

環境生理学特論



山梨大学大学院総合研究部

教授・小山勝弘

～パーソナルインフォメーション～

小山 勝弘(こやま かつひろ)

山梨大学大学院総合研究部教育学域

専門分野：スポーツ生理学，スポーツ医学

・低酸素刺激と生体応答

・酸化ストレスと運動効果

・アルカリイオン水の生理作用

・スポーツにおける頭部外傷

専門競技：柔道

E-mail: koyama@yamanashi.ac.jp

環境生理学

「生理学 Physiology」

✓ 安静時の正常な人体に見られる種々の生命現象のメカニズムを明らかにする学問 (Physio- 身体の)

✓ 自然現象の内、

→ 無生命的な現象を扱う学問：物理学

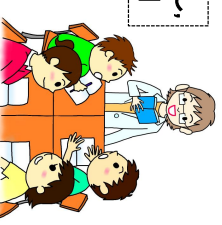
→ 生命のある身体を扱う学問：生理学

： physical という形容詞は「物理的・肉体的」

「環境生理学」

✓ 外部環境が人体の内部状態にどのような影響を及ぼし、

どのような適応変化を生み出すかを明らかにする学問



環境生理学特論

山岳域における独特の環境要因によって生じる生体の応答メカニズムを理解

→図表を題材にしてテキストカッソソソを通して学ぶ

1 オリエンテーション 山岳環境の特異性

2 恒常性維持の生理学的機構 (自律神経系と内分泌系)

3 低酸素環境への生体応答1 (呼吸器系と体液調節系)

4 低酸素環境への生体応答2 (循環器系と体液調節系)

5 低酸素環境への生体適応 (運動との関連)

6 暑熱環境と生体応答・適応1 (ヒトの熱放散システム)

7 暑熱環境と生体応答・適応2 (汗腺等)

8 寒冷環境と生体応答・適応1 (ヒトの熱産生システム)

9 寒冷環境と生体応答・適応1 (非震え熱産生と蓄熱)

10 風、湿度、気温の変化と生体応答

11 低圧環境と生体応答・適応

12 高圧環境と生体応答・適応

13 紫外線と生体応答・適応

14 重力・無重力環境と生体応答・適応

15 まとめと総括

環境生理学

物理的条件

- ❖ 温度
- ❖ 湿度
- ❖ 気圧
- ❖ 光
- ❖ 対流(風)
- ❖ 超音波
- ❖ 振動



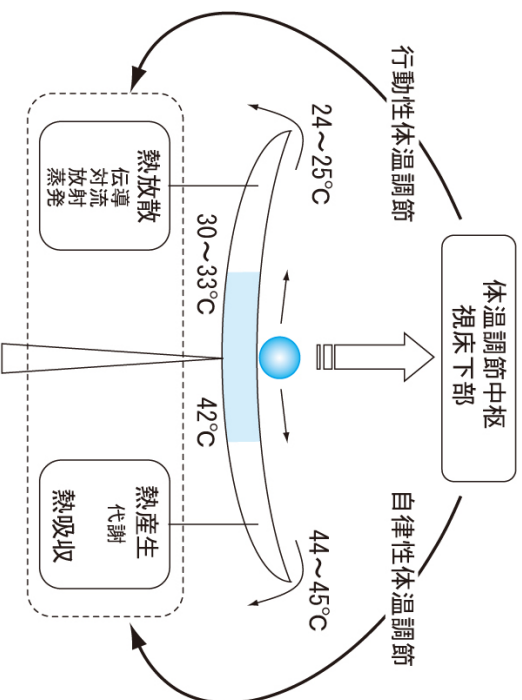
化学的条件

- ❖ 水(成分)
- ❖ 土壌(成分)
- ❖ 大気
- ❖ ガス(組成)
- ❖ 栄養素

社会的条件

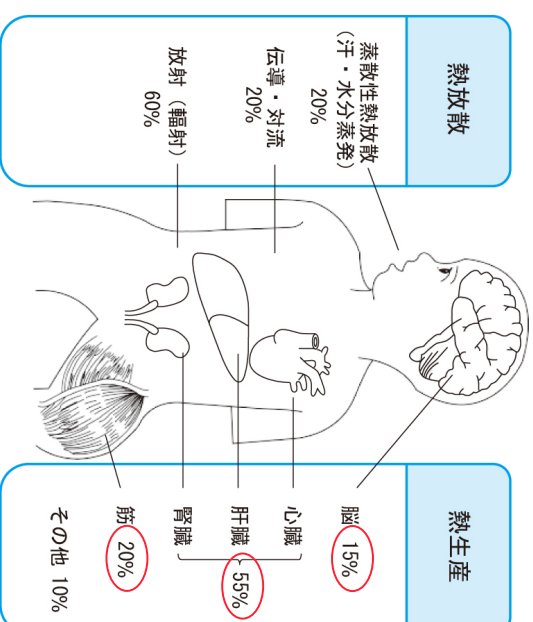
- ❖ 人間関係
- ❖ 文化
- ❖ 産業
- ❖ 政治経済
- ❖ 宗教

体温調節のしくみ

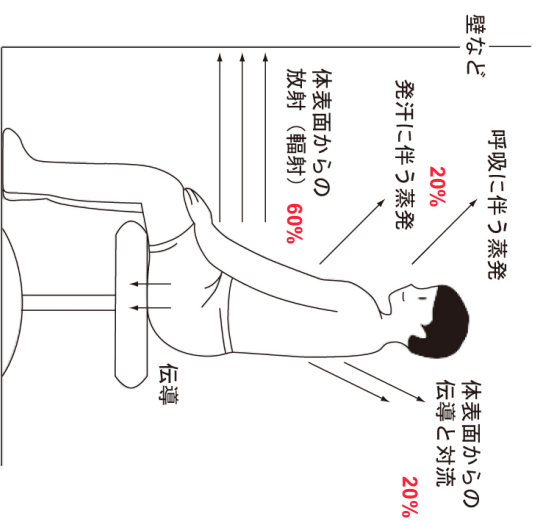


温度(変化)に対する生理学

安静時の熱出納



体表面からの熱放散



安静時と運動時の熱放散

熱放散	安静時		運動時	
	%	kcal/分	%	kcal/分
伝導・対流	20	0.3	15	2.2
放射	60	0.9	5	0.8
蒸発 (発汗)	20	0.3	80	12.0

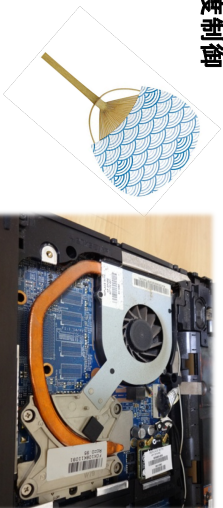
※安静時：約 1.5 kcal/分の熱産生

※運動時：約 15.0 kcal/分の熱産生 (70% $\dot{V}O_2$ max 相当強度)

対流(風)の効果

対流効果を活かした温度制御

- ✓ 団扇, 扇風機
- ✓ パソコンCPUファン
- ✓ ラジエータ



伝導・対流, 放射の特徴



伝導・対流, 放射は熱放散の重要な経路
しかしこれらには最大の限界点が存在する。それは何か?

外気温(気温) < 体温

✓ 体温は, 平常時37°C程度

✓ 外気温が37°C以上である場合, 外気の熱が体内に入り込む
(蓄熱, うつ熱)

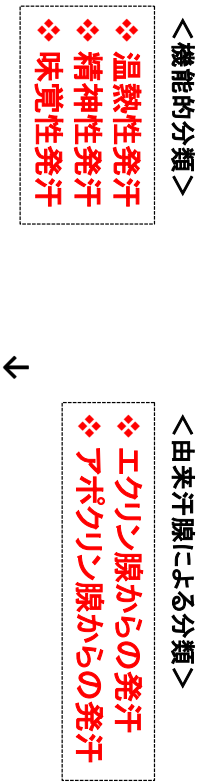
安静時と運動時の熱放散

熱放散	安静時		運動時	
	%	kcal/分	%	kcal/分
伝導・対流	20	0.3	15	2.2
放射	60	0.9	5	0.8
蒸発 (発汗)	20	0.3	80	12.0

※安静時：約 1.5 kcal/分の熱産生

※運動時：約 15.0 kcal/分の熱産生 (70% $\dot{V}O_2$ max 相当強度)

発汗の種類



❖ 気化熱

→1 mlの汗=0.586 kcalの蒸発

✓ 人体の比熱=0.83 kcal/°C

(人体1kgの体温を1°C上げるのに必要な熱量)

...体重が70kgのヒトでは、58.1 kcalで体温が1°C上昇

✓ 体重70kgのヒトが、皮膚表面で100 mlの汗が蒸発すると、

体温が1°C低下(皮膚からの熱放散)

気化熱の活用

名古屋「打ち水」大作戦



これが私たちの地球温暖化対策！

打ち水効果

1. 湿度が下がります
2. 水の蒸発時に熱を奪うことができます
3. 打ち水の音も心地よいです

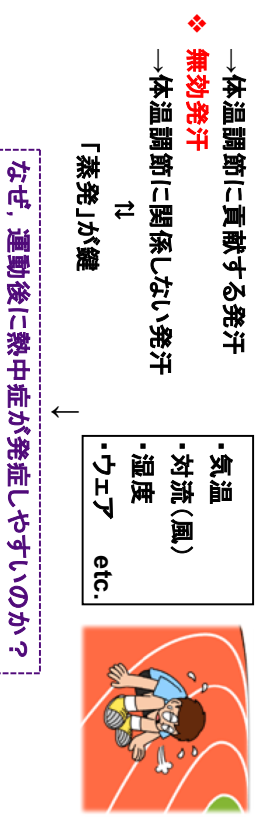
- × 打ち水のやりかたは関係ありません
- × 打ち水の回数も関係ありません
- × 打ち水の量も関係ありません



京都新聞 平成20(2008)年8月4日(月)

体温調節に関する発汗(蒸散性熱放散)

有効発汗と無効発汗の決定要因

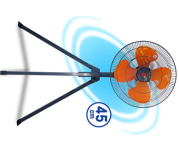


✓ 熱中症事故の特徴

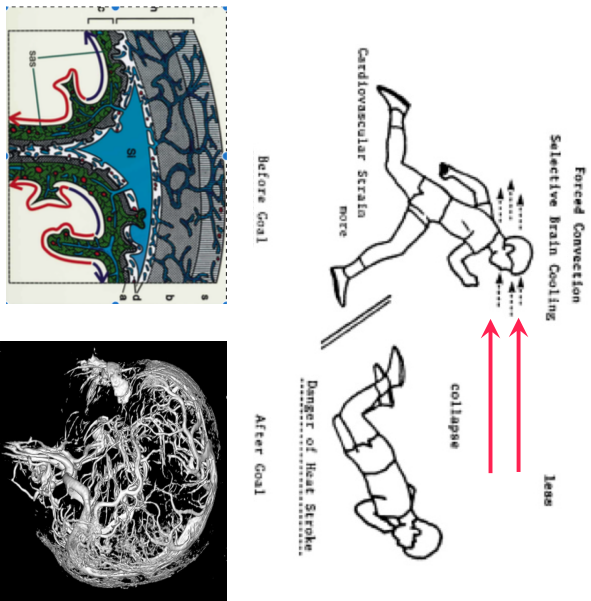
→ 運動会、競歩大会、ジョギング大会での熱中症

✓ “選択的脳冷却機構”の破綻(強制対流の重要性)

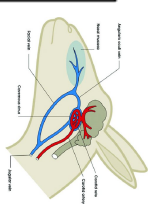
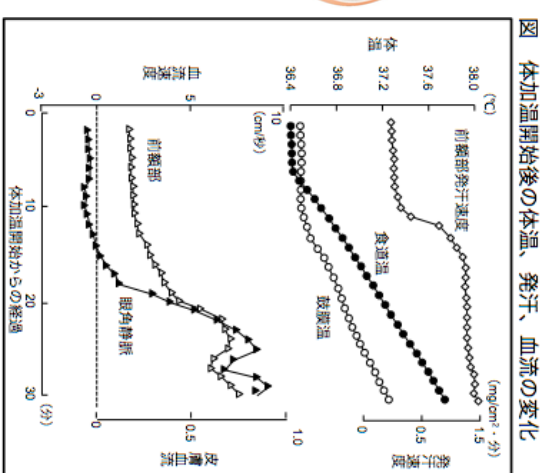
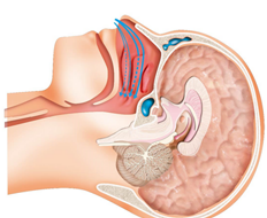
✓クーリングダウンの重要性



Selective Brain Cooling



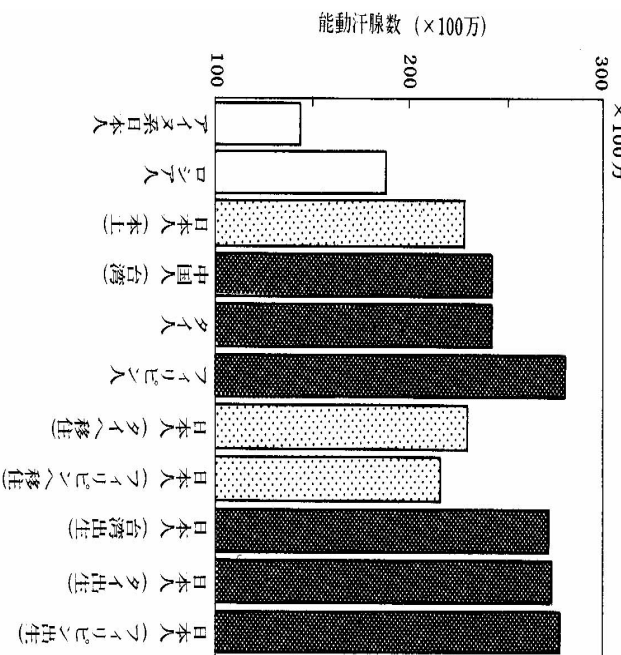
Selective Brain Cooling



鼓膜温
与
脳温

(永坂鉄夫: 日生気誌 2000, 37: 3-13)

汗腺数を決定する要因



汗腺数を決定する要因

- ✓ 汗腺数は、生後2〜3歳までにほぼ決定
- ✓ 熱帯地方で生育した人々の特徴
 - ・基礎代謝 <低>
 - ・皮下脂肪 <薄>
 - 発汗を最小限に抑さえ、脱水を防ぐ
- ・皮膚血流 <多>
- ・手足 <細長>

✓ 空調設備の充実とは
体温調節機能の破綻原因?

運動と体温調節 (暑熱環境)

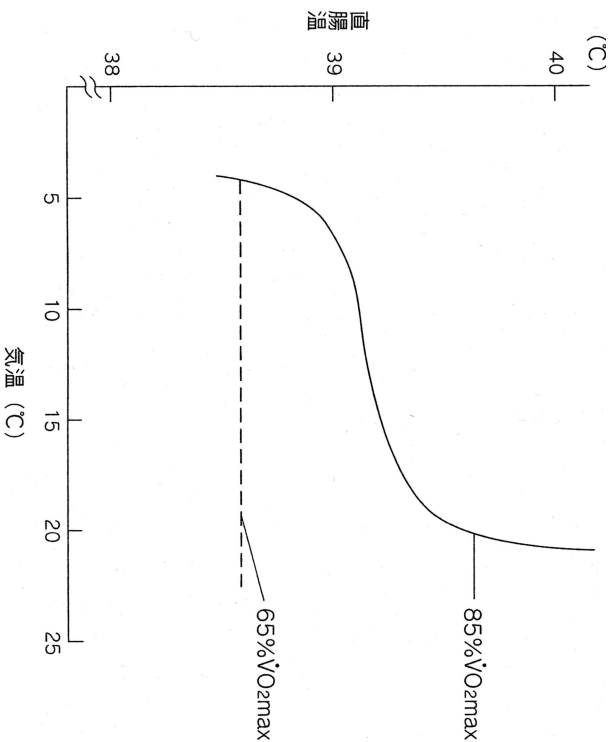
なぜ、運動(身体活動)によって熱中症が発症しやすいのか？

- ✓ 運動時には骨格筋での代謝亢進
 - 熱産生増大(安静時の10-20倍)
 - 深部体温(核心温度)上昇
 - 皮膚血管拡張と皮膚血流増大による熱放散促進
- ✓ 活動筋への血流を最優先する応答
 - 皮膚血流量低下

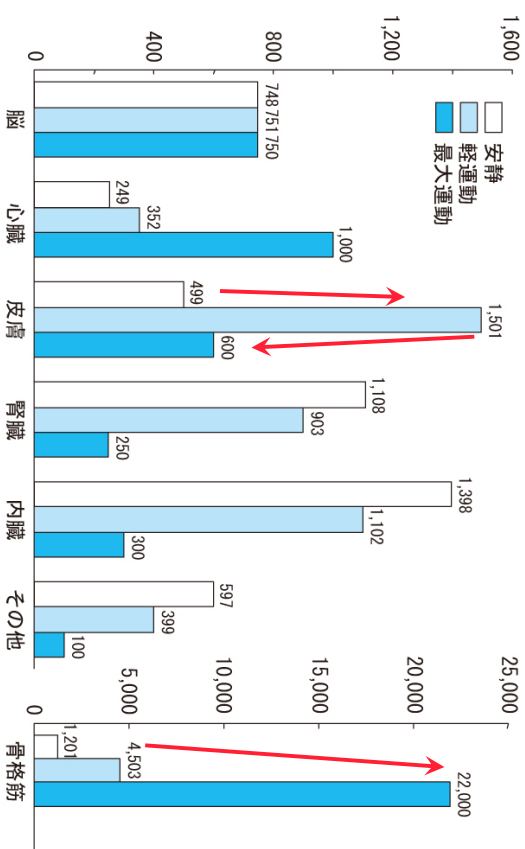


熱放散	安静時		運動時	
	%	kcal/分	%	kcal/分
伝導・対流	20	0.3	15	2.2
放射	60	0.9	5	0.8
蒸発(発汗)	20	0.3	80	12.0

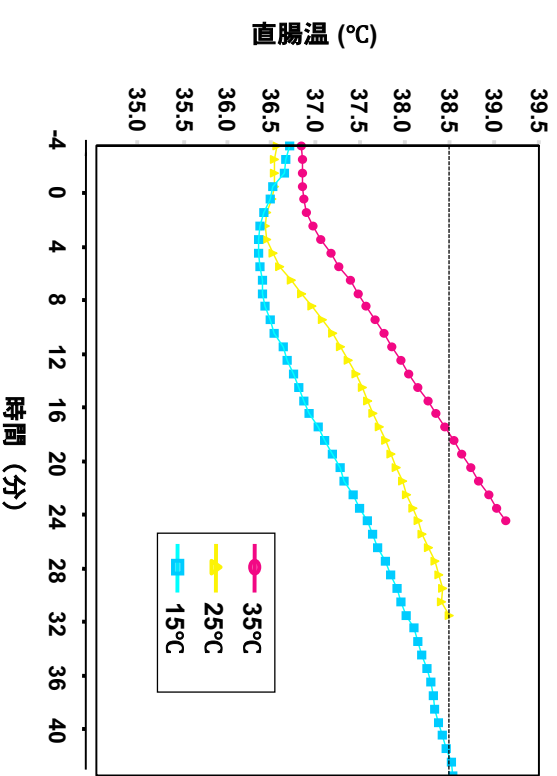
運動強度と深部体温(直腸温)



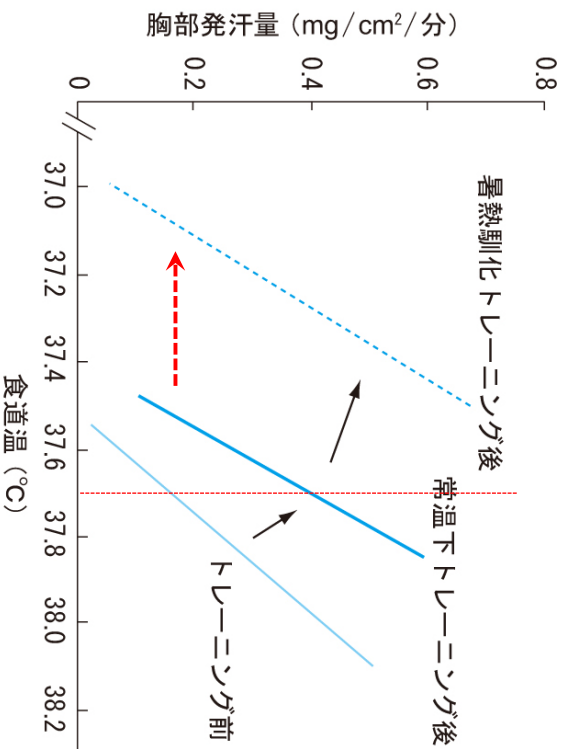
運動に伴う各器官への絶対的血流再配分 (ml/min)



環境温度と運動中の深部体温(直腸温)



発汗機能の変化 常温下トレーニング vs. 暑熱下トレーニング



発汗時の水分補給

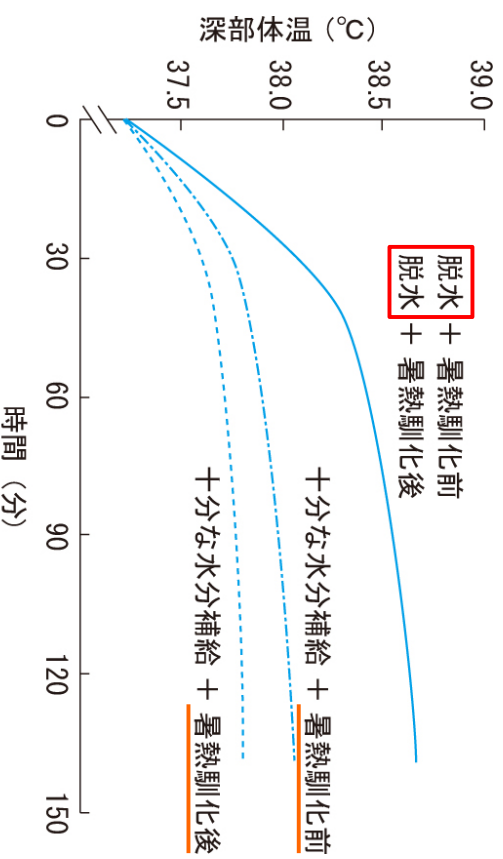
- ✓ 暑熱環境下での運動が長時間に及ぶと
 - 発汗量増大
 - 脱水 (細胞外液量喪失) と皮膚血流量増大
 - 活動筋への血流も要求される続ける
 - ✓ そのまま継続すると
 - 血液粘稠度が増加し、運動に不利益
 - 過度の脱水は、発汗などの熱放散自体を抑制
 - 運動機能、体温調節の両者の破綻 (→ 熱中症)
- ↓
- ✓ 水分補給が重要

脱水って、そもそも何が起きてるの？

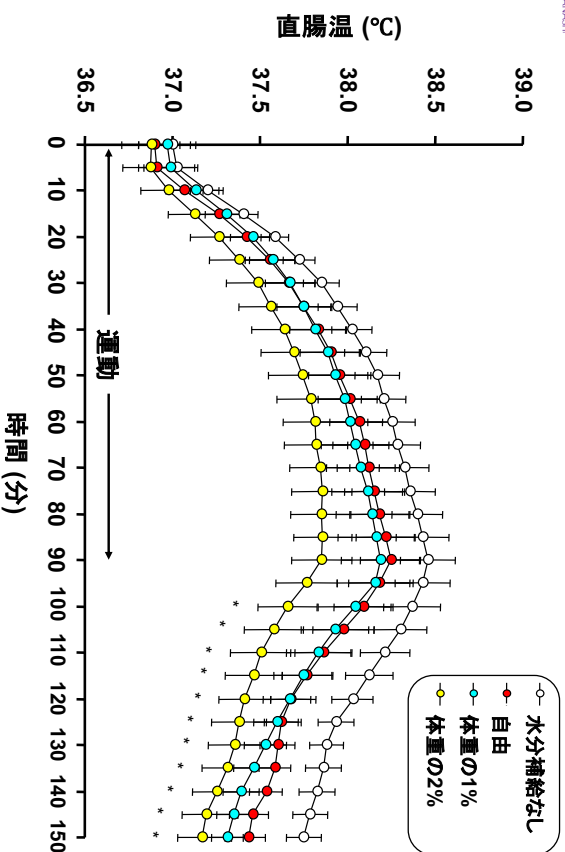


- ✓ ロサンゼルスオリンピック(1984)
- ✓ アンデルセン選手(スイス)39歳
- ✓ 脱水 → 熱中症 + アンモニアによる中枢性疲労？

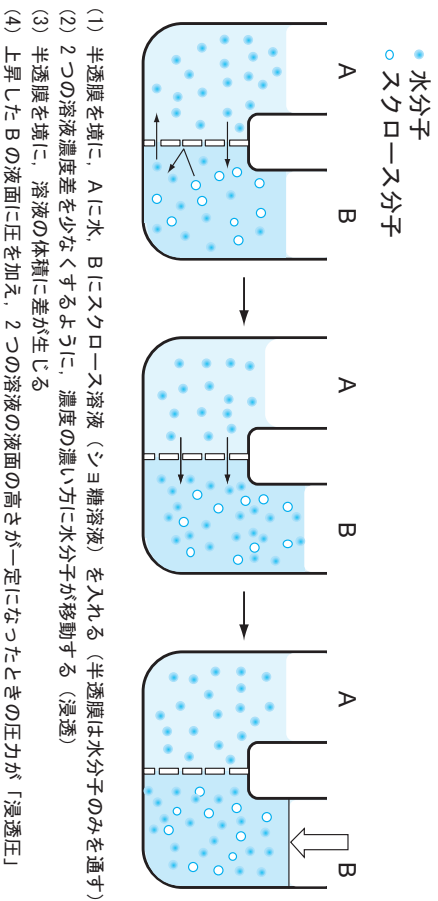
活動中の水分補給の重要性



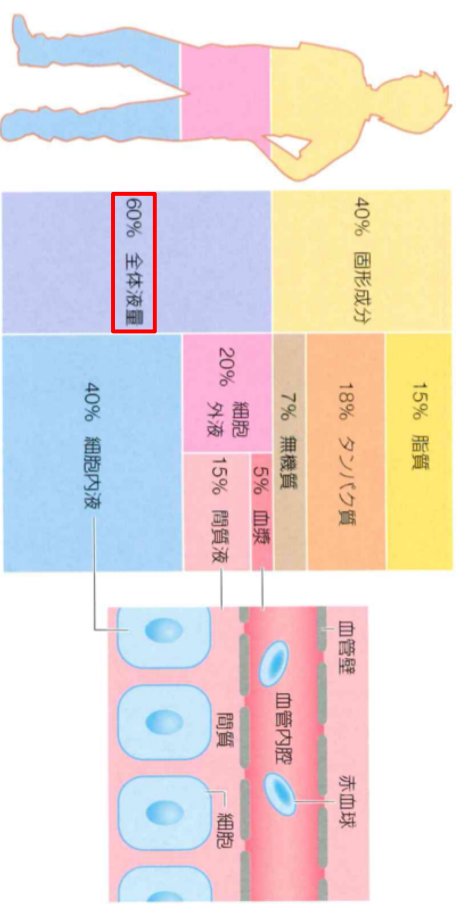
活動中の水分補給の重要性



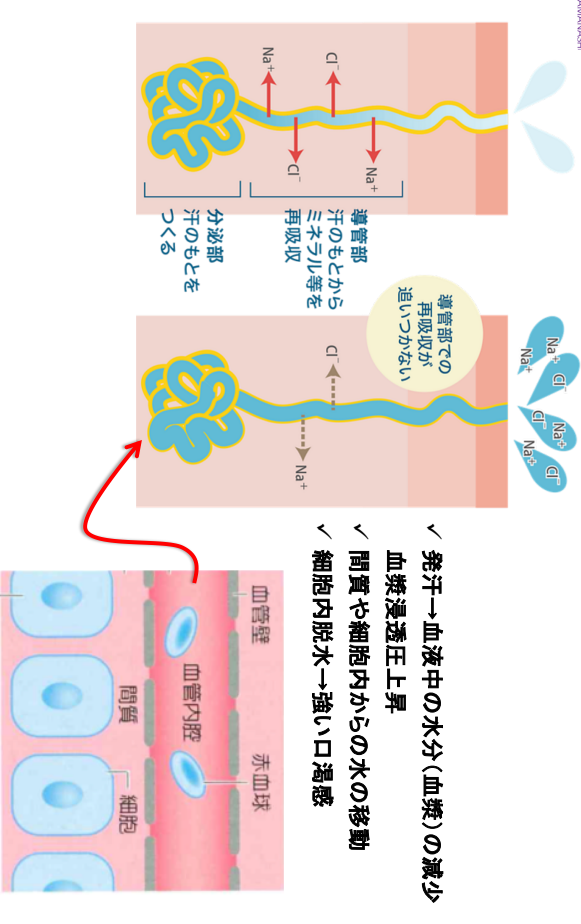
脱水・浮腫の理解(浸透圧)



脱水(体液の喪失)



汗(浸透圧)



活動中の水分補給方法

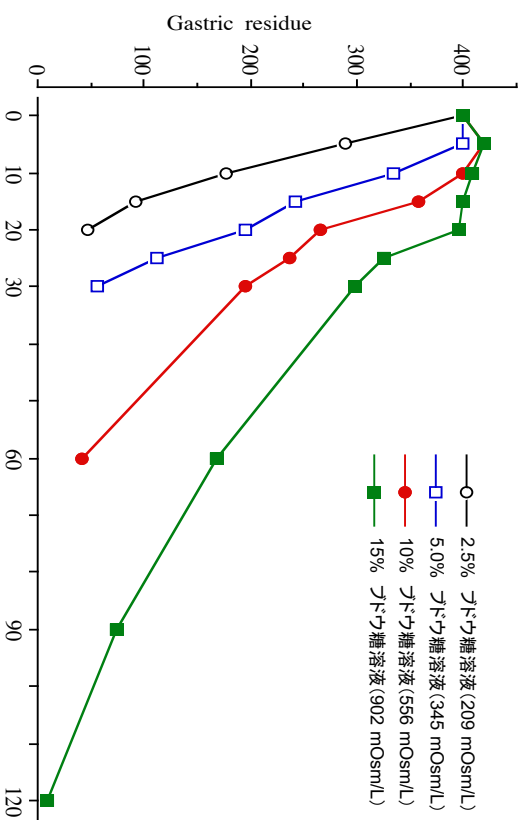
- (1) 「のどの渇き」と「脱水」を区別
- (2) 補給間隔は15～30分（「自由飲水」から「強制飲水」へ）
- (3) 1回の補給量は、200～250 mL/回程度
- (4) 温度は5～15℃くらいに冷やしたもの
- (5) 塩分を含むもの（0.1～0.2%食塩水、Na⁺濃度40～80 mg/100 mL）
- (6) 糖分（3～5%）を添加したもの（吸収速度が向上）

*「のどの渇き」は、すでに「脱水」が始まっている証拠であり、渇きを感じてから水を飲むのでは遅い。渇きを感じる前に計画的に水分を摂ることが大事→(2)に関連

（日本体育協会、「スポーツ活動中の熱中症予防8ヶ条」を引用改変）



補給する水分の浸透圧と胃内残存時間

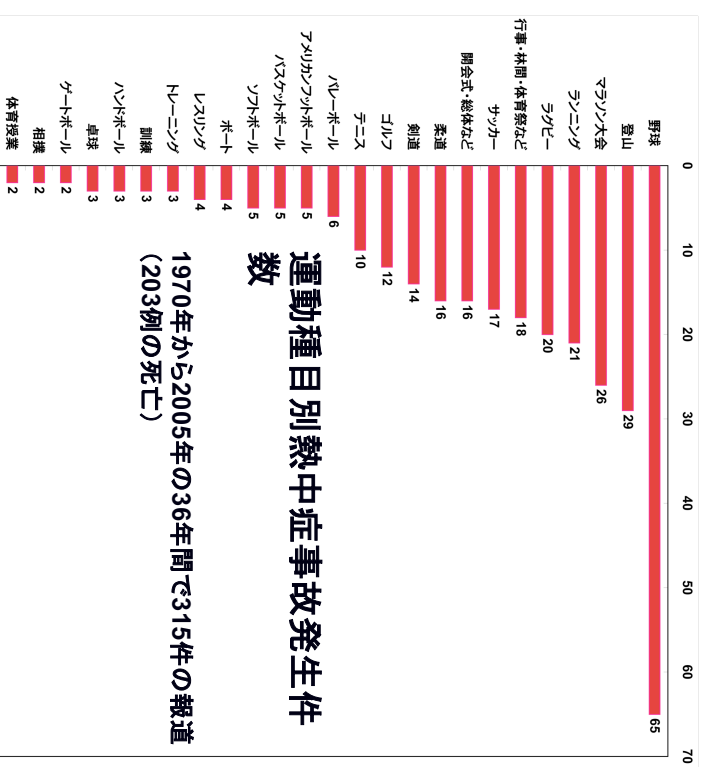


熱中症予防のための運動指針

WBGT	環境温度	乾燥温度	運動原則	注意
31 - 27	35	31	運動は原則中止	WBGT21以上では、熱中症の危険が増すので、積極的に休息をとる。
28 - 24	31	28	WBGT28以上では、熱中症の危険が高いので、激しい運動や持久走など体温が上昇しやすい運動は避ける。運動する場合には、積極的に休息をとる。体力の低いもの、暑さに慣れていないものは運動中止。	WBGT21以上では、熱中症の危険が増すので、積極的に休息をとる。激しい運動では、30分おきくらいに休息をとる。
25 - 21	28	25	WBGT21以上では、熱中症の危険は小さいが、適宜水分補給が必要である。市民マラソンなどではこの条件でも熱中症が発生するので注意。	WBGT21以下では、通常は熱中症の危険は小さいが、適宜水分補給が必要である。市民マラソンなどではこの条件でも熱中症が発生するので注意。
21 - 18	24	21	ほぼ安全（適宜水分補給）	



運動種目別熱中症事故発生件数



1970年から2005年の36年間で315件の報道（203例の死亡）

寒冷環境に対する生体応答

寒い時、生体はどのようにして体温を維持、低下を抑制するのか？

熱産生の促進

<急性応答>

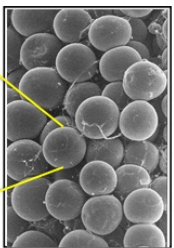
- ✓ 交感神経緊張 → 皮膚血管収縮 → 血流低下 → 熱放射抑制
- ✓ 立毛筋収縮 + 骨格筋のふるえ熱産生
- ✓ 行動性体温調節 (衣服, エアコン, ハグ)

<慢性適応> → 非ふるえ熱産生

- ✓ 皮下脂肪蓄積
- ✓ **褐色脂肪細胞増大**
- ✓ カテコールアミン, 甲状腺ホルモン分泌亢進

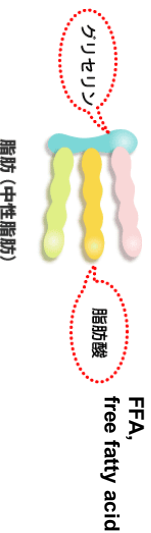
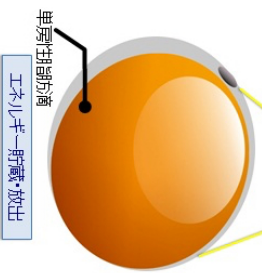
脂肪細胞

体内の過剰エネルギー
(糖質, 脂質, タンパク質)



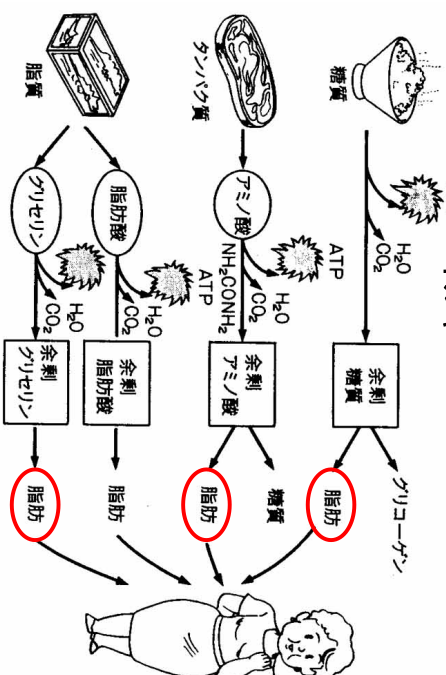
→ **中性脂肪TG**として貯蔵
(主に内臓脂肪, 皮下脂肪)

- ✓ 脂肪酸とグリセリンからなる「グリセリン脂肪酸エステル」の総称
- ✓ 生体内では、トリグリセリドがほとんど
- ✓ 90%以上 (mono-, di-, tri-)
- ✓ 中性の性質を有する
- ✓ 動物体内の脂肪酸は、飽和脂肪酸 (ステアリン酸, パルミチン酸)



体内のエネルギー貯蔵庫

ATP エネルギー



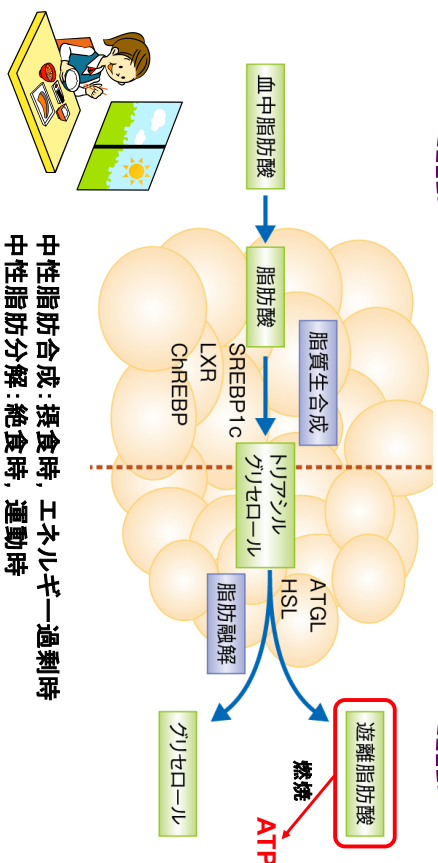
糖質: 糖質(グリコーゲン), タンパク質, 脂質に変換
タンパク質: 糖質や脂質に変換
脂質: 糖質やタンパク質には変換不能 → 脂質に変換

脂肪細胞の役割

摂食時
エネルギー過剰時

中性脂肪 TG
Triglyceride

絶食時
運動時



中性脂肪合成: 摂食時, エネルギー過剰時
 中性脂肪分解: 絶食時, 運動時

脂肪細胞とヘルシア緑茶の関係

製品情報

ヘルシア緑茶 / ヘルシア緑茶 すつきり

▶ カフェインとは?
▶ 特定保健用食品とは?

脂肪を消費しやすくする

体脂肪が気になる方に

茶カフェイン
540mg

生活習慣病予防のために
食生活改善に。
1日350mlを目標に
お飲みください。



年に1回は人間ドックを受けましょう。
消費を伴う食品
特定保健用食品

日本人の健康増進を
推進



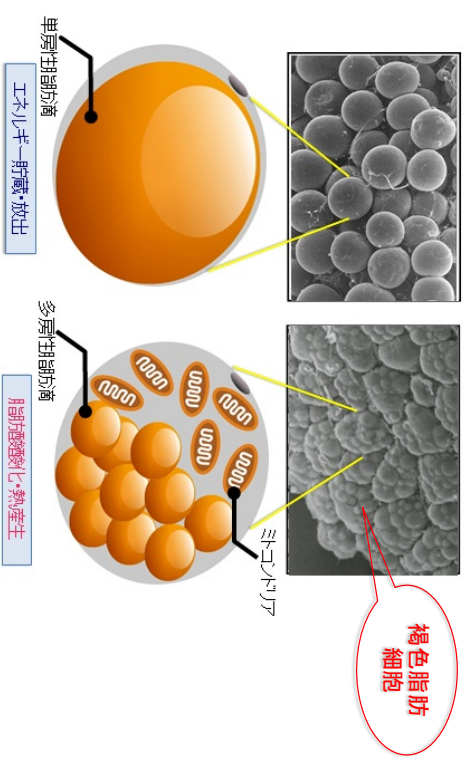
脂肪細胞の種類？

WAT

white adipose tissue

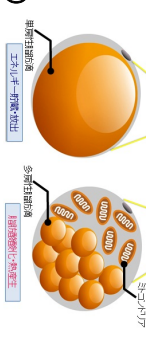
BAT

brown adipose tissue



WAT vs. BAT

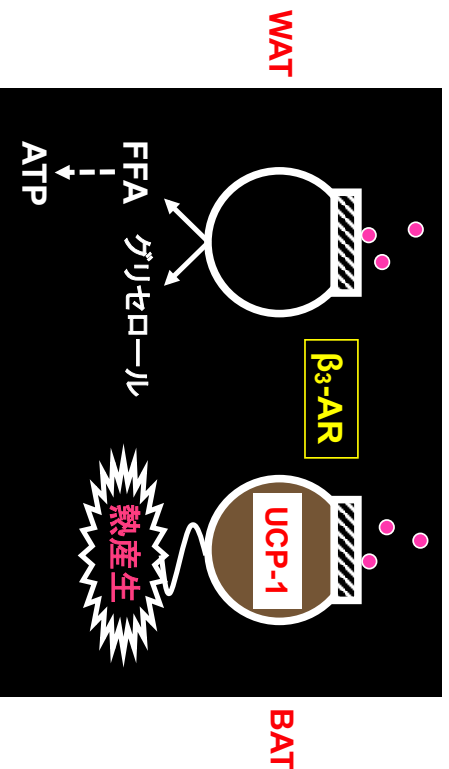
- ✓ 褐色脂肪細胞は単なるエネルギー貯蔵庫ではなく、**エネルギーを消費して熱を産み出す細胞** (UCP-1を使って発熱し、脂肪量を減らす)
 - ✓ 肩甲骨間、後頸部、腋窩、心臓、腎臓周囲に存在
 - ✓ 食後の体温上昇反応 (DIT, diet-induced thermogenesis) に大きく関与
 - ✓ ミトコンドリア (β酸化=脂肪燃焼の舞台) が豊富
 - ✓ 太りやすさの体質 (基礎代謝) を決定？
 - ✓ 寒冷刺激で増大？
 - ✓ 運動刺激で増大？
- (運動習慣があるヒトは太りにくい！)



褐色脂肪細胞による産熱

❖ 発熱タンパク質UCP-1

交感神経刺激(ノルアドレナリン:●)を
脂肪細胞表面の受容体(β₃-AR)が受け取る

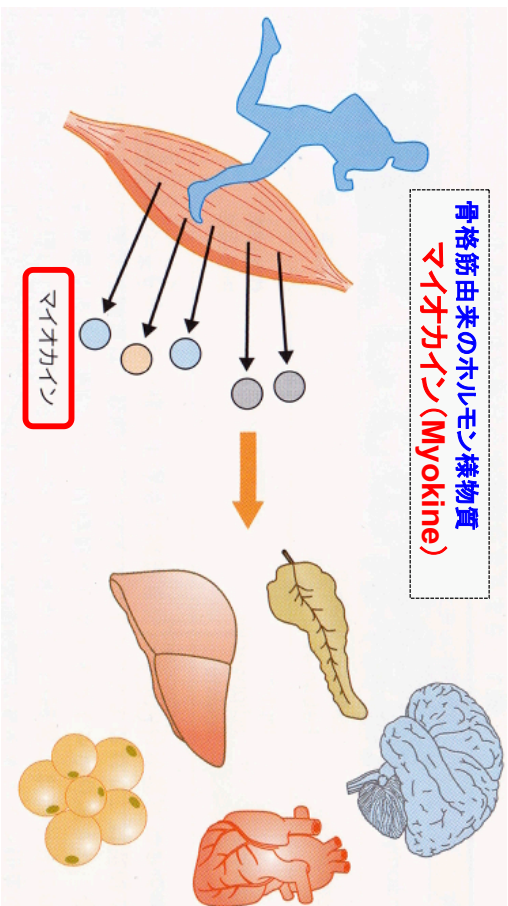


そういうこと?



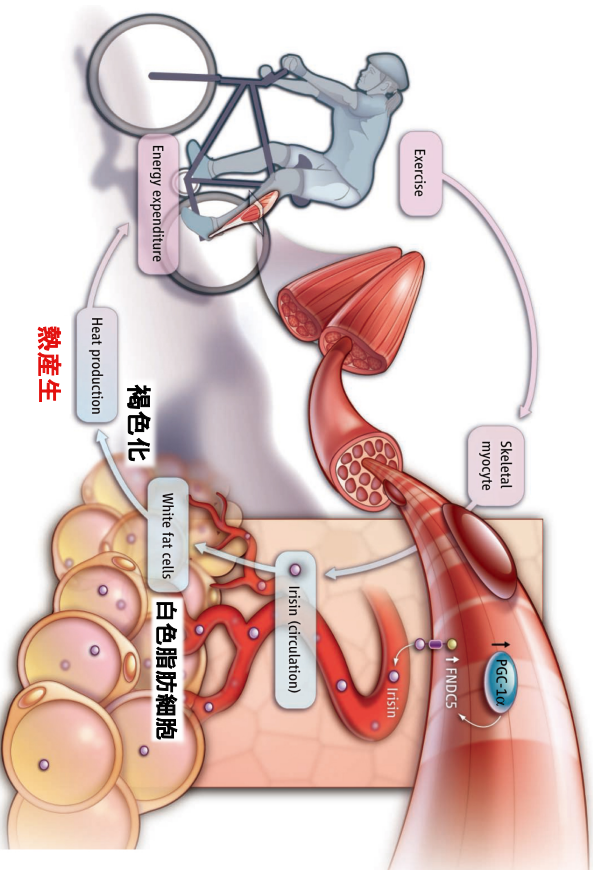
熱産生, 運動, マイオカイン

骨格筋由来のホルモン様物質
マイオカイン(Myokine)



筋から分泌されたマイオカインが, 他の器官, 組織, 細胞を制御

運動と褐色脂肪細胞

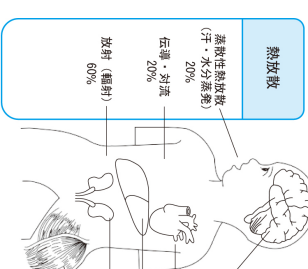


山岳地域で生じやすい脱水

登山時など, 高地では脱水が助長されやすいのはなぜ?

✓ 気圧低下 → 水蒸気圧低下 → 露点温度低下
→ 高地では湿度が高くても, 空気中の水分の絶対量が少ない
→ 気温も低い

- ✓ 蒸散性熱放散促進 (呼吸 ← 低酸素, 皮膚)
- ✓ 発汗 (登山)
- ✓ 水分摂取不足 (トイレット, 携行水)
- ↓
- ✓ 脱水 → 高山病?



摂取量 (mL)	排泄量 (mL)
水分摂取	皮膚から*
2,200	600
代謝水	肺から
300	300
	便
	100
	尿
	1,500
合計	合計
2,500	2,500

* 発汗と不感蒸泄との合計

山岳地域における生体反応

登山時の判断ミスはどのようにして生じるのか？

登山

- 低酸素血症 (SpO₂で評価可能)
- 過換気 (延髄呼吸中枢)
- 二酸化炭素 (CO₂) 排泄亢進
- アルカロシス (H⁺排泄亢進, PCO₂低下)
- H⁺ + HCO₃⁻ ⇌ H₂CO₃ ⇌ H₂O + CO₂**
- Ca²⁺が血漿タンパク質に結合
- 低カルシウム血症
- 手指の痙攣
- PaCO₂低下
- 脳血管収縮
- 脳血流低下
- 失神, 認知機能低下, 判断ミス

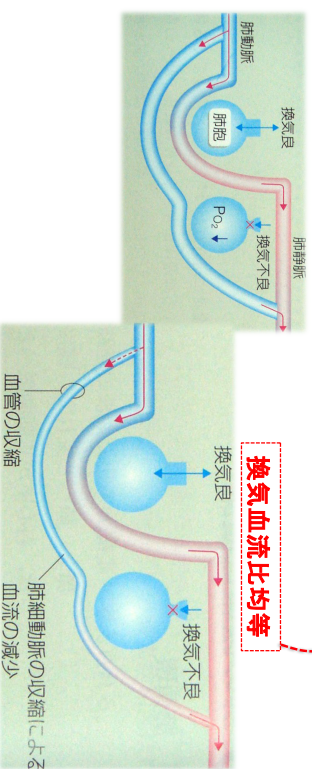
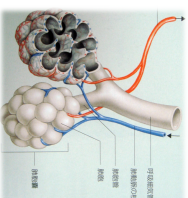


山岳地域と急性高山病 (AMS)

AMSはどのようにして生じるのか？

登山

- 低酸素血症
- 換気不良な肺細胞脈収縮 (血流制限)
- 肺高血圧
- 肺水腫



換気血流比均等



低酸素に対する生理学

山岳地域と急性高山病 (AMS)

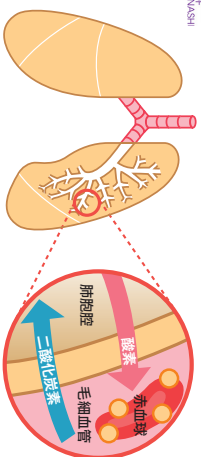
AMSはどのようにして生じるのか？

登山

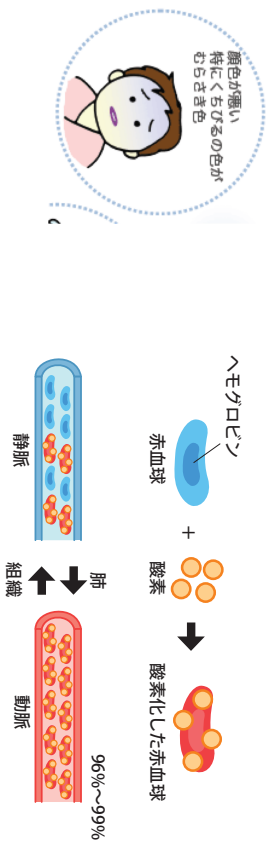
- 低酸素血症
- 過換気 (延髄呼吸中枢が反応しない)
- 換気亢進 & 利尿 (ADH, ALD) の不調
- PaCO₂上昇 + 体液貯留
- 脳血管拡張
- 脳血流増大
- 頭痛
- 脳浮腫



動脈血酸素飽和度 (SpO₂)



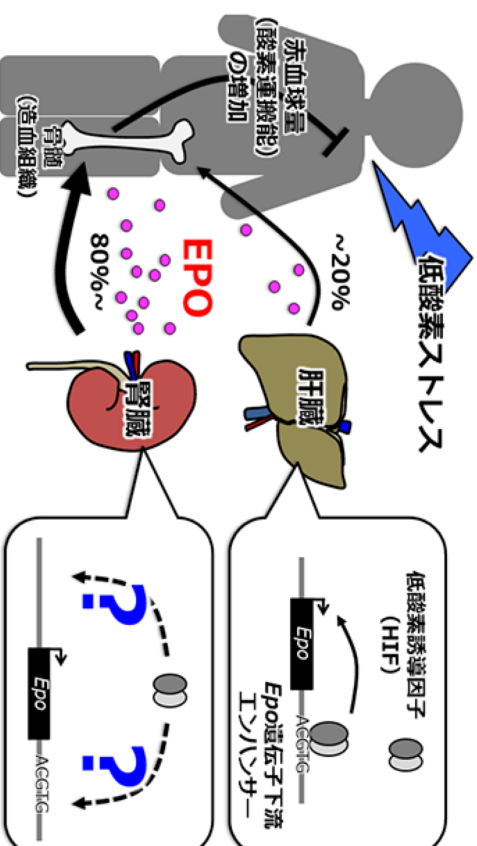
$$\text{動脈血酸素飽和度 (SaO}_2\text{、サチュレーション、\%)} = \frac{\text{酸素と結合したヘモグロビン量}}{\text{全体のヘモグロビン量}}$$



高地トレーニング



低酸素誘導性エリスロポエチン



低酸素ストレスによるエリスロポエチン (EPO) 産生を介した赤血球産生誘導

人工的高地トレーニング



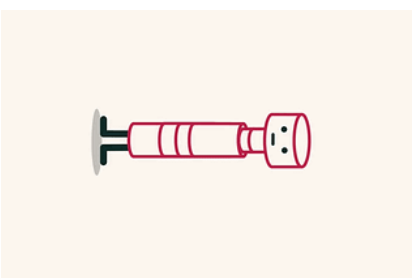
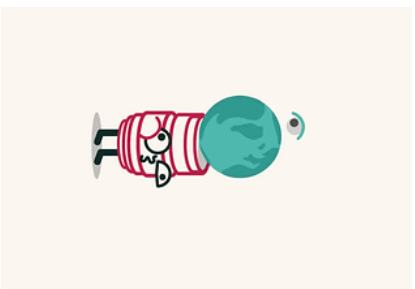
重力(無重力)に対する生理学



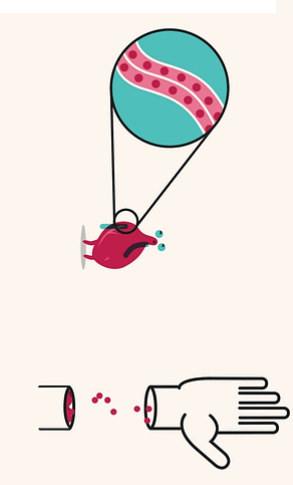
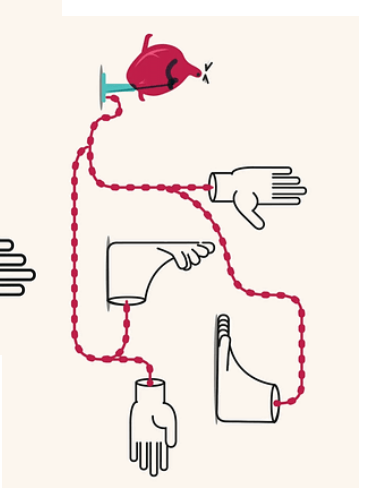
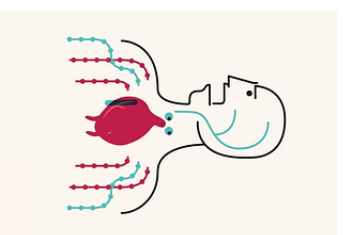
宇宙飛行士から学ぶこと

マルビン飛行士

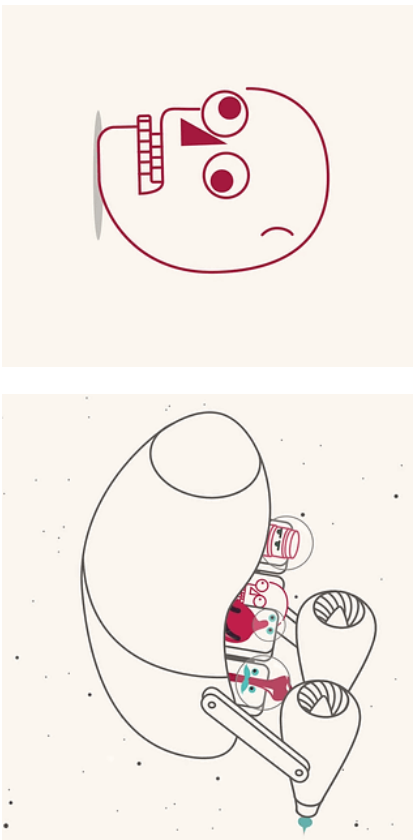
背骨



心臓，骨格筋

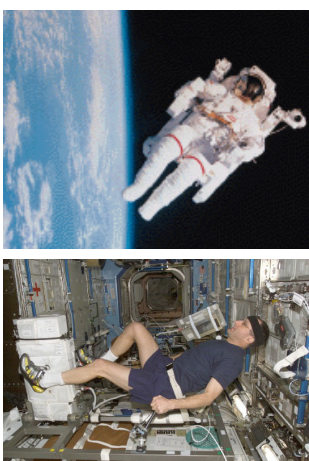


視力

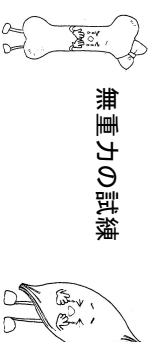


運動器（骨格筋、骨）の廃用萎縮

「刺激」が骨格筋や骨の、量と機能を維持する前提条件
 → 刺激不足で**萎縮**し、量が減り、機能が劇的に低下
 → 宇宙フライト、ギプス固定、寝たきり、運動不足



無重力の試験



- ✓ **大腿骨の骨密度**:-1.5% / 月
 → 加齢による低下: 約-1.5% / 年
 → 約12倍の速度
- ✓ **下腿の筋肉量**:-1.0% / 日
 → 加齢による低下:-2.0% / 年
 → 約180倍の速度
- ✓ **寝たきりによる低下**:-0.5% / 日

宇宙航空研究開発機構/JAXA HP (<http://iss.sfo.jaxa.jp/med/#1>)

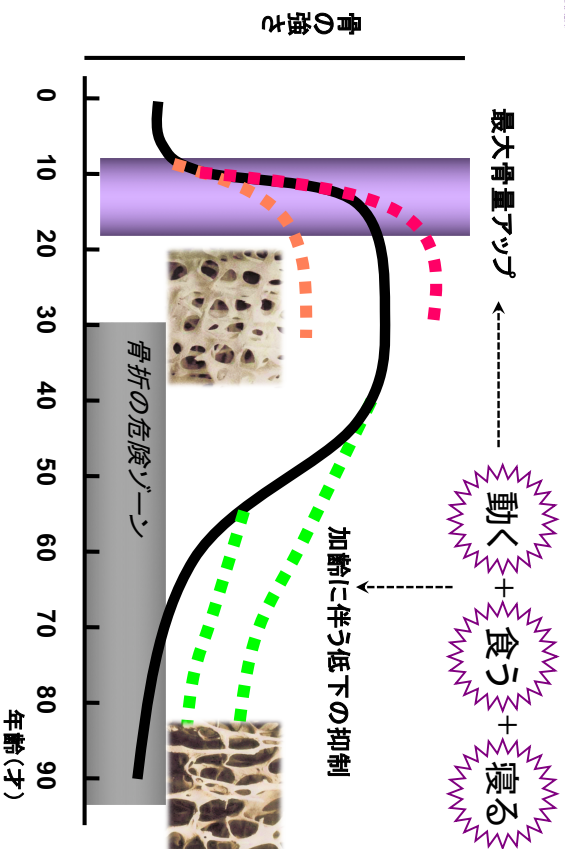
無重力→身体不活動



高血圧 心筋梗塞 脳梗塞 認知症
 糖尿病 肺がん 腰痛 筋肉の弱体化

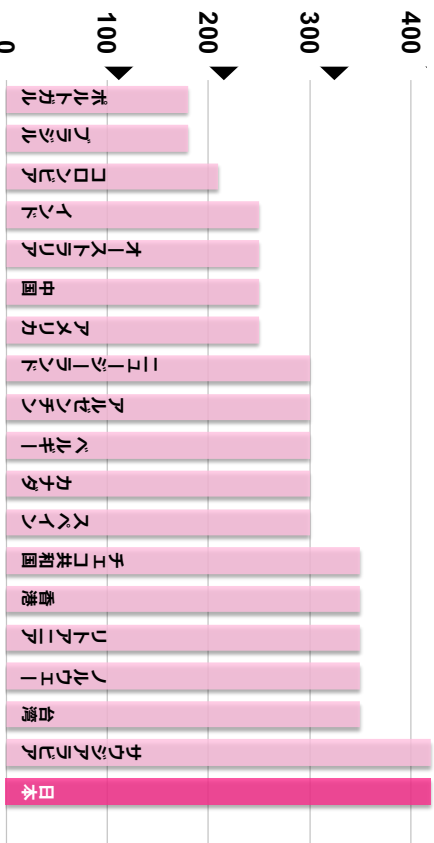


骨強度の生涯推移



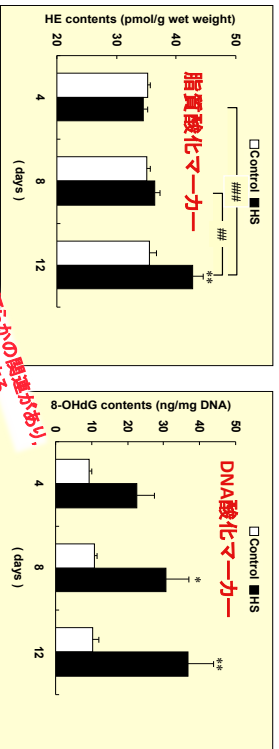
無重力→身体不活動→座位時間

日本の「座位時間(1日当たり)」は、国際的に見て長い！？

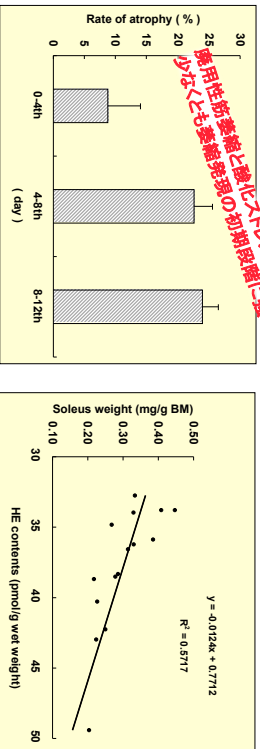


(Bauman A et al., Am J Prev Med 41, 2011)

無重力→重力負荷の欠如



HEL
適用性筋萎縮と酸化ストレスには何らかの関連がある
少なくとも萎縮発現の初期段階に強く関連する



ヒラメ筋の萎縮速度

HS12日目のヒラメ筋量と脂質酸化レベルの相関

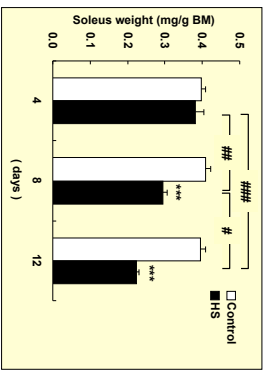
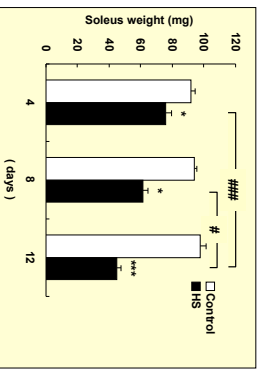
無重力→重力負荷の欠如

Unloading stress



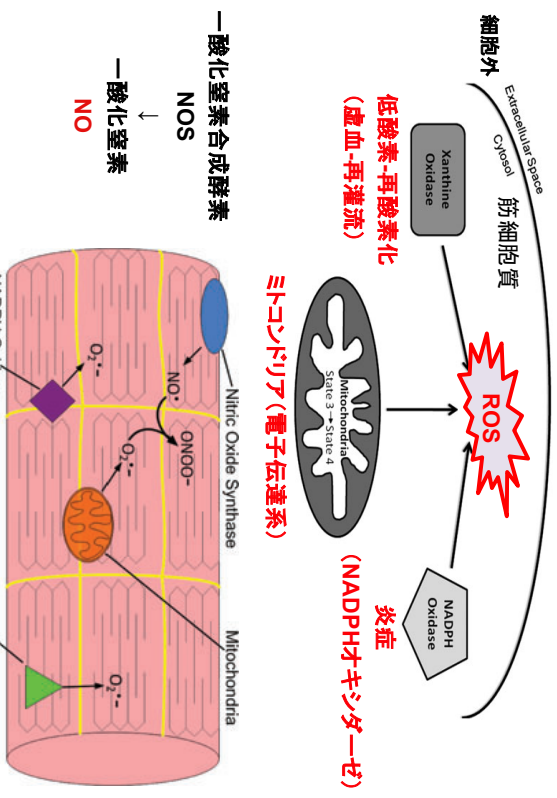
ラット(雄, 8週齢, n=35)
後肢不荷重(尾懸垂)
12日間
ヒラメ筋 soleus m
酸化マーカーと筋重量
(脂質, DNA)

- <適用性筋萎縮>
- 要支援, 要介護者(寝たきり患者)
 - 宇宙飛行士
 - オペ後リハビリテーション前
 - (・サルコペニア)



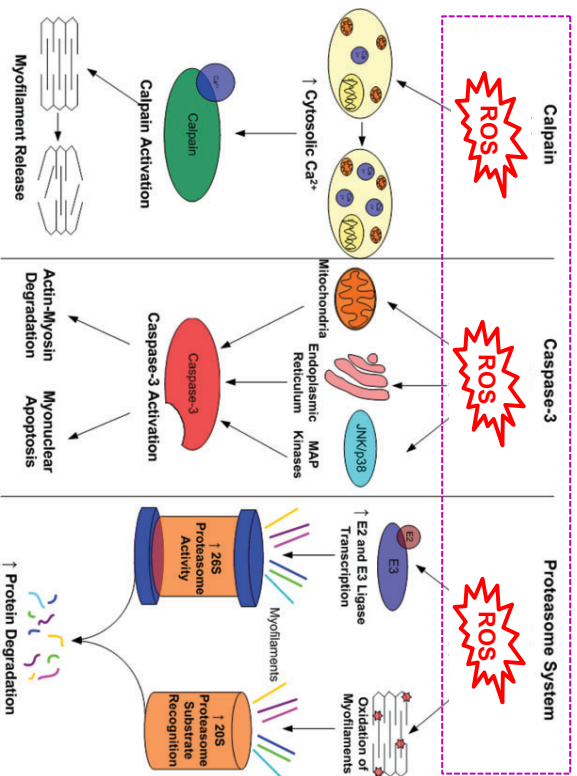
(小川麻理ら, 日本運動生理学会大会, 2010)

無重力→不活動→酸化ストレス



(Powers SK et al., Antioxidants & Redox Signaling 15, 2011; Powers SK et al., Exp Physiol 95, 2010)

無重力 → 酸化ストレス → 骨格筋萎縮



(Powers SK et al., *Exp Physiol* 95, 2010)