

活動トピックス | ANNUAL TOPICS

DEPARTMENT		海洋物理学部門 Department of Physical Oceanography	59
		海洋化学部門 Department of Chemical Oceanography	60
		海洋底科学部門 Department of Ocean Floor Geoscience	61
		海洋生態系動態部門 Department of Marine Ecosystems Dynamics	62
		海洋生命科学部門 Department of Marine Bioscience	63
		海洋生物資源部門 Department of Living Marine Resources	64
CENTER		国際沿岸海洋研究センター International Coastal Research Center	65
		海洋科学国際共同研究センター Center for International Cooperation	66
		先端海洋システム研究センター Center for Advanced Marine Research	67
LINKAGE		海洋連携分野<生物圏環境学> Marine Research Linkage <Biosphere Environment>	68

Volume Transport of Deep Circulation Current in Wake Island Passage

ウェーク島水路を通過する深層循環流の流量

Masaki Kawabe, Daigo Yanagimoto, Shoji Kitagawa, Yoshifumi Kuroda: Variations of the Deep Western Boundary Current in Wake Island Passage. *Deep-Sea Research I*, 52, 1121-1137, 2005.

深層海流の流量を測る

低温で塩分や酸素に富む海水を世界の深層海洋に供給している深層循環は、海の温暖化や酸欠化を防ぎ、世界の海洋を新鮮に保つ働きをしている。また、熱や温室効果気体を輸送することで、現在の気候の形成に大きく寄与している。こうした深層循環の実態と役割を明らかにするために最も重要な情報が流量である。しかし、流れの測定は容易でない。時間変化する流れの平均的な流量を求めるには、深層流が流れていて測定に適した場所を見つけ、係留流速計による大掛かりな直接測流を長期間実施することが必要である。この困難さのため、深層循環の平均流量の評価は世界でも例が少ない。

ウェーク島水路での測流

太平洋を北上する深層循環流は、海底地形の影響で二本に分かれて北太平洋に流入し、東側分枝流がウェーク島水路を通過する (Fig.1)。私たちは、1999年2月にウェーク島水路内の18°20'N、168°30'Eと169°30'Eに5台の流速計を付けた係留系を2系設置し、翌年2月に回収して1年間の測流に成功した。測定された東側分枝流の流速とその変動は、5000m以深で大きく4000m深で激減し、“4500m以深の深層循環流は東側分枝流となり、4500m以浅の大部分は西側分枝流を形成する”という水塊分析からの結論を裏づけた。海山の影響の少ない東側の測点では、海底付近で特に流速が大きく、平均で3.5cm s⁻¹であった (Fig.2)。

深層循環の流量

ウェーク島水路を通過する深層循環流の流量は、北向きを正として-5.3~14.8Sv (1Sv = 10⁶ m³ s⁻¹) の範囲で変化し、4か月弱の周期で変動していた (Fig.3)。意外なことに、たまには逆向きに流れている。平均流量は3.6Sv、この値の時間変動による誤差は1.3Svであった。一部はウェーク島より西方の小さな水路も通過するので、深層循環東側分枝流の流量は4Sv程度であると結論した。西側分枝流を含む全体では、7~8Svの深層循環流が北西太平洋海盆を北上していると考えられる。

Observations of volume transport of deep currents

Deep ocean circulation supplies cold, saline, and oxygen-rich water into a deep layer, and contributes to formation of climate. Volume transport must be known to examine the roles of deep circulation. For its estimate, we have to find a suitable place for measurement and conduct long-time observations with moored current meters. Due to this difficulty, few estimates have been made.

Velocity measurement in Wake Island Passage

The deep circulation enters the North Pacific forming two branches, and the eastern branch current passes Wake Island Passage (WIP). Then we deployed two moorings at 168°30'E and 169°30'E on 18°20'N in WIP in February 1999 and recovered them one year later. The velocity and its variation are large at depths greater than 5000 m and decrease markedly at 4000 m. The current at 169°30'E is particularly strong at near-bottom and reaches 3.5 cm s⁻¹ on average.

Volume transport of deep circulation

We clarified that volume transport of deep circulation through WIP changes in -5.3~14.8 Sv (1Sv = 10⁶ m³ s⁻¹, positive is northward) with periods of four months. The averaged transport is 3.6 Sv with an error of 1.3 Sv due to the variations. By adding the flow west of WIP, volume transport of the eastern branch current was concluded to be 4 Sv. The deep circulation of 7~8 Sv in total may proceed northward in the Northwest Pacific Basin.

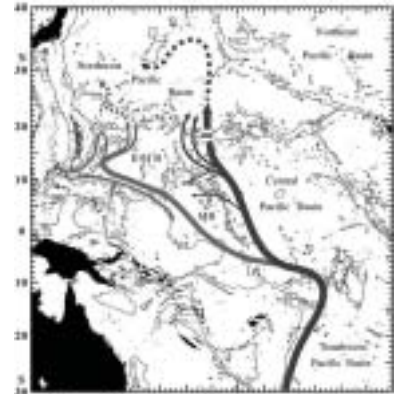


Fig.1 太平洋を北上する深層循環流。東側分枝流(黒色)の通過するウェーク島水路にXで示す2点が係留測流点。細線は4000m等深線を示す
Deep circulation currents flowing northward in the Pacific. Mooring stations are shown by two crosses in WIP where the eastern branch current (black arrows) passes. Thin curves show isobaths of 4000 m

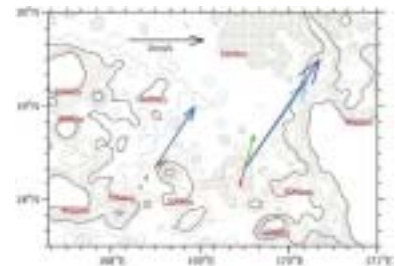


Fig.2 ウェーク島水路での深層循環流の平均流速ベクトル
Mean current velocity vectors of the deep circulation current in WIP

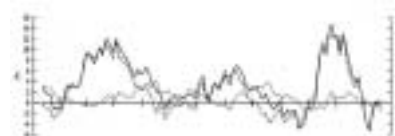


Fig.3 ウェーク島水路での深層循環流の流量。太線、細線、太破線は、それぞれ全体、西半分、東半分の流量を示す
Volume transport of the deep circulation current in WIP. Thick, thin, and thick broken lines show total, western half, and eastern half transports, respectively

Translocation and conservation of organic nitrogen within the coral-zooxanthella symbiotic system of *Acropora pulchra*, as demonstrated by dual isotope-labeling 安定同位体二重標識法を用いたサンゴ-褐虫藻共生系による有機窒素代謝の解明

Yasuaki Tanaka, Toshihiro Miyajima, Isao Koike, Takeshi Hayashibara, Hiroshi Ogawa: Translocation and conservation of organic nitrogen within the coral-zooxanthella symbiotic system of *Acropora pulchra*, as demonstrated by dual isotope-labeling technique. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 336, 110-119, 2006

サンゴ礁は光合成や石灰化といった生物反応が極めて活発に行われている海域である。サンゴ礁に生息する生物の中でも、造礁サンゴ群体はその内部に多数の藻類（褐虫藻）を共生させることによって、光合成と石灰化の両反応を行い、サンゴ礁生態系の物質循環に大きく寄与している。しかしながら、サンゴと褐虫藻の関係は、細胞内共生という複雑さゆえ未知なる部分が多く、両者の間でどのような物質のやり取りがなされているのかを中心に現在研究が進められている。本研究では、 ^{13}C ・ ^{15}N 二重標識法という当分野ではこれまで適用例のない手法を用いることで、サンゴと褐虫藻がサンゴ礁という貧栄養海域の中でどのように窒素を獲得、利用しているのか、炭素循環とのつながりと合わせて明らかにすることを試みた。

実験はまず、同位体トレーサーとして $\text{NaH}^{13}\text{CO}_3$ 、 K^{15}NO_3 を添加した水槽内の海水中で造礁サンゴ *Acropora pulchra*（オトメドリイシ）を一日培養し、その後通常の海水に戻してさらに二週間培養した。培養中、定期的にサンゴ片を取り出し、サンゴと褐虫藻を分離した後、それぞれの ^{13}C ・ ^{15}N 同位体比を測定した。その結果、硝酸取り込み中のサンゴ群体内では、C:N比が約23の有機物が作り出されていることが分かり（Fig.1）、硝酸取込速度の濃度依存性を考慮すると、実際のサンゴ礁海水中においてはその約3倍（C:N > 90）の割合で炭素と窒素を海水中から取り込んでいることが示唆された。また、サンゴ群体内で新しく作られた有機物は、その後の代謝過程でC:N比を徐々に低下させ、炭素よりも窒素をより長い期間体内に保持しようとする特徴を示している。窒素同位体比に着目してみると、褐虫藻については培養に伴い大きく減少する一方で、サンゴでは若干増加し、共生系全体としては二週間ほとんど変化が見られなかった（Fig.2）。これは、褐虫藻によって硝酸から合成されたアミノ酸などの有機窒素がサンゴへ移行するとともに、サンゴが排出した同位体比の軽いアンモニウム態窒素が褐虫藻によって再度取り込まれ、いわば窒素が迅速にリサイクルされることによって、全体としてはその損失が抑えられていることを示唆している。このように、サンゴ群体においては動物と植物がうまく共生することで、貧栄養な海水に適応してきたものと推察される。

Carbon (C) and nitrogen (N) metabolism of the hermatypic coral *Acropora pulchra* and its symbiotic algae (zooxanthellae) was investigated using ^{13}C and ^{15}N isotope tracers. *A. pulchra* was incubated in seawater containing ^{13}C -labeled bicarbonate and ^{15}N -labeled nitrate (NO_3^-) for 24 h (pulse period), and subsequently ^{13}C and ^{15}N isotopic ratios of the host coral and the zooxanthellae were followed in ^{13}C - and ^{15}N -free seawater for 2 weeks (chase period). Under our experimental condition of NO_3^- ($12 \mu\text{M}$), C and N were absorbed by the coral-algal symbiotic system with the C:N ratio of 23 during the pulse period. Taking account of concentration dependence of NO_3^- uptake rates determined by a separate experiment, C:N uptake ratios under supposed in situ NO_3^- conditions ($<1.0 \mu\text{M}$) would be >3.0 times higher, if the photosynthetic rate did not change. During the chase period, atom % excess (APE) ^{15}N of the zooxanthellae constantly declined, while that of the host slightly increased. Consequently, APE ^{15}N of the both fractions appeared to approach a common steady state value, suggesting that ^{15}N was recycled within the coral-algal symbiotic system. C:N ratios of organic matter newly synthesized with NO_3^- exponentially declined and converged into ca. 5. This suggests that organic compounds of high C:N ratios such as lipids and carbohydrates were selectively consumed more rapidly than those of low C:N ratios such as proteins and nucleic acids.

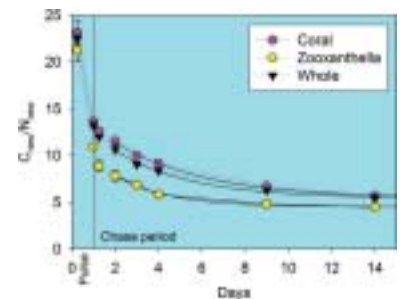


Fig.1 サンゴ・褐虫藻内のラベル有機物（硝酸とともに新しく作られた有機物）のC:N比の変化
Changes in C:N ratios of newly synthesized organic matter in the coral and zooxanthella

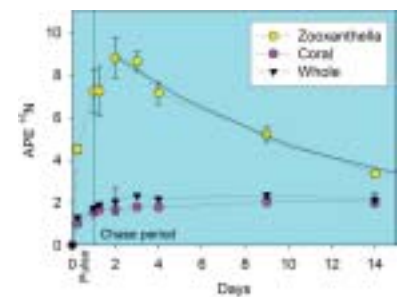


Fig.2 サンゴ・褐虫藻内の窒素安定同位体比の変化

Atom % excess (APE) ^{15}N in the coral and zooxanthella during the incubation



Fig.3 培養に使用した造礁サンゴ群体（石垣、白保サンゴ礁）

Coral colonies used for the experiment (Ishigaki, Shiraho Reef)

Characterization of seismogenic out-of-sequence thrust in the Nankai Trough

南海トラフにおける地震性分岐断層の特性の解明

T. Tsuji, G. Kimura, S. Okamoto, F. Kono, H. Mochinaga, T. Saeki, and H. Tokuyama: Modern and ancient seismogenic out-of-sequence thrusts in the Nankai accretionary prism: Comparison of laboratory-derived physical properties and seismic reflection data, *Geophys. Res. Letts.*, **33**, L18309, doi:10.1029/2006GL027025,

付加体内部に発達する分岐断層の特性は、地震のメカニズムや付加体の構造変形に直接的に影響する。そのため分岐断層の特性を推定することは、地質学的に重要な課題となっている。統合国際深海掘削計画 (IODP) では、地球深部探査船「ちきゅう」による分岐断層の掘削が予定されている。しかし現段階では深部の分岐断層に対して掘削が行われていないため、その特性は反射法地震探査といった物理探査によって推定されてきた。熊野沖 (Fig.1) で取得された反射法地震探査断面図では、分岐断層が強振幅の反射面として明瞭に同定できる (Fig.2)。この分岐断層は1944年の南海地震の際に滑りを生じ、津波を引き起こしたと考えられている。しかし、この深部分岐断層の特徴を反射法地震探査としたりリモートセンシングデータだけから解明することは難しいのが現状である。そこで過去の分岐断層とされる延岡衝上断層から取得された岩石試料の物性値を測定し (Fig.3)、現在の熊野沖分岐断層の音響特性と比較することで、活動的な分岐断層の特性を推定した。

延岡衝上断層の上盤は、泥質千枚岩から構成されており、顕著な地震波速度異方性が確認された (Fig.3)。特に主断層面の直上では、音波速度が非常に速いことが分かった (Fig.3)。これはクラックが石英によって充填され、開口クラックが減少したことを反映していると考えられる。一方、下盤側は変形が顕著で、上盤よりも音波速度が遅く速度異方性も小さいことが分かった。さらに延岡衝上断層の物性値から計算された理論的な Amplitude Variation with Offset (AVO) と、反射法地震探査データから得られる活動的な分岐断層の AVO との比較から、活動的な分岐断層の下盤側は高間隙水圧状態であることが示唆された。



Fig.1 延岡衝上断層と熊野沖反射法地震探査データの位置

Locations of the Nobeoka OOST and the seismic line off Kumano



Fig.2 熊野沖反射断面図上で確認される地震性分岐断層

Out-of-sequence thrust on seismic reflection profile off Kumano

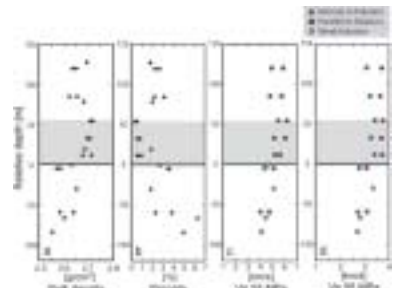


Fig.3 延岡断層周辺の (a) 密度、(b) 間隙率、(c) 封圧55MPa下でのP波速度、(d) 封圧55MPa下でのS波速度。縦軸は断層コアからの距離。速度プロファイル上で、青色、赤色、黄色の点は、それぞれ縮状構造に直行する方向の速度、平行する方向の速度、縮状構造が発達していないサンプルの速度を表している

At convergent plate margins, characteristics of out-of-sequence thrusts (OOSTs) are important for understanding the nature of earthquake mechanisms and deformation of the accretionary prism. To understand the OOST characteristics, Integrated Ocean Drilling Program (IODP) plans to drill through the seismogenic OOST in the Nankai Trough via the D/V “Chikyu”. In this phase, however, the seismogenic OOST is too deep to penetrate with riserless drilling, so its properties have only been estimated from seismic data. Seismic reflection data from the Nankai Trough off Kumano (Fig.1) image a strong-amplitude OOST reflection (Fig.2). This OOST might have ruptured during the 1944 Tonankai earthquake and associated tsunami. However, full OOST characterization solely using seismic reflection data is not possible. To investigate characteristics of a seismogenic OOST, therefore, we determined acoustic properties of discrete samples from the fossil OOST outcrop in Nobeoka (Fig.3), and compared the acoustic properties with those of an active Kumano OOST.

We observed anisotropy of velocity in the hanging wall of Nobeoka OOST attributed to foliation of pelitic-phyllite (Fig.3). In contrast, the footwall is composed of brittlely deformed, chaotic shales and fine sandstones, and velocities in the footwall are lower than those in the hanging wall. Furthermore, the velocities just above the fault core are high (gray zone in Fig.3), because cracks are filled by quartz and number of the open crack should be small. Amplitude variation with offset (AVO) modeling indicates that fractures filled with overpressured fluid likely account for angle-dependent reflection amplitudes of the active OOST in the Nankai Trough.

Historical dispersal of *Calyptogena* clams in the northwestern Pacific

シロウリガイは南を目指す？

Kojima, S., E. Tsuchida, H. Numanami, K. Fujikura and T. Okutani: Synonymy of *Calyptogena solidissima* with *Calyptogena kawamurai* (Bivalvia: Vesicomidae) and its population structure revealed by nucleotide sequences of mitochondrial DNA. *Zoological Science* **23**, 835-842, 2006

シロウリガイ類は、深海の化学合成生物群集を代表する大型二枚貝のグループである。日本周辺には、特に多くの種が生息している事が知られており、記載されている種だけで13種を数え、さらに5種の未記載種の存在が提唱されている。シロウリガイ類の大きな特徴は、分布域が比較的狭い水深範囲に限定されている事で、水深に沿った住み分けが、新たな種の誕生と共存を可能にしたものと推察される。北西太平洋のシロウリガイ類のいくつかの種が、南太平洋やインド洋の同程度の水深の還元環境に分散、新たな種に分化した事が分子系統解析により示されている。

アケビガイは、炭化水素湧出域の発見以前から稀に漁船のトロール等で採集されていたが、その正確な生息場所や環境は不明であった。故土田英二技官(当時)が入手した、銚子沖で漁船により採集された個体のミトコンドリアDNAの塩基配列を決定したところ、南海トラフで採集されたエンセイシロウリガイ個体の配列と一致した。さらにその後、駿河湾石花海で、やはり漁船により採集されたアケビガイについても同様の結果が得られ、両者の貝殻形態も酷似する事から、私達はエンセイシロウリガイがアケビガイと同じ種であると考えている。

沖縄トラフの熱水噴出域には、アケビガイ(エンセイシロウリガイ)、シマイシロウリガイ、ナンカイシロウリガイの3種が分布するが、いずれの種も本州沖の炭化水素湧出域にも生息している。さらにアケビガイは、琉球列島を挟んで反対側にある黒島海丘の炭化水素湧出域でも見つかっている。これら3種について各地方集団間の遺伝的特性を比較、解析したところ、沖縄トラフの集団は本州沖の集団から分散した個体の子孫であり、母集団と隔離され、遺伝的分化が進んでいる事が判明した。さらにアケビガイの黒島海丘集団は沖縄トラフ集団とは独立に本州沖集団から派生した事が示された。太平洋プレート沈み込みに伴って、さまざまな水深に還元的な環境が、長期間に渡って安定に維持されてきた事が、北西太平洋におけるシロウリガイ類の高い種多様性を生み出したと考えられる。



Fig.1 駿河湾石花海で採集されたアケビガイ *Calyptogena kawamurai* from Seno-umi Bank, Suruga Bay

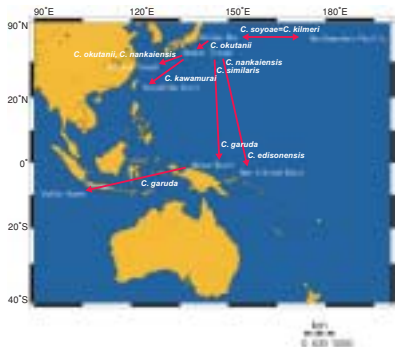


Fig.2 北西太平洋におけるシロウリガイ類の分散過程
Dispersal processes of *Calyptogena* bivalves in the northwestern Pacific

Calyptogena bivalves are one of the primary members of deep-sea chemoautosynthesis-based communities. In Japanese waters, thirteen described and five undescribed species of this genus have been reported. Distribution of each species is restricted to areas within a relatively narrow depth range. Segregation along water depth is supposed to have created and maintained high species diversity of this group. Our molecular phylogenetic analyses showed that some species in the northwestern Pacific have dispersed to the southern Pacific as well as the Indian Ocean and speciated there.

Before the discovery of deep-sea cold seep areas, *C. kawamurai* have been rarely collected in a commercial trawl while its habitats had been undetermined. We determined a nucleotide sequence of mitochondrial DNA for each one specimen from off Choshi and Suruga Bay, respectively, to show that they are identical to those of some specimens of *C. solidissima* which were collected in a cold water seep in the Nankai Trough. Shell morphology is a close resemble between the two. So, we think that *C. solidissima* is a junior synonym of *C. kawamurai*.

From hydrothermal vent fields in the Okinawa Trough, three *Calyptogena* species, namely, *C. kawamurai*, *C. okutanii* and *C. nankaiensis* have been discovered. All of them also inhabit seep areas off Honshu. Additional population of *C. kawamurai* was discovered in a seep area on the Kuroshima Knoll, off the Yayama Islands. We compared the genetic population structure among them, which showed that populations of the Okinawa Trough have been derived from those off Honshu and populations of the two areas were isolated and genetically deviated. A population of *C. kawamurai* of the Kuroshima Knoll was also shown to have derived from the off Honshu area independently. High species diversity of Japanese *Calyptogena* bivalves might be attributed to long-term stability of reducing environments at various depths in the seduction zone in the northwestern Pacific.

Spawning of eels near a seamount

ウナギの産卵場は海山

Katsumi Tsukamoto: Spawning of eels near a seamount. Nature 439, 929, 2006

海洋研究所のウナギ産卵場調査

ウナギの生態の中で、もっとも大きな謎は産卵場の問題である。東京大学海洋研究所は1973年に研究船白鳳丸を使ってニホンウナギ (*Anguilla japonica*) の産卵場調査を開始した。1991年には、10mm前後のレプトセファルスを約1000尾採集し、ニホンウナギの産卵場がマリアナ諸島西方海域にあることを明らかにした。それはフィリピン海を東から西に横断する北赤道海流の中にあった (Fig.1)。

しかしこの時には、かなり広い海域を産卵場として推定したに過ぎず、ニホンウナギの産卵現場をピンポイントとして押さえたわけではなかった。そこで、さらに産卵場を絞り込むために、これまでに得られた仔魚の全分布データを解析して、厳密な産卵地点を特定する「海山仮説」を得た。また、耳石日周輪による孵化日組成の解析から、産卵のタイミングを示す「新月仮説」を提唱した。以後10年間に亘り、これら2仮説に基づいて調査を続けてきた。

産卵地点の特定

2005年6月の新月の日、ついにマリアナ沖の海山域で、まだ眼も口も未発達のプレプトセファルス (2日齢) を約400尾採集することに成功した (Fig.2)。これによって上記2つの仮説が証明でき、ウナギの産卵地点をピンポイントで特定することができた。それは西マリアナ海嶺南端付近のスルガ海山であった (Fig.3)。

この成果は、生物の回遊現象に関する基礎生物学・海洋科学上の重要な発見であるばかりでなく、世界的に激減しているウナギ資源の保全対策の立案に大いに寄与する。また、ウナギの産卵地点がわかったことで、親魚の産卵条件、仔魚の発育過程、初期餌料、環境条件に関する様々な情報が得られ、40年来の研究にもかかわらず未だ難航しているウナギの人工種苗生産技術の開発にも貢献する。

Research on the spawning area of the Japanese eel by the Ocean Research Institute

The Ocean Research Institute of the University of Tokyo began a research effort for determining the spawning area of the Japanese eel (*Anguilla japonica*) using the R/V Hakuho Maru in 1973. In 1991, a large collection of about 1,000 Japanese eel leptocephali (8-34mm TL) led to the conclusion that the estimated spawning area was somewhere in the region around 15°N, 140°E in the North Equatorial Current (NEC) of the western North Pacific (Fig.1). To determine a precise location where actual spawning of the Japanese eel occurs, we proposed two hypotheses based on all previous collection data of leptocephali (Seamount Hypothesis) and hatching date analyses of their otolith daily rings (New moon Hypothesis).

Determination of the Japanese eel spawning site

During a Hakuho Maru research cruise in 2005, we collected a total of about 400 preleptocephali (3-6mm TL) of the Japanese eel (Fig.2) near the Suruga Seamount of the West Mariana Ridge around the new moon of June 2005 (Fig.3). Their ages estimated from otolith daily rings suggested that spawning had occurred about 4 days before new moon. These findings strongly supported our Seamount and New moon Hypotheses. Knowledge obtained from these studies may provide important hints and basic information for conservation, stock management and the artificial production of glass eels to supplement the shortage of wild seedlings for aquaculture of eels.

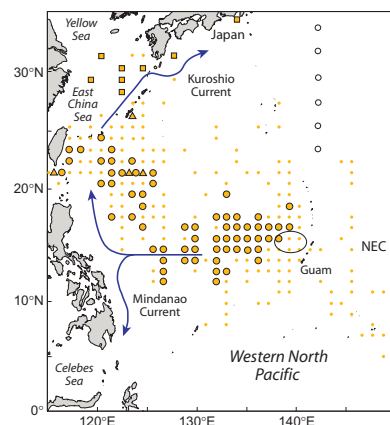


Fig.1 外洋におけるニホンウナギ仔稚魚の分布。2002年までに行われた31回の研究航海で採集された計2,418個体の採集測点を示す。産卵場で孵化したレプトセファルスは北赤道海流で西に運ばれ、やがて黒潮に乗り換えてシラスウナギへと変態した後、東アジアの河口に接岸回遊してくる

Distribution of Japanese eel leptocephali. Collection locations of a total of 2,418 specimens caught during 1956 to 2002 are shown. Larvae are passively transported westward by the North Equatorial Current and then metamorphose in the Kuroshio before recruiting to their growth habitats in East Asia



Fig.2 2005年夏の研究航海で採集されたウナギのプレプトセファルス。a:全長5.0mm (2日齢)。目や口が未発達で大型の油球を持つ。b:全長4.2mm (4日齢)。目や口が発達し油球は小さくなっている

Japanese eel preleptocephali collected during the research cruise in 2005. a:5mm TL (2days old), b:4.2mm TL (4days old)

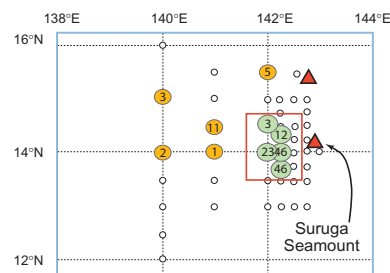


Fig.3 2005年白鳳丸研究航海においてニホンウナギのプレプトセファルスが採集された地点とスルガ海山

Collection locations of the Japanese eel preleptocephali and the location of the Suruga Seamount.

Bi-decadal variability in Northwestern Pacific and climate and 18.6-year period nodal tidal cycle

北西太平洋亜寒帯海域中層水・気候の20年周期変動と潮汐18.6年周期変動

I. I. Yasuda, S. Osafune and H. Tatebe: Possible explanation linking 18.6-year period nodal tidal cycle with bi-decadal variations of ocean and climate in the North Pacific. *Geophysical Research Letters*, 33, L08606, doi:10.1029/2005GL025237, 2006.II. S. Osafune, and I. Yasuda: Bidecadal variability in the intermediate waters of the northwestern subarctic Pacific and the Okhotsk Sea in relation to 18.6-year period nodal tidal cycle. *Journal of Geophysical Research*, 111, C05007, doi:10.1029/2005JC003277, 2006.

北太平洋海域のマイワシ・マグロなどを始めとする海洋生態系は数10年規模の気候・海洋変動と連動していることが知られているが、数10年規模の気候・海洋変動が何故生じるかメカニズムについては現在でも謎である。本研究は、親潮・オホーツク海等西部亜寒帯海域の水塊 (Fig.1) やアリューシャン低気圧の勢力を代表する気候指標 (NPI やPDO, Fig.2) に現れる約20年周期変動が、月の軌道変化によって生じる潮汐18.6年周期振動と整合的であることを初めて示した。また、千島列島付近の強い1日周期の潮汐流によって引き起こされる潮汐混合が18.6年周期で変動することに起因する北西太平洋亜寒帯中層水の変動メカニズムを提示した。さらに、千島列島付近の潮汐変動に伴い北太平洋西岸に沿った等密度面深度が長周期で変動することにより西岸境界流である黒潮・黒潮続流や赤道のENSOに影響し、気候変動にまで影響を及ぼす可能性を示唆した。本研究は、月の軌道の18.6年周期変動という天文学的に予測可能な現象と、海洋中の潮汐混合という微細スケールの現象を結びつけ、水塊変動・海洋大循環については気候変動にまで影響を与えうる可能性を示し、これまで謎であった約20年周期変動の予測可能性に道を開いた。

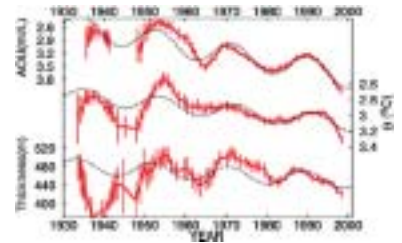


Fig.1 親潮中層水における変動: (上) 密度 $26.8\sigma\theta$ における見かけの酸素消費量 (AOU)、(中) 密度 27.0 における温位、(下) 密度 26.7 - 27.2 の厚み。破線はトレンドと18.6年周期でフィットさせた時系列

Time-series of Oyashio intermediate water properties: (upper) apparent oxygen utilization (AOU) at $26.8\sigma\theta$, (middle) potential temperature at $27.0\sigma\theta$, (lower) thickness between 26.7 and $27.2\sigma\theta$

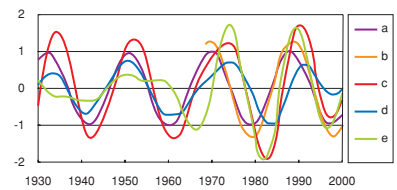


Fig.2 月の軌道変化に伴う18.6年周期変動(a)と、親潮中層酸素消費量(b)、冬季北太平洋指標(c:NPI)、冬季太平洋10年変動指標(d:PDO)、冬季極東モンスーン指標(e:MOI)の12-25年成分の規格化時系列

Normalized time-series of (a) 18.6-year period nodal tidal cycle, (b) AOU in the Oyashio and 12-25-year bandpass components of (c) winter North Pacific index, (d) winter Pacific Decadal Oscillation index and (e) winter East-Asian Monsoon index

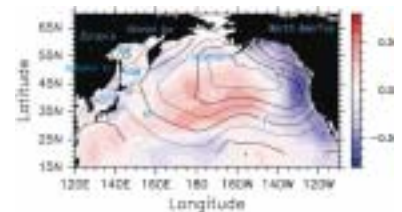


Fig.3 18.6年周期変動に伴う1日周期潮汐が強い期間と弱い期間の表面水温差(色、 $^{\circ}\text{C}$)と海面気圧差(等値線、hPa)

Difference in SST (colour in $^{\circ}\text{C}$) and SLP (contour in hPa) between the strong and weak diurnal tidal periods in the 18.6-year period nodal tidal cycle

North Pacific marine ecosystem including tuna and small pelagic fish as sardine and anchovy are known to be related with inter-decadal ocean-climate variability. However, this time-scale variability and mechanism remains unclear and thus unpredictable. Present studies discovered the relationship between the 18.6-year period nodal tidal cycle caused by lunar orbital variation and the bi-decadal variability of water-masses in the northwestern subarctic Pacific (Fig. 1) and of the North Pacific climate indices as winter NPI (North Pacific Index), PDO (Pacific Decadal Oscillation Index) and MOI (east-Asian Monsoon Index). The mechanism linking between the 18.6-year cycle of diurnal tidal mixing around the Kuril Islands and Northwestern subarctic intermediate water bi-decadal variability is shown. Furthermore, hypothesis linking the tidal mixing cycle around the Kuril Islands and large-scale ocean circulation and climate is proposed: isopycnal depth variations around the Kuril Islands propagates along the north Pacific western boundary and influences on the western boundary currents as the Kuroshio and Kuroshio Extension and the equatorial ENSO variability, eventually on climate through atmospheric tele-connection. These studies are noted to link the predictable astronomical cycle to small-scale ocean mixing and then large-scale ocean water-masses and circulation and climate, and to open the predictability of multi-decadal scale ocean-climate-ecosystem variability.

Stroke frequency, but not swimming speed, is related to body size in free-ranging seabirds, pinnipeds and cetaceans.

遊泳動物の体サイズに応じて決まっていたストローク周波数と体サイズによらず一定であった遊泳速度

K. Sato, Y. Watanuki, A. Takahashi, P. J. O. Miller, H. Tanaka, R. Kawabe, P. J. Ponganis, Y. Handrich, T. Akamatsu, Y. Watanabe, Y. Mitani, D. P. Costa, C.-A. Bost, K. Aoki, M. Amano, P. Trathan, A. Shapiro and Y. Naito. *Proc. Roy. Soc., B* 274, 471-477, 2007

体の大きな動物が四肢をゆったりと動かし、小さな動物は手足をちょこちょこ素早く動かす事は、我々が良く知っている事実である。この傾向は水中を泳ぐ動物についても当てはまる。今から50年以上前に、筋肉生理学者であるA. V. Hillが、「相似形の動物では筋収縮速度は一定となり、1回の動きに要する時間は体の長さ、すなわち体重の1/3乗に比例して長くなる。したがって、動きの頻度は体重の-1/3乗に比例するはずである」と予測した。

広範囲に泳ぎ回る水中動物の遊泳速度や、泳ぎに伴う鰭の動きを野外環境下で測定することは難しく、上記の予測は定量的に検証されることがないまま半世紀が過ぎた。水族館などの飼育動物を用いた実験結果を、物理的な観点から解釈した予測では、遊泳動物にとって最適な遊泳速度は、体重の1/6乗に比例して大きくなり、最適なストローク頻度は体重の-1/6乗に比例するといわれている。

近年、動物搭載型の小型記録装置の開発が進み、動物の遊泳速度とストローク頻度を記録できる加速度記録計を使った野外調査が、様々な動物を対象に進められている。これらの動物は、いずれも息ごらえ潜水によって、深いところにある餌を捕獲して、再び水面に戻ってくる事を繰り返している。すなわち、効率の良い遊泳を行うべき強い動機を持っていると見なすことが出来る。上記の予測を検証するために、野外環境下で各対象動物から測定されたデータを統一した手法で解析した。

体重500gの海鳥から、30tのマッコウクジラまでの25種類の野外データを比較したところ、全ての動物が巡航遊泳中は1-2m/sの速さで泳ぎ、そのストローク頻度は体重の-0.29乗に比例するという結果になった。50年以上前になされた予測の方が正しかったことになる。今回、体重mとストローク頻度fの散布図を両対数グラフに描くことで、きれいな右肩下りの直線関係 ($f = 3.56 m^{-0.29}$, $R^2 = 0.99$, $P < 0.0001$) を得ることが出来たが、一部の動物のストローク頻度がその直線から大きく外れた (Fig.1)。例えば、オサガメのストローク頻度は0.22Hzで、この値は同サイズのウェッデルアザラシの値0.63Hzを大きく下回る。データを得た時期のオサガメに、効率良く泳ぐ動機が無かったためなのか、代謝率が哺乳類鳥類に比べて大きく下回る爬虫類であるせいなのか、今後の課題が残った。今回、魚類としてはヒラメとサケのデータが得られている。ヒラメのストローク頻度は同サイズの鳥に比べて低かったが、サケは同サイズのペンギンとほぼ同じ頻度で鰭を動かしている事がわかった。水中生活に特化した魚類は、その体型も大きな変異に富んでおり、今後データを集めていく事でおもしろい比較行動学が展開できるであろう。

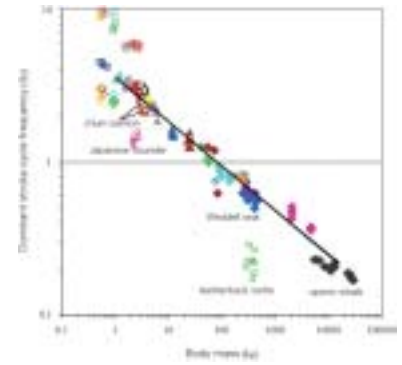


Fig.1 動物の体重とストローク卓越周波数との関係

Relationship between body mass and dominant stroke cycle frequency of each

It is obvious, at least qualitatively, that small animals move their locomotory apparatus faster than large animals: small insects move their wings invisibly fast, while large birds flap their wings slowly. However, quantitative observations have been difficult to obtain from free-ranging swimming animals. We surveyed the swimming behaviour of animals ranging from 0.5kg seabirds to 30,000kg sperm whales using animal-borne accelerometers. Dominant stroke cycle frequencies of swimming specialist seabirds and marine mammals were proportional to mass^{0.29} ($R^2=0.99$, $n=17$ groups), while propulsive swimming speeds of 1-2 m s⁻¹ were independent of body size. This scaling relationship, obtained from breath-hold divers expected to swim optimally to conserve oxygen, does not agree with recent theoretical predictions for optimal swimming. Seabirds that use their wings for both swimming and flying stroked at a lower frequency than other swimming specialists of the same size, suggesting a morphological trade-off with wing size and stroke frequency representing a compromise. In contrast, foot-propelled diving birds such as shags had similar stroke frequencies as other swimming specialists. These results suggest that muscle characteristics may constrain swimming during cruising travel, with convergence among diving specialists in the proportions and contraction rates of propulsive muscles.

Evolution of Genes Involved in Adaptation to Environment

環境適応に関する遺伝子の進化

K. Inoue, T. Sakamoto, S. Yuge, H. Iwatani, S. Yamagami, M. Tsutsumi, H. Hori, M.C. Cerra, B. Tota, N. Suzuki, N. Okamoto and Y. Takei: Structural and functional evolution of three cardiac natriuretic peptides. *Mol. Biol. Evol.*, 22: 2428-2434, 2005.

海洋生物は、多様な海洋の環境に適応するためにさまざまな機能を進化させてきた。我々は、環境適応にかかわる遺伝子およびその機能の進化の過程を詳細に解析することにより、様々な海洋生物がどのように現在の分布域や生態的地位を獲得してきたのかを明らかにしたいと考えている。

ナトリウム利尿ペプチド(NP)ファミリーは脊椎動物の体液調節に重要な役割を果たすホルモンファミリーである。NPファミリーの7つの主要メンバーのうち、心房性NP(ANP)、B型NP(BNP)、心室性NP(VNP)の3つは主に心臓で発現し、血液中を循環する循環型ホルモンである。我々は、ニジマスにおける遺伝的連鎖解析により、これら3つのホルモンの遺伝子が同じ染色体上に並んで存在することを発見した。この結果は、3つの遺伝子が魚類(条鰭類)と四肢動物(肉鰭類)が分岐する前に「縦列重複」と呼ばれる複製様式により生じたことを示唆している。さらに、条鰭類におけるこれら3つのホルモン遺伝子の存在を体系的に探索すると、チョウザメ、ウナギ、ニジマスなどのいわゆる原始的な魚類は3つの遺伝子を全て保持しているのに対し、アユ、ティラピア、フグなどはVNP遺伝子を欠くことがわかった。この結果をミトゲノムに基づく最新の系統樹に対応させると、VNP遺伝子がサケ科魚類の分岐以降に失われたことがわかる(Fig.1)。さらに、メダカにおいてはANP遺伝子も欠失していることがわかった。原始的な魚類は3つの遺伝子をどのように使い分けているのか、また、NP遺伝子の少ない魚種はどのように体液を制御しているのか、今後それぞれの遺伝子の機能を解析することにより明らかにしていきたい。

遺伝子の機能解析を行うためのモデルとして、我々はメダカおよびその近縁種に注目している。ゲノムデータベースが整備されており、外来遺伝子導入などの実験技術が確立されているメダカ(基本的に淡水魚)と、アジア各地に固有の分布域を持つ近縁種、例えば東南アジアの海水域や汽水域に広く分布するジャワメダカ(Fig.2)やインドメダカ(Fig.3)との比較研究を行うことで、遺伝子機能と生態の関係に迫りたい。

Marine organisms have developed various functions to adapt to a variety of environments in the sea. We are trying to understand, through studies on the structural and functional evolution of genes involved in environmental adaptation, how marine organisms have acquired their habitat and ecological status.

The natriuretic peptide (NP) family is a peptide hormone family that plays important roles in body fluid regulation in vertebrates. Among seven major members of the NP family, atrial NP (ANP), B-type NP and ventricular NP (VNP) are hormones expressed mainly in the heart. By genetic linkage analyses, we revealed that the three cardiac NPs were generated by tandem duplications, perhaps before the divergence of tetrapods (lobe-finned fish) and fish (ray-finned fish). We also found, by a systematic survey of NP genes in various ray-finned fishes, that primitive ray-finned fishes such as the sturgeon, eel and trout retain all three cardiac NP genes but the VNP gene is absent in so-called advanced fishes such as ayu, tilapia and pufferfish. By applying these results to the phylogenetic tree based on the mitogenome, it became evident that the loss of the VNP gene occurred after the divergence of salmonids (Fig.1). We also found that the Japanese medaka has lost the ANP gene and only the BNP gene remains. We will examine functional differences of the three NP genes and significance of the loss of some NP genes.

To examine the function of genes involved in environmental adaptation, Japanese medaka and related species are potential models. We expect that comparative studies of Japanese medaka, in which genome databases are available and experimental techniques including transgenesis has been established, and related species, e.g., Javanese medaka and Indian medaka inhabit seawater and brackish water area in Asian coasts, will bring us invaluable information to understand the relationship between the evolution of genes and the ecological status of species.

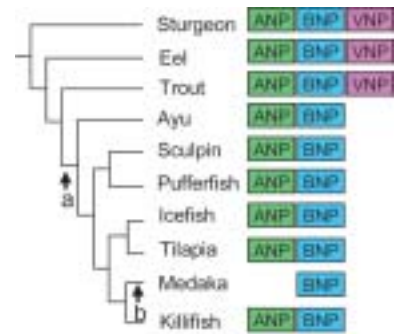


Fig.1 条鰭類におけるANP、BNP、VNP遺伝子の分布。a、bはそれぞれVNP、ANP遺伝子消失のタイミングを示す

Distribution of ANP, BNP and VNP genes in ray-finned fishes. a and b indicate timing of the loss of the VNP and ANP genes, respectively



Fig.2 ジャワメダカ *Oryzias javanicus*。海水への適応力がきわめて高く、東南アジア沿岸の海水域に広く分布するため、アジア沿岸の環境モニタリングのモデル動物となることが期待される
Javanese medaka *Oryzias javanicus*. This species is widely distributed in seawater along the coasts of South-East Asia and expected to be a model for environmental monitoring



Fig.3 インドメダカ *Oryzias dancena*。海水への適応力が高くアジアの汽水域に広く分布する。写真は日本学術振興会拠点大学交流事業「沿岸海洋学」の一環としてマレーシアにて採集された個体群

Indian medaka *Oryzias dancena*, which is widely distributed in brackish water in South-East Asia. Fish in the picture were collected in Malaysia during a project in JSPS Multilateral Core University Program "Coastal Marine Science"

Descent of dense water on a continental slope.

斜面を沈降する密度流に対して地球自転と海底傾斜が及ぼす効果—数値シミュレーションで明らかにされた深層水の形成機構—

Kiyoshi Tanaka: Effects of the Earth's rotation and bottom slope on density current descending a sloping bottom, Journal of Geophysical Research, **111**, C111018, doi:10.1029/2006JC003677, 2006

地球の自転が渦をつくる

海洋表層から深層への沈み込みが生じている北大西洋グリーンランド周辺や南極大陸周辺では、冬季には氷が張るなどの厳しい海洋環境にあるため、観測が困難である。そこで、これらの海域における海水の沈み込みのメカニズムを調べるためには、数値実験による研究が効果的である。海面冷却等によって高密度になった海水が大陸棚斜面を下るとき、傾圧不安定によってそれは複雑な渦流の様子を呈する (Fig.1)。一般に海洋中における高密度水は、斜面を沈降せずに等深線に沿って流れようとする傾向を持つが (斜面下向き重力と上向きのコリオリ力による地衡流平衡)、図に見られる渦はそうした地衡流平衡を壊して、高密度海水を斜面下方に効果的に沈降させる作用を持つ。

地球の自転は渦活動に対して、一見相反する効果を持つ

地球自転率 (= $0.5 \times$ コリオリパラメータ) が増加すると、渦の生成は早まる (Fig.2、有限振幅渦の発生時刻)。これは自転率の増加によって、大陸棚斜面上における等密度面の傾きが急峻化するため (= 傾圧不安定のエネルギー源である有効位置エネルギーが増加するため) である。しかしながら、一度渦が生成されると、渦による高密度海水の沖向き輸送は自転率の増加にともなって減少する (Fig.3)。すなわち、自転率の増加は渦の活動を弱める効果も持つ。これは、自転率の増加にともなって渦の空間スケール (内部変形半径) が減少するためである。

海底傾斜も同様に、相反する効果を持つ

海底傾斜の増加も、地球自転率の増加と同様に (等密度面の急峻化によって)、渦の生成を早める (Fig.2)。しかしながら、一度渦が生成されると、海底傾斜も渦の活動を弱める効果を持つ (Fig.3)。その理由は、海底傾斜によって地形性ベータ効果や水深が増加し、流れが安定化されるためである。

Descent of dense water induced by baroclinic instability

Many observations have shown to date that in some areas of the world ocean (e.g., Denmark Strait and Weddell Sea), dense water descends a continental slope into deep depths. Baroclinic instability can realize effective downslope transport of dense water, breaking down the geostrophic constraint on the continental slope (Fig.1).

The Earth's rotation has two contrary effects on the instability

Growth rate of the baroclinic instability increases with increasing Coriolis parameter (Fig.2), as isopycnal surfaces steepen to increase available potential energy. After the eddy formation, however, offshore eddy transport of dense water decreases with increasing Coriolis parameter, as eddy size becomes smaller.

Bottom slope also has two contrary effects

The growth rate of the instability increases with increasing bottom slope by the same reason as above (Fig.2). On the other hand, the offshore eddy transport decreases with increasing bottom slope (Fig.3), since the bottom slope has stabilizing effects (the topographic beta effect and the effect due to spatial increase in water depth offshore).

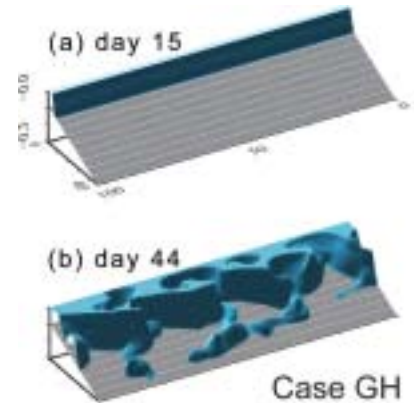


Fig.1 数値実験において現実的な密度 (負の浮力) フラックスを大陸棚斜面上部に課した場合の、等密度面 ($4.0 \times 10^{-2} \text{ kgm}^{-3}$) の時間変化。座標軸の単位は全て km

Distributions of isopycnal surface ($4.0 \times 10^{-2} \text{ kgm}^{-3}$). Density (negative buoyancy) flux is imposed at the coastal boundary on the continental slope. The units of the axes are km

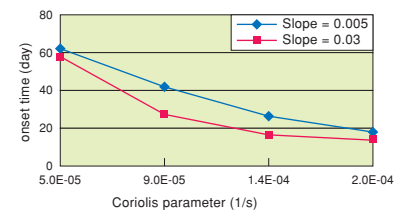


Fig.2 有限振幅渦の発生時刻 (海底傾斜 (正接) とコリオリパラメータを変化させたケーススタディの結果)

Onset time of eddies with finite amplitude. (Experimental result of a case study: changing the bottom slope (tangent) and the Coriolis parameter)

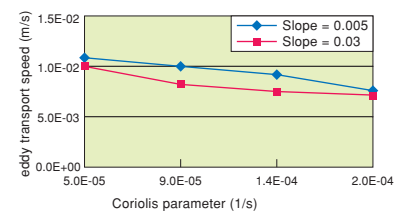


Fig.3 渦による高密度海水の沖向き輸送速度
Offshore transport speed of dense water by the finite amplitude eddies

Thermal adaptation of pacific bluefin tuna, *Thunnus orientalis*, to temperate waters

体温保持機構からみたクロマグロの温帯水域への適応

Takashi Kitagawa, Shingo Kimura, Hideaki Nakata, Harumi Yamada, *Fisheries Science* 72: 149-156, 2006

クロマグロ (Fig.1) はその優れた肉質や経済性により、世界的に重要な漁業資源のひとつとなっている。今後、国際的な資源管理を可能にするために、その科学的根拠として本種の回遊生態を詳細に把握することがこれまで以上に必要になっている。本種が、温帯水域の水温環境にどのように適応しているのかを明らかにするため、本種の温帯水環境下における体温の保持能力の成長に伴う変化について検討した。1995～1998年に対馬沖でデータ記録型標識 (アーカイバルタグ) を腹腔に装着した未成魚を放流した。放流後4年以内に再捕された23個体について、タグに128秒または256秒ごとに記録された水温、体温の時系列変化の解析を行った。

各個体の平均経験水温の範囲は15.0-20.7℃であり、本種の適水温範囲内 (12-22℃) にあった。また、体温と水温との差は成長に伴い大きくなる傾向があったが、温度差の増大する割合は成長に伴い小さくなり、平均体温は30℃をこえることはなかった。熱収支モデルを用いた解析により、クロマグロ腹部の熱交換係数を見積もったところ、成長に伴い係数は減少する傾向を示したことから、腹部の断熱性が増大したことが示唆された (Fig.2)。さらに、同じモデルで見積もった腹腔内の産熱速度も減少する傾向を示すことから (Fig.3)、本種の代謝速度が成長とともに減少することが示唆された。以上を総合すると、本種は成長に伴い体の断熱性は増大するが、その一方で腹腔内の産熱速度も減少するため、体温は致死温度には至らず、体サイズが大きくなっても温帯水域で活動することを可能にしていると推察される (Fig.4)。



Fig.1 クロマグロ
Pacific bluefin tuna, *Thunnus orientalis*

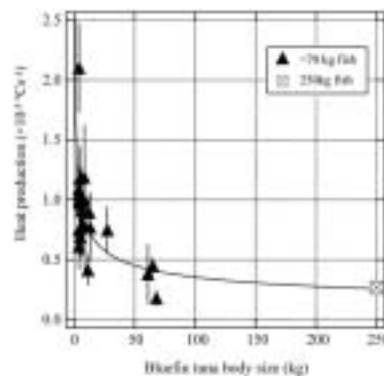


Fig.3 クロマグロ産熱速度の成長に伴う変化
Relationship between bluefin tuna body size and estimated internal heat production

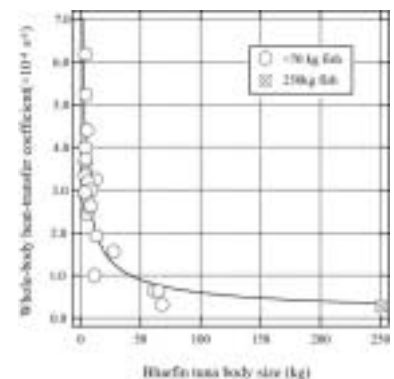


Fig.2 クロマグロの熱交換係数の成長に伴う変化
Relationship between bluefin tuna body size and estimated whole-body heat-transfer coefficient

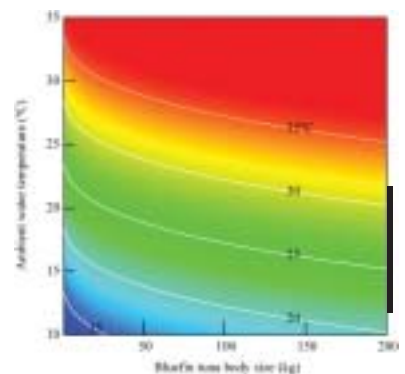


Fig.4 クロマグロ体温の成長に伴う変化。縦線はクロマグロの好適水温帯 (12~22℃) を示す。致死体温は35℃とされる
Relationship between bluefin tuna body size, ambient water, and estimated body temperature. The solid vertical line indicates the favorite temperature range of Pacific bluefin tuna (12~22℃). Temperatures exceeding 35℃ are lethal for tunas.

Immature Pacific bluefin tuna, *Thunnus orientalis* (Fig.1), tagged with archival tags, were released near Tsushima Island in the East China Sea during the winters of 1995 through 1998. Time-series data for ambient and peritoneal cavity temperatures, recorded every 128 or 256 seconds for 23 fish recovered, were analyzed. The objective of this study was to clarify the process of development of thermoconservation ability with growth in relation to adaptive mechanisms to cooler temperate waters. According to our results, mean ambient temperatures ranged from 14.9 to 20.7℃, which is almost within the optimum temperature range according to previous reports. Mean peritoneal temperatures were higher than ambient temperatures (19.7 to 27.3℃) but never reached 35℃, which would induce overheating. Although the mean thermal differences between peritoneal and ambient temperatures increased with body size, the rate of increase decreased with body size. A heat budget model suggests that as the insulation of the body develops (Fig.2), the estimated mean values of internal heat production decrease with body size (Fig.3). This is probably due to the allometric scale effect and explains why the thermal difference does not increase quickly with body size. It is likely that Pacific bluefin tuna inhabit cooler temperate waters in mid-latitude regions to avoid overheating (Fig.4).

