

削り昆布摂取後の尿中ヨウ素排泄量

吉田 宗 弘, 永 松 秀 麻
 (関西大学化学生命工学部栄養化学研究室*)
 (受付 2018年8月12日, 受理 2018年9月12日)

Urinary iodine excretion after ingestion of dried and thinly shaved kombu

Munehiro YOSHIDA and Shûma NAGAMATSU
*Laboratory of Food and Nutritional Sciences, Faculty of Chemistry,
 Materials and Bioengineering, Kansai University**

Summary

Urinary iodine excretion was measured in seven male university students taking 3 g of kombu product (iodine content, 2.61 mg/g). Urinary iodine excretion rate increased within 2 h after the kombu ingestion, reached a maximum at 4 to 6 h, and then returned to a base-line level at 42.8 h after the ingestion. A half-life of the excretion rate was estimated to be 9.13 h. Proportion of urinary iodine excretion to the ingested iodine was estimated to be 53.1% at 16 h, 63.6% at 30 h and 65.6% at 42.8 h after the ingestion. These results indicate that at most 70% of iodine in kombu are absorbed and rapidly excreted into urine within 2 days after the ingestion.

日本食品標準成分表からは、長昆布、真昆布、および昆布だしのヨウ素濃度が、それぞれ 2.1 mg/g, 2.0 mg/g, 54 µg/g であることが読み取れる¹⁾。食事摂取基準 2015 年版における成人のヨウ素の耐容上限量が 3.0 mg/日であることから²⁾、数値的には乾燥昆布 1.5 g あるいは昆布だし 60 mL 程度の継続摂取はヨウ素の過剰摂取に相当することになる。単発的であっても、このように昆布摂取が、数値的に耐容上限量を超えるヨウ素摂取につながるという事実は、食材としての昆布の普及を妨げている。欧米では、ヨウ素の耐容上限量を 600 ~ 1100 µg/日としている^{3,4)}。また、昆布を使用した日本製の食品がヨウ素過剰障害を引き起こした⁵⁾との理由で販売・輸入停止の処分を受ける事例がある。しかし、日本人においては、昆布に起因するヨウ素過剰障害の事例⁶⁾はきわめて稀である。日本人の高ヨウ素摂取が間欠的であることはよく知られており⁷⁻⁹⁾、このことが昆布に起因する高ヨウ素摂取による健康障害が生じない理由のひとつと考えられている²⁾。しかし、昆布に含まれるヨウ素の吸収と排泄に関する知見は少ない。ヒトを対象にした研究は、昆布主体の高ヨウ素食を摂取して 6 時間以内に尿に排泄されるヨウ素量がヨウ化カリウムを摂取した場合よりも少ないことを示し、昆布製品中のヨウ素の吸収率がヨウ化物に比較して低いことを示唆している¹⁰⁾。本研究では、昆布に含まれるヨウ素の吸収と排泄を明らかにすることを目的として、一定量の削り昆布（とろろ昆

布）を摂取した健常な男子大学生の尿中ヨウ素排泄を検討した。

対象と方法

1. 昆布の摂食試験

摂食試験は関西大学先端科学技術推進機構研究倫理委員会の承認（受付番号 16-29, 許可番号 029）を得た上で実施した。

22 歳の健常な男子大学生 7 名を被験対象者とした。対象者の体重と BMI（平均値 ± 標準偏差）は、それぞれ 63.0 ± 3.3 kg と 21.4 ± 1.3 である。対象者ごとに 3 日間の実験期間を任意に設定し、① 1 日目の起床後から 3 日目の就寝までの間、すべての排尿時に排尿時刻と尿量を記録し、尿の一部（約 10 mL）を容積 15 mL のポリ容器中に回収する、② 2 日目の午前中に削り昆布 3 g を摂食する、③ 実験期間中には供試した削り昆布以外の海藻類、および昆布だしを使用した献立を食べない、④ 実験期間中の食事記録をとる、⑤ 実験期間中にヨウ素入りのうがい薬を使用しない、ことを依頼した。

なお本研究に用いた削り昆布とは、酢に漬けて柔らかくした真昆布または利尻昆布をブロック状に固めて切断し、その断面を薄く糸状に削りとったものである。実際に供試した削り昆布は、フジッコ株式会社が製造・販売している

*所在地：大阪府吹田市山手町3-3-35（〒564-8680）

厚さ 0.02 mm の「ふじっ子純とろ[®]」であり、そのヨウ素含有量（測定は財団法人日本食品分析センター（吹田）に委託）は 2.61 mg/g であった。

2. 尿の分析

尿は 0.5% テトラメチルアンモニウムヒドロキシド溶液で適宜希釈し、含有されるヨウ素を、内部標準にテルルを用いた誘導結合プラズマ質量分析で定量した。また、クレアチニン濃度の測定は、日本医学研究所（貝塚）に委託した。

3. 解析

各尿のヨウ素濃度 (mg/L) をクレアチニン濃度 (g/L) で除し、ヨウ素濃度のクレアチニン補正值 (mg/g creatinine) を算出した。

一方、ヨウ素濃度 (mg/L) に尿容積 (L) を乗じて、ヨウ素排泄量を求めた。得られた排尿ごとのヨウ素排泄量を前回排尿からの経過時間 (h) で除すことで、この間のヨウ素排泄速度 ($\mu\text{g}/\text{h}$) を算出した。

ヨウ素排泄速度の半減期を求めるため、摂食後 4 時間以降に採取した尿について、排泄速度の自然対数変換値を摂食後経過時間に対してプロットした。この場合の、各排泄速度に対応する経過時間は、該当する尿の採尿時間と前回採取尿の採尿時間の中間値とした。これを解説したのが、排尿と排尿の間の排泄速度を一定としたときの、排泄速度と経過時間の関係を示した Fig. 1 である。すなわち、半減期を求めるためのプロットにおいては、経過時間 D に得た Sample B の排泄速度 E に対応する経過時間を、

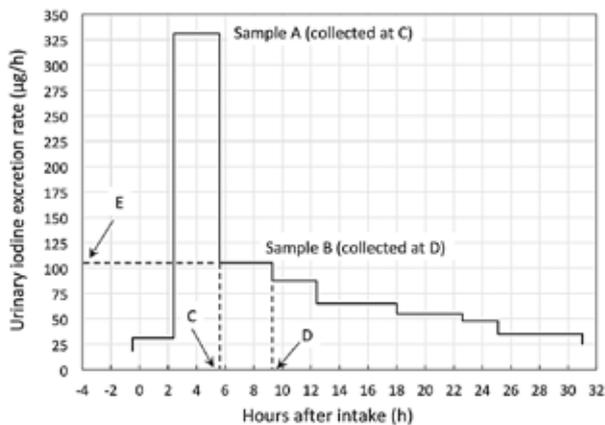


Fig. 1 Image of urinary iodine excretion rate

Amounts of iodine excretion was calculated by multiplying iodine concentration (mg/L) by urine volume (L). The iodine excretion rate ($\mu\text{g}/\text{h}$) was calculated by dividing the amounts of iodine excretion by the elapsed time (h) from the previous urination. The excretion rate between each urination and urination was assumed to be constant. In a kinetics of urinary iodine excretion, the time corresponding to each excretion rate (for example, E for sample B) was taken as an intermediate value (for example, $(C + D)/2$ for E) of the excretion times of the two urine (for example, C for sample A and D for sample B) used to obtain each excretion rate.

Sample B の前に採取した Sample A の実際の採取時間 C と Sample B の実際の採取時間 D の中間値である $(C + D)/2$ とした。

結果と考察

Fig. 2 に、昆布摂食前 5 時間から摂食後 40 時間までに排泄された尿のヨウ素濃度のクレアチニン補正值を対象者ごとに示した。早い対象者では摂食後 2 時間以内、遅い対象者でも摂食後 4 時間には尿中ヨウ素濃度は明らかに増加しており、摂食後 5 から 7 時間にはほぼ最大値に達していた。その後、尿中ヨウ素濃度は速やかに低下し、摂食後 30 時間には摂食前に近い値まで戻っていた。

Fig. 3 は、排尿間の排泄速度を一定と仮定した上で、尿中ヨウ素排泄速度の平均値と標準偏差を 2 時間ごとに摂食後 30 時間まで継時的に示したものである。なお、ここで摂食後 0 時間の排尿速度は、摂食直前に排泄された尿から得られた排泄速度とした。摂食後 2 から 8 時間までは、対象者ごとに高濃度排泄の開始が異なるため、大きなばらつきが認められたが、全体としてみれば、摂食後 2 時間以内に排泄が始まり、摂食後 4 から 8 時間に最大値になることは明らかであった。また、摂食後 20 時間以降は、個人ごとのばらつきは小さくなっていた。

Fig. 4 はヨウ素排泄速度の半減期を求めるため、排泄速度の自然対数変換値 (Y) を摂食後経過時間 (X) に対してプロットしたものである。両者の間には、 $Y = -0.0795X + 6.316$ ($R^2 = 0.724$) の強い関連が認められており、昆布由来のヨウ素の尿中排泄は一次的に減少している可能性が高いと思われた。

一方、任意の時間 t における薬物濃度 C と初期時間の薬物濃度 C_0 の関係が $[C = C_0 \cdot e^{-kt}]$ で示されることを応

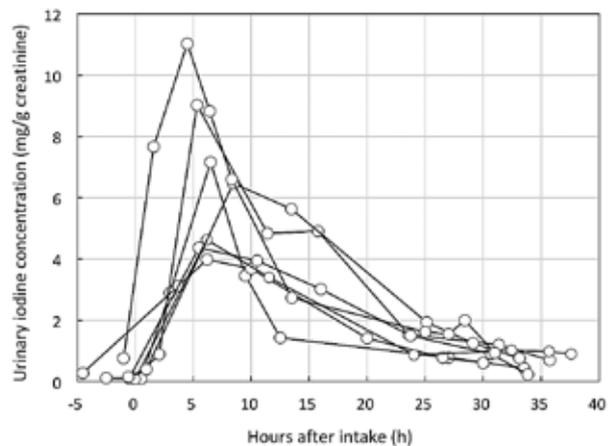


Fig. 2 Changes in urinary iodine concentration for each subject (n = 7) before and after ingesting kombu

After diluted with 0.5% tetramethyl ammonium hydroxide, urinary iodine was determined by an inductively coupled plasma mass-spectrometry. Each urinary iodine concentration was indicated by creatinine-adjusted value.

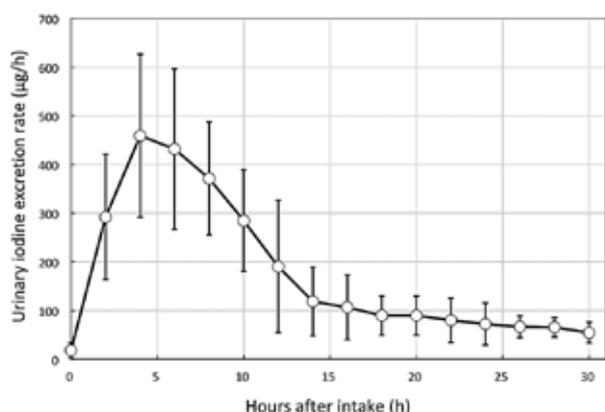


Fig. 3 Changes in urinary iodine excretion rate after ingesting kombu

Circles and bars indicate means and ranges of standard deviation ($n = 7$), respectively. The excretion rate between each urination and urination was assumed to be constant. As the value of 0 h, the excretion rate obtained from the urine collected just before ingesting kombu was used.

用し、ある時間の排泄速度 R が半分の値になる時間を T とすると、『 $R/2 = R \cdot e^{-KT}$ 』の式が成立する。この両辺を自然対数に変換した式『 $\ln R - \ln 2 = \ln R - KT$ 』より、 $T = (\ln 2)/K$ となる。 K は回帰式の傾きである 0.0759、 $\ln 2$ は 0.693 なので、排泄速度が半減する時間 T 、すなわち半減期は 9.13 (0.693/0.0759) 時間であると算出できる。さらに、摂食直前に採取した尿から得られた排泄速度の平均値 (18.40 $\mu\text{g/h}$) に戻るまでの時間は、回帰式の Y に 18.40 の自然対数である 2.912 を代入することによって、 $X = 42.8$ 時間であると求められる。

摂食後 30 時間目までは、すべての対象者について排泄速度を求めることが可能であったことから、対象者ごとに摂食後 16 時間および 30 時間までに排泄されたヨウ素量を算定した。算定においては、摂食後 0 時間の排泄速度 (実際には摂食直前の尿から得られた排泄速度) をベースライン値と考え、この値を各時間の排泄速度から減じることで、削り昆布由来のヨウ素の排泄量を求めた。その結果、摂食後 16、および 30 時間までに排泄されたヨウ素量 (平均値 \pm 標準偏差) は、それぞれ 4.16 ± 0.81 と 4.98 ± 1.03 mg と算定できた。摂食した削り昆布 3 g に含まれるヨウ素が 7.83 (2.61 \times 3) mg であったので、尿への排泄率はそれぞれ 53.1 ± 10.3 および $63.6 \pm 13.2\%$ と算定できる。さらに、回帰式から摂食後 30 から 42.8 時間後までに排泄される昆布由来ヨウ素は 0.16 mg と算定できるので、最終的に尿に排泄された削り昆布由来のヨウ素量は 5.14 ± 1.03 mg、すなわち摂食量 (7.83 mg) の 65.6 ± 13.1 (範囲: 45.0 ~ 78.9) % と推定できた。

食卓塩に添加されたヨウ素 (ヨウ化物又はヨウ素酸塩) は消化管でほぼ完全に吸収され、最終的にその 90% 以上が尿中に排泄される¹¹⁾。このことを根拠に、尿中ヨウ素は直近のヨウ素摂取量のよい指標であるとされている¹²⁾。尿

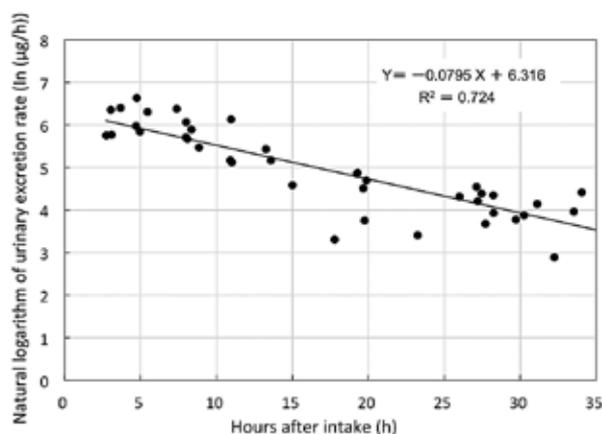


Fig. 4 Kinetics of urinary iodine excretion after ingesting kombu

The excretion rate obtained from the urine collected after 4 hour ingestion was analyzed. The time (h) corresponding to each excretion rate (ln ($\mu\text{g/h}$)) was taken as an intermediate value of the excretion times of the two urine used to obtain each excretion rate.

中排泄速度の減少が一次的と推測されることは、昆布由来のヨウ素が蓄積することなく速やかに排泄されている可能性が高いことを意味している。吸収されたヨウ素の 95% が尿に排泄されると仮定すると、排泄速度が摂食前の値に戻る摂食後 42.8 時間までのヨウ素排泄量 (5.14 mg) より、吸収量は 5.41 mg、すなわち吸収率は 69.1% と算出できる。以上より、削り昆布由来のヨウ素は、その約 70% が速やかに吸収されて、48 時間 (2 日) 以内に排泄されると結論できる。したがって、昆布製品の摂取が 1 日おきであれば、体内にヨウ素が蓄積するリスクは低いと考えられる。

先にも紹介したが、ヒトを対象にした試験では、昆布製品を主体にした高ヨウ素含量の献立を摂食した場合のヨウ素の尿への回収率がヨウ化カリウム錠剤を服用した場合の約 2 分の 1 であると報告されている¹⁰⁾。また、われわれも、昆布粉末を摂取したラットの血清、肝臓、および腎臓のヨウ素濃度が、等量のヨウ素をヨウ化カリウムとして摂取したラットの 54.2 ~ 54.8% の値であることを見出している¹³⁾。今回の結果は、これらの結果と同様に、昆布中のヨウ素の相当部分が吸収されていないことを示している。上記のヒトを対象とした試験で使われた昆布製品が佃煮、動物実験で使用したものが乾燥昆布粉末、今回のわれわれの研究で使用したものが削り昆布であることを考えると、昆布中のヨウ素は調理・加工の形態とは無関係に、ヨウ化物に比べて吸収率が低いといえるだろう。

昆布抽出液を HPLC で分画して含まれるヨウ素の形態を調べた研究は、昆布中ヨウ素の大半がヨウ化物だと報告している¹⁴⁾。しかし、われわれは、昆布中のヨウ素が水で容易に抽出できることを認めているので¹⁵⁾、かりにヨウ化物であれば今回のような低い尿への回収率にはならないと思われる。したがって、昆布などの海藻類中のヨウ素の形態については、再検討する必要があるといえる。

方法のところに記したように、摂食試験の対象者には、試験期間中、供試した削り昆布以外に海藻類や昆布だしを用いた献立を食べないことを条件に自由に摂食することを認めた。このため、食事記録からは同定できないが、試験期間中に対象者自身も気づかない高ヨウ素濃度の食材を摂取した可能性がある。実際、Fig.2を見ると、削り昆布摂食後数時間から低下し始めた尿中ヨウ素濃度が、一時的に増加する傾向を示す対象者が存在している。すなわち、今回、昆布由来のヨウ素として尿に回収した5.41 mgの中には、供試した削り昆布以外の食品に由来するヨウ素が多少含まれている可能性は否定できない。すなわち、昆布中ヨウ素の実際の吸収率は、今回の推定値（約70%）より、もう少し低いと思われる。

尿中ヨウ素濃度からヨウ素摂取量求める場合、摂取したヨウ素はほぼ完全に吸収され、その90%以上が速やかに排泄されることを前提としている¹²⁾。今回、昆布に含まれるヨウ素の吸収率を高くても約70%と推定した。この推定が正しければ、ヨウ素の主な給源が昆布である日本人に関しては、尿中ヨウ素濃度にもとづいてヨウ素摂取量を求める場合に、吸収率を加味した補正が必要であることを意味する。日本人が昆布をはじめとする海藻類から大量のヨウ素を摂取しても健康障害を起こさない理由のひとつに、高ヨウ素摂取が間欠的であることに加えて、昆布中ヨウ素の吸収率が食卓塩や飲料水から摂取されるヨウ素酸塩やヨウ化物などの無機ヨウ素化合物よりも低いことをあげることができるだろう。

参考文献

- 1) 文部科学省 (2015) 日本食品標準成分表 2015年版 (七訂)
- 2) 厚生労働省 (2014) 日本人の食事摂取基準 (2015年版) 報告書, pp. 306-310
- 3) Food and Nutrition Board, Institute of Medicine (2001) Iodine. In : Institute of Medicine, ed. Dietary reference intakes for vitamin A, vitamin K, arsenic, boron, chromium, copper, iodine, iron, manganese, molybdenum, nickel, silicon, vanadium, and zinc. National Academies Press, Washington D. C., pp. 258-89.
- 4) Nordic Council of Ministers. Iodine. In: Nordic Nutrition Recommendations 2012. Narayana Press, Copenhagen, 2014: 583-590.
- 5) Crawford BA, Cowell CT, Emden PJ, Learoyd DL, Chua EL, Sinn J, Jack MM (2010) Iodine toxicity from soy milk and seaweed ingestion is associated with serious thyroid dysfunction. *Med J Aust* 193: 413-415.
- 6) Matsubayashi S, Mukuta T, Watanabe H, Fuchigami H, Taniguchi J, Chinen M, Ninomiya H, Sasaki H (1998) Iodine-induced hypothyroidism as a result of excessive intake of confectionery made with tangle weed, Kombu, used as a low calorie food during a bulimic period in a patient with anorexia nervosa. *Eat Weight Disord* 3: 50-52.
- 7) 久田 文, 鈴木弥生, 吉永 淳 (2011) 尿中ヨウ素排泄濃度の個人内・個人間変動. *日衛誌* 66 : 711-716.
- 8) 六釜安祐実, 吉田宗弘 (2013) 健全な若年日本人成人における尿中セレン, モリブデン, ヨウ素濃度の個人内, および個人間変動, *微量栄養素研究* 30 : 93-96.
- 9) Tsubota-Utsugi M, Imai E, Nakade M, Matsumoto T, Tsuboyama-Kasaoka N, Nishi N, Tsubono Y (2013) Evaluation of the prevalence of iodine intakes above the tolerable upper intake level from four 3-day dietary records in a Japanese population. *J Nutr Sci Vitaminol* 59: 310-316.
- 10) Takamura N, Hamada A, Yamaguchi N, Matsushita N, Tarasiuk I, Ohashi T, Aoyagi K, Mine M, Yamashita S (2003) Urinary iodine kinetics after oral loading of potassium iodine. *Endocrine J* 50: 589-593.
- 11) Zimmermann MB (2012) Iodine and iodine deficiency disorders. In: *Present Knowledge in Nutrition 10th ed* (Erdman JW Jr, Macdonald IA, Zeisel SH eds), Wiley-Blackwell, Oxford, pp. 554-567.
- 12) Ji C, Lu T, Dary O, Legetic B, Campbell NR, Cappuccio FP; Sub-Group for Research and Surveillance of the PAHO-WHO Regional Expert Group for Cardiovascular Disease Prevention through Population-wide Dietary Salt Reduction (2015) Systematic review of studies evaluating urinary iodine concentration as a predictor of 24-hour urinary iodine excretion for estimating population iodine intake. *Rev Panam Salud Publica* 38: 73-81.
- 13) Yoshida M, Mukama A, Hosomi R, Fukunaga K, Nishiyama T (2014) Serum and tissue iodine concentrations in rats fed diets supplemented with kombu powder or potassium iodide. *J Nutr Sci Vitaminol* 60: 447-449.
- 14) Romarís-Hortas V, Bermejo-Barrera P, Moreda-Piñeiro A (2013) Ultrasound-assisted enzymatic hydrolysis for iodinated amino acid extraction from edible seaweed before reversed-phase high performance liquid chromatography-inductively coupled plasma-mass spectrometry. *J Chromatogr A* 1309: 33-40.
- 15) 由上文子, 中島恵美, 吉田宗弘 (2016) 昆布から出汁へのヨウ素の遊離と昆布出汁から食材へのヨウ素の移行, *微量栄養素研究* 33 : 55-58.