

特集

雪と氷の世界に生きる一極地方の生物, その特異な生態…… 1. 北極圏の生物

1 ホッキョクグマの生態・食性から見る環境適応

妹尾 春樹 Haruki Senoo

秋田大学 理事/副学長

ホッキョクグマ (polar bear, white bear, ice bear, シロクマともよばれる。 *Ursus maritimus*, 図1) は, 近接な関係にあるヒグマ (brown bear, *Ursus arctos*) から進化したと推測される。ホッキョクグマの分布区域は北極を取り巻く地域で, 厳しい北極圏の自然に適応して生活しており, 1万~4万頭いると推定されている。しかし今日, 地球温暖化の影響によって絶滅の危機にあると言われている。肝臓には大量のビタミンAを貯蔵している。これは北極圏の食物連鎖の中で生存していくための環境適応の一つと考えられている。

1 | どこから来たのか

一般にクマは約2,000万年前, 中新世の時代に, 小さなイヌのような先祖から進化してきたと考えられている。ホッキョクグマは近接な関係にあるヒグマ (北海道やシベリア, 北アメリカ等に住んでいる) から進化したと推測されている。ホッキョクグマが北極圏に移動して来たのはごく最近になってからで, 更新世 (約170万~1万年前

までの時代をいう) の中期から後期のことだろうと考えられている。通説によれば, シベリアで孤絶して生活するようになったヒグマの群れが短期間のうちにホッキョクグマに進化したとされている。両者の間には遺伝学的にはあまり大きな違いはなく, この2つの種の交配によって, 多産性ではないが子を産み出すこともできる。こうして生まれた子は繁殖能力を持っている。

2 | 現在どこにどれだけいるのか

ホッキョクグマは, 北極圏に1万~4万頭いると推定されている。どうしてもこんなに数字がばらばらかとういうと, 数えにくいからである。巣穴に入っているものは数えられない。

ホッキョクグマの分布区域は北極を取り巻く地域で, その南限は海を覆っている氷や, 氷の動き, 食物 (アザラシ) の入手の可能性によって変動する。単



海を泳いでいるもの (a) と雪の上にいるもの (b)。子供と一緒にいるのは母親グマである

図1 ホッキョクグマ

独で行動しているクマはしばしば氷の先端に従って北や南に移動し、海流と氷の動きが流水の間にひらいた空間を好む。これらの場所はアザラシの捕獲にも好都合な場所である。多数のホッキョクグマがアザラシのコロニーの周囲に群れているのを見ることがある。

3 | どういう生活ぶり（食性も含めて）か

身体のしかけ・仕組みは -40°C の気温にも耐えられるようにできている。皮下の脂肪層は厚く、体温を維持しエネルギー源として大きな役割を果たしている。

オスは体重800 kg、体長が2.5 mにもなり、メスはそれぞれ300 kg、2 mに達する。大きな体のサイズは熱を失いにくい。寿命は30年に達するものもある。

毛は2種類生えていて、①柔らかな、熱を伝えにくい密生した濃い下毛、および、②上記の下毛を被う、まばらな粗毛・防御の毛（長さが ~ 15 cmに達する）、が生えていて、体を護る。なおこの粗毛は中空になっていて、このためホッキョクグマの毛皮は水に濡れても直立したままで、もつれるようなことはない。また粗毛の間に十分な隙間があるために、水が凍る前に簡単に振り払うことができる。さらに粗毛は太陽光線中の短波エネルギーを「じょうご」のように吸収して黒い皮膚（シロクマの皮膚は黒い）に伝達している。毛の色は黄色から明るい茶色、薄い灰色に見えることがある。時として緑に見えるのは、付着した特殊な藻類による。上述のように皮膚と鼻は黒く見える。



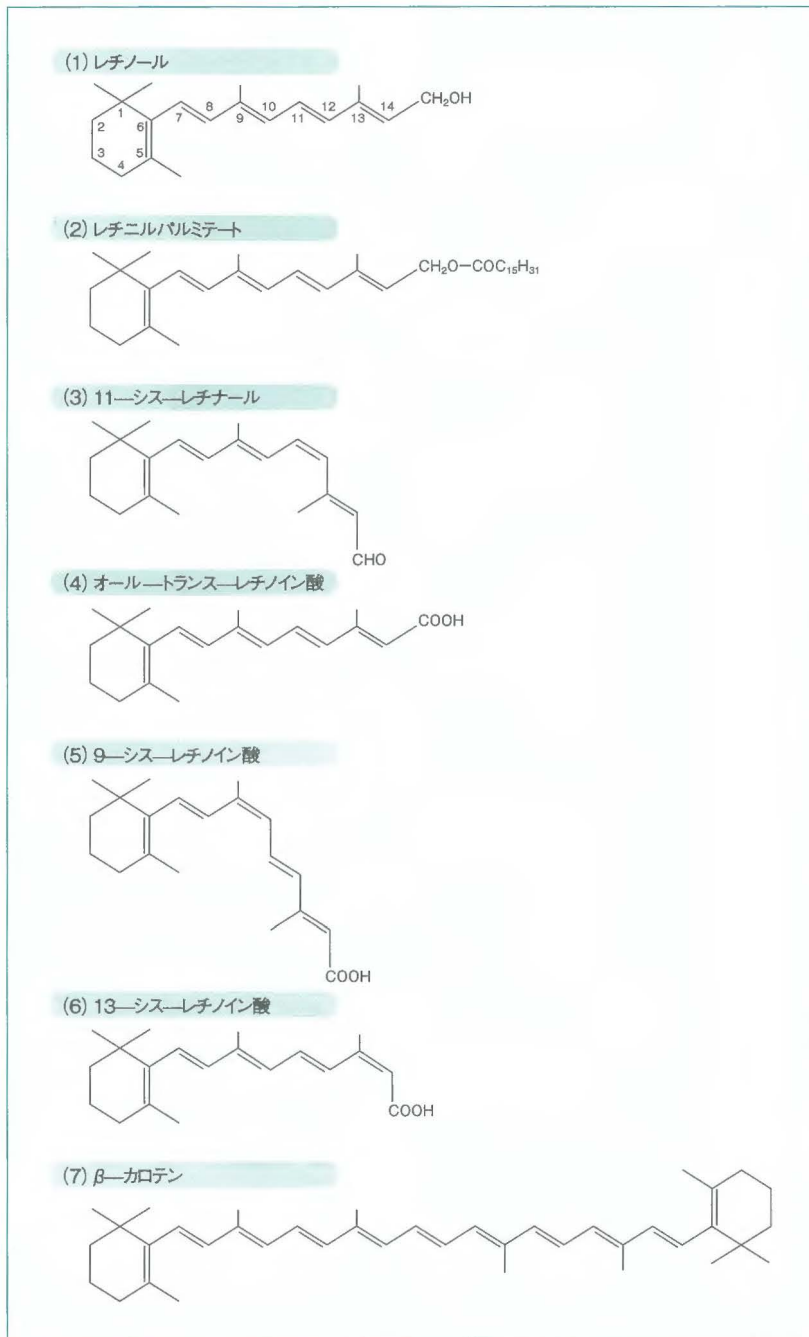
スバルバル群島での調査のための動物捕獲の際に見つけたワモンアザラシの赤ちゃん。もちろん捕獲の対象ではない。抱いているのはノルウェー人女性研究者

図2 ワモンアザラシの赤ちゃん

前足には部分的に（各指の半ばまで）大きな水かきがあって、泳ぐ助けになる。なお、各足は5本の指を持つ。5本の指には爪があり、氷や雪の上を歩き回る際にしっかりと掴むのに役立つ。海の氷が薄くなって不安定になると、ホッキョクグマは両脚を広く拡げて、体重をより均等に配分しようとする。爪と脚は穴を掘ったり、泳いだり、獲物を掴んだり、保持するのに役立つ。ホッキョクグマは優れた泳ぎ手であり、きわめてよく断熱された身体のお陰で凍った海でも長時間泳いでいられる。ホッキョクグマが食物を求めて島から島へ、大流水の間を泳ぐのがしばしば観察される。夏の間、陸路をとる旅行が困難であったり、時間をとられたりする時にはしばしば海岸に沿って泳ぐのが見られる。水泳の動作はイヌのそれと同様である。

ホッキョクグマが最も好んで食べる

食物は、ワモンアザラシ（ringed seal, *Phoca hispida*, 図2）であるが、ヒゲアザラシ（bearded seal, *Erigonathus barbatus*）、タテゴトアザラシ（harp seal, *Phoca groenlandica*）、ズキンアザラシ（hooded seal, *Cystophora cristata*）も捕獲して食べる。セイウチ（walrus, *Odobenus rosmarus*）やシロイルカ（*Delphinapterus leucas*）、ホッキョクタラ（arctic cod, *Boreogadus saida*）を食べることもある。北極海が凍ると、単独行動しているクマや、前年に生まれた子供（子供は2年間は母親とともにいる）を連れた母親グマはアザラシを求めて遠くまで広範囲を動き回る。ホッキョクグマはしばしば氷に掘られたアザラシの呼吸穴の傍で待ち、アザラシがその穴から顔を出したとたんに、強力な前肢の一撃によって気絶させる。また、小さな流水の上で休んでいるアザラシをひっくり返した



脂溶性ビタミン (A, D, E, K) の一種である。ここでは自然界に存在するビタミンAの代表的分子種とβ-カロテンの構造を示す。ビタミンAは血漿中ではレチノール(1)として存在し、レチノール結合タンパク質 (retinol-binding protein, RBP) と結合している。肝臓ではほとんどレチニルパルミテート(2)として貯蔵される。11-シス-レチナール(3)は網膜のロドプシンを構成する。オールトランス-レチノイン酸(4)はレチノイン酸受容体 (RAR α , RAR β , RAR γ) と、9-シス-レチノイン酸(5)はレチノイドX受容体 (RAR α , RAR β , RAR γ) と結合する。これらの核内受容体は転写をさまざまなレベルで制御している。13-シス-レチノイン酸(6)は RARs と結合できる。1分子のβ-カロテン(7)は分解されて2分子のレチナールになる

図3 ビタミンA

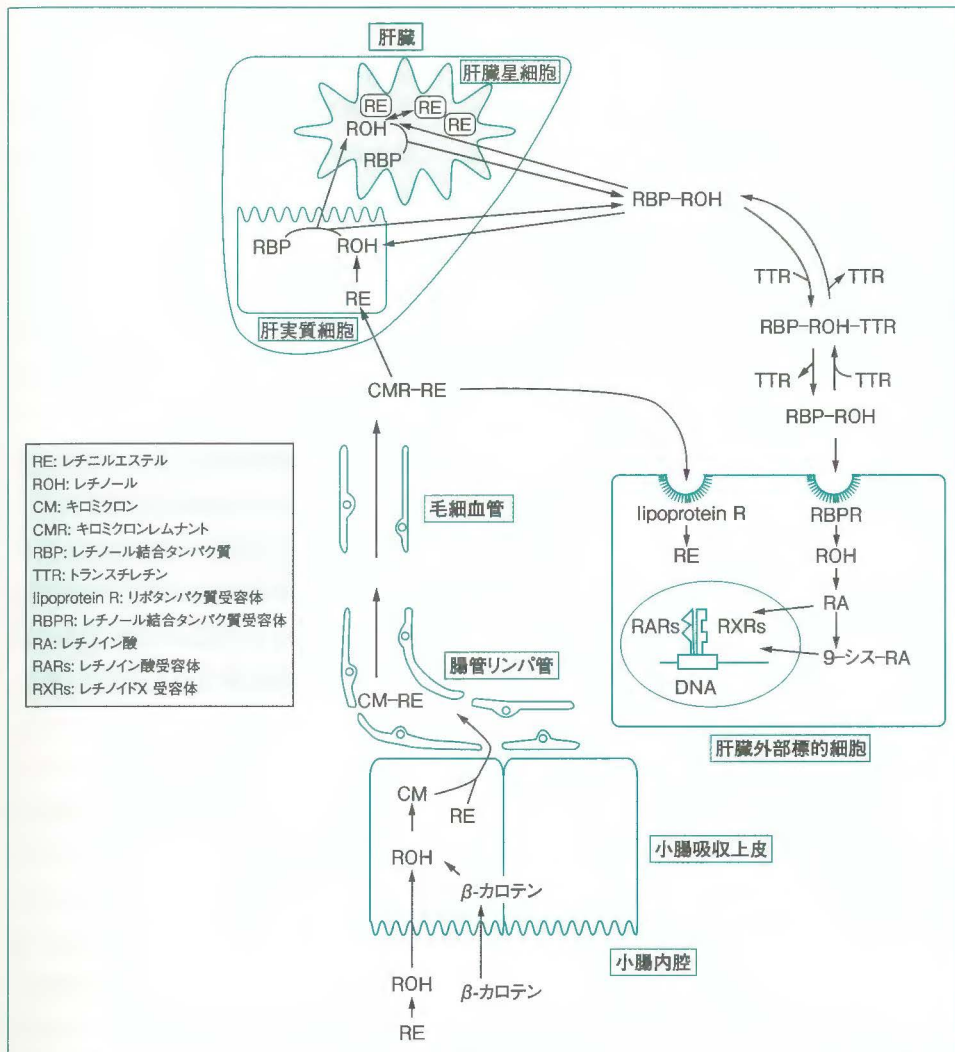
り、ワモンアザラシの飼育用の巣穴を破壊してアザラシを捕獲することもある。

春の月(3月~5月)には、母親グマが子供たちを養うために捕獲するためのアザラシが豊富である。しかし、晩

夏になると海の氷はほとんどが消え去り、アザラシが分散してしまっ、クマにとって食物が不足してくる。そうするとクマは陸上に上がって人家の近くにしばしばやってくる。しかし、メスと子供たちは、お互い同士あるいはオスと安全な距離を保つことによって、遭遇することを避けている。

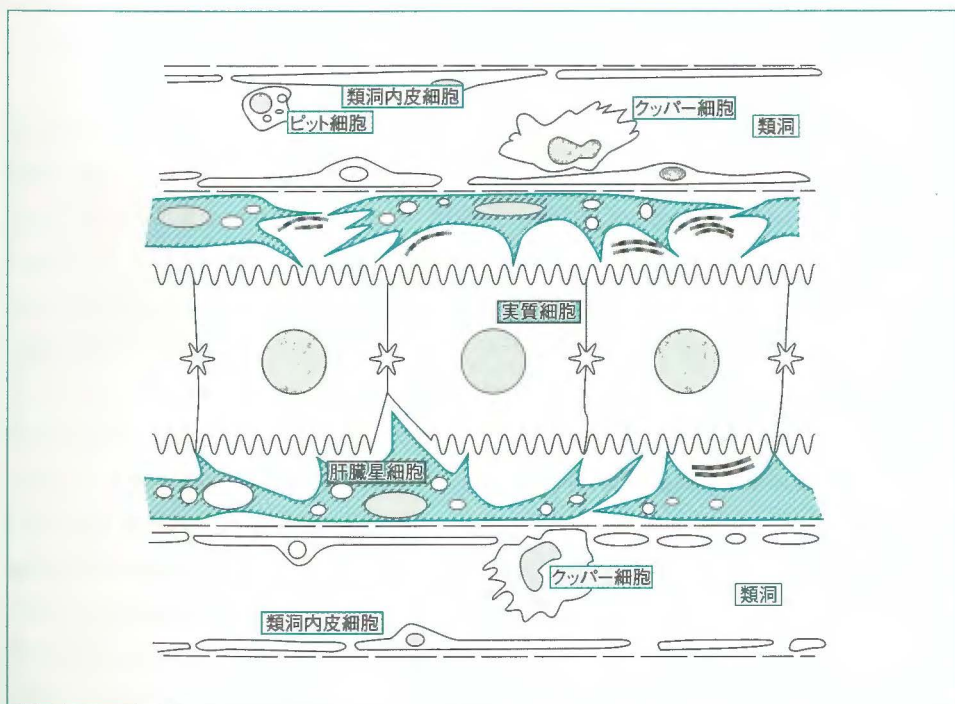
晩春(4月~6月)になると交尾のためにオスとメスが一緒になる。それぞれのオスは1匹あるいは数匹のメスと交尾する。妊娠したメスは11月~12月にかけて海岸の近くに積もった雪の中に巣穴を掘って、12月~1月にかけて1~3匹の赤ちゃんを産む。この巣穴の中で、母親グマは冬眠しているわけではない。雪を食べてわずかに水分を摂取する以外は食物を摂取することなく、それまでに貯めた皮下脂肪をエネルギー源として生き、濃厚な乳(脂肪分が30%ある。ちなみにヒトでは4%である)を子供に与えて育てる。春が来ると母親と子供は食物を探して巣穴を去る。メスは1年おきに交尾して、25歳まで妊娠できることがわかっている。

後述(最近の研究から)するように、ホッキョクグマは大量のビタミンA(図3, 図4)を肝臓星細胞(図5)に貯蔵している。ホッキョクグマは食物連鎖の中で限られた食物(アザラシなどビタミンAを肝臓にやはり大量に貯蔵している動物)を食べざるをえないため、食物とともに大量のビタミンAを摂取している。よって、大量のビタミンAを摂取しても生体が耐えられるように、ビタミンA中毒(過剰症)にならないように進化してきたと考えられる。



食物中のレチニルエステル (RE) は小腸内腔で加水分解されてレチノール (ROH) となり吸収上皮によって吸収される。カロテンは小腸吸収上皮に吸収されそこでレチノールとなる。小腸吸収上皮のなかでレチノールは脂肪酸と反応してエステルを作りキロミクロン (CM) に組み込まれる。キロミクロンは腸管リンパ管を通過して大循環に達し毛細血管内でキロミクロンレムナント (CMR) となる。キロミクロンレムナントは吸収したレチノールのほとんどを含み、主として肝実質細胞にまず取り込まれる。肝実質細胞内でレチニルエステルはすばやくレチノールに加水分解され、レチノール結合タンパク質 (RBP) と結合する。レチノールとレチノール結合タンパク質の複合体は分泌されて肝臓星細胞 (次項で説明する) に送られる。星細胞はビタミンAを主としてレチニルパルミテートとして貯蔵し、細胞の外にはレチノールとレチノール結合タンパク質の複合体の形で分泌する。ほとんどのレチノール、レチノール結合タンパク質複合体はトランスチレチン (TTR) と可逆的に結合している

図4 生体におけるビタミンAの吸収、輸送、貯蔵、利用



肝臓星細胞は、実質細胞と類洞内皮細胞との間に存在する細胞で、生理的条件下では生体の総ビタミンA量の約80%をレチニルエステルとして貯蔵している。星細胞は表面にRBPに対する特異的受容体を発現していて、レチノール-RBP複合体をこのRBPに対する受容体を介したエンドサイトーシスによって取り込み、また星細胞から直接レチノール-RBP複合体が分泌される。星細胞はビタミンAのホメオスタシスの制御において重要な役割を果たしている。肝小葉 (肝臓の機能的・構造的単位) を構築している肝細胞索は実質細胞から成り立っている。内皮細胞は類洞を形成している。クッパー細胞は組織マクロファージで単球-マクロファージ系に属する。ビット細胞はナチュラルキラー活性を持つ

図5 肝臓星細胞 (ビタミンA貯蔵細胞)



スバルバル群島(矢印)は北緯80°にあつてノルウェー領に属し、夏でも表面の約70%は氷河で覆われている。ほぼ日本の九州と四国を合わせた面積で、約1,000人が住んでいる。群島中で最大の島がスピッツベルゲン島である。なお、その西にある世界最大の島(面積217万km²)がグリーンランドである

図6 スバルバル群島とグリーンランド

ために小さな船に乗って北極圏に出かけていき、ホッキョクグマやアザラシを捕獲して、これらの動物の肝臓には大量のビタミンAが貯蔵されていることを発見した。これらの肝臓をイヌに与えると一定の量を超えると急性ビタミンA中毒によって死亡することも確認した。このようにビタミンAには強い活性があることが明らかにされたが、その後この研究が継続され発展することはなかった。

なお、現在の知識からみると、イヌイット(エスキモー)が先祖から言い伝えられたタブーとして動物の肝臓を決して食べないのは、ビタミンAの急性・慢性中毒を避けるためとわかる。また、かつて北極探検隊がホッキョクグマの肝臓をシチューにして食べて、皮膚が剥れ落ちたり(落屑)、脳圧亢進によって時には死亡する者もいたことも、ビタミンAの大量摂取が原因であったことも理解できる(参考文献9にはバレンツが率いる北極探検隊がホッキョクグマに遭遇する例が多数記録されている)。

4 | これからどうなるのか

1973年に国際自然保護連合(International Union for Conservation of Nature and Natural Sources, IUCN)の援助のもとに、ホッキョクグマを保護するための協定が結ばれているが、現在は地球温暖化の影響によって絶滅の危機にあると言われている。温室効果ガス(二酸化炭素やメタン)の排出を減らして温暖化を防ごうという動きはあるが、北極圏に住む人々やホッキョクグマなどに対する積極的対策はいまだ樹立されていない。

5 | 最近の研究から

(1) コーレ・ロダールの先駆的研究

第二次世界大戦の始まる直前のころノルウェーにミンクを飼育する会社があった。飼料販売会社から餌を買ってミンクを育てていたが、ある日多数のミンクが死んでしまった。そこでこのミンク飼育会社は飼料会社を訴えた。訴えを受けた裁判所はミンクの大量死の原因解明を、当時、生理学教授であったコーレ・ロダールに依頼した。彼は餌の中に北極圏動物の内臓が含まれていたのに気づき、その中に多数のミンクを死に至らしめた物質が含まれていたのではないかと推測した。しかもその原因物質がビタミンAであろうと仮説をたてた。この仮説を実証する

(2) 私たちの研究

ビタミンAを大量に貯蔵している北極圏の動物は、どのような分子・細胞メカニズムでビタミンAを貯蔵しているのかを調べるため、ノルウェー領のスバルバル群島(北緯80°、図6)やグリーンランド(デンマークの自治領)において、ホッキョクグマ、ホッキョクギツネ、ヒゲアザラシ、ワモンアザラシ、スバルバルトナカイ、シロカモメ、ウミガラス、ニシツノメドリ、ライチョウなどの全身の器官および血清や胆汁のビタミンを解析した。その結果、ホッキョクグマやホッキョクギツネ、ヒゲアザラシ、シロカモメなど

食物網の上位に位置する動物は、ヒトやラットの20~100倍もの高濃度のビタミンA (レチニルエステル) を肝臓星細胞に貯蔵していることが明らかになった。これらの動物では肝臓星細胞の数 (厳密には細胞密度) はヒトやラットと同じであり、個々の星細胞のビタミンA貯蔵能力が大きいことが判明した。

(3) ビタミンAと環境汚染物質、地球温暖化の相互作用

ところで、ホッキョクグマやホッキョクギツネでは肝臓の構造や肝臓の細胞の構造が一部破壊されているものも見られた。ビタミンAを実験動物に大量に投与しても、そのようなことは生じない。一方、これらの動物のなかではビタミンAが肝臓からあふれだして腎臓での貯蔵量が増えているものがあった。実験的にはラットにPCB (polychlorobiphenyl) を投与することで同じ現象がおこることが報告されている。

近年、北半球の工業国から排出され

る環境汚染物質は北極圏に「台所の流し」のように流入し、そこに住む動物には高濃度のダイオキシンやPCBが蓄積している。上述の肝臓で観察された障害はビタミンAと環境汚染物質との相互作用や地球温暖化の影響による可能性があり、ヒトにも警告を与える所見といえる。

【参考文献】

本文中ではいちいち取り上げなかった。簡単に各文献の内容を括弧の中に紹介する。

- 1) Lopez, B. H. 石田善彦・訳、極北の夢、草思社、1993。(ホッキョクグマのみでなく、イッカクその他の動物や、北極圏に住むイヌイット、自然に関して詳しく紹介している)
- 2) Koch, T. J 喜多元子・訳、北極グマの季節、文化放送開発センター出版部、1976。(ホッキョクグマの親子の一年の生活をj紹介するスタイルを取りながら、ホッキョクグマの生態を紹介している。章は12月から始まって11月までである)
- 3) Stirling, I. *Polar bears*. University of Michigan Press, Michigan, 1988。(多くの美しいあるいはユーモラスなホッキョクグマの写真とともにこの動物の生態について解説してある)
- 4) Blix, A. S. *Arctic animals and their adaptations to life on the edge*. Tapir Academic Press, Trondheim, 2005。(北極圏に住む動物の生態や生理を写真付きで簡潔に説明してある)

- 5) IUCN/SSC Polar Bear Specialist Group, Wiig, Ø., Born, W. E. & Garner, W. G. *Polar bears: proceedings of The Eleventh Working Meeting of the IUCN/SSC Polar Bear Specialist Group, 25-27 January 1993, Copenhagen, Denmark*. IUCN-The World Conservation Union, 1995。(北極を取り巻く国々のホッキョクグマの研究者がコペンハーゲンに集まって議論した内容をまとめたものである)
- 6) Hansen, J. R. Hansson, R. & Norris, S. *The state of the European arctic environment: EEA environmental monograph No. 3*. European Environment Agency, 1996。(ヨーロッパの北極圏の環境の現状を紹介している)
- 7) *Arctic pollution issues: a state of the arctic environment report*. Arctic Monitoring and Assessment Programme, Oslo, 1997。(北極圏の汚染の状況を報告したものである。挿絵が多い)
- 8) Mehlum, F. *Birds and mammals in Svalbard*. Norsk Polarinstittut, Oslo, 1990。(スバルバル群島に住む鳥とホッキョクグマをはじめとする哺乳類を美しい写真とともに簡潔に紹介している)
- 9) *Willem Barentsz' siste reise. Etter Gerrit de Veers beskrivelse fra 1598, oversatt og med innledning*. Kommentarer og noter av Inez Boon Ulsby, Thorleif Dahls Kulturbibliotek. H. Aschehoug & Co., Oslo, 1997。(バレンツ海に名を残すオランダ人バレンツはイギリスの依頼を受けて3度にわたって北極地方を探検した。その最後の探検の記録をノルウェー語に訳したものの。探検隊とホッキョクグマの遭遇の挿絵が豊富である)
- 10) 妹尾春樹. ビタミン, **80**, 105-113 (2006).
- 11) 曾根博, 夕田光治, 東伸好, 妹尾春樹. ビタミン, **79**, 97-112 (2005).



妹尾 春樹 Haruki Senoo

秋田大学 理事 (社会貢献・国際交流担当) / 副学長

略歴: 1975年, 東京医科歯科大学医学部医学科卒業。1975年, 同大学医学部付属病院第三内科医員。1979年, 同大学大学院医学研究科 (解剖学) 入学。1984年, 同大学助手 (医学部第一解剖)。1990年, 助教授。1994年, 秋田大学教授 (医学部解剖学第二講座)。2003年, 組織替えにより医学部構造機能医学講座細胞生物学分野教授。2006年より, 現職。

専門: 細胞生物学, 形態学, 組織学

受賞歴: 東京医科歯科大学医科同窓会第1回研究奨励賞 (1987年), 日経サイエンス創刊20周年記念論文優秀賞 (1992年), 日本眼科学会雑誌最優秀賞 (2002年), 日本ビタミン学会賞 (2005年)

著書: 分担執筆 (肝臓星細胞) 『医学大辞典』 (医学書院)