

研究紹介：もっとソルト・サイエンス！

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ソルト・サイエンス・シンポジウムを毎年開催してまいりましたが、2020 年 10 月 15 日に開催を予定していたソルト・サイエンス・シンポジウム 2020 は新型コロナウイルス感染拡大により、残念ながら開催を中止とさせていただきます。楽しみにされておられた皆様には大変申し訳ございませんでした。

そこで、シンポジウム 2020 で講演予定であった内容について「月刊ソルト・サイエンス情報」2020 年 11 月号から 2021 年 1 月号までの 3 回にわたり、下記の特集記事を掲載いたしました。

- ・ 11 月号 「海水から生まれる資源—新たな海水利用を目指して—」
和嶋 隆昌 千葉大学大学院 准教授
- ・ 12 月号 「長寿を支える味覚科学」 三坂 巧 東京大学大学院 准教授
- ・ 1 月号 「カルシウム・リンと健康」 深川 雅史 東海大学 教授

今回の Web-そるえんす No.20 は「研究紹介：もっとソルト・サイエンス！」と題して、上記誌面をご覧になっていない皆様にもご紹介するため、上記 3 題の特集記事を取りまとめて再構成したものです。海水・塩・ミネラルのサイエンスについて、環境・食・健康それぞれの視点からの研究が分かりやすく紹介されておりますので、ご一読いただければ幸いです。

「月刊ソルト・サイエンス情報」2020 年 11 月号掲載

海水から生まれる資源 — 新たな海水利用を目指して —

和嶋 隆昌

千葉大学大学院工学研究院地球環境科学専攻 准教授

1. はじめに

21 世紀において、資源の枯渇という問題に直面し、海洋資源の有効利用技術の開発は今世紀の重要な課題である。特に、資源に乏しく、海に囲まれている我が国では、海水中の資源を効率的に回収・有効利用するためのさまざまな研究が行われてきている。

海水は、約 96.7%が淡水であり、約 3.3%が溶存塩である（図 1）。その溶存塩のうち約 93.5%が Na、Mg、Ca、K、Cl、S、Br の 7 つの元素で占められている。海水の主成分である淡水の分離・回収、すなわち海水の淡水化は中近東の海水淡水化プラントをはじめ、様々な場所で数多く実用化されている。一方、海水からの溶存資源の工業的規模での回収は、塩化ナトリウム（食塩）およびその副産物である塩化カリウム、塩化マグネシウムなどのマグネシウム化合物、臭素に限定されている。現在まで、海水からのリチウム、ウラン、金、ホウ素などのレアメタルの回収技術に関する多くの研究がなされて

おり、著者も、海水からのリチウム回収や海洋深層水からのリン回収などの研究を進めてきた。しかしながら、海水中に大量に存在しているナトリウム（10.8 g/L）やマグネシウム（1.3 g/L）などの阻害のため、微量のリチウム（0.15 mg/L）、ウラン（3.3 μg/L）や金（0.03 ng/L）のみを海水中から分離回収することは極めて困難であり、これらの研究は未だ実用化には至っていない。

一方で、近年の中国やインドを始めとする新興国の経済成長は、エネルギー、鉱物、食糧など、あらゆる資源の確保が困難な状況を生み出しており、さらに、世界的に進行する異常気象や世界人口の増加に伴い、世界各地で深刻な食料・水不足を招いている。

このような中で著者は、海水や塩水を農業に利用するための簡易脱塩材の開発を目指して研究を進めている。海水中の溶存塩は NaCl が約 78%を占めており、この高濃度の NaCl が海水による植物の生育を阻害する。そのため、海

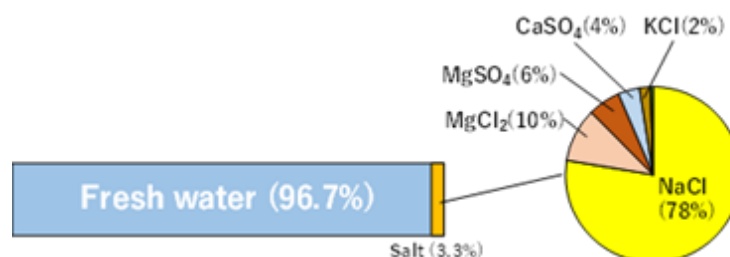


図 1 海水の組成（海水の科学と工業(1994)）

水から高濃度の NaCl を簡易に植物が生育可能なレベルに減少できれば海水の大部分を占める淡水や多くの溶存塩を植物の生育に利用可能になるのではと考えた。そこで、本稿では、新たな海水利用として、食料資源を確保するための海水の農業利用を目指した脱塩材の開発への取り組みの一部を紹介する。

2. 海水の農業利用

地球上に存在する全水資源量は約 13 億 8,600 万 km³ であり、その中でも海水が約 97.5%と最も多い。残りの約 2.5%が淡水であるが、その淡水の約 70%は南極大陸やグリーンランドなどの世界各地に存在する氷河であり、残りの約 30%もほとんどが土壌中の水分や私たちが利用できない地下水として存在する。そのため、私たち人類が実際に利用可能な淡水は最終的に約 10 万 km³ で、地球上の全水資源量の約 0.01%にすぎないといわれている。

世界の淡水利用は、灌漑利用：70 %、工業利用：23 %、家庭利用：7 %であり、日本においても、灌漑利用：66.2 %、工業利用：17.8 %、家庭利用：16.0 %、と農業への利用が最も高い（表 1）。食料資源は人間が生きていく上で必須の資源であり、その確保は急務となっている。農業における食料資源の生産では、農業用水や耕作地の確保が最も重要な要素である。近年、土壌の砂漠化など水資源の減少が顕著になっており、農業用水が容易に確保できない地域が増加している。水資源不足の解決策として、海水淡水化技術が注目されるが、これらの技術は、主に高純度が要求される飲料水利用や工業用水利用が目的であり、農業利用に対しては高コストな方法がほとんどである。海水は NaCl を高濃度を含むため作物に塩害をもたらすが、他に K・Mg・Ca や微量な Fe など作物に必要な元素を多く含んでいる。そのため、農業用水の場合、海水から多くの溶解物を除き高純度の水を製造する必要はなく、高濃度な NaCl を中心に溶存塩を大幅に除去することで農業用水として利用可能になると考えられる。

現在、厳しい水不足の状況にあるアフリカ・アジア諸国といった地域では食糧不足の問題も抱えている。水資源の確保は食料資源の確保と密接に関係しており、これらの地域で海水や塩水から農業用水が確保されれば、水不足と食糧不足が同時に解決されることが期待される。

3. 天然ゼオライトによる脱塩

脱塩材としては安価かつ豊富に存在する国産天然資源として天然ゼオライトに着目した。我が国の天然ゼオライトは、火山活動によって生じた火山灰が海底や湖底に堆積し、地下深くにおいて高圧下、地熱水の存在により変成して形成された天然鉱物で、北海道南西部から日本海側一帯にかけて分布するグリーンタフ（緑色凝灰岩）中に広く存在している。多孔質で比表面積が大きく構造中に負電荷を持つため、陽イオン交換能、吸着能、触媒能をもつ機能性物質であり、工業触媒、吸着剤、ビルダー（洗剤助剤）、乾燥剤、イオン交換剤、さらには排水処理、肥料および飼料添加材など幅広く利用されている。

ゼオライトは SiO₄ と AlO₄ が四面体構造で三次元に連なった構造で Si⁴⁺の一部が Al³⁺に置き換わっているため負に帯電していることから、構造骨格外に正電荷として Na⁺、K⁺、Ca²⁺などの陽イオンを交換可能な状態（交換性陽イオン）で保持している。この交換性陽イオンを Ca²⁺にして硬水中の Mg²⁺とイオ

表 1 淡水の利用用途（%）

Continent	Irrigation	Industry	Domestic
Africa	88	5	7
Asia	85	9	6
Europe	31	55	14
North America	49	42	9
South America	59	23	18
Total	70	23	7
Japan	66	18	16

(Tilzer (2006))

ン交換することで硬水の軟水化に利用されている。同様に天然ゼオライトにより海水中の Na^+ を交換性陽イオンにイオン交換することで脱塩ができると考えられる。また、豊富かつ安価に存在する国産天然資源として利用用途の拡大が求められていること、天然素材であるため処理による有害物質の混入の懸念がないこと、も脱塩材として着目した理由として挙げられる。

鉱物種や含まれる交換性陽イオン、陽イオン交換容量が異なる天然ゼオライトを国内5か所の鉱山から採取し、海水の脱塩処理を行ってみた(図2)。なお、海水は伊万里湾表層から採取した海水を用

いている。

海水に対し天然ゼオライトを固液比で 1 : 10 の割合で添加し 2 時間攪拌した後濾過し、再び天然ゼオライトを添加し攪拌する操作を 10 回繰り返した処理海水の組成と pH を表 2 に示す。陽イオン交換容量の高い飯坂産モルデナイトと郡山産クリノプチロライトで Na^+ が大きく減少すること、モルデナイトの処理は pH 5-6 とクリノプチロライトの処理での pH 6.8-7.3 よりも pH を酸性にさせること、クリノプチロライトではモルデナイトで減少しない Mg^{2+} も減少すること、がわかった。

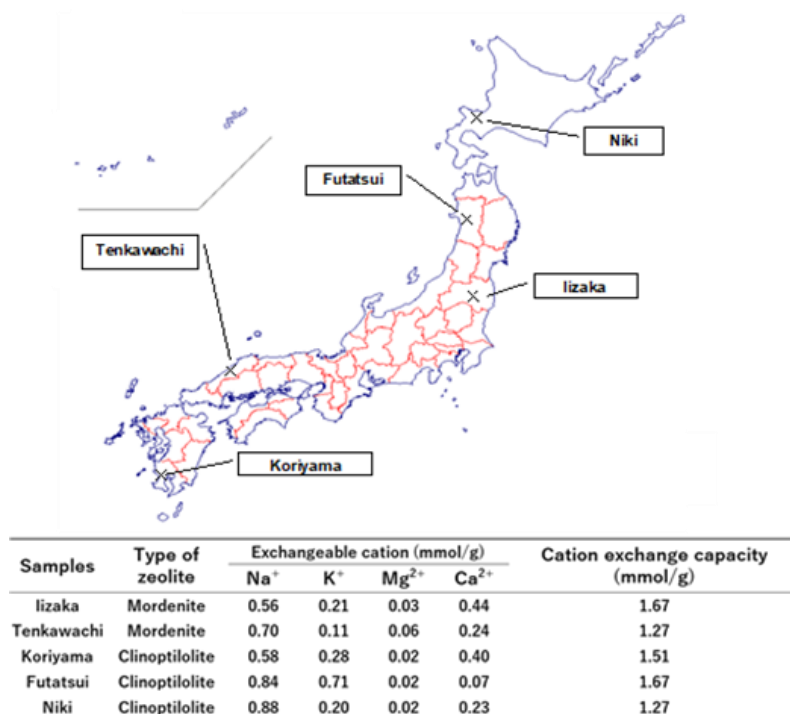


図 2 天然ゼオライトの採取場所と特性 (Wajima: Anal. Sci. (2013))

表 2 海水と処理海水の化学組成と pH

Samples	Chemical compositions (mg/L)							pH
	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	Br^-	SO_4^{2-}	
Seawater	10437	379	1296	417	18399	67	2661	7.77
Iizaka	2736	175	1164	6040	16626	57	1941	5.90
Tenkawachi	5518	153	1257	1984	13577	52	1825	4.98
Koriyama	3816	86	545	4481	13613	48	1806	7.33
Futatsui	7748	327	746	1054	14854	55	1941	6.81
Niki	6115	61	700	2365	13896	51	1969	6.84

(Wajima: Anal. Sci. (2013))

次に郡山産クリノプチロライト型天然ゼオライトの交換性陽イオンを Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} に置換して海水からの脱塩能の比較を行った。調製した置換型天然ゼオライトを用いて上記と同様の操作を 5 回繰り返した海水の組成を表 3 に示す。減少させる主ターゲットである NaCl に着目すると、 Na^+ は $\text{NH}_4^+ \rightleftharpoons \text{K}^+ \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+$ 、 Cl^- は $\text{Mg}^{2+} \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ \rightleftharpoons \text{K}^+ \rightleftharpoons \text{NH}_4^+$ の順で減少が多く、結果として Ca^{2+} 置換型が最も海水の脱塩に有効であると考えられる。

これらの結果をふまえ、Ca 型郡山産クリノプチロライト天然ゼオライトを用いて、カラムによる海水の脱塩処理を検討した。直径 14 mm、長さ 30 cm のガラスカラムに粒径 1 mm の天然ゼオライトを 40 g 詰め、100 mL の 1 M $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 溶液を 10 mL/min で 2 時間循環させた後に $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 溶液を抜き、800 mL の蒸留水を 10 mL/min で流し洗浄を行うことで Ca 置換天然ゼオライトカラムを調製した。なお、Ca 置換天然ゼオライトカラムは同様の操作で 4 本調製した。調製した Ca 置換天然ゼオライトカラムに 40 mL の海水を 4 mL/min で循環させ、120 min 経

過後、処理溶液をすべて回収し pH を pH メーターで塩分濃度を塩分濃度計で測定した。処理溶液は再び新しい Ca 置換天然ゼオライトカラムに同様の操作で循環させた。この操作を 4 回繰り返して測定を行った。海水とカラム処理海水の化学組成、塩分濃度、pH を表 4 に示す。カラムの処理回数が増えるにつれて Ca^{2+} 濃度のみが増加し、その他のイオンが減少することで、塩分濃度は徐々に減少した。pH は 6.5 付近で一定になる傾向が見られた。

水道水、海水、Ca 置換型カラムで 1 回処理した溶液 (Solution-1) と 4 回処理した溶液 (Solution-2) の 4 つの溶液を用いて、栽培試験を行った。供試作物にはカイワレ (Radish sprout) を使い、コットンを詰めた容器に種を 10 粒のせ、スプレーを用いて各溶液で種を湿らせ、室温にて 10 日間行った。その結果、海水で発芽が確認されなかったが、Ca 置換型天然ゼオライトカラムで処理した海水では発芽が確認され、1 回処理の Solution-1 より 4 回処理の Solution-2 の方がよく発芽しており、水道水とほぼ同様の様子が観察された (図 3)。

以上の結果より、天然ゼオライトを用いて海

表 3 海水と処理海水の化学組成

Samples	Chemical compositions (mmol/L)						
	Na^+	NH_4^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}
Seawater	475	-	10.3	56	11.7	55	27.8
Na^+ -type	477	-	0.3	51.2	6.8	541	28.0
NH_4^+ -type	402	66.5	0.9	51.9	9.3	562	27.6
K^+ -type	415	-	59.8	52.4	10.1	548	27.5
Mg^{2+} -type	450	-	5.7	73.7	10.4	507	27.2
Ca^{2+} -type	406	-	3.1	57.3	51.1	506	27.1

(Wajima: Int. J. GEOMATE (2019))

表 4 海水とカラム処理海水の化学組成、塩分濃度、pH

	Concentration (mg/L)						Salinity (%)	pH
	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}		
Seawater	12191	682	1360	403	21891	2724	3.40	7.79
1-times	5027	140	592	2330	12409	1520	2.15	7.48
2-times	2501	74	330	3132	9643	1136	1.45	6.85
3-times	857	33	135	2644	6036	667	0.95	6.55
4-times	405	0	70	2466	4959	504	0.66	6.73

(Wajima: Int. J. GEOMATE (2019))

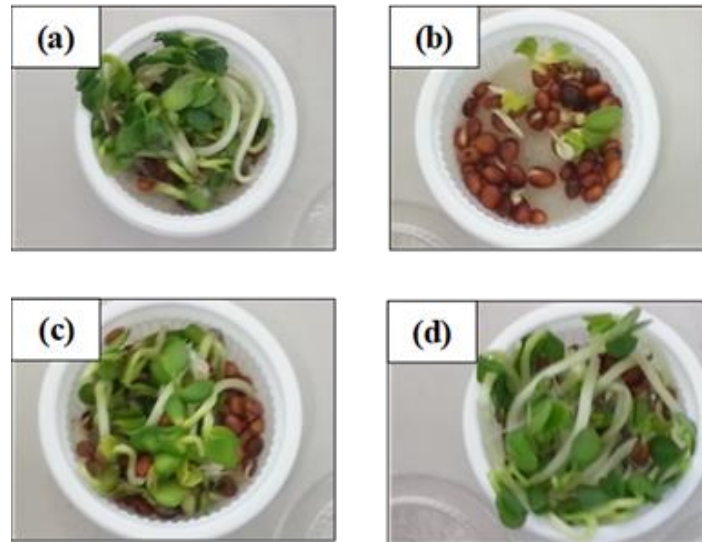


図3 カイワレ栽培試験結果：

(a) 水道水、(b) 海水、(c) Solution-1、(d) Solution-2 (Wajima: Int. J. GEOMATE (2019))

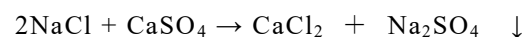
水を農業利用可能なレベルに脱塩処理できることが明らかになった。

4. 塩害土壌への適用を目指して

現在、塩害は世界の農業生産を減少させる主要因の一つとなっている。灌漑水や地下水への海水の混入、塩化ナトリウムなどの塩類の土壌中への蓄積や、台風などの強風による海水を含んだ海風の内陸への入り込み、など植物の生育が過剰の塩類によって阻害されることを塩害という。日本で発生した塩害事例の多くは、台風や高波による海水の流入、海岸近くの防風林の除去による海水の飛散、ハウスなどの施設栽培での肥料成分の土壌蓄積などによる農作物の生育阻害、などである。一方、地球的規模では、乾燥・半乾燥地域における地表面からの過度の蒸散による土壌表層への塩類集積、作物生産や飲料水確保のための不適切な灌漑による地表面への塩類集積、などが主な原因として挙げられる。土壌塩類化は自然および人為的要因によってもたらされる環境問題であり、現在、世界の農地の1/5が塩の被害により塩害土壌となっているといわれている。このような土壌塩類化にともなう農業生産量の低下は世界各地で起こっており、これからの人口増加に対応する耕作地の確保のために除塩技術が求められてい

る。

従来の塩害土壌からの除塩技術は、主に土壌の透水性を良くして過剰な塩分を天水で流し出す方法である。地表面排水や暗渠排水が挙げられ、大量の水にてリーチングする方法などがある。しかしながら、大量の水の確保、大規模な工事、適切な管理が必要となるため適用できる場所は限られる。一般的には、化学的手法を用いる場合が多く、例えば石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)を施用することで、土壌粒子表面に吸着していたNaイオンをCaイオンで交換させ、Naを中心とした塩類のリーチング、さらに、亀裂が生じることで透水性や通気性が回復し、その結果植物の植生が回復することにより土壌粒子の団粒構造が徐々に復活し改良される。利用される改良剤としては、塩化カルシウム、天然石膏、リン酸石膏、脱硫石膏、あるいは比較的溶解度の低い炭酸カルシウムがある。石膏はオランダですでに1945年に海水が氾濫した際の土壌改良に用いられている。石膏の主成分である CaSO_4 と塩化ナトリウムを混ぜると以下の反応が起きる。



この反応により塩害の原因であるNaClを溶解度が低い硫酸ナトリウムにすることで、植物への影響を減少させる。しかし、土壌の回復には

CaCl_2 とともに最終的には流し出す必要があり、降水量などの天候によって大きく左右されること、降水量の少ない乾燥地帯や半乾燥地帯などでは効果が見込めないこと、農業利用できるレベルまで除塩するためには雨季を含めて長い時間を要すること、などの要因から塩害土壌の農業利用のための早期回復には不向きである。

そこで、著者は天然ゼオライトと層状複水酸化物を用いた新たな塩害土壌改良材を検討している。粘土鉱物の一種である層状複水酸化物 (Layered double hydroxide: LDH) は陰イオン交換能をもつことから陰イオン性粘土や anionic clay とも呼ばれており、一般式は $[\text{M}^{2+}_{1-x}\text{M}^{3+}_x(\text{OH})_2]^{x+} \cdot [(\text{A}^{n-})_{x/n} \cdot m\text{H}_2\text{O}]^{x-}$ (M^{2+} :2 価の陽イオン、 M^{3+} :3 価の陽イオン、 A^{n-} :n 価の陰イオン) で表される複水酸化物である。数少ない無機陰イオン交換体であり、2 価の陽イオンと 3 価の陽イオンの水酸化物からなるホスト層と、陰イオンおよび水分子から

なるゲスト層が交互に積層した層状構造を持つことが特徴である。水酸化物基本層は 2 価金属イオンの一部を 3 価金属イオンが置換することにより正電荷をもち、その電荷を補うために中間層へ陰イオンと水分子を取り込み、電気的中性を保持している。焼成処理により焼成層状複水酸化物にすることで酸化物になり、水溶液中で陰イオンを中間層に取り込み層状複水酸化物の構造を再構築する性質を持ち、その性質を用いて様々な液中の陰イオンの除去が研究されている。塩害土壌中で天然ゼオライトによる Na^+ 、焼成層状複水酸化物による Cl^- の捕獲を行うことができれば、処理土壌での植物の育成が可能となり、捕獲された Na^+ と Cl^- は施肥の際にゼオライトと層状複水酸化物からのイオン交換で植物に影響しないレベルで徐々に放出され、肥料を保肥できる可能性が期待できる (図 4)。現在、天然ゼオライトと焼成層状複水酸化物の組み合わせで海水から農業利

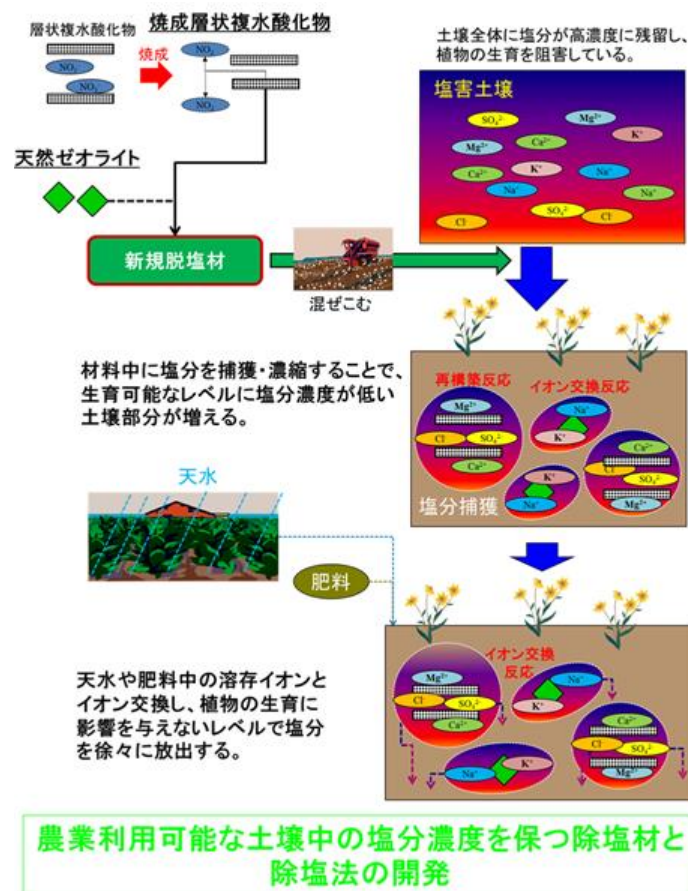


図 4 塩害土壌改良材の概略

用可能な処理液を得ることには成功している。今後、捕獲した塩分の放出挙動や模擬塩害土壌における研究を進めることで新たな脱塩材の開発を目指す。

5. おわりに

天然ゼオライトを中心に海水を農業利用可能なレベルに処理する技術を検討し、その可能性を見出してきた。現在、天然ゼオライトの海水中での脱塩メカニズムや焼成層状複水酸化物との相互反応機構などを検討している。今後、これらの知見をもとにして、海水からの高効率脱塩材や脱塩プロセスの設計、最終的には即効性のある塩害土壌改良材の開発へ繋げていきたい。

参考文献

- ・ 日本海水学会・ソルト・サイエンス研究財団 共編「海水の科学と工業」東海大学出版会
- ・ 中島敏光「海洋深層水の利用」緑書房
- ・ M. M. Tilzer: Renewable, but not inexhaustible: The fresh water supply for a growing human population、第二回オートアナライザーシンポジウム講演要旨集、4-15 (2006).
- ・ 和嶋隆昌他：海洋深層水からのリチウム回収を目的としたパラオおよびフィジー海域における海洋調査とその評価、*海洋深層水研究*、**7**、17-22 (2006)
- ・ 吉塚和治、和嶋隆昌：海水からのリチウム回収技術の開発動向、*配管技術*、**12**、14-18 (2007)
- ・ T. Wajima: Phosphate adsorption on zirconium-loaded activated carbon, and its application for phosphate recovery from deep-seawater, *Int. J. Chem. Eng. Appl.*, **7**, 388-393 (2016)
- ・ 和嶋隆昌：にがりを活用した硝酸性窒素除去材の開発、*日本海水学会誌*、**72**、218-224 (2018)
- ・ T. Wajima: Synthesis of hydrotalcite from bittern, and its removal abilities of phosphate and nitrate, *Int. J. Chem. Eng. Appl.*, **6**, 228-231 (2015)
- ・ T. Wajima: Removal behavior of nitrate using Fe-layered double hydroxide derived from bittern, *J. Ion Exch.*, **29**, 147-152 (2018)
- ・ T. Wajima: Ion exchange properties of Japanese natural zeolites in seawater, *Anal. Sci.*, **29**, 139-141 (2013)
- ・ T. Wajima: Selective Removal of Cl⁻ and SO₄²⁻ from seawater using Ag- and Pb-exchanged natural clinoptilolite zeolites, *Bull. Soc. Sea Water Sci. Jpn.*, **72**, 332-333 (2018)
- ・ T. Wajima et al.: Removal of NaCl from seawater using natural zeolite, *Toxicol. Environ. Chem.*, **91**, 21-26 (2010)
- ・ T. Wajima: Desalination of Seawater using Ca-A Zeolite for Agricultural Utilization, *Bull. Soc. Sea Water Sci. Jpn.*, **72**, 325-328 (2018)
- ・ T. Wajima: Desalination of seawater using natural zeolite for agricultural utilization, *Int. J. GEOMATE*, **16**, 21-26 (2019)
- ・ T. Wajima: Simple desalination process for making agricultural cultivation solution from seawater using natural zeolite and activated alumina, *Int. J. Sci. Technol.*, **5**, 159-166 (2019)
- ・ 和嶋隆昌他：海水からの灌漑用水製造を目指した天然ゼオライトによる簡易脱塩処理に関する基礎的研究、*素材物性学雑誌*、**22**、18-22 (2009)
- ・ T. Wajima et al.: Simple two-step process for making agricultural cultivation solution from seawater using calcined hydrotalcite and natural zeolite, *Clay Sci.*, **14**, 7-12 (2008)
- ・ D. Tsutsui, T. Wajima: Desalination of seawater using calcined hydrotalcite with different Mg/Al ratio, *ESTEEM Acad. J.*, **13**, 195-204 (2017)
- ・ D. Tsutsui, T. Wajima: Desalination property of various calcined layered double hydroxides from seawater, *Int. J. Environ. Agric. Res.*, **4**, 15-21 (2018)
- ・ T. Wajima: Desalination behavior of calcined hydrotalcite from seawater for preparing agricultural cultivation solution using natural

- zeolite, *Energy Environ. Res.*, **4**, 3-10 (2014)
- T. Wajima: Phosphorous removal ability of hydrotalcite reconstructed in seawater, *Bull. Soc. Sea Water Sci. Jpn.*, **73**, 339-342 (2019)

著者略歴

和嶋 隆昌（わじま たかあき）

千葉大学大学院工学研究院地球環境科学専攻都市環境システムコース准教授。1998年京都大学工学部資源工学科卒業。2000年京都大学大学院エネルギー科学研究科修士課程修了。2004年京都大学大学院人間・環境学研究科博士課程修了、京都大学博士（人間・環境学）。2004年佐賀大学海洋エネルギー研究センター非常勤研究員、2007年秋田大学大学院工学資源学研究科

助教を経て、2013年より現職。所属学会は、日本海水学会、日本イオン交換学会、化学工学会、資源・素材学会、環境資源工学会、骨材資源工学会、日本鉄鋼協会、軽金属学会など。1976年生まれ。

主な著書

- ・「吸着技術の産業応用ハンドブック」（リアライズ AT 株式会社）(2009) 分担執筆 <天然ゼオライトを用いた海水からの農業用栽培用水の製造>
- ・「骨材資源ハンドブック」（骨材資源工学会）(2020) 分担執筆<骨材の用途、水質汚濁、場内外排水の処理、脱水ケーキの処理、その他の骨材>

「月刊ソルト・サイエンス情報」2020 年 12 月号掲載

長寿を支える味覚科学

三坂 巧

東京大学大学院農学生命科学研究科応用生命化学専攻 准教授

1. はじめに

我々人間を含む動物は、エネルギーや必須栄養素を補給するため、毎日食事をとらなければならない。五大栄養素に分類される炭水化物、脂質、タンパク質、ビタミン、ミネラルをバランスよく、かつ摂取不足にならないような食生活を実践することが、健康を保つ秘訣の一つであるということもできる。

口の中で感じる食べ物の味は、動物において生きていくために必要な感覚であると考えられている。なぜなら、目の前にあるものが食べられるかどうかを判断する上で、口の中で感じる味覚が最も重要な判断指標となっているからである。特に野生動物においては、有害なものを摂取することは、自分自身の命に直結してしまうため、特に慎重な判断をしなければならない。したがって、すべての動物には食べ物の

味を感じる能力が備わっており、最近の研究から、哺乳類、鳥類、魚類など、脊椎動物においては比較的類似した仕組みで味を感じていることが明らかにされるようになったのである。

2. 食べ物の「味」が示す意味

食べ物の味は主に、口腔内の舌上皮に存在する専用の細胞で感じている。味を感じる細胞は味細胞とよばれ、味細胞が数十個集まった特殊な器官である味蕾（みらい）が、舌の上皮などに存在している。味細胞では基本味に分類される甘・酸・塩・苦・旨の 5 種類の味を識別し、それぞれの味が含まれていることを検出しているのである。

この 5 種類の味は、食べるべきかどうかを判断するための大きな指標となっている（図 1）。一般的にはおいしいと感じるものには生体に

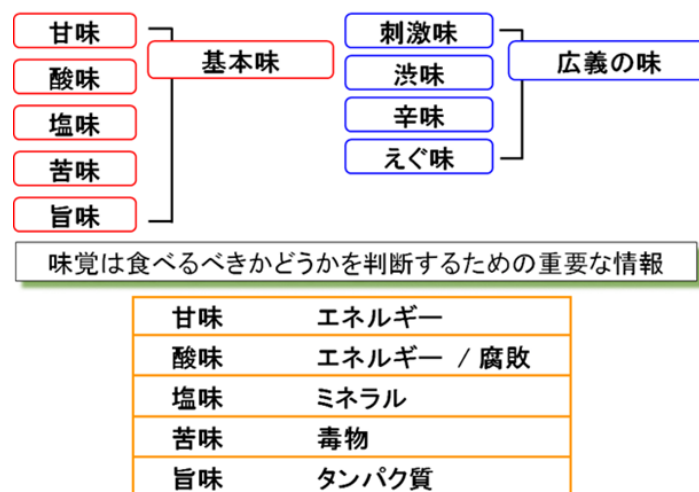


図1 食品の味が示す意味

とって有用なものが、まずいと感じられるものには有害なものが含まれている可能性がある、と理解することができる。例えば、甘味を示すものにはエネルギーが、旨味を示すものにはタンパク質が含まれているので、我々はこれらを好んで食べる。一方で、強い酸味や強い苦味はそれぞれ腐敗物や毒物のシグナルとなるため、好まれないことが多い。塩味についてはミネラルの存在を検知するための味覚であるため、薄い塩味は好まれる味となる。その一方で、海水のような濃い塩味はナトリウムの摂りすぎになってしまうため好まないという、特徴的な現象を示す味質である。

さらに、人間は基本味以外の味も感知ことができ、渋味や辛味やといった味が基本味以外の味として分類されている。これらは広い意味では味に分類されるが、味細胞で受け取られないという特徴から基本味以外の味として取り扱われている。

3. 食べ物の「好き嫌い」

上記のように、食べ物の味には嗜好・忌避のシグナルが潜在的に含まれているため、例えば甘い食品が好まれ、苦い食品が嫌われるといった現象は、本能的なものであり、なかなか避けることはできない。実際、人間の乳児を用いた昔の研究報告によると、母乳しか飲んだことのない赤ん坊であっても、初めて口にする砂糖水

は喜んで飲んでくれるのに対し、生まれて初めての経験である酸っぱいもの・苦いものに対しては泣きながら拒絶するという行動を示すことが記されている¹⁾。

それにもかかわらず、食べ物の好き嫌いは、個人ごとに大きく異なっているのが一般的である。ピーマンやセロリといった味の強い野菜もみんなが嫌いなわけではなく、好きな人も見受けられる。酸っぱい酢の物も、同じように好きな人も嫌いな人もいる。いったいどうして、このような現象が生じてしまうのだろうか。

4. 食経験がもたらす嗜好・忌避行動

この原因の一つになるのが、それぞれの人達が、生まれてから今までに何を食べてきたのかという、食に関する経験である(図2)。以前に経験した味覚刺激がその後の嗜好性にも影響を与えるといったことは感覚的にも理解できるが、学術的な研究論文でも、そのような知見が実証されている。

例えば、米国で行われた乳児を対象とした臨床研究では、塩味の嗜好性変化に関する調査結果が提示されている²⁾。生後2ヶ月、6ヶ月の時点で来院してもらい、乳児の塩味に関する嗜好性試験を実施し、その結果を2-6ヶ月の間の離乳食の食履歴によってグループ分けできるかどうかについて解析を実施した。その結果、離乳食として塩分を比較的多く含むクラッカ

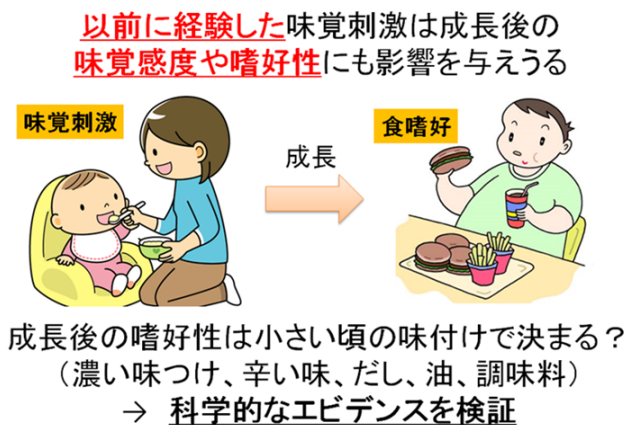


図2 食経験に起因する味嗜好性の変化

一やビスケットなどの食品を食べたことがある乳児においては、生後6ヶ月の時点で濃い食塩水を有意に好むという結果が得られたのである²⁾。

濃い味付け以外にも、辛い食べ物が異常に好きになってしまうようなことにも、小さい頃の食経験が関与している可能性は十分にある。成長後に健康的な味付けを好むようになるには、いつどのような味を味わうことが良いのかということについては、当然ながら統一的な見解は得られていない。しかしながら、少なくとも、小さい頃の食事というのが嗜好性を変更させる一つの要因であることは間違いなく、一体何が生体に起きているのか、ということを科学的に示していくことが必要であると、筆者らは考えている。

5. 食事刺激がもたらす中枢の変化

生まれてすぐの時期には、脳内における様々な神経回路網が刺激依存的に変化・発達することが知られている。感覚刺激についても同様であり、小さい頃に言語学習や絶対音感が特によく身につくというのも、その一つの例である。

食事を摂取した際に生ずる口腔内の刺激についても、神経回路の変化をもたらす一つの要因になると考えられたため、離乳期のマウスを用いて、摂食刺激がどのような変化を脳内にもたらすのかについて、我々のグループで解析を行った³⁾。

実験室で飼育しているマウスは、生後すぐの時期は母乳を飲んで育つが、生後約3週間もすると大人と同じ固形食を食べるようになる。つまり、実験室のマウスにとっては、一生を通しての食事がミルクか固形食かの2択しかない場合もあるといえよう。したがって、食事が大きく変化する離乳期の時期には脳内の味刺激を処理するような領域でドラスティックな変化が起きる可能性があると考え、それを検証する実験を実施した。

詳細な実験条件についてはここでは割愛するが、予想通り、離乳期のマウスにおいては固形食を摂取することにより、中枢で味覚に関する情報処理を行う大脳皮質の味覚野近傍において、マーカートンパク質の蓄積量が、顕著に増加することが見出されたのである(図3)。この結果は、食事の刺激が味覚の情報処理を担

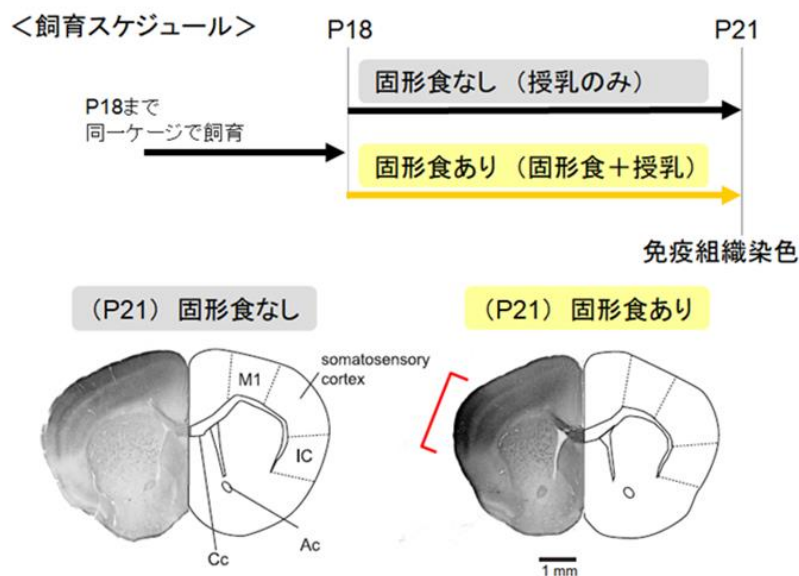


図3 固形食刺激がもたらす大脳皮質の変化

マウスが離乳期直後に固形食を摂取すると、味覚野近傍において SNAP25 というマーカートンパク質の蓄積量が顕著に増加することが見出された(右下図の赤線の領域)。

う神経回路の発達を顕著に促すことを示唆するものであり³⁾、小さい頃の食事が脳を変化させるという科学的エビデンスにつながっていくものであると予想される。

6. 加齢に伴う食嗜好の変化

食事に関する嗜好性の変化は小さい頃しか起きないのではなく、成長後にも嗜好性は大きく変化することもある。子供の頃に好きだった食べ物と、大きくなってから好きな食べ物が異なっているのは珍しいことではなく、いつの間にか苦手だった食べ物を克服している場合もある。

一方、加齢によっても、味覚の感受性や食の嗜好性が変化することも経験的に知られている。年とともに脂っこい食べ物が苦手になったり、塩味の濃いものを好むようになったりするが、その科学的な要因は実はあまり明らかになってはいない。

その要因の一つとしては、高齢者に共通してみられる身体面・精神面におけるいくつかの特徴が挙げられる(図4)。身長や体重の減少により消費カロリーが少なくなると、それに伴い食欲も低下し、サルコペニアという老化に伴う筋肉量の減少といった症状も見受けられるようになる。また様々な疾患に伴って薬剤を服用することも多くなるだけでなく、特に免疫機能の低下には注意が必要となる。精神面においても、生活環境の変化などによって孤独感を抱きやすくなったり、認知機能の低下が顕在化するなど、様々な特徴が現れてくる。

このような特徴が味覚の感受性や嗜好性変化に影響するのかしないのか、という点について、我々はいくつかのモデル動物を用いた検証を実施している。ライフステージの違いに着目した高齢マウスや加齢促進モデルマウスを用いた嗜好性変化の解析や^{4,5)}、病態モデルマウスを用いた疾病状態と嗜好性変化の相関⁶⁾など、いくつかの解析を実施しているものの、どのような因子が嗜好性変化に強く影響するのかと

いう結論を得るには至っていない。ただし、高齢マウスにおいて特定の味質の感受性が有意に低下したり⁴⁾、抗認知症薬の投与によって味覚感受性の変化が認められるなど⁶⁾、実際の人間における現象を反映していると考えられる結果も得られている。

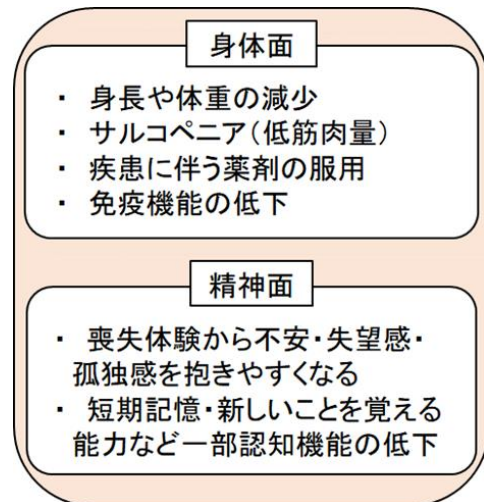


図4 高齢者に見られる身体的・精神的な特徴

7. おわりに

健康な生活を送るためには、日々の食生活が重要になってくるのは言うまでもない。「おいしく食べて健やかに」ともいわれるように、毎日の食事をおいしく食べることは、長寿への秘訣の一つと言っても過言ではない。食のおいしさに関する学術的な疑問は、実は多く残されており、そのような課題の解明へ向けた研究を、今後も進展していきたいと考えている。

参考文献

- 1) Steiner J.E. (1973) The gustofacial response: observation on normal and anencephalic newborn infants. *Symp. Oral Sens. Percept.*, 4, 254-278.
- 2) Stein, J.L., Cowart, B.J., and Beauchamp, G.K. (2012) The development of salty taste acceptance is related to dietary experience in human infants: a prospective study. *Am. J. Clin.*

Nutr., 95, 123-129.

- 3) Kawakami, S., Ohmoto, M., Itoh, S., Yuasa, R., Inagaki, H., Nishimura, E., Ito, T., and Misaka, T. (2012) Accumulation of SNAP25 in mouse gustatory and somatosensory cortices in response to food and chemical stimulation. *Neuroscience*, 218, 326-334.
- 4) Narukawa, M., Kurokawa, A., Kohta, R., and Misaka, T. (2017) Participation of the peripheral taste system in aging-dependent changes in taste sensitivity. *Neuroscience*, 358, 249-260.
- 5) Narukawa, M., Kamiyoshihara, A., Kawae, M., Kohta, R., and Misaka, T. (2018) Analysis of aging-dependent changes in taste sensitivities of the senescence-accelerated mouse SAMP1. *Exp. Gerontol.*, 113, 64-73.
- 6) Narukawa, M., Takahashi, S., Saito, T., Saido, T.C., and Misaka, T. (2020) Analysis of taste

sensitivities in *App* knock-in mouse model of Alzheimer's disease. *J. Alzheimers Dis.*, 76, 997-1004.

講演者略歴

三坂 巧（みさか たくみ）

東京大学大学院農学生命科学研究科応用生命化学専攻 准教授。1993年東京大学農学部農芸化学科卒業、1998年同大学大学院農学生命科学研究科博士課程修了。日清食品株式会社、日本学術振興会特別研究員、自然科学研究機構生理学研究所助手を経て、2005年より東京大学大学院農学生命科学研究科講師。2008年より准教授。人間が味をどのようにして感じているかというメカニズムの解明、また味覚に影響を与える物質の探索に焦点を当てた研究を行っている。1971年生まれ。

カルシウム・リンと健康

深川 雅史

東海大学医学部内科学系腎内分泌代謝内科 教授

1. 身体の中のカルシウム・リンはどこで何をしているか？

身体の中にあるカルシウム、リンはどこにあるかといえば、間違いなくすべての人がまず骨を思い浮かべるだろう。確かにその多くの部分は骨に存在し、ハイドロキシアパタイトとして硬い骨格を形成している。カルシウムもリンも、腸から正味吸収された分が、尿中に排泄されることで、身体の出納バランスを保っているが、その他に、骨から出てくる分と骨に入る分も、正常ではバランスが保たれている。

血液中のカルシウム（イオン）濃度は一定に保たれていて、細胞の機能に大切な膜電位を保持している。一方、細胞内には血中の 1 万分の 1 しかカルシウムは存在しないが、細胞の中で情報を伝えるセカンドメッセンジャーとしてホルモンの分泌、筋肉の収縮、酵素の活性化などを調節する重要な役割を果たしている。

リンも同様にほとんどが骨と軟部組織に分布しているが、細胞外液中にも存在する。細胞では、細胞膜の重要な構成成分として、細胞内では DNA, RNA の構成成分として、またカルシウム同様、細胞内セカンドメッセンジャーとしても働いている。

2. 環境の変化と進化にどう対応してきたか？

細胞の中と外では、イオンの組成が異なる。外にはナトリウムが、中にはカリウムが多く、細胞の中は生命が誕生した頃の海の組成を引き継いでいるのではないかと考えられている。

それでは、カルシウムとリンについてはどうだろうか？

海水のカルシウム濃度は体内より高く、リンは乏しい（表）。そこで、海棲動物では、身体からカルシウムを出す機能が発達しており、カルシウムを下げるホルモンであるカルシトニンが備わった。

その後、骨格を備えた生物は、海水からカルシウムの少ない淡水へ、そして陸上へと進出し、生活環境が変わってきた。そこでは細胞外液中のカルシウム（イオン）濃度は放っておくと下がってしまうため、これを維持する仕組みが必要となった。そのシステムでは、骨はカルシウムの貯蔵庫、そして供給源として働くことになる。

3. カルシウムとリンはどのように調節されているか？

ヒトの体内のカルシウム・リンの調節機構は、図に示すように、副甲状腺、腎臓、腸管、骨のネットワークで構成されている。活躍する重要なホルモンは、副甲状腺ホルモン（PTH）、腎臓で活性化されるビタミン D である。

細胞外液中のカルシウム（イオン）濃度が少しでも低下すると、副甲状腺細胞のカルシウム感受受容体がそれを検知し、副甲状腺ホルモン（PTH）が分泌される。PTH は骨に働き、そこからカルシウムとリンを血中に動員する。PTH は腎臓に働き、カルシウムを保持するとともに、リンの排泄を促進し、カルシウム濃度だけを有効に上昇させる。同時に PTH

海水	体液
H	H
O	O
Na	C
Cl	N
Mg	Na
S	Ca
K	P
Ca	S
C	K
N	Cl

表 海水中と体内に多い元素

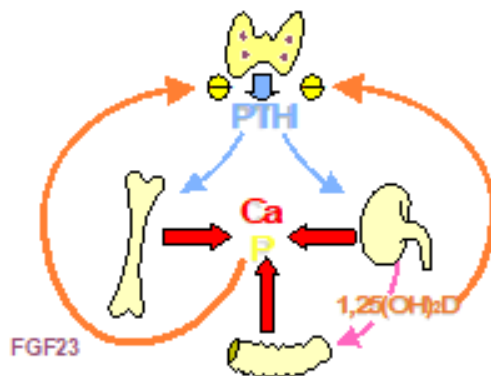


図 カルシウム・リン調節系

は腎臓におけるビタミンDの活性化を促進するので、そこでできた活性型ビタミンDが腸管に働き、カルシウムの吸収を増やすことになる。このようにして、元のレベルに血中カルシウム（イオン）濃度が戻ると、PTHの分泌は抑えられる。

人においては、カルシトニンの役割は特別な場合以外は大きくない。一方、最近では骨から分泌されて腎臓からリンの排泄を促進するFGF23という新しいホルモンも注目されている。

4. 腎臓が悪くなるとどうなるのか？

腎臓は2個あり、糸球体と尿細管を備えたネフロンを片方に100万個有する。腎臓の予備能は大きく、腎機能が悪くなったときには、残ったネフロンが頑張って、身体に入ってきた物質を尿中に排泄する。

腎機能が少し落ちると、まず骨からFGF23が

分泌されて、ネフロンあたりリンの排泄を増やす。進行すると、次に解説する活性型ビタミンDが低下してカルシウムが下がり、それに対して分泌されるPTHが、さらにリンの排泄を促進する。それでも十分排泄できないほど腎機能が低下して初めて血中のリンが上昇してくるが、身体の中の異常は初期から生じているのである。

このような異常が継続すると、血中にCalciproteinという物質が形成され、それが腎臓の障害や血管の石灰化につながるということが最近明らかになった。このプロセスを阻害するには、もう一つのミネラルであるマグネシウムが大切であることもわかり、注目されている。

また、透析患者のように長期に腎不全状態にあると、PTHの分泌が継続するために、元々、米粒大の副甲状腺が著明に腫大し、PTHの分泌が調整不能になることも大きな問題となっていたが、幸いなことに、新しい薬剤の開発により、手術を要するような重症例は少なくなりつつある。

5. 食事の中のカルシウム・リン

日本人は欧米人に比べるとカルシウムの摂取量が少ないが、これは乳製品を食べる量の差で説明されて来た。これに加えて、カルシウムの腸からの吸収に関わるビタミンD欠乏も大きな役割を果たしていることが知られている。ビタミンDは、食事中から摂取するか、紫外線により皮膚で合成される。その後、まず肝臓で、そして最終的には腎臓で活性化されて働く。欧米では牛乳やジュースにビタミンDが強化されているが、我が国ではそれはない。また、最近日焼け止めが多用されていることも影響している。さらに、蛋白尿の著しい腎臓病患者では、尿中に失われることも知られている。

さて、表に示すように、海水中にはカルシウムは豊富だが、リンは乏しい。しかし、1で述べたように、リンは生命活動に不可欠であるため、我々の先祖は、他の生物を捕食することで

リンを得るようになった。リンの多い食事を我々が美味しく感じるのは、どうも身体にその記憶があるかららしい。人のリン摂取の許容量は、極めて大きく、多量にとっても尿中に出て行ってしまうが、これは腎臓が悪い人の場合には問題となる。

食物中のリンの制限については、以前は蛋白質の制限によって行われていたが、極度の蛋白制限は低栄養につながるため、考え方が変わりつつある。食物中のリンは無機リンと有機リンに別れる。無機リンは、容易に吸収されるが、有機リンはそれを含む蛋白質から切り離される必要がある。植物由来の蛋白質では、ヒトにはリンを切断する酵素が腸管にないため、同じ量のリンを含む動物由来の蛋白質よりリンの吸収は少ない。これに加えて、種々の食品に使われている添加物由来の無機リンが大きな問題になっている。これらは、無機リンであるためほとんど吸収される。添加物が加わる製造プロセスによっては記載がない場合もある上、量についての記載は現在のところない。これらについては、欧米ではラベルに加えるような運動が起こっている。

おわりに

カルシウム、リンは、食塩に比べると注目度は低いですが、加齢に伴って、骨粗しょう症が多く発生すると同時に、腎機能の低下も進むため、今後重要度は増していくと思われる。食品表示の問題など、解決すべき問題も多く残されていることを、社会的にも認識するべきであろう。

参考文献

・深川雅史監修、濱野高行、藤井秀毅、風間順

一郎編、CKD-MBD 3rd Edition, 日本メディカルセンター、東京、2018.

- ・やさしい腎臓病患者のための骨・ミネラル代謝の自己管理～保存期・透析期から移植期まで 改訂3版 (医薬ジャーナル社:編集)
- ・深川雅史: 特別寄稿 腎と骨代謝研究の歴史と将来、腎と骨代謝 32(4): 319-323, 2019.

講演者略歴

深川 雅史 (ふかがわ まさふみ)

1958 年宮崎県生まれ。1983 年東京大学医学部医学科卒業。1990 年東京大学医学部第一内科助手。1992 年米国バンダービルト大学リサーチフェロー。1995 年宮内庁侍従職待医。2000 年神戸大学医学部附属病院助教授、代謝機能疾患治療部部長。2009 年東海大学医学部腎内分泌代謝内科教授、2020 年より同内科学系長。

専門は腎臓病、腎不全、骨カルシウム代謝異常、水電解質代謝異常、透析合併症など。所属学会は日本腎臓学会(特別顧問)、日本骨代謝学会(評議員、編集委員)、日本透析医学会(理事)。日本透析医学会並びに KDIGO の CKD-MBD ガイドライン作成並びに改訂委員を務めた。2020 年より KDIGO 理事。

2005 年日本骨代謝学会学術賞、2018 年日本腎臓財団学術賞受賞。

主な著書

- ・レジデントのための腎臓病診療マニュアル 第3版(医学書院:編集)
- ・図解:水電解質テキスト(文光堂:編集)
- ・より理解を深める! 体液電解質異常と輸液 第3版(中外医学社, 監修)