

器官生理学 第15回
2023年10月8日 第1時限

講義テーマ 消化器（消化器3）

到達目標

各栄養素の消化と吸収、小腸における栄養素の分解過程、消化管における水の出入りに関して説明できる。

血管分子生理学（第1生理学）
内藤 尚道
hinaito@med.kanazawa-u.ac.jp

器官生理学 第15回
2023年10月8日 第1時限

講義テーマ 消化器（消化器3）

到達目標

各栄養素の消化と吸収、小腸における栄養素の分解過程、消化管における水の出入りに関して説明できる。

血管分子生理学（第1生理学）
内藤 尚道
hinaito@med.kanazawa-u.ac.jp

器官生理学 第15回
2023年10月8日 第1時限

講義テーマ 消化器（消化器3）

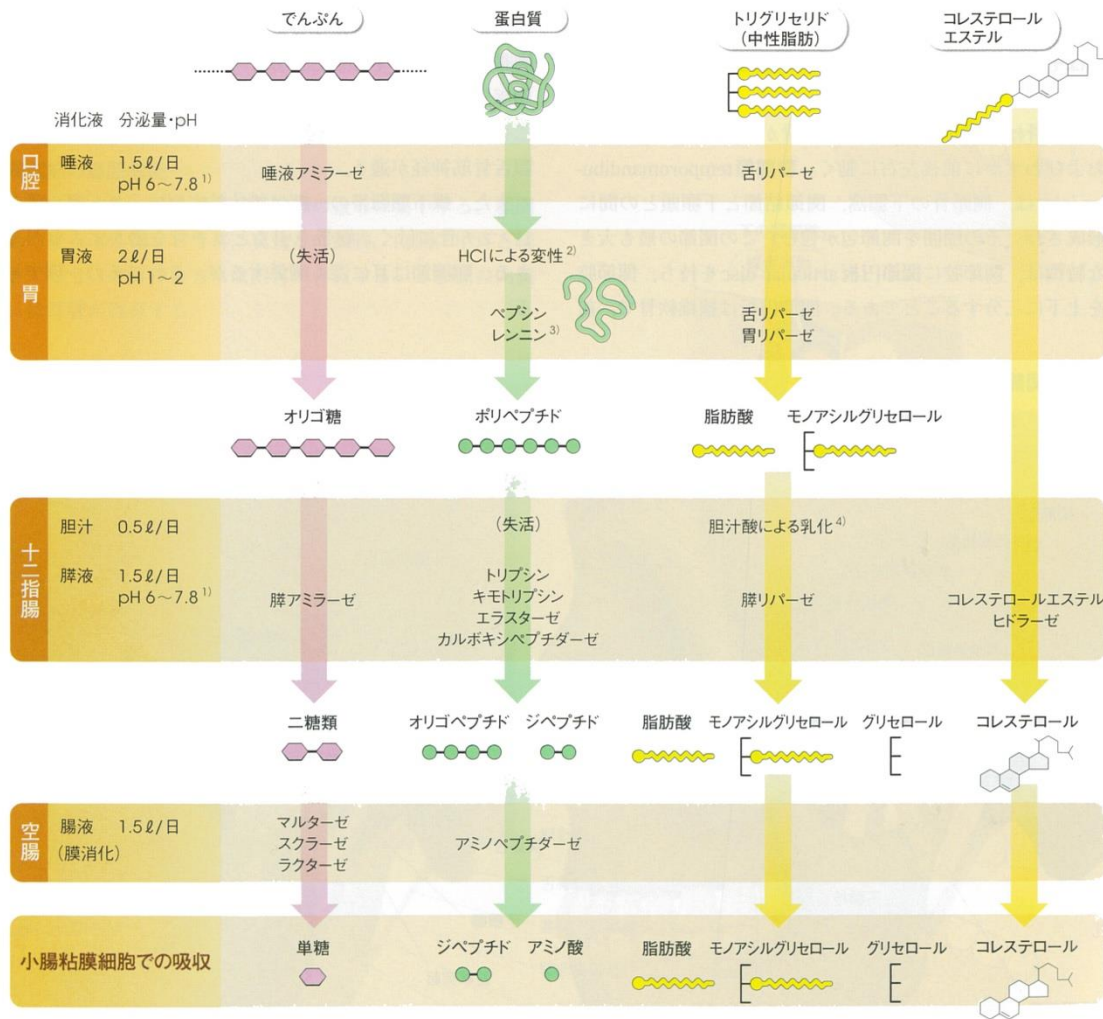
到達目標

各栄養素の消化と吸収、小腸における栄養素の分解過程、消化管における水の出入りに関して説明できる。

血管分子生理学（第1生理学）
内藤 尚道
hinaito@med.kanazawa-u.ac.jp

消化液による分解

6 消化管各部位における消化酵素とその分解産物



高分子の食物を低分子
に変える。

適切な温度、pHの環境
と消化酵素があれば、反
応は進む。
(自発反応である)

1) 唾液の分泌量が少ないとき (食間) は酸性、分泌量が多いとき (食事中) はよりアルカリ性。

2) 強い酸により、蛋白質分子の立体構造 (四次構造) が崩れる。

3) レニンはヒトでは乳児期にのみ分泌され、ミルクの蛋白質 (カゼイン) を固める作用を持つ。胃における滞留時間を長くし、ミルクの消化吸収効率を良くする。

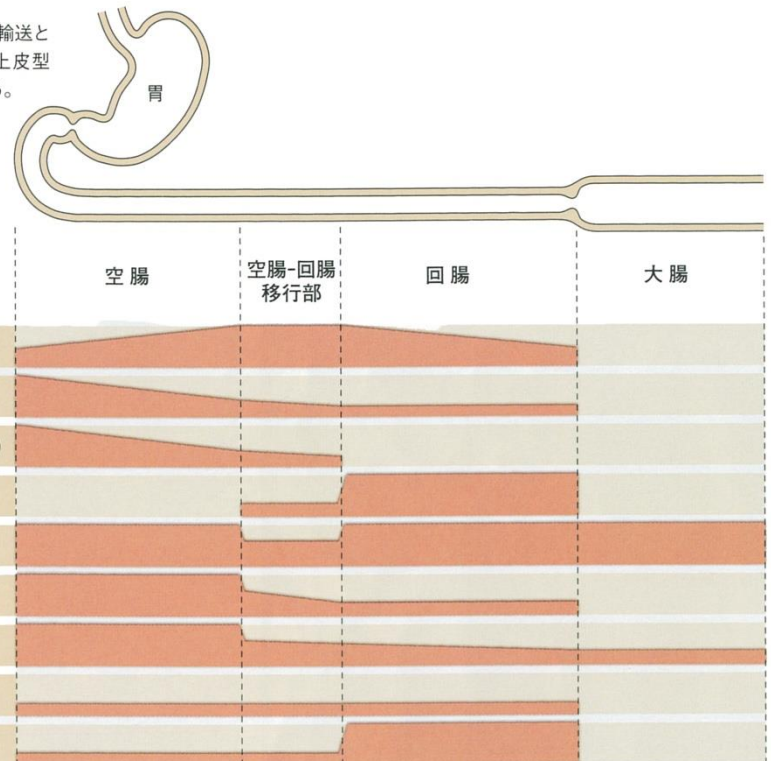
4) 乳化は胆汁酸とリン脂質の協調作用。脂肪が懸濁化する。

栄養素の消化と吸収

- 食物は消化酵素による管腔内消化と小腸粘膜上皮細胞の消化酵素による膜消化により消化される。
- 炭水化物はグルコースに、タンパク質はアミノ酸に、脂肪は脂肪酸とグリセロールに消化され吸収される。

78 主な栄養素の吸収部位

小腸での Na^+ 輸送は、糖およびアミノ酸輸送と協同している。大腸での Na^+ 輸送は、上皮型 Na^+ チャネル(ENaC)を介して吸収される。

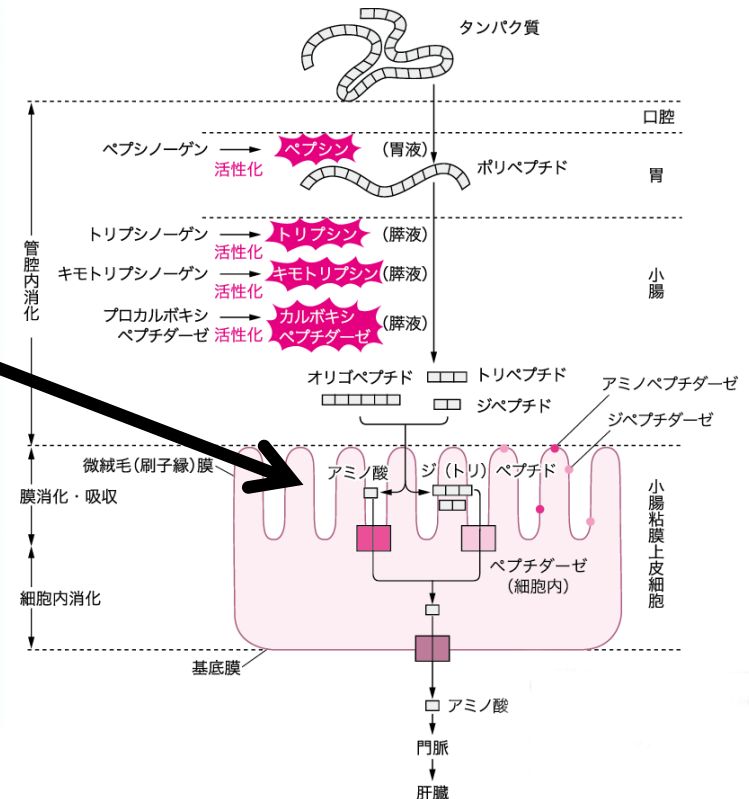
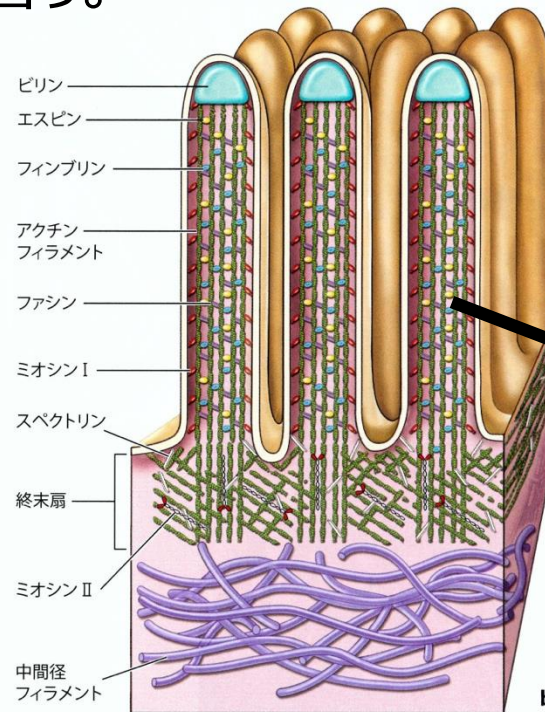
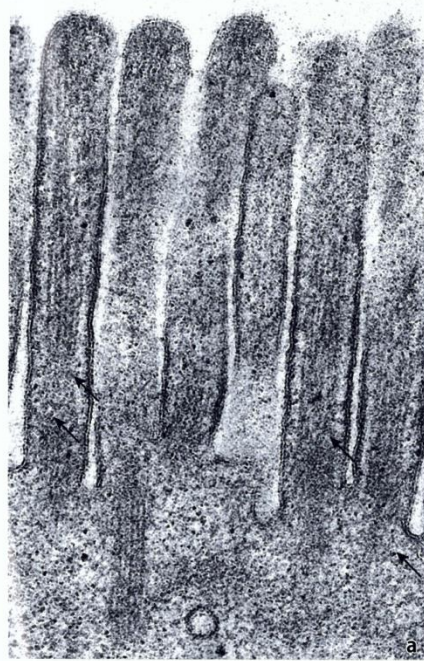


- グルコースとアミノ酸は小腸粘膜上皮細胞の膜輸送体を介して吸収される。
- 脂肪酸、グリセロールは脂質二重層を拡散により通過する。

栄養素の消化と吸収

刷子縁 (さっしえん、brush border)

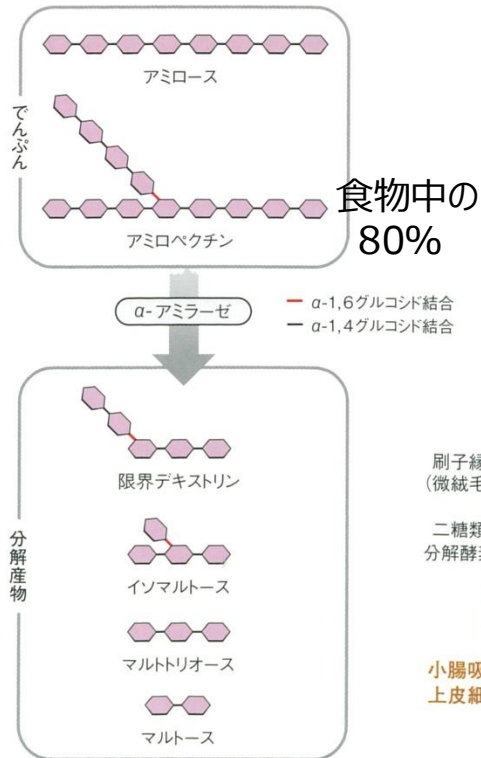
小腸上皮細胞および腎臓の近位尿細管細胞の管腔側に存在する長さや太さが不揃いの微絨毛が密に形成されている領域。頂端膜(apical membrane)とも言う。



栄養素の消化と吸収・炭水化物

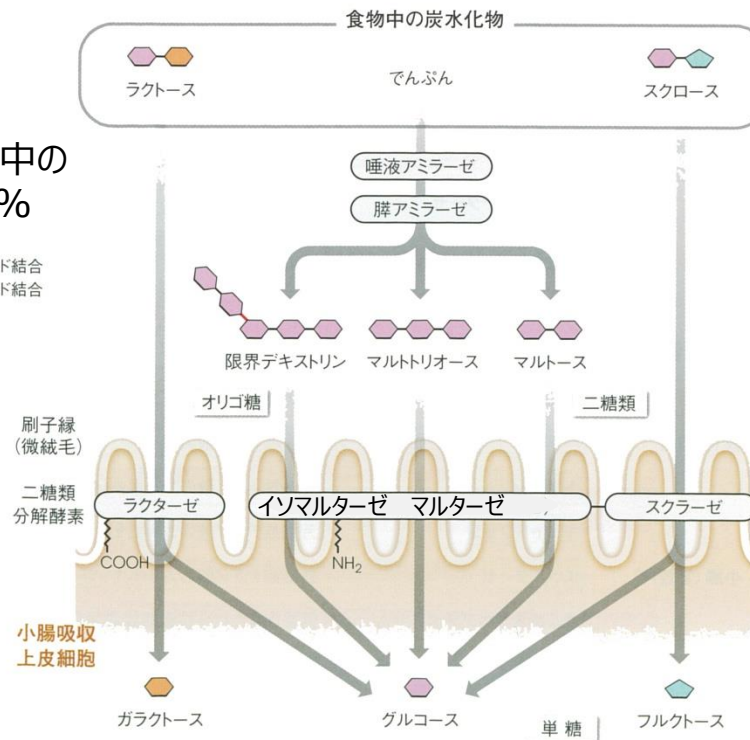
生命活動に必要な**エネルギー源の半分以上**は**炭水化物**に依存している。
ヒトの消化管で消化吸収できる多糖類はグルコースの重合体である「でんぷん」である。2糖類のマルトース（麦芽糖）、スクロース（ショ糖）、ラクトース（乳糖）も消化吸収できる。

79 α -アミラーゼによるでんぷんの加水分解



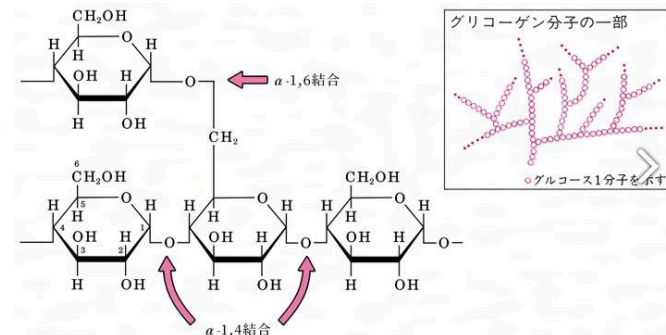
80 炭水化物の消化の流れ

アミラーゼによる管腔内消化と膜結合型二糖類分解酵素による膜消化



α アミラーゼは、**管腔内消化**
 α 1-4結合のみ切断できる。
(2、3個のグルコース単位まで分解)

α 1-6結合は
イノマルターゼ
(**α 限界デキストリナーゼ**)で切断される。
マルトースは
マルターゼにより切断される。
(**α グルコシダーゼ**)



栄養素の消化と吸収・炭水化物

炭水化物とは単糖類を構成成分とする有機化合物の総称。その名前の由来は、これらを分子式で表わすと多くの場合 $C_mH_{2n}O_n$ となり、 $C_m(H_2O)_n$ と書き直すと炭素と水が結合したように見えるため。

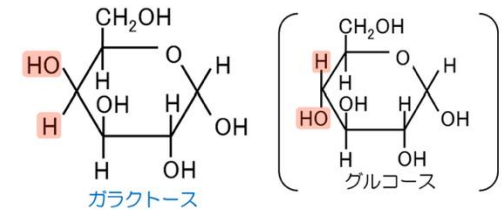
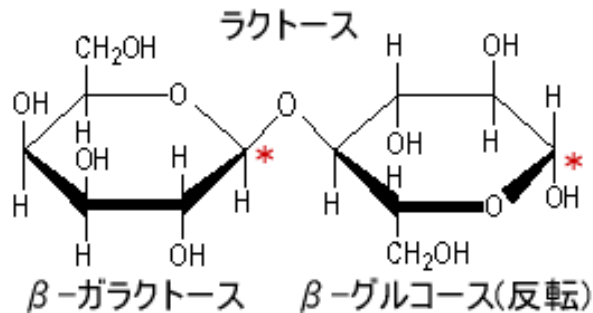
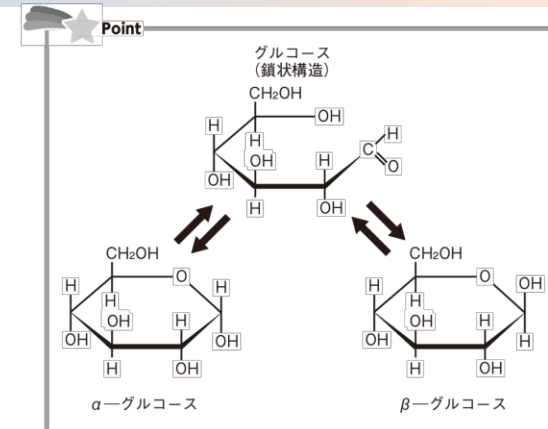
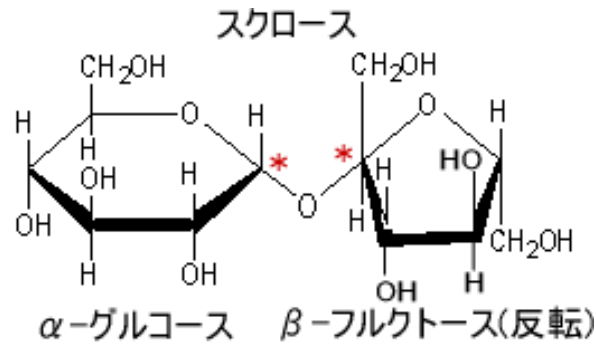
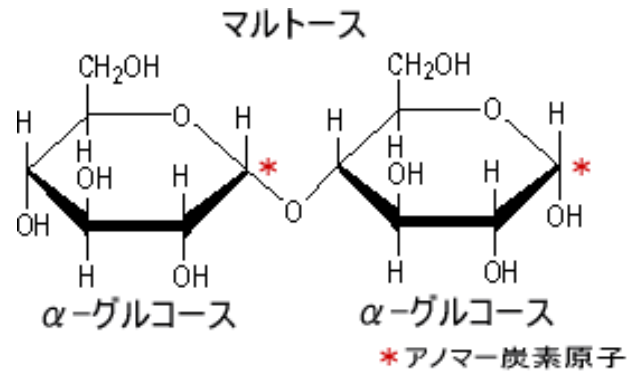
炭水化物	単糖類		ブドウ糖、果糖、ガラクトース等	糖類
	少糖類	二糖類	ショ糖、麦芽糖、乳糖、トレハロース等	
		三糖類以上（オリゴ糖）	ラフィノース、スタキオース等	
	多糖類	でんぷん性		糖質
		難消化性	難消化性でんぷん、難消化性デキストリン等	食物繊維
		水溶性	ペクチン、ガム、アルギン酸ナトリウム等	
		不溶性	セルロース、ヘミセルロース等	
	その他		リグニン等	

ヒトの消化酵素で消化できない成分は「食物繊維」

それ以外の成分が「糖質」

糖質のうち単糖類及び二糖類（糖アルコールは除く）は「糖類」

栄養素の消化と吸収・炭水化物



4 位水酸基の向き (配向) が違う

単糖類

- グルコース (ブドウ糖)
- フルクトース (果糖)
- ガラクトース

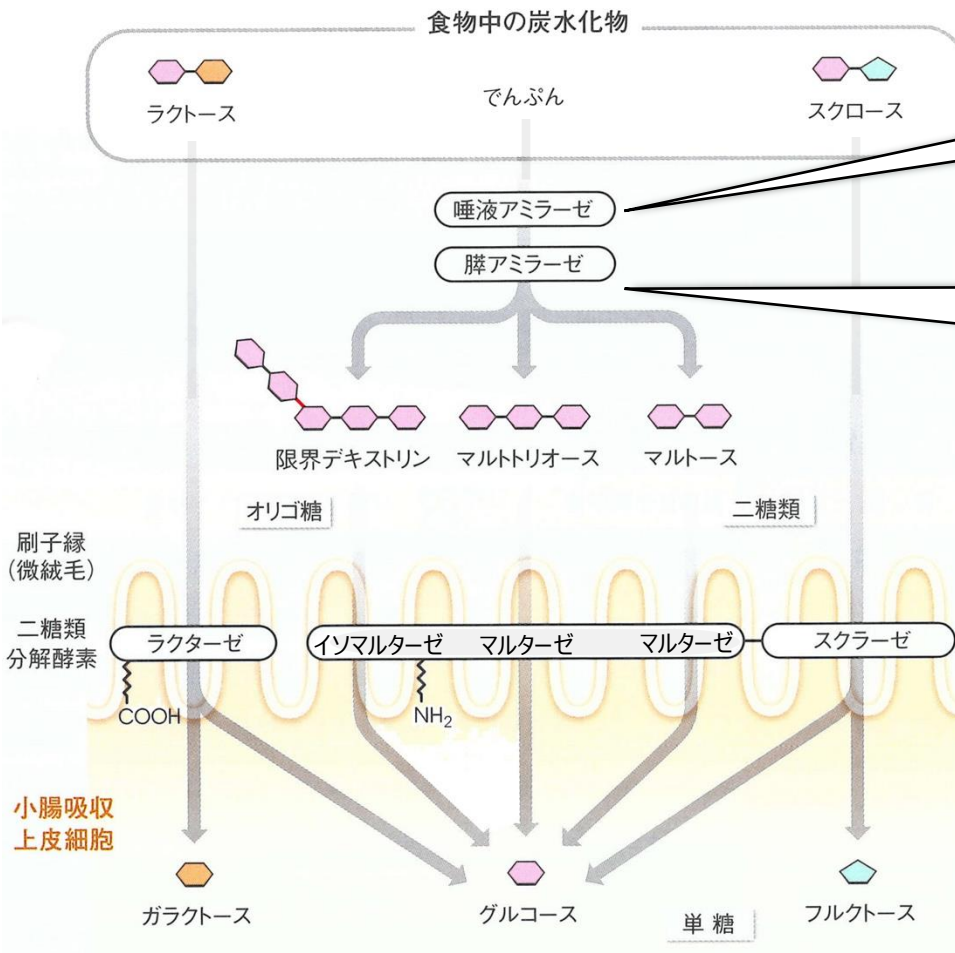
二糖類

- マルトース (麦芽糖) - グルコース+グルコース
- ラクトース (乳糖) - グルコース+ガラクトース
- スクロース (ショ糖) - グルコース+フルクトース

栄養素の消化と吸収・炭水化物

80 炭水化物の消化の流れ

アミラーゼによる管腔内消化と膜結合型二糖類分解酵素による膜消化



口腔で混ざり胃に入って、胃酸と混ざり pHが低下することで、酵素活性が失活するまでの30~60分間、消化が進む。

膵アミラーゼにより15~30分で2糖、3糖に分解される。

絨毛の上皮は常に更新され、寿命は約5日間である。新しい細胞が作られ、酵素も常に新しくなる。

栄養素の消化と吸収・炭水化物

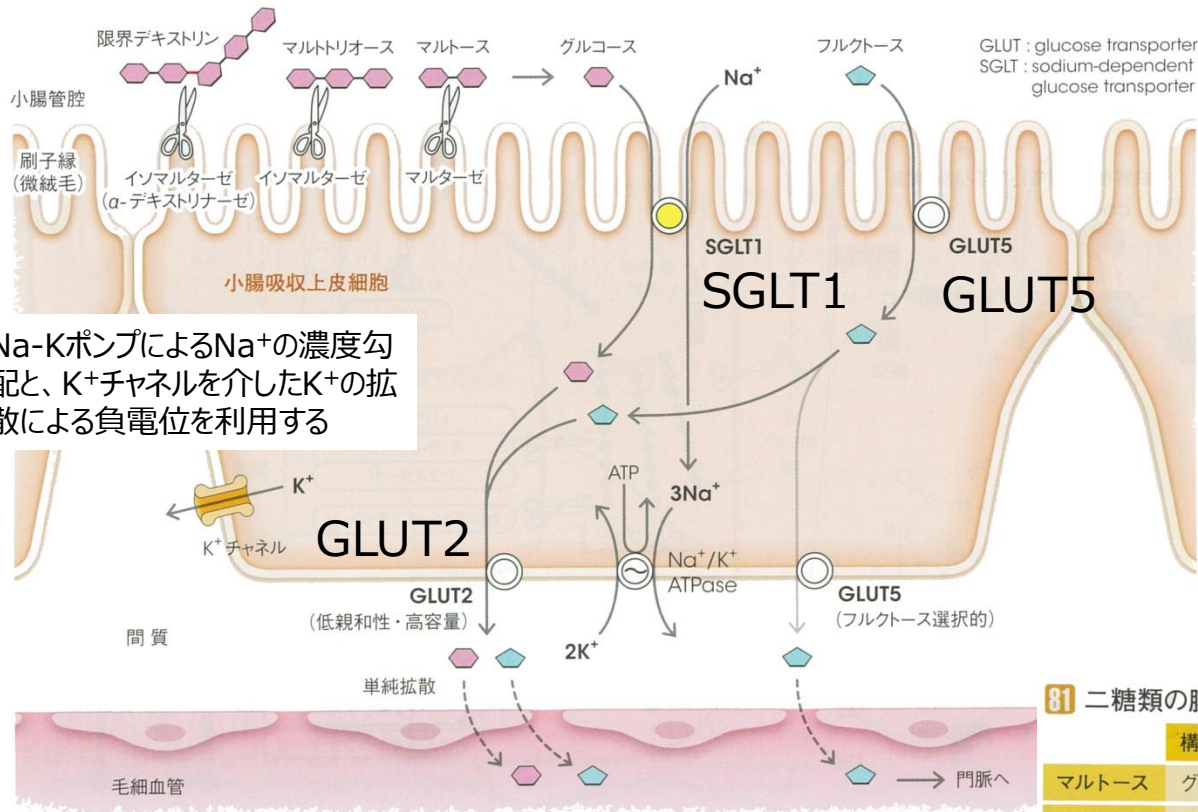
単糖は速やかに小腸粘膜上皮細胞に取り込まれる。

グルコースとガラクトースはNa⁺依存性グルコース輸送体SGLT1

フルクトースはNa⁺非依存性グルコース輸送体GLUT5

82 グルコース輸送系

Na⁺/K⁺ ATPaseによるNa⁺の汲み出し(細胞内低Na⁺濃度)と、チャネルを介したK⁺の拡散による細胞内負電位が、SGLT1の駆動力となっている



グルコース・ガラクトース

SGLT1を介して細胞内に入る。
細胞内から血管側への排出は
Na⁺非依存性グルコース輸送体
GLUT2を介する。

フルクトース

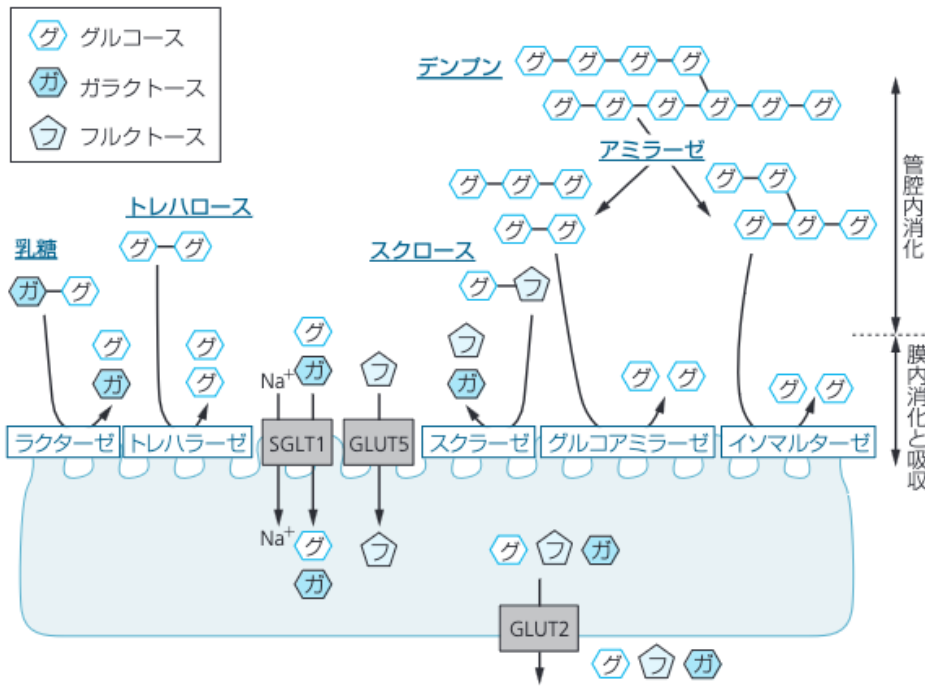
GLUT5で細胞内へ入る。
GLUT2（及びGLUT5）で細胞外にでる。

GLUT2,5は促進拡散
SGLT1は2次性能動輸送

81 二糖類の膜消化と輸送路

	構成単位	消化酵素	吸収路(管腔膜)	排出路(側底膜)
マルトース	グルコース + グルコース	マルターゼ	SGLT1	GLUT2
ラクトース	グルコース + ガラクトース	ラクターゼ	SGLT1	GLUT2
スクロース	グルコース + フルクトース	スクラーゼ	SGLT1, GLUT5	GLUT2, GLUT5

栄養素の消化と吸収・炭水化物



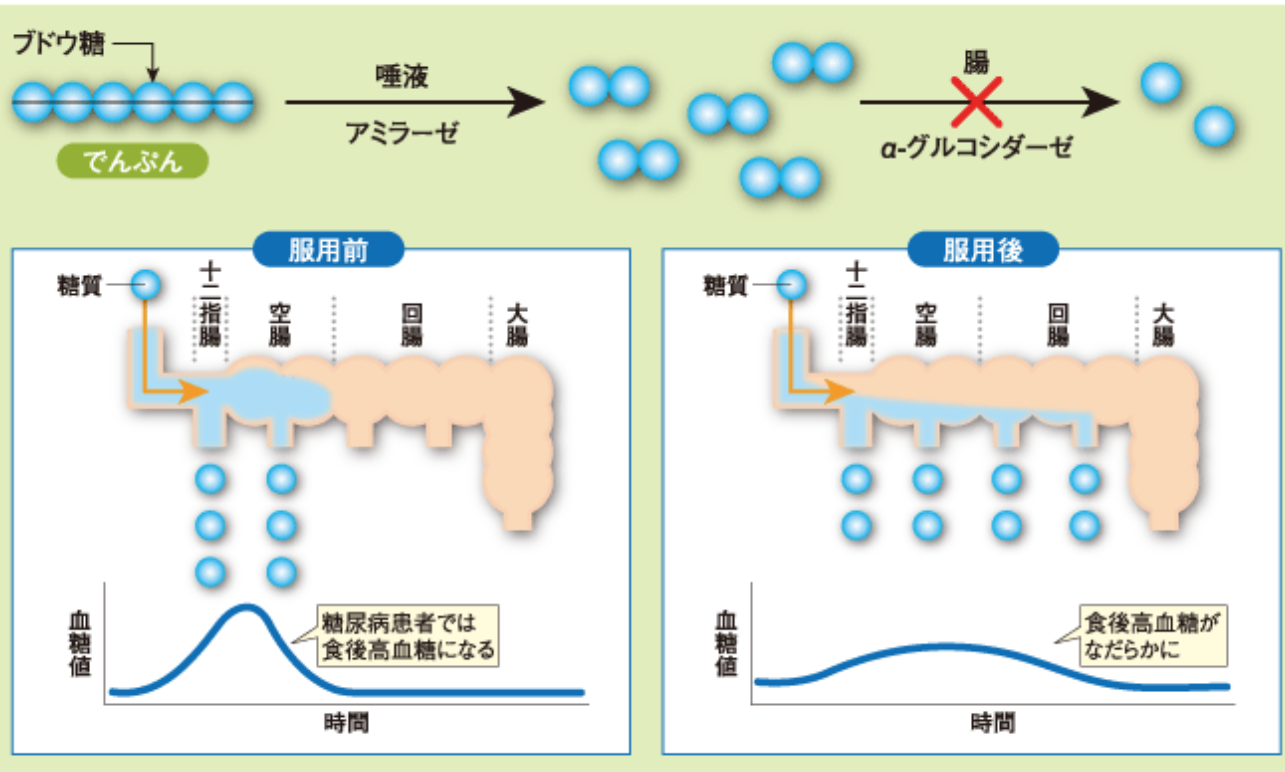
グルコアミラーゼ：澱粉を非還元性末端からグルコース（ β 型）単位で逐次分解を行うエキソ型酵素。 α -1,4-グルコシド結合のみならず α -1,6-グルコシド結合にも作用する。

食塊中の未消化デンプンは膵臓から分泌される膵液 α -アミラーゼによってさらに消化を受ける。デンプンは、 α -アミラーゼによって最終的には二糖のマルトースと三糖のマルトトリオースにまで消化される。これらのオリゴ糖は、さらに小腸粘膜上皮細胞表面（刷子縁膜）に存在する酵素のマルターゼやグルコアミラーゼにより消化を受け、マルトースやマルトトリオースはグルコースにまで加水分解される。スクロースは、スクラーゼにより加水分解（膜消化）を受け、フルクトースとグルコースを生じる。またラクトースは、ラクターゼによって分解され、グルコースとガラクトースとなる。**成人になるとラクトースを加水分解するラクターゼが消失することが多く、これをラクトース不耐症（乳糖不耐症）とよぶ。**消化されなかったラクトースは大腸の細菌群で発酵されて、腸ガスを発生し腹痛や下痢の症状を引き起こす場合もある。腸管からのグルコース吸収は、小腸上皮細胞膜に局在するナトリウム依存性グルコース輸送体により細胞内に輸送され、その後、基底膜より GLUT2 により血液側に移行する。また、単糖であるフルクトースは、上皮細胞膜に局在する GLUT5 により輸送されて細胞内に取り込まれる。

栄養素の消化と吸収・炭水化物

糖尿病治療の標的となる。

図 α -グルコシダーゼ阻害薬の作用機序



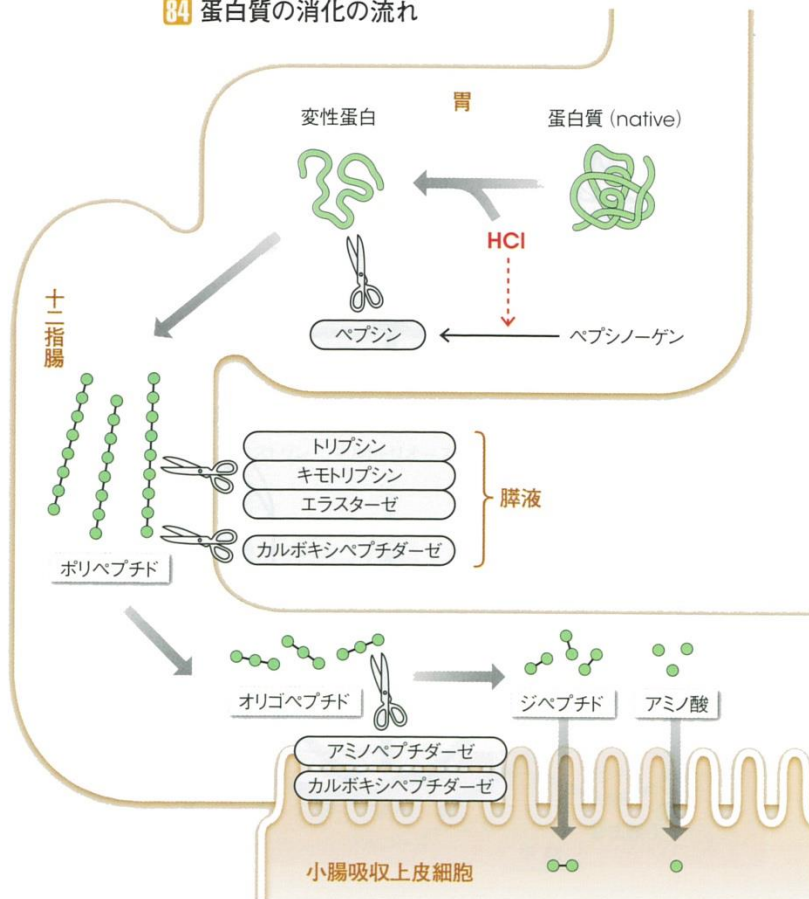
α グルコシダーゼ：
2 糖類を単糖にする酵素の総称。
マルターゼ、イソマルターゼ、スクラーゼを
競合的に阻害する。

2 糖類を単糖類にする酵素を阻害して、糖の分解・吸収を遅らせる。
→ 糖が腸内に入った際に、薬も一緒に存在する必要があるので、
食前に服用する。

栄養素の消化と吸収・タンパク質

タンパク質はペプチド結合によるアミノ酸の重合体である。
体内のタンパク質の1~2%は毎日交換されている。
タンパク質を消化してアミノ酸として吸収する。

84 蛋白質の消化の流れ



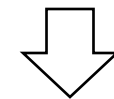
胃： **ペプシン**は芳香族アミノ酸がアミノ末端に生じるような部位でペプチド結合を切断して、**ポリペプチド**とする。

(アミノ酸数が10より多いもの：ポリペプチド)

十二指腸： セクレチン、CCKにより膵液を分泌
酸性び粥は中和され、膵液の**トリプシン**、**キモトリプシン**、**エラスターゼ**などの強力な蛋白分解酵素で**オリゴペプチド**になる。

(アミノ酸数が2~10のもの：オリゴペプチド)

小腸粘膜細胞： カルボキシペプチダーゼ、アミノペプチダーゼにより**ジペプチド**と**アミノ酸**になる。

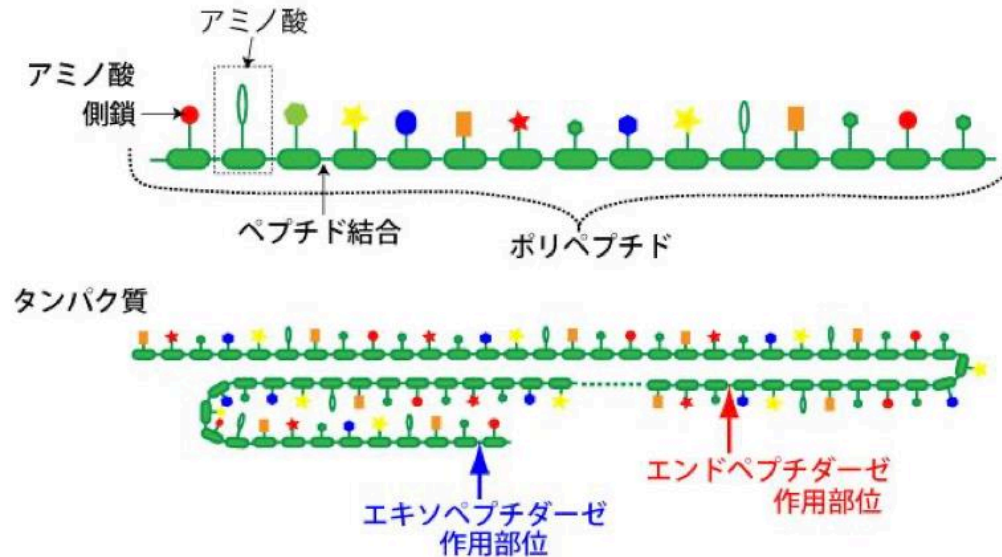


小腸粘膜で吸収

栄養素の消化と吸収・タンパク質

エンドペプチダーゼ：タンパク質内部のペプチド鎖を加水分解する。
(ペプシン、トリプシン、キモトリプシン、エラスターゼ)

エキソペプチダーゼ：タンパク質末端のペプチド結合に作用する。
(アミノペプチダーゼ、カルボキシペプチダーゼ)



十二指腸で、
膵酵素によりポリペプチドは
15～30分で加水分解され、
オリゴペプチドになる。

↓ 微絨毛の アミノペプチダーゼ
ジペプチダーゼ

- アミノ酸 (～20%)
- ジペプチド、トリペプチド (～80%)

栄養素の消化と吸収・タンパク質



トリプシンとキモトリプシンの切断部位

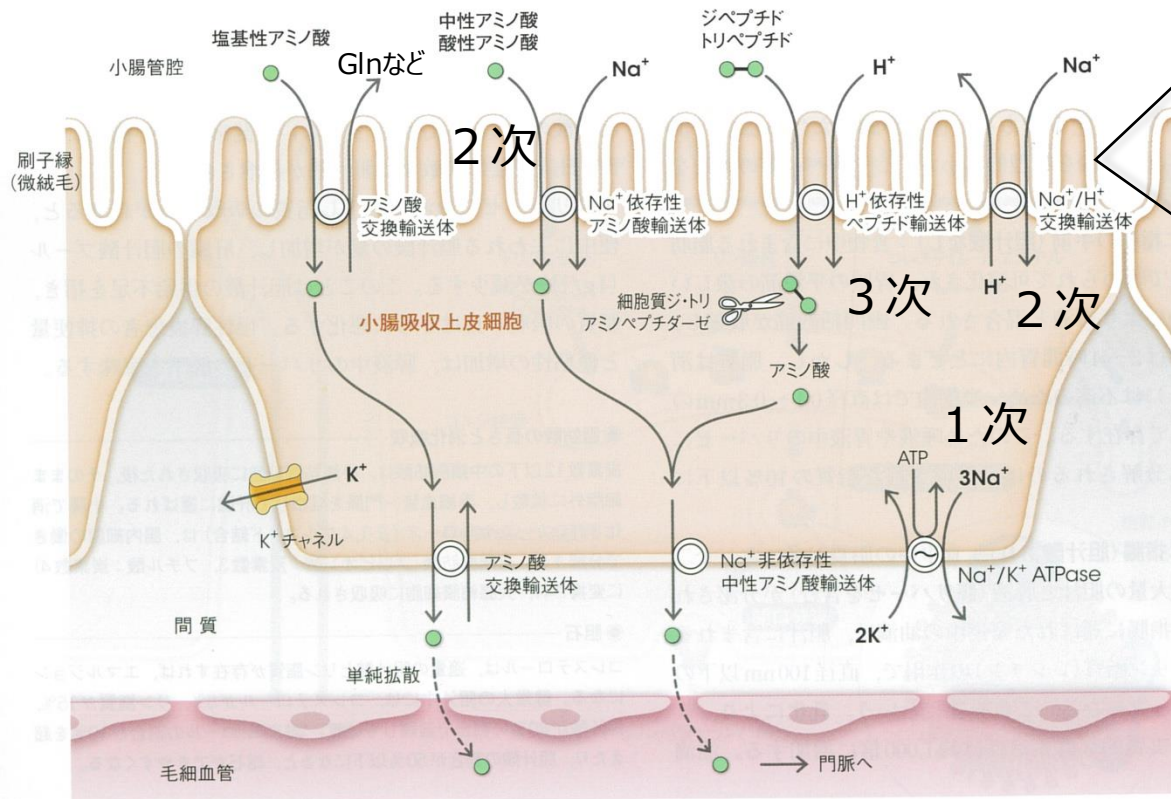
エラスターゼとペプシンの切断部位

酵素は切断できる部位が決まっている。

栄養素の消化と吸収・タンパク質

微絨毛のアミノペプチダーゼ
ジペプチダーゼ ⇒ ・ アミノ酸 (～20%)
・ ジペプチド、トリペプチド (～80%)

86 アミノ酸輸送系とペプチド輸送系 管腔膜のペプチド輸送体は H^+ との共輸送である



ジペプチド、トリペプチドは
 H^+ 依存性ペプチド輸送体
により細胞内へ。
→ 3次性能動輸送

アミノ酸はアミノ酸輸送体
で細胞内へ取り込まれる。
→ 2次性能動輸送、及
び促進拡散

アミノペプチダーゼ：オリゴペプチドを切断する。

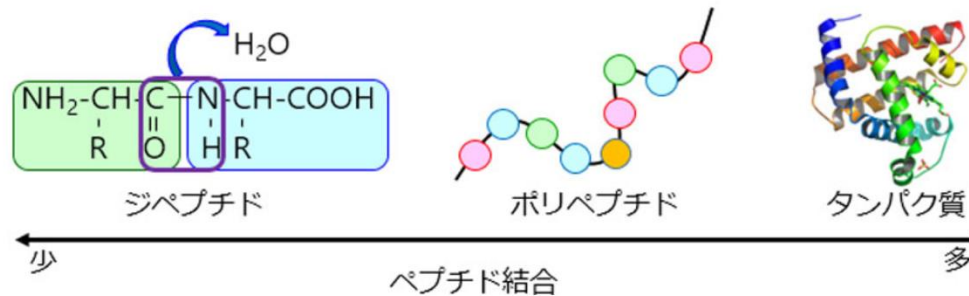
栄養素の消化と吸収・タンパク質

アミノ酸の基本構造

アミノ酸は、分子内に**酸性基であるカルボキシル基 (-COOH)** と **塩基性基であるアミノ基 (-NH₂)** を有する化合物の総称です。



アミノ酸同士は**ペプチド結合 (-CONH-)** によって結合することにより、二つのアミノ酸が結合した**ジペプチド**からアミノ酸が多数結合した**タンパク質**まで各種の化合物が構成されます。



中性アミノ酸

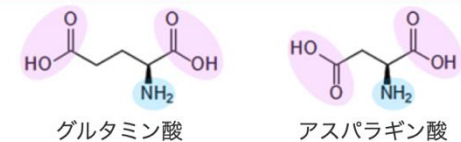
カルボキシル基、アミノ基以外に特徴的な官能基をもつ



- アルキル鎖を持つ ⇒ グリシン、アラニン、バリン、ロイシン、イソロイシン
- ヒドロキシ基を持つ ⇒ セリン、スレオニン
- 硫黄を含む ⇒ システイン、メチオニン
- アミド基を持つ ⇒ アスパラギン、グルタミン
- イミノ基を持つ ⇒ プロリン
- 芳香族基を持つ ⇒ フェニルアラニン、チロシン、トリプトファン

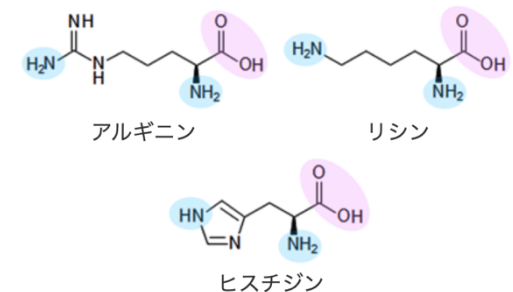
酸性アミノ酸

2つのカルボキシル基をもつ



塩基性アミノ酸

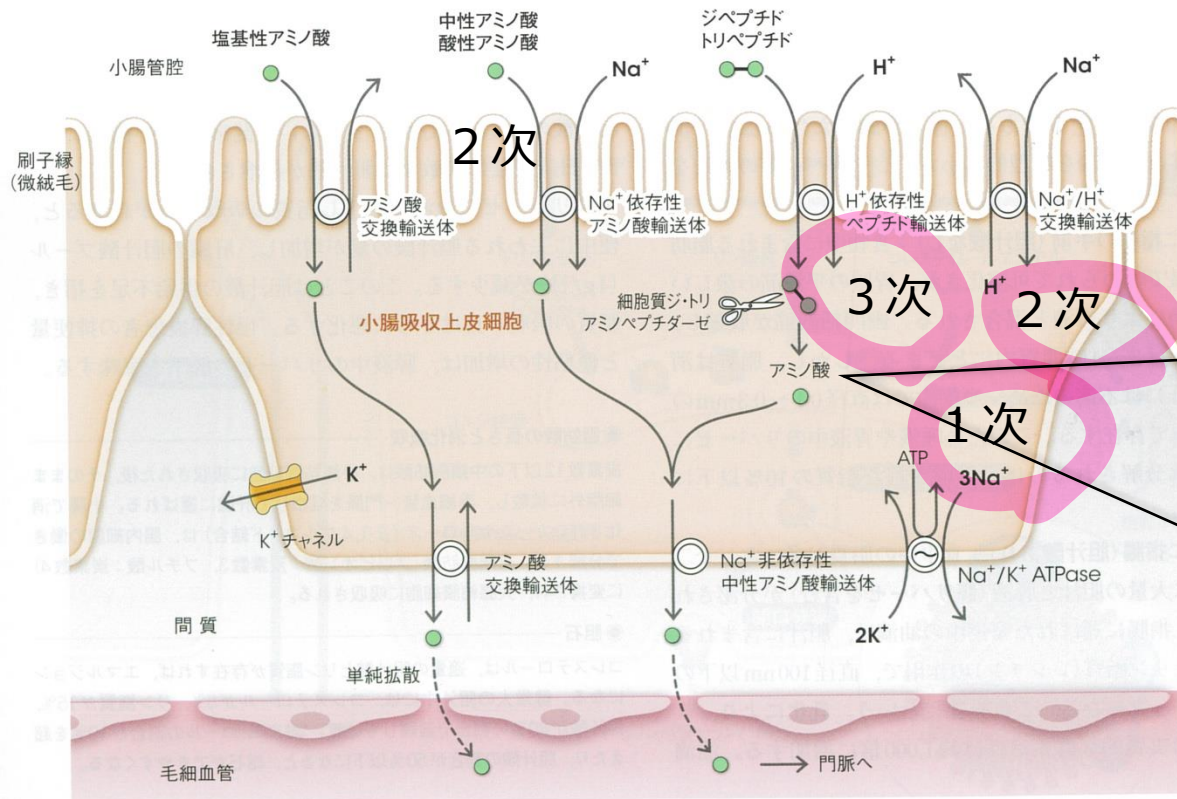
2つのアミノ基をもつ



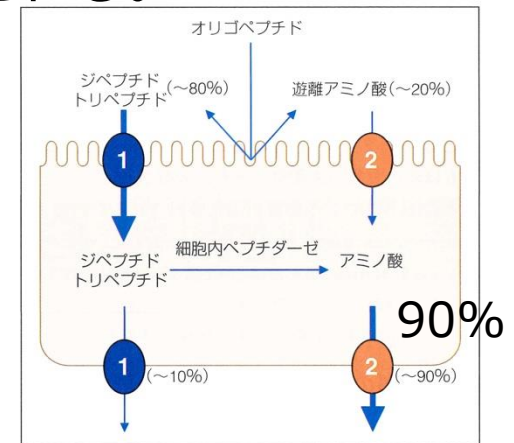
栄養素の消化と吸収・タンパク質

微絨毛のアミノペプチダーゼ
ジペプチダーゼ \Rightarrow ・ アミノ酸 (～20%)
・ ジペプチド、トリペプチド (～80%)

86 アミノ酸輸送系とペプチド輸送系 管腔膜のペプチド輸送体は H^+ との共輸送である



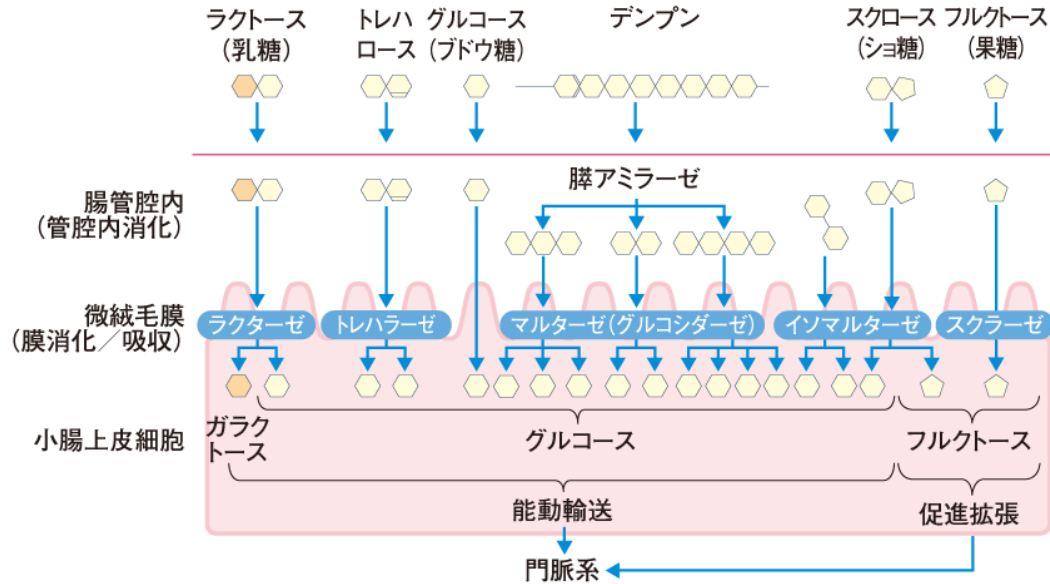
細胞内では細胞内ペプチダーゼによりアミノ酸に分解される。



↓
アミノ酸輸送体で間質へ。
その後、毛細血管→門脈。

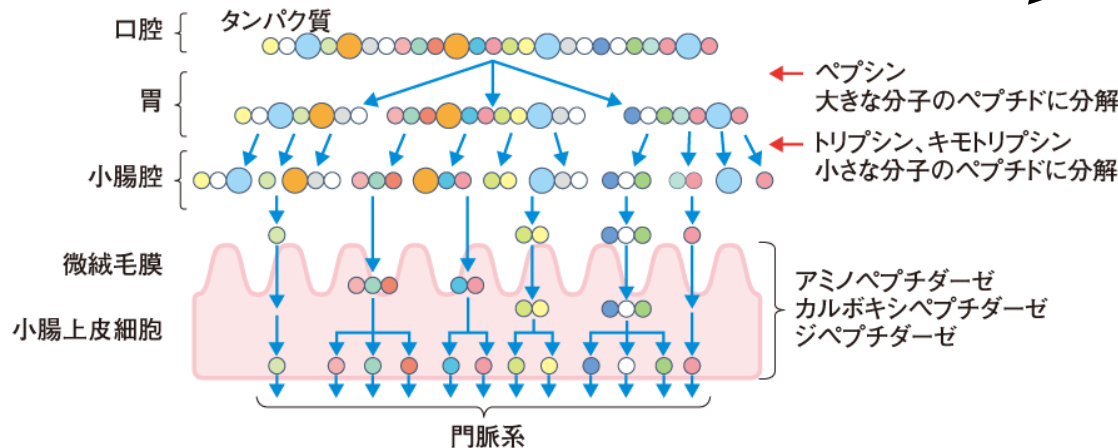
炭水化物とタンパク質

糖質の分解



糖とタンパク質の分解の過程は似ている。

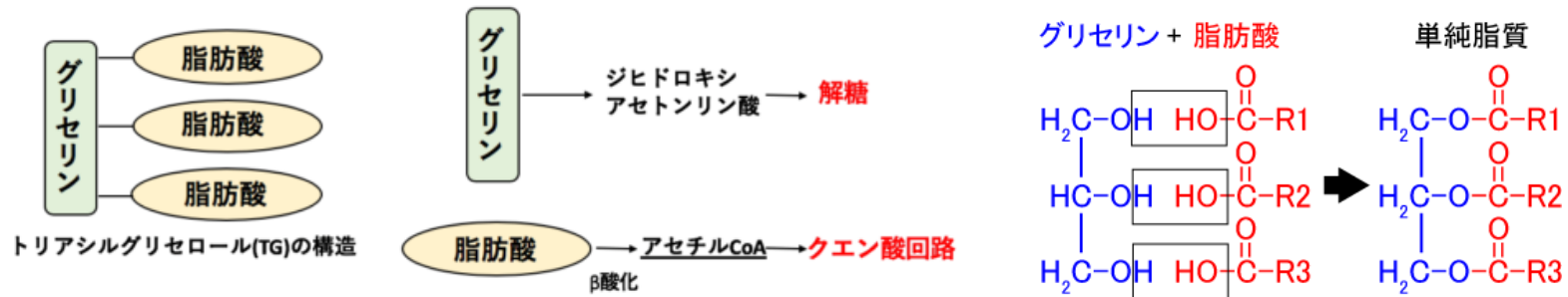
タンパク質の分解



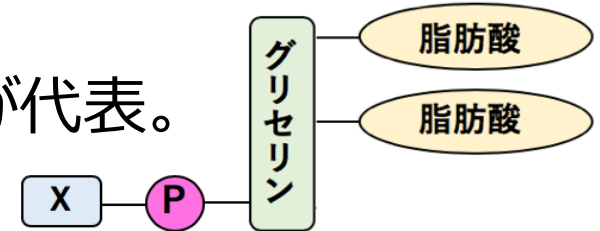
タンパク質は約20種類のアミノ酸から構成されているため、分解に関わる酵素も種類が多い。

脂質の分類

単純脂質 : アルコールと脂肪酸のエステルのこと。
グリセリン（3 価のアルコール）と3つの脂肪酸が
エステル結合した、**トリアシルグリセロール**が代表



複合脂質 : 分子中にリン酸や糖質などを含んでいる脂質
(リン脂質、糖脂質)。
グリセロリン脂質やスフィンゴ脂質が代表。

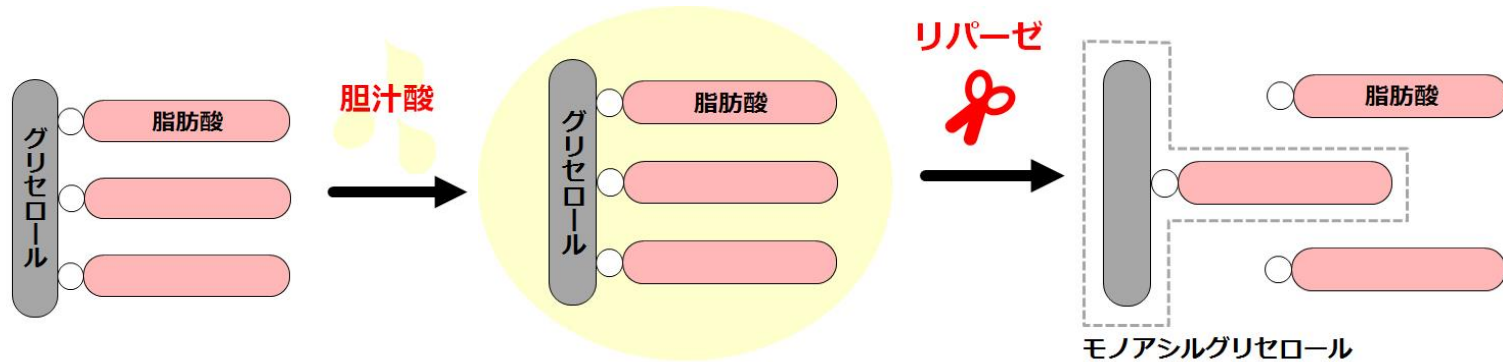
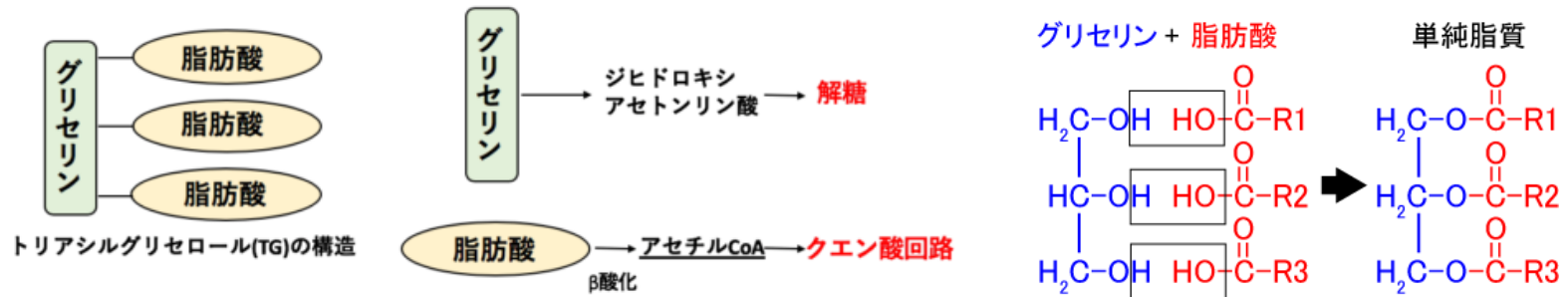


グリセロリン脂質の構造

誘導脂質 : 脂質の加水分解で生じる化合物。
脂肪酸やコレステロール、
エイコサノイド（プロスタグランジンなど）が含まれる。

脂質の分類

単純脂質：アルコールと脂肪酸のエステルのこと。
 グリセリン（3 価のアルコール）と3つの脂肪酸が
 エステル結合した、**トリアシルグリセロール**が代表



脂質を構成するエステル結合を加水分解する酵素群

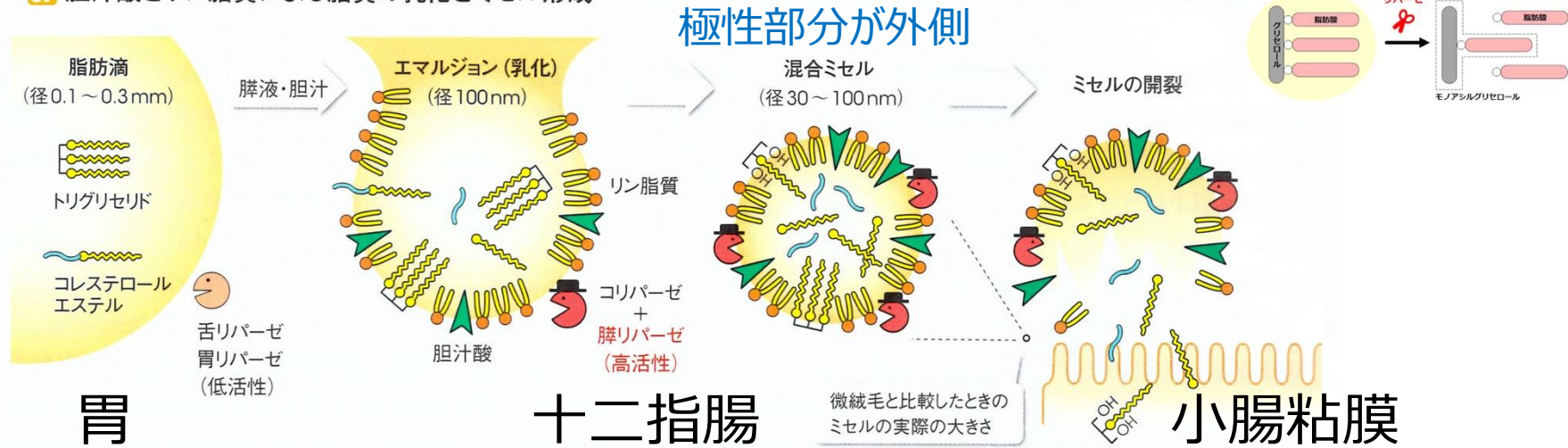
栄養素の消化と吸収・脂質

脂質はエネルギー源として有用なだけでなく、**必須脂肪酸**の供給源として、また**脂溶性ビタミン**の吸収に必要である。

食事中的脂肪の大部分はトリグリセリドである。

コレステロールは細胞膜の成分、各種ステロイドの前駆体として重要。

87 胆汁酸とリン脂質による脂質の乳化とミセル形成



胃では蠕動運動で胃液と混合され、直径0.1~0.3mmの油滴となる。

リパーゼの作用で加水分解されるのは10%以下である。

十二指腸では胆汁に含まれる**胆汁酸**と**レシチン(リン脂質)**により直径が100nm以下となる（乳化）。膵リパーゼの作用によりトリグリセリドは加水分解され脂肪酸と2-モノアシルグリセロールになり、コレステロール、胆汁酸とミセルを形成する。（エマルジョンを形成することで、リパーゼは活性が増す）小腸粘膜でミセルが壊れ脂質二重膜を単純拡散で細胞内に入る。

栄養素の消化と吸収・脂質

必須脂肪酸とは？

脂質の成分である脂肪酸には、体内で作ることができるものと作ることができないものがある。このうち、体にとって重要な役割をもつものの、体内では作ることができないため、食事から摂取する必要があるものを必須脂肪酸という。必須脂肪酸には、リノール酸、 α -リノレン酸、 γ -リノレン酸、アラキドン酸、そしてDHA、EPAがある。

多価不飽和脂肪酸（必須脂肪酸）

【n-3系脂肪酸】 $\omega 3$

ドコサヘキサエン酸（DHA）

エイコサペンタエン酸（EPA）

α - リノレン酸

【n-6系脂肪酸】 $\omega 6$

リノール酸

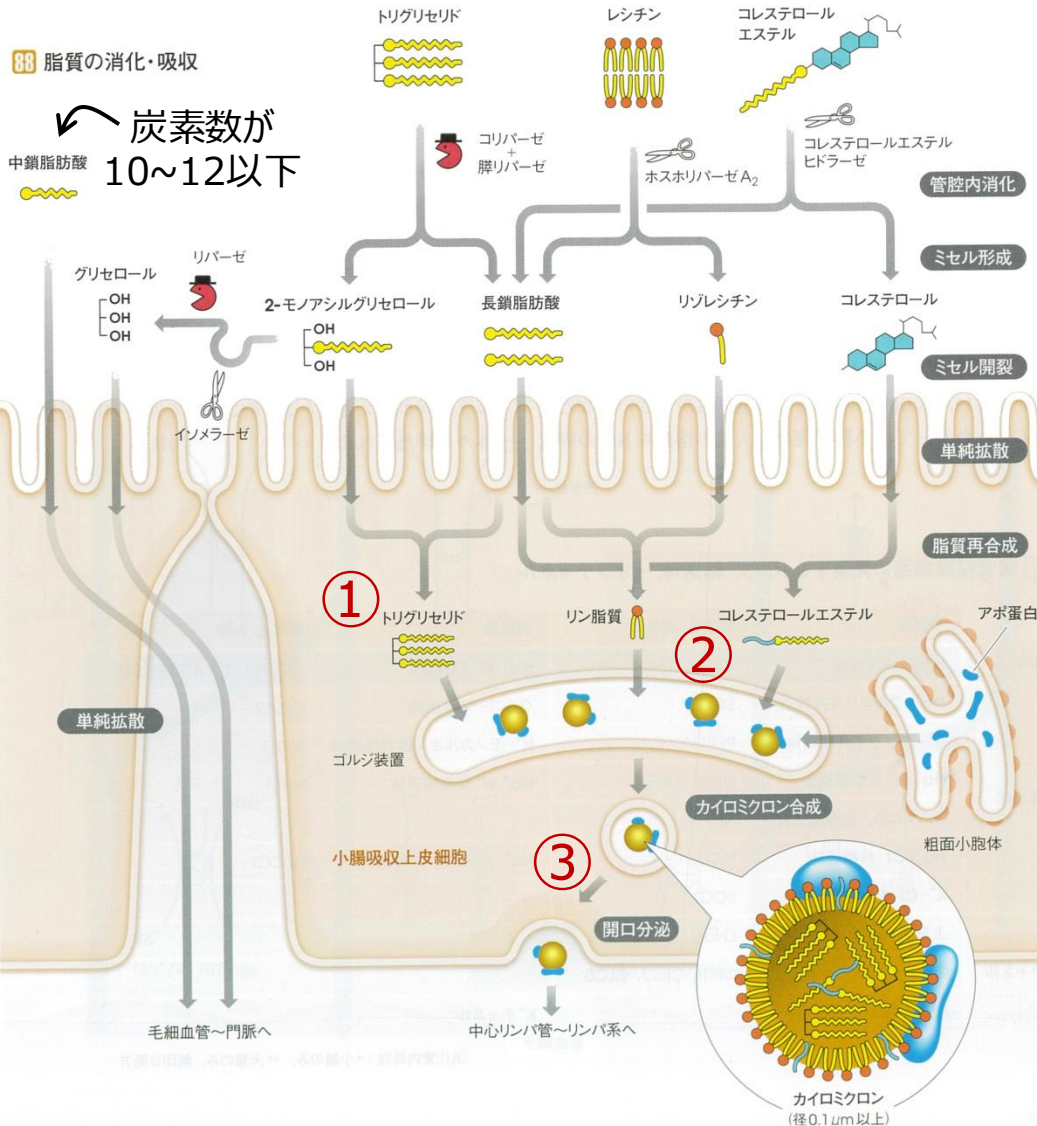
アラキドン酸

γ - リノレン酸

栄養素の消化と吸収・脂質

88 脂質の消化・吸収

炭素数が
10~12以下
中鎖脂肪酸



長鎖脂肪酸は細胞内（滑面小胞体）でエステル結合されトリグリセリドに再合成される①。

トリグリセリド、コレステロール、リン脂質、アポ蛋白が加わりゴルジ体でカイロミクロンが形成される②。

エクソサイトーシスで間質に分泌されリンパ管に入る③。

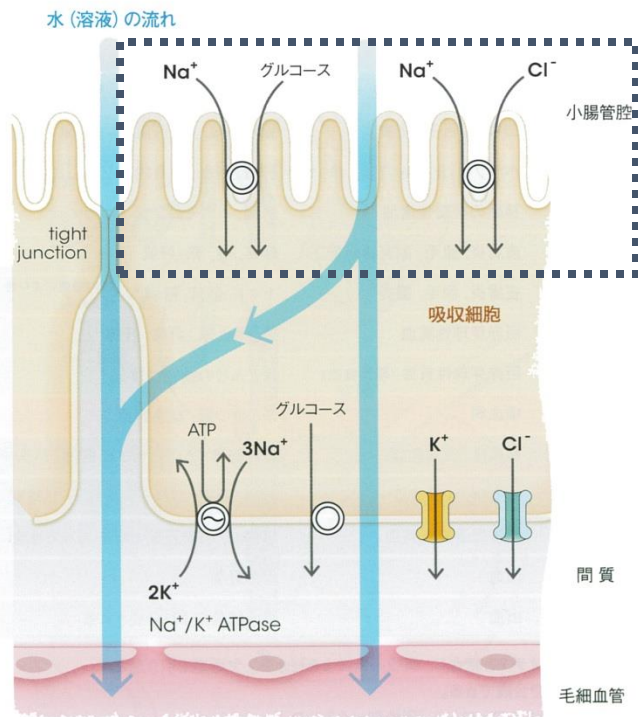
胆汁酸は回腸で再吸収される
→胆汁酸の腸肝循環

栄養素の消化と吸収・水

1日 9 Lの水が腸管に入る。ほとんどが小腸と大腸で吸収され、便中に含まれる水分は0.1~0.2L（2%以下）である。水の輸送は受動輸送である。浸透圧に従って移動する。摂取した液体は胃内で等張性になる。

（低張性の液体は水が吸収され、高張性の液体は薄められる）

80 NaCl, 水の吸収と分泌



- 小腸粘膜上皮細胞の管腔膜には Na^+ 輸送体がある。細胞内への能動的な Na^+ 輸送は浸透圧差を形成する。
- また小腸では糖、アミノ酸、脂肪酸などの吸収により、内腔は次第に低浸透圧になる。

→水の移動が生じる

下痢症

小腸と大腸で何らかの理由で水分を吸収する働きが弱まったり、腸管の中に排出される水分量（分泌物）が多くなったりすると、下痢を起こす。便中に含まれる水分は通常0.1~0.2Lである。

浸透圧性下痢症：乳糖不耐症、高浸透圧性物質の摂取、吸収不良

腸管運動性下痢症：蠕動運動亢進による吸収不良

分泌性下痢症：ガストリンの過剰分泌、コレラ毒素

滲出性下痢症：炎症による粘液の産生亢進と血管透過性亢進

トランスポーター異常による下痢症

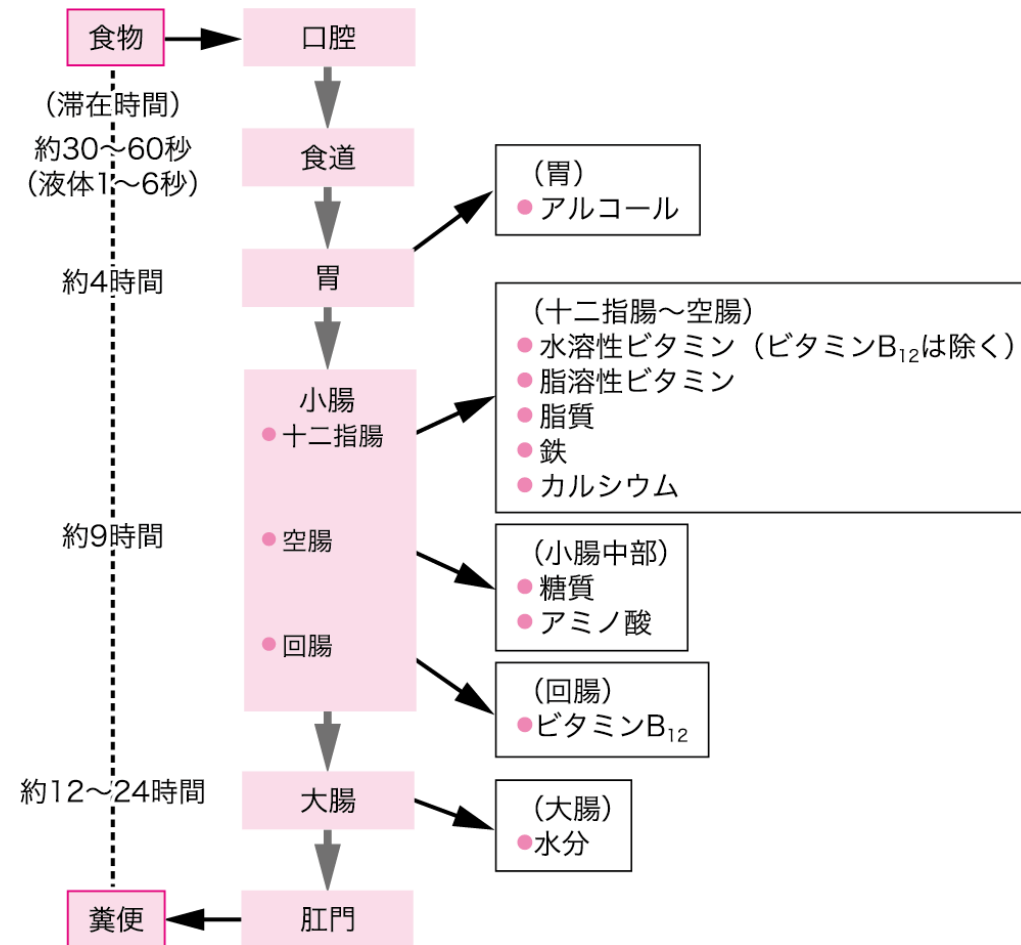
腸管に分泌される消化酵素は HCO_3^- に富むので、アニオンギャップ正常の高 Cl^- 性代謝性アシドーシスを引き起こす。

結腸から K^+ の分泌も亢進→低カリウムを引き起こす。

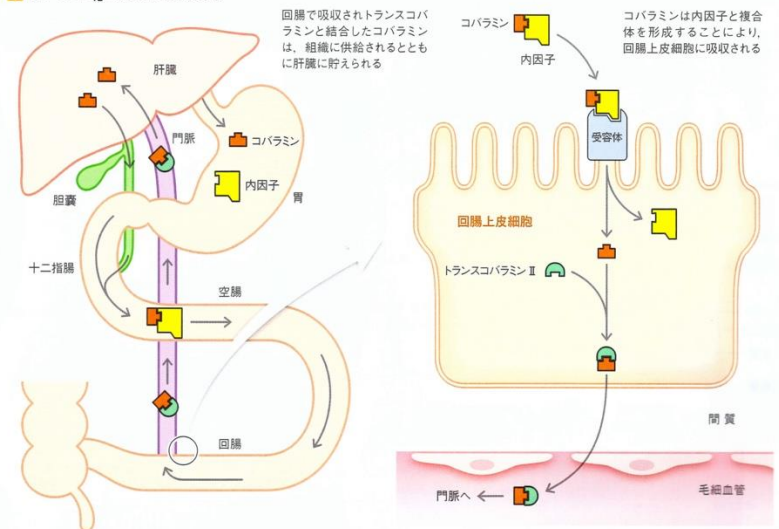
栄養素の消化と吸収・ビタミン

ビタミンの種類：水溶性ビタミン（BとC）、脂溶性ビタミン（A、D、E、K）

- 水溶性ビタミンは小腸粘膜から吸収される
- VitB12は特殊。胃の壁細胞から分泌される内因子と一緒に回腸で吸収される。
- 脂溶性ビタミンは脂質と共に小腸から吸収される。



④ ビタミンB₁₂の吸収と体内循環



栄養素の消化と吸収・鉄

食品中にヘム鉄（赤血球ヘモグロビンや筋ミオグロビンに含まれる鉄、ポルフィリンと結合している）と非ヘム鉄（塩と結合）で存在する。解離して鉄イオンになる。ヘム鉄と非ヘム鉄では吸収率が異なり、それぞれ10-30%と1-3%と言われている。主に十二指腸と空腸で吸収される。

- ヘム鉄はヘム受容体を介して細胞内に入り、細胞内で鉄イオンが遊離する。
- 無機鉄（野菜などの鉄）は3価鉄として存在するので、鉄還元酵素で2価鉄となりDMT1により細胞内に入る。

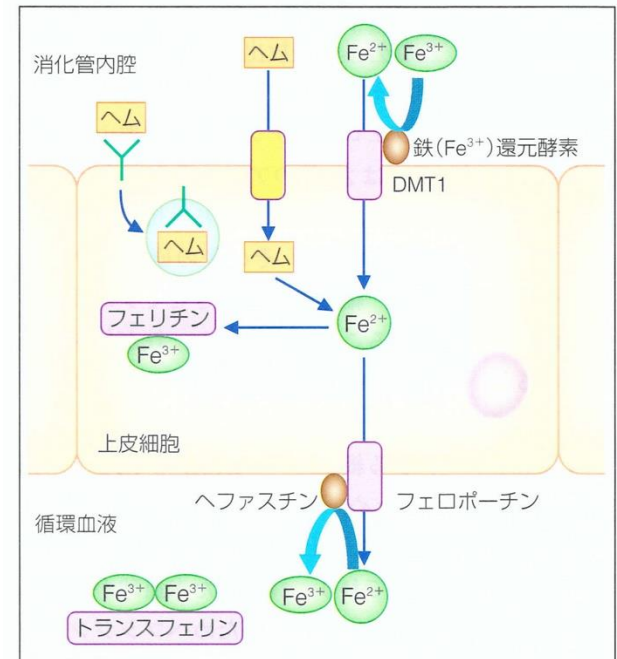
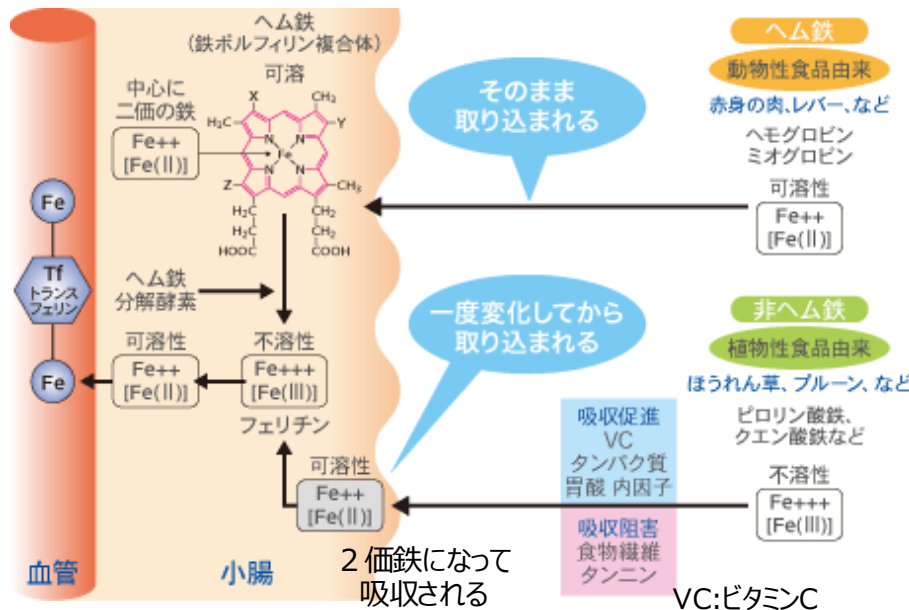


図 29-2 小腸粘膜の上皮細胞における鉄の吸収
ヘム鉄および二価鉄はそれぞれヘム受容体および DMT1 を介して吸収され、フェロポーチンを介して循環血液中に輸送される。

フェロポーチンを介して細胞外に出て、3価に酸化されてトランスフェリンと結合して骨髄などに運ばれる。



消化器の学修項目

消化管の構造と機能

- 消化管の基本構造と神経支配

- 消化管平滑筋の膜電位と収縮調節

主な消化管ホルモンの作用

消化管運動とその調節

- 嚥下反射

- 胃、小腸、大腸の運動

- 排便の仕組み

消化液の分泌

- 消化液の種類と一般的な成分、それらの分泌機構

- 各消化液の成分、働き、分泌機構、分泌調節

- 唾液、胃液、膵液、胆汁、腸液

小腸における栄養素の分解過程

- 各栄養素の消化と吸収

- 消化管における水の出入り