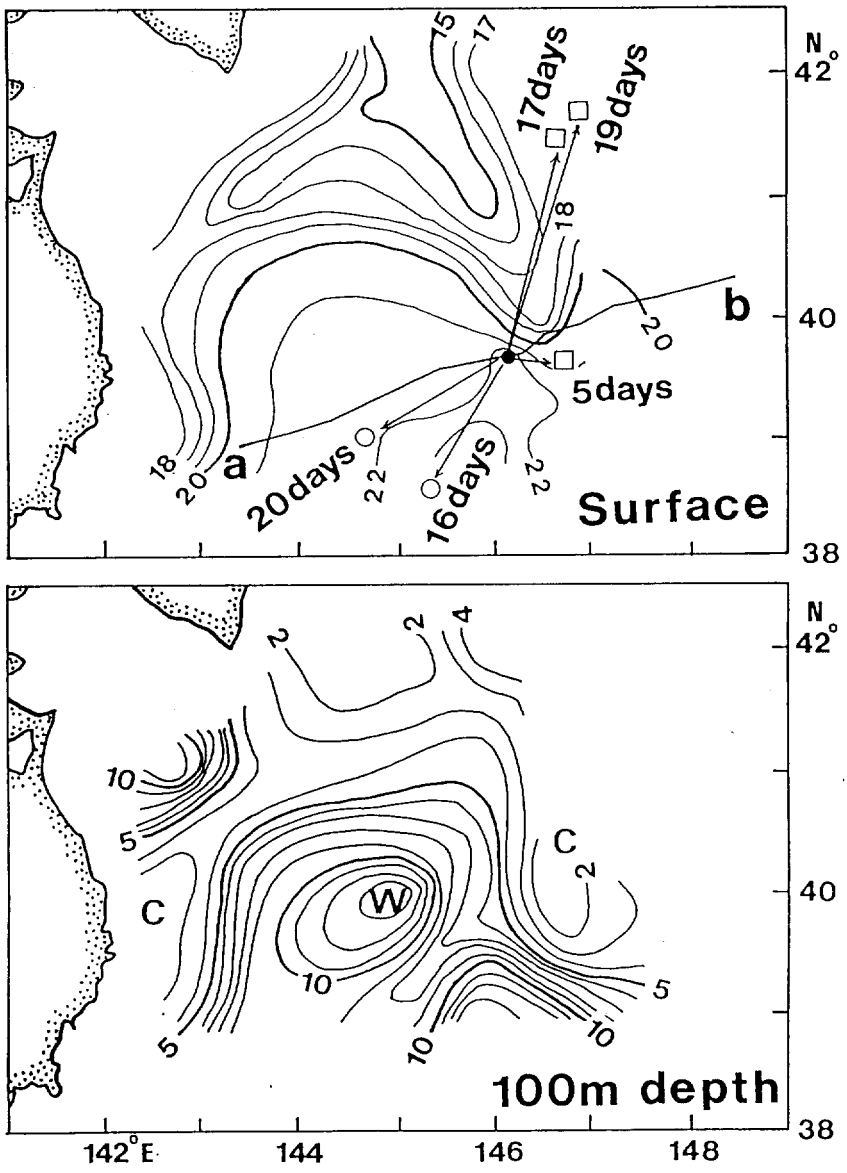

Fig. 35 Movement of tagged skipjack tuna in relation to the temperature distribution at the sea surface and 100 m depth during August 27-31, 1981. (a-b: Survey line for surface temperature mesurements by R/V Mito-maru)

3-3-2　方法

1981年8月25日に，39°45.5′N, 146°10.5′E，表面水温22.1°Cの位置において水戸丸によりカツオの「鳥付き跳ね」群を釣獲し，一度に497尾に対し標識放流した．使用した標識は直径3 mm，長さ140 mmのダート型タグである．再捕獲はおもに民間漁船によって行われた．再捕獲位置，体長，体重値のデータは民間漁船員や水揚地における水産試験場職員らにより記録された後，東北区水産研究所に報告された．放流魚の大きさは標識放流時に釣獲した魚体118尾を計測して推定した．また標識放流を実施した8月から11月までの期間，各漁場に分布したカツオの体長と肥満度を調べるため，茨城県那珂湊港に水揚げされた竿釣船の漁獲物の生物測定調査を実施した．

海洋観測資料としては，水戸丸による一時間毎の航走時表面水温，放流2日後の8月27日から31日にかけて放流海域を海洋観測した福島県水産試験場調査船いわき丸の観測データを使用した．

3-3-3　結果

3-3-3-1　放流点付近の海洋環境

水戸丸による航走水温，いわき丸による表面水温分布，100 m層水温分布をFig. 35に示した．放流点付近の海洋環境は表面水温分布によれば放流点から西側143°E付近までは水温20°C以上の暖水域が広がり，その北縁はおよそ40°30′N付近まで達していた．また北側の42°N, 145°E付近からは冷水域が南西および南東方向に張り出し，南東方向への張り出しは，放流点のすぐ北東40°N, 146°30′E付近にまで達していた．これら暖水と冷水の境界域には18～20°C，水温差約2°Cの顕著な潮境が認められた．また放流点付近へ南下した冷水の東側，146～147°E付近には17°C台の水温域が北に広がっていた．100 m層水温図によれば，親潮前線の代表等温線に近いとされる100 m層5°Cの等温線(川合 1955a)は放流点の西側では，表層水温20°Cの等温線とほぼ一致して北側に張り出し，東側ではそのまま39°20′N付近を東へ伸びていた．

東北東方向 (Fig. 36内のa-bのライン) への水戸丸の航走水温 (Fig. 36，上図) によれば，144°Eから145°30′Eまでは水温はほぼ21°Cで推移し，放流点のやや西側から水温は上昇し，放流点付近では22°C台に達していた．放流点のすぐ東側では水温は22.3°Cから19.3°Cに急低下し，3°C差の顕著な水温フロントの存在が認められた．フロントの東側の水温は148°E付近まで19.0～20.1°Cとフロントの西側よりも2～3°C低い水温値を示した．

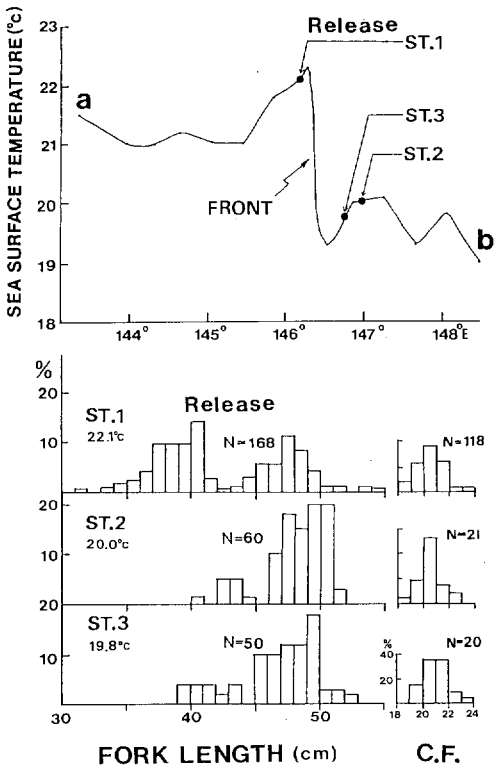

Fig. 36　Sea surface temperature along the survey line (a-b) and fork length compositions of skipjack tuna near the oceanic front.

3-3-3-2　フロント付近に分布したカツオの体長組成

フロント付近に分布したカツオ3群の体長組成と肥満度をFig. 36 (下図) に示した．フロント西側の高水温域側 (表面水温22.1°C) に分布したカツオは体長43 cm付近を境とした体長40 cmと47 cmにモードをもつ小型体長群と大型体長魚が混合した体長組成を示した．それに対し，フロント東側の低水温側 (表面水温19.8°C, 20.0°C) に分布したカツオでは体長43 cm以下の小型魚は非常に少なかった．体長43 cmを境にして小型魚と大型魚の尾数比を計算すると，St. 1では61 : 39, St. 2では13 : 87, St. 3では18 : 82であった．肥満度では最も低い水温域 (St. 3) に分布したカツオがやや高い肥満度を示した．

3-3-3-3 標識魚の移動

標識魚の月別移動状況と当時の表面水温分布をFig. 37に示した．標識魚は放流後5日目に放流点の東側約11海里，表面水温20.4°Cの点ではじめて再捕獲され，放流後16日目にあたる9月9日以降からは連続して再捕獲された．9月の再捕獲位置をみると，標識魚は南西方向と北方向に大きく2分した移動を示した．南西方向に移動した標識魚は，37°11′～39°02′N, 142°14′～145°21′E，表面水温21°C以上の水域（B海域）でおもに再捕獲され，北方向に移動した魚は放流点のやや北東付近から舌状に北側に伸びた41°37′N～42°45′N, 144°49′E～146°31′Eの表層暖水域の先端付近（D海域）でおもに再捕獲された．この舌状の暖水域における再捕獲点の表面水温は18.4～19.4°Cであった．

この表層暖水域における再捕獲は10月2日まで続き，10月8日以降は大半が沖合の38°00′N～39°30′N, 147°38′E～150°00′Eで再捕獲された．また一部はすでに沿岸域を南下し34°25′～35°18′N, 138°15′～140°56′Eの黒潮内側域で再捕獲された．

3-3-3-4 北上魚と南下魚の体長差

8月下旬に放流したカツオの体長組成は体長43 cmを境として大小2群に分けられる．9月から10月にかけてB, D, E海域において再捕獲されたカツオの体長別出現尾数を検討すると(Fig. 38)，体長44 cm以下と46 cm以上のカツオが比較的多く再捕獲されているのに対して，45 cm付近の体長のカツオは再捕獲されていない．そこで，体長44 cm以下のカツオを放流時の小型群由来，46 cm以上のカツオを大型群由来の魚として区分し再捕獲緯度を検討した．放流後16日から40日までの間で，放流点緯度よりも北側で再捕獲されたカツオには大型魚が多く，南側で再捕獲された魚には小型魚が多い傾向が認められた(Fig. 39)．また民間漁船が各海域において漁獲したカツオの体長頻度分布を用いて各海域の小型魚と大型魚の混合割合を計算した．小型魚と大型魚の尾数比は，A海域では56 : 44，B海域では85 : 15，D海域では6 : 94，E海域では6 : 94となった．放流点付近のA海域では大型魚と小型魚の尾数はおよそ等しい割合を示したが，9月に放流点の南側に漁場形成されたB海域では85%が小型魚，放流点の北側でやはり9月に漁場形成されたD海域と10月に放流点の東南東側に漁場形成されたE海域では逆に94%が大型魚で占められた．

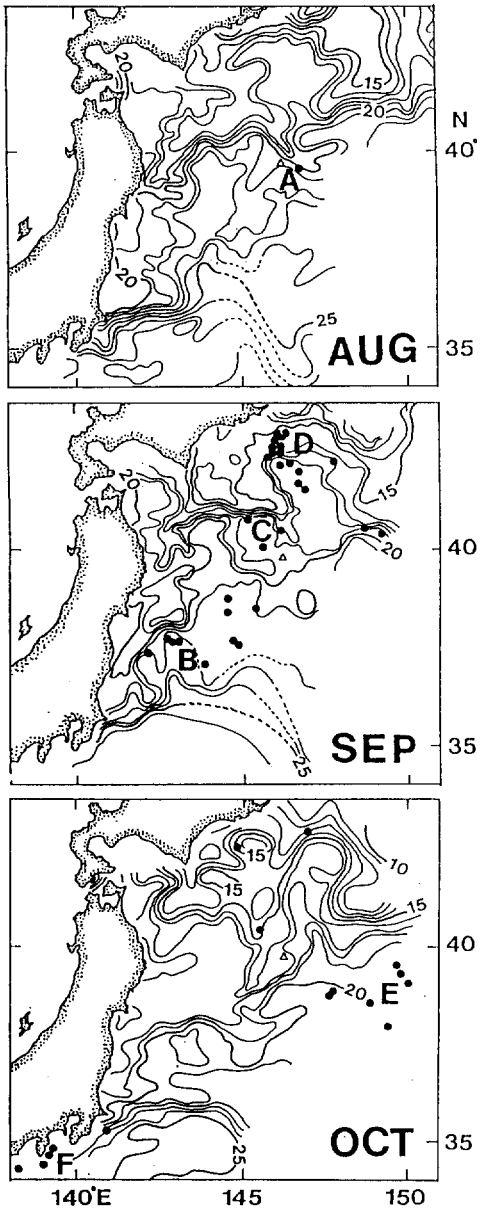

Fig. 37 Locations of the recapture of skipjack tuna from August to October in 1981 (△: Location of release, ●: Location of recapture, A～F: Areas of recapture).

3-3-4 考察

3-3-4-1 放流魚の移動経路

A海域で放流されたカツオは16日目以降連続して再捕獲された．その時空間的位置変化と再捕獲魚の体

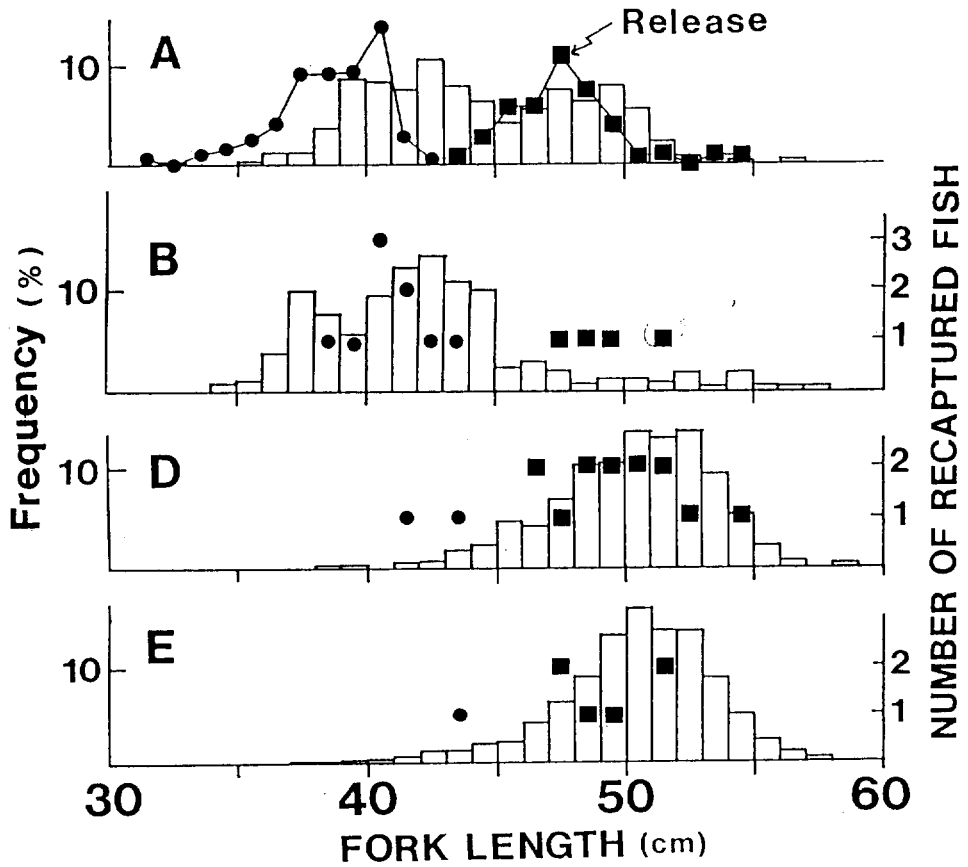

Fig. 38 Fork length of recaptured skipjack tuna and fork length compositions of the fish caught in the areas of A～E (●: Small size fish, ■: Large size fish).

長から移動経路を推定すると，一部の標識魚は北上移動をして9月中旬にはD海域へ移動し，その後10月にはE海域へと南下したと考えられた．また一部はD海域までは北上せずに，北緯40°N以南のC海域にとどまった後に，10月にE海域に移動したと思われた．さらに，一部の魚は放流点付近から北上することなく，そのまま南下移動をはじめ，9月中旬にはB海域に移動し，さらに10月には沿岸域を南下してF海域にまで移動したと推察された．このように，放流時に同一魚群を構成した標識魚は，その後，異なる魚群の構成魚となって，A→D→E, A→C→E, A→B→Fの主に3つの経路を経て南下移動をしたと考えられた．

3-3-4-2 フロント域におけるサイズスクリーニング現象

フロントを挟んで高水温域である放流点と東側低水温域に分布したカツオの体長組成を比較すると低水温域側では小型魚の漁獲割合は低かった．南西方向へ移動した標識カツオに小型魚が多かったことから考えて，おそらく小型魚はフロント域付近からさほど北上移動する事なくUターンし，37°N付近の高水温域まで南下したものと思われる．放流5日後にフロントを越えた東側の20°C台の水域で再捕獲されたカツオが大型魚であったこと，および放流後17日目以降に北側の表層暖水域内で再捕獲されたカツオが大型魚ばかりであったことから，大型魚はフロントを越えて東側へ移動した後，146°30′E付近の冷水を迂回してから，表層暖水域内へ北上移動したものと考えられた．このように大型と小型の混合群であった放流魚はフロント域付近において「サイズスクリーニング」され，小型魚は高水温域側に移動し，大型魚はフロント域を通過して41°N以北の低水温域側まで北上移動したものと思われる．標識魚が再捕獲された各漁場で民間漁船に

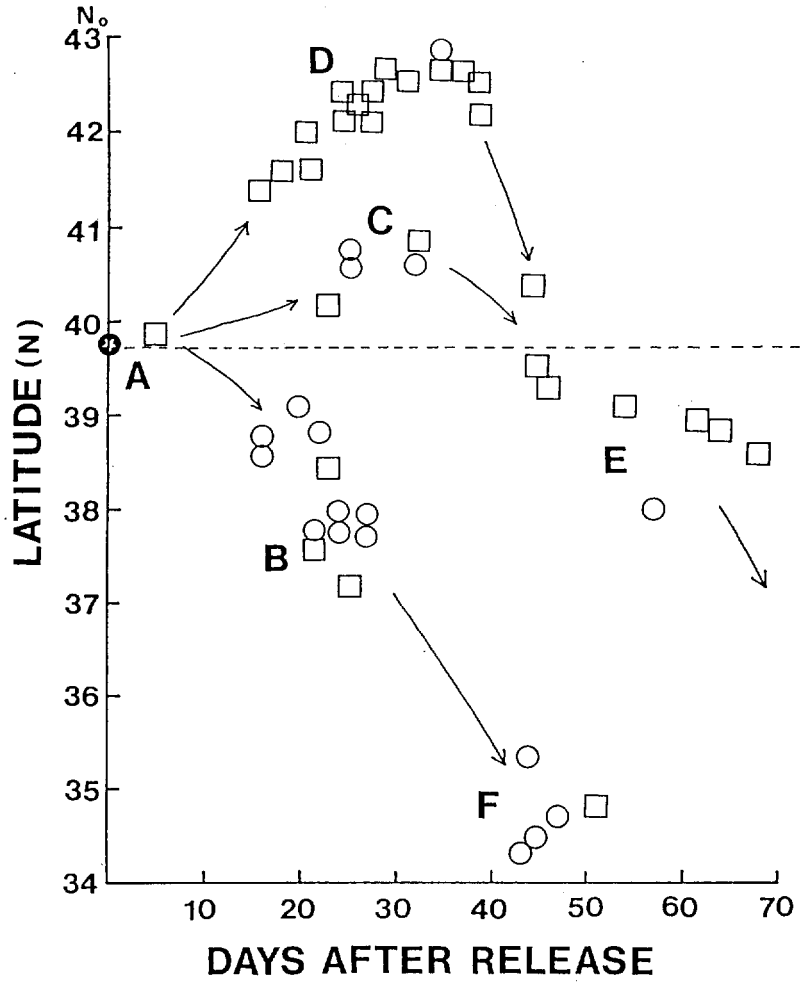

Fig. 39 Southward and northward migrations of tagged skipjack tunas (○: Small size fish, □: Large size fish).

よって漁獲されたカツオの体長組成でも，南下移動した標識魚が混在していたB海域の組成と，北上移動した標識魚が混在したD海域の組成では，およそ体長45 cmを境として，明らかに前者に小型魚，後者に大型魚が多い組成を示したことなどからみて，このようなサイズスクリーニング現象は標識魚に対してのみ起こった現象ではなく，この海域に北上来遊をしてきたカツオ全体のなかで，広く生起した現象であったと考えられる．

Bayliff (1988a) やHilborn (1991) はカツオの群(school)内の個体の保持性および群間の交流について標識調査結果を解析し，比較的短い期間に異なる群に所属する個体間で交流が起こっていることを明らかにした．フロント域付近でのサイズスクリーニングはこのような群内構成魚の再編成がフロント付近で活発に行われながら進行していることを示すものと考えられる (Fig. 40)．

西部太平洋において，はじめて産卵に参加するカツオの体サイズについて丹羽 (1973) は体長45 cm以上であるとし，永沼 (1979) は実質的な産卵群は46 cm以上であるとしている．この大きさと，フロントにおいてサイズスクリーニングされたカツオの体サイズがほぼ一致することから，フロントから北上移動したカツオは，秋に南下移動した後，亜熱帯から熱帯海域において，はじめての産卵を行うと考えられる．混乱水域においては大型個体，小型個体ともその生殖腺は

未熟であり（八百 1955，丹羽 1973，二平・小沼 1981），その生活はもっぱら索餌のための生活である．しかし，成魚としての体サイズに達した個体は，初回産卵へ向う前の混乱水域内の索餌生活期から，すでに，成魚としての群形成と行動に参加していくものと考えられる．そして，群の再編成と行動の分離は水温フロントと密接な関係を持ちながら進行するものと推察される．

8月29日に表層水温フロントの西側高水温域の39°36′N, 146°07′E 水温 21.9°C の位置に分布したカツオ 10 尾と 東側低水温側の 39°50′N, 146°58′E 水温 20.0°C の位置に分布したカツオ 5 尾の胃内容物の調査

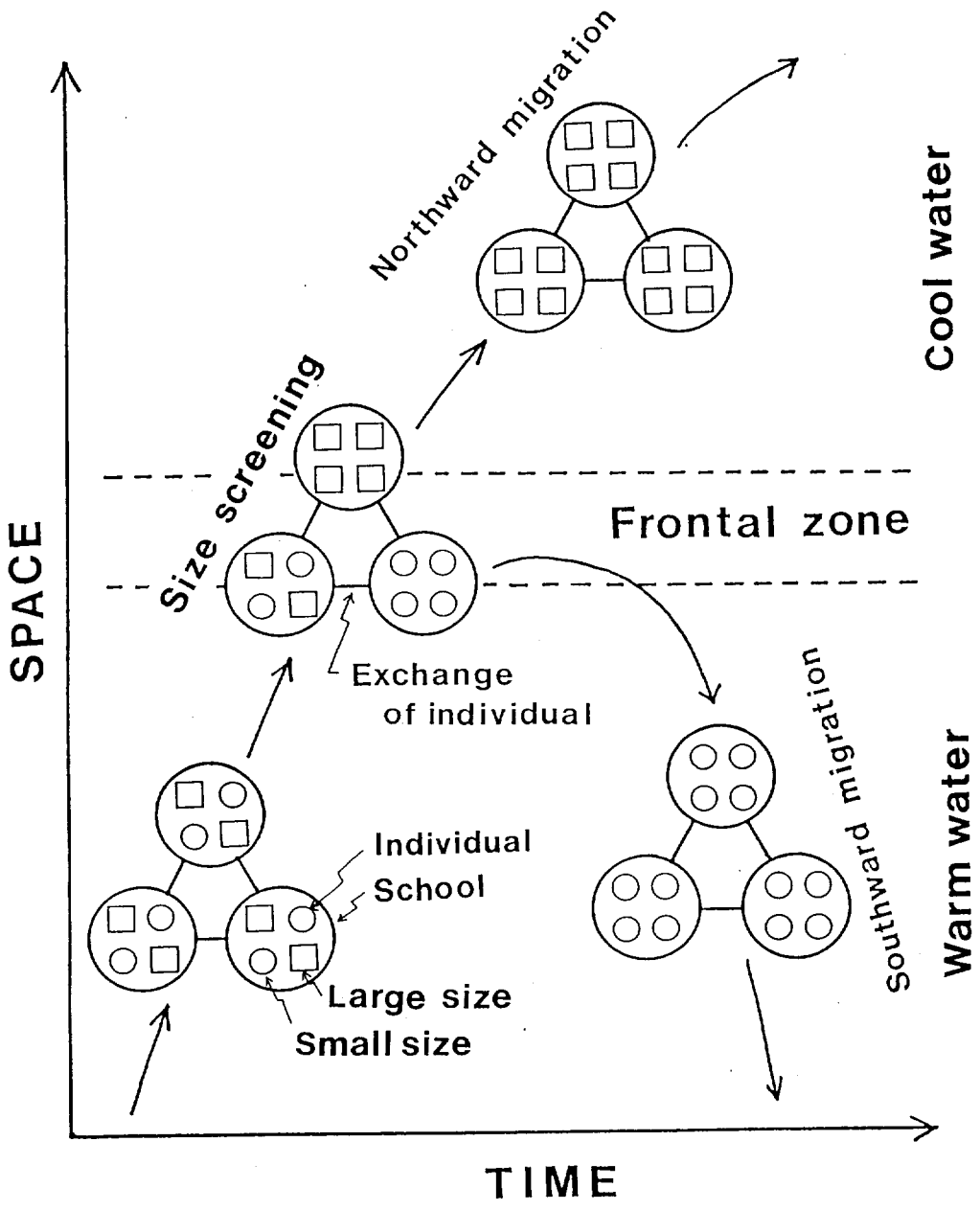

Fig. 40 Schematic model of the "size-screening" of skipjack tuna at the frontal zone.

結果では，高水温域分布魚の1尾あたり胃内容物重量はオキアミが8.3 g，カタクチシラスが3.6 gであったのに対して，低水温域分布魚のそれはオキアミが42.0 gであった．このことから，おそらく東側低水温域の方が餌生物との遭遇確率は高かったものと思われる．それにもかかわらず小型個体の大半は，低水温域側へ進入していない．カツオは高速で泳ぎながら多くの海水を鰓を通すことによって，体内に酸素を十分に取入れる．また，カツオは鰾（air bladder）が未発達であることから体が沈まないようにするためにも常に高速で泳ぎ続けなければならない．そして，外部環境より高い体温を保つことによって物質代謝，筋収縮，神経の興奮伝導などを速く行って高速遊泳を可能にしているとされる（Magnuson 1973，板沢1988）．東部太平洋で体長44.7-55.5 cmのカツオの体温を測定したBarrett and Hester（1964）はおよそ20°Cの水温環境に分布するカツオの体温は環境水温値よりも約5.6-11°C高いことを示した．このデータの範囲からはカツオが代謝維持に必要とする最低体温は25.6°C以上であるらしい．高緯度海域への北上移動を続けてきたカツオが低水温環境に遭遇した場合，その環境が代謝維持のために不適な水温環境であれば，どんなに餌が豊富な環境であったとしてもその環境に進入し続けることはできない．今回の標識放流実験では大型個体のみがフロントを越えて低水温環境下へ進入した．おそらく，大型個体は小型個体よりもより大きな発熱機構と体温保持機構を備えていて，代謝維持可能な最低体温を保持しながら低水温環境への進入を可能にしているものと思われる．

第4章 黒潮前線域から暖水ストリーマ内におけるカツオの分布とフロント

4-1 黒潮前線域へのカツオの集積と暖水ストリーマ内への侵入

潮境漁場の生態学的研究をすすめるためには，生物と海洋の両者に共通の時空間スケールの調査が重要である．ここでは潮境付近におけるカツオの分布状況，および，その生物的特性と潮境環境との関係を流し刺網調査に基づいて明らかにする．

4-1-1 方法

調査は1987年6月13日～6月23日に水戸丸を使用して行った．調査点は149°E～150°Eを，34°N～40°Nの範囲で，ほぼ緯度30′間隔に合計13点設定した．海洋観測は調査点すべてにおいて実施し，水深500 mまでの水温値と水深300 mまでの塩分値および表層流速を測定した．流し網調査はSts. 1, 3, 5, 7, 9, 11, 14の7点で実施した．流し網は夕方に設置し，翌日の朝に揚網した．使用した流し刺網の目合と反数は30 mm目合が10反，55 mm目合が5反，72 mm目合が8反，93 mm目合が9反，121 mm目合が12反の合計44反である．網丈は7 mである．流し刺網での採集生物は船内ですべて凍結保存し，水産試験場へ持ち帰ったのち測定に供した．

4-1-2 結果

4-1-2-1 調査域の海洋環境

調査時における表面水温分布および海洋観測調査点の位置，表面水温，流向・流速，流し刺網調査点をFig. 41, Table 8に示した．表面水温図としては6月16日から20日の期間に得られた表面水温値をもとに漁業情報サービスセンター（1987）* が作成した図を用いた．この表面水温分布図によれば黒潮続流域の最高水温帯は143°～145°E付近では36°N付近に分布しているが，145°～146°Eには冷水が侵入しているため33°N, 146°E付近まで下がり，147°～149°E付近では再び37°N付近を東に伸びている．37°N以南の調査ラインは149°～150°Eに設定したが，ここは黒潮続流域の最高水温帯が大きく北に張り出している水域の縁辺部にあたる．潮境の一応の目安となる表面水温の等温線が混んだ海域はSt. 7のすぐ北側とSt. 11付近に認められる．St. 7～St. 9のすぐ東側には北側に突出した表面水温17～18°Cの暖水舌状の水温構造が見られ，またSt. 11の北側には表面水温15°C以下の冷水の南下が認められる．

各調査点の表面流速は0.14～1.44 knotの範囲であった．他の調査点に比較してSt. 5, St. 11の調査点は1.0 knotを越える流速を示した（Table 8）．

各調査点における水温と塩分（実用塩分値PSU）の鉛直分布をFig. 42に示した．南側のSt. 1からSt. 7までは塩分34.5以上，100 m水深で水温15°C以上の高温高塩分の水が認められる．St. 8では塩分34.5以下，水温18°C以下の水の背斜構造が認められるが，St. 9では逆に塩分34.5以上の水が水深100 m層まで存在する向斜構造をなし，表層水温も18°C以上の水と

* 漁業情報サービスセンター（1987）漁海況速報第929号．

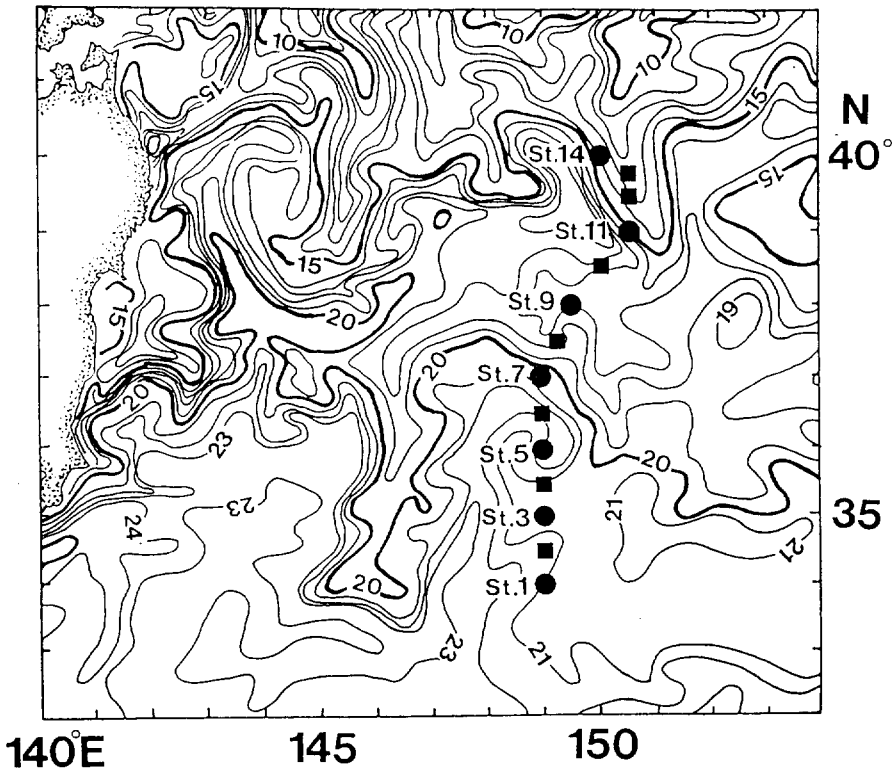

Fig. 41 Distribution of sea surface temperature (June 16-20, 1987) and location of drift nets (●) and CTD stations (■).

Table 8 Catch in number of skipjack tuna by drift nets in June, 1987.

St.	Date	Location		S.W.T (°C))	Current		Catch in No. of skipjack tuna
		Lat. (N)	Long (E)		Direction (°)	Speed (Knot)	
1	Jun. 13. 1987	34°00′	148°59′	21.3	210	0.45	42
2	Jun. 14	34°30′	149°00′	21.0	288	0.17	
3	Jun. 14	35°00′	149°00′	20.8	68	0.29	42
4	Jun. 15	35°30′	149°00′	21.9	121	0.61	
5	Jun. 15	36°00′	149°00′	22.4	88	1.44	3
6	Jun. 16	36°30′	149°00′	21.3	60	0.82	
7	Jun. 17	37°00′	149°00′	21.0	96	0.91	86
8	Jun. 18	37°30′	149°20′	17.1	142	0.81	
9	Jun. 18	38°00′	149°30′	18.9	243	0.22	20
10	Jun. 19	38°30′	150°00′	17.7	165	0.54	
11	Jun. 19	39°00′	150°30′	18.5	142	1.08	0
12	Jun. 20	39°30	150°30′	17.8	180	0.14	
13	Jun. 20	39°50′	150°30′	15.2	79	0.47	
14	Jun. 23	39°56′	150°00′	15.5	176	0.65	0

なっている．St. 10 から St. 12 の間は表面から水深 80 m 付近まで塩分 34.4 の水で覆われているが，St. 12 と St. 13 の間には顕著な塩分フロントの存在が認められる．

各調査点における水質区分のために，T-S ダイヤグラムを作成した(Fig. 43)．これによれば，各調査点は Sts. 1, 3, 5 のグループ，Sts. 7, 9 のグループ，Sts. 8, 11 のグループ，St. 14 のグループの大きく 4 つに区分される．さらに，St. 7 と St. 9 の間では 0～30 m 層で水温値に 2°C 程度の相違があることが明瞭に読み取れる．

つぎに，カツオの遊泳層にフロントが存在するかどうかを確かめるために，ここでは 20 m 層の水温・塩分をぬきだして，その南北の変化を表面流速値とともに図示した(Fig. 44)．図中の流し刺網調査点にはカツオの漁獲尾数を記入した．南側からの水温，塩分値の推移をみると，St. 7 から St. 8 の調査点にかけて水温差で 4.3°C，塩分差で 0.19 の低下が認められる．St. 9 では再び水温，塩分とも高い値を示している．St. 10 以北では水温，塩分とも低いまま推移している．

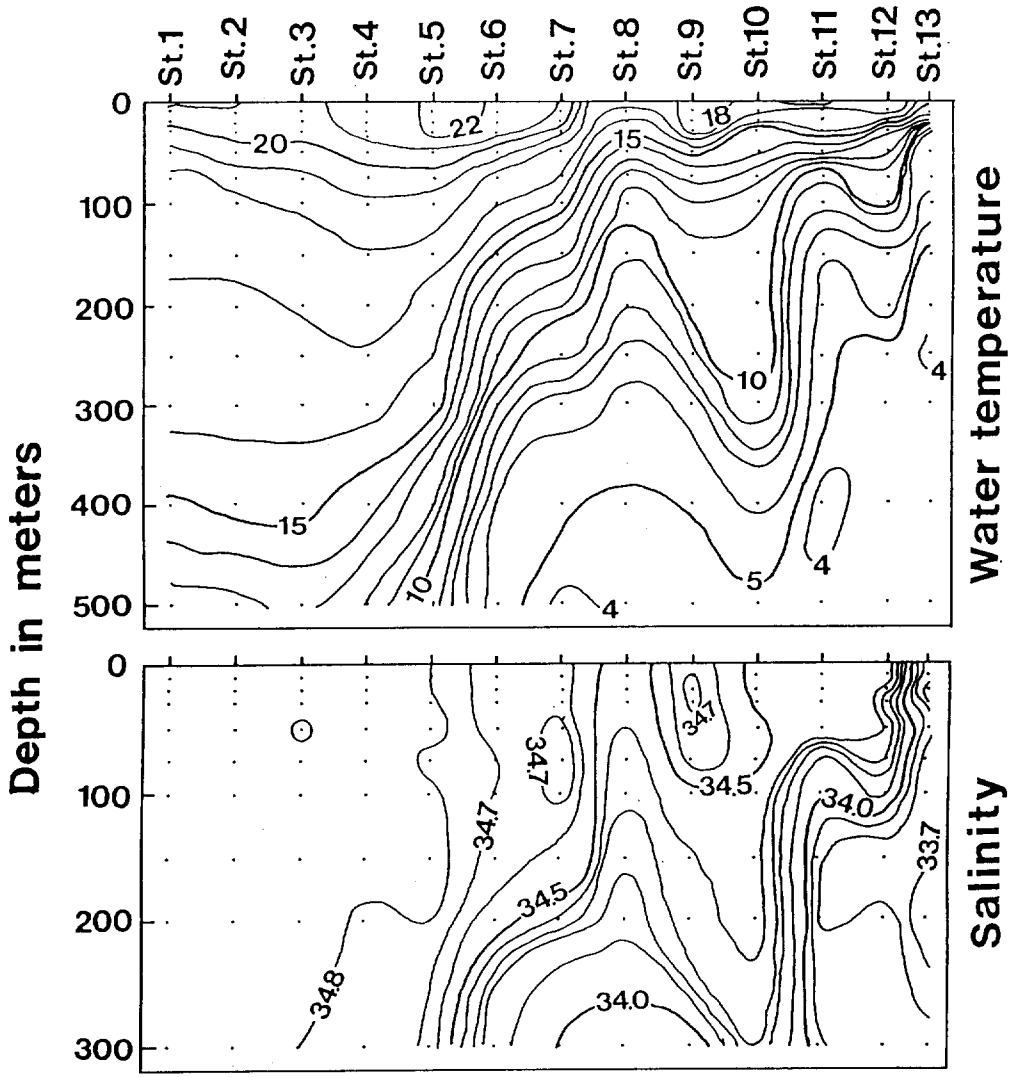

Fig. 42 Distribution of water temperature (upper) and salinity (lower) at the cross section of the Kuroshio Front in June, 1987. The survey line is indicated in Fig. 41.

4-1-2-2　流し刺網による採集生物種

Table 9 に各調査点において採集された生物種の尾数を示した．カツオは St. 1 で 42 尾，St. 3 で 42 尾，St. 5 で 3 尾，St. 7 で 86 尾，St. 9 で 20 尾の合計 193 尾が採集された．北側の 2 点 St. 11, St. 14 の調査点ではカツオは採集されなかった．カツオが採集された調査点はいずれも表面水温が 18°C 以上，塩分が 34.6 以上であった．胃内容物調査をした 52 尾のカツオからは胃内容物は検出されなかった．カツオが採集されなかった St. 11, St. 14 では尾叉体長 22.0～38.3 cm のマサバと体長 14.0～16.4 cm のマイワシ，体長 23.6～32.4 cm のサンマなどが数多く採集された．胃内容物調査をした

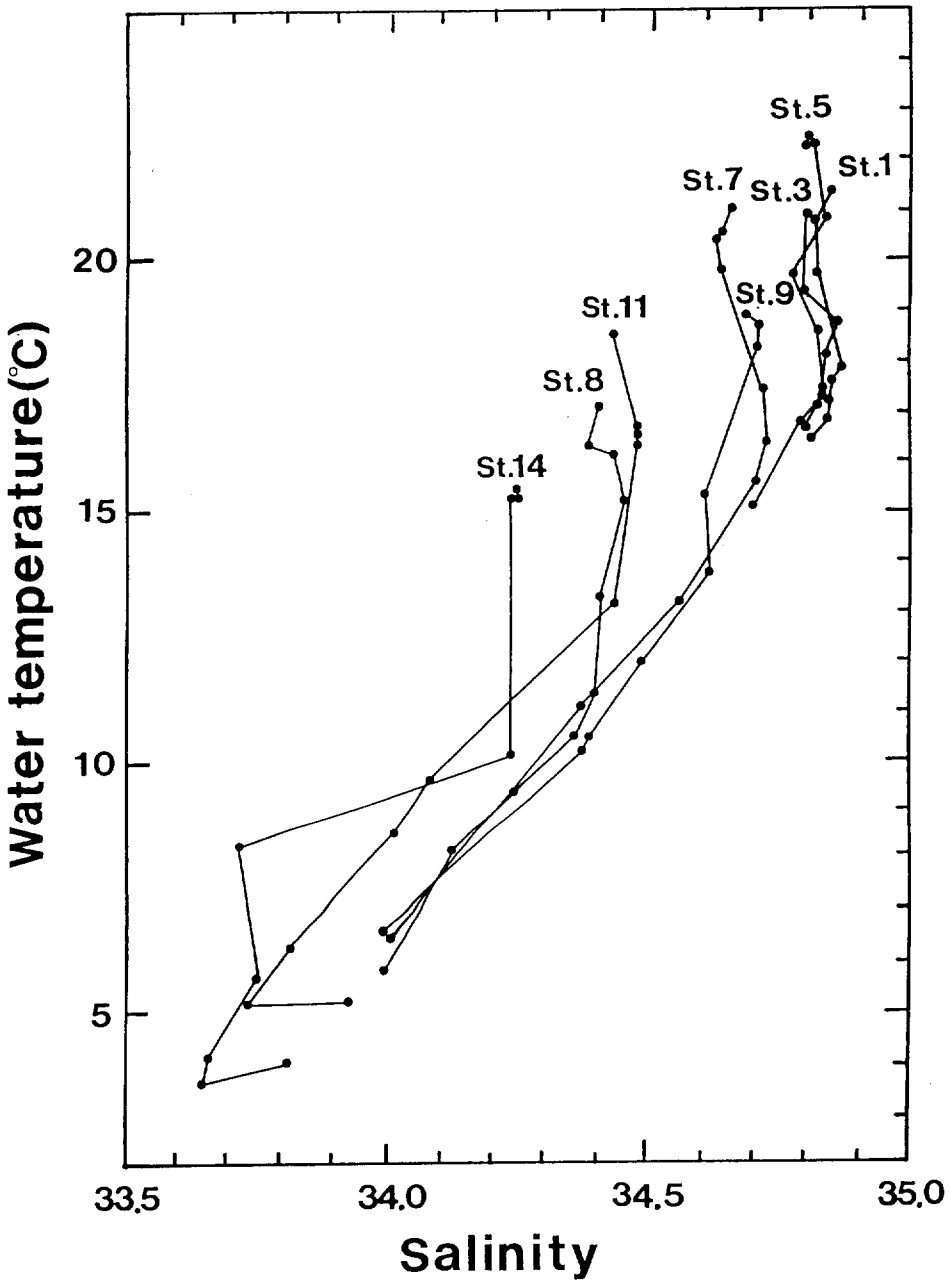

Fig. 43　T-S diagrams based on the data obtained from the drift net stations in June, 1987.

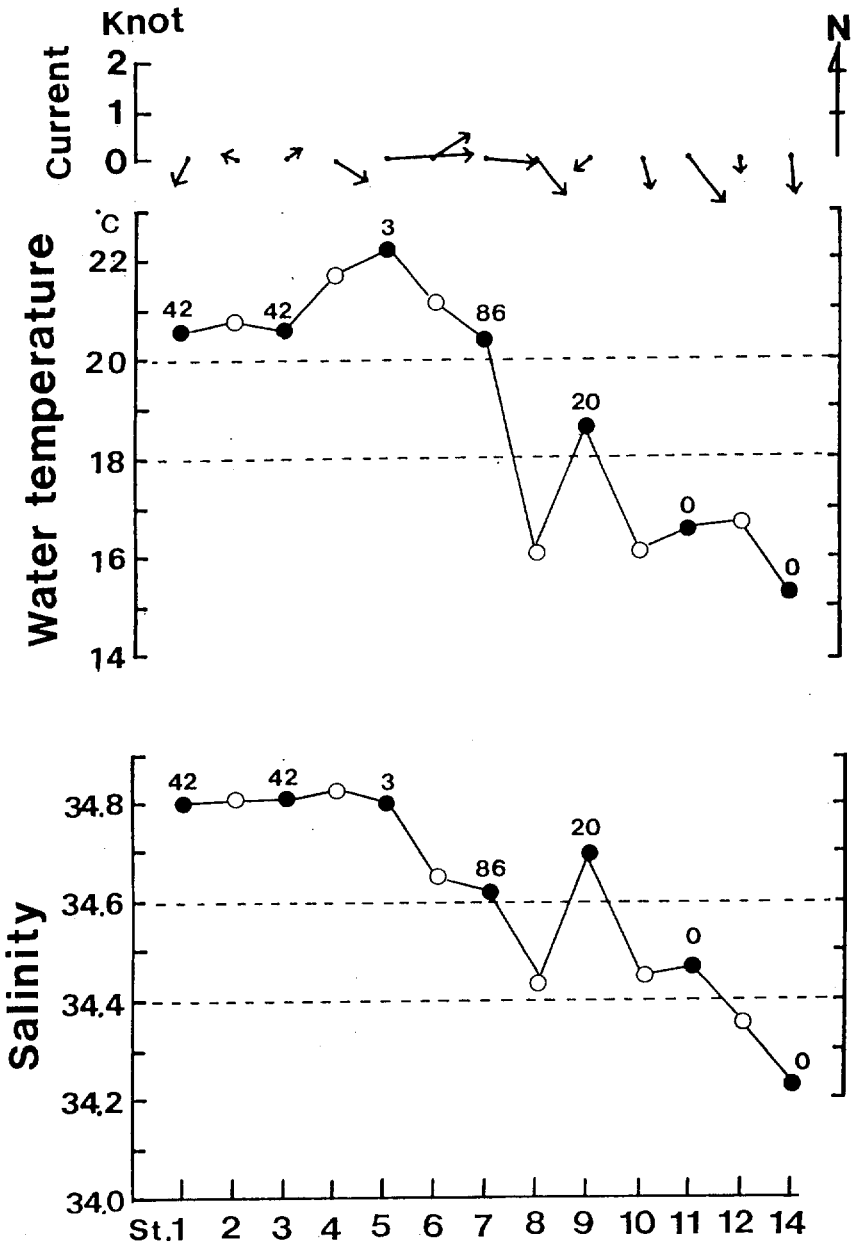

Fig. 44 Surface currents from GEK and temperature and salinity at 20 m depth along a cross section of the Kuroshio Front in June, 1987. Numerals in the figure indicate the catch in number of skipjack tuna by the drift nets.

Table 9 List of the species caught in the drift nets.

Speices	Station No.						
	St. 1	St. 3	St. 5	St. 7	St. 9	St. 11	St. 14
Katsuwonus pelamis	42	42	3	86	20	0	0
Sthenoteuthis bartrami	30	13	21	17	1	1	35
Brama japonica	2	1	13	4	3	54	50
Chondrichthyes sp.	3				5	103	
Psenes pellucidus	1			2			
Diodon holocanthus	1						
Argonauta argo		4					
Coryphaena hippurus			1	1	2		
Exocoetidae sp.			6				
Scomber japonicus			1	1	1	32	98
Seriola quinqueradiata			1				
Thunnus alalunga					1		
Cololabis saira					3	4	34
Sardinops melanostictus						2000	1500
Onychoteuthis banksii borealijaponia							10
Gempylus serpens							4

33尾のマサバのうち67%の個体がオキアミ類を捕食していた.

4-1-2-3 カツオの体長と肥満度

Fig. 45にはSt. 1からSt. 9の調査点で採集されたカツオの体長と肥満度を示した. Sts. 1, 3, 5, 7では, 採集数が少なかったSt. 5をのぞいて, 体長40 cmから55 cmまでの幅広い体長のカツオが採集された. それに対して, St. 9では, 体長45 cm以上の魚の割合に比較して, それ以下の魚の割合は極めて少なかった. St. 7で体長45 cm以下のカツオが大量に採集されたのに比較すると, St. 9では体長45 cm以下のカツオの採集数はきわめて少ない. またSt. 1からSt. 7まではカツオの体長の大きさにかかわらず肥満度は17.0から24.0まで幅広い範囲の値を示したのに対し, St. 9ではすべてのカツオの肥満度が20.0以上であった.

4-1-3 考察

4-1-3-1 海洋構造

水深20 mにおける水温・塩分値の変化によれば, 顕著な水温・塩分値の低下はSt. 7とSt. 8の間に認められる. Fig. 42の水温の鉛直分布においては水深200 m以深ではSt. 5とSt. 6の間に顕著な水温躍層が認められ, 200 m以浅ではSt. 7とSt. 8の間に顕著な水温躍層が認められる. 塩分の鉛直分布でも水深150 m以浅ではSt. 7とSt. 8の間に塩分値34.4から34.6の塩分躍層が認められる. 北側ではSt. 12とSt. 13の間で顕著な塩分フロントが存在し, その北側に塩分34.0以下の低塩分水が存在する. T-SダイヤグラムにおいてもSt. 8はSt. 7とは大きく異なり, むしろ, St. 11に近い. したがって, St. 7とSt. 8の間のフロントは黒潮前線, St. 12とSt. 13の間のフロントは親潮前線であると考えられる. また, St. 5はもっとも高い水温値と表面流速値を示すことから, 川合 (1972) のWarm core, St. 1～St. 4は外側低温帯, St. 7は水温がSt. 1～St. 3と変らず塩分値がやや低下していることから, 黒潮前線付近であると思われる. St. 9は水温がSt. 7よりも低下しているが, 塩分値はSt. 7以南と同様に34.6以上ある. また, St. 9と緯度で30分の距離にあるSt. 8とSt. 10が低温・低塩分であること, Kawai and Saitoh (1986) による海洋の鉛直分布構造からの判定基準に照しても, St. 9付近の高温高塩分水は暖水ストリーマであると思われる. 表面水温分布によればSt. 7付近からSt. 8のすぐ東側を水温18°C台の水が細く北側に張り出している. また, St. 9の表面流速はSt. 8の142°, 0.81 knotに対して243°, 0.22 knotと西向きに流れている. これらのことから, おそらく暖水ストリーマはSt. 7のやや東側から北にのびてSt. 9付近から東側へ回り込んでいるものと推測される (Fig. 46).

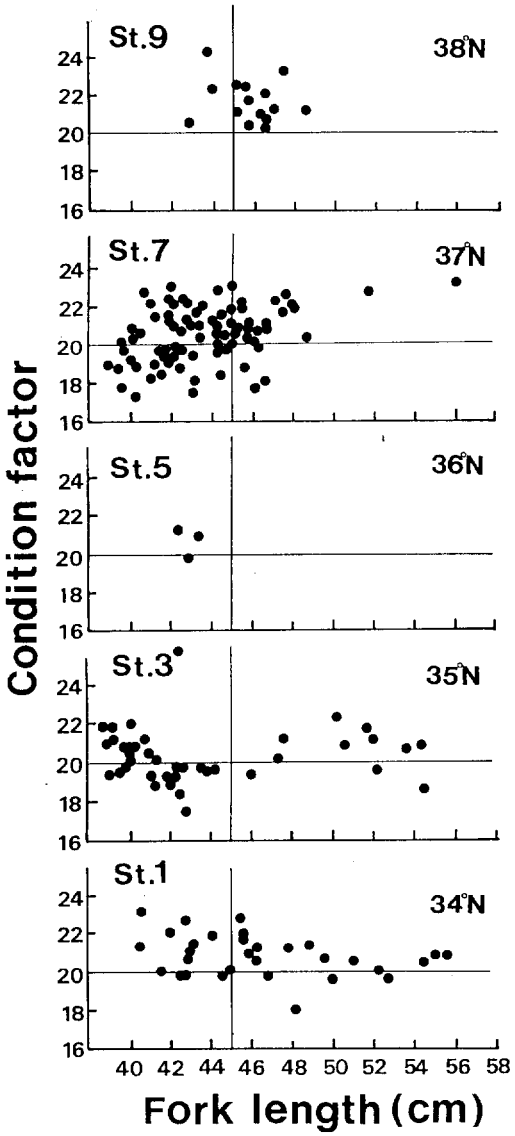

Fig. 45 Fork lengths and condition factors of skipjack tunas caught by drift nets. St. 1 and St. 3: Kuroshio area, St. 5: warm core, St. 7: Kuroshio Front and St. 9: warm streamer. All skipjack tunas in the warm streamer has the condition factor above 20.

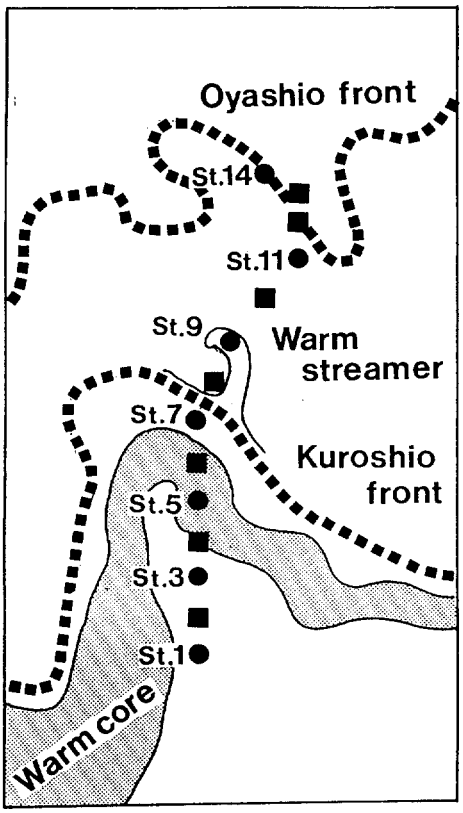

Fig. 46 A schematic illustration of the Kuroshio and Oyashio Fronts and the location of drift nets (●) and CTD stations (■) in June, 1987.

4-1-3-2 カツオの移動

カツオの採集量は外側低温帯 (St. 3) で 42 尾，黒潮前線付近 (St. 7) で 86 尾，暖水ストリーマ内 (St. 9) で 20 尾，Warm core 内 (St. 5) で 3 尾であった．この採集尾数から推察すると，日本近海を北上移動してきたカツオは外側低温帯で一時滞留したあと北上個体は Warm core 内を一気に通過して黒潮前線付近に集積していると思われる．この黒潮前線付近で採集されたカツオには外側低温帯の Sts. 1, 3 で採集された体長 49 cm 以上のカツオの採集数はきわめて少ない．このことは外側低温域まで北上してきたカツオのうち一部の「大型・高肥満度」のカツオは Warm core を越えて黒潮前線付近までは大半が北上しないものと思われる．第 3 章において，カツオの標識放流結果を解析し，外側低温帯から放流されたカツオには，さらに北上して黒潮前線を越える個体と外側低温帯付近から U ターンして南下移動する個体があることを確かめた．そして，南下移動個体はおそらく産卵活動に関与するものと推定した．このことから推察すると，外側低温帯で今回採集された大型個体はおそらく，南下移動する個体であろうと思われる．

また，St. 7 の黒潮前線域へ集積したカツオは，St. 8

の「低水温・低塩分」水を直接乗り越えてSt. 9の暖水ストリーマ内へ移動したのではなく，おそらくSt. 7の東側の前線域から派生した暖水ストリーマに沿いながら北側のSt. 9付近へ移動しているものと思われる．St. 7の黒潮前線域の30 m以浅の水温が19.8～21.0°Cであったのに比べ，St. 9の暖水ストリーマ内のそれは18.3～18.9°Cと約2°Cの水温差を示している．北上移動個体はSt. 7の前線域からSt. 9の暖水ストリーマ内へ北上移動する際，黒潮前線付近に形成される表層水温フロントを通過して暖水ストリーマ内へ侵入しているものと考えられる．

4-1-3-3　黒潮前線域から暖水ストリーマ内へのカツオの移動と体サイズ

St. 7において採集されたカツオが体長39 cmから55 cm，肥満度17から23と幅広い体長と肥満度を示したのに対し，St. 9において採集されたカツオのほとんどが体長45 cm以上で，しかも，すべてのカツオが肥満度20以上を示した．このことからカツオが20°C台の「高水温域」から18°C台の「低水温域」へ移動する際，水温フロントで大型個体のみが通過するサイズスクリーニングをおこしているものと思われる．体長およそ45 cm以下，および肥満度20以下の小型個体は18°C台の暖水ストリーマ内へは侵入できないため，多くのカツオがSt. 7の黒潮前線付近で滞留・集積していたと考えられる．St. 7で漁獲尾数が最も多かったのはこのような原因によるものであろう．おそらく小型個体は黒潮前線付近に滞留しながら体長，体重を増加させた後，低水温の暖水ストリーマ域へ侵入するか，あるいは，暖水ストリーマの発達にともなうストリーマ内の水温上昇を待って北上するものと考えられる．30m以浅の水温が16.4～18.5°Cを示したSt. 11の調査点や15.2～15.5°Cを示したSt. 14の調査点ではいずれも多くのマイワシやマサバの分布が認められた．また，マサバの大半がオキアミ類を捕食していた．このことから，カツオが集積していた黒潮前線域や暖水ストリーマ付近のフロントをはさむ低温水域側には，これらの生物種が数多く分布するものと考えられる．マイワシやマサバ，オキアミ類はカツオの重要な餌生物であることから（堀田・小川1955，飯塚ら1989），黒潮前線域にまで北上来遊するカツオはこれら低水温域に分布する餌生物を採餌している可能性が高い．今回採集したカツオの胃内容からは認められなかったが，例年，前線漁場でのカツオの胃内容物からは，これらの生物種の消化物が数多く検出される．

サーミスターを魚の体内に挿入して環境水温変化に対する体温変化を調べた結果(黒木1967)によれば，環境水温を急に数°C変化させた場合ニジマスやキンギョでは体温がそれに追随するのに2～3.5分の遅れが認められる．Carey and Lawson (1973) はクロマグロにテレメトリー装置を付け，体内温度と環境水温の違いを調べている．彼等の示した図によれば，クロマグロは極めて短時間の間に温度躍層を越えて水温差がしばしば10°C以上もある低水温層に侵入している．体内温度は外部環境水温の低下に伴い一時的な低下を示すが，その範囲は5°C以内となっており，クロマグロは短時間の間に元の高水温環境に戻るため，体温はそれ以上大きな降下を示す前にすみやかに元の体温に復帰しているようである．

マグロ類と同様に向流熱交換系（Counter current heat exchanger）(Stevens *et al.* 1974) を持ち，外部環境水温より高い体温を保つカツオ（Barrett and Hester 1964, Stevens and Fry 1971）においても一時的には低水温環境に侵入して，これら低水温側に分布する餌生物を利用し，再び高水温側に戻ることは可能であると思われる．おそらく黒潮続流や暖水ストリーマによって形成されるフロント域に集積したカツオ魚群は低水温域側に一時的に侵入する行動をくりかえしながら，たくみに低水温域側に分布する豊富な餌生物を利用しているものと考えられる．

黒潮前線域まで来遊したカツオは暖水ストリーマ内へ移動することによって，混乱水域から親潮水域まで侵入することが可能となる．そのような移動行動をとることによってカツオは混乱水域から親潮水域に分布する豊富な餌生物との遭遇確率を一層高めているものと思われる．

4-2　暖水ストリーマ内に侵入したカツオの水温適応と採餌生態

本節では1988年の流し刺網調査結果をもとに，暖水ストリーマ内に侵入したカツオの採餌生態と潮境との関係について検討する．

4-2-1　方法

調査は水戸丸を使用し，1988年6月20～29日にかけて行った．調査点は146°E～147°E付近を黒潮前線南側の35°Nから親潮水域の40°38′Nまで暖水ストリーマ付近を南北，および東西に縦断するように設定した．水温と塩分の鉛直分布調査のため33調査点において

水深500 mまでのCTD観測を実施した．また7点で流し刺網調査を実施した．使用した流し刺網の目合と反数は21 mmが5反，30 mmが10反，55 mmが5反，72 mmが5反，75 mmが3反，93 mmが9反，112 mmが3反，121 mmが9反，130 mmが10反の合計59反である．1反当たりの長さは50 m，網丈は7 mである．流し刺網での採集生物は船内ですべて凍結保存し，水産試験場に持ち帰ったのち測定に供した．

4-2-2 結果

4-2-2-1 調査域の海洋環境

調査時における表面水温分布および海洋観測調査点の位置，カツオ魚群の目視位置，流し刺網調査位置をFigs. 47, 48, Table 10に示した．Fig. 47は6月21～24日までの水温データをもとにJAFIC（漁業情報サービスセンター）で作成された表面水温分布図であり，Fig. 48は本調査期間に得られた水戸丸での航走水温値と無線交信で得た他船の航走水温値から作成した．

St. 1からSt. 27までの調査点の中から，この海域をほぼ南北に横断する測線上の調査点を選定して，500 m深までの水温，塩分の鉛直断面分布図を作成した(Fig. 49)．100 m深で南側のSt. 1からSt. 5までは水温20°C以上，塩分34.5以上の高温・高塩分水が認められるが，St. 5とSt. 7間には水温，塩分の収束域が認められ，St. 7から北では水温は15°C以下，塩分34.5以下である．さらに，St. 24とSt. 25の間には2番目の水温，塩分の収束域が認められ，それよりも北側では水温は10°C以下，塩分33.5以下である．水温20°C以上の表層水はSt. 7からSt. 15付近まで約20 mの水深幅で張り出し，さらに，St. 24付近にも水深30 m幅で認められる．また，34.5以上の高塩分水はSt. 5以南の他に，St. 13からSt. 14付近の50 m深に水塊状に存在し，St. 23～St. 25付近には表面から100 m深にかけて認められる．

4-2-2-2 カツオ魚群の目視観測位置

調査ライン付近におけるカツオ魚群の目視観測結果をFig. 48に示した．表層水温が21.7°C以上であったSt. 7付近までは魚群はまったく認められず，表面水温20.1°CのSt. 8付近で最初の魚群が認められ，その後，St. 10, St. 16, St. 18～St. 20, St. 23, St. 29, St. 33付近で魚群分布が認められた．魚群分布が確認された点の表面水温は18.3～20.6°Cであった．

4-2-2-3 流し刺網による採集生物種

Table 11には各調査点において採集された生物種の尾数を示した．カツオはSt. 1で2尾，St. 5で2尾，

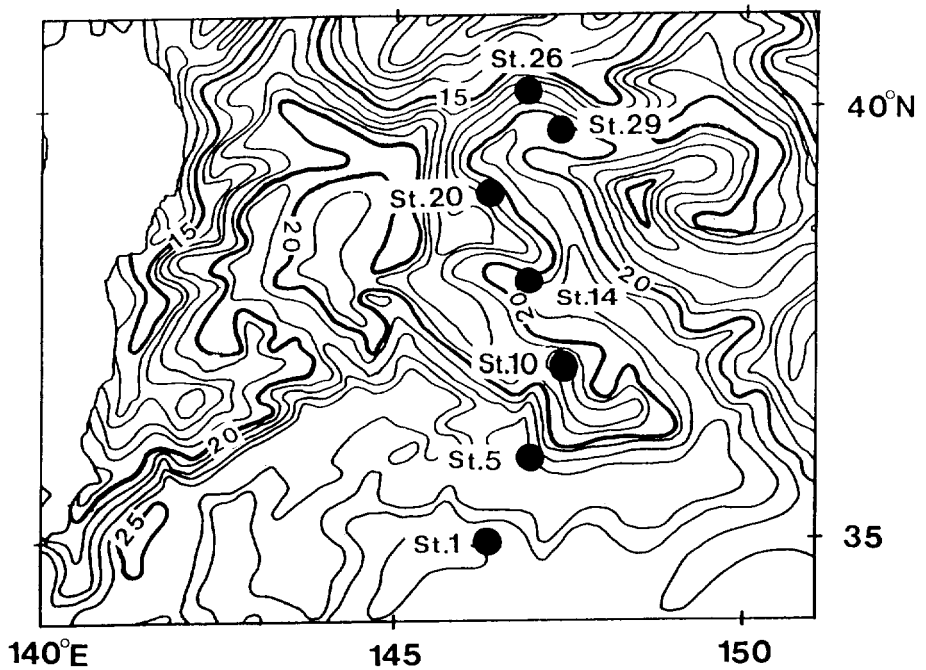

Fig. 47 Surface temperature distribution during 20-29 June and location of drift nets in June, 1988.

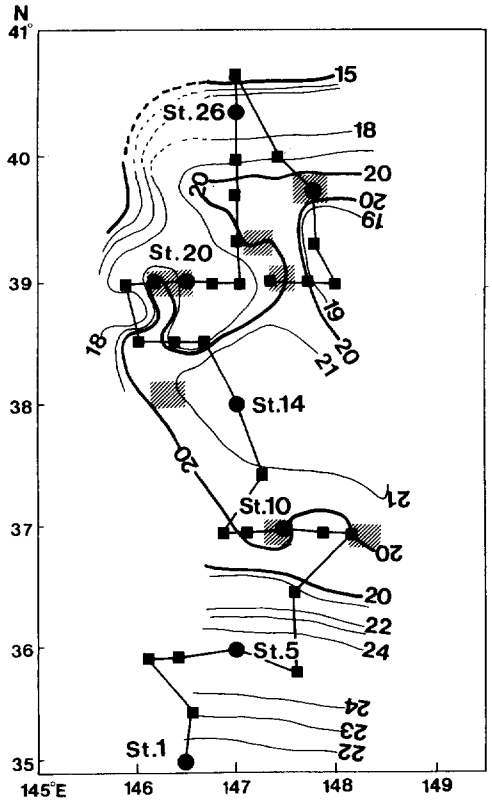

Fig. 48 Surface temperature distribution and distribution of shoals of skipjack tuna (the part of shadow) during 21-27 June 1988. The survey line by R/V Mito-maru is shown with a solid line.

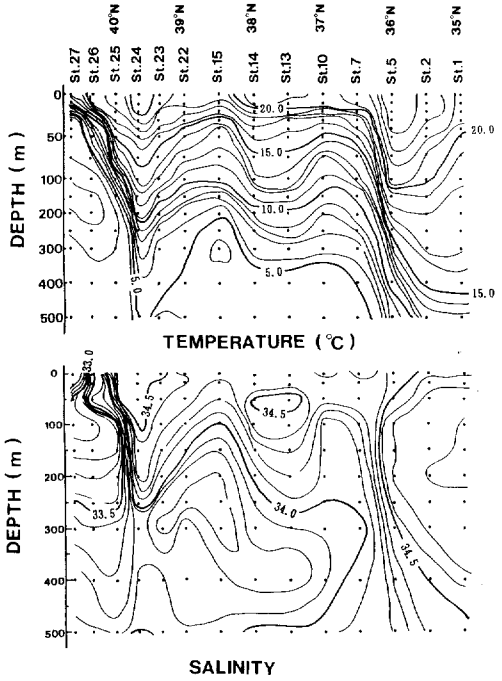

Fig. 49 Distribution of water temperature (upper) and salinity (lower) along a cross section of the Kuroshio Front in June, 1988.

St. 10 で 791 尾, St. 14 で 3 尾, St. 20 で 256 尾, St. 29 で 50 尾が採集されたが, 最も北側に位置し, 表面水温が 17.8°C であった St. 26 では採集されなかった. カツオが採集された調査点の表面水温は 18.3°C 以上, 表面塩分 34.2 以上であった. カツオが採集されなかった St. 26 では体長 28.2～36.7 cm のマサバ, 体長 15.1～19.0 cm のマイワシ, 体長 28.6～33.0 cm のサンマが数多く採集された.

4-2-2-4　カツオの体長と肥満度

Figs. 50, 51 には St. 1 から St. 29 までの調査点で採集されたカツオの体長と肥満度を示した. 表面水温が 21.7°C 以上を示した St. 1, St. 5, St. 14 の 3 調査点において採集されたカツオは測定不能であった 1 尾を除い

Table 10 Catch in number of skipjack tuna caught in the drift nets in June.

St.	Date	Laocation		S.W.T (°C)	Current		Catch in No. of Skipjack tuna
		Lat. (N)	Long (E)		Direction (°)	Speed (Knot)	
1	Jun. 21. 1988	35°01′	146°21′	21.7	135	0.10	2
5	Jun. 22	35°59′	147°00′	24.8	127	2.10	2
10	Jun. 23	37°00′	147°29′	20.4	113	0.38	791
14	Jun. 24	38°00′	147°00′	21.9	71	0.39	3
20	Jun. 25	39°00′	146°26′	18.3	352	0.33	256
26	Jun. 26	40°20′	146°59′	17.8	128	0.59	0
29	Jun. 27	39°44′	147°29′	20.6	105	1.05	50

Table 11 List of the species caught in the drift nets.

Species	Kuroshio area		Transitional area				Oyashio area
	St. 1	St. 5	St. 10	St. 14	St. 20	St. 29	St. 26
Katsuwonus pelamis	2	2	791	3	256	50	
Scomber japonicus	5	1					506
Sardinops melanostictus	5	1		7			1903
Cololabis saira				1	10	37	909
Thunnus thynnus			1				
Thunnus albacores		1		1			
Tetrapturus audax		3	1				
Seriola aureovittata		1					
Auxis rochei				2			
Thunnus alalunga				3	1	6	
Coryphaena hippurus	1	5	5		8	3	3
Brama japonica	2	2	5	5	8	3	15
Naucrates ductor	1		1	4	4	3	
Gempylus serpens				1			
Ommastrephes bartrami	12	2	20	12	85	126	
Todarodes pacificus						22	
Eucleoteuthis luminosa			1	1	1		
Onychoteuthis borealijaponica	5	3					110
Cetacea sp.			1	1			
Selachii sp.	1		3		20	8	34

て，すべて体長 47 cm 以上，肥満度 19.9 以上の個体であった．また，表面水温が 20.4°C および 20.6°C であった St. 10，St. 29 で採集されたカツオは 40 cm から 55 cm と広い体長範囲を示し，St. 10 で 96%，St. 29 で 91% 以上の個体が肥満度 20.0 以上を示した．18.3°C と表面水温が最も低い St. 20 で採集されたカツオは 41 cm から 50 cm の体長範囲を示し，採集個体の 94% 以上が肥満度 20.0 以上であった．200 尾以上採集された St. 10 と St. 20 のカツオについては，表面水温が 20.0°C 以上を示した St. 10 では体長 43～45 cm の範囲の個体が卓越したのに対し，18.3°C の表面水温を示した St. 20 では体長 45～47 cm の範囲の個体が卓越した．

4-2-2-5 胃内容物

各調査点で採集したカツオの胃内容物を調査し，胃内容生物種の出現率（出現胃数/調査胃数）を Fig. 52 に示した．表面水温が 20.0°C 以上の St. 5, St. 14, St. 29 で採集されたカツオでは空胃率が 50～100% と高い割合を示し，わずかに St. 5 で魚骨が 50%，St. 29 でオキアミ類が 27% を示した．それに対して表面水温は 20.4°C でも水深 30 m 層で 16.9°C と低い水温を示した St. 10 では，空胃率は 14% に減少し，胃内容物はオキアミ類，カタクチシラス，消化物，魚骨，イカ類と多様度を増し，特にオキアミ類は 67%，カタクチシラスは 54% の割合で出現した．

表面で 18.3°C，水深 30 m 深で 15.5°C と最も低い水温を示した St. 20 では空胃率はさらに 7% と低くなり，胃内容物としてはオキアミ類，マイワシ，イカ類，カタクチシラス，魚骨，カタクチイワシ，端脚類が出現した．特にオキアミ類の出現は 72% にのぼり，また，他の調査点では出現していないマイワシやカタクチイワシの出現が認められた．胃内容物のマイワシの体長範囲は 16.0～19.0 cm，カタクチイワシは 8.5～9.0 cm であった．

1 尾あたりの胃内容物の平均重量は St. 5 での採集個体で 10 g, St. 29 で 24 g であったのに対し，St. 10 では 50 g, St. 20 では 57 g と，水深 30 m 層水温が相対的に低い調査点で採集されたカツオが大きな値を示した．

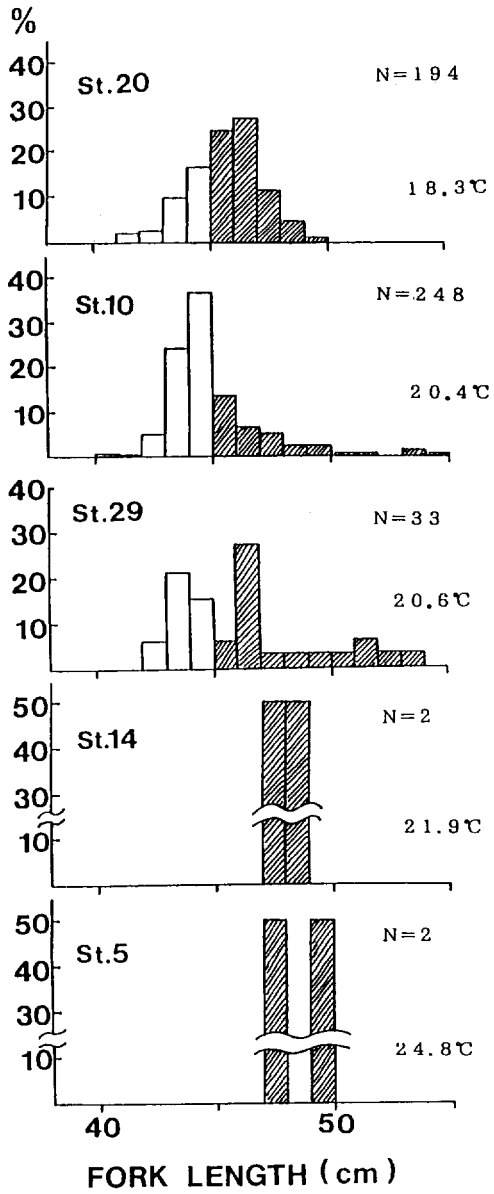

Fig. 50 Fork length composition of the skipjack tuna caught by drift nets. Surface water temperatures are indicated in the figure.

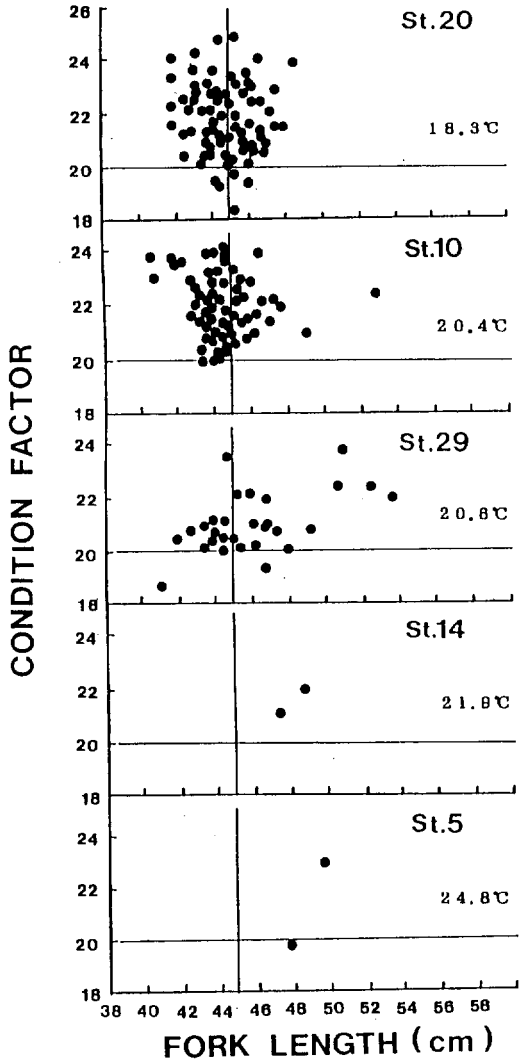

Fig. 51 Fork lengths and condition factors of the skipjack tuna caught by drift nets at Sts. 5, 10, 14, 20, 29. Surface water temperatures are indicated in the figure.

4-2-3 考察

4-2-3-1 海洋構造

St. 5 における流速は 2.10 knot と速い流れを示したこと，表層から 200 m 深まで高温，高塩分を示すことから St. 2 から St. 5 付近は Warm core, 鉛直分布における水温と塩分の収束位置から黒潮前線の位置は St. 5 と St. 7 の間にあると考えられる．また，川合 (1972) は親潮前線は 50～200 m 深における塩分 33.60 以下の西部北太平洋亜寒帯水の周辺にある水温前線であるとしている．このことから，調査時における親潮前線の位置は St. 24 と St. 25 の間付近と考えられる．また，St. 13～St. 14 と St. 23～St. 25 付近に認められた高温，高塩分水は暖水ストリーマであると考えられる．

表面水温分布 (Figs. 47, 48) から推察すると，暖水ストリーマは St. 8 の東側から北西側に延びて，その西

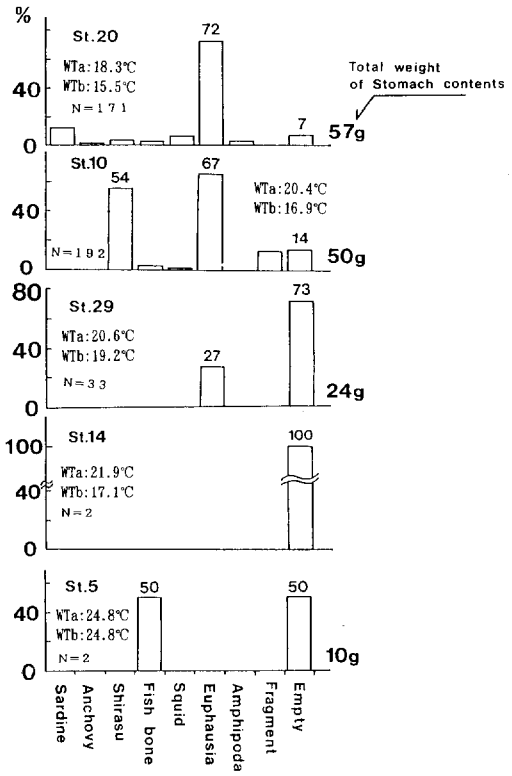

Fig. 52 Stomach contents of the skipjack tuna caught by drift nets. (WT_a: Surface water temperature, WT_b: Water temperature at 30 m depth)

側縁辺部は St. 11 から St. 17 付近に達し，そこから東に回り込み，St. 32 から St. 33 付近からはさらに北に延びて St. 24, St. 29 付近を通って東に延びている．また，St. 17 付近から St. 19 にかけては小規模な暖水ストリーマの存在が認められる．水温・塩分の鉛直分布，および，表面水温分布から，流し刺網調査点の海洋環境は St. 1 と St. 5 が黒潮水域，St. 10, St. 14, St. 20, St. 29 が混乱水域，St. 26 が親潮水域と区分できる．

4-2-3-2 生物分布の特徴

流し刺網で採集された生物種の分布を検討すると，黒潮水域だけに分布して混乱水域や親潮水域に分布しない種は認められない．カツオをはじめアカイカ，ビンナガマグロ，ブリモドキなどは黒潮水域から混乱水域にかけて連続的な分布が認められ，親潮水域では採集されていない．また，逆に，ツメイカ，マサバ，マイワシなどは親潮水域にだけ分布が認められる．このことから，生物的な分布の不連続性は黒潮前線ではそれほど顕著ではなく，親潮前線で顕著であると言える．このことから，カツオがマイワシやマサバ，サンマなど餌生物となる小型の回遊性浮魚類との遭遇の度合を高めようとする場合，暖水ストリーマ内に侵入して親潮水域に接近する方が有利と思われる．

4-2-3-3 暖水ストリーマ内におけるカツオ分布

暖水ストリーマ内の中央部付近，表面水温が 21.9℃ の調査点 St. 14 ではカツオの採集尾数は 3 尾と少なかった．それに対して，暖水ストリーマの縁辺域である St. 10, St. 20, St. 29 での採集尾数は 791 尾，256 尾，50 尾と高い値を示し，しかも，目視調査による魚群分布でもカツオの分布は暖水ストリーマの西側縁辺部に認められた．川崎・永沼 (1959) はカツオは袋状暖水塊の西側に偏在して漁場が形成されるとしたが，本調査結果におけるカツオの分布状況も西側に偏在している．

胃内容生物種の出現率は暖水ストリーマの中央部付近 (St. 14) での採集個体に比較して，縁辺域 (Sts. 10, 20, 29) における採集個体の方が高かった．このことは暖水ストリーマに侵入した個体の摂餌活動は親潮系水と暖水ストリーマによって形成されるフロント付近で活発に行われる事を示唆している．St. 29 は 30 m 層水温が 19.2℃ と高いことから，フロントからやや離れていると思われ，そのことがこの調査点での採集個体の空胃率を高めているものと思われる．

最も多い 791 尾のカツオが採集された St. 10 での採集個体の胃内容物にはオキアミ類の他にカタクチシラスの出現が顕著であった．St. 8 から St. 12 までの水温鉛直断面分布 (Fig. 53) から，St. 10 には，水温 20℃ 台の水が表面から 20 m 深に存在しており，その下層は顕著な躍層構造を示していることがわかる．また，St. 10 から西側では St. 12 の手前まで表面水温で 20℃ 前後の水温帯で占められ，St. 12 付近には水温差 2.5℃ の顕著なフロントが存在する (Fig. 53 の上図)．つまり，St. 10 は 15℃ 以下の「冷水」の上におよそ 20～30 m の厚みで Over hang した暖水のなかにあり，フロントよりはやや暖水側に位置している．

また，St. 10 に次いで採集尾数が多かった St. 20 のカツオの胃内容物では，カタクチシラスは少なくオキアミ類が圧倒的に多かった．また，親潮水域 (St. 26) で採集されたものとほぼ同じ体長のマイワシが胃内容物に出現している．St. 18 から St. 22 までの水温鉛直断面分布 (Fig. 54) によれば，東側の St. 22 から St. 19 までの下層水温は変動が比較的小さく水深約 40 m 付

近で15°C，水深約100 m付近で10°Cを示し，この範囲では水温躍層もそれほど顕著ではない．しかし，St. 19からSt. 18にかけては10°Cの等温線は水深30 m付近まで隆起しており，水深20 m付近では水温躍層が顕著になっている．

一方，表面水温（Fig. 54の上図）ではSt. 19付近に20°C台の狭い暖水ストリーマの存在が認められ，その西側は約−2°C，東側は約−1°Cの水温差を持つフロントを形成している．さらにその東側はSt. 20付近まで18.8°C～19.0°Cで推移し，St. 20のすぐ東でさらに約−1°Cの水温フロント構造を示している．St. 20での流し刺網の投網位置の水温は18.8°Cで揚網時の水温は18.3°Cであったことから，採集生物はこのフロント付近に分布していたものと思われる．

目視観測でカツオ魚群はSt. 19付近の暖水ストリーマの先端付近からSt. 20にかけて連続的に分布が確認されたことから，おそらくカツオはこの20°C台の暖水ストリーマを経由して，徐々にその西側の18°C台の水域に侵入し，St. 20のフロント付近まで達していたものと考えられる．

暖水ストリーマ内に分布したカツオには前年（1987年）の調査時に比較して体長45 cm以下の「小型魚」が多い傾向が認められたが，暖水ストリーマ内の水温が前年の調査時よりも高く，JAFICの表面水温図（Fig. 47）では22°C以上あることから，これら「小型魚」は黒潮前線付近から容易に暖水ストリーマ内へ侵入したものと思われる．暖水ストリーマに侵入したカツオは，最初20°C以上の水温帯を北上し，暖水ストリーマの西側の親潮系水との間に形成される表層潮境付近に集積

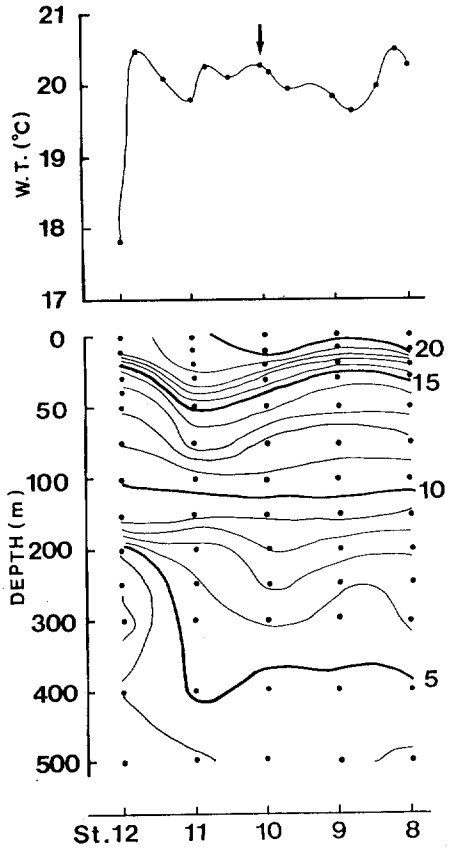

Fig. 53 Surface water temperature and vertical temperature (°C) profile along the line from St. 8 to St. 12. The arrow denotes the point that skipjack tunas were caught by drift nets.

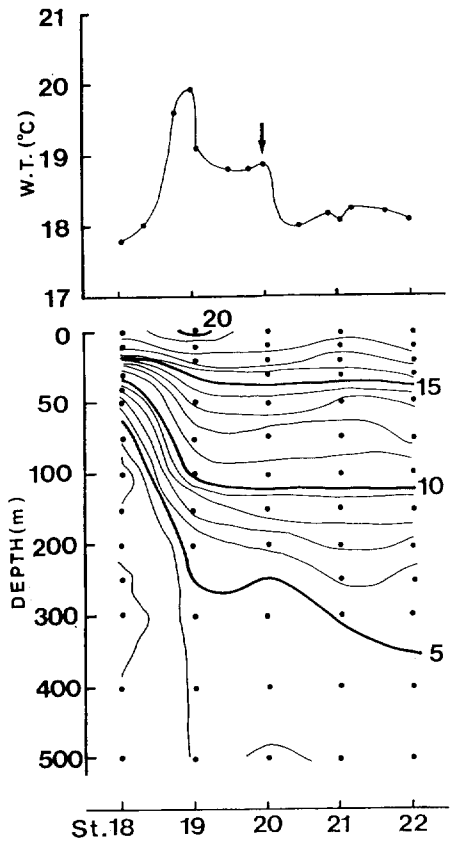

Fig. 54 Surface water temperature and vertical temperature (°C) profile along the line from St. 18 to St. 22. The arrow denotes the point that skipjack tunas were caught by drift nets.

するカタクチシラスやオキアミ類を捕食しながら，肥満度を増加させ，2次的に形成されるさらに小規模な暖水ストリーマを経由して，表層潮境を越えて水温18°C台のさらに低い水温帯へ侵入したものと考えられる．

第5章 温度生態学的視点からみた潮境域におけるカツオの行動

5-1 カツオの脂肪蓄積と低水温環境に対するその適応的意義

一般的に回遊性魚類の場合，筋肉脂質の含有量は季節や漁場ごとに著しく変動することが知られている（座間 1976）．東北海域に来遊するカツオの脂質含有量についての研究は，加工原料学的な研究を行った土屋・広田（1953）の他はほとんどない．ここではカツオの摂餌生態や成長，発育，海洋環境との相互関連性を探るため，東北海域に来遊したカツオの脂肪蓄積状況を調査し，海洋環境との関係について検討する．

5-1-1 方法

標本は1979年7月から11月まで，茨城県那珂湊港に水揚げした近海竿釣船より採集した．標本尾数は51尾で，採集時に漁船の無線交信記録により漁獲位置，水温，群の性状を調べた．標本魚の漁獲日，位置，水温，群の性状をTable 12に，漁獲位置をFig. 55に示した．標本は実験室で体長，体重，腸間膜脂肪重量などを測定した後，胸鰭の後方部を約5 cm幅に切取り，腹側部（A），背側の皮下6 mmまでの皮下部（B），皮下6～12 mmまでの肉部（C）の3カ所（Fig. 56）の筋肉を採取して粗脂肪量，水分量を測定した．脂肪量の測定はエーテル抽出法（日本食品工業学会食品分析法編集委員会編 1982）によった．

5-1-2 結果

5-1-2-1 粗脂肪量と水分量との関係

測定した51個体すべての個体の3部位の粗脂肪量と水分量の関係をFig. 57に示した．3部位の粗脂肪量（y）と水分量（x）との間には次の関係式が得られた．

A $y=93.06-1.24x$ $(r=-0.99,\ p<0.01)$
B $y=94.60-1.30x$ $(r=-0.99,\ p<0.01)$
C $y=65.33-0.92x$ $(r=-0.85,\ p<0.01)$

y：粗脂肪量（%）
x：水分量 （%）

粗脂肪量と水分量との間には1% の有意水準での高い相関が得られた．

5-1-2-2 腸間膜脂肪量指数と3部位の粗脂肪量との関係

脂肪含有量の測定にはソックスレー法などの化学分析を行うのが最も良い方法であるが，簡易な脂肪含有量の指標として腸間膜脂肪量指数（内臓脂肪含有量指数）が用いられている（ニコルスキー 1963）．そこで，カツオにおいて，腸間膜脂肪量指数が肉部の脂肪含有量変化の指標になるか，腸間膜脂肪量指数（y）と3部位の粗脂肪量（x）との関係を検討した（Fig. 58）．腸間膜脂肪量指数は以下の式に従って計算した．

腸間膜脂肪量指数（Fat index：FI）

$$FI=10^4\times FW/BW$$

FW：腸間膜脂肪重量 fat weight (g)

Table 12 Data on the skipjack tunas used for the measuring the fat content.

No.	Date	Location		W.T. (°C)	Shoal	Catch (ton)
		Lat(N)	Long(E)			
1	Jul. 22. 1979	38°11′	149°55′	20.0	Birds	13.0
2	Jul. 29	37°35′	148°19′	21.5	Free	5.0
3	Jul. 30	35°53′	144°49′	23.4	Birds	4.0
4	Aug. 18	41°07′	152°24′	23.9	Free	2.5
5	Sep. 9	38°18′	147°14′	23.9	Shark	13.0
6	Sep. 17	36°54′	146°26′	23.5	Drifter	17.0
7	Oct. 24	40°23′	154°17′	18.0	Free	11.0
8	Nov. 9	36°51′	148°49′	20.2	Birds	7.0
9	Nov. 28	36°56′	148°50′	21.2	Birds	5.0

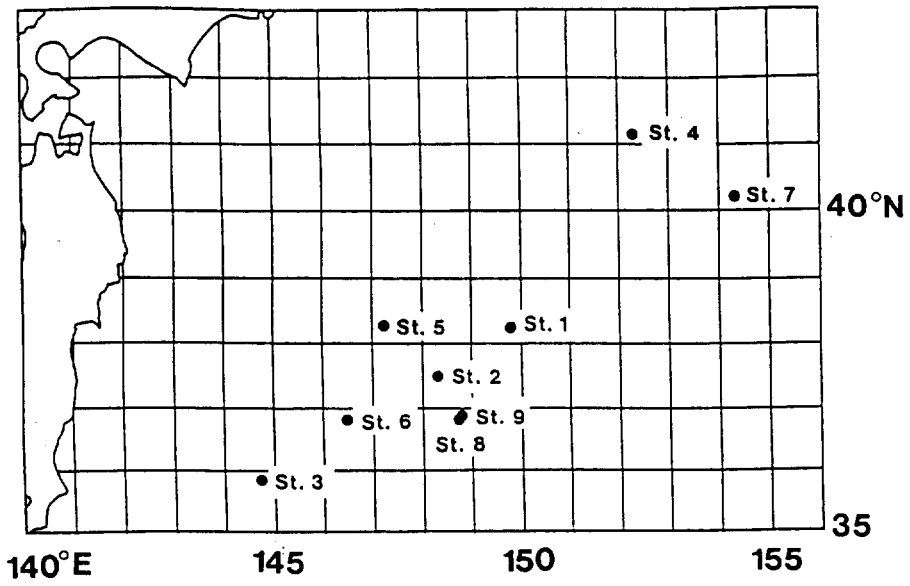

Fig. 55 Sampling locations of skipjack tunas for lipid analysis.

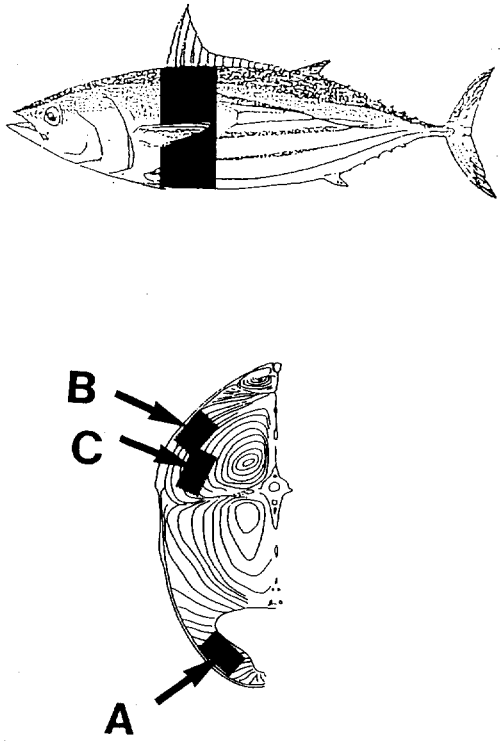

Fig. 56 The muscles used for measuring the amount of fat. (A, B: outer muscle with a thickness of 6 mm (0～6 mm). C: inner muscle with a thickness of 6 mm (6～12 mm))

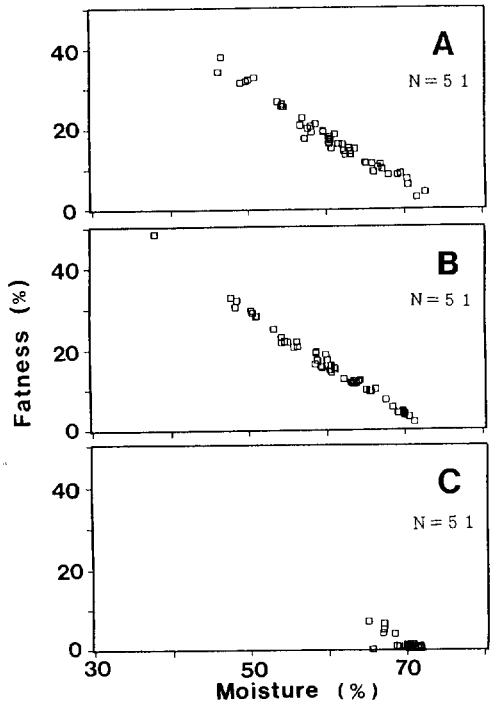

Fig. 57 Relationship between the moisture content and the amount of fat in muscle (A, B, C) of skipjack tuna.

BW：体重　　body weignt (g)

腸間膜脂肪量指数は A 部位および B 部位の粗脂肪量が約15%まで増加しても，0.5以下で推移するが，それ以上になると腸間膜脂肪量指数も増加する傾向が認められた．C 部位では粗脂肪量の変化が少ないため特定の傾向は認められなかった．腸間膜脂肪量指数 (y) と A および B 部位の粗脂肪量 (x) との関係を一次回帰式で表すと次の関係式が得られた．

A　$y=0.06x+0.33$　　($r=0.70$, $p<0.01$)

B　$y=0.03x+0.09$　　($r=0.50$, $p<0.01$)

y：腸間膜脂肪量指数 ($10^4\times FW/BW$)

x：粗脂肪量 (%)

5-1-2-3　3部位の粗脂肪量の月別・漁場位置別変化

A, B, C の3部位粗脂肪量の月別，漁場位置別変化をFig. 59に，月別平均値の推移をFig. 60に，腸間膜脂肪量指数の月別変化をFig. 61に示した．7月では最も南側である35°N，表面水温23.4°Cの位置に分布したカツオの粗脂肪量は，A 部位が4.0-25.5% (平均11.3%)，B 部位が3.5-28.3% (平均12.1%)，C 部位が0.1-0.8% (平均0.32%) であった．測定魚のなかで最も大型の体長48.4 cmのカツオ1尾だけが A, B 部位とも25%以上の高い脂肪量を示した．37°N，表面水温21.5°Cに分布したカツオの粗脂肪量は，A 部位が9.2-18.1% (平均13.62%)，B 部位が11.3−17.4% (平均14.28%)，C 部位が0.3-0.7% (平均0.52%) を示し，3部位とも35°N分布魚に比較して平均粗脂肪量は高かった．最も北側の位置にあたる38°N，表面水温20.0°Cに分布したカツオの粗脂肪量は，A 部位が8.8-20.1% (平均16.59%)，B 部位が12.6-30.4% (平均19.27%)，C 部位が0.1-3.8% (平均0.9%) であった．35°Nおよび37°N分布魚に比較して3部位とも平均粗脂肪量は高い傾向にあった．

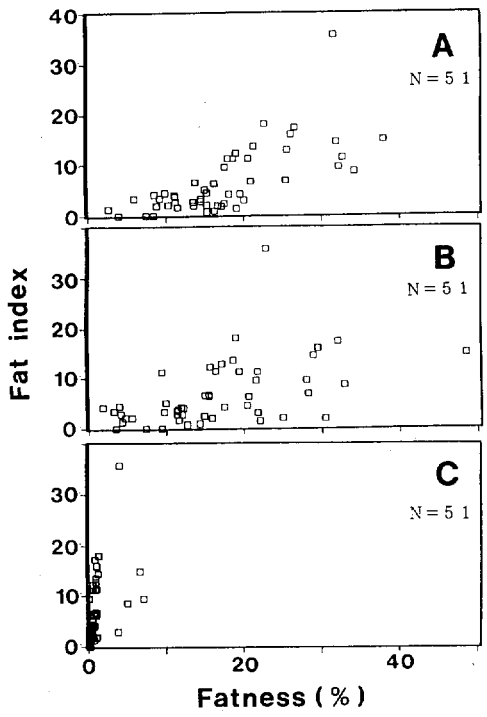

Fig. 58　Relationship between the amount of fat in muscle (A, B, C) and the fat index of skipjack tuna.

8月に41°N，表面水温23.9°Cに分布したカツオの粗脂肪量は，A 部位が11.5-20.9% (平均15.72%)，B 部位が11.4-21.5% (平均16.06%)，C 部位が0.2-1.0% (平均0.4%) と，7月の37°N, 38°Nに分布したカツオに比較して大きな違いは示していない．

9月に36°N，表面水温23.5°Cに分布したカツオの粗脂肪量は，A 部位が5.9-15.2% (平均10.78%)，B 部位が1.8-4.6% (平均3.52%)，C 部位が0.2-0.5% (平均0.28%) と，7月の35°N分布魚と同様に低い粗脂肪量値を示した．38°N，表面水温23.9°Cに分布したカツオでも，A 部位が2.7-18.0% (平均11.82%)，B 部位が4.2-14.9% (平均8.74%)，C 部位が0.1-0.2% (平均0.18%) と，7, 8月に37°N以北で採集された魚に比較して低い脂肪量を示した．

10月に40°N，表面水温18.0°Cに分布したカツオでは，A 部位が25.7-34.3% (平均31.34%)，B 部位が16.3-32.9% (平均23.44%)，C 部位が0.9-7.0% (平均3.56%) と今回の標本中では最も高い平均粗脂肪量を示した．

11月上旬に36°N，表面水温20.2°Cに分布したカツオの粗脂肪量は，A 部位が19.6-32.0% (平均25.04%)，B 部位が11.9-32.1% (平均24.84%)，C 部位が0.5-1.2% (平均0.82%) と A および B 部位で大半が20%以上の脂肪量を示した．また，11月下旬に36°N，表面水温21.2°Cに分布したカツオでは，A 部位が11.1-38.0% (平均21.12%)，B 部位が9.9-48.5% (平均21.27%)，C 部位が0.4-6.5% (平均1.75%) と全体では11月上旬のカツオより低い粗脂肪量を示したが，うち一尾だけは A 部位で48.5%，B 部位で38.0%と全測定魚の中で最高の粗脂肪量を示した．

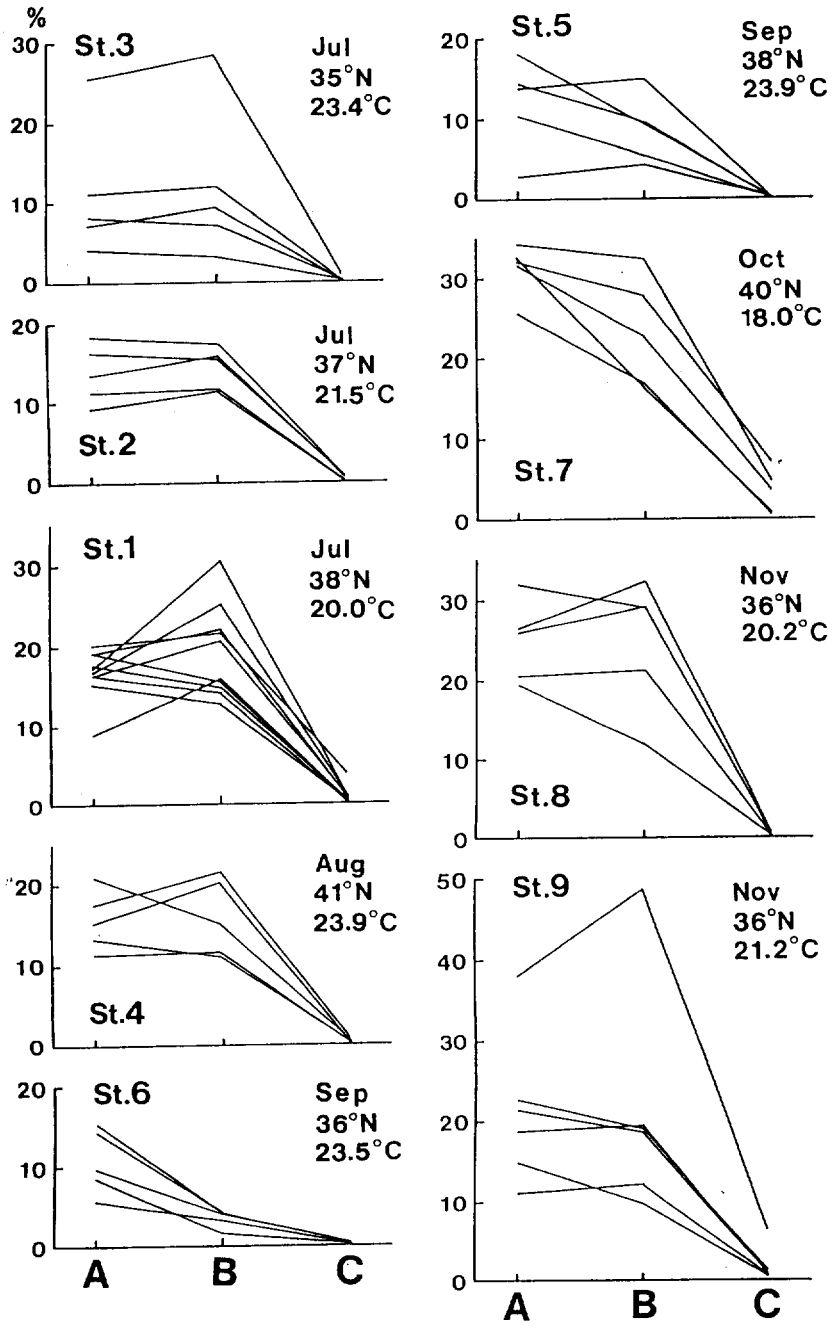

Fig. 59 Seasonal changes in the amount of fat in muscle (A, B, C) of skipjack tuna.

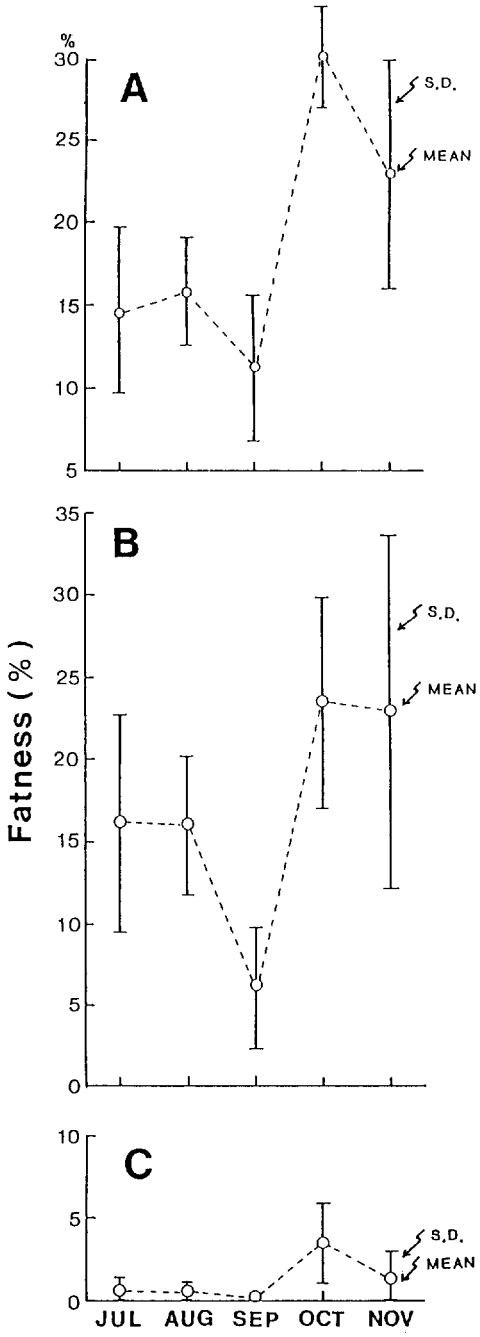

Fig. 60 Seasonal changes in the amount of fat in muscle (A, B, C) of skipjack tuna.

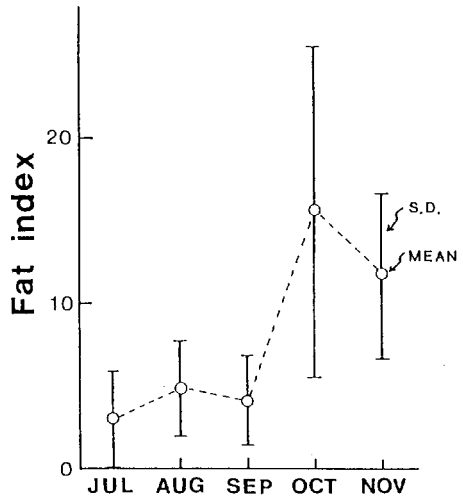

Fig. 61 Seasonal changes of fat index of skipjack tuna.

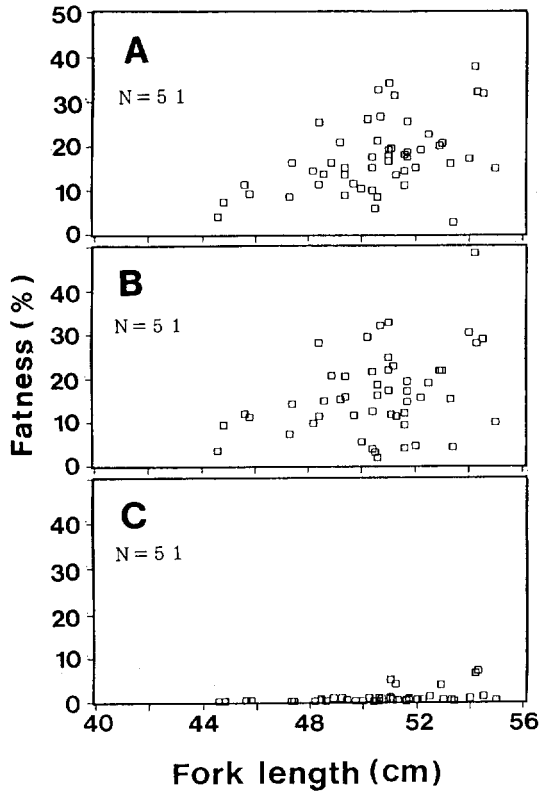

Fig. 62 Relationship between the fork length and the amount of fat in muscle (A, B, C) of skipjack tuna.

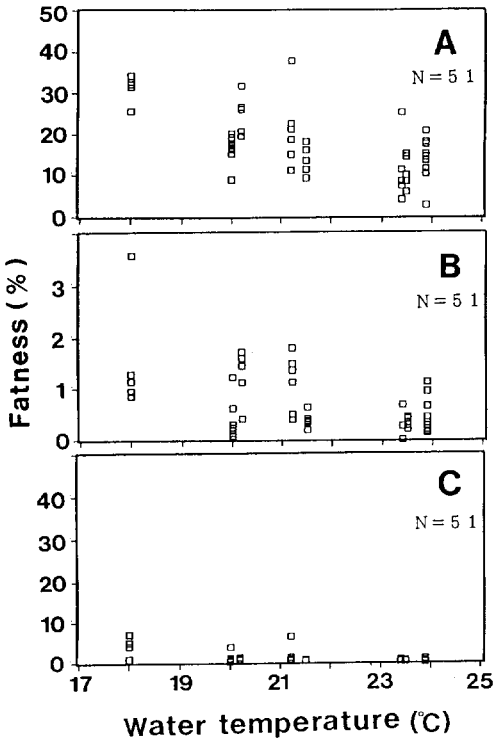

Fig. 63 Relationship between water temperature and the amount of fat in muscle (A, B, C) of skipjack tuna.

5-1-2-4　体長と粗脂肪量との関係

体長と3部位の粗脂肪量の関係をFig. 62に示した．*A*部位および*B*部位では体長がおよそ48 cmを越えると脂肪量の多い個体が出現する傾向が認められる．*C*部位では一部体長50 cm以上の個体にやや脂肪量の高い個体が認められるが大半が体長に関係なく脂肪量は5%以下と低い結果を示した．

5-1-2-5　生息環境水温と粗脂肪量との関係

3部位における粗脂肪量と漁獲位置の表面水温値との関係をFig. 63に示した．*A*および*B*部位とも水温が高いほど粗脂肪量が低い個体が多く，水温が低いほど粗脂肪量の高い個体の出現が顕著である．23°C以上の水温環境に分布した魚（F23）と20～22°Cの水温環境分布魚（F20），18°Cの水温環境分布魚（F18）との間で，各部位の脂肪量における平均値の差の検定をすると，*A*部位ではF18, F20, F23の各相互間で，また*B*部位ではF18とF23, F20とF23の間で，*C*部位ではF18とF23の間で1%の水準で有意な差が認められた（Table 13）．

Table 13　Test for equality of the fat content between the three skipjack groups that were sampled in different thermal environments.

A	F18	F20	F23
F18		**	**
F20	**		**
F23	**	**	

B	F18	F20	F23
F18		—	**
F20	—		**
F23	**	**	

C	F18	F20	F23
F18		**	—
F20	**		—
F23	—	—	

**: Significant at 1% level

5-1-3　考察

5-1-3-1　腸間膜脂肪量指数の指標性

3部位における水分量と粗脂肪量との間には高い相関関係が認められたことから，ソックスレー法によらないで簡易に皮下部の脂肪量を推定するためには水分量を測定するだけでも可能である．また，*A*および*B*部位では粗脂肪量と腸間膜脂肪量指数に相関関係が認められたことから，カツオの蓄積脂肪量の指標としては腸間膜脂肪量指数を用いても良いと考えられる．

5-1-3-2　漁獲位置と水温分布

7月下旬に35°Nに分布した魚では1尾が*A*部位，*B*部位とも25%以上の高い脂肪量を示したほかは，ほぼ10%以下の脂肪量値であったのに対し，37～38°Nに分布した魚では*A*部位，*B*部位とも10～20%と35°Nのカツオよりは平均的に高い脂肪量を示した．この時期はカツオが黒潮前線の南側と北側に分布する時期であり，100 m深水温分布図（気象庁全国海況旬報 No. 1184, No. 1187, 1979）から推定して，35°Nの魚は黒潮前線の南側，37～38°Nの魚は前線付近

もしくは北側に位置したと考えられる．おそらく，前線南側まで北上してきたカツオは前線を乗り越え混乱水域に進入してから全体的に脂肪量を増加させたものと思われる．

35°N の魚で *A* 部位の脂肪量が 25.5% と 1 尾だけ高い値を示したカツオは体長も大きく，また肥満度も 21.8 と高いこと，北側での採集個体にはこの様な高い脂肪量，肥満度を持つ個体は出現していないことから，おそらく，このカツオは黒潮前線を越えることなく，前線南側で U ターンして南下移動する個体である可能性が高いと思われる．

8 月中旬に 41°N，水温 23.9 に分布したカツオでは *A* 部位，*B* 部位とも 10～20% の脂肪量を示しており，7 月の 37°N および 38°N のカツオと大きな違いはない．それに対し，9 月，36°N に出現したカツオは *A* 部位，*B* 部位とも 7, 8 月のカツオよりは全体的に低い脂肪量を示した．漁場が南側であること，群の性状がそれまでの鳥付き群や素群ではなく，サメ付き群や木付き群であることから，おそらく 7 月に北上した群とは別の後続来遊群であろうと考えられる．

10 月に 40°N，表面水温 18°C の低水温環境域にまで侵入したカツオの中には脂肪量が 20% を越える個体が増加している．その後，11 月に南側の 36°N で採集された魚にも脂肪量が 20% を越える個体が出現している．おそらく，北上回遊したカツオは 18°C の低水温環境への侵入と同時的に皮下脂肪の蓄積を行い，高い脂肪を蓄積した魚は，その後南下して 36°N に出現したものと考えられる．ただし，11 月 28 日に 36°N 付近で漁獲されたカツオのうち脂肪量が 10～20% の個体については一旦低水温域に侵入して脂肪を蓄積した後に，南下して脂肪量を低下させたものか，あるいは低水温域にまで侵入することなく，脂肪蓄積量も低いままであったのかは定かではない．

5-1-3-3 脂肪蓄積の部位

粗脂肪量は *A*, *B* 部位で増加しても *C* 部位では増加していない．また，腸間膜脂肪量指数は *A*, *B* 部位の粗脂肪量が 15% を越える頃から増加していることから，脂肪はまず腹部，背部の皮下部に蓄積し皮下部の脂肪量が 15% を越えるようになると内臓部にも蓄積がすすむものと思われる．*A*, *B* 部位の脂肪量が 30% を越える量になっても *C* 部位の脂肪量はそれほど増加しないことから，脂肪はもっぱら皮下部と内臓部に蓄積され，肉の中心部には蓄積されないといえる．内臓で脂肪が蓄積されるのは胃壁と腸壁である．皮下部は外界環境と接する部位であり，また，胃腸部位は外部から取り込んだ餌や水が通過する部位である．ともに，外界環境水温の影響を直接受ける部分である (Fig. 64)．カツオは外界水温よりも高い体温を保ちながら物質代謝を保証し，高速遊泳や速い消化を可能としている．皮下部や内臓部の蓄積脂肪は低水温環境下にカツオが侵入する場合，体温を保持するうえで好適な役割を果たしていると思われる．

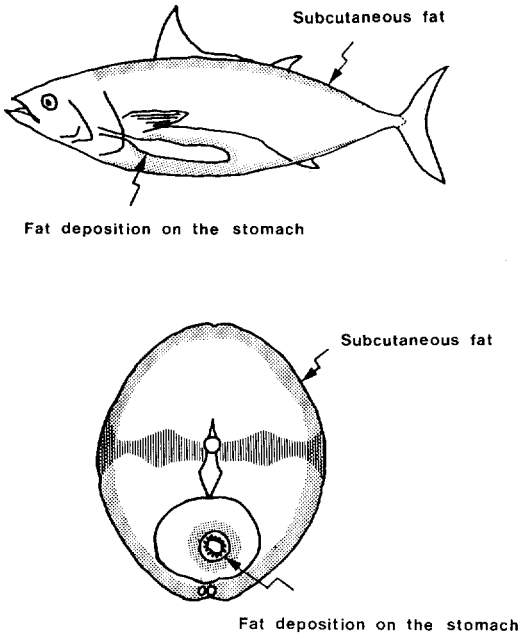

Fig. 64 Deposition area of fat in skipjack tuna. The fat contributes to keep the body temperature higher than the environmental temperature.

5-1-3-4 腸間膜脂肪の蓄積と環境水温

環境水温と蓄積脂肪量の季節的変化を検討するために，1988 年に春季北上時期から秋季の南下時期にかけて連続的に腸間膜脂肪重量を調べた．その月別，漁場水温別，群平均の腸間膜脂肪量指数を Fig. 65 に示した．図によれば 5, 6 月に黒潮前線付近に来遊するカツオの群平均脂肪量指数は 1～3 であり，漁場水温は 20～23°C である．前線を越え「混乱水域」に入る 7, 8 月には群平均脂肪量指数は 3～7 に増加している．この時期には 20～26°C の幅の広い水温域で漁場形成される．9 月に入ると群平均脂肪量指数はさらに高まり 4～10 を示す．とくに 18°C から 19°C 台の低水温域に入ったカツオは高い群平均脂肪量指数を示している．この傾

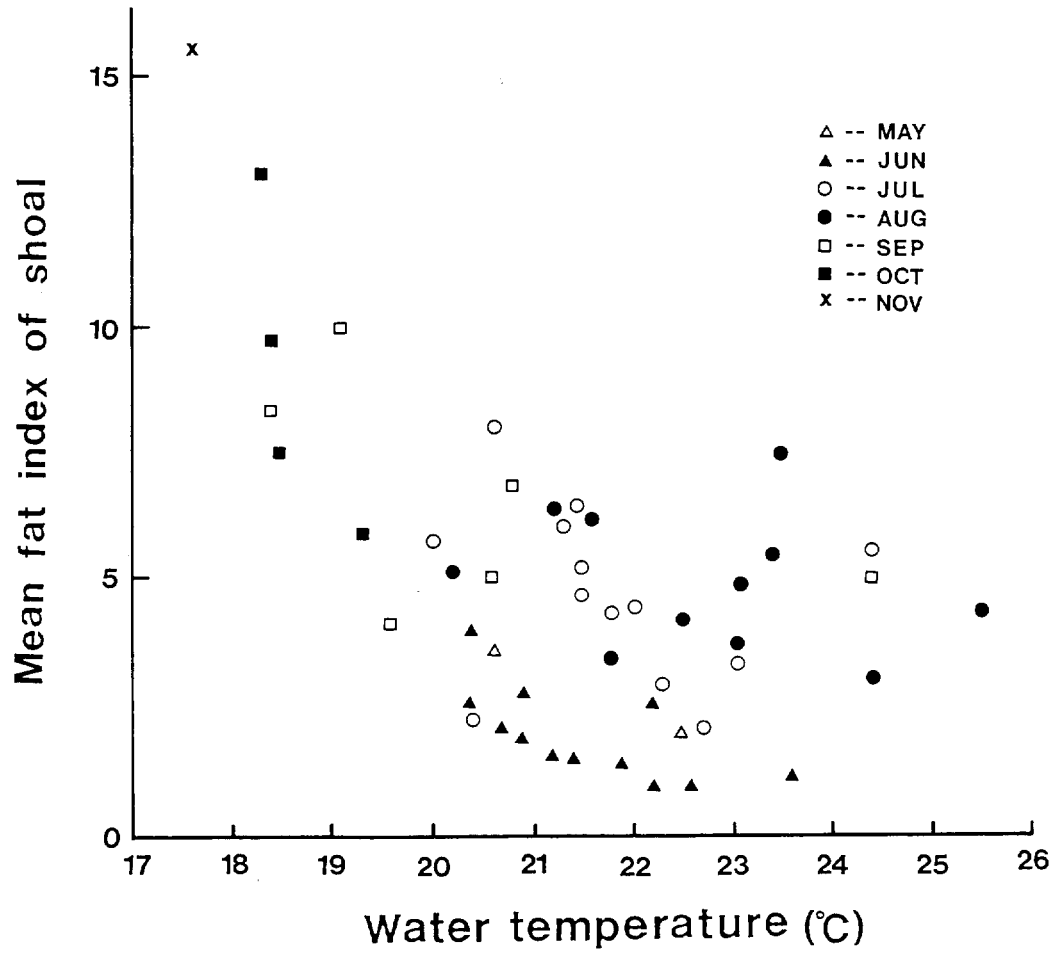

Fig. 65 Monthly change in the fat index and the environmental temperature of skipjack tuna.

向は10, 11月になるとさらに顕著となり，17℃から18℃台の水温域で10以上の群平均脂肪量指数を示す魚群も出現している．

このように，環境水温19℃附近を境として群平均脂肪量指数は急激な増加を示している．ニコルスキー(1963)は「温度がある一定の値以下に低下すると，蛋白質の成長を低下させ，脂肪蓄積過程を開始させる．」と述べているが，カツオの場合，19℃の環境水温がこのような値に相当しているのかもしれない．そして，一定量の脂肪量の増加を示した6月から7月の時期と，急速な脂肪蓄積を示した9月の時期は，前の章で述べたように，ともに潮境を越えてカツオが低水温域へ侵入する時期に相当している．おそらく，このような脂肪の蓄積は潮境を乗り越える行動に相伴って生起している現象であろうと考えられる．

5-2 体温と環境水温の関係から考察した魚群の潮境通過と回遊

5-2-1 目的

低緯度・高水温域を起源とするカツオは成長にともなって，北方に回遊をはじめ，1～2才時には日本の東北部の黒潮続流域にまで来遊し，一部の魚は黒潮前線を越えて混乱水域へ北上し，暖水ストリーマを利用して秋には親潮水域の表層部まで侵入する．

カツオは体長15 cmに達する以前の稚魚期には表面水温24℃等温線よりも高温側の海域に滞留しており，体長35 cmに達しないある段階で24℃等温線よりも低温の海域へ分布を広げるとされている（森1972）．

カツオが春季に黒潮続流から派生した暖水ストリーマ内へ侵入する過程や，秋期に親潮水域表層部に発達した暖水ストリーマ内へ移動する状況については前章で詳しく述べた．カツオが暖水ストリーマ内へ移動する際，表層水温フロント付近で，体サイズの大きな個体のみが低水温側に侵入する現象を明らかにし，著者はこの現象を魚がフロントを通過する際にひきおこす「サイズスクリーニング現象」と定義した．そして，このメカニズムにはカツオの体温維持機構が作用しているらしいことを，前章で述べた．カツオの体温については宇田（1941），渡辺（1942），福島（1953），Barrett and Hester（1964）らの調査例がある．そこではカツオの体温はいずれも外部環境水温よりも高いことが述べられているだけで，回遊生態についての検討がされた報告はない．

そこで，本章では，赤道海域付近から亜寒帯水域付近までに分布するカツオの体温測定データから，体サイズと体温と環境水温との関係を検討し，温度生態学的な視点から，カツオの潮境におけるサイズスクリーニング現象と，その回遊生態について考察する．

5-2-2 方法

1990年9月から1992年9月までの期間に2°N～43°N，132°E～178°Eの範囲の北西部太平洋海域に分布するカツオ722尾の体温値を測定した．測定は茨城県水産試験場調査船水戸丸をはじめ各県水産試験場所属調査船（新宮城丸，富士丸，駿河丸，土佐丸）および，水産高校実習船（やいず，しろちどり）にて行った．調査位置をFig. 66に示した．調査範囲は日本近海に来遊するカツオの回遊範囲である北西部太平洋全域（二平・浅野1990a，二平・浅野1990b）とし，カツオの生息水温域をできるだけカバーできるようにした．測定方法は，まず，竿釣または曳き縄でカツオを釣獲し，釣り揚げ直後にカツオの頭部をすばやく木槌でたたき，仮死状態にしたあとサーミスター温度計を魚体中央部深部組織に刺し，数秒から十数秒後の最高体温値を読みとり，この値を体温値とした(Fig. 67)．したがって，ここではこの深部組織の体温，中核部体温のことを体温とする．そして，この体温値と外部環境水温値との差をΔtとして，これを魚体サイズ別に検討した．

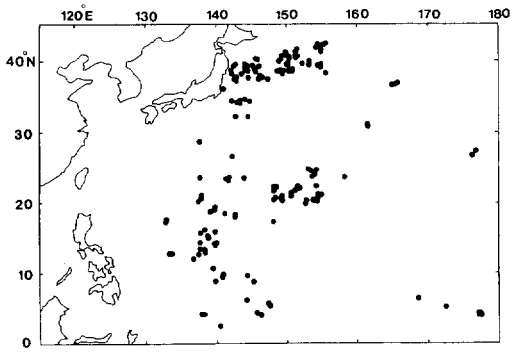

Fig. 66 Sampling locations of skipjack tuna to measure the body temperature in the western Pacific Ocean.

5-2-3 結果

5-2-3-1 体長・体重と体温値との関係

調査したカツオの体長範囲は31 cm～80 cm，環境水温範囲は17.1°C～30.3°C，得られた最低体温は21.4°C，最高体温は36.8°Cであった．体温と外部環境水温との差(Δt)の範囲は0.2～14.4°Cであった．全個体の体長・体重値と体温値との関係をFigs. 68, 69に示した．体長30 cmから55 cm，体重3.5 kg以下のカツオの体温範囲は21.4～36.3°Cと14.9°Cの変異幅を持つが，体長55 cm以上，体重3.5 kg以上の個体では，その体温は29.0°C以下を示すことはなく，体温範囲は29.0～36.8°Cとわずか7.8°Cのきわめて安定した体温幅を示した．

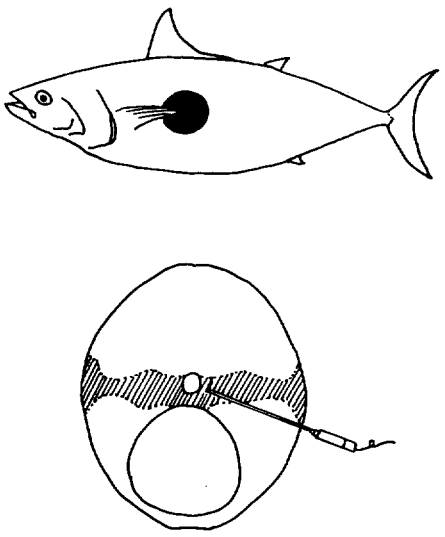

Fig. 67 Measuring area of body temperature of skipjack tuna.

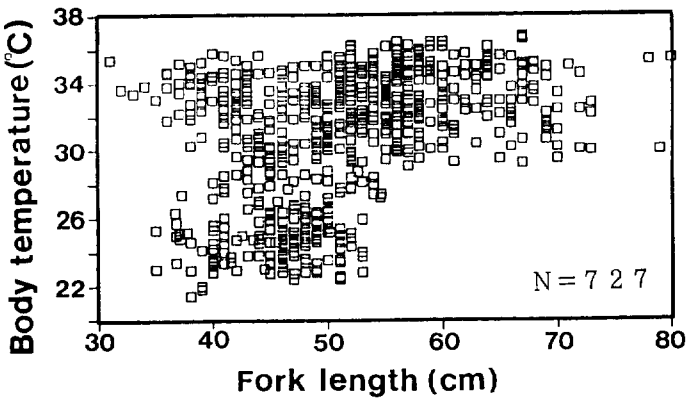

Fig. 68 Relationship between the fork length and the body temperature of skipjack tuna.

5-2-3-2　体長別の体温と外部環境水温との関係

体長範囲を 10 cm 幅にとって，環境水温値と Δt の関係を検討した（Fig. 70）．図では横軸に環境水温値，縦軸に Δt 値をとり，図中の 3 本の斜線はそれぞれ 22°C, 26°C, 30°C の体温値を示している．

体長 39.9 cm 以下の個体では，24～30°C の環境水温域における Δt 値は約 1～7°C を示し，体温値は 30°C 以上となっている．環境水温が 23°C 以下では 1 尾だけが体温 30°C 以上を示すが，他は 27°C 以下の体温となり，水温 20°C 以下の水温環境では 24°C 以上の体温の個体はなく，低い個体では 22°C 以下の体温値も認められる．22°C 以下の環境水温でも Δt 値は 7°C 以下と高水温域における Δt 値と比較してほとんど変化は無い．

体長 40.0 cm から 49.9 cm の個体では，24～30°C の環境水温域における Δt 値は約 1～11°C を示し，大半の個体は 30°C 以上の体温値を示している．23°C 以下の環境水温域では，Δt は高水温域よりも広がりおよそ 2～12°C を示す．19～21°C 台の水温域では 30°C 以上の体温を持つ個体も認められるが，多くは 22～26°C の体温を示している．20°C 以下に環境水温が低下すると Δt は増加する傾向にあり，22°C 以下の体温の個体は出現していない．

体長 50.0 cm から 59.9 cm の個体では，24～30°C の環境水温域における Δt 値は体長 40 cm 台の個体とほぼ同じ約 1～11°C を示すが，ほとんどすべての個体が 30°C 以上の体温値を示している．23°C 以下の環境水温域では，Δt の変異幅は広がり 14°C を示す個体も認められる．体長 40 cm 台の個体と同様に 20°C 以下に環境水温が低下すると Δt は増加する傾向にあり，22°C 以下の体温の個体は出現していない．

体長 60.0 cm から 69.9 cm の個体では，24～30°C の

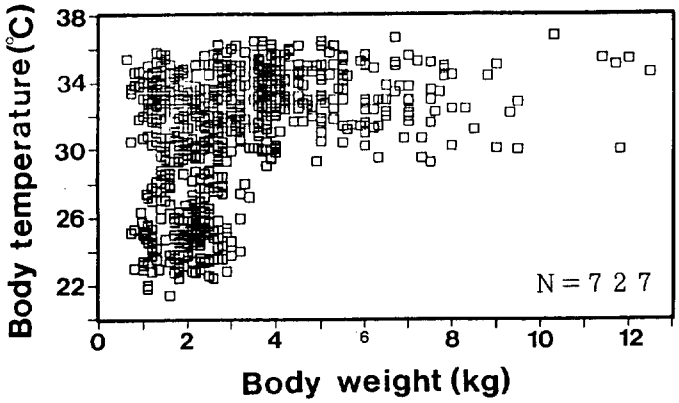

Fig. 69 Relationship between the body weight and the body temperature of skipjack tuna.

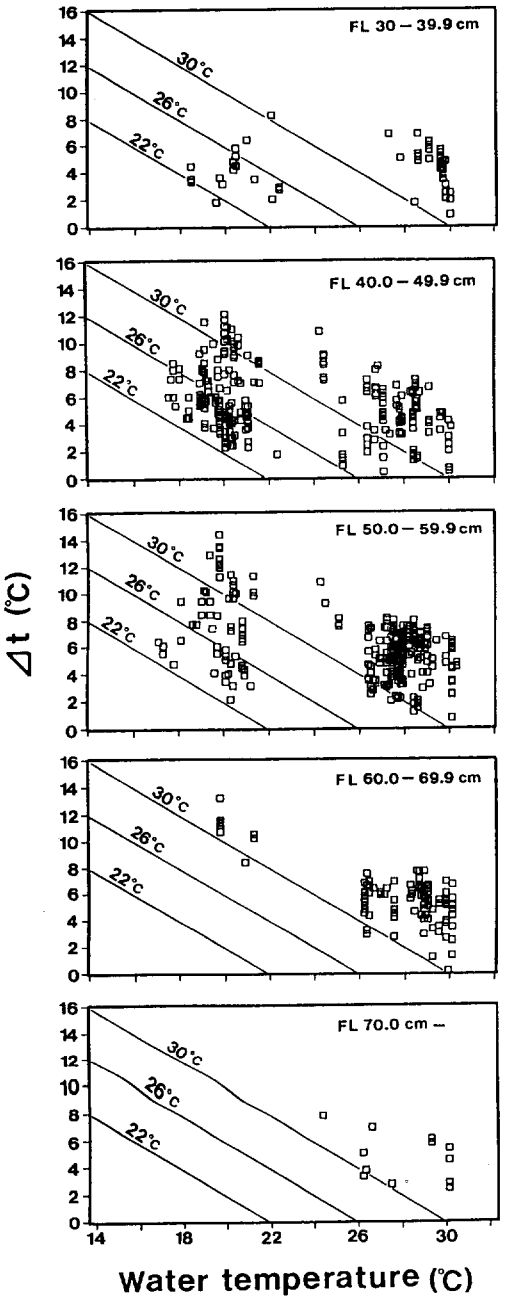

Fig. 70 Relationship between the environmental temperature and Δt (the deviation of the body temperature from the environmental temperature).

環境水温域における Δt 値は 8°C 以下を示すが，50 cm 台の個体と同様，ほとんどすべての個体が 30°C 以上の体温値を示している．この体長範囲の個体では水温 20°C 以下の環境に出現する個体は少なくなるが，23°C 以下の環境水温域でも，ほとんどが 30°C 以上の体温を示している．

体長 70.0 cm 以上の個体では，24°C 以上の環境水温域でだけ分布が確認されたが，Δt は 2～8°C でほとんどすべての個体が 30°C 以上の体温値を示している．

5-2-3-3 「小型個体」と「大型個体」の体温と環境水温との関係

黒潮続流から派生する暖水ストリーマへカツオが侵入する際におけるサイズスクリーニング現象を水温・体温関係から検討するため，水温 22°C 以下の環境に分布した体長 30～44.9 cm の個体と体長 45.0～54.9 cm の個体について，それぞれの水温・体温関係図を作成した (Fig. 71)．

体長 30.0～44.9 cm の個体では 19°C 以上の環境水温下では体温は 1 尾を除いてはすべて 23°C 以上を示し，また 30°C 以上の高い体温を示す個体も認められた．しかし，環境水温が 18.4°C と 18.5°C の水温環境では，体温は 21.8～24.5°C と 22°C の線にほぼ近づいた体温値を示し，また 18.4°C 以下の環境水温では 45 cm 以下の個体は漁獲されなかった．

それに対し，体長 45.0～54.5 cm の個体ではすべての個体が 22°C 以上の体温を示し，17°C から 18°C 台の水温環境でも 26°C 以上の体温を示す個体も認められ，45 cm 以下の個体よりは相対的に体温は高い傾向にあった．体長 45 cm 以下の個体に比べ低い水温環境においても漁獲された．

5-2-3-4 環境水温と肥満度との関係

前章において黒潮前線を境として肥満度に変化が生じていることを述べた．ここでは低い水温環境下への侵入にともなう肥満度の変化を調べるために，22°C 以下の水温環境に分布したすべての個体の肥満度と環境水温の関係を示した (Fig. 72)．各水温における最低肥満度に着目すると，20°C よりも環境水温が低くなると最低肥満度は大きくなる傾向が認められた．

5-2-3-5 「小型個体」と「大型個体」の肥満度と環境水温との関係

体長 45 cm を境とする「小型個体」と「大型個体」の肥満度と環境水温との関係を検討して Fig. 73 に示す．45 cm 以下の小型魚では 20°C 以下の水温環境になると肥満度が 19 以下に低下している個体が多くなっ

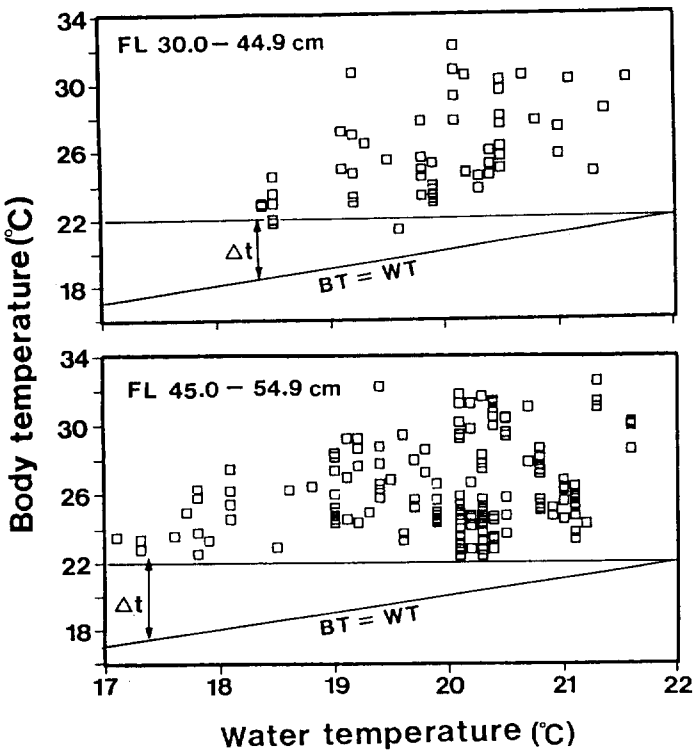

Fig. 71 Relationship between the environmental temperature and body temperature. (Upper: fish with 30.0～44.9 cm in fork length, lower: fish with 45.0～54.9 cm in fork length.)

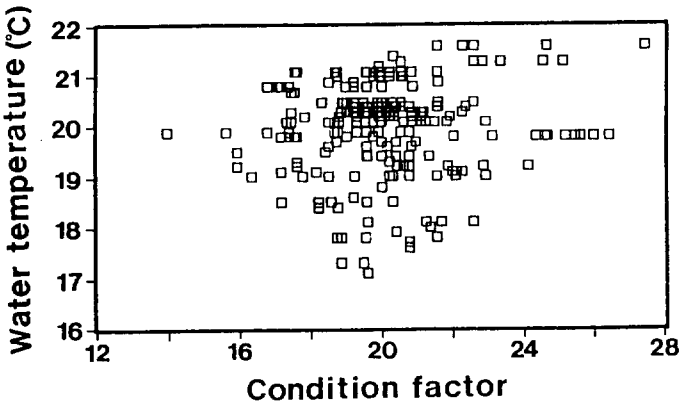

Fig. 72 Relationship between the condition factor and the environmental temperature in which the skipjack tuna were sampled in the thermal environment below 22°C.

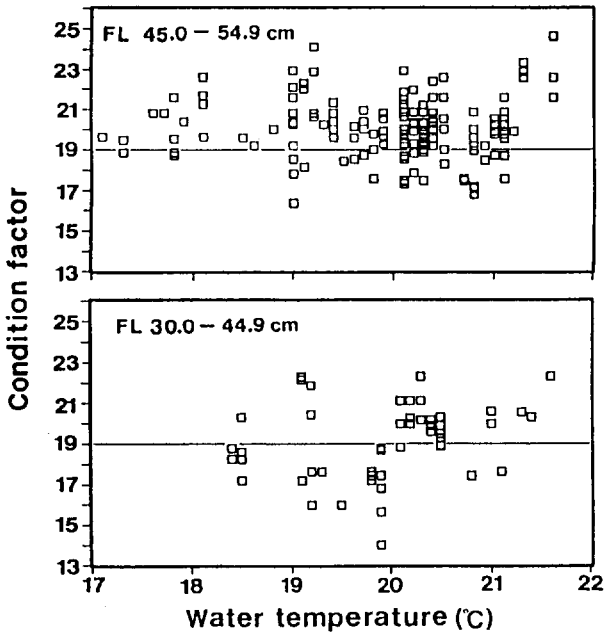

Fig. 73 Relationship between the environmental temperature and the condition factor of skipjack tuna sampled in the thermal environment below 22℃.

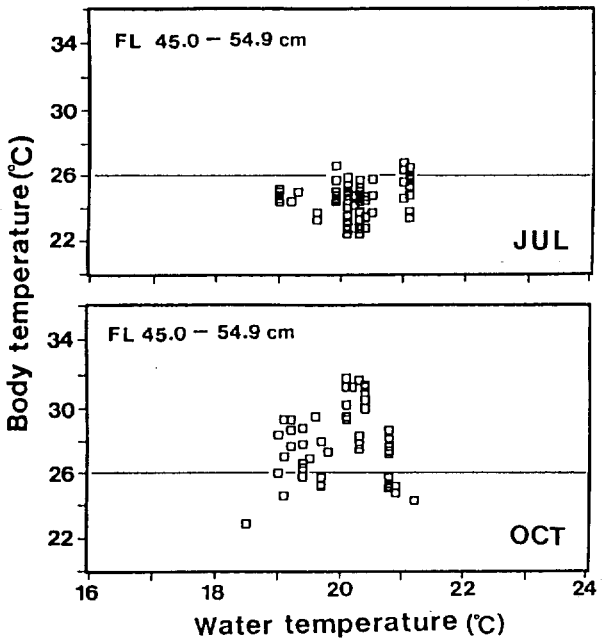

Fig. 74 Relationship between the environmental temperature and body temperature of skipjack tuna in the northward and southward migratory seasons.

ている．それに対して，45 cm 以上の大型個体では20°C 以下の環境水温になっても肥満度は低下せず小型魚とは逆に肥満度は 19 以上の値を示す個体が大半である．

5-2-3-6　北上期と南下期における体温の相違

北上回遊して黒潮前線などのいくつかの潮境を越えて低水温域に侵入したカツオは，秋期には再び亜熱帯から熱帯海域に南下回遊する．北上回遊期には高水温環境から低水温環境への移動回遊であるが，南下回遊期には逆に低水温環境から高水温環境への移動回遊である．したがって，上昇する環境水温への適応のためには北上過程とは異なる体温調節を行う必要がある．そこで，北上期の 7 月，南下期の 10 月に北緯 37°N 以北に分布した体長 45.0 cm から 54.9 cm の体長範囲の個体を取りだし，その体温を比較検討した(Figs. 74)．北上期および南下期とも環境水温はほぼ 19～21°C の範囲であったが，北上期における体温は 22～27°C で大半が 26°C 以下であったのに対して，南下期の体温は 24～32°C と逆に大半が 26°C 以上と明らかに南下期のほうが高い体温を示した．また，南下期 (10 月) における体長別の体温値を比較すると，体長が大きいほど高い体温を示す傾向が認められた．とくに，体長 42～43 cm よりも小型な個体では大半が 26°C 以下でそれ以上の体長範囲の個体に比べ，明らかに低い体温を示す傾向が認められた (Fig. 75)．

5-2-4　考察

5-2-4-1　代謝維持のための最低体温

一般にカツオ・マグロ類では，背柱直下の主幹血管のほかに体側皮下を縦走する血管が発達し，両者の間を無数の細い動脈と静脈が密接に並走して連結し，血合筋を包むように分布している．この構造を奇網(rete mirabile)というが，奇網では動脈血と静脈血が対向流をなし，代謝熱は静脈血に伝えられた後，鰓まで運ばれることなく動脈血に伝えられて，血合筋部に熱が保存される．そのため血合筋部の温度が環境温度よりかなり高く保たれる (Carey and Teal 1966)．筋肉温度を高く保つことにより，遊泳筋群の力が大幅に増加し，収縮—弛緩サイクルの速度は約 3 の Q_{10} (温度係数；温度 10°C の上昇に対する反応速度上昇の倍率) を示す．すなわち，筋肉が 10°C 暖められると，マグロでは同じ重量の筋繊維から引出しうる力を 3 倍に高めることができることになると考えられる．この筋力の増加は遊泳速度の増加となり，逃げ足のはやい餌生物群の中に「突入」して採餌することを可能にする．また，内臓温度を高く保つことで，消化と吸収速度を高める．摂

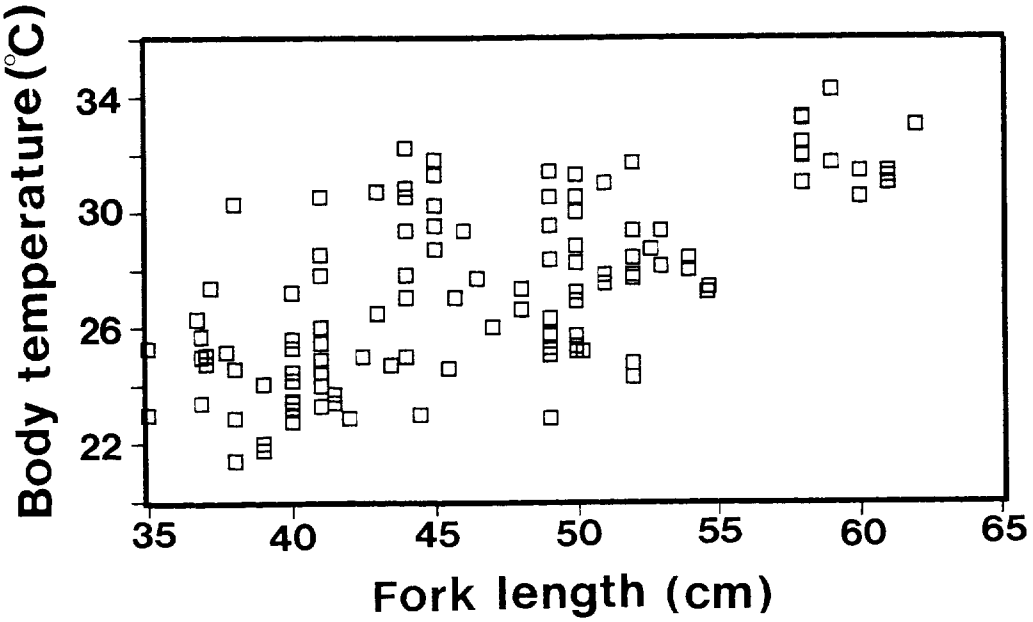

Fig. 75 Relationship between the fork length and the body temperature of skipjack tuna in the southward migratory season (Octorber).

取した食物を急速に効率よく処理する能力は比較的小さい胃の容積をうめ合せ，遊泳効率を高めているとされる（Carey *et al.* 1971）．

Barrett and Hester (1964) は体長 46.7 cm から 55.5 cm のカツオ 31 尾の体温を測定し，その結果から，小型魚は大型魚よりも体温が低い傾向にあり，体温は環境水温と体長を説明変数とする以下の重回帰式で表わされるとした．

Body temperature (°C)
$=8.63+0.59\times$Water temperature (°C)
$+0.015\times$Body length (mm)

しかし，今回の調査結果では，小型魚と大型魚では高水温環境下では Δt には大きな差はなく，低水温環境では小型魚は Δt が小さく，大型魚は Δt の変動幅が大きい傾向を示し，必ずしも Barrett and Hester (1964) の示した重回帰式には適合していない．このことは，カツオの体温は同じ体長，同じ水温環境でも魚の生理的な条件でかなり異なる値をとっている可能性を示すものであるといえる．

体長 55 cm 以上，体重 3.5 kg 以上の個体ではその環境水温にかかわらず体温は常に 29.0°C 以上を示した．体長 55 cm 以上の個体が分布した最低環境水温は 19.8°C であり，最高環境水温は 30.3°C である．体長 55 cm ほどの個体は前章で述べたように春の北上期には A 群に相当し，黒潮前線を越えて混乱水域に侵入することはほとんどない．おそらく，このサイズ以上の個体はすでに産卵を経験しているか，春季に成熟過程に入っていく個体であると思われる．

体長 55 cm 以上になった成魚の体温が，環境水温にかかわらず 29.0°C から 36.8°C の間ときわめて安定的な体温を保持していることは興味深い．Hardy (1979) は，代謝過程に関与する酵素の至適温度は，哺乳類や鳥類では 30～40°C の範囲にあり，酵素自体もこの範囲では安定しているとしている．おそらく，成魚の段階に到達したカツオは体温を一定の高い範囲に限定しておくことによって，酵素活性を安定化させているものと思われる．

春季に体長 42～48 cm である B・C 群に相当する個体は 10 月の南下期には体長 49～55 cm 程度にまで成長することから，これらの群は未成熟の最後の索餌期に黒潮前線を越えて混乱水域に北上分布していることになる．これらの群が混乱水域に北上来遊して，低水温環境に侵入するのに際しては Fig. 71 に示したように，Δt を大きくすることによって体温を 22°C 以下に低下させないようにしていると考えられる．

温度は化学反応速度に著しい影響を与えるため，低温では動物の代謝速度が低下し，正常な生活活動が行えなくなるおそれがある（内田・菅原 1977）．どの体長範囲のカツオからも 22°C 以下の体温値の個体がほとんど出現しないこと，また，環境水温が低下すると，それにともなって Δt を大きくして 22°C 以上に体温維持をはかっていることから，おそらく，体長 55 cm 以下の個体の代謝維持のための最低限の体温は，この 22°C 付近にあると考えられる．

体長 30.0～44.9 cm の小型個体では肥満度が 20°C 以下の環境水温域では大型個体に比較して低い値を示し，また，19°C 以下の環境水温では Δt が小さくなって体温が 22°C の限界温度ぎりぎりにまで近づいていた．これら小型魚が肥満度を低下させることと，体温を高められないことは，ともに，カツオが低水温環境では代謝機能を低下させ充分な栄養蓄積をなしえないことからくる結果ではないかと推察される．魚の温度変化に対する感覚能力を調べた Murray (1971) によれば，魚は 0.03～0.05°C というわずかな温度変化を感知しうること，海水魚は淡水魚より敏感であることがわかる．このように，小型魚にとっては 20°C 以下の環境水温域は栄養蓄積をはかる上では非適応的環境であると思われ，したがって，小型個体は餌密度が高いのにもかかわらず「栄養蓄積効率」の悪さから低水温環境を成育場とすることなく，より水温の高い環境を選択するものと思われる．

5-2-4-2 代謝補償

成魚が体温 30°C～36°C のきわめて狭い範囲に体温を安定化させていることからすると，カツオにとってはこの体温範囲が代謝にとって好適であると思われる．それに対して未成魚は 22°C まで体温を低下させながら低い環境水温域にまで来遊する．体温の低温化は代謝の低下をまねく恐れがある．

変温動物では，温度の低下に際し，代謝速度を高める代謝補償（metabolic compensation）を行っている例が数多く報告されている（Hochachka and Somero 1973, 内田・菅原 1977）．ニジマスやコイ，キンギョでは，夏季と冬季の水温の変化にともなって季節的な代謝補償がおこなわれる．これは温度順化によるもので，ニジマスでは数日から十数日で酵素中に順化に関連したアイソザイムの生成をおこなうとされる．

カツオ未成魚が体温を低下させながら低環境水温域

を北上回遊する際，代謝速度をおとすことなく採餌し，消化吸収，栄養蓄積をするためには，このような温度順化をおこないながら北上回遊している可能性がたかい．おそらく体温22°C付近がそれ以上には酵素中に温度順化に関連したアイソザイムを生成することができない温度限界なのであろう．

5-2-4-3　成熟産卵場と索餌場における環境水温とカツオの栄養代謝

成熟産卵場が高水温域で摂餌成長場が中低温域であることについて黒木（1970）はエントロピー概念から説明を試みている．

物質系の示す絶対温度を T，その系に出入りする熱カロリーを Q とすると，エントロピーは

$$\int (dQ/T)$$

とあらわすことができる．

成熟産卵期には次の世代の卵・稚仔をたくさん残そうとする種保存の本能は次式の分子をなるべく小さくする方向へ働く．

$$\int dQ/T = \int \{(\text{成熟母体}) - (\text{卵・稚仔})\}/T$$

さらに，エントロピーを少なくするためには，産卵環境としての水温 T が母体や卵の正常性を損なわない程度に高い方が良いことになる．

一方，摂餌成長期には，魚は餌をとって消化して自己増重をはかる過程は，熱カロリーを体内に残そうとする過程で次式を大きくする方向に働く．

$$\int dQ/T = \int (A-B)/T$$

A は採った餌の熱量（正確には体内に消化吸収されたもののカロリー）を示し，B は運動その他生活に費やす熱量と体外へ排出されるものに含まれて系外へ出る熱量を合計したカロリーを意味する．この式の値をさらに大きくするためには T（環境水温，体温）は採餌活動や消化活動を不活発にさせない程度に低い方が良い．この式に従えば，索餌海域において，ある程度体温が低くなることは，未成魚が栄養蓄積をはかる上では適応的であるということができる．成魚は未成魚期ほどの顕著な季節的な南北移動回遊を示さず，東西回遊に移行する傾向がある（永沼1979）．したがって，その海域内での温度環境は安定的であるといえる．

季節的な南北移動回遊が顕著で産卵時期が集中型のマイワシは索餌期における脂肪蓄積と，産卵準備期における蓄積脂肪から生殖腺への栄養移行のサイクルが明瞭であるのに対し，温暖域に生息するカタクチイワシでは摂取した栄養を一旦脂肪として蓄積することなく，常時生殖腺へふりむけることにより，温暖環境下で多様な季節的成熟群の出現を可能としている（竈田1992）．カツオにおいても亜熱帯反流域から南赤道海流域にかけては，多様な季節的成熟群と周年にわたる稚仔の出現が認められる（永沼1979，遠洋水研1985）．そして，亜熱帯反流域以南では混乱水域で認められるほど脂肪を蓄積した魚群は認められない．産卵海域におけるカツオが周年にわたり低い脂肪量であることはカツオ節の原料特性の分析から明らかにされている（静岡水試1977, 1978, 1979, 1980, 1986, 1987）．おそらく，成魚期のカツオは摂取した栄養を一旦脂肪として蓄積することなく，カタクチイワシと同様に直接生殖腺へふりむけているのではないかと考えられる．この様な栄養代謝を行う上では高い環境水温域はカツオにとって適応的であり，そのことが成魚が高緯度・低水温環境へ来遊しない基本的な要因ではないかと考える．

5-2-4-4　南下時期における体温調節と前線通過

北上期には20°C等温線で示される水温上昇過程にともなって，カツオは徐々に北上移動する（笠原1977）が，標識放流結果によれば南下期には40°Nの混乱水域から20°Nの亜熱帯反流域まで一気に南下回遊している（第2章）．北上期における水温適応は低水温環境への適応であり，代謝機能が維持できる限界体温（およそ22°C）の範囲において北上している．南下期には低水温から高水温域に回帰する回遊であるから，生理限界近くまで低下させていた体温を高めなければならない．北上期には潮境で一時滞留しながら温度順化をしたとしても，南下回遊過程では黒潮前線などの潮境で滞留し漁場が形成される例はほとんど認められない．おそらく南下回遊過程に入った個体は潮境で滞留することなく，一気に南下移動をおこなっているにちがいない．

実際の標識個体の移動状況（第2章）を参考に仮に147°Eを南下したとして，その表層水温を経験水温と仮定してみると，混乱水域から南下したカツオは主黒潮前線で6～7°C差の潮境を高水温側へ回遊しなければならない．したがって，南下回遊行動に移行する直前に体温を大きく高めておくことは，その後の回遊，とくに黒潮前線における潮境通過，高水温適応をスムーズに行うためにはきわめて有効である（Figs. 76, 77）．今回観察された10月における体温の高まりはその意味で南下回遊にあるカツオにとっては意味のある生理状況である．体温の高まりがその後の急速な南下行動

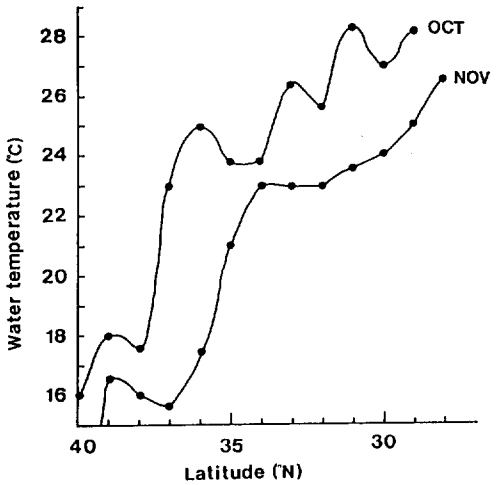

Fig. 76 Latitudinal change of the environmental temperature during the southward migratory route of skipjack tuna estimated from the distribution of the surface water temperature in October and November.

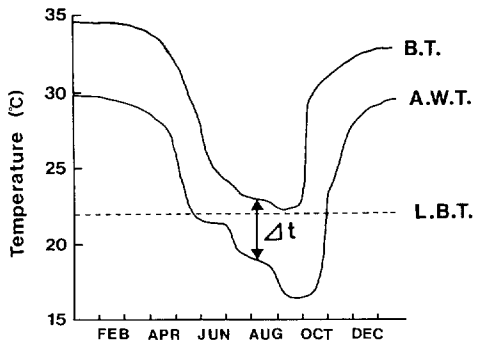

Fig. 77 Seasonal change of the body temperature and the environmental temperature of skipjack tuna which migrated to the transitional area from the tropical area.

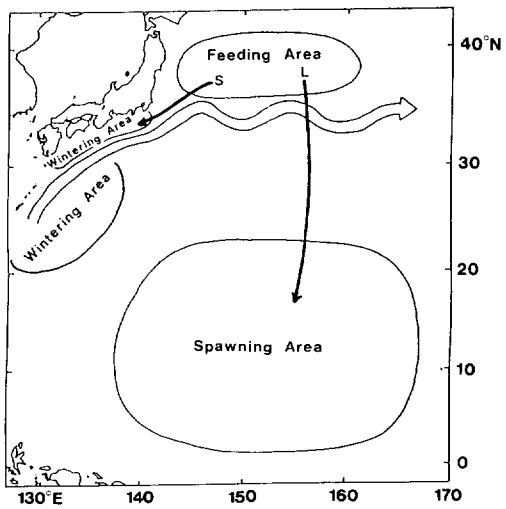

Fig. 78 Schematic model of the wintering and spawning migration of small size and large size skipjack tunas in the western Pacific Ocean.

と関係して，低水温域から高水温域への潮境の通過を可能にしているとすると，体温の高まりを示さなかった体長 42～43 cm 以下の個体は潮境を避け，水温勾配の小さな環境を選択しながら徐々に南下する移動回遊行動をとることが考えられる．

秋期に水温低下する混乱水域から南下して，回遊過程で比較的水温勾配が小さく一定の採餌・栄養蓄積を補償する水域は日本近海では黒潮内側域であろうと思われる．1981 年の水戸丸による放流実験で小型個体は南下回遊過程で大型個体に比較して西側寄りを南下して黒潮内側域に入り，そこから薩南海域に回遊したと推定されている（第 3 章 Fig. 37）．また，1992 年に駿河丸により標識放流された D 群の一部も黒潮内側域で顕著な再捕獲が認められている．

秋に体温の高まりをみせた大型魚は一気に南下して亜熱帯反流以南の産卵域付近まで到達して，産卵準備活動に入るのに対して，小型魚は黒潮内側域を南下回遊ルートに選択して薩南海域で越冬生活に入り翌年の春季，再び日本近海に北上来遊するものと思われる．このように，南下回遊魚群にあっては，回遊行動にはいる前に，大型魚は高い水温環境に対応した準備として高体温化の生理的適応をなしとげて潮境を乗り越えていくのに対し，高体温移行をしない小型魚群は温度勾配の小さな環境選択をすることにより，未成魚である小型魚群と成魚である大型魚群は索餌海域から別々に分離回遊していくと考えられる（Fig. 78）．

第6章 総合考察

6-1 はじめに

水産海洋学が海洋物理学的側面と海洋生物学的側面をあわせもつ学問であるかぎり，研究をすすめるうえで生物の基本的な属性について充分に認識をしておく必要があると思われる．とくに北原（1918）宇田（1936）以来の前線漁場形成論を今後さらに発展させ

るためには，このことは重要な意義を持つと考えられる．

生物の基本的な属性について，井尻（1977）は①生物は個体の単位でも，自己矛盾をはらみ，時間・空間的に変化し，環境条件にたいして固定した存在ではないこと．②生物は無機の世界から相対的に独立して生物系（生物界）という自己運動をおこなう一つの独立した体系を形づくっているものであるから，生物はいつも，その基礎構造である無機の世界と，交互作用をいとなんでいること．③環境条件からの作用（刺激）にたいする生物の反作用（反応）の形をとって交互作用の法則が実現され，この作用と反作用が，生物系のいちじるしい特徴となっていること．④生物は，まず環境条件の側からあたえられる刺激にたいして反応し，環境条件（外的なもの）を生物体内（内的なもの）にとりいれ，生物自身を変化させ，この反応をくりかえすことによって，環境条件に応化した形質を次第に形成していくこと．などをあげている．彼は「進化」という長大な時間スケールの問題のなかでこのことを論じているが，生物の行動や魚類の回遊といったある限られた時空間スケールにおける「生物と環境」の問題について考えるときにも，これらの指摘は重要な意義を持つと考えられる．

6-2　北方低水温域環境のもつ二つの側面

熱帯から亜熱帯の低緯度・高水温域を起源とするカツオは成長とともに北方回遊し，春に日本近海にまで来遊した後，一部は，黒潮前線付近に形成される表層水温フロントを越えてより北側の低水温域へ侵入し活発な索餌活動をする．南方の高水温域を起源とするカツオにとって北方の低水温域は，生産性の高い餌の豊富な海域であり，索餌活動に「最適の場」であると同時に，体温を高く保ち物質代謝を速くして高速遊泳を可能にする（板沢 1977）上で，低水温環境はある意味では「不適な場」でもある．このような，カツオにとって「矛盾」する場である北方低水温域へ侵入し，亜寒帯海域寄りの豊富な餌生物を利用するためには，巧みな適応機構の存在が不可欠である．

6-3　低水温域侵入魚の生活史上の位置

カツオの産卵はおもに低緯度・高水温域で行われるが，成熟魚や稚魚の出現状況などからカツオには冬春季発生グループと夏秋季発生グループがあるとされる．日本近海に北上来遊してくるカツオにはこれらの発生集団を起源とすると考えられる5つの体長群が認められることを本論で明らかにした．この5つの体長群A, B, C, D, E群の季節に伴う南北回遊と黒潮前線の関係をモデル的にFig. 79に示した．A群は春期における体長が50 cmを越えていることから成魚の範

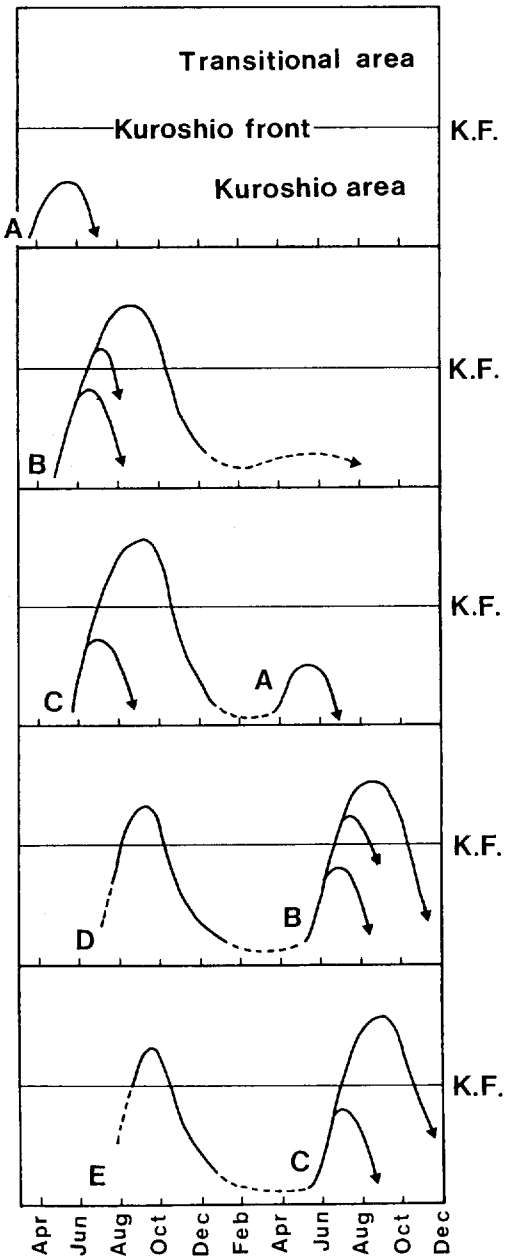

Fig. 79　Migratory patterns of the five different size groups (A～E) of skipjack tuna in the western Pacific Ocean.

疇に入っており，したがって黒潮前線を越えて北側に侵入することはない．B群は春期に体長45～50 cmであることから成魚の性格を持ち得る．したがって，一部の魚では成熟過程に入ったり，あるいは充分な肥満度を備えるまでになった個体では黒潮前線の南側で南下過程に入るか，あるいは黒潮前線の北側へ回遊した後に，早目に南下回遊に移行する個体が出現するものと思われる．C群は春期に体長40～45 cmで来遊する．一部の個体では黒潮水域で充分な肥満度に達する個体もあるが大半は黒潮前線を乗り越えて混乱水域に侵入して，秋に南下する．D群は夏期に体長が40～45 cm, E群は40 cm以下であるので，完全な未成魚の性格を持つ．夏期には黒潮前線の表層水温は上昇していることから，これら両群は黒潮前線の北側へ容易に回遊する．しかし，表面水温で22～24°Cの水域に分布することが多く，20°C以下の暖水ストリーマ内へ侵入することはほとんどない．これらD・E群は翌年B・C群となって再度東北海域に来遊する．これらの体長群のうち，例年，主群となる群は春季，体長40～45 cmのC群で，これらの魚は秋には体長50～55 cmほどに成長したあと南下して，はじめて産卵親魚となる(二平・小沼1981)．カツオは広温性の魚（川崎1963）とされているが，西部太平洋の南北回遊範囲とされる0°～42°Nの範囲で漁獲されたカツオの体長モード値と漁獲表面水温値の関係を検討すると(Fig. 80)，表面水温20°C以下の環境水温下へ分布するカツオは体長40～55 cmの範囲の魚だけであることがわかる．このカツオは先に述べた主群が黒潮前線を越えて北方低水温域に分布したものに相当する．これら主群よりも大型の体長群は黒潮前線よりも南側に分布し，より小型の体長群は夏以降に来遊して高水温域側に分布する傾向が強い．このように，黒潮前線を越えて北側の表面水温20°C以下の低水温域へ侵入するのはカツオの生活史上において，その体長からみて「未成魚から成魚に移行する期間」にあたるごく限定された時期と体長群だけであると考えられる．

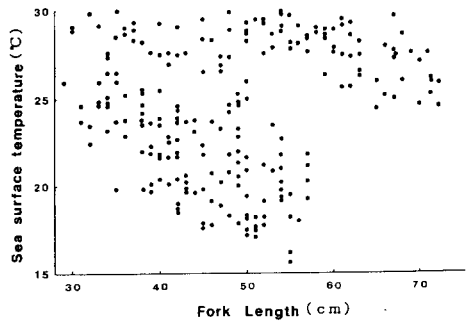

Fig. 80 Relationship between the fork length and the environmental temperature of skipjack tuna in the western Pacific Ocean.

6-4 フロントにおけるサイズスクリーニング現象

黒潮前線南側から黒潮暖水舌内にかけて実施した流し刺網調査結果（第4章）によれば，前線付近の水温フロント以南で採集されたカツオは幅広い体長と肥満度を示したのに対し，フロント北側の暖水ストリーマ内で採集されたカツオはほぼ体長45 cm, 肥満度20以上を示し，水温フロントを境に明らかな差が認められた．同様な現象は標識移動個体の再捕獲結果(第3章)にも明瞭にあらわれた．このことから高水温域から低水温域へカツオが侵入する場合，水温フロント付近で，大型・高肥満度の魚だけが，フロント域を通過して低水温域に進入する現象があることを明らかにし，これを潮境を魚群が通過する場合のサイズスクリーニング現象と定義した（Fig. 81）．

6-5 体温と生息水温および体長との関係

低水温域へのカツオの侵入メカニズムを明らかにするため，西部太平洋における南方高水温域から北方低水温域までのカツオ383尾の体温値を集め検討した(第5章)．これによれば，体温範囲は22～36°Cで，外部環境水温との差（Δt）は0～13°Cを示した．Δtの値は高水温環境下で小さく，低水温環境下で大きい傾向を示した．体長および体重別の体温は55 cm, 2.5 kg以上の個体では，つねに28°C以上の体温を示したのに対し，それ以下の個体では22～36°Cまでの間の体温を示した．表面水温20°C以下の低水温域に侵入する55 cm以下の体長群では，体長の大きな個体，肥満度の高い

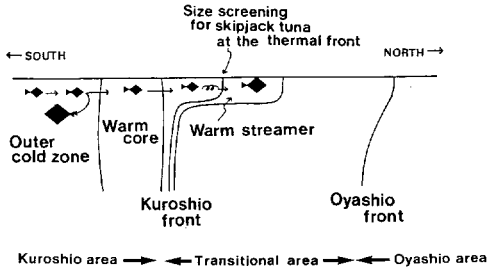

Fig. 81 Schematic model of the "Size-screening" of skipjack tuna at the Kuroshio Frontal zone.

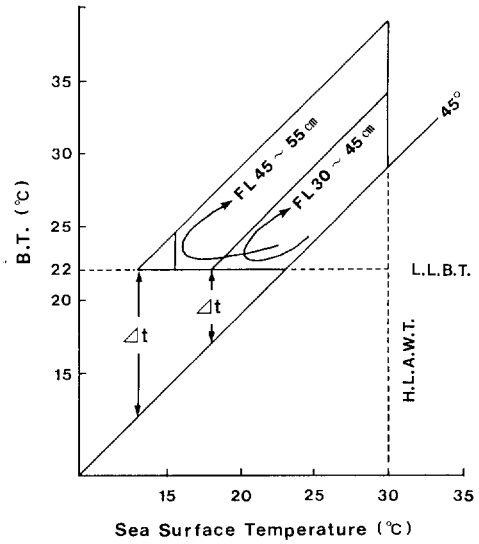

Fig. 82 Relationship between the environmental temperature and body temperature of skipjack tuna. Small size fish can not migrate into the cooler water because of the inability to maintain their body temperature.

個体ほど大きな Δt 値を示す個体が多い傾向が認められた．低水温域への侵入は代謝維持のための最低体温範囲内で行われると考えられる (Fig. 82)．

6-6　蓄積脂肪量と体長，生息水温の関係

皮下脂肪量および腸間膜脂肪量を測定し，体長および生息水温値との関係を検討した．脂肪量は体長が 45 cm を越えるころから増加し，肉質部では皮下部に脂肪が蓄積する傾向があった．月別，漁場水温別腸間膜脂肪量指数によれば，5, 6 月に黒潮前線付近に来遊するカツオの脂肪量指数は 0.1～0.3 であり，前線を越え「混乱水域」に入る 7・8 月には 0.3～0.7 に増加し，さらに表面水温 19°C 以下の水温域に入る 10, 11 月にはさらに増加し 1.0 以上を示す個体も出現した．6～7 月の一定量の脂肪量の増加と，9 月頃からの急速な脂肪量の増加はともにカツオが海洋前線を越えて低水温域へ侵入する行動に相伴なって生起している現象であると考えられた．皮下脂肪の蓄積は低水温環境への侵入個体にとっては体温保持の点できわめて適応的現象であると考えられる．

6-7　暖水ストリーマ内におけるカツオの分布と採餌生態

黒潮分流暖水舌内におけるカツオの分布と海洋構造および食物の種類と量を調べた結果によれば，暖水ストリーマ内中心部の高水温域での採集魚に比較して，暖水ストリーマの西縁部の親潮系水上に Over hang した表層暖水内に分布したカツオは一尾あたり胃内容物量が二倍以上の値を示し，肥満度も高かった．その暖水ストリーマ内分布魚のうち水温フロントの高水温域側と思われる表面水温 20.4°C の水域では体長 45 cm 以下の個体が多く，胃内容物はオキアミ類とカタクチシラス，低水温側と思われる 18.3°C の水域では体長 45 cm 以上の個体が多く，胃内容物はオキアミ類であった．このことから，成長や脂肪蓄積のための食物の獲得は親潮系水上に Over hang した表層暖水によって形成される水温フロント付近で行われていると推察された (Fig. 83)．

6-8　低水温域侵入と産熱機構

Barkley *et al.* (1978) は実験結果よりカツオは 17°C 以下では摂餌活動が鈍り，15°C 以下の水温環境では死亡すると報告している．実際上の分布では表面水温 15.6°C の水域にまで分布する．体温測定の結果から推察するとカツオの代謝活動のためにはおよそ 22°C 以上の体温が必要であるように思える．そのためには低水温域に侵入したカツオは体温と外界水温との温度差を補うために発熱量を増大させるか，皮膚の表面から外部環境への熱の放散量をおさえる必要がある．

低水温環境における産熱量の増大・体温保持機構としては

① 食物量の増加による特異動的作用 (S.D.A.) による発熱量の増加 (Suzuki 1970, Hamada and Ida 1973, Beamish 1974)．

② 食物量の増加による餌由来の脂肪酸からの直接的な発熱量の増加．

③ 蓄積脂肪消化による発熱．

④ 皮下脂肪層による断熱効果．

⑤ 体の大型化による熱放散比の減少効果（ベルグマンの法則）．

⑥ 体内脂肪蓄積による浮力増による運動エネルギーの減少効果

などのメカニズムが考えられる (Fig. 84)．低水温域に侵入した個体の肥満度および食物量が増加しているこ

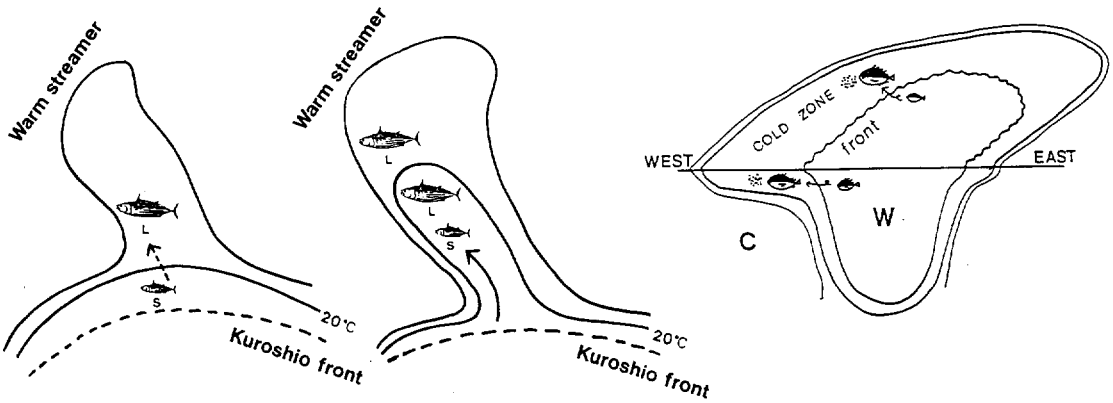

Fig. 83 Schematic model of the intrusion of small and large size skipjack tuna into warm streamers. Small size skipjack tuna enters into the warm streamer after the water temperature in the warm streamer rises above about 20°C.

とは第4章で，脂肪量が増加していることは第5章で述べた．おそらく，カツオは上記の機構を働かせ，環境条件（外的なもの）を生物体内（内的なもの）に取入れ，体長，肥満度，脂肪，食物量を増加させることにより，自己を変化させながら低水温域侵入を成し遂げていると思われる．

6-9 フロント付近におけるカツオの行動

上記のことは，自己変化をおこす前は水温フロントを一時的にも越えないということを意味しない．なぜ

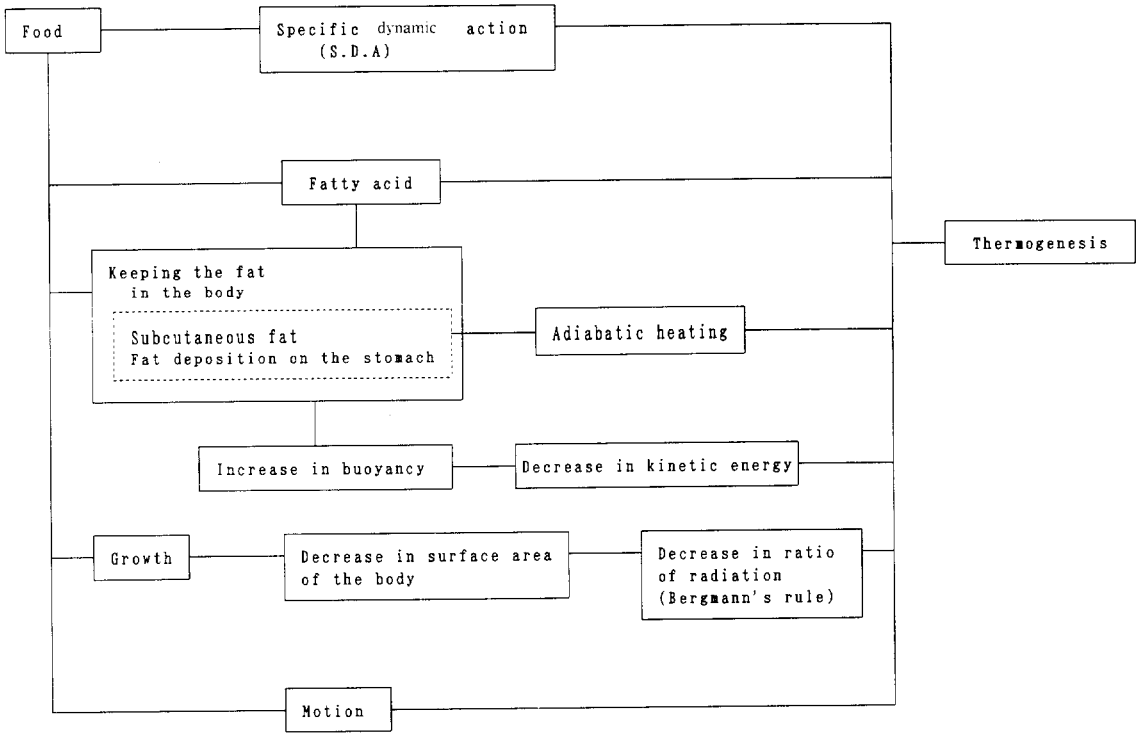

Fig. 84 A mechanism of the thermo-regulation of skipjack tuna in the cool water of high latitude areas.

なら15℃以下の冷水環境下に分布するオキアミ類やイワシ，サバなどを食物として利用するためには水平的あるいは鉛直的な水温フロント（水温躍層）を越えて採餌行動をとっているはずである．Over hangした表層暖水によって形成される水温フロント付近では，水平的にはフロントを越えた低水温側の方が主要な餌生物であるイワシ，サバ，オキアミ類などの分布条件は良いであろうし，フロント手前の高水温側では鉛直的に形成されるフロント（躍層）の下層低水温側の方が餌条件は良いと考えられる．フロント付近まで来遊したカツオはこのようなフロントを代謝活動維持可能な範囲内において行き来しながら，採餌活動を行っていると考えられる．つまりカツオは水温フロント付近で「走熱性」と「走餌性」の自己矛盾を内包しながら行動していると言うことができる．カツオは好的な環境条件下においても，そこにとどまったり，外へ出ないようにするのではなく，むしろある広さをあちこち泳ぎ回ることによって，環境条件の変化を自分のものとする．適応をしていない環境条件の中へはいりこむことによる，刺激と反応のくりかえしのなかで自己を変化させ，低水温環境という新たな環境条件下へ侵入を果しているのだと思われる（Fig. 85）．

6-10　前線漁場形成の生物的要因

南方海域で発生したカツオは成長にともなって北方に回遊し，春季には日本近海にまで来遊する．日本近海にまで来遊したカツオの一部は，さらに北上して黒潮前線を越え，低水温環境の暖水ストリーマ内へ進入する．カツオの前線漁場形成機構に関連して，川合・佐々木（1962）はカツオが黒潮前線を越えて暖水ストリーマ内へ移動する際の促進的水理条件として，黒潮前線から分岐する2次的黒潮前線の北寄りの強流帯が大きな役割を演じているとし，カツオ主群が混合水域に移行した直後に漁獲効率が良くなるのは，魚群が水平方向にも鉛直方向にも濃密に集中化されるためであるとした．また川崎（1963）は黒潮前線付近における漁場形成に関して初期のカツオ来遊量の大小と分布の仕方とは強い関連を持っており，不漁年には黒潮前線

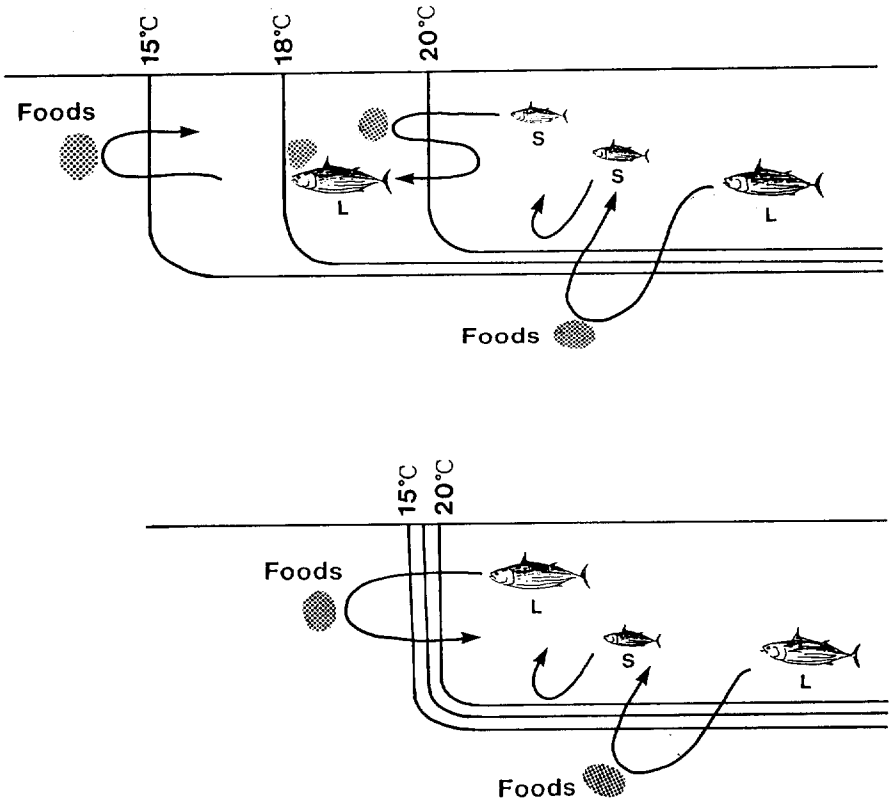

Fig. 85　Feeding behavior of skipjack tuna near the front of the warm streamer.

の南側だけで漁獲され，豊漁年には黒潮前線の南側とともに黒潮前線上および，2次的黒潮前線上にも漁場形成され，この現象は資源量が大きくなればカツオの分布域が広くなるということを示しているとした．前線漁場形成に関し，川合・佐々木（1962）の報告では海洋学的側面だけが，川崎（1963）の報告ではカツオが広温・広塩性であること，資源量が増えると分布域が広がることだけが述べられ，かならずしもカツオの生物学的知見が充分取り入れられた前線漁場形成論ではなかった．

黒潮前線付近におけるカツオの生物学的調査と標識放流に基づいた行動学的な調査から，著者は前線漁場の形成には川合・佐々木（1962）や川崎（1963）の見解をも包括した以下の様な生物学的な機構が存在すると考えた．つまり，カツオの来遊量水準が低い年には，カツオの成長，発育速度が早く，黒潮前線南側水域まで北上する時期には体長も大きく，肥満度も高くなる．なかには発育が進んで生殖腺熟度も高くなる個体も出現し，このような個体は黒潮前線まで到達せずにその南側で成熟が進んで，Uターンする．また，成熟するまでに至らない個体は，黒潮前線付近まで北上するが，体サイズが大きいことから，そのまま前線付近で滞留することなく，暖水ストリーマ内へ進入する．したがって，このような年には，もともと来遊量が低い上に，Uターンする個体の増加，黒潮前線を乗越える生理的条件に達する魚の増加によって，黒潮前線付近ではカツオの滞留現象は起きにくくなり，前線漁場形成は不活発となる．それに対し，来遊量水準が大きい時は，成長・発育速度が遅く，黒潮前線南側水域に来遊するときには，体長は小さく，肥満度も低くなる．したがって生殖腺の未熟個体も多くなることからUターン個体は少なく，ほとんどが黒潮前線付近まで北上する．しかし，前線付近に達した個体の中には，まだ黒潮分流暖水舌内の低水温環境へ進入する身体的，生理的な条件を備えていない個体が多いことから，黒潮前線付近に形成される表層水温フロントで滞留し活発な索餌活動をした後，成長をしてから低水温環境へ順次進入する．したがって，このような年には，もともと来遊量が高い上に，Uターンする個体が少なく，黒潮前線付近へ集結する個体が増加する．そして，これらの個体は，前線を乗越える身体的，生理的な条件を備えるまで，前線付近で滞留することから，前線漁場の形成はきわめて活発となる（Figs. 86, 87）．

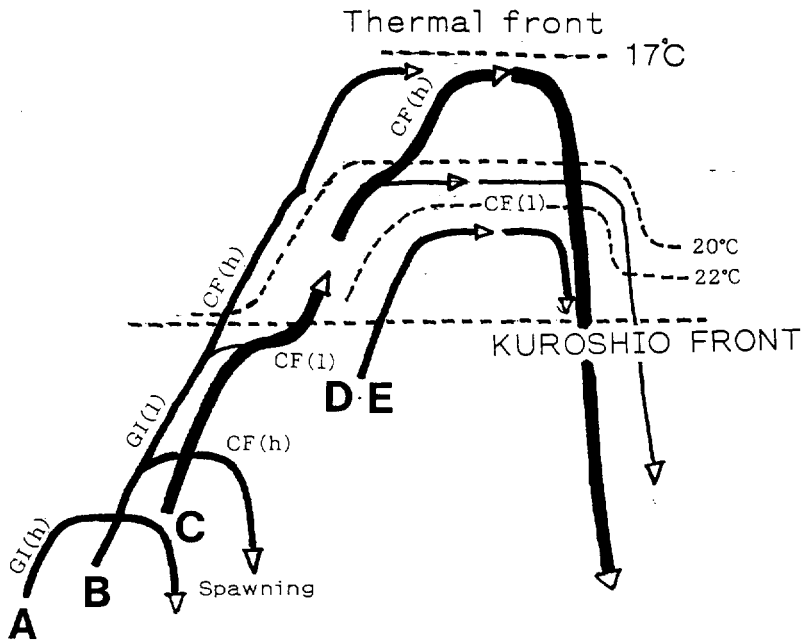

Fig. 86 Migratory model of the five size groups (A～E) of skipjack tuna in the Kuroshio Frontal area.

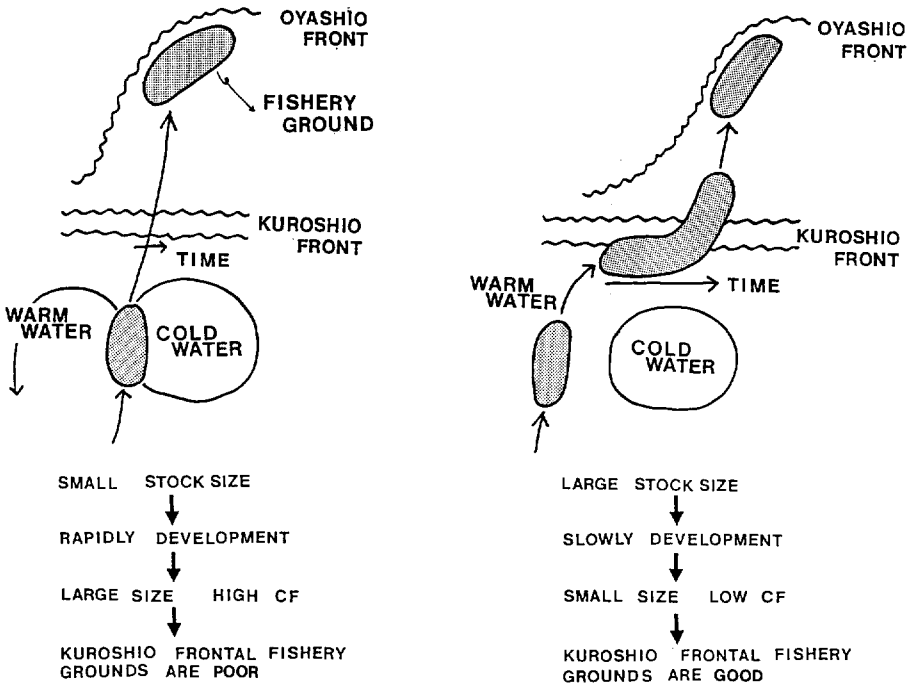

Fig. 87 Schematic model on the formation of the frontal fishing grounds of skipjack tuna.

6-11 漁獲量予測手法への応用

6-11-1 目的

日本近海におけるカツオ漁獲量は東北海域である黒潮前線から混乱水域でとくに高いため，毎年6月初旬にカツオ予報会議が開催され，東北海域のカツオ漁獲量の予測が行われている．しかし，充分な予測手法が確立されていないことから，この海域における漁場形成機構の解明や漁獲量予測の手法開発が期待されている．

本論文において著者は日本近海に来遊するカツオの生物特性とその回遊生態について明らかにした．ここでは，それらの知見をもとに，東北部近海域におけるカツオの漁獲量予測手法について検討した．

6-11-2 方法

カツオの生物データには1971～1993年の期間に茨城県那珂湊港において測定した体長(尾叉体長)，肥満度を使用した．日本東北部近海域の漁獲量としては東北の主要12港（銚子・那珂湊・小名浜・中の作・塩竈・石巻・女川・気仙沼・大船渡・釜石・宮古・八戸）(Fig.

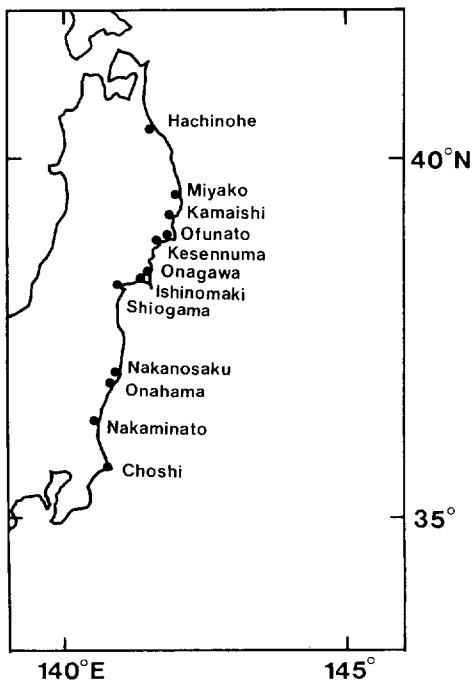

Fig. 88 Map showing the twelve main fishing ports in the northeastern area of Japan.

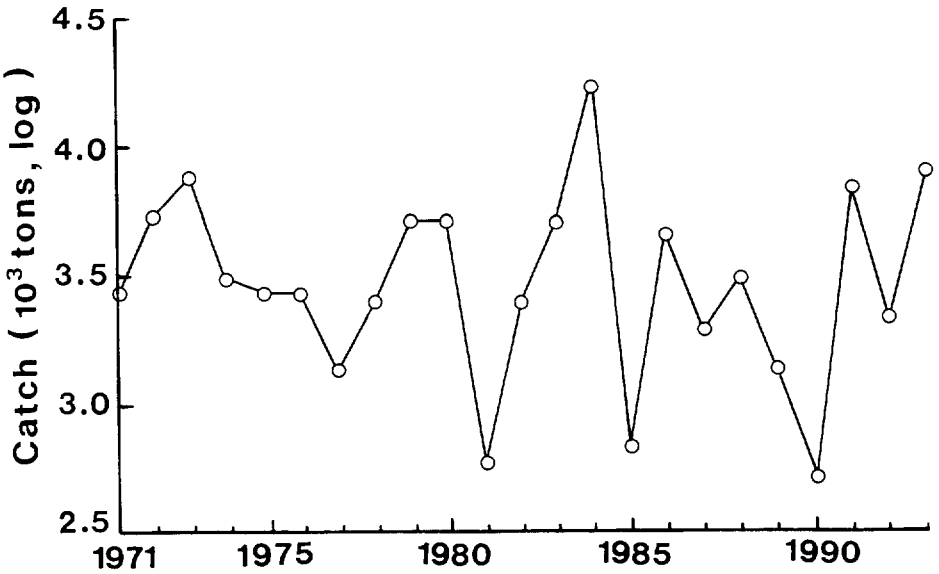

Fig. 89 Yearly fluctuations of landings of skipjack tuna at the twelve main fishing ports in the northeastern area of Japan. Landings are indicated in the log scale.

88) における生鮮カツオ水揚量（水産流通統計）から北部まき網水揚量を除いた値を用いた．1971 年から 1993 年までの 12 港水揚量の変化を Fig. 89 に示した．5 月の黒潮北限位置は気象庁海況旬報から村上 (1993) の指標水温に従って読み取った．

6-11-3 結果

東北近海域のカツオの漁獲量変動におよぼす要因を Table 14 に整理した．第 1 には東北海域に来遊する主群である 2 歳魚の資源量，第 2 には資源量，来遊量の反映指標あるいは回遊パターンを規定する因子としての体長や肥満度などの体サイズ，第 3 には北上魚群に対する物理的な要因としての黒潮前線の北限位置，第 4 には漁獲努力量などが考えられる．

6-11-3-1 来遊密度と成長量の逆相関関係からの予測

一般的に魚類においても個体群密度が高まると成長が抑制され，密度と成長速度との間には逆比例関係が成立し，この関係は同一年齢群や閉鎖的な環境において顕著であるとされている (久保 1969, 川本 1979)．本論文第 3 章において肥満度の異なる魚群の北上回遊の違いについて述べ，肥満度の高い魚群には春季に U ターン個体が多いことを明らかにした．このことは栄養蓄積度が高い個体が多い場合には東北海域への来遊量・滞留割合が低いことを示す．そこで，春季に来遊する魚群の体長と肥満度と 12 港漁獲量との関係を検

Table 14 Casual factors underlying the catch fluctuation of skipjack tuna off the northeastern coast Japan.

Causal factors underlying the catch fluctuations of skipjack tuna off the northeastern coast of Japan	Indices of the explanatory variable
Population size of 2-year-old which is the main year class in fish migrated to this area.	Abundance of egg-laying 2-year-old
Density effect	Fork length and condition factor in May
The ratio of the northward migratory fish to the transitional area to the turn back fish to the tropical area from near the Kuroshio Front	Fork length, condition factor and gonad index in May Fork length in September of the year before
Locational fluctuation of the Kuroshio Front	The closest location of north in latitude of Kuroshio Front in May
Fishing effort	Number of fishing unit for the skipjack pole-and-line fishery

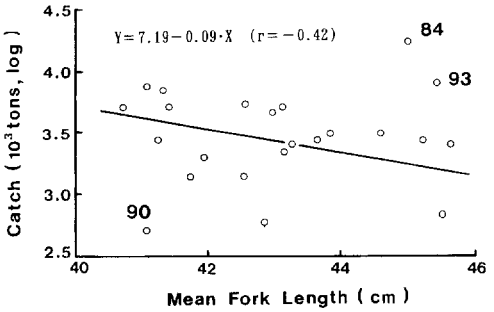

Fig. 90 Relationship between the mean fork length of skipjack tuna in the southern area of the Kuroshio Front in May and the yearly landings at the main twelve fishing ports in the northeastern area of Japan. Landings are indicated in the log scale.

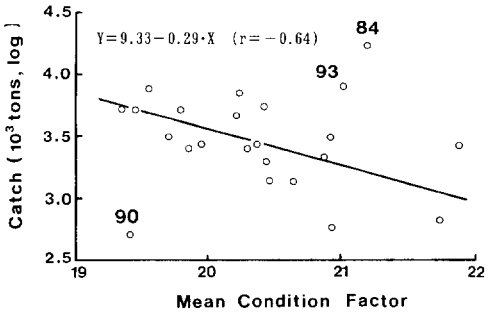

Fig. 91 Relationship between the mean condition factor of skipjack tuna in the southern area of Kuroshio Front in May and the yearly landings at the main twelve fishing ports in the northeastern area of Japan. Landings are indicated in the log scale.

討した.

① 来遊初期の平均体長値と年間漁獲量との関係

1971 年から 1993 年まで 23 年間に那珂湊港で実施した生物測定結果から作成した各年の 5 月の体長組成から(第 2 章), C 群に相当するコホートの平均体長を来遊初期の平均体長とし, この値(x)と年間漁獲量(y)との相関を検討した(Fig. 90). 1984 年, 1990 年, 1993 年を除くと次式が得られた.

$\log y = 7.876 - 0.103x$　($r = -0.547$, $P < 0.05$)

y: 年間漁獲量 (トン)

x: 5 月の平均体長 (cm)

② 来遊初期の平均肥満度と年間漁獲量との関係

同様にして各年の 5 月の肥満度平均値 (x) を求め, 年間漁獲量 (y) との相関分析を行い, 以下の関係式を得た (Fig. 91). 前式と同様に 1984 年, 1990 年, 1993 年は特異年として除いた.

$\log y = 9.087 - 0.285x$　($r = -0.604$, $P < 0.01$)

y: 年間漁獲量 (トン)

x: 5 月の平均肥満度

以上のように, 来遊初期である 5 月の体長, 肥満度が小さい年ほど 12 港の年間水揚量は多い傾向が認められた.

6-11-3-2 黒潮前線の北限位置と漁獲量の関係

春季, 北上来遊してくるカツオ漁場の推移は 20°C の等温線の推移とよく一致することから, この等温線で示される水温上昇過程が, 漁場の移動を促す原動力になっているとされる(笠原 1977). したがって, 東北近

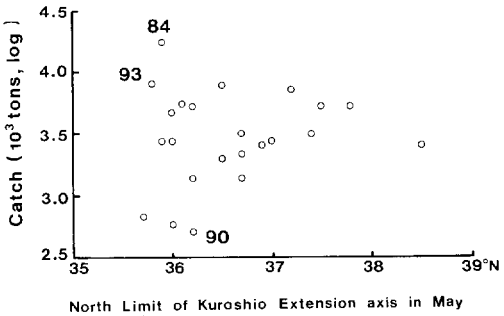

Fig. 92 Relationship between the northern limit of the Kuroshio Front in May and the yearly landings at the main twelve fishing ports in the northeastern area of Japan. Landings are indicated in the log scale.

海域へのカツオの来遊は黒潮前線の北上位置と密接な関係をもつ可能性が高い. そこで, 5 月における黒潮前線の北限位置と 12 港の年間水揚量との関係を検討した. 1984 年, 1993 年を除くと 5 月の黒潮北限緯度が高いほど水揚量は多い傾向がうかがえる (Fig. 92).

6-11-3-3 前年秋季の平均体長と漁獲量の関係

第 2 章において標識放流調査結果を検討し, 南下期に D 群, E 群サイズの魚群は翌年に再び混乱水域に来遊することを明らかにした. 秋季に来遊主群となる魚群は, ほとんどが C 群の年が多いが, 1983 年, 1985 年, 1987 年, 1992 年には D 群が主体となっている.

このような年の翌年には, これらの魚群は B 群となって混乱水域に再来遊し, 通常の C 群と重なることから例年よりも漁獲量が増加することが考えられる

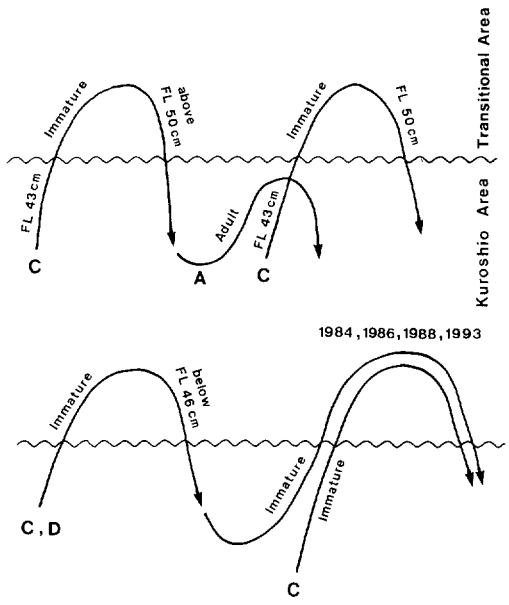

Fig. 93 Schematic model on the migration of skipjack tuna to the transitional area. Only immature fish in autumn migrates again into the transitional area in spring of the following year.

(Fig. 93)．そこで，($N-1$) 年の9月における来遊主群の平均体長と N 年の漁獲量の関係を検討した (Fig. 94)．前年の主群の平均体長が 46 cm よりも小さな年は明らかに翌年の漁獲量は高い値を示した．このことからも索餌期に成魚にならない魚群は翌年に混乱水域に再来遊する回遊パターンが存在するとの第2章の推測は確かであると思われる．5月の来遊初期の体長，肥満度と漁獲量の関係図において，特異年とした 1984 年，1993 年の2年はこの様な卓越した前年の D 群の再来遊年にあたっている．

6-11-3-4 推定産卵量と漁獲量の関係

東北近海域に来遊するカツオの主群は2歳魚で，ほとんどの年が C 群であることから，これらの魚は南下時期には既に体長 45～46 cm の生物学的最小形（永沼 1979）のサイズ以上に達していることから，秋に南下して翌年には産卵に加入する．そこで，東北部近海域において漁獲される2才魚の漁獲量が資源量に比例するものと仮定して，年齢別の産卵数を計算し，これらの産卵数を説明変数とする重回帰分析を行った．

産卵量の計算は以下のようにして求めた．

n 年の東北部近海域の2歳魚の漁獲量を C

n 年の2歳魚の資源量 N と漁獲量 C は比例すると仮

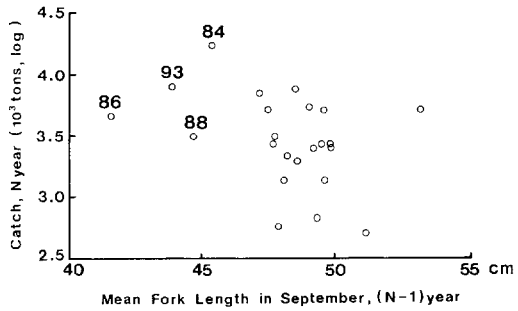

Fig. 94 Relationship between the mean fork length of skipjack tuna in September of the year (N-1) and the yearly landings of the year N at the main twelve fishing ports in the northeastern area of Japan. Landings are indicated in the log scale.

定する

$$N=p\times C$$

西部太平洋におけるカツオの全減少係数 $Z=1.087$ (未発表)

n 年における，年齢 t の資源尾数 N_t は

$$N_t=p\times C_{(n-t+2)}\cdot\exp(-Z(t-2)) \quad (t\geqq 3)$$

t 歳におけるカツオの体長 L_t は田中 (1989) より

$$L_t=116\times[1\text{-}\exp\{-0.17\times(t+0.59)\}$$

よう卵数 Y_t は Simmons (1969) より

$$Y_t=-1333.5+54+3.238\times 10\times L_t(\text{cm})$$

Table 15 Estimation of the relative number of eggs spawned from several age groups of skipjack tuna.

Age (t)	Fork length (L_t, cm)	Fecundity (Y_t)	Population size (N_t, ratio)	Abundance of egg-laying ($Y_t\cdot N_t$)
1	27.5			
2	41.3	3,754	1	3,754
3	53.0	382,600	0.337227	129,023
4	62.8	699,924	0.113722	79,597
5	71.2	971,916	0.038350	37,273
6	78.2	1,198,576	0.012933	15,501
7	84.1	1,389,618	0.004361	6,060
8	89.1	1,551,518	0.001471	2,282
9	93.3	1,687,514	0.000496	837

Table 16 The results of the multiple regression analysis to forecasting the skipjack tuna catch off the northeastern coast of Japan. Relative number of eggs spawned from several age groups of skipjack tuna each year was used for an explanatory variable.

Spawning year	Partial correlation coefficient					R	R^2	AIC	DF	F_0	
	E3	E4	E5	E6	E7						
(N-2)	−0.410	0.801	−0.615	0.652	−0.584	0.819	0.671	7.88	5.11	4.493	*

*: Significant at 5% level

Table 17 Stock-recruitment relationship for the skipjack tuna in the western Pacific Ocean.

Area	Year				
	N-4	N-3	N-2	N-1	N
Feeding area	2 age				Ct
Spawning area		3 age	3 age 4 age 5 age 6 age 7 age	5 age	6 age

産卵量はよう卵数に比例し，雌雄比を2分の1とすると，

年齢別の産卵量は

$$Egg_{(t)} = q \times N_t \times Y_t \times 1/2$$

となる（Table 15）．

カツオの産卵は年齢によって時空間的に分離した海域で行われるとされることから（永沼 1979），目的変数を N 年の東北12港水揚量とし，説明変数を3歳から7歳までの産卵量とする重回帰分析を行った．結果は5%水準で有意性が認められ，4歳魚の寄与率が高い結果が得られた（Tables 16, 17）．

6-11-3-5 重回帰式による予測法の検討

カツオの漁獲量に影響を与えると考えられる因子と

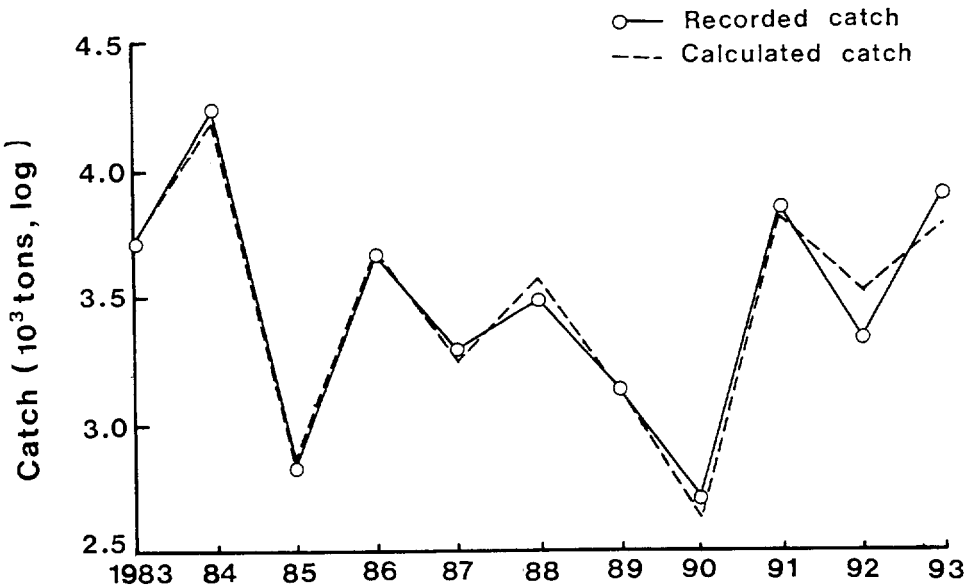

Fig. 95 The estimation of the skipjack tuna catch in the northeastern area of Japan using the multiple regression analysis.

Table 18 Results of the multiple regression analysis to forecasting the skipjack tuna catch off the northeastern coast of Japan. Open circles (○) are used for the explanatory variable, cross (×) is not used. (FL9: Mean fork length in September of the year before, CF5, FL5: Mean condition factor and fork length in May, NOB: Number of fishing unit for the skipjack pole-line fishery, E_t: Abundance of egg-laying by t-year-old fish.)

Year	R	R^2	AIC	FL9	CF5	FL5	NOB	E3	E4	E5	E(6-10)	
1983-1993	0.983	0.967	−6.02	○	○	○	○	○	×	○	○	*
1982-1993	0.953	0.908	0.97	○	○	○	○	○	×	×	○	*
1981-1993	0.779	0.607	12.02	○	×	×	×	×	×	×	○	*
1981-1993	0.779	0.607	12.02	○	×	×	×	×	×	×	○	*
1980-1993	0.682	0.466	16.03	○	×	×	×	×	×	×	○	*
1982-1992	0.963	0.928	−0.61	○	○	○	○	○	×	×	○	*
1981-1991	0.756	0.572	12.99	○	×	×	×	×	×	×	○	*
1980-1990	0.547	0.299	15.87	○	×	×	×	×	×	×	×	
1979-1989	0.595	0.354	12.84	×	×	×	×	×	○	×	×	
1978-1988	0.560	0.314	12.87	×	×	×	×	×	○	×	×	
1977-1987	0.995	0.991	−25.78	×	○	○	○	○	○	×	×	**
1976-1987	0.957	0.916	−4.02	×	○	×	○	○	○	×	○	**
1975-1987	0.951	0.905	−4.94	×	○	×	○	○	○	×	○	**
1973-1987	0.944	0.891	−6.56	×	○	×	○	○	○	×	○	**
1971-1987	0.938	0.881	−9.33	×	○	×	○	○	○	×	○	**
1975-1985	0.999	0.999	−43.94	○	○	○	○	○	○	○	○	**
1974-1985	0.998	0.996	−36.29	○	○	○	○	○	○	○	○	**
1973-1985	0.977	0.954	−9.70	○	○	○	○	○	○	×	○	**
1972-1985	0.969	0.940	−8.51	○	○	○	○	○	○	×	○	**
1971-1985	0.964	0.929	−8.97	○	○	○	○	○	○	×	○	**
1974-1984	0.998	0.996	−35.49	○	○	○	○	○	○	×	○	**
1973-1984	0.974	0.949	−8.36	○	○	○	×	○	○	○	○	*
1972-1984	0.940	0.884	−4.55	×	○	×	○	○	○	×	○	**
1971-1984	0.939	0.882	−6.69	×	○	×	○	○	○	×	○	**
1973-1983	0.999	0.999	−73.86	○	○	○	○	○	○	○	○	**
1972-1983	0.942	0.888	−7.59	×	○	×	○	○	○	×	○	**
1971-1983	0.937	0.877	−9.27	×	○	×	×	○	○	×	○	**
1972-1982	0.951	0.905	−7.24	×	○	×	○	○	○	×	○	*
1971-1982	0.943	0.890	−8.48	×	○	×	○	○	○	×	○	**
1972-1981	0.973	0.946	−13.58	×	○	×	○	○	○	×	○	**

**: significant at 1% level * : significant at 5% level

して5月の体長，肥満度，黒潮前線の北限緯度，前年9月の体長，カツオ船の漁撈体数，3歳・4歳・5歳・6から10歳までの推定産卵量の9つの変数を取上げて変数減少法による重回帰分析を行った．使用する年数も変えながら行った．1987年以前のデータでは1%水準での有意性が認められる式が得られたが，1978-1991年，1979-1992年，1980-1990年のデータでは有意な式は得られず，1981-1991年，1982-1992年，1983-1993年のデータでは5%の有意水準の重回帰式が得られた (Table 18)．一例として，説明変数を ① 5月の平均体長，② 5月の平均肥満度，③ 前年9月の平均体長，④ 近海カツオ竿釣船の漁撈体数，⑤ 3歳魚の推定産卵量，⑥ 5歳魚の推定産卵量，⑦ 6歳～10歳魚の推定産卵量の7つとした重回帰式の計算結果をFig. 95に示した．1983～1993年の期間の漁獲量変動をこれら7つの変数で比較的よく説明することができ

る．このように，カツオの生物特性と回遊生態に基づいた回帰分析で，ある程度の有意性のある回帰式が得られた．今後はこれらの説明変数をファジー理論 (Sakuramoto *et al.* 1995) やエキスパートシステム，ニューラルネット（青木ら 1989，青木・小松 1992）などの新たな解析手法に適用することにより，より有用な来遊量予測手法の開発が期待される．

要　約

潮境域は陸棚や湧昇域とともに回遊性浮魚類の重要漁場であり，これまでにも多くの研究がなされてきた．しかし，潮境の海洋構造と漁場の位置関係を示す事実記載的な研究がそのほとんどであり，魚群の行動生態学的あるいは生理生態学的な研究は皆無に近い．魚群の回遊行動や資源量変動に伴う回遊域の拡大・縮小の機構などの問題を，生物と環境の相互作用の面から解明し，また，これらの生態学的な知見を基礎とした漁場形成や漁況の予測手法を改良するためにも，魚群の回遊行動に対する生理生態学的な研究が必要である．

本研究は，東北近海の潮境域に来遊するカツオ *Katsuwonus pelamis* を対象として，主に標識放流と流し刺網調査および体温測定により，その回遊行動と生理および潮境環境との関連性を明らかにした．研究成果の大要は以下のとおりである．

1. 日本近海に来遊するカツオの生物学的特性

茨城県那珂湊港における 1971～1993 年の体長測定データをもとに，カツオの資源構造，生物特性値（生殖腺指数，肥満度，内臓除去肥満度，肝臓重量指数，腸間膜脂肪量指数）の変化と潮境の位置関係を解析するとともに，標識放流調査によりカツオの回遊生態を検討した．その結果，以下のことが明らかになった．

1)　春・夏季に東北近海域に来遊するカツオには，来遊の時期と体長により冬季発生する群と夏季発生する群に由来する A～E の 5 つの群が存在する．A 群は 4 月に出現し，その時の平均体長は 51～54 cm，B・C 群は 5～6 月に出現し，前者は 45～48 cm，後者は 42～44 cm，D・E 群は 8 月以降に出現し，前者は 41～45 cm，後者は 30 cm 台の大きさである．北赤道海流域から赤道海流域で冬に生まれる E 群は成長して翌年 C 群に，さらにその翌年の春 A 群になる．他方，主に亜熱帯反流域で夏に生まれる D 群は翌年の春 B 群となる．

2)　カツオは体長 45.0 cm 付近から成熟度を増加させることから，B 群の一部と A 群は春季に成熟過程に入る．そのため，これらの魚群は黒潮続流の南縁付近まで北上した後，U ターンして南下し産卵群となる．

3)　B 群の一部と C 群のほとんどは，黒潮前線を越えて北上する．北上する B・C 群は未成熟個体のみである．また，それらの体長，肥満度，内臓除去肥満度，肝臓重量指数，腸間膜脂肪重量指数はいずれも黒潮前線を境に北側で不連続的に高くなる．

4)　北上した B・C 群は秋・冬季に亜熱帯反流域および赤道海域まで南下するが，D・E 群は南下しても黒潮周辺域どまりである．

2. 標識放流調査からみた潮境域におけるカツオの行動生態

潮境における魚群の行動調査のため，1981 年 8 月に 2 次黒潮前線，1986 年 5, 6 月に黒潮続流の前線付近でカツオを標識放流し，放流時と再捕獲時の生物特性値を比較検討した．その結果，以下のことが明らかになった．

1)　春季に黒潮続流水域まで北上してきたカツオ魚群の U ターン行動の決定は黒潮続流の最高水温帯の南縁付近で行われる．北縁の黒潮前線まで北上した個体は最終的にはすべて北上する．

2)　6 月に黒潮前線から北にのびる暖水ストリーマに乗って北上する個体は，ストリーマの水温が約 20℃ 以上になるまでは体長・肥満度の大きいものに限られる．

3)　9 月に 2 次黒潮前線付近まで北上した群のうち，体長 45 cm 以上の大型魚は潮境を通過し肥満度を高めながら北の低水温域側へ侵入するが，小型魚は潮境から高水温帯側に戻る．潮境域におけるこの体サイズ別の魚群のふるい分け現象を「サイズスクリーニング」と呼ぶことにした．

3. 流し刺網調査からみた潮境域におけるカツオの分布と海洋環境

潮境域におけるカツオ魚群の分布と海洋構造の関係を調べるために，1987 年と 1988 年の 6 月に黒潮水域および暖水ストリーマ内において流し刺網調査と海洋調査を実施し，以下のことを明らかにした．

1)　黒潮前線南の暖水域では体長 45 cm 以下と 45 cm 以上の個体が混在するのに対して，北の冷水側では体長 45 cm 以上の大型魚のみが分布し，サイズスクリーニング現象が認められる．

2) 暖水ストリーマ西縁部のフロント付近（表面水温 20.4°C）におけるカツオはオキアミ類とカタクチシラス，低水温側(表面水温 18.3°C)に分布したカツオはオキアミ類とマイワシを主に食べていた．ストリーマ内のカツオのうち，先端部付近の個体の胃内容物重量は中央部付近の個体の 2～5 倍もあり，より活発に採餌していることがわかった．

4. 温度生態学的視点からみた潮境域におけるカツオの行動

黒潮と親潮の間の混乱水域に分布するカツオの部位別蓄積脂肪量の測定と，北西部太平洋全域のカツオの体温測定により，以下のことを明らかにした．

1) カツオの脂肪蓄積量は，春季に魚群が黒潮前線を越えて混乱水域に北上した時と，秋季に暖水ストリーマ北縁の低水温域に侵入した時に増加する．体長 45 cm 以上の大型個体は小型個体に比べて蓄積脂肪量が高い．この脂肪は主に皮下部と胃腸壁部に蓄積されており，低水温環境域に侵入するカツオの体温保持に有効であると考えられる．

2) 混乱水域に来遊する体長 30～55 cm のカツオは，環境水温が低下しても，代謝のための最低体温 22°C を保つ．体長 45 cm 以下の小型個体は，断熱層としての脂肪蓄積量が少ないため，大型個体に比較して体温を高く保つ能力が劣るので，水温環境が 20°C 以下になると代謝活性が低下すると考えられる．このことが潮境におけるサイズスクリーニング現象の基本的な要因であると推察される．

3) 南下期のカツオのうち，大型個体は潮境通過前に体温を上昇させ，水温 26～27°C の亜熱帯反流以南の水域まで一気に南下する．一方，体温が大型個体ほど高くならない体長 42～43 cm 以下の小型個体は，南下しても黒潮周辺域にとどまる傾向がある．

以上により，黒潮続流の潮境域におけるカツオ魚群の回遊に関わる生理生態学的特性と漁場形成の経年変動の機構に関して，以下のことが結論される．

(1) 黒潮続流の南縁ですでに成熟過程に入った魚群は南に U ターンする．肥満度が高い魚群の一部は前線を越えて混乱水域に入るが，南側に U ターンする個体の割合は肥満度の低い魚群に比べて高い．

(2) 混乱水域に来遊する魚群のうち，体長 30～45 cm の個体は 20°C 以下の水温環境下では体温を高く保持する機構がないために，20°C 以上の暖水域にとどまる．一方，体長 45 cm 以上の索餌群は，皮下部に脂肪を蓄積することにより体温保持機構を備え，潮境を越えて低水温域まで侵入する．その結果，サイズスクリーニング現象が生じる．

(3) 北に侵入した大型個体は親潮水域表層部に伸びる暖水ストリーマを利用してその先端付近まで侵入し，多量の栄養蓄積を行うことにより，亜熱帯反流以南の産卵域までの長距離南下回遊を可能にする．

(4) 資源量の水準が高い年は個体の成長と発育が遅れ，未成熟・低肥満度・小型魚の出現割合が増え，黒潮南縁域で U ターンせずに北上する魚群量が増加する．さらに，前線付近でサイズスクリーニング現象のために滞留する魚群の量が増える結果，黒潮続流域の前線漁場形成は活発となる．資源の低水準年には逆の現象が生じ，前線漁場の形成は不活発となる．

謝　辞

本研究をとりまとめるのにあたり，終始懇切なる御指導をいただき，さらに本論文の御校閲をいただいた東京大学海洋研究所教授杉本隆成博士に心から感謝申し上げる．また東京大学農学部教授会田勝美博士，東京大学海洋研究所教授松宮義晴博士，同助教授青木一郎博士，同助教授中田英昭博士には本論文の御校閲をいただくとともに，数々の御指導と有益な御教示をいただいた．元九州大学農学部教授板沢靖男博士，京都大学農学部教授坂本　亘博士からは文献の供与と種々の御教示をいただいた．深く感謝申し上げる．

本研究をすすめるにあたっては歴代の茨城県水産試験場場長，資源部長および漁業部長からは種々の御理解ある便宜と御指導をいただいた．長谷川一磨現場長，堀　義彦資源部長には本研究の発表にあたりその機会と本論文の御校閲をいただいた．浜田篤信茨城県水産試験場技佐(当時)，漁業部長久保治良博士には本研究のとりまとめにあたり適切な御助言をいただいた．また南西海区水産研究所高知支所資源管理部長小坂　淳博士，永沼　璋元東北区水産研究所資源管理部第 2 研究室長，遠洋水産研究所資源管理部かつお・まぐろ調査研究室田中　有主任研究官には本研究をすすめるうえで種々な御教示と有益な御助言をいただいた．これらの方々の御高配に対し深謝の意を表する．

漁獲物標本の採集・測定や種々の調査にあたっては，茨城県水産試験場庶務部小沼伊佐男技師，加工部山口安男技師（当時），星野　悟技師（当時），漁業部清水信宏技師（当時）をはじめとする同僚諸兄の暖かい御

協力をいただいた．また，標識放流調査，流し刺網調査をはじめとする洋上調査については，御園昌邦元水戸丸船長，二田耕一現水戸丸船長，横須賀功ときわ船長，大和田盛弘元あさなぎ船長をはじめとする茨城県水産試験場所属調査船の乗組員の方々には多大な御協力をいただいた．さらに，焼津水産高校調査船やいづ，宮城県所属調査船新宮城丸，三重水産高校調査船しろちどり，静岡県水産試験場調査船富士丸，駿河丸，高知県水産試験場調査船土佐丸の船長はじめ乗組員の方々には調査にあたり御理解と御協力をいただいた．とくに，東出権之介元やいづ船長，雫石勝喜新宮城丸船長には調査への格別の御配慮とカツオの漁撈生態に関して種々御教示いただいた．東北区水産研究所資源管理部長河井智康博士，同第2研究室長飯塚景記博士（当時），同第2研究室長渡辺　洋博士，浅野政宏主任研究官（当時），田辺智唯技官には予報会議等において多くの論議をいただくとともに，貴重な資料の提供と文献の紹介を受けた．静岡県水産試験場森　訓由主任研究員，吉田　彰技師，高知県水産試験場新谷淑生研究員（当時）には調査への御協力と，貴重な調査資料の提供をいただいた．これらの方々の御協力に対し心より御礼申し上げる．

大源漁業株式会社所属第8源漁丸植杉　豊元漁労長をはじめとする多くの土佐近海鰹船の乗組員の方々には調査の御協力をいただくとともに，カツオの漁撈生態等について多くのことを御教示いただいた．また，那珂湊魚市場での調査にあたっては，那珂湊市漁業協同組合連合会渡辺国雄元会長，那珂湊市漁業協同組合販売部平戸一男氏をはじめとする市場職員各位，大浅漁業株式会社出沼敬祐社長，カクダイ水産株式会社桜井泰順社長をはじめとする仲卸業界の皆さんの多大の協力をいただいた．また，茨城県水産試験場の大内康子嬢，得能一栄嬢，永田好子嬢，大和田千鶴子嬢には資料整理と作図の作業に多大の御協力をいただいた．これらの方々にも心から感謝申し上げる．

最後に，本研究をすすめるにあたって，生前に暖かい激励をいただいた元東北区水産研究所所長故佐藤栄博士，元東京大学海洋研究所教授故黒木敏郎博士に対し，心より厚く御礼申し上げる．

引用文献

青木一郎・稲垣　正・三谷　勇・石井丈夫（1989）カタクチイワシの漁況予測へのエキスパートシステムの応用．日水誌，**55**，1777-1783

青木一郎・小松輝久（1992）ニューラルネットによるマイワシ未成魚漁獲量の予測．水産海洋，**56**(2)，113-120

浅野政宏・田中　有（1972）西部太平洋におけるカツオの成熟に関する研究．東北水研報(31)，153-159

安楽守哉・川崎　健（1966）日本近海におけるカツオ・ビンナガの来遊量とその変動について（第2報）．東北水研報（26），9-33

BARRETT, I. and HESTER, F.J. (1964) Body temperature of yellowfin and skipjack tunas in relation to sea surface temperature. *Nature*, London, **203**, 96-97

BAYLIFF, W.H. (1977) Estimates of the rates of mortality of skipjack tuna in the eastern Pacific Ocean derived from tagging experiments. *Inter-Amer. Trop. Tuna Comm.*, Internal Rep. **10**, 59 pp

BAYLIFF, W.H. (1984) Migrations of yellowfin and skipjack tuna released in the central portion of the eastern Pacific Ocean,as determined by tagging investigations. *Inter-Amer. Trop. Tuna Comm.*, Internal Rep. **18**, 107 pp

BAYLIFF, W.H. (1988a) Integrity of schools of skipjack tuna, *Katsuwonus pelamis*, in the eastern Pacific Ocean, as determined from tagging data. *Fishery Bulletin*, **86**(4), 631-643

BAYLIFF, W.H. (1988b) Growth of skipjack, *Katsuwonus pelamis*, and yellowfin, *Thunnus albacares*, tunas in the eastern Pacific Ocean, as estimated from tagging data. *Inter-Amer. Trop. Tuna Comm.*, Bull. **19**(4), 311-385

BEAMISH, F.W.H. (1974) Apparent specific dynamic action of largemouth bass, *Micropterus salmoides*. *J. Fish. Res. Bd. Canada*, **31**, 1763-1769

CAREY, F.G. and LAWSON, K.D. (1973) Temperature regulation in free-swimming Bluefin tuna. *Comp. Biochem. Physiol.* **44**A, 375-392

CASSIE, R.M. (1954) Some used of probability paper in the analysis of Size Frequency distribution. *Australian Journal of Marine and Freshwater Research*, **5**, 513-522

CAREY, F.G. and TEAL, J.M. (1969) Regulation of body temperature by the bluefin tuna. *Comp. Biochem. Physiol.* **28**, 205-213

CAREY, F.G., TEAL, J.M., KANWISHER, J.W., LAWSON, K.D. and BECKETT, J.S. (1971) Warm-bodied fish. *Am. Zool.* **11**, 135-143

遠洋水研 (1985) 遠洋性サバ型魚類稚仔の平均的分布, 1956-1981 年. 99 pp

FINK, B.D. (1965) Estimation, from tagging experiments of mortality rates and other parameters respecting yellowfin and skipjack tuna. *Inter-Amer. Trop. Tuna Comm.*, Bull. **10**(1), 3-82

FINK, B.D. and BAYLIFF, W.H. (1970) Migrations of yellowfin and skipjack tuna in the eastern Pacific Ocean as determined by tagging experiments, 1952-1964. *Inter-Amer. Trop. Tuna Comm.*, Bull. **15**(1), 1-227

福島信一 (1953) 釣上直後のカツオの体温に就いて (特に血合筋の異常高温に関して). 東北水研研報 (2), 22-25

福島信一 (1973) サンマ漁況と海況. 海洋学講座, 13, 水産資源論, 96-103

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

HAMADA, A. and IDA, T. (1973) Studies on the specific dynamic action of fishes-I. Various conditions affecting the value of measurement. *Bull. Jap. Soc. Sci. Fish.* **39**, 1232-1235

HARDY, R.N. (1979) Temperature and Animal Life. Edward Arnold, London, 佐々木隆訳 (1980), 温度と動物. 110 pp. 東京, 朝倉書店

HILBORN, R. (1990) Determination of Fish Movement Patterns from Tag Recoveries using Maximum Likelihood Estimators. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **47**, 635-643

HILBORN, R. (1991) Modeling the stability of fish schools: exchange of individual fish between schools of skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*). *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **48**, 1081-1091

HOCHACHKA, P.W. and SOMERO, G.N. (1973) Strategies of Biochemical Adaptation. 藤田道也訳, 環境適応の生化学. 357 pp, 東京, 共立出版

堀田秀之・小川 達 (1955) 海区別カツオの食餌組成について. 東北水研研報 (4), 62-82

飯塚景記・浅野政宏・永沼 章 (1989) 南方カツオ (*Katsuwonus pelamis* LINNAEUS) の食性とカツオ幼魚の出現状況. 東北水研研報(51), 107-116

井尻正二 (1977) 新版科学論(下). 210 pp, 東京, 大月書店

板沢靖男 (1977) 温度. 田村保編, 魚類生理学概論, 63-82, 東京, 恒星社厚生閣, 276 pp

板沢靖男 (1988) 遊泳の生理と生態, 上野輝彌・沖山宗雄編, 現代の魚類学, 181-200, 東京, 朝倉書店, 256 pp

笠原康平 (1977) 北太平洋におけるカツオの分布・回遊. 北大水産北洋研業績集, 特別号, 383-396

笠原康平・八百正和・永沼 章・安楽守哉・浅野政宏 (1971) 標識放流結果から見た日本近海のカツオの移動について (第1報). 東北水研研報 (31), 141-152

川合英夫 (1955a) 東北海域における極前線帯とその変動について, 第1報. 東北水研研報(4), 1-46

川合英夫 (1955b) 東北海域における極前線帯とその変動について, 第2報. 東北水研研報(5), 1-42

川合英夫 (1959) 東北海域における極前線帯とその変動について, 第3報. 東北水研研報(13), 13-59

川合英夫 (1972) 黒潮と親潮の海況学. 増沢譲太郎編, 海洋科学基礎講座 2, 海洋物理 II, 129-321. 東京, 東海大学出版会, 328 pp.

KAWAI, H. (1972) Hydrography of the Kuroshio Extension. Ed. by Stommel, H. and Yoshida, K. *Kuroshio its physical aspects*, 235-352. Tokyo, University of Tokyo Press, 517 pp

川合英夫・坂本久雄 (1970) 黒潮表層水の収束発散に関する研究 II, 表層混合層の上部と下部における海面における収束発散の実測. 南西水研研報 (2), 19-38

川合英夫・坂本久雄・百田方子 (1969) 黒潮表層水の収束発散に関する研究 I, 海面における収束発散の実測とその解釈. 南西水研研報 (1), 1-14

川合英夫・佐々木実 (1962) カツオが黒潮前線を越えて北上回遊をする際の促進的な水理条件について. 東北水研研報 (20), 1-27

KAWAI. H and SAITOH, S. (1986) Secondary fronts, warm tongues and warm streamers of the Kuroshio Extension system. *Deep-Sea Reseach*, **33**(11/12), 1487-1507

川崎 健 (1952) 東北海区に来遊するカツオのポピュレーションに就いて. 東北水研研報(1), 1-14

川崎 健 (1955) 伊豆・小笠原および東北海区におけるカツオの移動および成長について. 東北水研研報 (4), 101-119

川崎 健 (1964) 北太平洋およびその周辺水域におけるカツオのポピュレーション構造と資源変動について. 東北水研研報 (24), 28-47

川崎 健 (1965) カツオの生態と資源, I. 水産研究叢書, 8(2), 108 pp, 東京, 日本水産資源保護協会

川崎 健 (1963) 東北海区におけるカツオ竿釣漁業およびマグロ旋網漁業の海況予想, とくに海況との関連において. 漁業資源研究会議報告(1), 5-13

川崎 健・永沼 章 (1959) 日本近海のカツオ竿釣漁業における漁況の変動について. 第3報. 東北水

研研報 (13), 79-94
北野清光 (1953) 東北海区金華山沖におけるカツオ主漁場の成立について. 東北水研研報 (2), 1-10
小坂 淳 (1980) 親潮前線とその周辺の海洋の微細構造とサンマの北上期の分布との関連について. ミチューリン生物学研究, **16**(1/2), 178-188
KOSAKA, S. (1986) Relation of the migration of Pacific sauries to oceanic fronts in the northwest Pacific ocean. *I.N.P.F.C. Bull*, **47**, 229-246
黒木敏郎 (1967) 魚と水温刺激. 日水誌, **33**(3), 264-274
黒木敏郎 (1970) 水温. 川本信之編, 魚類生理, 279-290, 東京, 恒星社厚生閣
北原多作 (1913) 漁業基本調査報告第3冊, 水産局.
北原多作 (1918) 海洋調査と魚族の回遊. 水産講習所.
北原多作 (1921) 漁村夜話. 306 pp, 大日本水産会
KLEIBER, P., ARGUE, A.W. and KEARNEY, R.E. (1983) Assessment of skipjack (*Katsuwonus pelamis*) resources in the central and western Pacific by estimating standing stock and components population turnover from tagging data. South Pac. Comm., *Tuna and Billfish Assess. Prog.*, Tech. Rep. **8**, 38 pp
KLEIBER, P., ARGUE, A.W. and KEARNEY, R.E. (1987) Assessment of Pacific skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*) resources by estimating standing stock and components of population turnover from tagging data. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **44**(6), 1122-1134
LEBEDEV, N.V. (1967) Elementary population of fish. Israel Program for Scientific Translation, 1969, Jersalem, 224 pp
MACHIDA, Y. (1981) Studies of specific dynamic action on some freshwater fishes. *Rep. Usa Mar. Biol. Inst. Kouchi Univ.* **3**, 1-50
MAGNUSON, J.J. (1973) Comparative study of adaptations for continuous swiming and hydrostatic equilibrium of scombroid and xiphoid fishes. *Fish. Bull.* **71**, 337-356
松宮義晴・田中昌一 (1974) 体長組成解析によるサンマのいわゆる大型・中型等の検討. 東北水研研報 (**33**), 1-18
松宮義晴・田中昌一 (1974) 東北・北海道海区の表面水温分布の数量化とサンマ漁場との結びつき. 水産海洋研究会報, **29**, 30-40
三島清吉 (1979) 極前線付近におけるサケ, マスの分布特性. 水産海洋研究会報, **35**, 56-60
三島清吉 (1981) 夏期亜熱帯生物の亜寒帯海洋前線の乗り越えについて. 北大水産北洋研業績集, 特別号, 61-71
森 訓由・吉田 彰・二平 章・小沼伊佐男 (1994) 伊豆および東北近海域に来遊するカツオの生殖腺熟度指数の変化. 平成6年カツオ資源会議報告, 140-146
森慶一郎 (1972) まぐろ延縄により漁獲されたマグロ・カジキ類の胃内容物として出現する数種のサバ型魚類の幼稚魚の地理的分布と相対的密度, I, カツオ. 遠洋水研研報 (6), 111-157
村上眞裕美 (1993) 東北海区近海における黒潮続流流軸を指標とする100 m深水温について. 海の研究, **2**(5), 343-349
MURRAY, R.W. (1971) Temperature receptors. Ed. by W.S. Hoar and D.J. Randall, Fish Physiology, **5**, 121-133
中川晃子・白木原国雄・永沼 璋・浅野政宏 (1990) 標識放流データによる日本近海のカツオの移動率推定. 平成2年度日本水産学会秋季大会講演要旨集, 20
中井甚二郎 (1939) 朝鮮マイワシ資源の将来を予測するための二, 三の資料. 水産研究誌, **34**(4), 114-130
永沼 璋 (1979) 西部太平洋におけるカツオの産卵活動について. 東北水研研報 (40), 1～13
中村保昭 (1979) サンマ漁場形成に関する研究, 東北海区北部の温度前線の時空間的変動とサンマ漁場の分布移動. 静岡水試研報 (13), 1-20
日本食品工業学会食品分析法編集委員会編 (1982) 食品分析法, 929 pp, 東京, 光琳
Никольский, Г.В. (1963) Экология рыб. Высшдя школд. 亀井健三訳, 1965, 魚類生態学, 315 pp, 米子, たたら書房
二平 章・小沼伊佐男 (1981) 東北海域におけるカツオの生態研究 I, 成長過程の異なるいくつかの群について. 茨城水試創立80周年記念誌, 34-45
二平 章・浅野政宏 (1990a) 日本近海に来遊するカツオの資源生態学的研究 XI, 標識放流結果による北方域分布魚の南下移動. 平成2年度日本水産学会秋季大会講演要旨集, 20
二平 章・浅野政宏 (1990b) 日本近海に来遊するカツオの資源生態学的研究 XII, 標識放流結果による南方域分布魚の北上移動. 平成2年度日本水産学会秋季大会講演要旨集, 21
丹羽 誠 (1969) 南方カツオの産卵調査について (I). 昭和42年度三重県浜島水試事業報告, 23-37
丹羽 誠 (1970) 南方カツオの産卵調査について (II). 昭和43年度三重県浜島水試事業報告, 84-

111
丹羽 誠 (1971) 南方カツオの産卵調査について (III). 昭和44年度三重県浜島水試事業報告, 161-140
丹羽 誠 (1972) 南方カツオの産卵調査について (IV). 昭和45年度三重県浜島水試年報, 1-30
丹羽 誠 (1973) 南方カツオの産卵調査について (V). 昭和46年度三重県浜島水試年報, 2-19
小川嘉彦・中原民男 (1978) 浮魚類の要素個体群の構造とその漁業生物学的意義. 水産海洋研究会報, **33**, 15-24
小達和子 (1986) 東北海区の混合水域. 海洋科学, **12** (9), 634-645
小達和子 (1991) 三陸・常磐沿岸のツノナシオキアミとその漁業. 水産研究叢書(40), 97 pp, 東京, 日本水産資源保護協会
RODEN, G.I. (1972) Temperature and salinity fronts at the boundaries of the subarctic-subtropical transition zone in the western Pacific. *J. Geophys. Res.* (77), 7175-7187
SAKURAMOTO K., NIHIRA, A. and OHNISHI, S. (1995) Factors of Fluctuations of Skipjack Tuna in the North-Eastern Waters of Japan and its Forecasting. *Fisheries Science*, **61**(6), 921-925
SHUL'MAN, G.E. (1972) Life Cycle of Fish. *Physiology and Biochemistry*, 254 pp, New York Toront, John Wiley & Sons
静岡水試 (1977) 昭和51年度事業報告, 81-82
静岡水試 (1978) 昭和52年度事業報告, 95-97
静岡水試 (1979) 昭和53年度事業報告, 124-125
静岡水試 (1980) 昭和54年度事業報告, 107-109
静岡水試 (1986) 昭和60年度事業報告, 88-91
静岡水試 (1987) 昭和61年度事業報告, 103-106
静岡水試 (1993) 平成4年度カツオ調査報告書. 79 pp
SOEVENS, E.D. and FRY, F.E.J. (1971) Brain and muscle temperatures in ocean caught and captive skipjack tuna. *Comp. Biochem. Physiol.* **38**A, 203-211
STEVENS E.D., LAM, H.M. and KENDALL, J. (1974) Vascular anatomy of the counter-current heat exchanger of skipjack tuna. *J. Exp. Biol.* **61**, 145-153
SUZUKI, N. (1970) Metabolic rate of cruciancarp in relation to the specific dynamic action. *Mem. Fac. Edu. Shiga Univ. Natural Sci.* **20**, 66-72.
杉本隆成・村野正昭・黒田隆哉 (1988) 潮境のドラマを描く. 水産海洋研究会編, 21世紀の漁業と水産海洋研究, 262-265, 東京, 恒星社厚生閣
SUGIMOTO T. and TAMEISHI, H. (1992) Warm-core rings, streamers and their role on the fishing ground around Japan. *Deep-Sea Reserch*, **39**, s183-s201
土屋靖彦・広田 望 (1953) 鰹の加工化学的研究, I, 原料鰹の体脂肪分布についての予報. 日本水産学会東北支部会報, **4**, 6-8
辻田時美 (1979) 日本周辺海洋の魚群回遊モデル. 海洋科学, (11), 63-71
為石日出生・樽村裕一・四之宮博 (1994a) 北上期におけるマイワシの三陸まき網漁場に関する知見. 日水誌, **60**(1), 39-44
為石日出生・樽村裕一・四之宮博 (1994b) 北上期における三陸海域でのマイワシ群の回遊に果たす暖水ストリーマの役割. 日水誌, **60**(1), 45-50
為石日出生・杉本隆成 (1994) 東北海域におけるマイワシの北上回遊と接岸に果たす暖水渦と暖水ストリーマの役割, 航空機調査から. 水産海洋研究, **58** (2), 77-90
田中昌一 (1985) 水産資源学総論. 381 pp, 東京, 恒星社厚生閣
田中 有 (1980) 南方かつお漁場の漁獲物と漁況変動. 水産世界, **29**(3), 58-63
鷲田義成 (1992) カタクチイワシの成熟・産卵と再生産力の調節に関する研究. 水工研研報 (13), 129-168
堤 裕昭・田中雅生 (1988) 体長頻度分布データからの世代解析. 東海区水研数理統計部編, パソコンによる資源解析プログラム集, 189-207
TAYLOR, B.J.R. (1962) The analysis of polymodal frequency distribution. *J. Anim. Ecol.* **34**, 445-452
東北水研 (1957) 昭和27年度東北海区水研海洋資源年報, 第2部カツオ資源篇. 133 pp
東北水研 (1993) 平成4年度カツオ標識放流調査結果報告書. 70 pp
東北水研 (1994) 平成5年度カツオ標識放流調査結果報告書. 77 pp
内田清一郎・菅原 浩 (1977) 適応の生物学. 講談社, 東京, 186 pp
宇田道隆 (1936) 東北海区の鰹漁場中心と潮境の関係. 日水誌, **4**, 385-390
宇田道隆 (1941) カツヲとサンマの魚体温と形状に関する測定. 日水誌, **9**(6), 231-236
宇田道隆 (1960) 海洋漁場学. 水産学全集16, 247 pp, 東京, 恒星社厚生閣
UDA, M. and ISHINO, M. (1958) Enrichment pat-

tern resulting from eddy systems in relation to fishing grounds. *Jour. Tokyo Univ. Fish.* **44**, 105-129

渡辺信雄 (1942) カツヲの魚体密度，体温及び遊泳速度に関する一測定．日水誌，**11**(4), 146-148

WILLIAMS, F. (1972) Consideration of three proposed models of the migration of young skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*) into the eastern Pacific Ocean. *Fish Bull.* **70**, 741-762

八百正和 (1955) 日本近海のカツオの卵巣について．東北水研研報 (5), 43-52

山岸 宏 (1977) 成長の生物学．196 pp，東京，講談社

山中一郎 (1950) 東北海区カツオ魚体組成について．日本海洋学会誌，**5**(2/4), 99-104

安井 港・森訓由 (1985) 標識放流結果からみた日本近海へのカツオ (*Katsuwonus pelamis*) の来遊経路．静岡水試研報 (20), 1-8

座間宏一 (1976) 脂質，白身の魚と赤身の魚，肉の特性，水産学シリーズ 13, 53-67，東京，恒星社厚生閣

(1996 年 1 月 19 日受理)

Address: NIHIRA, Ibaraki Prefectural Fisheries Experimental Station, 3551-1, Mitsuzuka, Hiraiso, Hitachinaka, Ibaraki 311-12, Japan (茨城県水産試験場)