

ソルト・サイエンス・シンポジウム 2022 「宇宙時代のソルトサイエンス」開催について

去る10月21日(金)に、スクエア荏原・ひらつかホール(品川区立荏原平塚総合区民会館)(東京都品川区)において、「ソルト・サイエンス・シンポジウム 2022」を開催しました。

当財団では2003年(平成15年)から、塩に関する科学的な情報を提供する本シンポジウムを毎年開催しております。今年は「宇宙時代のソルトサイエンス」をテーマに、第一線でご活躍の3名の先生方にご講演いただきました。

当日は、塩事業関係者、一般企業・大学関係者、一般の方々など、約50名にご参加いただきました。

冒頭挨拶にて、当財団の川北力理事長が財団の事業概要とこれまでのシンポジウムの実施内容と今回の講演3題についてのご紹介があり、その後講演に移りました。各講演の概要は以下の通りです。



会場入口



開演前



川北力理事長挨拶

1. 「高圧実験から見た地球・惑星内部の塩と氷」

東京大学大学院理学系研究科教授 鍵裕之先生

地球や惑星深部の氷と塩に関連した話題をご講演いただきました。具体的には、私たちが知らないいろいろな氷が存在すること、氷の種類によって塩が含まれたり含まれなかったりすること、海水の大循環によって氷と塩が地球表層の物質循環を支配することなどをご紹介いただきました。また、高圧をかけることにより常温で氷を作る実験など動画を交えて分かりやすくご紹介いただきました。



2. 「宇宙における味覚—宇宙食と塩味—」

東京大学大学院特任教授 朝倉富子先生

宇宙でのナトリウムバランスについてご講演いただきました。具体的には、宇宙空間では、味に関する感受性が低くなるという報告もあり、塩に関しては摂取量が増加してしまうこと、過剰摂取を回避するために減塩が必要となり、地上での減塩の取り組みが宇宙空間でも参考となることなどを、実験データを交えて分かりやすくご紹介いただきました。



3. 「宇宙で、そして地上で健康に生きるために」

東海学院大学教授 森田啓之先生

宇宙飛行に伴う医学的問題についてご講演いただきました。具体的には、宇宙飛行士が微小重力空間で経験する身体的影響への対処法の一部がわかってきたこと、そのことが地上における医学的問題を解決する手掛かりになる可能性を、実験データを交えて分かりやすく紹介いただきました。



各講演に対しては様々な質問があり、改めて今回の講演に対する関心の高さが伺えました。

本稿は当日の写真や質疑応答を盛り込んだシンポジウム 2022 の記事となっています。講演要旨は、開催時に発行しておりますので、それを抄録として掲載し、質疑応答とつながるように編集しました。なお、本シンポジウムの講演要旨については当 Web サイトのシンポジウムのページで公開しております。

講演－1

高圧実験から見た地球・惑星内部の塩と氷

鍵 裕之

東京大学大学院 教授

座長：吉川 直人

公益財団法人塩事業センター
海水総合研究所 所長

鍵 裕之 先生

1. はじめに

地球は表面の約7割を海水で覆われた水の惑星である。現在の海水量は 1.4×10^{21} kgで、地球の質量は 6.0×10^{24} kgである。地球の水の大部分(約97%)は海水で塩分を含む。海水の量を地球の水の量と考えると差し障りはないので、現在の地球には0.02 wt.%の水が含まれることになる。一方、地球の原料となったと考えられる隕石には、約2 wt.%の水が含まれている。隕石中に含まれる岩塩(NaCl)の中に液体の水(飽和食塩水)が流体包有物として含まれている例も報告されているが、大半の水は隕石に含まれる含水鉱物の結晶構造にOH⁻イオンや構造水(H₂O)として取り込まれている。このような隕石を実験室で加熱すると、含水鉱物が脱水反応を起こして水を放出する。地球の水は宇宙からもたらされた物質が高温で脱水することによってもたらされたと考えられている。これらの水の濃度を比較すると、現在の地球の含水率は地球の原料である隕石から2桁も減少していることがわかる。今から30年近く前、私が学生だった頃は、地球の進化過程で水が揮発して宇宙空間に散逸したと考えられていた。ところが1990年代から盛んに行われた高温高圧実験によって、地球深部を構成する物質(鉱物)が水をOH⁻イオンあるいは水素原子として取り込みうる

ことが明らかになった。地球は表層から地球中心部まで、地殻、上部マントル(410 kmまで)、マントル遷移層(660 kmまで)、下部マントル(2900 kmまで)、外核(5100 kmまで)、内核(6400 kmまで)と層構造をとる。それぞれの層に現在の海洋の何倍もの水が取り込まれるポテンシャルがある。このように地球深部には無視できない量の水(水素)が現在でも取り残されている可能性があるが、どのような構造でどれだけの量が地球深部物質に取り込まれているかといった問題は未解決である。

一方、地球内部でのハロゲン元素のふるまいも理解が進んでいる。塩素と臭素の大部分は海水中に存在し、塩素は蒸発塩や地殻流体にも多く含まれる。また、ヨウ素は藻類や有機物に富む堆積物に多く含まれている。これらの元素とは対照的にフッ素とヨウ素は海水中で著しく欠乏している。ちなみにヨウ素の生産量第一位はチリで、日本は第二位でその大半は千葉県産である。ヨウ素は生物親和性が高いため、ヨウ化メチル(CH₃I)のような有機ハロゲン化合物として有機物に富む堆積物に隔離される。一方、フッ素は電気陰性度が高く、フッ化物イオンのイオン半径はOH⁻のイオン半径ときわめて近いいため、黒雲母、白雲母、アパタイト、角閃石などの水酸基を持つ鉱物のOH⁻イオンを置き換えて結晶構造中に取

り込まれる。マントル中のハロゲン元素は海水起源の物質が地球内部にリサイクルすることによってもたらされたと考えられている。地球核にどれだけのハロゲン元素が取り込まれるかはまだ良くわかっていない。

本講演では地球や惑星深部の水と塩に関連した話題をいくつか紹介したい。

2. 水と氷の性質

氷は 0°C以上で液体の水に変化し、約 100°Cで気体の水蒸気に変化する。先に述べたとおり、地球上に存在する水の約 97%が塩分を含んだ海水なので、塩分を含まない淡水は地球上の水の 3%しかない。その淡水のうち約 7割を占めるのが氷で、地球上では氷河や永久凍土などとして存在している。我々の生活に欠かすことができない液体の水はその残りになるので、ごくわずかである。

水は、水素と酸素からなる水分子 (H₂O) からできている。水分子の中で水素原子はプラスの電荷を帯び、酸素原子はマイナスの電荷を帯びており、プラスの電荷とマイナスの電荷は引き合うため、水分子同士には引力が働く。この水分子同士をつなぐ弱い結合は水素結合と呼ばれ、水が分子量 18 の軽い分子であるにもかかわらず、同じような分子量をもつメタン、アンモニア、フッ化水素よりも有意に高い融点、沸点をもつ原因となっている。また、水分子間に働く水素結合のため、水の熱容量は大きく、熱しにくく冷めにくい性質を持つため、地球表層の温度は生物が棲みやすい環境に保たれていると言える。氷は水素結合によって水分子どうしが結びつきながら規則正しく並んだ結晶である。

雪の結晶の形を思い出してほしい。雪は六角形を基調とした構造をもつ。氷の結晶構造は、雪の結晶と同様に六角形を基調とした構造をもち、水分子に囲まれたトンネルのような空間（隙間）があることがわかる。氷の構造は隙間が大きいため、液体の水よりも密度が小さく、水に浮く。後述するが、氷には 20 種類もの多形があることが報告されていて、我々の身の回りにある氷は 1h (ワン エイチ) と呼ばれている。このような記号が付けられた理由は、1 番

目に発見された氷で、六角形 (hexagon) の形状を持っているためである。ところで、多くの物質は温度を下げると液体から固体に変化して密度が増加するが、水のように液体の方が固体よりも密度が大きい物質は珍しく、異常液体と呼ばれている。水の他にケイ素、ゲルマニウム、ガリウム、ビスマスと言った物質が液体から固体になるときに体積が膨張して密度が低下する。氷が水に浮くことは生物が繁栄することができた地球環境の形成においてきわめて重要な意味をもつ。たとえば池の水面だけが凍って、冷たい外気から水が遮蔽されることによって水が底まで凍らずに済むことは、生物の生活環境を守ることにつながる。

氷と塩に関わる重要な性質を一つ指摘しておきたい。低温で液体の水が凍るときには、塩などの溶存成分は氷 (氷 1h) の結晶構造には入らず、液体側に取り残されて塩分が濃縮されていく。一方、氷には 20 種類もの多形があり、その中で高圧で安定な氷 VII には塩化リチウム、塩化ナトリウムをはじめとする塩が mol%オーダーで構造中に取り込まれることが報告されている。

3. 氷と塩が地球表層の物質循環を支配する

化石燃料の消費によって大気中の二酸化炭素濃度は年々増加している。ハワイ島のマウナロア観測所は標高 3397 m に位置し、局所的な大気変動の影響を受けにくい地球全体の平均的な温室効果ガスの長期変動を観測することができる。2022 年 8 月時点での二酸化炭素濃度は 417.19 ppm、1 年前の 2021 年 8 月は 414.47 ppm で、二酸化炭素濃度は 1 年で 3 ppm 増加したことになる。化石燃焼によって放出された二酸化炭素がそのまま大気中に留まるとしたら、大気中の二酸化炭素濃度の増加は年間 3 ppm では収まらない。実際には大気から海水に二酸化炭素が溶解して、大気と表層海水で化学平衡が成り立っている。海水の pH は世界中どこでも約 8 の弱アルカリ性で、二酸化炭素を吸収しやすい性質をもっている。表層で二酸化炭素を吸収した海水は、深層までもぐりこんで約 2000 年かけて地球全体を大きく循環している。この大きな海水の大循環によって、二酸化

炭素や様々な物質が地球を巡ることになる。

海洋の大循環を理解する上でそもそも不思議な点がある。海水の温度は表層で高く、深層ほど低い。また、海水の塩分は表層が低く、深層が高い。これは表層海水が河川水の流入の影響を受けて塩分は薄くなるからである。海水温が高く、塩分が低いほど海水の密度は低くなるので、海水の密度は表層ほど低く、深層ほど高くなる。つまり、軽い表層海水が重い深層海水へ潜り込むことは不思議なことであるが、これには塩と氷が重要な役割を果たしている。海水が潜り込む北大西洋域は気温がきわめて低く、海水が冷やされて凍結する。既に述べたように、塩分は氷の結晶構造には取り込まれにくい性質があるため、塩分をほとんど含まない氷と、塩濃度が高く冷たい（＝密度の高い）海水に分かれる。密度の高い海水が深層へと沈み込んで、海水を大きく循環させる原動力となる。

上に述べた海水の大循環（熱塩循環と呼ばれる）は海水に溶け込んだ物質を海洋全体に運ぶだけでなく、地球表層の熱を運搬する役割も果たしている。もしも今後地球温暖化が進んで、地球表層の淡水の約7割を占める氷河が融けたりすると面倒なことが起こるかも知れない。氷河が融けて生じた水は、いずれは河川を通じて海まで流れていく。氷河から融け出す淡水が表層海水の塩濃度を下げると、表層海水が凍っても塩分濃度が高く密度の高い水が生じにくくなるので海水が深層へ潜り込めず、海水の大循環が停止してしまい、熱の輸送が停止し、ますます気候の極端化が進む可能性もある。

4. 氷の種類

氷は0°C以下の低温環境の象徴であるが、室温であっても高い圧力条件で「氷」は生成する。実験室の室温条件で液体の水に圧力をかけていくと約1万気圧（1 GPa）で水は凍結する。注意深く高圧条件を維持しながら、少しずつ圧力を上げ下げすることで、1個の結晶だけを成長させると美しい氷の単結晶を得ることができる。六角形を基調としている雪や氷の結晶が六回対称性をもつことに対して、1 GPa で得られる氷の結晶は六角形の特徴をもたない。高圧

下で出現する氷は、我々の身の回りにある氷とは水分子の配列（結晶構造）が異なるからである。1 GPa で出現する氷は氷 VI と呼ばれて、水分子が密に配列しているため、液体の水よりも密度が高く、水に沈む。室温条件で氷 VI をさらに加圧していくと2 GPa を超えたあたりでさらに水分子の配列が変化して、氷 VII に変化する。氷 VII は高温高圧状態でも安定で、深海よりもずっと深い地球深部にも存在していると考えられている。

氷は、水分子の並び方（結晶構造）の違いによって現時点で20種類の多形が確認されている。氷の多様性は、酸素原子の並び方の違いや、水素（水素結合）のネットワークの組み方から生まれる。たとえば、同じ酸素原子の並びでも、水素原子が一定方向に規則的に偏って分布する場合（秩序相）と、偏らずに無作為な方向に分布する場合（無秩序相）がある。私たちの身の回りには氷 Ih は無秩序相であるが、約60 K（約-210°C）まで温度を下げていくと秩序相の氷 XI に変化する。高圧で安定な氷 VI と氷 VII も無秩序相で、低温になるといずれも秩序相に変化する。氷に多様な種類があることの一つの理由は、秩序相と無秩序相があるためである。

5. ダイヤモンドと地球内部の水

氷には様々な多形があつて、地球深部には高温高圧で安定な氷 VII が存在する可能性があることを紹介した。ダイヤモンドは炭素原子が共有結合で結びついた最も硬い物質で、熱力学的な安定領域は地球深部150 km 以深の温度圧力条件に相当するため、天然ダイヤモンドは少なくとも上部マントルあるいはそれよりも深いところで生成された。ダイヤモンドが成長する際に、周囲を取り囲む固体（鉱物）や流体を包有物として取り込むことがある。地球深部でダイヤモンド中に取り込まれた包有物は硬いダイヤモンドの中に閉じこめられて、1 GPa 以上の高圧力を保持したまま地表に上がってくる。ある種の天然ダイヤモンドには、液体の水が包有物として取り込まれていることが古くから知られている。だとすれば天然ダイヤモンド中には液体の水が凍るだけの十分な圧力がかかっているため、高圧相の氷（VI あ

るいは VII) が発見されても不思議ではない状況であった。しかし、天然ダイヤモンドからこれらの高压氷は容易には見つからなかった。その理由の一つとして、天然ダイヤモンド中の水には KCl といった塩が溶解しているため、高压条件でも氷が結晶化しにくいと考えられる。最近になって、マントル遷移層よりも深い起源を持つ天然ダイヤモンド中に閉じこめられた氷 VII が発見され、X 線回折による結晶構造解析が発表された。

ダイヤモンドからは氷だけでなく、水を多く取り込んだ鉱物も発見されている。マントルの主要構成鉱物である橄欖（かんらん）石の高压相であるリングウッドイト（マントル遷移層の 510 km 以深、19 GPa 以上で安定）と呼ばれる高压鉱物には、OH イオンが水分子換算で約 2 wt.%（重量百分率）取り込まれることが高温高压実験によって明らかになっている。2014 年になって、ダイヤモンド中の包有物として実験室で合成されたものと同様含水リングウッドイトが発見された。氷 VII の発見と並んで、地球深部にも「水」が存在する直接的な証拠が示された。

6. 氷を見分ける

氷の種類を見分けるためには、氷の結晶の中で水分子がどのように並んでいるかを見分ける必要がある。一般的に物質の結晶構造は X 線回折パターンから知ることができる。氷についても同様に X 線回折パターンからその結晶構造を調べることができるが、X 線は電子が 1 個しかない水素原子からほとんど散乱されないため、氷の結晶構造で酸素原子の位置はわかっても水素原子の位置を決定することができない。氷の種類を見分けるためには水素原子の位置を決定することができる中性子回折という手法を用いる必要がある。X 線が原子核の回りに分布している

電子によって散乱されるのに対して、中性子は原子核によって散乱されるので、水素原子の原子核によっても大きく散乱され、水素原子の位置を決定することができる。

ところが中性子を使った実験は大規模な実験施設を利用しなければいけないので、容易ではない。中性子を作る方法は大きく分けて二つある。一つは原子炉での ^{235}U （ウラン 235）の誘導核分裂反応によって得る方法。もう一つが水銀のような重元素に大型加速器で高エネルギーに加速したプロトン（陽子）のビームをぶつけて原子核を壊す核破砕法による方法である。どちらの施設も茨城県東海村にあるが、高温高压や低温高压といった特殊条件の実験は、J-PARC MLF（大強度陽子加速器施設 物質・生命科学実験施設）のパルス中性子源で行われている。J-PARC MLF には高压下での中性子回折実験を行う PLANET と呼ばれるビームラインがあり、これまでいくつもの重要な研究成果が得られてきた。最近、我々は 2 GPa、約 -150°C （120 K）の低温高压条件下で氷 XIX と呼ばれる新しい構造の氷を発見した（Yamane et al., 2021）。20 番目に発見された最新の氷である。これまで氷の無秩序相と秩序相はそれぞれ一つずつ、一対一の関係で存在していたが、無秩序相である氷 VI には二つ秩序相（既に報告されていた氷 XV と新しく発見された氷 XIX）が存在することが明らかになった。

宇宙にも普遍的に存在する氷には、まだまだ未解明な課題がたくさん残されている。高压条件下には様々な水和物が存在するが、その複雑な構造も今後は中性子回折によって解き明かされていくことになるだろう、特に地球や惑星の深部での水や水素のふるまいは、宇宙地球科学の分野でも盛んに研究されているテーマで、今後も発展が期待される。

質疑応答



吉川直人 所長

【吉川】先生、ありがとうございました。それでは会場の方から質問を受けたいと思います。

【会場】大変面白いご講演ありがとうございました。最後の方にあった塩も水和物が 2 水から 13 水に変わることですが、それは原子構造というか、結晶構造が変わって水和水を持てるようになるのか、それとも水の方の結晶、あるいは秩序性のようなものが変わってくるのかということを質問させていただきます。

【鍵】ありがとうございます。今ご質問いただいたことは、私もまだ解決していません。というのは「できる過程」をまだ僕らは見ておらず、結果として「こういうものができた」ということがわかっている状態です。ちょうどご質問にあった「秩序」・「無秩序」ということでお答えすると、この 13 水和物は、「水素が秩序化している水」と「無秩序の水」が混在している可能性があります。これまで報告されている氷の構造を見ると、全部の水分子が「秩序化している」か、全部が「無秩序化している」かのどちらかです。このため、塩(えん)の性質を引き継いでいる部分と、氷の性質を引き継いでいる部分と、あとどちらでもない性質を引き継いでいるという可能性があります。これから取組みたいところで、大変本質的なご質問ありがとうございました。これから明らかにしたいと思います。

【会場】ありがとうございます。

【吉川】他にございますでしょうか？

【会場】氷にはいろんな形・種類があるということですが、

普通の氷では氷点は圧力あげると下がりますが、そういう傾向は、氷の種類が変わっても、同じなのでしょうか？

【鍵】圧力を上げると凝固点・氷点が下がるということは実は普段目にする「氷 Ih 型」だけなのです。微妙なものもありますけど、基本的に圧力・温度を軸に描かれた相境界は右肩上がり、つまり傾きがプラスです。それは氷がすごく特殊な性質をもち「水よりも密度が下がる」、「固体になると軽くなる」ということと密接に関係しています。そのため、ここだけがネガティブになります(スライド内提示)。先ほどお見せした「氷 VI 型」はポジティブの傾きで、これが「水に沈む」ということと実は関連しています。水に浮く氷はとても特殊と言えます。

【吉川】他にございますでしょうか？

【会場】ちょっとご専門と違うかもしれませんが、初めの方の地球の水の量のお話の中で、海水から塩を採ったり、あるいは鉱物から塩を採って、我々が塩を摂取する行動は、人口増加でその採取量がかかなり増えた時に、地球温暖化のような、何か環境に影響を与えたりすることはあり得るのでしょうか？

【鍵】おそらく無いのではないかなと思います。我々が大量に、例えば塩で建物を造るといった、つまり「(地球内)循環」から、塩を完全に隔離するような形で利用しない限り、生命とか普通の環境で塩を濃縮しても、塩はとも水に溶けやすい物質ですので、大きな「循環」の中に入っていきと思います。また海水中にはとてもたくさん塩があるということも背景にあり、その(環境への影響の)心配は多分ないのではと思います。むしろ先ほどお話ししたように、水・真水によって海水が薄められることによる効果の方が、環境への影響がとっても大きいと思っています。

【吉川】私から少しお聞きしたいのですが、最後の方にあった NaCl が 13 水和物になるということは、私たち塩に携わる者として衝撃的でした。そして、塩化マグネシウム、通常 6 水和物ですが、それも結構変わるということでした。そうすると、高圧の場で、マグネシウム単体ではなくて、マグネシウム単体ではないもの(塩化マグネシウム多水和物)を何かと反応させると、反応性が違うことなどで、できるものが違うといったことが起こり得るのでしょうか？

【鍵】それは調べてないのでなんとも言えませんけれども、

構造や安定性も違うので、それは起こるかもしれません。ただ、注意しないといけないのは、この 6 水和物の場合はちょっと特殊な実験していて、この(結晶の)周りはアルコールです。アルコールなので、液体が共存していて、0.6GPa だからまだかろうじて水がいます。いろんなものを反応させるためには、溶媒となる液体、(言い換えれば)原子あるいはイオンが動きやすい液体が共存した方がいいと思います。しかし、これほどの高圧になると、周りの水(液体)は全部固体になります。そのため、ゆっくりとした反応が起こる可能性や、反応性が異なる可能性があります。固相の反応になるので、速度は遅いという気が致します。答えになっていますか？性質は違うと思います。

【吉川】ありがとうございます。それから最初のほうに隕石に水があったり、アミノ酸があったりということですが、それらはもともと隕石のものなのですか。その他の星にもそれがあるのか、或いはどこかでできて、入り込んだとは考えられないでしょうか？

【鍵】隕石の中のアミノ酸の話がありましたけど、宇宙に

おけるアミノ酸はかなり普遍的な存在で、濃度で百 ppm とか数十 ppm とか隕石の中に入っています。おそらく宇宙空間で星間分子の反応でできたもので、それが隕石に入っているということです。ただ、生物の元になる、アミノ酸が二個、三個、四個、繋がったペプチドというのは多分あまりなくて、隕石には宇宙空間でできる比較的簡単なアミノ酸が入っているということです。最近、はやぶさII が戻ってきて、確か「20 種類ぐらいのアミノ酸が見つかった」という論文も出ていました。ということで地球上での汚染がない小惑星由来の試料でもアミノ酸が含まれるので、やはりアミノ酸は宇宙空間で普遍的にできたのだろうと思います。水に関して言うと、水も宇宙空間では、温度が低いので氷として普遍的に存在しています。でするので、有機物、氷・水は、宇宙空間にはかなり普遍的に存在すると考えていいと思います。

【吉川】ありがとうございます。それでは時間がきましたので、感謝を込めまして、先生に拍手を贈りたいと思います。どうもありがとうございました。

講演－2

宇宙における味覚—宇宙食と塩味—

朝倉 富子 東京大学大学院 特任教授

座長：松本 美鈴 元大妻女子大学大学院教授



朝倉富子 先生

はじめに

地動説が受け入れられるまで私たちは天(=宇宙)が動いていると信じていた。夜になると多くの星が見え一団の星座が確認できることから、宇宙には何らかのブロックのようなものがあると想像し星座が生まれたが、空の瞬きのほとんどが太陽のようなエネルギーを放出する恒星であるとは思ってもよらなかったに違いない。そのような中で星空を見ていると月や火星・水星・木星といったよく光る動きが特殊な明るい星を見出した。のちに月が地球の衛星であり、火星や水星が地球と同じ太陽を回る衛星であることが明らかとなり、19世紀には航空機の発達とともに将来は宇宙旅行も実現可能と考えるようになった。

まず手始めに地球の衛星軌道まで上がってみることを試みた。次に月に人を送り込んで帰ってくることを試みた。以上の二つのミッションは成功裡に終わったが、我々が描く宇宙旅行には程遠い状態である一方、多大な予算が必要であること、宇宙は地上とは異なり多くの課題があることが明らかとなった。

私たちは宇宙船「地球号」という特殊な惑星環境のもとで守られながら生命活動を営んでいる。「地球号」の特殊性は、地球の持つ重力加速度(=9.81 m/s²=1×G)、酸素の豊富な大気(1013 Pa、窒素 78%、酸素 21%、アルゴン 0.9%、二酸化炭素 0.4% 他)および地磁気による強力な放射線の減弱効果、の三点が大きい。逆に言えば、私たちが一瞬でも地球の重力圏の外に飛

び出した場合、大気が存在しないことから何らかの閉鎖環境を用意し人為的に大気を用意しなければならない。さらに、重力が微弱であるため平衡感覚が機能不全になるため視覚の優先度を上げる訓練が必要となる。しかし宇宙における人に生じる変化はこれだけではない。

生体に生じる変化は以下の8つが知られている。

1. “宇宙酔い”と呼ばれる現象；三半規管の機能不全に由来、この現象は嘔吐感・頭痛や食欲不振を伴うが訓練により対応可能
2. 上半身への体液シフト；地球の重力が原因、回避不能で慣れる以外に対策なし
3. “骨量減少および尿路結石”；微小重力下での適応反応とも考えられる、規則的な運動を行うことで変化を遅らせる
4. “筋萎縮”；規則的な運動で遅延
5. 24時間制で維持していた生活リズムの変調；規則正しいリズムを人為的に維持
6. 閉鎖空間による精神ストレス；メンタル強化訓練で克服方向
7. 高エネルギー粒子による被曝；最大の課題、現時点では厚い遮蔽物の中に閉じこもる以外対策なし
8. 体液バランスの変化；今回の主題、体内ナトリウムが増加する。

宇宙でのナトリウムバランス

公開されている論文が極めて少ないためデータの信

びよう性への疑問や詳細・再現性の不足が指摘できるが、ほぼ唯一ともいえるスペースシャトルに搭乗した宇宙飛行士のナトリウム(=食塩)バランスに関する論文を紹介する。飛行1日目から9日目まで7名の宇宙飛行士の平均データとして摂取ナトリウム量と排出ナトリウム量およびこれらの差引をグラフ化したところ、日に日に体内蓄積量が増加して行くことが示された。このデータは血液の塩濃度分析がないことから特定はできないが、血液を含めたどこかの組織にナトリウムが蓄積していることを示す。またさらに長期の場合のデータもないため詳細は不明であるが、おそらくある濃度に到達した時点で摂取量と排出量のバランスがとれるものと推定している。なぜこのように大量のナトリウムが宇宙飛行士の体内に蓄積するかについては現時点では不明である。よく言われているように宇宙(μG 環境)では塩味に関する感覚が低下するとの報告もあるが、むしろナトリウムを蓄積する組織がナトリウムを必要としているという可能性も否定できない。いずれにしても宇宙飛行士は地球に帰還した時点で急いで体内ナトリウムバランスの補正処置を行う必要がある。

宇宙空間では味の感受性が低下するという宇宙飛行士の所見がある。食塩の地上での必要量は約2g/日とされ、体液の浸透圧、pH調整、細胞内のシグナル伝達に関わっている。ISS(国際宇宙ステーション)滞在中のナトリウム出納を調べたデータによると摂取量は4000~mg/日で、排出量は3000~3500mg/日という報告がある。摂取量と排出量の差分が体内蓄積量となる。滞在中の摂取栄養素については目標値が定められており、ナトリウムの摂取は1500~3500mg/日(食塩換算量3.8~8.9g/日)とされているが実際に6000mg超が摂取された例も報告されている。このようにナトリウムは、目標値と摂取量の差が最も多い栄養素である。なぜ、ナトリウムの摂取量が多くなるのかというと、塩味がヒトでは特に食べ物の美味しさの基盤になっているからである。私たちが、日常摂取している食品の塩分含有量は、汁物では1%前後である。この濃度域は狭く、これよりも大きくても小さくても嗜好性が著しく低下する。汁物以外の食べ物では、塩分の含有量の多い食品も多数存在する。食塩の含有量を減らすと、呈味性が落ち、満足感が得られない、食

欲が減退するなど、栄養摂取の問題を引き起こす。

塩分の過剰摂取と減塩

2019年の日本人の食塩摂取量は、男性10.9g/日、女性9.3g/日である(令和元年国民健康栄養調査)。WHO(世界保健機関)は、高血圧などの予防のためには食塩の摂取量を5g/日にすることを推奨している。しかし、ほとんどの国でこの基準を上回る食塩を摂取している。日本では男性7.5g/日、女性6.5g/日(2020年食事摂取基準)を目標値に設定しているが、これに対しても、現状は40%の超過である。食塩の継続的な過剰摂取は、高血圧の原因となり、これによって引き起こされる循環器疾患などの生活習慣病の遠因となる。また、食塩摂取量と胃がんの発症率に相関が見られることから、胃がんの発症にも影響を与えていることが示唆されている。このような背景から、減塩が求められているが、先にも述べたように、単なる食塩量の低下は、長続きせず、様々な栄養的障害の原因ともなる。このような状況から、食塩代替物が求められてきたが、NaClの完全な代替物は見つかっていない。そこで塩味を増強する物質あるいは方法が探索されてきた。宇宙空間では地上よりもさらに塩味強度を高くし、且つ実際の摂取ナトリウム量を少なくすることが必要である。

グアニジニル基に着目した塩味増強物質の探索

様々な塩味増強物質或いは方法が報告されている。これらの物質についてブラインドで増強効果を調べると、ほとんどの物質は食塩とは明らかに味質が異なり、明確な有効性は認められなかったが、アミノ酸、特にL-アルギニン塩酸塩(Arg-HCl)は、塩味以外の異味が感じられず、増強効果を持っていた。そこで、Arg-HClの特徴であるグアニジニル基に着目し、数種類のグアニジニルアルコールを合成した。合成した化合物の水に対する溶解度を考慮し、3-グアニジニルプロパノール塩酸塩(3GPrOH)を官能評価により、塩味増強効果を評価した。その結果、0.9%の食塩水に10mMの3GPrOHを加えると約20%塩味強度が高まり(0.9%食塩水が1.1%食塩水と同等の塩味を示す)、且つ塩味以外の味は感じられなかった。

塩味受容体を用いた 3GPrOH の評価

五基本味(甘味、旨味、苦味、酸味、塩味)は、舌上に存在する味細胞に発現する味覚受容体によって受容される。約 20 年前に甘味、旨味、苦味に応答する味覚受容体(Gタンパク質共役型受容体)が発見された。しかし、酸味と塩味の受容体は未解明であった。近年、酸味受容の有力候補として Otopetrin1 (OTOP1)が報告された⁸。塩味に関しては、塩味の代表である NaCl のうち、Na⁺に反応する分子として上皮性ナトリウムチャネルである ENaC が、げっ歯類では塩味を受容する分子として報告されている。しかし、塩味は、Na⁺と Cl⁻の両方があって初めて「塩味」となることから、我々は、Cl⁻を受容する分子の存在を予測し、塩味の受容に関わる電位依存性クロライドチャネル Transmembrane channel-like4 (TMC4)を発見した。TMC4 は、舌の有郭乳頭と葉状乳頭に存在し、これを欠失したマウスでは、塩味に対する味神経応答が低下した。すなわち、TMC4 は、塩味をセンシングする分子である。

そこで、塩味増強効果が確認された 3GPrOH について、TMC4 を発現させた HEK293T 細胞に添加し、ホールセルパッチクランプ法を用いて細胞膜を通過する電

流を測定した。その結果、3GPrOH の添加によって細胞内に流入する電流は増加し、3GPrOH が、TMC4 が媒介する電流を増加させることが明らかとなった。このような科学的な評価方法は、心理学的要素を含む官能評価に依らない新しい方法としても注目される。

おわりに

私達人類にとって宇宙は身近なものになりつつある。夜空を見上げると、国際宇宙ステーションが飛行している光を見つめることが出来る。宇宙ステーションに一般の人が滞在し、宇宙から地球を眺めることも夢の話ではなくなった。地球上に生まれた小さな生命体である人類が、地球を飛び出して全く環境の異なる空間で生活するとき、様々な問題が生じるが、それを一つずつ解決することで、人類は新たな世界を切り拓くことが出来るであろう。私達は、どこに居ても生きるためのエネルギーを食べ物から得る必要があり、健康を維持するための栄養素を取り続けなくてはならない。今後栄養学は重要性を増し、個々人に適したテーラーメイド栄養学や宇宙栄養学なども、新たな学問領域として発展していくものと思われる。

質疑応答



松本美鈴 先生

【松本】それでは会場から、ただ今の朝倉先生のご講演に、質問やご意見をお願いいたします。

【会場】最初の方のスライドに出て来た宇宙飛行士では、ナトリウム(Na)バランスがポジティブになるということですが、それは、排泄量は変わらずにインテイクが増加しているとのことでしょうか？

【朝倉】そうではなくて、おそらく排泄量が下がっているのだと思います。

【会場】インテイクと一緒に排泄量が下がって、体内に溜まっているということでしょうか？

【朝倉】はい、そういうことになるのかと思います。ただ、インテイクも食事から計算をしているので、非常に厳密かどうか疑問が残りますが、そういうことと捉えています。

【会場】はい、ありがとうございました。

【松本】次の質問をお願いいたします。

【会場】非常に面白い話ありがとうございました。今日の話には出てこなかったのですが、食塩に関しては「慣れ」の現象がよく言われていますよね。例えば、今の宇宙の問題から言えば、非常に低塩に慣れていけば、そうはならないのかなと思ったりするのですが、「慣れ」の現象というのは、生理学的にどんな事が、起こっているのでしょうか。味蕾や、そこにある受容体への作用とか、どんなところに関係していて起こっているのでしょうか。

【朝倉】はい、ありがとうございます。「慣れ」に関しては、

イギリスで、少しずつ加工食品の塩の味、パンの食塩の含有量を減らして、食塩全体の摂取量を減らすことを試みて、それは非常に成功したと報告されています。しかし、ある程度のところまで来たらそこから先はやっぱ減らなくなってしまっています。要するに下げ止まりになっています。ですから、その「慣れ」でも、例えば食塩摂取目標量 5g/日というような「WHO の基準」も、慣れだけでは超えられないハードルではないかと考えております。それはおそらく受容体などとの関連ではなく、生理的なものではないかと。今日はお話しませんでした。味覚は、赤ちゃんの胎児の時からできている原始より形成されている感覚ですので、ある程度より少なくしたり、無くしてもいいということは、できないのではないかと私は考えています。

【会場】たまたま私は、臨床医なので、患者さんが入院されると、家庭の環境とかなり違った減塩の環境に置かれますよね。そういう人が退院して、うちへ帰ってもとの味に戻ると、とても濃いと感じられるということ、よく聞きます。そこで起こっていることはどういうことかな？と思っています。先ほどのお話で患者さんのこのような現象は、ナトリウムあるいはクロライドに対する応答性の違いと関係があるのかなと思ってお聞きしました。

【朝倉】確かに先生がおっしゃるように、ナトリウムとクロライドというのは両方必要です。今後は、クロライドの方も考えながら、慣れのような感覚がどう変わるか、そういうようなことを追求していったら良いと思っています。ありがとうございます。

【松本】他にありますか？それでは時間ですが、最後にわたくしの方から。最後のところで、塩味増強物質の 3-guanidinyl-propanol を加えた時に ENaC の応答は変わらないけど、TMC4 の応答が上がったとありました。最初に示された官能評価では、添加することによって塩味が強くなっていました。これは、受容体として塩味を感じる受容体として TMC4 の方が ENaC よりも寄与していることを示唆していると考えていいのでしょうか。

【朝倉】ありがとうございます。非常に重要なところでして、今回私たちが、たまたま合成した 3-guanidinyl アルコールもアルギニンもそうなのですが、それらは TMC4 にのみに応答しております。でも他に塩味増強効果が報告されている化合物の中には、TMC4 を増強しないも

のこともあります。ということをお考えますと、必ずしも全てのものが TMC4 に応答するというのではなく、それぞれが、ENaC または TMC4 というように、いろんな経路があるのではないかと考えています。今まで ENaC を活性化せず、

不思議に思われたものが TMC4 を活性化していたと説明できるものも、もちろん今回のようにあると思います。

【松本】ありがとうございました。それでは最後にもう一度、朝倉先生のご講演に御礼の拍手をお願いいたします。

講演－3

塩化物泉（食塩泉）の医学的効果

森田 啓之

東海学院大学 教授

座長：菱田 明

浜松医科大学名誉教授



森田啓之 先生

はじめに

1961年ユーリイ・ガガーリンによる人類初の宇宙飛行（108分間で地球1周）から60年が経過し、500人以上の飛行士が宇宙飛行を経験しました。この間、克服しなければならない多くの医学的問題が報告されました。重力酔い・平衡機能障害、起立性低血圧、筋・骨量減少、視力障害、宇宙放射線被曝、閉鎖環境によるストレスなどです。このうち前4者は、宇宙の重力環境が地上とは異なる—地上の1gと宇宙の微小重力（サイドメモ参照）—ということが原因と考えられています。さらにこれら症状は、地上の高齢者でも見られることから、「宇宙は老化のアクセラレーター」と言われており、微小重力環境に起因する医学的問題の克服は、健康年齢の延長にも貢献する可能性があります。重力環境の変化が身体に及ぼす影響は、主に重量（質量×重力）の変化による物理的影響と重力・直線加速度の感知器官である耳石前庭系を介する影響の2つに大別されます。微小重力環境下では、身体構成要素の重量がゼロになり、臓器・器官、体液が上方にシフトするとともに運動器系への負荷が減少します。私たちの身体はこのような変化に対して、適応を試みます。体重がゼロになれば筋・骨量を減らしても身体活動を維持できます。脚にたまっていた血液が上方にシフトして胸腔内血液量が増加すれば、血液量を減らし

ても心臓から駆出される血液量は確保できます。また、耳石前庭器への入力が増加すれば、その機能を低下させても姿勢を維持できることになります。微小重力環境に伴う医学的問題の多くは、これらの適応過程あるいは適応の破綻により生じるものであると考えられます。

10月21日のシンポジウムでは、微小重力環境が生理機能に及ぼす影響およびそれに対する適応および適応破綻により生じる医学的問題のうち前庭系の可塑的变化が関与する—宇宙酔い・平衡機能障害、起立耐性低下、骨・筋量減少—に関する私たちの研究を紹介させていただきます。その前に本稿では、これらの医学的問題に関する一般的な理解について、簡単に解説させていただきます。

宇宙酔い・平衡機能障害

微小重力暴露の初期に起こる最も厄介な医学的問題は、宇宙酔い（space motion sickness、宇宙動揺病）です。微小重力暴露直後、数分—数時間以内に悪心・嘔吐、頭重感、食欲不振など地上の乗り物酔いに似た症状や空間識失調を呈し、通常、1週間以内で回復します。抗動揺病薬投与や地上での訓練などの対策にもかかわらず、初回飛行の宇宙飛行士の50—70%が罹患すると言われ、ミッション初期のパフォーマンス低下の重大な原因となります。また、

今後本格化する商業宇宙飛行では、「宇宙酔いのために全然楽しめなかった」という状況が起こるかもしれません。その発症機序として、感覚混乱説（前庭入力、視覚入力、体性感覚入力のミスマッチ）や耳石機能左右非対称説等、前庭系の関与が想定されているため、微小重力環境下での前庭機能が宇宙医学研究の対象として注目されています。

ヒトは地上では空間における身体の位置や動きを、視覚入力、前庭入力、深部感覚入力により判断しています。視覚入力は重力に依存しないが、前庭入力と深部感覚入力は重力に依存します。宇宙の微小重力環境下でも体動に伴う回転加速度と直線加速度は保たれ、半規管と耳石器で感知されます。しかし、重力や頭部傾斜による耳石器への入力は欠落します。このような状態は地上ではどのような体位でも起りえない微小重力環境に特有のものです。微小重力に対する最初の適応は、このような地上とは異なる感覚情報の新たなパターンを基準とみなすことを学ぶプロセスであり、この過程で宇宙酔いが起こるといのが、感覚混乱説です。半規管機能は保たれているが耳石機能は徐々に低下するという適応とともに宇宙酔いの症状は軽減し、微小重力環境下での空間識を獲得していくと考えられています。

起立性低血圧

地上で生活する私たちにとって、姿勢変化に伴う重力方向の変化は最も日常的で最も重要な心・循環系に対する外乱です。その影響の鍵は、重力方向の変化に伴う静水圧—静止した液体の重量（質量×重力）によって生じる圧—の変化です。例えば、臥位から立位に姿勢を変えると、循環系の長軸方向と重力方向が一致するため、下半身の静水圧が増加して静脈が拡張し、約 500 mL の血液が下半身に蓄積します。その結果、起立直後の 15 秒間で胸腔内の血液量が 20%減少し、心充満が減少し、心拍出量が減少して血圧が低下します。さらに、毛細血管の濾過圧が上昇するため血管外へ血漿成分が漏出し、起立後 10–20 分で 400–500 mL の血液が失われて血圧はさらに低下します。長い進化の過程で地上の 1 g 環

境に適応してきた私たちの体には、このような心・循環系の変化を防止する循環調節機構が備わっているため、健常人では起立による血圧低下はほとんど認められません。しかし、高齢者の 30%以上に起立性低血圧—起立時の収縮期血圧低下 > 20 mmHg あるいは拡張期血圧低下 > 10 mmHg—が認められます。また、宇宙から帰還後の宇宙飛行士 40%程度に起立性低血圧が起こることが報告されています。

微小重力環境下では体液・血液の重量がゼロになり、体液・血液を下方に押し下げる静水圧差（水の高さに相当する水の重さによる圧）がなくなるため、体液・血液が上方（頭方）にシフトします。その結果、宇宙飛行士は丸くむくんだ **puffy face** と呼ばれる特徴的な顔貌になり、頭部の充血感・頭重感や鼻閉感を訴えます。逆に脚は細くなり、**bird legs** と呼ばれます。このような体液シフトは微小重力暴露後 24–48 時間で 2 L にもなると言われています [4]。上方シフトに伴う胸腔内血液量増加と胸腔内圧低下（微小重力環境下では胸壁が持ち上がり、胸郭が拡大する）による経壁圧増加により、この部位に存在する伸展受容器が刺激されて尿量が増加し、体液量・血液量が減少して新しい平衡状態になります。実際、数週間の宇宙滞在により血液量は十数%減少することが分かっています。宇宙では十分な血液量ですが、このまま還ってくると、地上では血液不足の状態となり起立性低血圧が起こります。その他の原因として、圧受容器反射（血圧をモニターして血圧を一定に保つ反射）低下や心筋萎縮などが挙げられていますが、最近、前庭—血圧反射の機能低下が重要な役割を果たしていることが報告されました。

筋・骨量減少

かつては、宇宙では地上の骨粗鬆症の 10 倍のスピードで骨密度が減少し、下腿の筋肉は 1 日 1%ずつ細くなると言われていました。しかし、軌道上の運動プログラム充実、骨吸収抑制薬投与、ビタミン D やカルシウム補充により克服されつつあるものの、月や火星への飛行を考えると、機序解明と予防法の確立は喫緊の課題です。体重がゼロになることによる使用依存的可塑性（*use-dependent plasticity*）が主

原因であることは言うまでもありませんが、最近、前庭系が筋・骨量調節に関与していることが明らかになってきたことから、宇宙での前庭機能変化が筋・骨量減少に関与している可能性が考えられるようになってきました。

前庭機能

微小重力環境下では、体動に伴う回転加速度や直線加速度による前庭入力は保たれるが、頭部の傾きによる入力は欠落します。従って、回転加速度の感知器官である半規管への入力は保たれるが、直線加速度・頭部傾斜の感知器官である耳石器への入力は減少すると考えられます。この環境において、空間での位置を認識し、種々の調節作用を行うために、前庭系は自身の機能を変化させる必要があります。

宇宙飛行に伴う前庭機能の変化については、1980年代以降 European vestibular experiments, Neurolab 計画など、多くの研究成果が発表されています [8,9]。これまでの主な報告をまとめると、①角速度の変化に対する感知閾値は変化しなかった。すなわち、半規管を介する調節は正常である。②対流が起こらない微小重力環境では Caloric test による眼振（半規管

を介する温度性眼振）が起こらないと考えられていたが、地上とほとんど変わらない眼振波形が記録された。③直線加速度の変化に対する感知閾値は、宇宙滞在中及び帰還直後に上昇した。④前庭（耳石）－眼反射によって生じる眼球反対回旋（ocular counter rolling）の調節力が低下した。これらの結果から、微小重力環境下では半規管系の機能は維持されるが、耳石系の機能は地上とは異なっていると考えられています。

おわりに

耳石器は、直線加速度・頭部傾斜の変化を感知して眼球運動（前庭眼反射、VOR）や姿勢制御（前庭脊髄反射、VSR）を調節しています。さらに最近は、起立時の血圧調節（前庭心循環反射、VCR）や筋・骨代謝にも関与してきているとの報告があり、耳石器の機能低下が宇宙飛行に伴う医学的問題に関与している可能性が議論されるようになりました。10月21日の講演では、前庭系の可塑的变化に起因する医学的問題について、宇宙研究と地上研究（サイドメモ参照）で得た私たちの成果を紹介させていただきます。

質疑応答



菱田明 先生

【菱田】森田先生、有難うございました。宇宙医学、宇宙でどんなことが我々の体に起こっているかということを知ることが、我々が宇宙で生活するようになってから必要で、私には関係無いなと思っていましたが、今日の森田先生の話をお聞きすると、宇宙で我々に起こっていることが、この地上での今の我々の高齢化社会に多く貢献する可能性を感じて、非常に感銘深く話を聞かせて頂きました。質問の時間を残していただいていますので、御質問あれば受けたいと思います。

先ずは、私の方から。キリンの血圧は非常に高いことが知られています。それは頭の方に血液を確保するために高くなっていると説明がされています。そうしますと、宇宙ではそういった重力が働かないわけですから、血圧はぐんと下がってもいいと私は思いますが、今回の話では、あまり宇宙に行っても血圧は変わらないように思われますが、それはどのように考えたらよいのでしょうか？

【森田】まず多分ストレスが違うと思います。(宇宙飛行士は)宇宙ではいろんなミッションがあって、分刻みで働いています。それが非常に大きなストレスとなっています。それから最初のスライドにも出てきましたが、ISS(国際宇宙ステーション)は90分で昼と夜が変わります。そのようなリズムの問題、それから閉鎖環境の問題、これもストレスになります。だから、一概に血圧を地上と比べて変化していない、あるいは増えたといっても、比較する対照の

バックグラウンドが全然違います。どう考えて良いかは、正直分からないのですが、宇宙で特別に「高血圧になる」とか、「低血圧になる」とかはなく、宇宙に行っても血圧ほとんど変わることもありません。

【菱田】また私から質問いたします。(日本人宇宙飛行士の)若田さんは今回五回目となりますが、宇宙へ行ったときに起こる「宇宙酔い」は、五回目になるともう起こらないと予測されるのでしょうか？行って数日すれば一応慣れるとのことですが、そういう慣れの記憶が地上に戻ってきても残っていて、今度行かれた時にそれは有効に働くと考えられるのでしょうか？

【森田】「宇宙酔い」に関しては、初回よりも二回・三回と慣れが起こると考えられています。若田さんに話を聞くと、「宇宙酔い」は最初からしてないみたいですね。若田さんには何回か実験に協力いただいたことあるのですけれども、やっぱりお元気で帰って来られます。ところがこの10月14日に帰ってきた宇宙飛行士の方に、15日に実験させてもらったのですけれども、その方に関してはもう帰って来た後へろへろでした。例えば、地上の乗り物でも酔う人もいるし、酔わない人もいます。慣れてきたら大分ましになる。それと同じように最初から酔わない人もいますね。

【菱田】基本的にはこうした記憶は残っているということなので、よろしいのでしょうか？

【森田】ただ、地上でバーチャルリアリティの訓練をいくらやっても、宇宙飛行士ほぼみんな「乗り物酔い」の薬飲んでいるのですが、飲んででもほとんど効かないみたいです。

【菱田】次の質問どうぞ。

【会場】貴重なお話を聞かせていただき、ありがとうございました。前庭系が重力に反応して、さまざまな身体的な変化が起こることでしたが、前庭系によって起こる変化は、その環境で健康になるための変化なのでしょうか？それとも前庭系そのものは1Gの条件のみで正常に働いていて、2G、3Gとか0Gの時に起こる変化は、全部体にとってはもうバグのような悪いものなのでしょうか？

【森田】おそらく最初にスライドでお見せしましたように、非常に可塑性が強いのでしょうか。可塑性が強いということは環境が変わるとその環境に慣れやすい。だから今、

私たちは 1G の環境に慣れているので、この 1G と違う 2G に行ったり、あるいはマイクロ G (ほぼ 0G) に行ったりすると戸惑っているようなバグが起ります。しかし、その環境で、二週間、あるいは二ヶ月暮らしていると、もうその 2G が、あるいはマイクロ G がネイティブな G になっていくのではないかと考えています。ただ、面白い実験があって宇宙で妊娠した動物を宇宙で育てて、地上に持ってくることをやっています。妊娠後、ちょうど前庭器官が形成される頃に宇宙で育ったマウスはもう地上に持ってきて前庭系が宇宙仕様になっているというような研究があります。ただ、どうも納得がいかず、僕たちもそれを確かめようと思って、宇宙実験じゃないですけども、2G の環境でずっと 15 代にわたって、マウスを育ててみました。2G の環境で代々 15 代にわたって育てても、1G に取り出した時にはやっぱり戸惑っておろおろして、きちんと姿勢制御ができない個体もあるのですけども、二週間もすればもう慣れてきます。受容体の遺伝子発現も 15 代目になると、1G のマウスとは変わってきますけれども、また 1G に二週間慣らすと、その変化が元に戻って来るようになります。だからどうも最初に紹介した論文というのは信用できない。ネイティブ G というのが果たしてあるのかどうかですね。それよりも、行った環境に慣れて生活できるようになるのではないかと考えています。

【菱田】もう一つ、私の方から質問します。我々のサーカディアンリズムについてですが、我々の体は一応 25 時間ぐらい、24 時間より少し長い周期で調整されていて、

それを 24 時間に調整しているのは、太陽の光であるというような話があります。ISS に乗っておられる方は 90 分ごとに (明暗が) 変わるわけですよね。宇宙空間にいる間、サーカディアンリズムはどうなるのでしょうか？

【森田】それが宇宙飛行士のリズムはかえって宇宙へ行ったらよくなります。かえって宇宙へ行くと良くなるぐらい。というのは、地上にいる間は絶えず時差を飛び越えて旅行しているわけです。旅行というか、トレーニングの為にったり、あるいは研究の為にたりして、あんまり一つのところにじっとしてない。そのことの方がずっとサーカディアンリズムを乱すようです。宇宙へ行くと、90 分で地球 1 周して明/暗となるのですけど、一応庫内のライトは 24 時間で、(明/暗) 12 時間/12 時間にしています。窓開けたら別ですけどね。そのため宇宙行った方が、リズムが良くなるという、面白いことが起きています。

【菱田】最後に、今回のお話のような非常に夢のある仕事をされていますが、宇宙医学をやっておられる上で、実際に一番苦労されることはどんなことでしょうか？

【森田】そうですね。実際に苦労することは感じたことないですね。

【菱田】楽しさの方が勝っているということですね。結構ですね。ありがとうございました。もし質問がないようでしたら、これで終わりにしたいと思います。最後にまた森田先生にあの感謝の拍手で終わりにしたいと思います。どうもありがとうございました。