

第1章

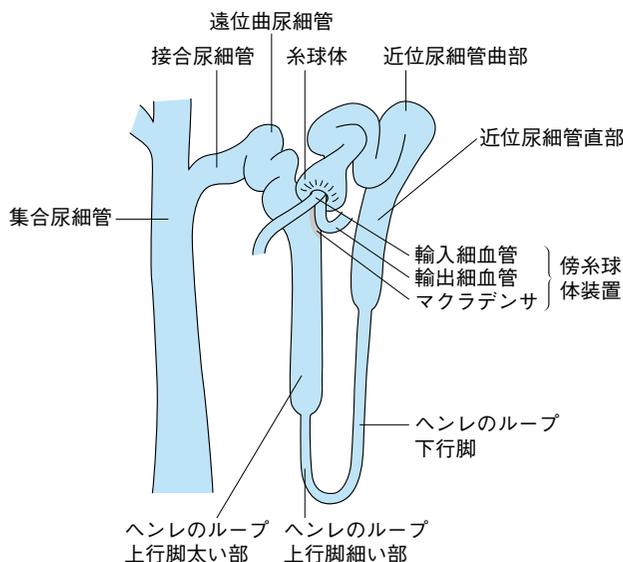
体液恒常性維持のメカニズム

A 腎臓の構造と尿生成

腎臓は腰の両側に1つずつある「ソラマメ」のような形をした重さ1個120g程度の臓器である。腎臓の主な役割は尿を作り、体内に必要なものを排泄することにより、水電解質酸塩基バランスを維持すること（体液の恒常性維持）にある。腎臓では血液を糸球体で濾過した後、尿細管で必要なものは再吸収、不要なものは分泌することを行って、尿を生成している。この糸球体と尿細管のセットをネフロンといい、ネフロンは1つの腎臓に約100万、2つで約200万個あることになる（図1）。

腎臓は1分間に約1リットルという大量の血液を供給されていて（腎血流量1l/min）、これは心拍出量の約20%にも相当する。血液の液体成分である血漿の量は血液の半分であり、腎血漿流量は約500ml/minで、そのうちのさらに約20%が糸球体で濾過されている（糸球体濾過量GFR: glomerular filtration rate 100ml/min）。

しかし、糸球体で濾過された血漿成分（原尿）の約99%もが再吸収を受け、実際に尿として排泄されるのは約1ml/min（1440ml/day）である。



腎重量: 120 g (1個あたり)
ネフロン数: 100万個 (1個あたり)
腎血液流量 RBF: 1000 ml/min
腎血漿流量 RPF: 500 ml/min
糸球体濾過量 GFR: 100 ml/min
尿細管再吸収率: ~99%

図1 腎の構造と機能

(奥田俊洋. わかりやすい水・電解質と輸液. 中外医学社より)

B 腎臓と体液恒常性維持（人はどの位水を飲むことができる？）

なぜ、腎臓は1日約150lもの血液を濾過して原尿を生成し、その約99%をも再吸収するという一見無駄なことを行っているのであろうか？

人間が摂取する水や電解質の量は常に一定でなく、多い場合も少ない場合もある。しかし、体液は恒常性を保つために一定である必要があるため、このような膨大な糸球体濾過量がセーフガードとなって、必要なら再吸収し、不要なら排泄する余裕を作っているのである。つまり、このシステムによって、人はどんなに多く水や電解質を摂取しても、また、どんなに少なく摂取しても、体内の水電解質バランスを一定に維持することが可能になっている。

このシステムの意義を理解するためには人がどれ位、水電解質の摂取量に許容範囲をもっているかを考えてみるとよい。

例1 水分摂取量の許容範囲

人は体液の恒常性を維持したまま、どの位の水を飲むことができるのであろうか？ 尿は約50 mOsm/lまで希釈することができるが、1日の平均的な尿中の溶質排泄量（蛋白代謝による尿素や電解質）は600~1000 mOsmであるから、これだけの溶質を排泄するのに必要な最大希釈尿（50 mOsm/l）の量は $(600\sim 1000)\div 50=12\sim 20l$ である。よって、平均的な食事（溶質摂取）をしている場合、最大で12~20lもの水を飲んでそれが全て尿中に排泄されるのである。さらに、溶質摂取量が多ければ、30~40lもの尿を理論的には排泄できる。逆に、人間はどの位少ない水分摂取で体内の恒常性を維持したまま、生きていくことができるのであろうか？ 尿は最大で約1200 mOsm/lまで濃縮可能である。よって、平均的な食事摂取における溶質排泄に必要な尿量は $(600\sim 1000)\div 1200=0.5\sim 0.8l$ である。不感蒸散や便中排泄で約1000 mlの水を失うので、1日に必要な最低限の水分は約1.5lとなる。

例2 塩分（ナトリウム）摂取量の許容範囲

塩分はどうであろうか？ 1日に糸球体から濾過されるナトリウム（Na）は多く見積もると $140\text{ mEq/l}\times 150\text{ l/day}=21,000\text{ mEq}$ （約1200g）である。このうち、約7割は近位尿細管で再吸収され、残りの3割がヘンレのループに到達する。ここでNaは約1/6の濃度になるまで再吸収を受けて減少するので、約5%のみ（約1000 mEq: 60g）が遠位尿細管以降に送られることになる。遠位尿細管でのNa再吸収はK排泄などで若干必要であるが、かなり低くすることはできるので、最終的に尿中には1000 mEq（約60g）近く理論的には排泄が可能である。逆に、Na欠乏の際には再吸収が全てのネフロンで充進し、糸球体で濾過された量の99.9%以上が最吸収される。よって、Na摂取量が約20 mEq（約1g）程度でも人はNaバランスを保つことができるのである。

このように1日の水電解質には摂取許容量（体液恒常性を維持したまま摂取可能な量: Daily Allowance）というものがある。上記したように水は1.5~40l、Naは10~1000 mEqであり、同様にカリウム（K）、酸（プロトンH⁺）などにもDaily Allowanceがある（表1）。このようなDaily Allowanceを維持するためには、このような膨大な糸球体濾過を行う必要があるのである。

表1 1日の摂取許容量 (Daily Allowance)

水:	1.5~40 l
Na:	10~1000 mEq
K:	20~500 mEq
H ⁺ :	0~500 mEq

C 体液の組成と分布

我々の体の約60%は水分(体液)である。体重60kgの人であれば、約36lが体液ということになる。

1. 体液の体内分布

水は半透膜である細胞膜を溶質が形成する浸透圧勾配に従って通過移動し、膜の両側の浸透圧(溶質量÷体液量)を等しく保っている。細胞内の溶質は細胞外の溶質の2倍存在するので、水の量も細胞内液(ICF: intracellular fluid)は細胞外液(ECF: extracellular fluid)の2倍である。つまり、体液の約2/3が細胞内液であり、約1/3が細胞外液となる。細胞外液のうち、約1/4~1/3が血管内(plasma)に存在し、残りは組織間液(ISF: interstitial fluid)として存在する。

例えば、体重60kgの人では、体内総水分量は60kgの60%で36lである。その内、細胞内液量は体液36lのうちの2/3である24l、細胞外液量は1/3の12lである。細胞外液の約1/4~1/3が血管内であるから、血漿量は3~4lで、残りの8~9lが細胞間質液量ということになる(図2)。

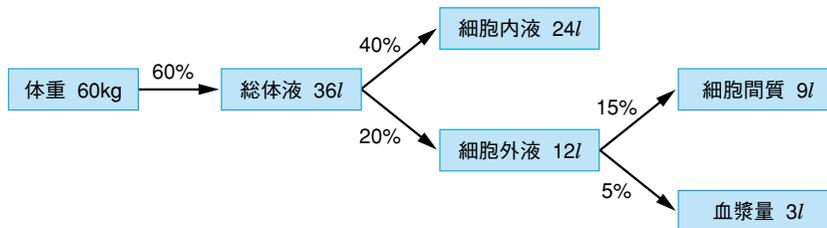


図2 体液分布とその比率

2. 年齢・性別・肥満度による体液量の変化

総体液量は全体重(筋肉量+脂肪量)における筋肉量の比率によって変化する(図3)。

水は主に筋肉に含まれ、脂肪にはないので、年齢・肥満度によって体液量の割合が変化する。また、女性は男性と比べ体重に占める脂肪の割合が多いので、水分量は男性に比べ少ない。体重における体液量の割合は表2に示す通りである。

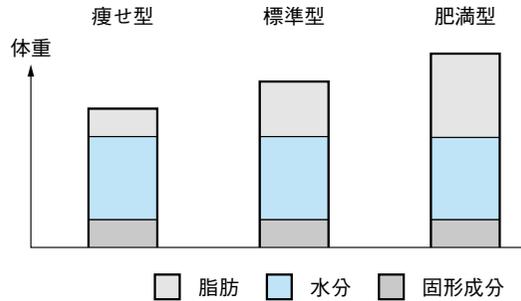


図3 体内水分量の年齢・体格による違い

表2 体内水分量（体重における割合％）の年齢・体格による違い

体格	小児	成人・男	成人・女
痩せ型・筋肉質	80%	65%	55%
標準型	70%	60%	50%
肥満型	65%	55%	45%

3. 体液を構成する溶質とその量・濃度の関係 (図4)

水は細胞膜を総溶質濃度が膜の両側で等しくなるように速やかに移動するため、常に細胞内外での溶質濃度の総和は等しく保たれている。細胞内の主な溶質はカリウム (K) であり、細胞外では

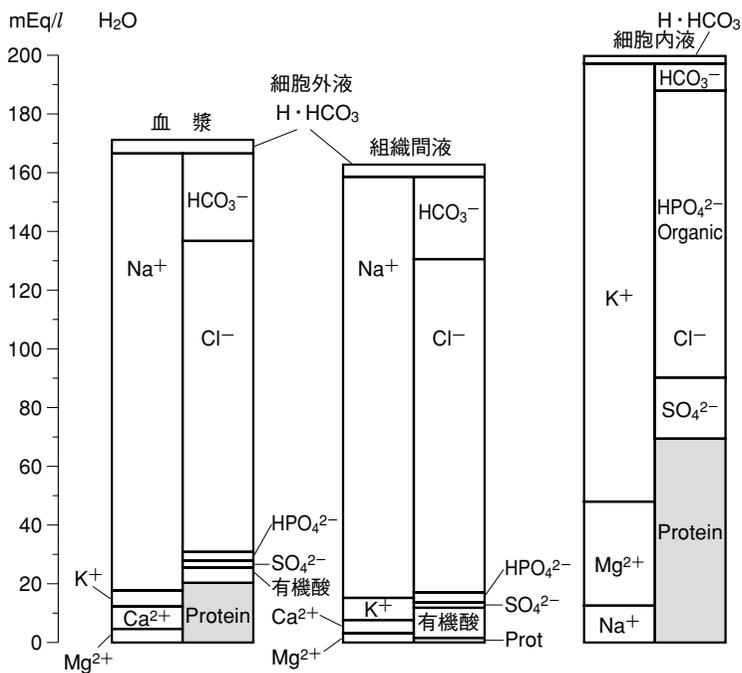


図4 体液各コンパートメントの電解質濃度（電荷濃度 mEq/l とモル濃度）(Gamble JL による)

表3 体液各コンパートメントの電解質濃度（電荷濃度 mEq/l とモル濃度 mM）

	細胞外液	細胞内液	
陽イオン (mEq/l)	Na	142	12
	K	4	150
	Ca	5	4
	Mg	3	34
Total	154	200	
陰イオン (mEq/l)	154	200	
総モル濃度 (mM)	310	310	

ナトリウム (Na) によって構成される。この細胞内外の電解質濃度の違いは細胞膜にある Na-K ATPase の働きによって維持されている。

表3にあるように、細胞内外共に陽イオンと陰イオンの濃度 (mEq/l) は電荷を中性にするため等しい。しかし、mEq/l で表した細胞内液と細胞外液の電解質の電荷濃度（電荷の数）にはかなりの差がある。これは2価以上に荷電した物質 (Ca, Mg, 蛋白など) が存在するためであり、細胞外液と内液での浸透圧物質の数をそれぞれのコンパートメントの水分量で割った総モル濃度 (mM) は等しい。

ワンポイント

ミリ当量 (mEq: milliequivalent) とは何か？

これは電解質の化学的活性（電荷）の単位であり、ちょうどミリグラム (mg) が重量の単位であるのと同じである。電解質の生理学的力（浸透圧：張度）はその電荷によって生じるので、張度・浸透圧の話を考える場合には重さで表すよりも、ミリ当量で計るほうが遥かに实际的で便利なのである。電荷が1価の分子1モルが1当量 (Eq) に相当する。表4にグラムからミリ当量 (mEq) への換算の表をあげる。NaCl 1g が 17 mEq に相当することは覚えておきたい。

表4 各種電解質物質のグラムからミリ当量への変換

mEq = 分子量 (g) ÷ (原子価 × 1000)		
物質名	分子量	1g に相当する mEq
Na ⁺	23	43
Cl ⁻	35.5	28
NaCl	23 + 35.5 = 58.5	17
K ⁺	39	26
KCl	39 + 35.5 = 74.5	13
HCO ₃ ⁻	61	16.4
NaHCO ₃	61 + 23 = 84	12
Ca ⁺⁺	40	50

(NaCl 1g = 17 mEq)