

宇宙における味覚—宇宙食と塩味—

朝倉 富子

東京大学大学院農学生命科学研究科 特任教授

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 ($=9.81 \text{ m/s}^2=1\times G$)、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ぴょ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(図1)^{1,2}。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。

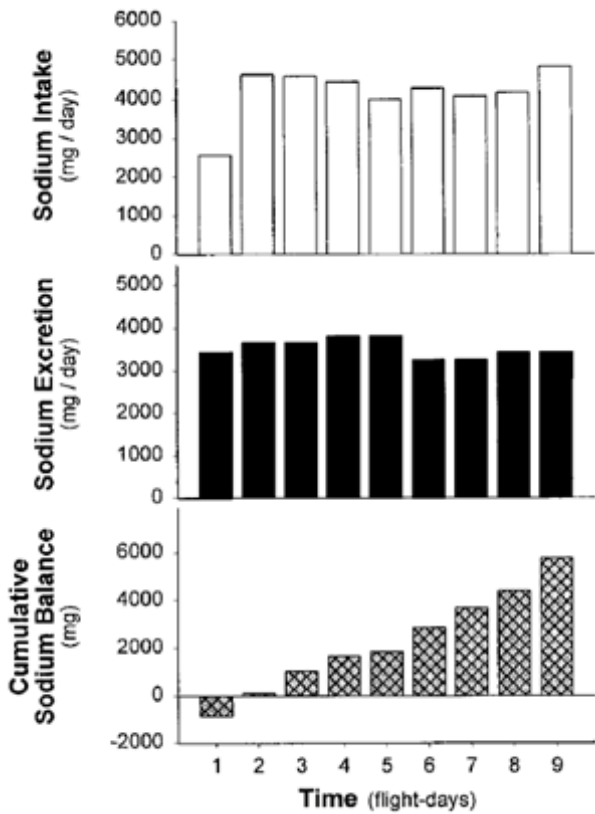


図1 宇宙飛行士7名によるナトリウムの経口摂取量と尿への排泄量の経時バランス

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、図2に示すように汁物では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。

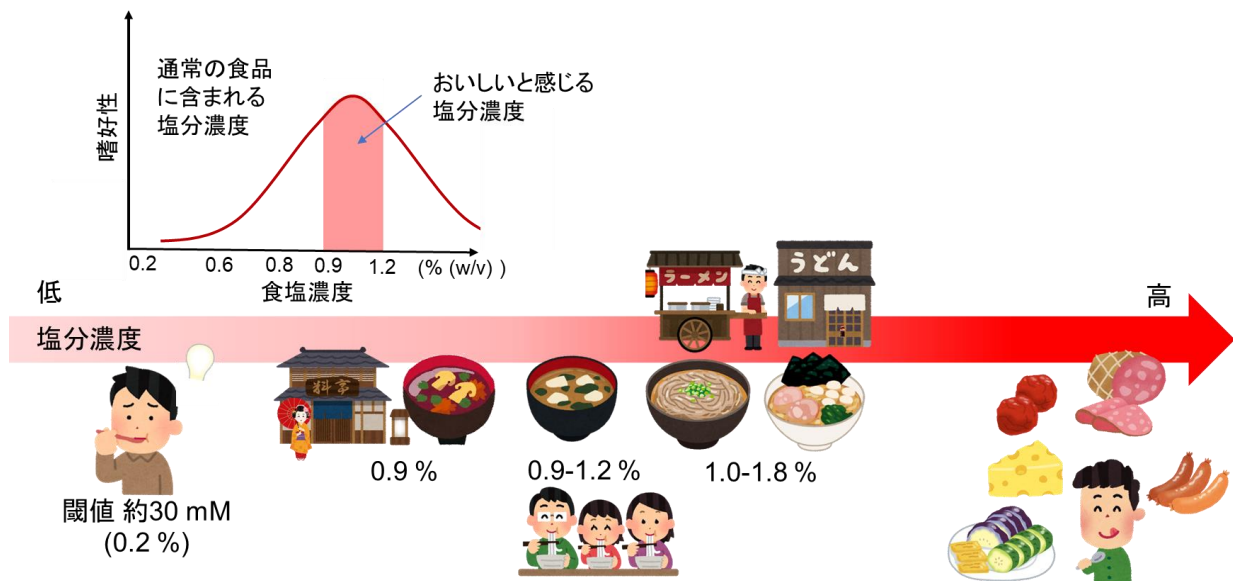


図2 食品に含まれる塩分と嗜好性

表1 特許出願された塩味増強物質

1 アミノ酸、ペプチドおよびタンパク質分解物などのオリゴペプチド混合物	ロイシン、アルギニン、ゼラチン分解物、ホエイ分解物、コラーゲン分解物
2 有機酸塩	乳酸マグネシウム、グルコン酸ナトリウム
3 アニオン性ポリマー	キチン、キトサン
4 特定の材料の抽出物	海藻エキス、乳清ミネラル、昆布エキス、野菜エキス
5 匂い成分	メチオナル、スピラントール
6 食塩の形状を変化	結晶の大きさ、結晶をコーティング

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 10.9 g/日、女性 9.3 g/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 5 g/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 7.5 g/日、女性 6.5 g/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(表1)³。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、図3に示す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 10 mM 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⁴。

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⁵⁻⁷。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⁺に応答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⁹。しかし、塩味は、Na⁺と Cl⁻の両方があ

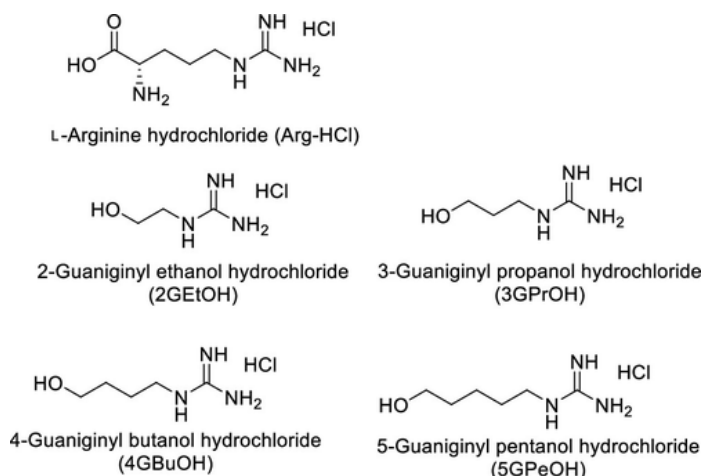


図3 合成したグアニジニル化合物

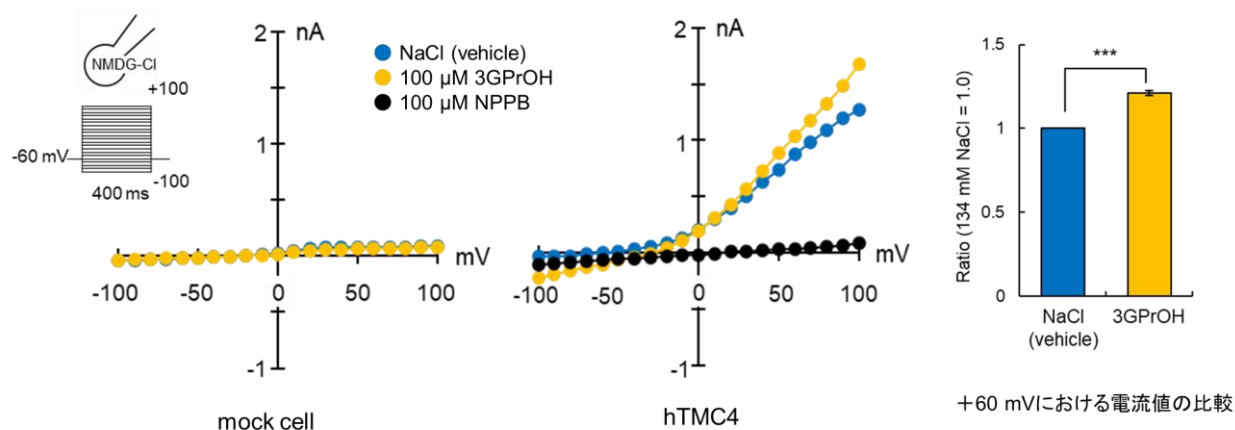


図4 3GPrOHによるTMC4媒介電流の変化

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ンネル Transmembrane channel-like4 (TMC4)を発見した¹⁰。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(図4)⁴。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けることができる。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をするとき、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できるであろう。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。

文献

1. Drummer, C., Norsk, P. & Heer, M. Water and sodium balance in space. *Am J Kidney Dis* **38**, 684–690 (2001).
2. Drummer, C. *et al.* Water and sodium balances and their relation to body mass changes in microgravity. *Eur J Clin Invest* **30**, 1066–1075 (2000).
3. 山下治之, 笠原洋一, 阿部啓子, 朝倉富子. 味覚の宇宙観-ナトリウム摂取と塩味制御の視点から. *宇宙・医学・栄養学* 68–74 (2020).
4. Kasahara, Y., Yamashita, H., Narukawa, M., Abe, K. & Asakura, T. 3-Guanidiny1 Propanol Enhances Salt Taste via TMC4-Mediated Current. *ACS Food Sci. Technol.* **2**, 1213–1216 (2022).
5. Nelson, G. *et al.* Mammalian sweet taste receptors. *Cell* **106**, 381–390 (2001).
6. Damak, S. *et al.* Detection of sweet and umami taste in the absence of taste receptor T1r3. *Science* **301**, 850–853 (2003).
7. Chandrashekar, J. *et al.* T2Rs function as bitter taste receptors. *Cell* **100**, 703–711 (2000).
8. Teng, B. *et al.* Cellular and Neural Responses to Sour Stimuli Require the Proton Channel Otop1. *Curr Biol* **29**, 3647–3656.e5 (2019).
9. Chandrashekar, J. *et al.* The cells and peripheral

representation of sodium taste in mice. *Nature* **464**, 297–301 (2010).

10. Kasahara, Y. *et al.* TMC4 is a novel chloride channel involved in high-concentration salt taste sensation. *The Journal of Physiological Sciences* **71**, 1–14 (2021).

講演者略歴

朝倉 富子（あさくら とみこ）

1982 年 お茶の水女子大学大学院家政学研究科食物学専攻修士課程修了

1996 年 農学博士（東京大学）

2005 年 跡見学園女子大学短期大学部家政学科教授

2006 年 跡見学園女子大学マネジメント学部生活環境マネジメント学科教授

2007 年 東京大学大学院農学生命科学研究科特任准教授

2012 年 東京大学大学院農学生命科学研究科特任教授 現在に至る