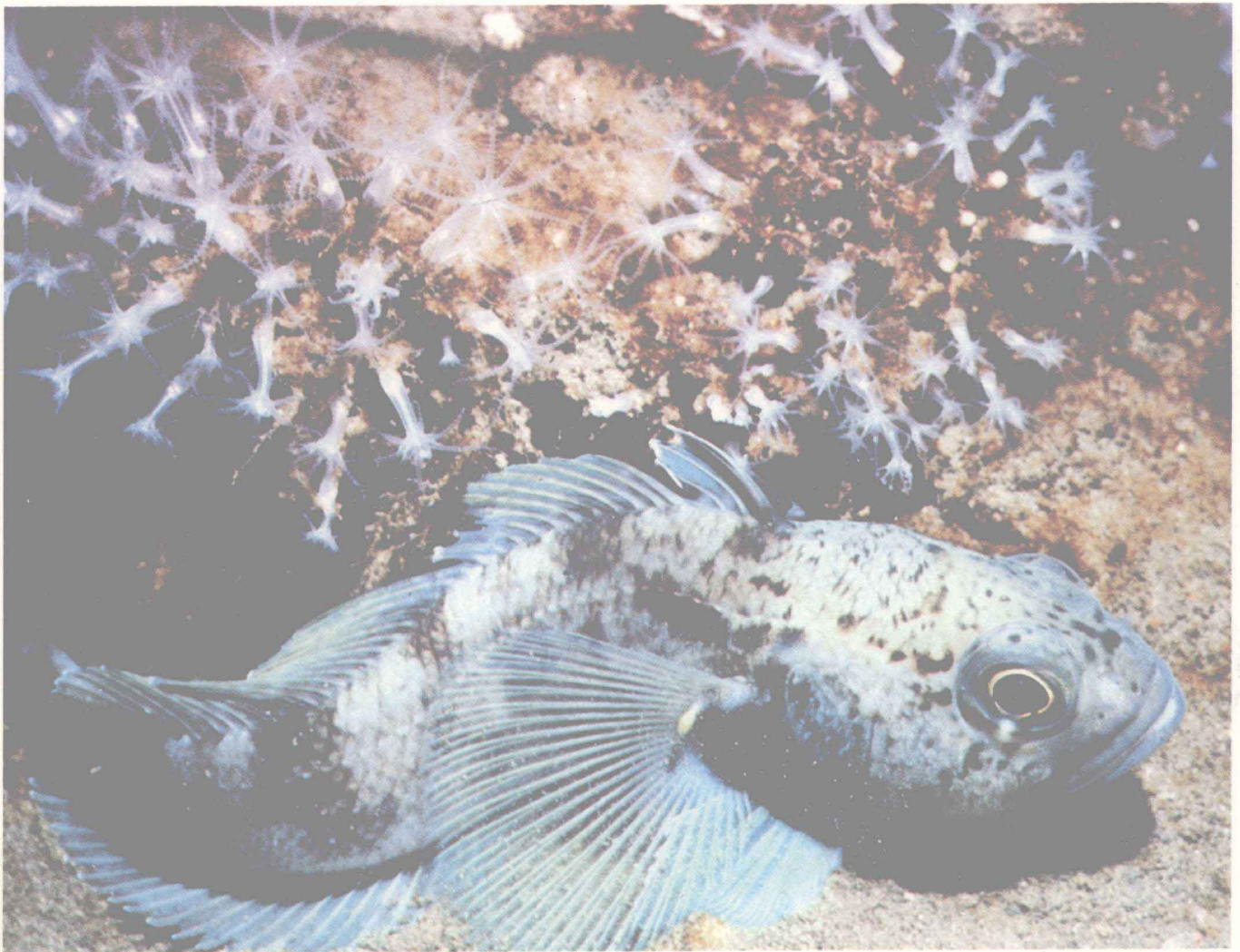


南極海の魚はなぜ凍らない

- 1. 南極海の魚はなぜ凍らない
- 2. バクテリアで光る魚
- 3. 魚はどのように群れを維持するか
- 4. サケの人工飼育
- 5. 托卵するナマズ



LIGHT SCIENCE BOOKS—

南極海の魚はなぜ 凍らない

江苏工业学院图书馆
藏书章

「サイエンス」掲載年月

- | | |
|--------------------|----------|
| 1. 南極海の魚はなぜ凍らない | 1987年1月号 |
| 2. バクテリアで光る魚 | 1977年5月号 |
| 3. 魚はどのように群れを維持するか | 1982年8月号 |
| 4. サケの人工飼育 | 1983年9月号 |
| 5. 托卵するナマズ | 1987年2月号 |

LIGHT SCIENCE BOOKS——⑧

南極海の魚はなぜ凍らない

1989年10月20日 1版1刷

編 者 サイエンス編集部

発行者 樋口 剛

発 行 日経サイエンス社

発 売 日本経済新聞社

〒100-66 東京都千代田区大手町1-9-5

電話03-270-0251 振替東京3-555

ブック・デザイン／杉田龍史

印刷・製本／大日本印刷㈱

©NIKKEI SCIENCE, INC., 1989 ISBN4-532-06468-6

Printed in Japan

本書の一部あるいは全部を無断で複写複製（コピー）することは、法律で認められた場合を除き、著作者および出版社の権利の侵害となりますので、その場合にはあらかじめ当社あて許諾を求めて下さい。

まえがき

■「ライトサイエンス・ブックス」への招待

かわいいクジラをシンボル・マークに、ブック形式の新別冊シリーズ「ライトサイエンス・ブックス」が誕生いたしました。

世界有数の科学雑誌『サイエンティフィック・アメリカン』は1845年の創刊になり、現在、英語版を含め世界10カ国語で発行されています。その日本版である『サイエンス』は今年（1989年）満18周年を迎えました。ここに発表される論文の著者は世界的な業績をあげた研究者に限られ、すでにノーベル賞受賞者の論文も100本をこえております。扱うテーマは自然科学が中心ですが、社会学、考古学、軍事、科学史、さらには政治や経済までと広い分野に及んでいます。

こうした世界的に認められた、すぐれた論文の宝庫の中から、テーマ別に雑誌形式でまとめた別冊サイエンスをこれまでも刊行してきました。しかし、それらはどちらかと言うと、硬い内容の専門分野のテーマに限られておりました。今回、もっとやさしく軟らかい、しかも知的好奇心を十分に満足させる「科学読み物」の新しいシリーズをスタートさせました。豊富な図版と美しい4色刷りのしゃれた“クジラの本”にご期待ください。

■第8巻『南極海の魚はなぜ凍らない』への招待

南極海のように氷に覆われた極限の寒冷環境下では、魚など海洋生物は生存できない、とかつては考えられていた。事実、暖かだった南極海が、現在のような氷の海となりはじめた時、そこにすんでいた多くの魚は死滅した。それは、ほとんどの熱帯産および温帯産の魚類は、体液の温度が約 -0.8°C になると凍ってしまうからである。

ところが、驚くべきことに、スズキ目ノトセニア亜目に属する魚類だけは、8種におよぶ「不凍糖タンパク質」を体内に保持することによって、氷点下の水の中でも凍らずに生存できるように適応したのである。

表題論文をはじめ、魚の不思議・謎の解明に挑戦した生物学者たちの知的熱情が伝わってくる好論文5編を収めた。魚好きのあなたに贈る一冊。

1989年10月

サイエンス編集部

目 次

1. 南極海の魚はなぜ凍らない●J.T.イーストマン／A.L.ド・フリース……………	5
2. バクテリアで光る魚●J.E.マッコスカー……………	17
3. 魚はどのように群れを維持するか●B.L.パートリッジ……………	29
4. サケの人工飼育●L.R.ドナルドソン／T.ジョイナー……………	43
5. 托卵するナマズ●佐藤 哲……………	57
参考文献一覧……………	69
著訳者紹介……………	70

1. 南極海の魚はなぜ凍らない

かつては暖かだった南極海が現在のような氷の海となりはじめた時、そこにすんでいた多くの魚は死滅した。しかし、ノトセニア亜目に属する魚類だけは、ある種の糖タンパク質を体内に保持することによって、氷点下の水の中でも凍らずに生存できるように適応した。

J.T. イーストマン/A.L. ド・フリース

南極海に分布する全魚類のうち、種類数で2/3、個体数で90%は、スズキ目ノトセニア亜目の硬骨魚類である。

南極海のように氷におおわれた海域では、ほとんどの熱帯産および温帯産の魚類は、体液の温度が約 -0.8°C になると凍ってしまう。それに対してノトセニア魚類は、体温が -2.2°C になるまで凍らない。

これは、ノトセニア亜目の魚類の体液に8種の不凍糖タンパク質が含まれているからである。この糖タンパク質が氷点を降下させるメカニズムはわかっていないが、氷に吸着されて、氷の結晶が成長するのを何らかの方法で阻害するのだろうと思われる。

不凍糖タンパク質は分子量が小さいので、多くの魚類では腎臓の糸球体によって体外に排出されてしまう。しかし、ノトセニア亜目の魚類の腎臓には糸球体がなく、不凍糖タンパク質は体外に排出されないで、この魚類は、不凍糖タンパク質を再合成するためにエネルギーを使わなくてすんでいる。

また、ノトセニア亜目の魚類の多くは底生生活をしているが、ライギョダマシとコオリイワシは中層に生息している。ノトセニア魚類には浮き袋がないが、ライギョダマシとコオリイワシは、体の中に脂肪の一種であるトリグリセリドを蓄えることや、脊柱を中空にすることなどにより、比重をほぼ海水と同じにして、浮くためのエネルギーを節約している。

1899年2月、英国船サザンクロスに乗った10人の男が南極大陸のアデア岬に上陸し、世界最南の地での初めての

越冬探検が開始された。南極探検時代の先駆けとなったこの越冬探検隊によって、それまでの約1世紀にわたって多くの動物学者の興味をそそってきた新たな発見、すなわち、世界で最も寒冷な海洋環境下にもたくさんの魚がすんでいるという発見が、もたらされるものと期待された。事実、隊の動物学者であるハンソン(Nicholai Hanson、彼は不幸にも越冬半ばに他界した)は、それまで学界に報告されていなかった何種類もの魚を採取した。

およそ1世紀の後、私たち2人と共同研究者は、かつて生息が不可能と思われていた南極海で、魚類がいかに寒冷適応しているのかを理解しようとしている。とりわけ、ノトセニア亜目に属する魚類の進化適応は興味深い。この魚類は世界中いたるところでみられるスズキ目に属する硬骨魚である。ノトセニア亜目の90~100種の魚は南極海にだけ分布し、南極海に分布する全魚類の中で、種類数では2/3を占め、分布量では90%を占める。

私たちは2つの適応現象に注目した。第1は、寒冷海水中でも凍らずにいるという適応である。凍らないためには、魚は、不凍性の化合物を生産して、体液の氷点を下げねばならない。第2は、ある魚種でみられる海水中での中立な浮力、つまり無重力状態を保つための適応である。海水中で無重力状態であれば、エネルギーを消費せずに浮いていられる。多くのノトセニア亜目の魚類が底生生活をしたのに対し、少なくとも2種の魚は、他の生物群がまだ利用していない中層域へと適応放散した。

ノトセニア魚類が南極海域で栄えて

いるのは、いくつかの地質学的・海洋学的出来事のおかげである。南極大陸は、今までの歴史のほとんどの部分は、南半球の他の大陸といっしょになってゴンドワナ超大陸を形成していた。おそらく8000万年前に、この超大陸はバラバラになり始め、南極大陸の周りに海ができ始めた。この頃の周囲の海は、少なくとも所々ではかなり暖かだったと思われる。たとえば、筆者の1人であるイーストマンとシカゴ自然史博物館のグランド(Lance Grande)は、セイモア島で発見された3800万年前の化石を調べて、サメ、ノコギリザメ、エイ、ギンザメ、ナマズといった、今の南極海にはほとんど、あるいはまったくいない温帯産魚類が、かつての南極沿岸水には生息していたことを明らかにしている。

セイモア島にこれらの化石が形成された頃、南極大陸はオーストラリアや南米大陸の先端部と完全に分離し始めた。そして、南極大陸は、広大で寒冷で、深い海洋に取り囲まれた。複雑な環境の変動が、南極海の寒冷化をもたらしたが、とりわけ、南極収束線の形成が大ききものだった。収束線の形成に伴い、南緯50度と60度の間に、南極大陸を取り囲む周極海流が発達した。これが、北方からの暖流や、温暖魚種の南極海への侵入を阻む大きな熱的バリアーとなった。

寒冷水の発達によって、それまで生息していた温帯産魚種は消滅したであろう。しかし、ノトセニア魚類だけは逆に、寒冷下で明らかに進化した。現在の南極海では、寒冷や他の要因によって、北極海に比べ魚類の種分化が進

んでいない。北極海には、種類数で1.5倍、科の数で2倍の魚が生息している。ふつう、島々の周りや沿岸の浅海域は魚類相が豊富である。しかし、南極海には島々は少なく、大陸縁辺の大陸棚も深い。このことも、南極海で種分化が進んでいない理由だと考えられる。

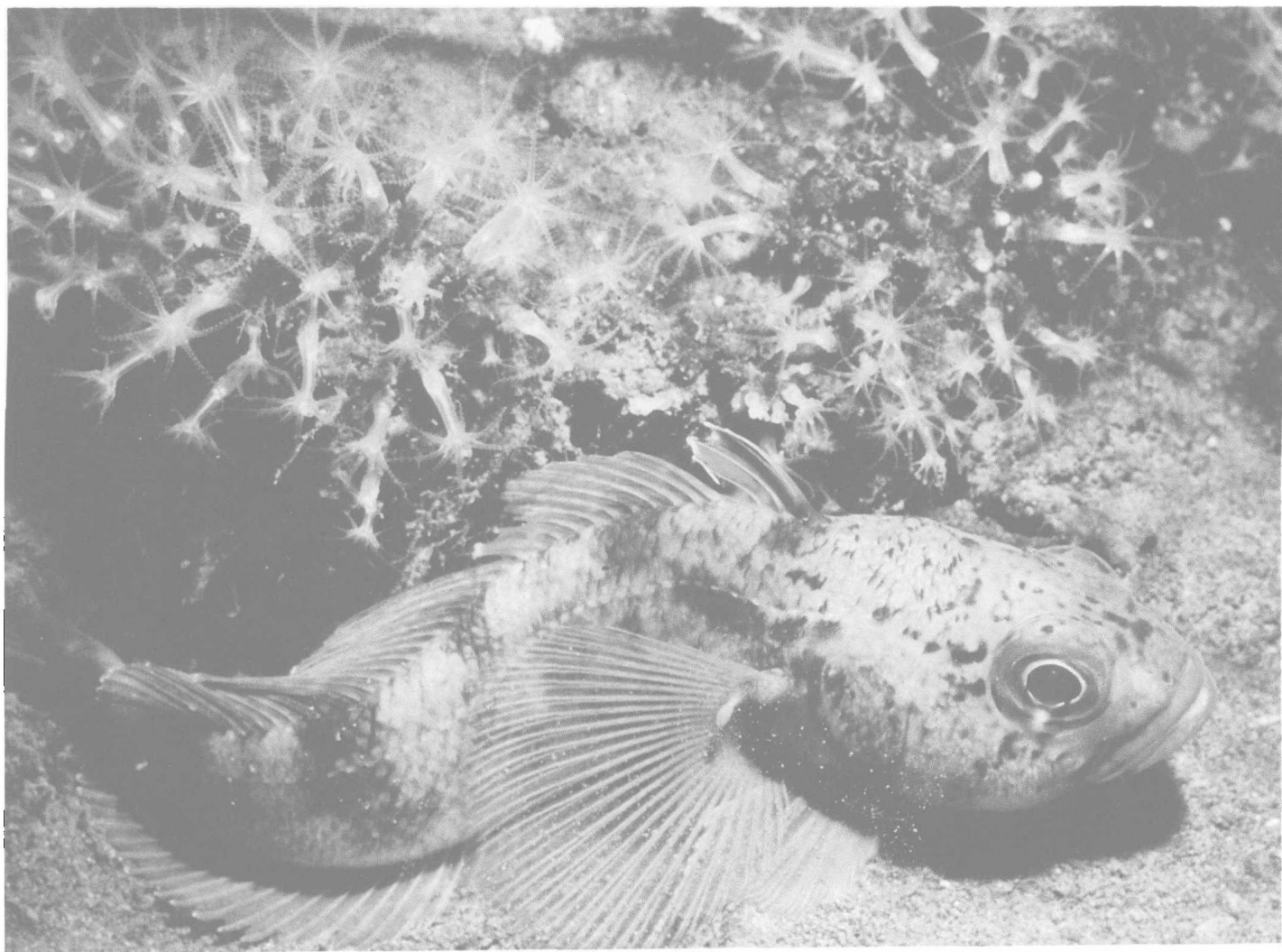
寒冷環境と氷の危険性

寒冷下で多くの魚種が死滅する中で、

どうしてノトセニア魚類だけが生き残り、進化できたのか、その適応現象の謎（なぞ）を知るために、私たちは定期的に南極アデア岬南方600kmほどの所にあるロス島を訪れている。ここには、火山活動によってできた細長い地帯に、生物研究施設（マクマード基地）がある。南極大陸とはマクマード入江をはさんで、60kmほど離れているが、米国科学財団によって、ほぼ30

年にわたって維持されている。

20年前、南極の魚が凍らないメカニズムを明らかにするため、私たちの1人（ド・フリース）が初めて同施設を訪れた。その時点ですでに、マクマード入江の海洋条件についていくつかの情報が得られていた。たとえば、スタンフォード大学のリトルページ（Jack L. Littlepage）は、入江の年間平均海水温は -1.87°C で、変動はわずかに -1.4



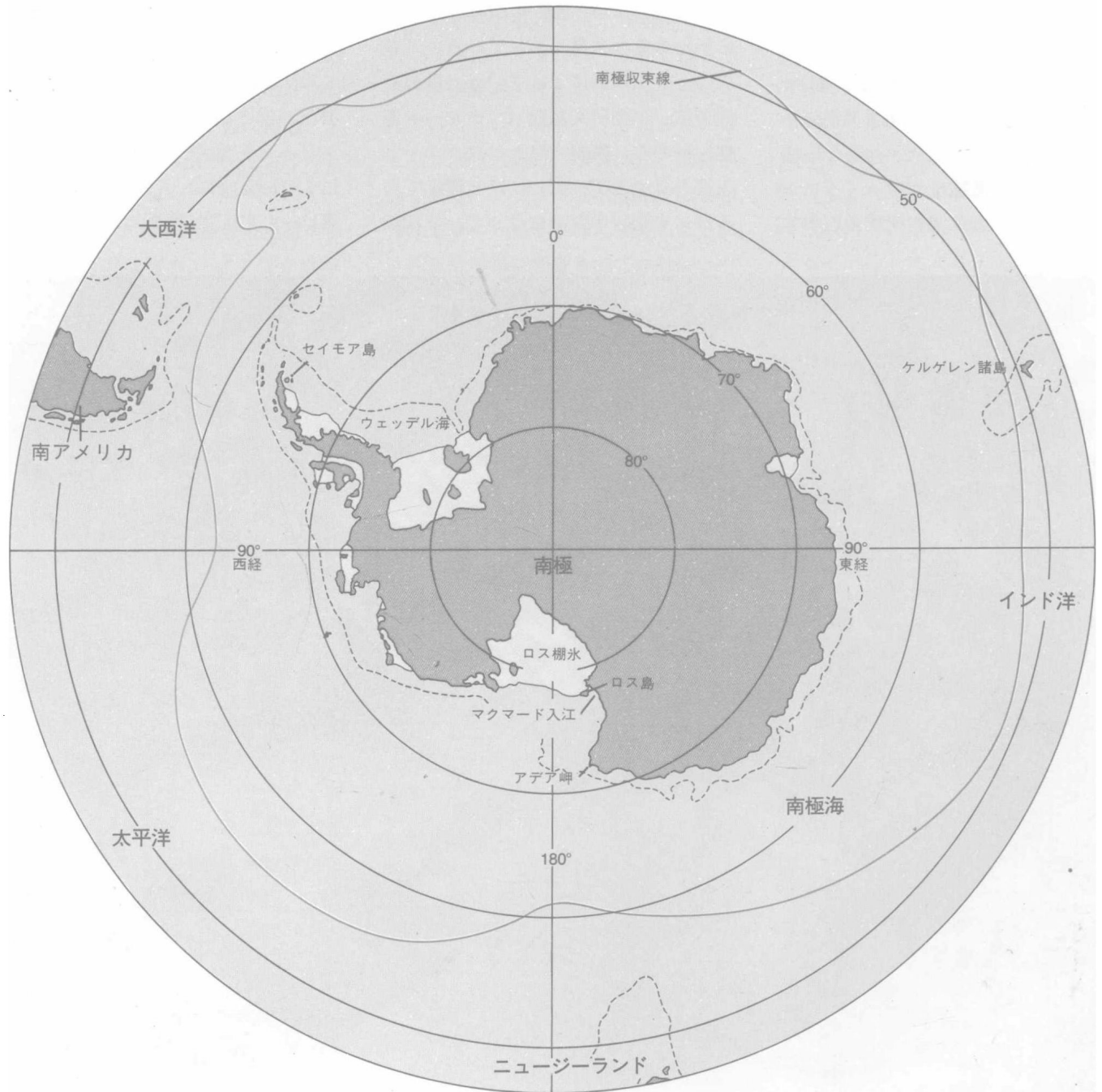
ニセハゲギス ニセハゲギス（*Trematomus nicolai*）は、スズキ目ノトセニア亜目の代表的な種である。海底付近に生息し、捕食・繁殖する。ノト

セニア亜目に属する90～100種の魚は、南極海だけに分布し、南極海に出現するすべての魚のうち、個体数で90%、種類で2/3を占める。

〜 -2.15°C の範囲内であることを報告している。南半球での夏期間である12月から2月にかけて、水温は -1.9°C

から -1.8°C へ上昇する。海水下の水中への日射は、夏期間でも、海水表面にふりそそぐ日射のわずか1%以下であ

る。しかし、1年間のうち4カ月も暗黒下であることと比べれば、これでもかなりの光の量である。



南極海の海洋構造 ノトセニア亜目魚類の進化に影響を及ぼした海洋学的特徴としては、狭く深い大陸棚と南極収束線が存在があげられる。赤い線で示した南極収束線を境に、水温は大きく変化する。点線で示した1000mの等深線は、南極大陸のすぐ近くまでせまっており、ノトセニア魚類と競合

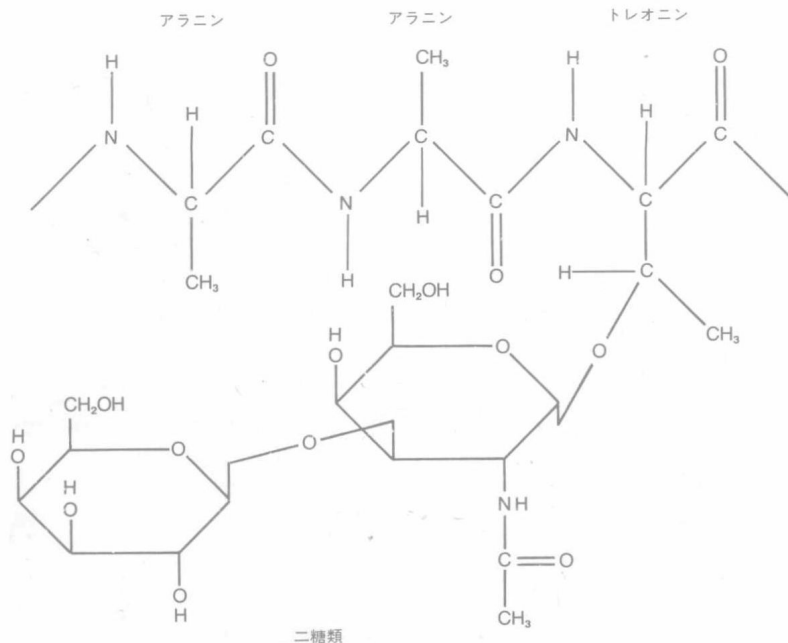
しそうな浅海性魚類の生息場所が少ない。南極収束線は南極海と北方との境界を形成し、南向きの暖かい表面水が南極海に入り込むのを妨げている。収束線の発達には、南極海の寒冷化につながり、そして、ノトセニア亜目魚類の進化を促した。今日では、南極海の水温が 2°C を超えることはめったにない。

南極の魚類にとって、暗黒や寒冷よりも危険なものは、何層にも重なった海水の存在である。海表面には厚さ2～3 m、あるいはそれ以上になる周年氷があり、少なくとも1年のうちの10ヵ月は存在する。夏には嵐によって碎かれ、流れ去る。この周年氷の下方に、さらに1～2 mの樹枝状氷の層（短冊のような細長い結晶が粗く集合したもの）がある。これは12月中旬からしだいに消滅する。1年間のうちのある期間は、さらに、いかり氷と呼ばれる別の層が形成される。これは氷の結晶が大きく、入江の30mより浅い所では、海底までおおいつくしてしまう。

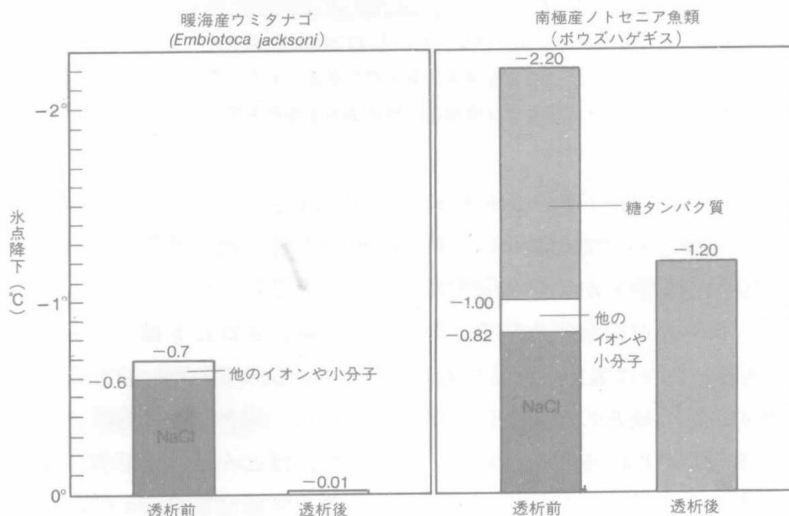
1950年代の研究では、氷そのものが、魚類の鰓（えら）や外皮を容易に突き抜ける危険性をはらんでいると強調している。変温動物である魚類では、その体温は周囲の温度と等しくなる。そして、血液の温度がその平衡氷点（氷の結晶が形成される温度）より1℃下がるまでは、生存できる。ただし、魚類がこのような冷却に耐え、体液を液状に保てるのは、体内に氷が侵入しない場合だけである。魚体の周囲に氷がある場合は、たかだか0.1℃下がるだけで、外皮を通して急速に氷が成長し、体液を凍らせる。氷がある場合には、ほとんどの熱帯産および温帯産の魚類は、体液温が約-0.8℃に冷却されると凍ってしまう。それに対し、マクマード入江にいるノトセニア亜目の魚類は、体温が-2.2℃に下がるまで凍らない。

不凍糖タンパク質の発見

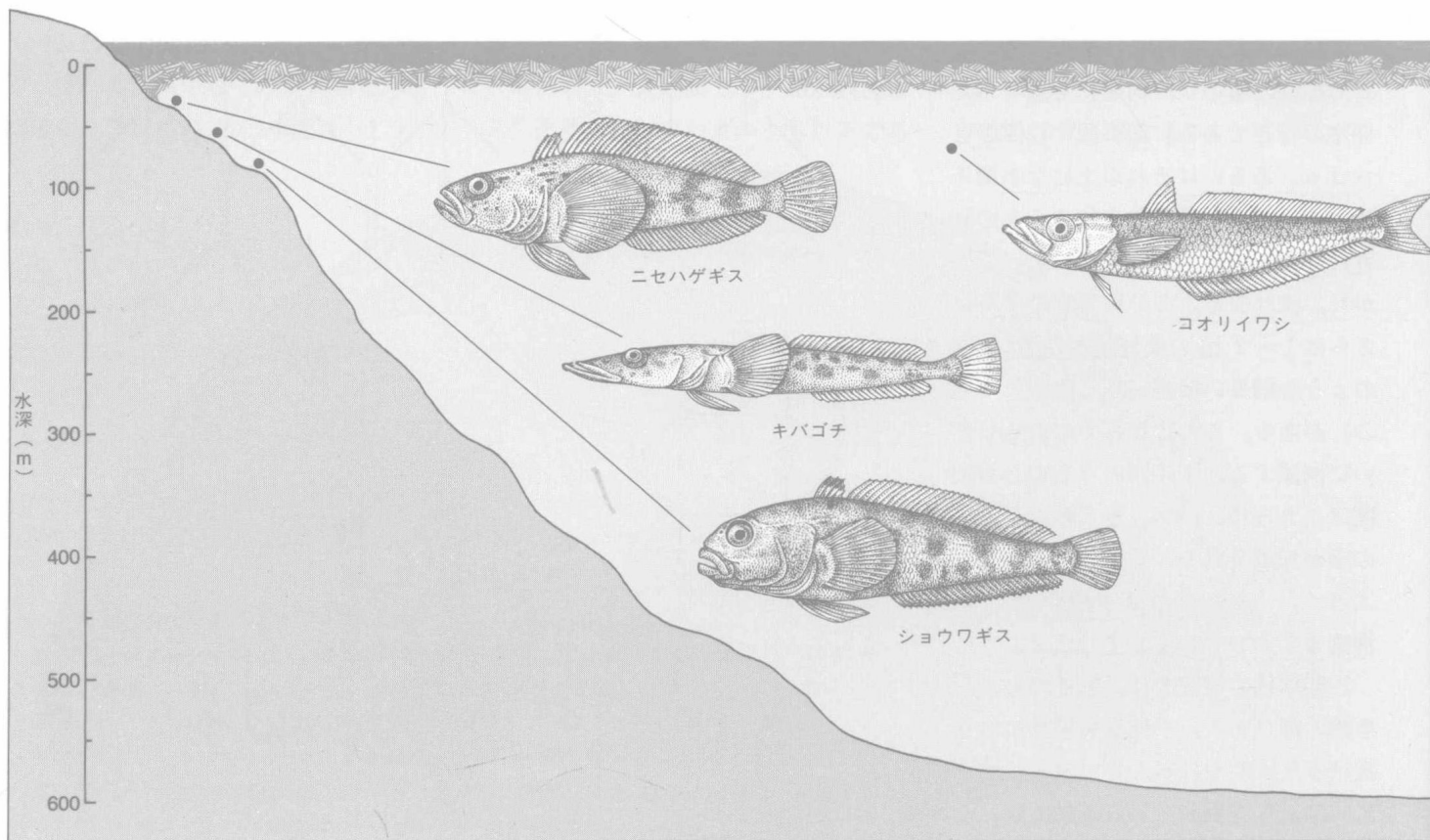
これらの情報をもとにし、ド・フリ



不凍糖タンパク質の基本単位 ノトセニア亜目魚類の不凍糖タンパク質の基本単位は、トリペプチド鎖の3番目のアミノ酸に二糖分子がついたものである。この単位が繰り返された連鎖が不凍糖タンパク質である。分子量の大きさによって、3万3700ダルトンのNo.1から2600ダルトンのNo.8まで、8つに分類されている。糖タンパク質No.1～5の基本単位は、アラニン-アラニン-トレオニンであるが、No.6～8はアラニンのいくつかがプロリンに代わっている（これは図示していない）。



血しょうの氷点の比較 暖海のウミタナゴ魚類 (*Embiotoca jacksoni*) と南極のノトセニア魚類 (ボウズハゲギス) とでは、血しょうの氷点や血しょうの成分に大きな相違がある。分子量が1000ダルトンより小さな溶質を取り除く透析を行なうと、-0.7℃だったウミタナゴの血しょうの氷点が、純水の氷点にほぼ等しい-0.01℃へ上昇した。これは、ウミタナゴでは、塩化ナトリウム (NaCl) や他の小分子量の溶質が氷点降下の担い手であることを示している。一方、ボウズハゲギスでは、透析の前には、-2.2℃だった氷点が、透析後でも-1.20℃に上昇するだけであり、1000ダルトン以上の大きさの糖タンパク質分子が、氷点降下のかかなりの部分を担っていることがわかる。実際、これら糖タンパク質は、氷点降下の約半分を担っているのである。



ノトセニア魚類 図に示したのは、マクマード入江にいる14種のノトセニア魚類のうちの7種である。ニセハゲギス、ショウワギス、ミナミクロギス、キバゴチのような多くのノトセニア魚類は、種によって生息深度は異

なるが、いずれも海底近くに分布する底生種である（図中の黒点は主な生息深度を示すが、これより広く分布することもある）。ライギョダマシとコオリイワシの2種は、底生性から中層性へと放散進化した種類である。両種は、

ースたちは、マクマード入江の魚類について、氷点降下に対する種々の物質の相対的な役割を明らかにする研究に着手した。ほとんどの海産魚類では、体液中の塩（とりわけ塩化ナトリウム）が、氷点を 0°C （純水の氷点）以下に下げさせる役割の85%を担っている。残りの役割は、血液中や組織液中に、少量ではあるがごく普通に含まれているカリウム、カルシウム、尿素、グルコース、アミノ酸が果たしている。

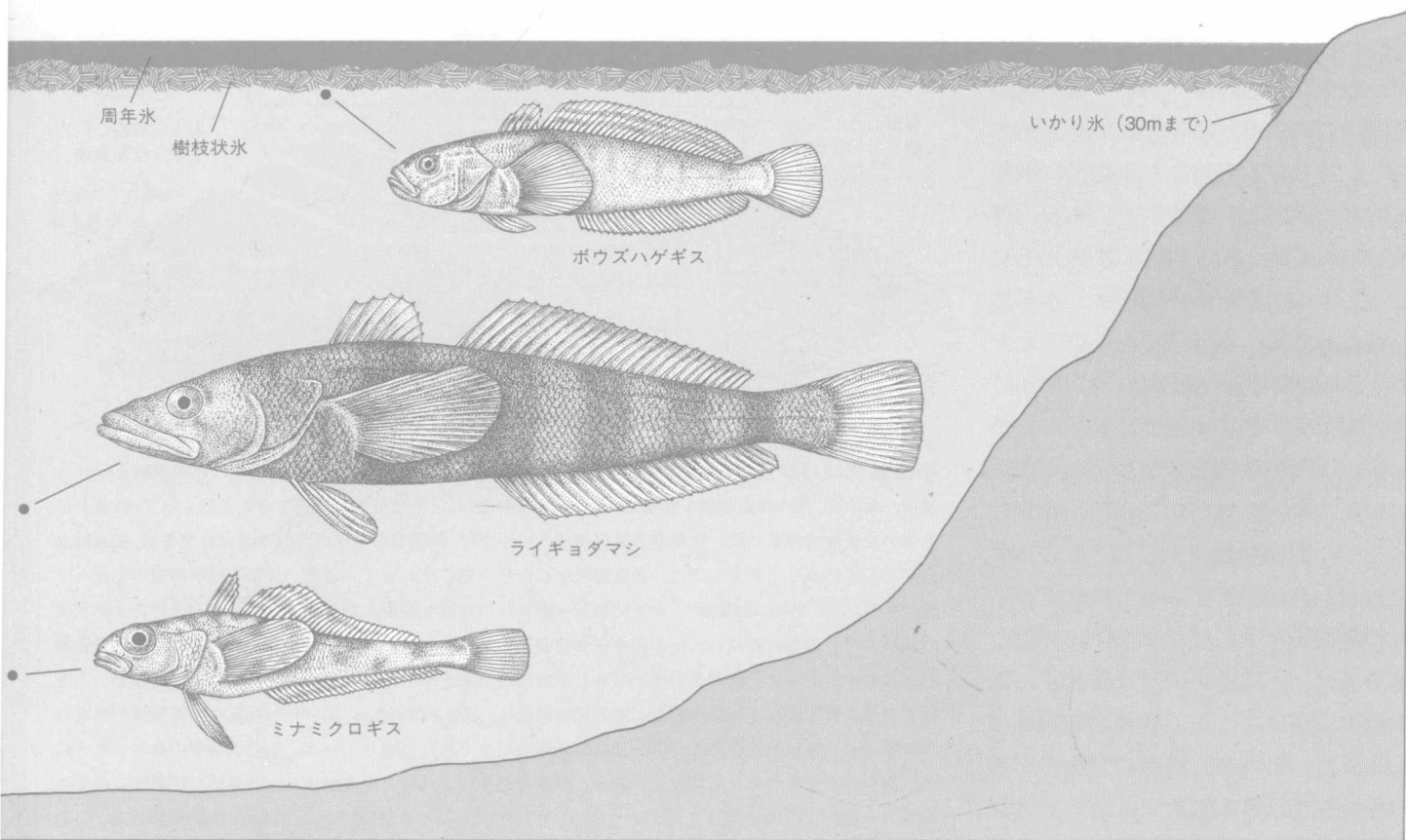
マクマード入江の魚類では、塩化ナトリウムや、その他のイオンや小分子の濃度は、温帯産魚類のそれより高いにもかかわらず、これらは氷点降下の

40～50%しか担っていない。残りの部分（これが南極産魚類の生死にかかわるものであるが）は、ノトセニア魚類から見出された8種の不凍性分子が担っているのである。これら8種の不凍分子は、尿と眼球液を除く体液中に、また、ほとんどの細胞質中に含まれており、体液全重量の3.5%を占める。

これら不凍分子は糖タンパク質である。各々は、3つのアミノ酸からなるペプチド鎖がいくつもつながったものである。この単位となるペプチド鎖の3番目のアミノ酸には、二糖分子（デイスaccaライド）が結合している（前頁上図）。8種の糖タンパク質のうち、

分子量が最大のものは3万3700ダルトン、最小のものは2600ダルトンである。最大のものには糖タンパク質 No.1、最小のものには糖タンパク質 No.8、と番号がつけられている。No.1～5の糖タンパク質は、アミノ酸配列が、アラニン-アラニン-トレオニンであるが、No.6～8は、いくつかのアラニンがプロリンにとって代わられている。これら8種の糖タンパク質の不凍性は、分子の大きさに比例する。

ノトセニア魚類にみられる不凍糖タンパク質が、どのように氷点降下を引き起こしているかを知るには、体液中の他の溶質であるグルコースや塩化ナ



図示した水深から海面下 500m にかけての中層に分布する。また、ボウズハゲギスは海水下面域に適応して生息する。この種も底生性から放散進化したと思われる。他の魚種よりひととき大きく示したライギョダマシは、他のノ

トセニア魚類に比べ、体長で約 6 倍、体重で約 250 倍と大きい。周年氷は厚さ 2~3m、あるいはそれ以上であり、1 年のうちの 10 カ月は存在している。その下の樹枝状氷の厚さは 1~2m である。

トリウムが氷点降下を引き起こす様子と比べるとわかりやすい。ほとんどの溶液の氷点は、それら溶液の「束一性」によって決まる。つまり、溶液中にある溶質粒子性質よりも、溶質粒子の数によって決まるのである。粒子数が多ければ多いほど、水分子同士が集合しにくくなり、氷の結晶のめばえが阻害される。塩化ナトリウムは溶液中では、塩素イオンとナトリウムイオンに分離するため、グルコースの約 2 倍の氷点降下を引き起こす。しかし、糖タンパク質は粒子の束一性によらない方法で、粒子数から想像される 200~300 倍の効率で、氷点降下を引き起こす（同様に

融点も低下させるが、これはわずかであり、粒子の束一性による方法で引き起こされる）。

いかに氷結晶の成長を妨げるか

それでは、糖タンパク質は、束一性以外のどのようなメカニズムで、マクマード入江の魚類を凍結から守っているのだろうか。

ところで、理由は明らかではないものの、小さい結晶に不純物が吸着すると結晶の成長が阻害されることを、化学者は知っていた。さらに、単位となる分子の組み合わせの繰り返しが多い不純物ほど、その効果が大きくなるこ

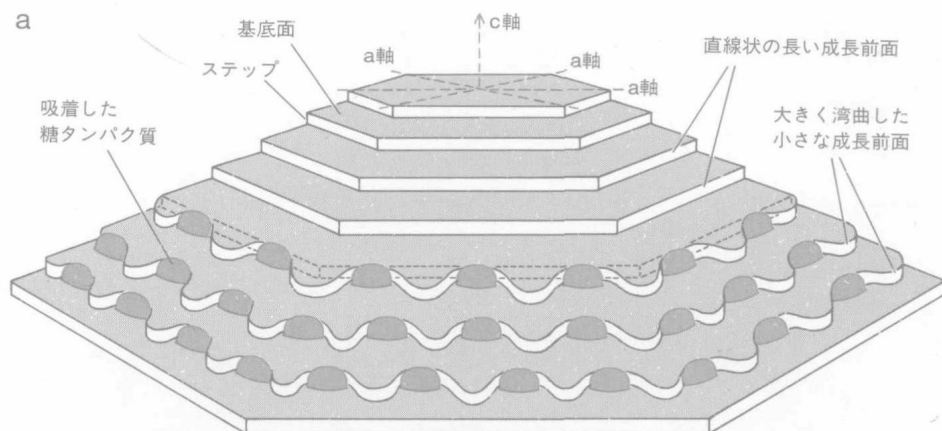
とがわかっていた。そこでド・フリースは、不凍糖タンパク質が微細な氷の結晶に吸着され、結晶の成長を妨げることによって、ノトセニア魚類を凍結から守っているのであろうと考えた。その後、ド・フリースと彼の学生であるドマン (John G. Duman) とレイモンド (James A. Raymond) の研究グループは、実際に糖タンパク質が、成長しつつある氷に吸着されることを見出し、彼の考えを裏づけた。

氷結晶への吸着といった分子レベルの現象を直接目にするには難しいので、可能性のある図を 12~13 頁に示した。私たちは、糖タンパク質分子を吸

着した氷はさらに成長することができず、わずかに氷と糖タンパク質の間隙内で成長せざるをえないと考えている。さらに、吸着された結晶の前面は大きく湾曲し、結果的に、氷は、容積に対して表面積を大きくすることになる。このような氷の前面は、氷を取り囲む液体中へ水分子を失うことになり、氷前面の成長を止める現象が起こる。水分子がさらに前面に加わるためには、周囲の液体温度がもっと下がらねばならない。言い換えれば、非常に湾曲した前面が発達することによって、液体の水点が降下することになる。

この仮説によれば、体液中にできた氷結晶は、不凍糖タンパク質分子の集中砲火を浴びて、その成長が止まることになる。しかし、最近の実験で、別の可能性が示された。ノトセニア魚類を、氷のない水中に入れると、水温が -6°C に下がるまで凍らない。氷の結晶が体内に侵入しない限り、明らかに体内で結晶が成長することはない。そのため、寒冷下で生存するノトセニア魚類にとって、最大の脅威は周囲の氷の存在にちがいない。おそらく、糖タンパク質の最大の役割は、外皮を通しての氷の成長を防ぐことであろう。このことを裏づけるいくつかの事実がある。うろこのない表皮の内側を、不凍分子を含んだ塩水でぬらすと、表皮は外側からの氷の成長を防ぐバリアーとして働く。だが、不凍分子がない場合には、氷は外皮を通して容易に成長するのである。

しかし、まだ水溶液中での不凍分子の3次元的構造が完全に理解されていないこともあり、不凍分子がどのよう



不凍糖タンパク質が氷の結晶の成長を阻害する仕組み

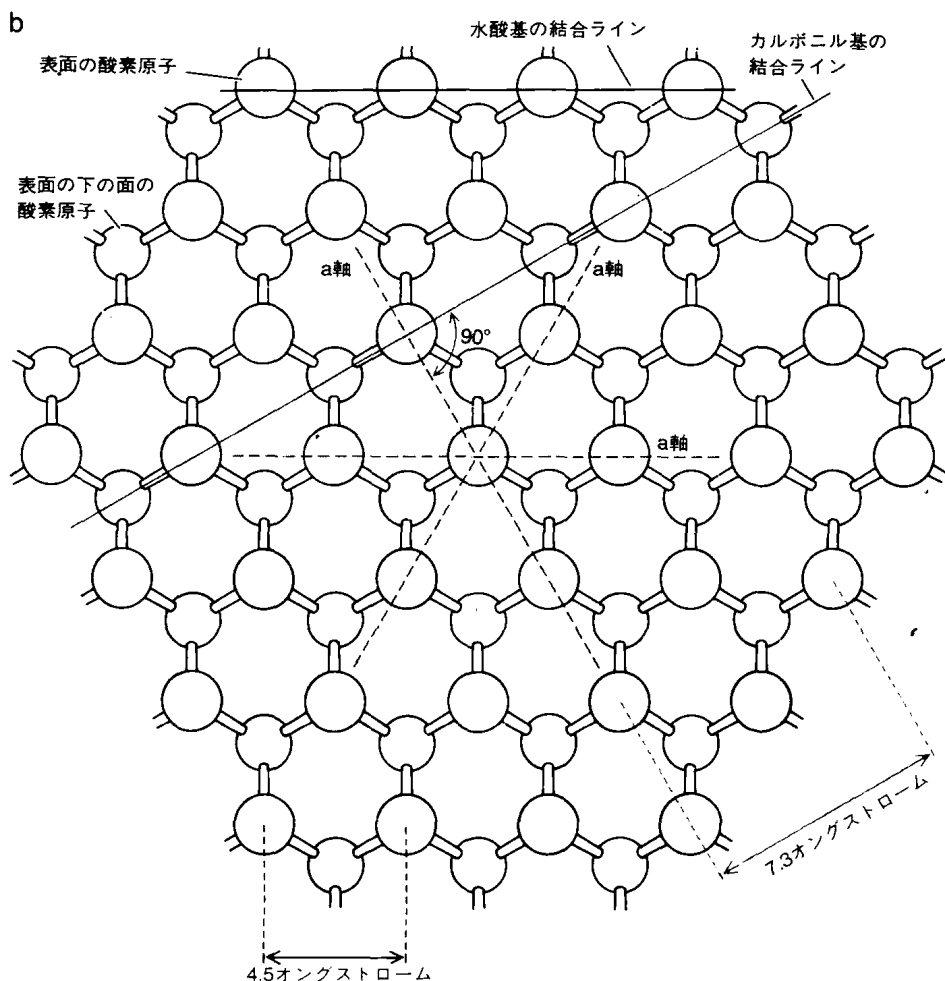
氷に吸着された不凍糖タンパク質は、たぶん、氷の結晶表面を横切るステップ(氷の層)の正常な成長を阻害することによって、結晶そのものの成長を妨げる(a)。氷結晶の基底面のステップに、周囲の溶液中の水分子が結合すると、結晶は成長する。このようなステップは、基底面の中心から外側に向かって、通常、長い直線状の前面を伴って成長する(上図の中の上層部)。これに対し、糖タンパク質が吸着したステップは、すぐ下にある基底面と結びつき、極端に湾曲した多くの小さな前面に分かれる。この湾曲した前面では、体積に対して表面積が大きくなるので、周囲の温度がもっと下がらないかぎり、結晶の成長は止まったままとなる。不凍糖タンパク質がどのように氷結晶と結合するのかは、正確にはわかっていないが、2つの可能性が示されている(b)。氷結晶の中では、水分子は六角形のリング状に存在している。この六角形の各コーナーには、図中の白丸で示した酸素原子がある。分子モデルによると、不凍糖タンパク質の二糖鎖側にある水酸基($-\text{OH}$)は、4.5オングストローム(1オングストロームは 10^{-8}cm)の間隔で並んでいる。これは、氷結晶の基底面a軸に平行に並ぶ酸素原子間の距離に等しい(図中の濃い赤線で示した酸素原子の列)。一方、不凍糖タンパク質のペプチド鎖にあるカルボニル基($-\text{CO}-$)もまた、氷の結晶と結合する(薄い赤線)。糖タンパク質のポリペプチド鎖が完全にのびた状態では、カルボニル基はおおよそ7.5オングストロームの間隔で並ぶ。これは、a軸と直角方向に並んだ基底面上の酸素原子間の距離と同じである。

に氷と結合するのかは、よくわかっていない。不凍分子そのものの構造は、その中心骨格部から、水酸基($-\text{OH}$)や他の極性基が枝状に突き出ていることがわかっている。そして、ここが氷と結合する場所と考えられる。実際、糖タンパク質の糖分画にある水酸基が、不凍性を引き起こす上で重要なことがわかった。もし、実験的にこの水酸基を不活性化させると(アセチル基、 $\text{CH}_3\text{CO}-$ を加えると)、糖タンパク質分子は不凍効果を失うのである。

氷の結晶格子は、各コーナーに酸素原子をもつ六角形がつながってできて

いる。不凍分子の極性基は、この格子の水分子に、水素結合する。この水素結合の結合力が最大になるのは、成長する氷結晶の前面に並ぶ酸素原子間の距離と、不凍分子の極性基の間隔が等しい時である。

この理想的な条件は、おそらく現実のものである。糖タンパク質の構造モデルから、糖側にある鎖の水酸基の多くは、4.5オングストローム(1オングストロームは 10^{-8}cm)間隔で並んでいることがわかった。この間隔はまさしく、氷格子の水平面に並ぶ酸素原子間の距離である。



不凍分子が氷と結合するもう1つの方法は、アミノ酸鎖にあるカルボニル基 ($-\text{CO}-$) によって行なわれるものである。糖タンパク質の糖側鎖は、ポリペプチド鎖の骨格をひきのばす。この状態では、ポリペプチド鎖の同じ側から他のカルボニル基がすべて突出し、約7.3オングストロームの間隔で並ぶ。これは、氷格子の中の、ある位置関係にある酸素原子間の距離と等しい。

不凍分子の保存

どのようなメカニズムであれ、マクマード入江の魚類にとって、不凍糖タ

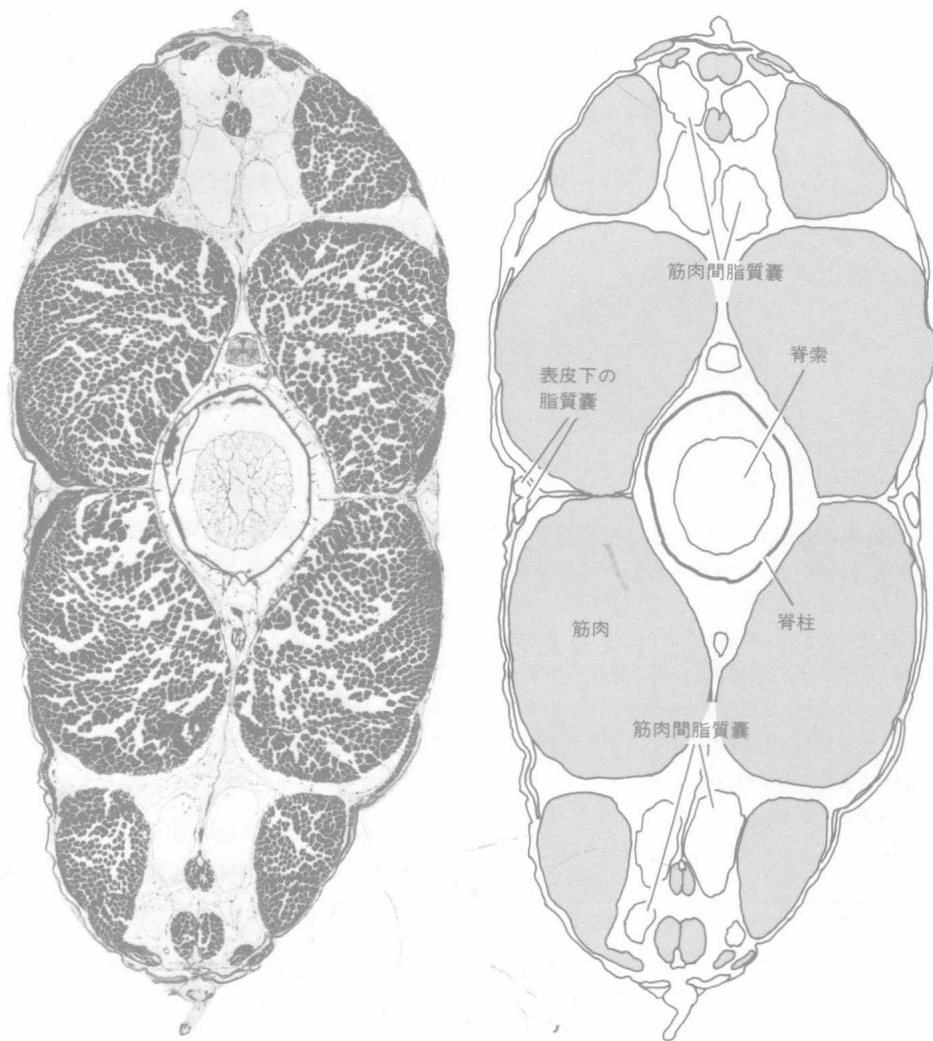
ンパク質は年中必要である。このことは興味深い問題をもたらす。南極産魚類が蓄えている生存に必要なエネルギーは、非常に限られたものである。海洋生態系の生産力がきわめて低くなる冬期には、そのエネルギーをとくに節約しなければならない。どのようにして彼らは、不凍分子の合成に、多くのエネルギーを消費することなく、適量の不凍分子を供給しつづけるのであろうか。

ノトセニア魚類の尿中に不凍分子がみられないことから、腎臓に関連した何らかの機構が、不凍分子を保存する

役割を果たしていると思われる。不凍糖タンパク質の分子量は小さいので、ほとんどの脊椎動物では、不凍糖タンパク質は腎臓の糸球体を通して、常に尿中へ逃げだす。糸球体では、束になった毛細管が血液をろ過する役割をしている。通常、糸球体内部の圧力は、4万ダルトン以下の大きさの分子を、血液の中から尿を集める集合管へと押しやる力がある。糸球体がある魚類では、理論的には、不凍分子が集合管を通過する前に分子をアミノ酸や糖に分解し、尿中より回収し、再び糖タンパク質を合成することができる。しかし、そのためには多くのエネルギーを消費することになる。

1972年、ド・フリースと彼の学生ドブス (Gary H. Dobbs III) は、顕微鏡下でノトセニア魚類の腎臓組織を調べたところ、12魚種のすべてに糸球体がないことを見出した。さらに、放射性同位元素で不凍分子をラベルし、糖タンパク質の動きを追跡したところ、なんと、糖タンパク質は腎臓で尿中へ入ることがなかった。これら無糸球体腎臓魚類では、ろ過過程ではなく、分泌過程によって、尿を産出する。集合管壁に並んだ細胞は、ある限られた老廃物のみを取り込み、必要とする不凍分子はそのまま血液循環系に残している。これによって、ノトセニア魚類は、不凍糖タンパク質を再合成する必要がなく、エネルギーをかなり保存できるのである。

マクマード入江の魚類が、不凍糖タンパク質とエネルギーの節約のために、無糸球体腎を特別に進化させたか否かは不明であるが、腎臓の重要さを考え



コオリイワシの横断面 コオリイワシの横断面から、中立浮力、つまり水中での無重力状態をつくり出す仕組みがわかる。コオリイワシのきわだった特徴は、脂質囊の存在である。脂質（脂肪）は海水より軽く、大きな浮力を生み出す。また、脊柱内の脊索も比重が小さく、浮力を生じる（この写真では、顕微鏡観察のために組織固定した結果、脊索は縮んで脊柱から大きく離れている）。コオリイワシと異なり、多くの硬骨魚の脊椎骨は硬く、重い。このような構造のおかげで、コオリイワシは浮くためのエネルギーを使うことなく中層で生活できる。

ると、そうとも思える。さらに、最近、温帯域に分布する数少ないノトセニア魚類の一種であるニュージーランド産のソーンフィッシュ（thornfish, 学名 *Bovichthys variegatus*, ノトセニア亜目ボビキチーデ科に属す）を調べたら、糸球体をもっていることがわかった。このソーンフィッシュはノトセニア魚類の中で、最も分化の遅れた種類である。

ということは、その他のノトセニア魚類にみられる無糸球体腎は、やはり、寒冷水中でエネルギーを節約しつつ生存するための特別の適応現象とみなされるであろう。

中立の浮力

少なくとも2種のノトセニア魚類でみられる中立な浮力もまた、エネルギ

ーを節約するための、もう1つの適応であろう。今から10年前、ノトセニア魚類の中で最大の大きさを誇るライギョダマシ（*Dissostichus mawsoni*）を捕獲した時に、この適応の可能性に気づいた（ほとんどのノトセニア魚類は体長15～30cmであるが、ライギョダマシは体長127cmに達し、体重は28kgにもなる）。私たちは水深300～500mの間の中層にはえなわをしかけた。ライギョダマシは海底付近の生息域から上昇し、そして、釣り餌に食いつくものと思っていた。ところが、ライギョダマシそのものや、その胃内容物の70%を占めて出現するコオリイワシ（*Pleuragramma antarcticum*）の体型が流線型をしていることに気づいてからは、どうも海底近くにはいないであろうと考えるようになった。おそらく、この2種は、もともと底生性であるノトセニア魚類の中で、中層性へと分かれていったものであろう。

1978年に、この2種が中層に効率よく分布する浮力があるかどうかを調べた。もし、そうだとしたら、いったいどんな適応がこの浮力獲得を可能にしているかを調べた。中立の浮力とは相対的な目安であり、水中での魚体重を空中での魚体重で割ったものに100をかけて得られる指数である。指数が0に近づくほど、その魚は中立の浮力に近づくことになる。ライギョダマシとコオリイワシで実際に測定したところ、それぞれの指数は0.01と0.6であり、十分に0に近く、中立の浮力と言える。

ちょっと解剖してみれば、すぐにわかることであるが、この2種と他の底生性ノトセニア魚類には、浮き袋がな