

ドモノヌクレオチド) → NR (ニコチンアミドリボシド) → ニコチンアミドの両反応を触媒する酵素は、小腸膜酵素であると思われる¹²⁾。ニコチンアミドの血液中への転送は、エネルギー非依存的かつ非飽和型である¹³⁾。血液から臓器・組織へのニコチンアミドの移行は単純拡散によって行われるが(図2)、細胞はニコチンアミドを速やかに補酵素型に合成することで細胞内捕捉している¹⁴⁾(図3)。補酵素型となったのちは、アポ酵素と結合し、ホロ酵素となり機能を果たす。そして、一定時間はたれば、役目を終えて、タンパク質部分はプロテオソーム系で処理され、一方、NADは、図4に示したようにニコチンアミド、MNA (*N*¹-メチルニコチンアミド)、2-Py (*N*¹-メチル-2-ピリドン-5-カルボキサミド)、4-Py (*N*¹-メチル-4-ピリドン-3-カルボキサミド)へと代謝され、尿中に排泄される。図1~図4に示した過程をすべて含めた概念として「生体利用」と呼ぶことを提案したい。簡潔に述べれば、「消化・吸収」と「吸収後の体内利用」を合わせた概念である。ビタミンの「生体利用率」とは、ヒトが摂取した食事に含まれるビタミンがどの程度ヒトが利用できたのかという数値である。つまり、「(体内で利用されたビタミン量/摂取ビタミン量)」である。

3. 摂取したビタミン量をどのようにして測定するのか

この問題は、技術的には簡単である。1日に摂取する食事を倍量作り、半分を食べ、半分を分析用に供すればよい。

4. 体内で利用されたビタミン量をどのようにして測定するのか

知りたい情報は、1日に食べた食事由来のビタミンのうち、どの程度が図1~図4に示した代謝運命をたどったのか、という数値を測定しなければならない。1日に食べた食事由来のビタミンの生体利用率を調べるためには、前歴の食事の影響を消し去るために、ある期間同じ食事を摂取しなければならない。その期間は少なくとも4日間は必要である¹⁵⁾。

図1~図4では、真っ直ぐな代謝運命を書いたが、実際には、①消化、②吸収、③細胞内への輸送、④補酵素への合成、⑤アポ酵素との結合、⑥ホロ酵素機能を発揮、⑦ホロ酵素の終末、⑧補酵素の分解、⑨遊離ビタミンの異化、⑩尿中への排泄の各過程で影響を及

ぼす因子がある。また、摂取したビタミンがそのままの形で尿中にすべて排泄されるわけではない。そこで、現実的な生体利用率を求めるためには、一つの仮定をもうけた相対生体利用率を提案したい。その仮定は、遊離型のビタミンの生体利用率を100%とすることである。

各過程で影響をおよぼす因子を具体的に順に述べたい。食品にはビタミンの構造を破壊するものが含まれている。たとえば、チアミナーゼ¹⁶⁾、果物や野菜に含まれる耐熱性のポリフェノールがチアミンを破壊することが¹⁷⁾、果物に含まれる有機酸が亜鉛依存性のコンジュガーゼ¹⁸⁾(ポリグルタミン酸型葉酸を吸収可能なモノグルタミン酸型葉酸に変換する酵素)を阻害することが¹⁹⁾、牛乳が食品中の葉酸の消化・吸収率を高めることが²⁰⁾、生卵白に含まれるアビジンというタンパク質はビオチンと特異的に結合して吸収を阻害することが²¹⁾知られている。血液中から臓器・組織中への転送に影響を与える因子に関する具体的な情報はないが、脳内へのトリプトファン²²⁾の転送が、血液中のチロシン、フェニルアラニンや分岐鎖アミノ酸の量によって影響²²⁾を受けるといようなことから、摂取した食品の組み合わせにより、この転送が影響されるものと考えられる。補酵素への生合成系とホロ酵素活性の両方に影響をおよぼす因子は、アンチビタミンとよばれるビタミン類縁化合物がある。チアミンに対してはピリチアミンが²³⁾、リボフラビンに対してはガラクトフラビンが²⁴⁾、ナイアシンに対しては3-アセチルピリジジン²⁵⁾、6-アミノニコチンアミド²⁶⁾、イソニコチン酸ヒドラジド²⁷⁾が、葉酸に対しては4-アミノプテリン²⁸⁾、メトロキセート²⁹⁾が知られている。しかしながら、これらのアンチビタミンは食品中には含まれていないため、現実的には薬剤被害が考えられるのみである。

さて、我々は豊かになればなるほど種々の食品の組み合わせが行われる。食品は、組み合わせによって、ある場合は単独の栄養価の総和以上の効果がでる場合と、反対に総和以下の栄養価となる場合がある。したがって、我々が、過去に行ってきた単独の食品中の一つのビタミンの生体利用率を求めても^{30,31)}、学問的には価値があっても、すぐには実生活には役にたたないし、「食事摂取基準」で考慮すべき「生体利用率」として使用することもできない。

そこで、1日に摂取した食事の水溶性ビ

タミンの生体利用率を、**図5**と**図6**に示した方法で求める実験方法を、著者らは提案している³²⁾。試験食投与時の尿中ビタミン排泄率 = (試験食投与時の1日尿中ビタミン排泄量) / (試験食中のビタミン含量)。遊離型ビタミン投与の尿中ビタミン排泄率 = {遊離型ビタミン付加によって増大した1日尿中ビタミン量(遊離型ビタミン付加試験食投与時の1日尿中ビタミン排泄量 - 試験食投与時の1日尿中ビタミン排泄量)} / (遊離型ビタミン付加量)。生体利用率(%)は、(試験食投与時の尿中ビタミン排泄率/遊離型ビタミン投与の尿中ビタミン排泄率)×100 から求めた。つまり、この報告で述べる食事のビタミンの生体利用率とは、遊離型(合成型)ビタミン投与時の生体利用率を100%とした時の相対的な数値である。

5. 尿中への排泄量はどのように調節されているのか

著者らの推測の域をでないが、ビタミンの摂取量が必要量を満たさないときは、再吸収系が能動的にはたらい、尿中への排泄を積極的に抑えている。一方、体内飽和量を超えるような過剰な摂取量の場合は、排泄系が能動的にはたらい、積極的に尿中に排泄を行っている。そして、必要量から体内飽和量間の摂取量の時は、再吸収系も排泄系も積極的にたらいおらず、ただ単純拡散によって尿中にもれでているだけであると考えている。模式的に書くと**図7**のようになる。著者らが提案する生体利用率を求める時は、摂取量と排泄量との関係が正比例の関係にある範囲内で行わなければならない。

6. 1日食事由来のビタミンの生体利用率はどの程度か

ここで提案したような方法を駆使している論文を検索した結果、類似した方法を駆使した論文が一報のみ検索された。詳しく紹介する。代表的なアメリカ食中のビタミンB₆とパントテン酸の生体利用率³³⁾という論文である。

彼らの実験方法の概略を**図8**に示した。期間1と期間3は合成ビタミンを投与した期間で、この時に尿中に排泄されたビタミンB₆量とパントテン酸量を100%の生体利用率と考えたものである。そして、期間2では、代表的なアメリカ食(**表2**)を与えた時に24時間尿中に排泄されるビタミンB₆量とパントテン酸量を測定し、この期間に排泄された

値をもとに、期間1と期間3で得られた値を基準として比較することにより、体内で利用された値を求める、つまり、摂取実測値と尿中の値から、計算によって得られた利用されたビタミン値を得る。この計算によって得られた利用値と摂取実測値の比率から、生体利用率を求めている。代表的なアメリカ食に含まれるビタミンB₆とパントテン酸の生体利用率を**表3**と**表4**に示した。ビタミンB₆は80%程度、パントテン酸は50%程度という値を彼らは報告している。

他のビタミンに関する報告はみあたらない。

7. ビタミンの生体利用率に影響をおよぼす栄養失調(ミネラル欠乏)

7-1. 生理活性ミネラルとB群ビタミンの生体利用率との関係

ミネラルは、B群ビタミンの生体利用率に関して次のことに関わっている。①結合型ビタミンの消化・吸収に関わるミネラル含有酵素、②遊離型ビタミンから補酵素型の合成に関わるミネラル含有酵素、③ビタミンの代謝に関わるミネラル含有酵素、④ビタミンを補酵素とする過程に関わるミネラル含有酵素である。我々が、被験者とするヒトには栄養失調はないので、これから述べることは、疾病時においてのみみられる現象である。

結合型ビタミンの消化・吸収に関わるミネラル含有酵素として、アミノペプチダーゼ(Zn, Co)、カルボキシペプチダーゼ(Zn)、 α -アミラーゼ(Ca)、 γ -グルタミルヒドロラーゼ(通称:コンジュガーゼ)(Zn)などが知られている。亜鉛欠乏時患者においては、食品に含まれているポリグルタミン酸型の葉酸の消化が低下することが予想される。しかし、モノグルタミン酸型は消化される必要がないので、亜鉛欠乏患者ではモノグルタミン酸型の投与が有効である。なお、亜鉛欠乏患者で、葉酸の吸収後の体内利用率がどのようになっているかに関する情報はみあたらない。

遊離型ビタミンから補酵素型の合成に関わる酵素でミネラルを必要とする酵素に関する実験がある³⁴⁾。ニコチンアミドからNADP⁺への生合成系においてMgを必要とする酵素がある。ニコチンアミドホスホリボルトランスフェラーゼ、NMNアデニリルトランスフェラーゼ、NAD⁺シンターゼ、NAD⁺キナーゼである。**表5**に示したように、ミネラル欠乏ラットでは、トリプトファンか

らのナイアシンへの合成量が低下した。

ニコチンアミドからMNAをへて2-Pyと4-Pyへの異化代謝系において、2-Py生成MNAオキシダーゼ (Mo, Fe) と4-Py生成MNAオキシダーゼ (Mo, Fe) がミネラル酵素である。ミネラル欠乏では、表6に示したように、これら両酵素活性が低下し、代謝産物である2-Pyと4-Pyの生成量が低下し、その結果、(2-Py+4-Py)/MNAが低下した。

ビタミンを補酵素とするミネラル含有酵素として、アルコールデヒドロゲナーゼ (ナイアシン, Zn), プロピオニルCoAカルボキシラーゼ (パントテン酸, K), グルタチオンペルオキシダーゼ (リボフラビン, Se), ピルビン酸カルボキシラーゼ (ビオチン, Mn), キサンチン酸化酵素 (リボフラビン, Mo) などがある。ミネラル結合が体内のNAD含量におよぼす影響を調べたが、表7に示したように、差異は認められなかった。

引用文献

- 1) Yu BH, Kies C (1993) Niacin, thiamin, and Pantothenic acid bioavailability to humans from maize bran as affected by milling and particle size. *Plant Foods Hum Nutr* **43**, 87-95
- 2) Reynold RD (1988) Bioavailability of vitamin B-6 from plant foods. *Am J Clin Nutr* **48**, 863-867
- 3) Elmadfa I, Heinzle C, Majchrzak D, Foissy H (2001) Influence of a probiotic yoghurt on the status of vitamins B₁, B₂ and B₆ in the healthy adult human. *An Nutr Met* **45**, 13-18
- 4) Picciano MF, West SG, Ruch AL, Kris-Etherton PM, Zhao G, Johnson KE, Maddox DH, Fishell VK, Dirienzo DB, Tamura T (2004) Effect of cow milk on food folate bioavailability in young women. *Am J Clin Nutr* **80**, 1565-1569
- 5) Tadera K, Kaneko T, Yagi F (1988) Isolation and structural elucidation of three new pyridoxine-glycosides in rice bran. *J Nutr Sci Vitaminol* **34**, 167-177
- 6) Kodicek E, Wilson PW (1960) The isolation of niacytin, the bound form of nicotinic acid. *Biochem J* **76**, 27p-28p
- 7) Das ML, Guha BC (1960) Isolation and chemical characterization of bound niacin (niacinogen) in cereal grains. *J Biol Chem* **235**, 2971-2976
- 8) Carter EGA, Carpenter KJ (1982) The bioavailability for humans of bound niacin from wheat bran. *Am J Clin Nutr* **36**, 855-861
- 9) Gregory III JF, Trumbo PR, Bailey LB, Toth JP, Baumgartner TG, Cerda JJ (1991) Bioavailability of pyridoxine-5'-β-D-glucoside determined in humans by stable-isotopic methods. *J Nutr* **121**, 177-186
- 10) Kabir H, Leklem JE, Miller LT (1983) Comparative vitamin B-6 bioavailability from tuna, whole wheat bread and peanut butter in humans. *J Nutr* **113**, 2412-2420
- 11) 日本人の食事摂取基準 (2005年版), 日本人の栄養所要量-食事摂取基準-策定検討会報告書, 平成16年10月, 厚生労働省
- 12) Gross CJ, Henderson LM (1983) Digestion and absorption of NAD by the small intestine of the rat. *J Nutr* **113**, 412-420
- 13) Shuette SA, Rose RC (1983) Nicotinamide uptake and metabolism by chick intestine. *Am J Physiol* **245**, G531-G538
- 14) Stein J, Daniel H, Whang E, Wenzel U, Hahn A, Rehner G (1994) Rapid postabsorptive metabolism of nicotinic acid in rat small intestine may affect transport by metabolic trapping. *J Nutr* **124**, 61-66
- 15) Fukuwatari T, Ohta M, Kimura N, Sasaki R, Shibata K (2004) Conversion ratio of tryptophan to niacin in Japanese women fed on a purified diet conforming to the Japanese Dietary Reference Intakes. *J Nutr Sci Vitaminol* **50**, 385-391
- 16) Murata K (1982) Actions of two types of thiaminases on thiamin and its analogues. *Ann New York Acad Sci* **378**, 146-156
- 17) Hilker DM, Somogyi JC (1982) Antithiamins of plant origin: their chemical nature and mode of action. *Ann New York Acad Sci* **378**, 137-145
- 18) Chandler CJ, Wang TT, Halsted CH (1986) Pteroylglutamate hydrolase from human jejunal brush borders. Purification and characterization. *J Biol Chem* **261**, 928-933
- 19) Wei MM, Gregory JE III (1998) Organic acids in selected foods inhibit intestinal brush border pteroylpolyglutamate hydrolase in vitro: potential mechanism affecting the bioavailability of dietary polyglutamylfolate. *J Agric Food Chem* **46**, 211-219
- 20) Picciano MF, West SG, Ruch AL, Kris-Etherton PM, Zhao G, Johnson KE, Maddox DH, Fishell VK, Dirienzo DB, Tamura T (2004) Effect of cow milk on food folate bioavailability in young women. *Am J Clin Nutr* **80**, 1565-1569
- 21) Green NM (1963) Avidin. 3. The nature of the biotin-binding site. *Biochem J* **89**,

- 599-609
- 22) Pardridge WM, Oldendorf WH (1975) Kinetic analysis of blood-brain barrier transport of amino acids. *Biochim Biophys Acta* **401**, 128-136
 - 23) Murdock DS, Gubler CJ (1973) Effects of thiamine deficiency and treatment with the antagonists, oxythiamine and pyrithiamine, on the levels and distribution of thiamine derivatives in rat brain. *J Nutr Sci Vitaminol* **19**, 237-249
 - 24) Aksu O, Mackler B, Shepard TH, Lemire RJ (1968) Studies of the development of congenital anomalies in embryos of riboflavin-deficient, galactoflavin fed rats. II. Role of the terminal electron transport systems. *Teratology*, **1**, 93-102
 - 25) Woolley DW (1945) Production of nicotinic acid deficiency with 3-acetylpyridine, the ketone analogue of nicotinic acid. *J Biol Chem* **157**, 455-459
 - 26) Dietrich LS, Friedland IM, Kaplan KA (1958) Pyridine nucleotide metabolism: Mechanism of action of the niacin antagonist, 6-aminonicotinamide. *J Biol Chem* **233**, 964-968
 - 27) Comaish JS, Cooper M (1977) Isoniazid-induced pellagra. *Arch Dermatol* **113**, 986-987
 - 28) Gavostro F, Pileri A, Camurati P (1955) Experimental research on the mechanism of action of folic acid antagonists: effects of 4-aminopterin on nucleic acids in the regenerating liver of the rat. *Arch Sci Med (Trino)* **100**, 1-19
 - 29) Schoo MMJ, Pristupa ZB, Vickers PJ, Scrimgeour KG (1985) Folate analogues as substrates of mammalian folylpolyglutamate synthetase. *Can Res* **45**, 3034-3041
 - 30) 福渡努, 斉藤智恵, 佐々木隆造, 柴田克己 (2003) ラットにおけるインスタントコーヒーのナイアシン活性. *日本家政学会誌*, **54**, 77-82
 - 31) 福渡努, 江畑恵, 佐々木隆造, 紅林毅久, 橋詰昌幸, 柴田克己 (2005) カツオ由来ナイアシン高濃度含有パウダーのナイアシンとしての有効性. *日本家政学会誌*, **56**, 265-272
 - 32) 柴田克己 (2005) パンを主食とした時の水溶性ビタミンの生体利用率 (第400回ビタミンB研究協議会) 平成17年5月28日, 三重県合歓の郷.
 - 33) Tarr JB, Tamura T, Stockstad LR (1981) Availability of vitamin B₆ and pantothenate in an average American diet in man. *Am J Clin Nutr* **34**, 1328-1337
 - 34) 柴田克己, 才野木当糸(1993) ミネラル欠乏がトリプトファン-ニコチンアミド代謝に及ぼす影響. *ビタミン* **67**, 429-434

ビタミンの体内運命 (1/4)

(消化・吸収まで)

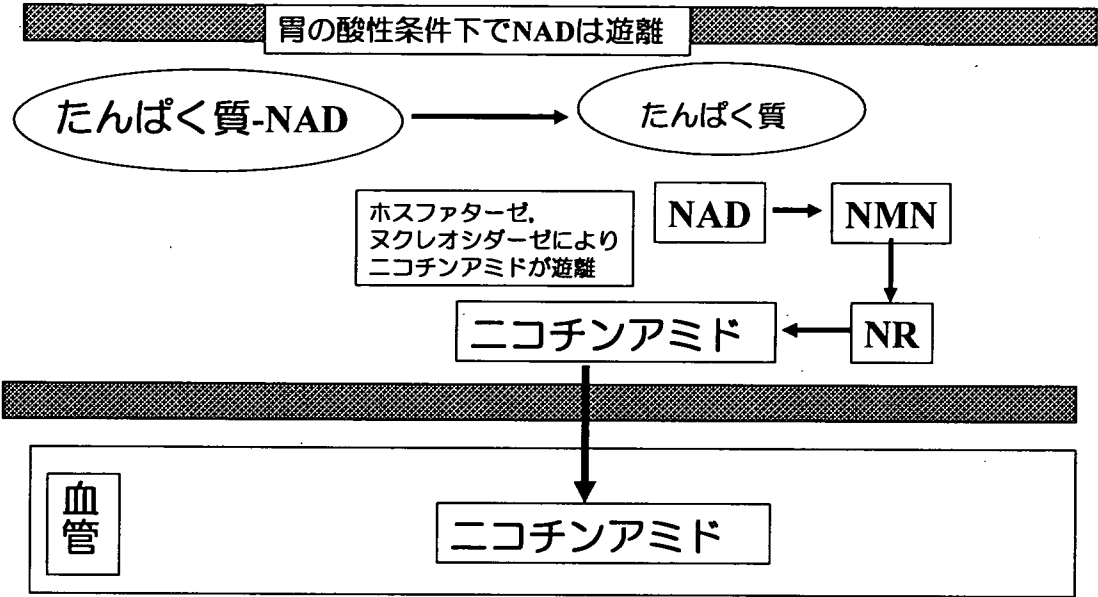


図1. ビタミンの体内運命 (1/4) (消化・吸収まで)

ビタミンの体内運命 (2/4)

(血液から組織へ)

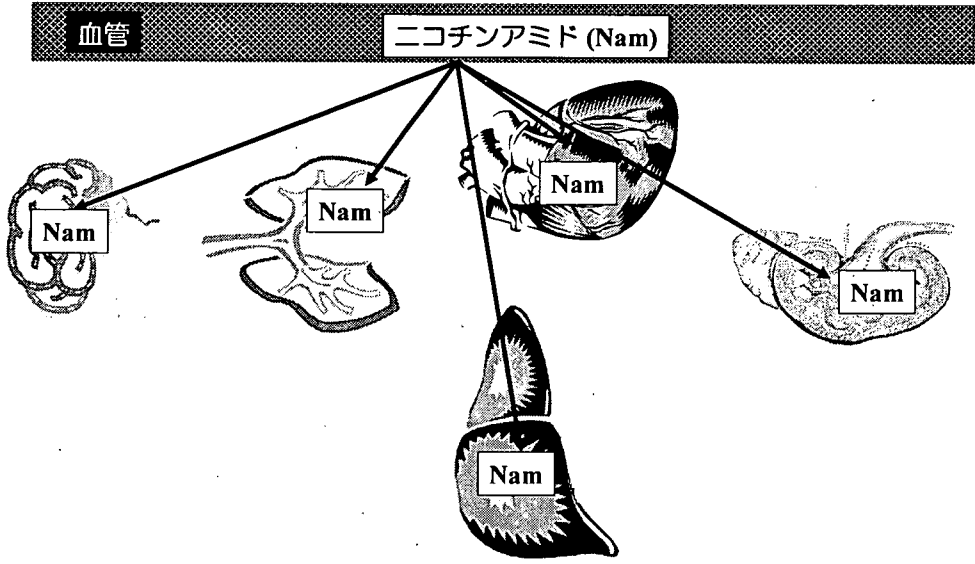


図2. ビタミンの体内運命 (2/4) (血液から組織へ)

ビタミンの体内運命 (3/4)

(補酵素型へ、そして酵素と結合、機能を果たす、そして役目を終えて異化経路へ)

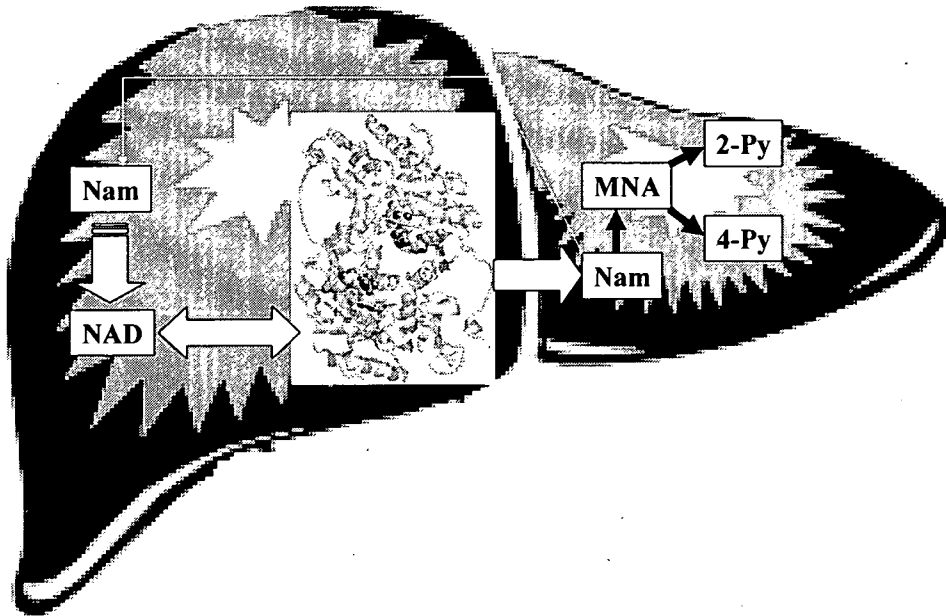


図3. ビタミンの体内運命 (3/4) 補酵素型へ、そして酵素と結合、機能を果たす、そして役目を終えて異化経路へ)

ビタミンの体内運命 (4/4)

(利用されたのち、尿中に排泄)

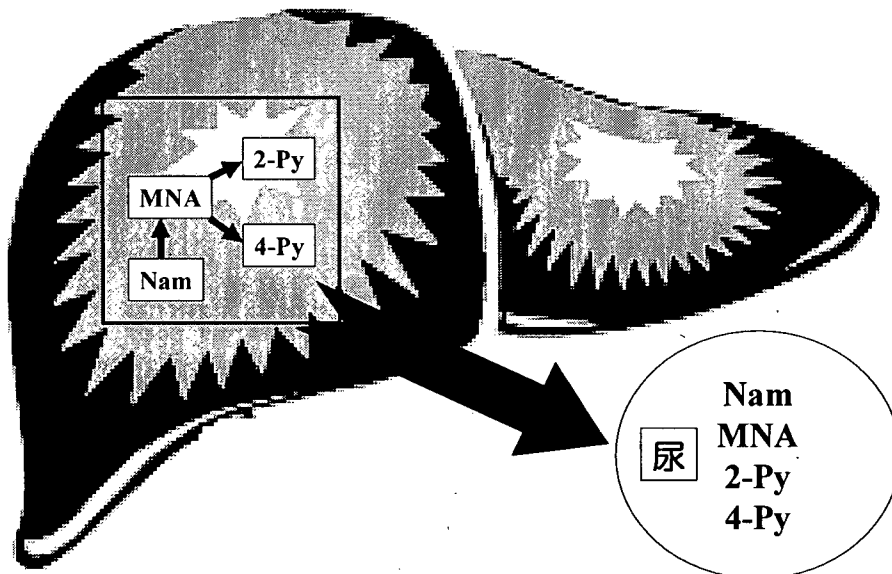


図4. ビタミンの体内運命 (4/4) (利用されたのち、尿中に排泄)

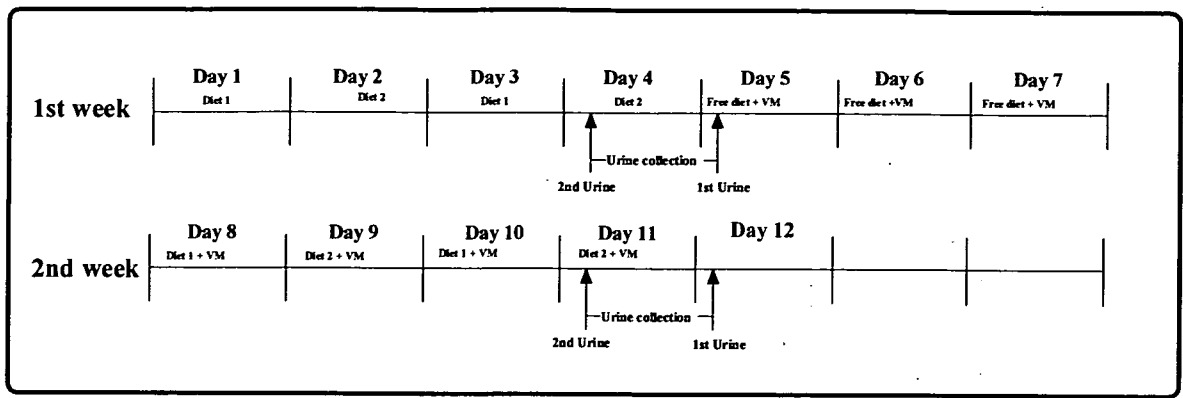


図5. 著者らが提案する1日食事由来のB群ビタミンの生体利用率の実験計画の概略

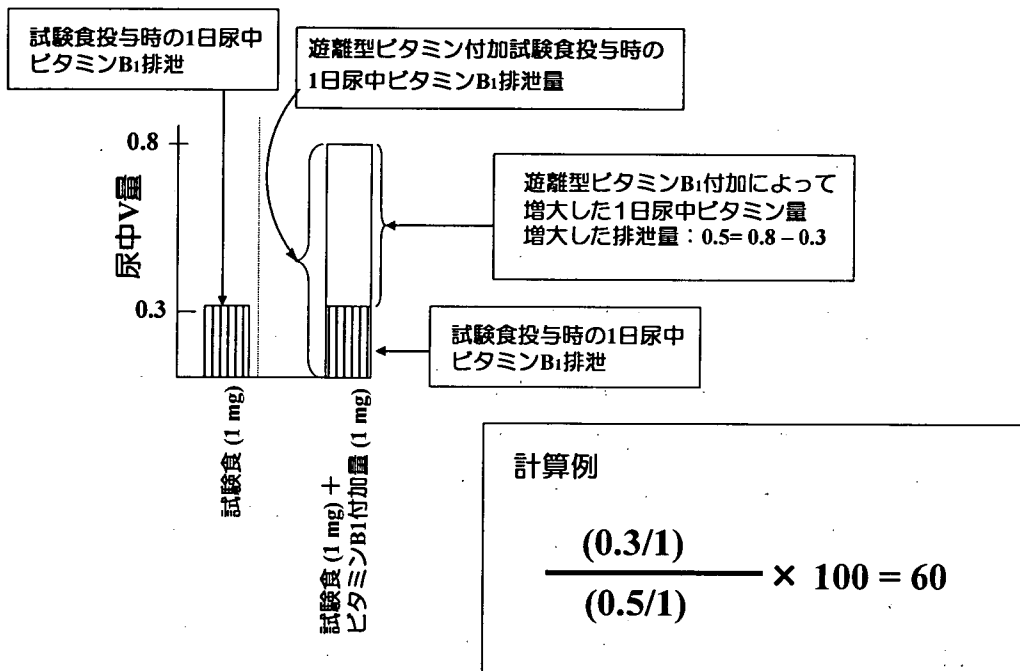


図6. 著者らが提案する1日食事由来のB群ビタミンの生体利用率の求め方

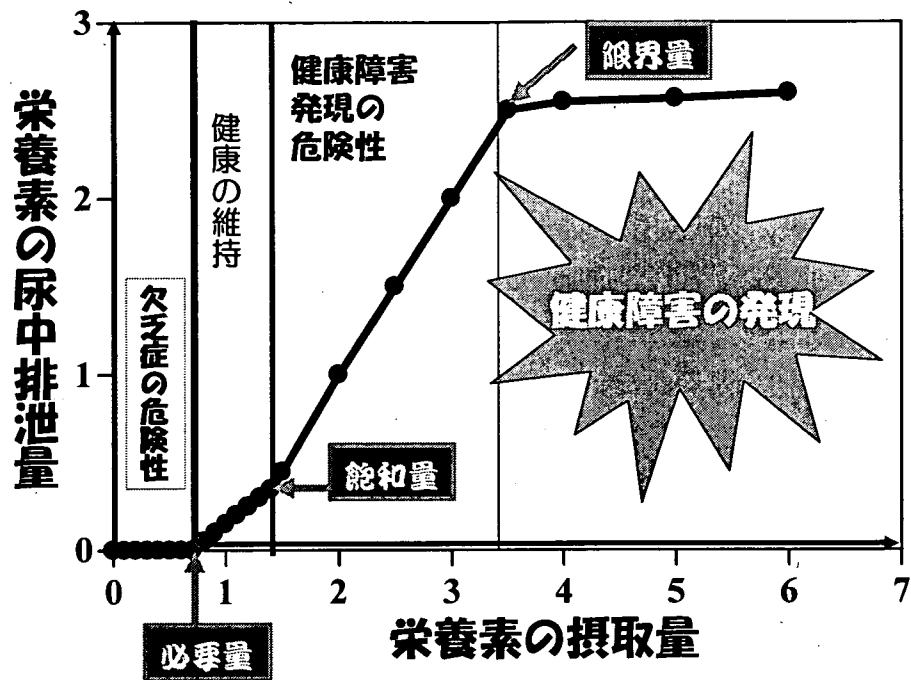


図7. ビタミンの尿中への排泄量への調節（推測）
縦軸と横軸の数値はともに、相対的な数値である。

実験方法

被験者：6名の男性（21～35歳）。体重（65～72kg）

PERIOD 1 Days 1 to 35	PERIOD 2 Days 36 to 70	PERIOD 3 Days 71 to 91
半合成食 （ビタミンは合成 品から供給） VB6：1.1mg/d PaA：8.2mg/d	代表的なアメリカ食 （ビタミンは食品中 から供給） VB6：2.3mg/d PaA：11.5mg/d	半合成食 （ビタミンは合成 品から供給） VB6：2.7mg/d PaA：8.2mg/d

定期的に24時間尿を集め、ビタミンB6とパントテン酸排泄量を測定

Tarr JB, Tamura T, and Stockstad LR (1981) *Am J Clin Nutr* 34, 1328-1337.

図8. Tarr らの実験方法の概略

表 1. ラット肝臓中のナイアシン関連化合物含量

	概数 (nmol/g)
NAD ⁺ + NADH	700
NADP ⁺ + NADPH	300
遊離ニコチンアミド	400
総ニコチンアミド	1400

表 2. 典型的なアメリカ食

Canned food	Weight (g)	Company
Beef puree	340	Gerber Products Co.,
Tuna	13	Star-Kist
Chicken	42	Swanson, Campbell Soup Co.,
Spinach	42	Co-op, Berkeley
Potatoes	170	Del Monte
Lima beans	4	Libby's
Peas	13	One Star
String beans	17	Libby's
Tomato juice	68	Libby's
Peaches	85	F & P
Pineapple	85	Del Monte
Carrots	43	Monarch
Frozen concentrated orange juice	20	River Valley

Other foods	Weight (g)	Company
Whole milk	406	Berkeley Farms
White bread	140	Kilpatrick's
Shredded wheat	30	Nabisco
Margarine	30	Co-op, Berkeley
Cottonseed oil	13	Gold-n-Sweet
Sucrose	42	C and H

Each subject received supplementary sucrose and corn oil (ratio of 3.5 to 1 by weight) in sufficient amounts to maintain constant body weight.

Tarr JB, Tamura T, and Stockstad LR (1981) Availability of vitamin B6 and pantothenate in an average American diet in man. *Am J Clin Nutr* 34, 1328-1337.

表3. 代表的なアメリカ食中に含まれるビタミンB₆の生体利用率
(尿中へのビタミンB₆排泄量を指標にした場合)

Subject No.	尿中ビタミンB ₆ (µg/d)			Apparent vitaminB ₆ utilized (mg/d)	Availability (%)
	Period 1 (1.1mg)	Period 2 (2.3mg)	Period 3 (2.7mg)		
1	39	79	134	1.77	77*
2	40	87	152	1.72	75
3	53	81	109	1.82	79
4	45	73	106	1.80	78
5	51	101	124	2.11	92
6	61	105	155	1.69	73
mean	48	87	130	1.82	79

Tarr JB, Tamura T, and Stockstad LR (1981) Availability of vitamin B6 and pantothenate in an average American diet in man. *Am J Clin Nutr* 34, 1328-1337.

表4. 代表的なアメリカ食中に含まれるパントテン酸の Availability
(尿中へのパントテン酸排泄量を指標にした場合)

Subject No.	尿中パントテン酸 (mg/d)			Apparent PaA utilized (mg/d)	Availability (%)
	Period 1 (8.2mg)	Period 2 (11.5mg)	Period 3 (8.2mg)		
1	5.4	2.6	3.5	5.14	44*
2	3.6	2.4	3.1	6.22	54
3	5.6	3.5	4.3	6.15	54
4	3.6	1.7	2.5	4.65	40
5	4.4	3.4	3.9	6.97	61
6	2.7	1.7	2.4	5.66	49
mean	4.2	2.6	3.3	5.79	50

Tarr JB, Tamura T, and Stockstad LR (1981) Availability of vitamin B6 and pantothenate in an average American diet in man. *Am J Clin Nutr* 34, 1328-1337.

表5. ミネラル欠乏がトリプトファン-ナイアシン代謝におよぼす影響 (ラット)

	対照群	ミネラル欠乏群
尿中へのニコチンアミド及び異化代謝産物量の総和 (nmol/g food)	638±58	304±27*

* $p < 0.05$ で有意差が認められた (Student t 検定) .

柴田克己、才野木当糸(1993) ミネラル欠乏がトリプトファン-ニコチンアミド代謝に及ぼす影響. *ビタミン* 67, 429-434

表6. ミネラル欠乏がニコチンアミドの異化代謝におよぼす影響 (ラット)

ラット肝臓	対照群	ミネラル欠乏群
2-Py 生成 MNA オキシダーゼ (nmol/h/g 肝臓)	715±54	307±23*
4-Py 生成 MNA オキシダーゼ (nmol/h/g 肝臓)	1683±199	628±71*
尿中の (2-Py+4-Py)/MNA	9.6±0.7	4.3±0.5*

* $p < 0.05$ で有意差が認められた (Student t 検定) .

柴田克己、才野木当糸(1993) ミネラル欠乏がトリプトファン-ニコチンアミド代謝に及ぼす影響. ビタミン 67, 429-434

表7. ミネラル欠乏が体内のナイアシン含量におよぼす影響 (ラット)

	対照群	ミネラル欠乏群
肝臓中の総ナイアシン (nmol/g)	2070±60	2210±80
全血中 NAD (nmol/mL)	81.2±2.1	78.5±0.9

* $p < 0.05$ で有意差が認められた (Student t 検定) .

柴田克己、才野木当糸(1993) ミネラル欠乏がトリプトファン-ニコチンアミド代謝に及ぼす影響. ビタミン 67, 429-434

分担研究報告書

ビタミン当量の活用方法

分担研究者 柴田克己 滋賀県立大学 教授

研究要旨

ビタミンの食事摂取基準について正しく活用されていないと思われる項目を詳細に記した。ビタミンB₁はチアミン塩酸塩の量である。ビタミンB₁の推奨量は0.54mg/1000kcal, ビタミンB₂の推奨量は0.60mg/1000kcal, ナイアシンの推奨量は5.8mg NE/1000kcal, ビタミンB⁶の推奨量は0.023 mg/g たんぱく質である。1日当たりの量として策定されていない。食事献立の評価をする時は、これらの値に換算した後、評価すべきである。ナイアシン当量, レチノール当量という概念と各々の計算方法を習得すべきである。ビタミンDにはプロビタミンDとプレビタミンDがある。生物系食料中のB群ビタミンは補酵素型としてタンパク質と結合した状態で存在しているので、遊離型のビタミン(サプリメント型)と比較して、生体利用率(消化・吸収率と体内利用率を合わせたもの)が低い。生物系食料中のビタミンB₆の生体利用率はサプリメント型の75%, 葉酸は50%, ビタミンB₁₂は50%である。しかしながら、これらの生体利用率は米国人が食する食事(脂肪エネルギー比が40%程度)の場合である。他のB群ビタミンの生体利用率の情報はない。

日本人の食事摂取基準（2005年版）の使用が平成17年4月にはじまって、3年が経過しようとしている。今回の改定では食事摂取基準の考え方が明確に示された。ビタミンは、2005年版においても、13種類すべての食事摂取基準が策定された。

さて、ビタミンの当量に関連することが、正しく活用されていないようであるので、詳しく記載する。

1. ビタミンB₁

科学技術庁資源調査会編の五訂増補 日本食品標準成分表（食品成分表と略す）に記載されているビタミンB₁の値は、「成分値はチアミン塩酸塩相当量で示した。」と書かれているように、チアミン（ビタミンB₁）そのものの量ではない。チアミンの分子量は265.3である。チアミン塩酸塩にはHClとClがついている。HClの分子量は36.5、Clの原子量は35.5であるので、チアミン塩酸塩の分子式量は337.3（265.3+36.5+35.5）となる。チアミン塩酸塩の量をチアミン量にするには、ClとHClの重さだけ引かなければいけないので、チアミン＝チアミン塩酸塩×0.79（265.3/337.3）という式で計算できる。一方、逆にチアミン塩酸塩＝チアミン×1.27（337.3/265.3）という式で計算できる。

2005年版では、ビタミンB₁の推奨量は0.54 mg/1000 kcalと策定されている。この量は、チアミン塩酸塩としての量である。第六次改定日本人の栄養所要量-食事摂取基準-では、ビタミンB₁の所要量は0.42 mg/1000 kcalであった。このときの量は、チアミンとしての量であった。一見すると、2005年版ではビタミンB₁の値が高くなったと思っているヒトがいると思われるが、 $0.42 \times 1.27 = 0.53$ であり、ほぼ同じである。よくある間違いとして、調査したビタミンB₁の1日摂取量を1日当りに換算された値と比較していることである。2005年版のビタミンB₁の食事摂取基準という表に記載してある値は、生活活動強度II（ふつう）の時の値である。比較は、1000 kcal当たりの値ですべきである。

2. ビタミンB₂

ビタミンB₂の推奨量は0.60 mg/1000 kcalと策定されているので、この値に換算した後、食事の献立作製時に比較しなければならない。

3. ナイアシン

ナイアシンの推奨量は5.8 mg NE/1000 kcalと策定されている。NEはNiacin Equivalent（略してNE、ナイアシン当量）のことである。ビタミンAは、成分表にしっかりと「レチノール」、「カロテン、 α 、 β 」、「クリプトキサンチン」、「 β -カロテン当量」、「レチノール当量」という項目がある。しかし、「ナイアシン当量」という項目が食品成分表にはない。そこで、調査したヒトが独自に計算しなければならない。市販のコンピュータソフトにはナイアシン当量を計算する機能はないようである。コンピュータソフトによる計算では成分表にでているナイアシンしか計算されていない。この値をナイアシンの推奨量と比較して献立の評価をするヒトが多い。

ナイアシンというビタミンは、必須アミノ酸のトリプトファンから肝臓で生合成できる。トリプトファンからナイアシンへの転換率はモル比で2~3%程度と低いが、トリプトファンの摂取量が多いため、実際にはトリプトファン由来の生合成量だけでナイアシン必要量を賄うことができる。2005年版では、この転換量は60mgのトリプトファンが1mgのナイアシンに相当するという値が採用されている。重量比で1/60であるので、モル比にすると1/36となる。これは、トリプトファンの分子量が204、ナイアシン（ニコチン酸とニコチンアミドの総称名、ニコチン酸の分子量は123.1、ニコチンアミドの分子量は122.1）の分子量を123とすると、モル比では $(1/60) \times (204/123) = 1/36$ となる。生体内での栄養素の代謝を考える場合は、重さでの変化は意味をなさない。モルで表記された値で比較すると化学量論的な考え方ができる。栄養素必要量のバランスを考える場合は、モル比で比較すべきである。

ナイアシンという項目は、食品成分表のナイアシンという項目に記載されている数値をかけばよい。

トリプトファンという項目は、成分表をみてもでてこない。市販の食品成分表には付録のような形で、食品アミノ酸組成表がついているものが多くある。このアミノ酸組成表を利用して、摂取した食品のトリプトファン摂取量を計算できるはずであるが、掲載されている食品名が少なく、実際には使用しにくい。専門的な話題であるが、タンパク質中のアミノ酸の中で、トリプトファンだけが酸加水分解で破壊されてしまう。そのため、通常のアミノ酸分析法ではトリプトファンは

測定できない。そこで、トリプトファンを測定する場合には、タンパク質をアルカリ加水分解してから測定している。しかしながら、トリプトファンが 100%回収できる測定方法の開発は難しく、アミノ酸成分表に記載されている値も精度が低い。そこで、簡便法として、次の式を使用して、トリプトファン摂取量を推測すればよい。トリプトファン摂取量 (mg) = たんぱく質摂取量 (g) × 1000 × (1.0/100)。たんぱく質摂取量は成分表の値から求めることができる。「1000」は、「g」という単位で示されているたんぱく質摂取量を「mg」という単位にするためである。「1.0/100」という数値は、平均的な食品たんぱく質のトリプトファン含量がたんぱく質 100g 当たり 1.0g であるというデータからの数値である。

トリプトファン由来のナイアシンは、トリプトファン摂取量 (mg) × 1/60 で計算する。

ナイアシン当量は、ナイアシン+トリプトファン由来のナイアシンから計算する。一番簡便なナイアシン当量の計算式は、 $NE (mg) = \text{ナイアシン} (mg) + \{ \text{たんぱく質摂取量} (g) / 6 \}$ である。例えば、1日の食事において、食品成分表から計算したナイアシン摂取量が 15 mg、たんぱく質摂取量が 60 g であったとする。すると、NE は $15 + 60/6 = 25$ mg となる。たんぱく質由来、すなわちトリプトファン由来のナイアシンが半分程度を占めていることに気がつく。

ナイアシンの推奨量は、5.8mg/1000kcal と策定されていますので、この値に換算した後、比較しなければならない。

なお、ニコチン酸とニコチンアミドのナイアシン活性は当価である。ニコチン酸は植物性食品に、ニコチンアミドは動物性食品に含まれる。

4. ビタミン B₆

ビタミン B₆ の推奨量は、0.023 mg/g たんぱく質と策定されているので、この値に換算した後、比較しなければならない。

なお、ピリドキシン、ピリドキサル、ピリドキサミンのビタミン B₆ としての活性は当価である。

5. ビタミン C

ビタミン C の食事摂取基準は、欠乏症である壊血病の予防を指標として策定されていない。壊血病の予防を指標とすれば、10 mg/日程度である。食事摂取基準は、ビタミン C

の抗酸化作用が血漿中で最大限発揮できる濃度である 50μmol/L を、50%のヒトが維持できる摂取量から策定されている。

ビタミン C 活性を有する化合物は還元型のアスコルビン酸であるが、生物系食料には酸化型のアスコルビン酸も含まれている。2005 年版では、酸化型のアスコルビン酸も還元型のアスコルビン酸と当価とされている。

食品成分表のビタミン C の値は、還元型アスコルビン酸+酸化型アスコルビン酸+2,3-ジケトグルン酸の値として記載されている。2,3-ジケトグルン酸はビタミン C 活性を有しない。しかしながら、生物系食料中の 2,3-ジケトグルン酸含量は、還元型アスコルビン酸+酸化型アスコルビン酸量に比して、きわめて低いので、食品成分表に記載されているビタミン C 含量は、そのままビタミン C 含量として計算してもさしつかえない。

6. ビタミン A

レチノール当量 (Retinol Equivalent = RE) という概念が用いられている。2005 年版では、 $1 \mu\text{g RE} = 1 \mu\text{g}$ レチノール = $12 \mu\text{g}$ β-カロテン = $24 \mu\text{g}$ α-カロテン = $24 \mu\text{g}$ β-クリプトキサンチンである。

β-カロテン、α-カロテン、β-クリプトキサンチンはプロビタミン A と呼ばれるものであり、カロテノイドと総称される場合もある。これらのカロテノイドは小腸や肝臓でレチノールへ転換され、ビタミン A としての活性を示す。ヒトの場合は、これらのカロテノイドが主要なビタミン A 給源となっている。しかしながら、カロテノイドは、ビタミン A の前駆体としての役割ばかりでなく、カロテノイドそのままの形で、抗酸化作用、免疫賦活作用や発がん抑制などの生理作用があることが明らかにされている。したがって、カロテノイドそのものの食事摂取基準を算定しようとする動きもある。

7. ビタミン D

ビタミン D 活性を有する化合物には植物性食品に含まれるビタミン D₂ (エルゴカルシフェロール) と動物性に含まれるビタミン D₃ (コレカルシフェロール) がある。ヒトにおけるビタミン D 活性は当価である。

プロビタミン D と呼ばれる化合物が食品中に含まれている。プロビタミン D は紫外線照射で、まずプレビタミン D を生成する。プレビタミン D は体内に吸収されて、熱異性化反応により、ビタミン D となる。プロビタミン

ンDから、紫外線照射により、直接ビタミンDが生成することはない。

一方、ヒトにおいてもビタミンDは、皮膚で合成されている。皮膚ではアセチルCoAよりコレステロールが生合成されているが、この生合成経路の最終中間体にプロビタミンD₃である7-デヒドロコレステロールがある。この化合物は、皮膚中でも表皮に蓄積している。したがって、UVB (290~330nm) を浴びると、プレビタミンD₃となる。そして、体温で徐々に熱異性化されて、ビタミンD₃となる。ヒトにおいて、ビタミンD栄養の維持にどの程度この経路が寄与しているかは明らかではないが、高緯度に住むヒトにビタミンD欠乏が認められることを考えると、無視できないと思われる。

なお、動物実験ではあるが、動物の皮膚には250 µg/g程度のプロビタミンD₃である7-デヒドロコレステロールが存在している。UVB照射によって皮膚内に生成するビタミンD₃の量はその1/1000程度の0.25 µg/g程度である。UVB照射を続けても、それ以上には上昇しないことが確かめられている。これは、ビタミンDの過剰症を防ぐための生体防御反応が存在していることを示している。

8. ビタミンE

2005年版ではビタミンE活性を有する化合物は、α-トコフェロールのみとされた。第六次改定で使用されていたトコフェロール当量という概念はなくなった。これは、ヒトにおいては、α-トコフェロールと非常に親和力が強いα-トコフェロール輸送タンパク質しか存在しないためである。

食品中にはα-トコフェロールの同族体が含まれているので、肝臓までは取り込まれるが、肝臓では、α-トコフェロール輸送タンパク質しか存在しないために、他の同族体は胆汁中に捨てられてしまう。そのため、再度、各組織に分配されるものはα-トコフェロールのみとなる。

9. ビタミンK

ビタミンK活性を有する化合物として、ビタミンK₁ (フィロキノン, 分子量450.7), ビタミンK₂ (メナキノン-4, 分子量444.7), メナキノン-7 (分子量649.0) がある。これらは、ヒトにおいて、モル比において当価のビタミンK活性を有する。

食品成分表のビタミンKの値は、原則として、ビタミンK₁とビタミンK₂の合計で示さ

れている。

ただし、食品成分表の備考欄に記載されているように、納豆類にはメナキノン-7が多く含まれている。このような場合には、メナキノン-7をメナキノン-4量に換算したのち(メナキノン-4相当量=メナキノン-7×444.7/649), ビタミンKの食事摂取基準と比較しなければならない。しかしながら、食品成分表にはメナキノン-7の量が記載されていないので、納豆類のようにメナキノン-7を多く含む食品はすべてメナキノン-7とし、メナキノン-4相当量=メナキノン-7×444.7/649の式を用いて、換算するしかない。つまり、納豆類のビタミンK量は、食品成分表に記載されている値に0.69をかければよい。

10. 生物系食料由来のビタミンの生体利用率の問題

生物系食料中のB群ビタミンは、遊離型ではなく、いわゆる結合型と称される形で存在している。生細胞中のB群ビタミンは、酵素タンパク質の補酵素としてその活性中心に存在している。植物性食品では、ピリドキシン、ニコチン酸のようにグルコースなどの糖と結合した形で存在しており、生体利用率の低いことが明らかとなっているものもある。したがって、我々が生物系食料中のB群ビタミンを消化・吸収し、体内で利用するには、まず結合型を遊離型にする消化という過程が必要である。この消化作用は、必ずしも完全ではない。さらに、吸収されたビタミンのうちの何%を体内で利用できるのかわかっておく必要がある。ところが、すべてのビタミンの生体利用率が知られているわけではない。

2005年版では、一部のB群ビタミンは生体利用率を考慮して策定されたが、これらはすべて日本食を食べた時の値ではなく、米国型の食事での値である。脂肪エネルギー比が40%~50%程度のものである。したがって、今回の改定(2010版)までに、日本型の食事におけるB群ビタミンの生体利用率が明らかにされることが強く望まれる。

例えば、生細胞中のビタミンB₁のほとんどは補酵素型のチアミンニリン酸(Thiamin diphosphate = TDP)として存在し、酵素タンパク質と結合した状態で存在している。生細胞を加工して食する状態になった時に、何%が遊離型となっているかは不明であるが、かなりの量がそのままの状態であるものと推

定される。したがって、血液中に吸収される前に、消化が必要である。例えば、食品中の総チアミン含量を測定するときには、食品を終濃度 0.1% タカジアスターゼ B (ホスファターゼの力価が強く、プロテアーゼ活性も強い) 溶液中で、37°C で 1 晩消化処理を行い、遊離型のチアミンに変換した後、測定する。酵素タンパク質から遊離した TDP は消化管内ではホスファターゼによりピロリン酸がはずれ、遊離型のチアミンとなったのち、吸収されるものと推定されている。したがって、生物系食料由来のビタミン B₁ の消化・吸収率は、遊離型の合成チアミンと比較して、低いものと推察される。その後の体内利用率 (吸収されて血清に表れたのちの体内運命) に関する情報は乏しい。ビタミン B₁ の生体利用率 (消化・吸収率と体内利用率をあわせたもの) が、75% なのか、50% なのか、あるいは 25% 程度なのか不明のままである。

ところで、2005 年版で生体利用率が使用された B 群ビタミンは、ビタミン B₆ とビタミン B₁₂ のみである。ビタミン B₆ が 75%、ビタミン B₁₂ が 50% という生体利用率が採択されている。各々ピリドキシン、シアノコバラミンという遊離型のビタミンと比較しての値である。したがって、食事摂取基準で示された 1.5 mg のビタミン B₆ を摂取するためには、サプリメント中のピリドキシンならば、1.1 mg と当価となる。食事摂取基準で示された 2.4 μg のビタミン B₁₂ を摂取するためには、1.2 μg のシアノコバラミンが当価となる。これらの値は、厳密にいうと、消化・吸収率である。一端、血清中に現れてしまえば、あとの体内利用率は合成ビタミンと同じであろうという考え方に基づいたものである。しかしながら、この考え方には盲点があるが、ここではふれない。

注意が必要なものが、葉酸である。2005 年版では、生物系由来 (これを「食事性」という) の葉酸の値として、推奨量を 240 μg としている。この量をサプリメント中のプテロイルモノグルタミン酸として摂るならば、半分の 120 μg で当価となる。つまり、プテロイルモノグルタミン酸は、食事性葉酸 (生物系食料中の葉酸) の 2 倍の葉酸活性を有することを意味する。ただし、食事と一緒に摂ると、プテロイルモノグルタミン酸の生体利用率は低下して、1.7 倍となる。

他の B 群ビタミンにおいても、生物系由来の食料中のものは、遊離型のビタミン (いわゆるビタミン剤) と比較すれば、生体利用

率が低いと推察される。多くのビタミンの必要量を求める実験が、遊離型のビタミンを用いたものであることを考えると、我々日本人が 1 日に食べている食事の中の B 群ビタミンの生体利用率を求める研究は、優先順位が高いと考えられる

平成19年度 厚生労働科学研究費補助金
循環器疾患等生活習慣病対策総合研究事業

日本人の食事摂取基準の活用方法に関する検討

報告書

平成20(2008)年3月
独立行政法人 国立健康・栄養研究所
栄養疫学プログラム

由田 克士

〒162-8636 東京都新宿区戸山1-23-1

電話：03-3203-5721 FAX：03-3202-3278