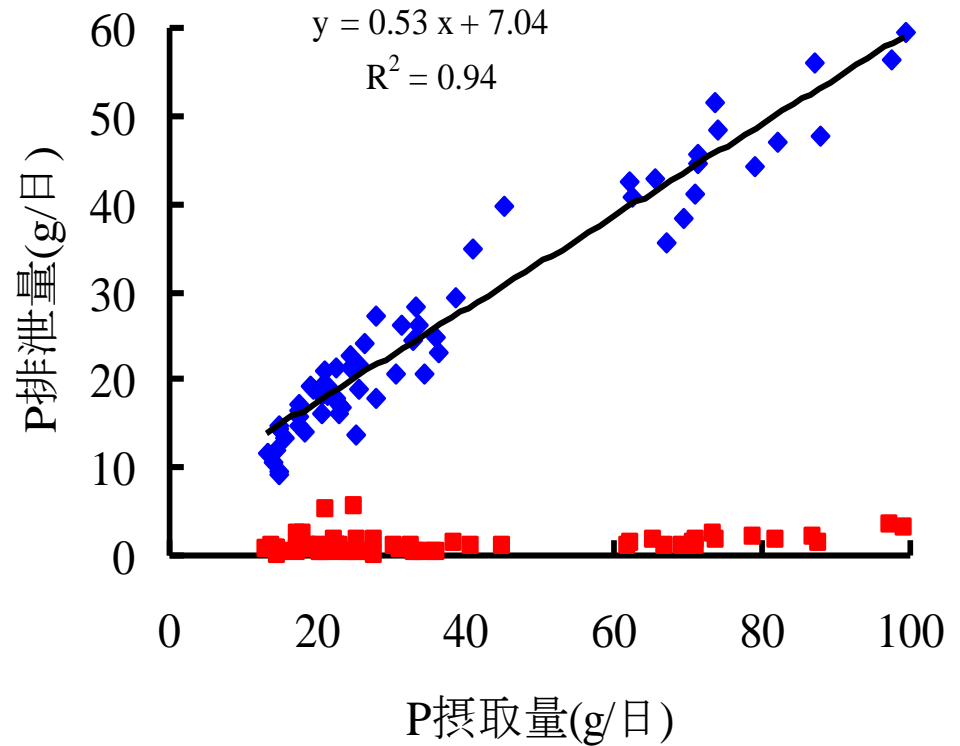


水資源と動物の水代謝

グローバルとローカルな環境問題

- グローバルな環境問題(メタン等)に対して、ローカルな環境問題(窒素、リン、カリウムなどによる湖沼・河川・地下水の汚染)がある。



乳牛の糞(◆)と尿(■)中
リン排泄量

帯広の農家
乳牛：850頭
肉牛：7000頭





環境温度：
-18°C



保温水槽

水と塩

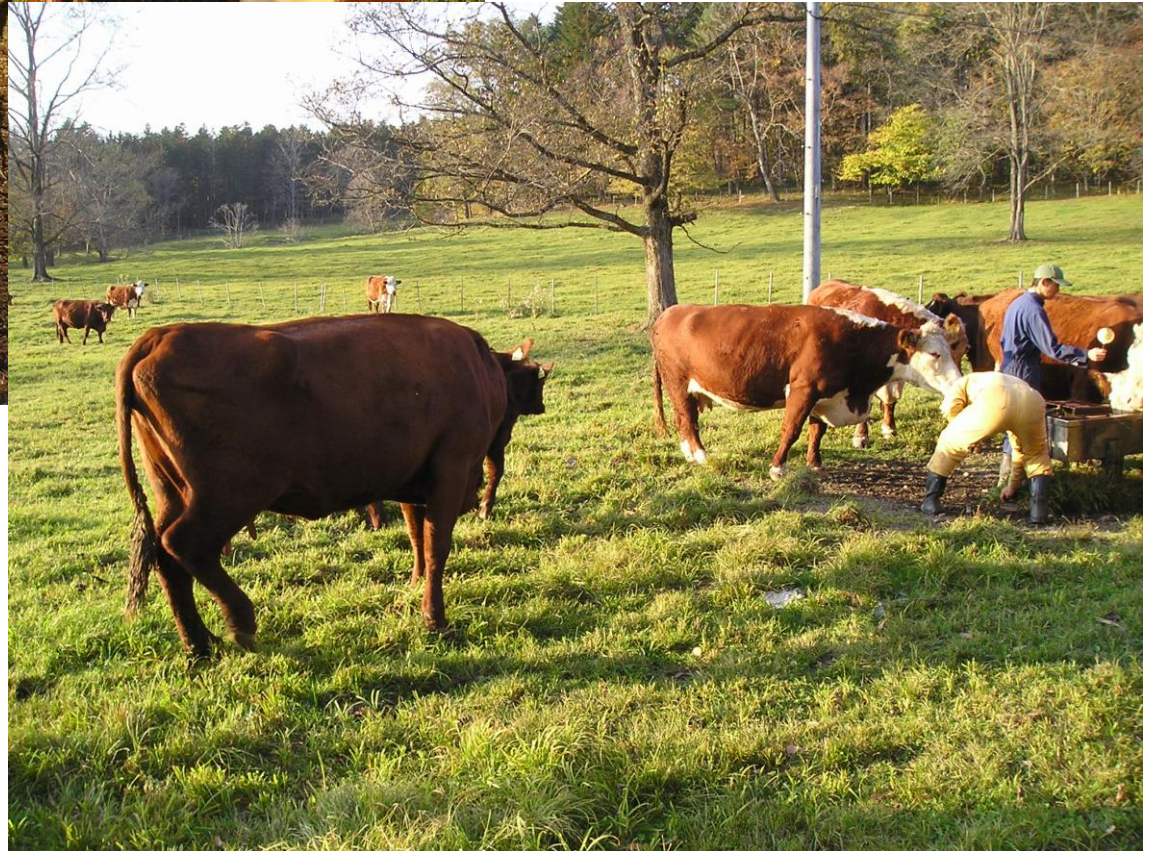


集約放牧



放牧牛の飲水行動と防暑管理





- ヘレフォードの放牧と水

水需要の増加（高橋、2003年）

- 全世界の水需要（農業用水・工業用水・生活用水）は急速に増加しているが、農業用水の占める比率が最も高く、水需要の62%（2000年）に達している。
- 水不足と水汚染（原因：病原菌、化学肥料、農薬、重金属、油、塩分など）が原因で、世界では年間約400万人の死者がでている。
- **21世紀は水の問題が大きくなる**

バーチャルウォーター輸放量

- バーチャルウォーターは輸入している農産物等を自国で生産する場合に必要な水資源量を指し、大量の食料輸入は世界の水資源に悪影響を及ぼすことを示している
- トウモロコシ1kg生産に必要な水は約900L、牛肉1kg生産では2万Lの水が必要(約11kgのトウモロコシが必要なことから試算)
- わが国では世界各国から穀物(283億 m^3 /年)、大豆(121億 m^3 /年)、畜産物(223億 m^3 /年)のバーチャルウォーターを輸入(800億 m^3 /年:2005年)している。

内部環境の恒常性維持 (体液のしくみと働き)

- 内部環境としての体液：原始の生物は海水中で物質交換をしたが、陸にあがると体の中に海水環境をもちこんで細胞外液とし、細胞外の環境を生存に適するように維持している
- 体液調節（循環血液量、血漿浸透圧、酸塩基平衡など）のしくみは、水と電解質の出納を調和することで維持されている
- 細胞内のシグナル伝達にカルシウムとリン（ATP、核酸などの構成成分）が重要な役割を果たしている

表、体液の区分

	体重に 対する%	総水分に 対する%
細胞内液	41	63
細胞外液	24	37
間質液	18	27
血漿	4	7
細胞通過液 ^a	2	3
計	65	100

a) 脳脊髄液、消化液、関節腔液など

動物体内の水の働き

- **新陳代謝作用**: 生命活動の基本となる酵素反応の円滑化—水溶液中で反応する(体内の加水分解反応)
- **運搬作用**: 栄養素、代謝産物、酸素、ホルモンなどの組織への運搬—水に溶けやすい
- **排泄作用**: 糞尿への老廃物の排泄
- **体温調節作用**: 発汗などによる体温上昇の抑制
- 水の体内保留時間は短く(半減期は約3.5日)、水がないと5-10日で死に至る

陸生動物の生理学的利点と脅威

- 空気呼吸に対する大規模な進化的適応は節足動物と脊椎動物で起こった(熱帯・寒冷地域、乾燥・湿潤地域など)
- 陸生生活の最大の利点:酸素の利用が容易(エネルギーの有効利用)
- 陸生生活の最大の脅威:脱水による死の危険(体表からの水の蒸発:ミミズやカエルは皮膚からの蒸発速度が速い)

電解質と体液保持

- 陸生動物は水中から陸上にあがるときに体液を確保することが重要になり、腎臓に体中の水分を逃さない構造を持たせた
- 細胞外液の電解質濃度は生体の恒常性維持のために一定に保たれ、**血漿の浸透圧は細胞外液に含まれる溶質濃度の総和(NaとCl)に比例する**：レニン-アンジオテンシン-アルドステロン系は陸生に進化した時に備わった体液調節系

細胞内液と外液のイオン組成 (mM)

陽・陰イオン	細胞内液	細胞外液
--------	------	------

Na ⁺	5-15	145
-----------------	------	-----

K ⁺	140	5
----------------	-----	---

Ca ²⁺	10 ⁻⁴	1-2
------------------	------------------	-----

Mg ²⁺	0.5	1-2
------------------	-----	-----

H ⁺	7x10 ⁻⁵	4x10 ⁻⁵
----------------	--------------------	--------------------

(pH)	(7.2)	(7.4)
------	-------	-------

Cl ⁻	5-30	110
-----------------	------	-----

HCO ₃ ⁻	10	30
-------------------------------	----	----

陰イオンにはリン酸・蛋白質などがある

表、牛の発汗量(g/m²/hr)と イオン成分(mg/m²/hr)

温度 (°C)	Na	K	Cl	Ca	P	発汗量
15	3.13	2.25	3.94	2.68	0.24	5.75
25	4.49	8.56	5.94	1.45	0.14	25.50
35	9.46	15.18	9.74	3.86	0.09	66.00

(Jenkinsonら)

- ・高温時に飲水量は増加する

絶食牛と乾乳牛の飲水量 (kg/日)

	環境温度		
	18°C	27°C	36°C
絶食牛			
飲水量 (給与時)	29.3	32.9	35.8
飲水量 (絶食時)	3.0 ^b	4.9 ^b	18.6 ^a
	18°C	26°C	32°C
乾乳牛			
DMI、kg/日	8.4	8.3	7.9
飲水量、kg/日	32.0 ^b	36.5 ^b	46.0 ^a

動物体内の水分量の変化 (関根、1998)

- 動物体内の水分量は発育に伴って減少し、この水分量の減少は体脂肪含量の増加と密接に関係している
- 牛体内の水分量は受胎直後(95%以上)、新生子牛(75%前後)、成熟期(66%程度)、老年期(55%程度)になる
- 子牛の発育中の水分含量は、細胞外液の変化が大きく、細胞内液の変化は少ない

陸生動物の水分平衡

- **脱水による死の危険からの逃避**: 水を保持し、損失を減少させる能力であり、水の過剰と不足に対して生理機構を適応させる
- 水の損失(体表面や呼吸器官からの蒸発、糞・尿への排泄など)と水の獲得(飲水、食物からの水、代謝水、体表面からの摂取)のバランスを一定にする
- 代謝による水の生成: $C_6H_{12}O_6(180g) + 6O_2(192g) \rightarrow CO_2(264g) + H_2O(108g)$
- 哺乳類は体の水分の10%損失に耐えられる

つなぎ牛舎と分離給与 水槽：ウォーターカップ

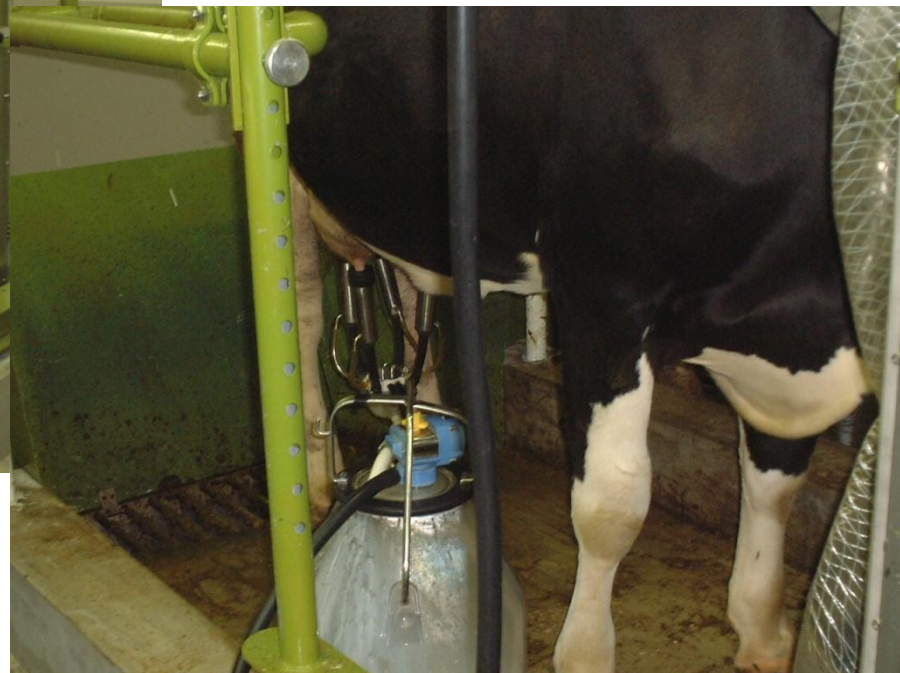
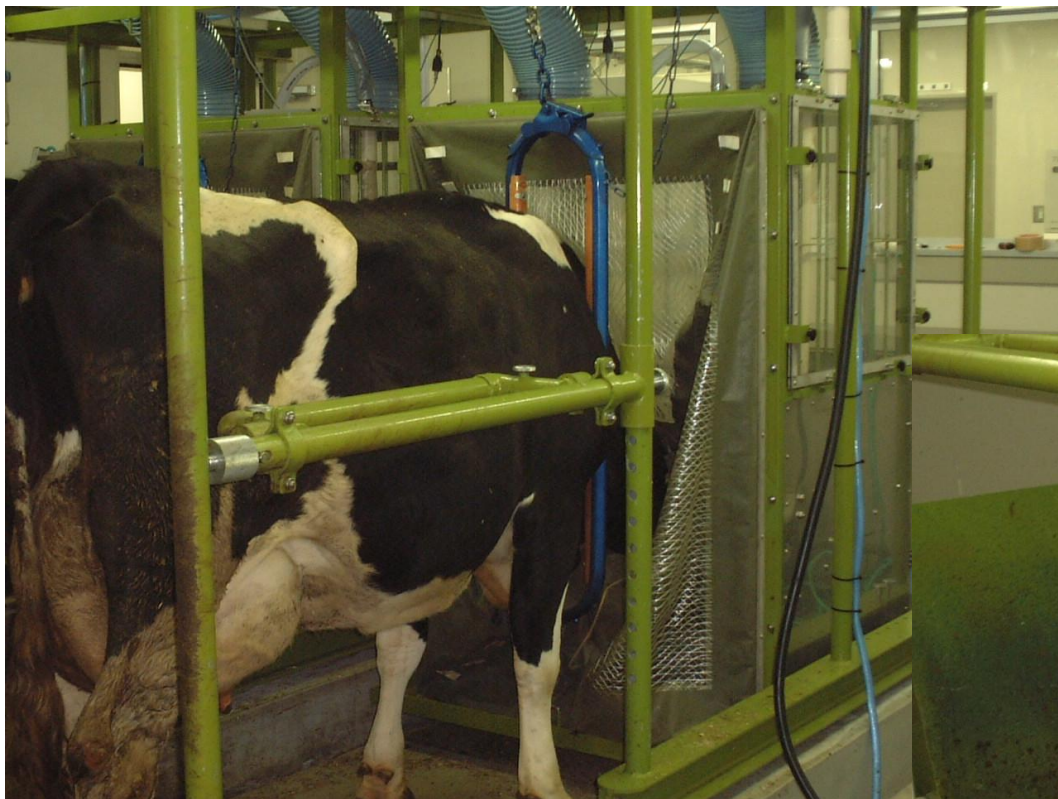


表1. 乾乳牛と泌乳牛の飼料成分と乾物摂取量・尿量(平均±SD)

	乾乳牛	泌乳牛	P
粗飼料給与比率, %	90-100	60	
成分, % of DM			
DM	43.8±18.9	51.2±9.5	
CP	14.5±3.8	16.6±3.1	
K	2.33±0.88	1.96±0.47	
体重, kg	616±64	609±48	NS
DMI, kg/d	7.6±1.0	20.7±2.2	***
乳量, kg/d	--	29.5±3.5	
尿量, kg/d	12.1±5.1	21.9±7.5	***

*** $P < 0.001$.

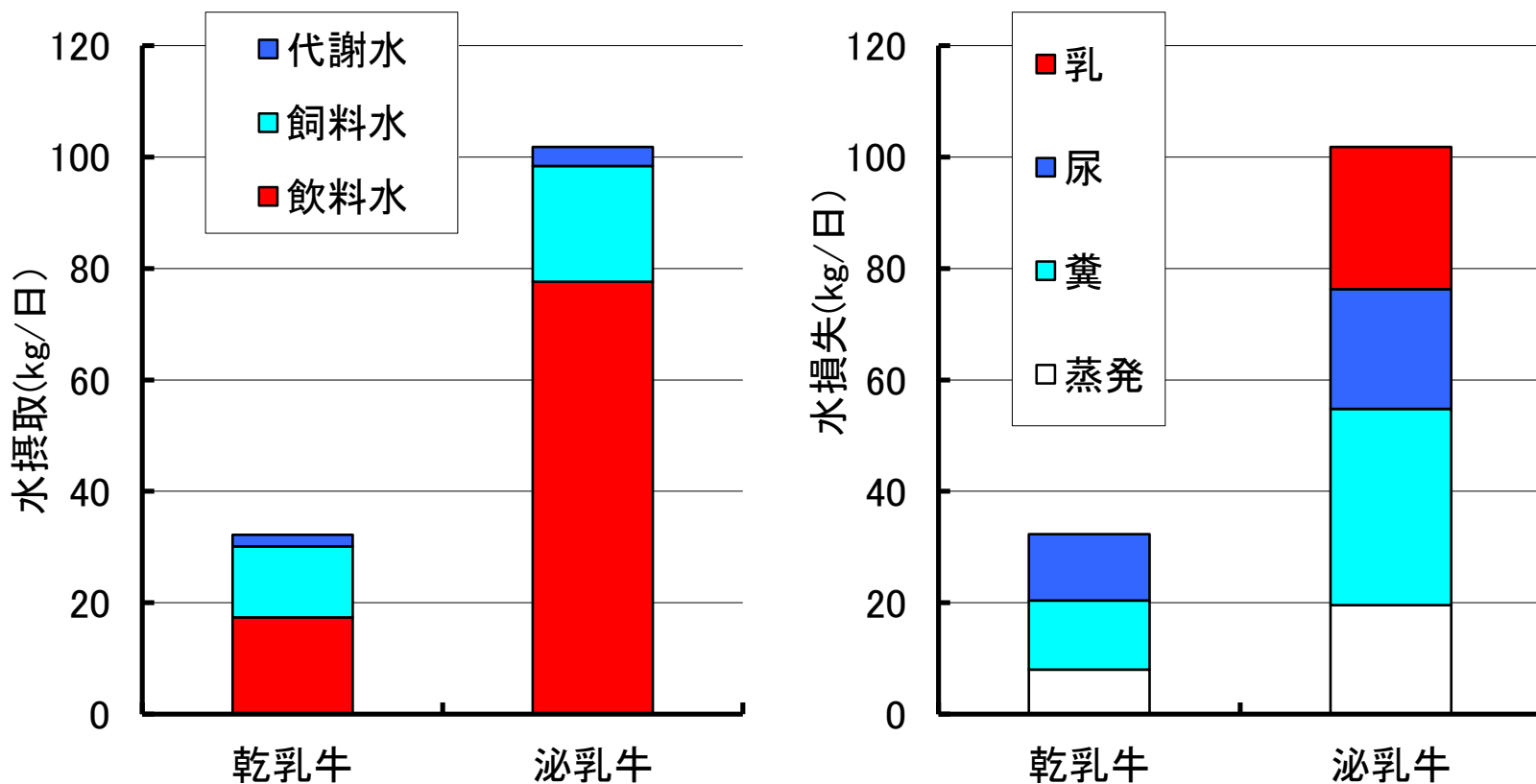
代謝試験(ヘッドケージ)



糞尿の採取



図、乾乳牛と泌乳牛（乳量：29.5kg） の水摂取量と水損失量



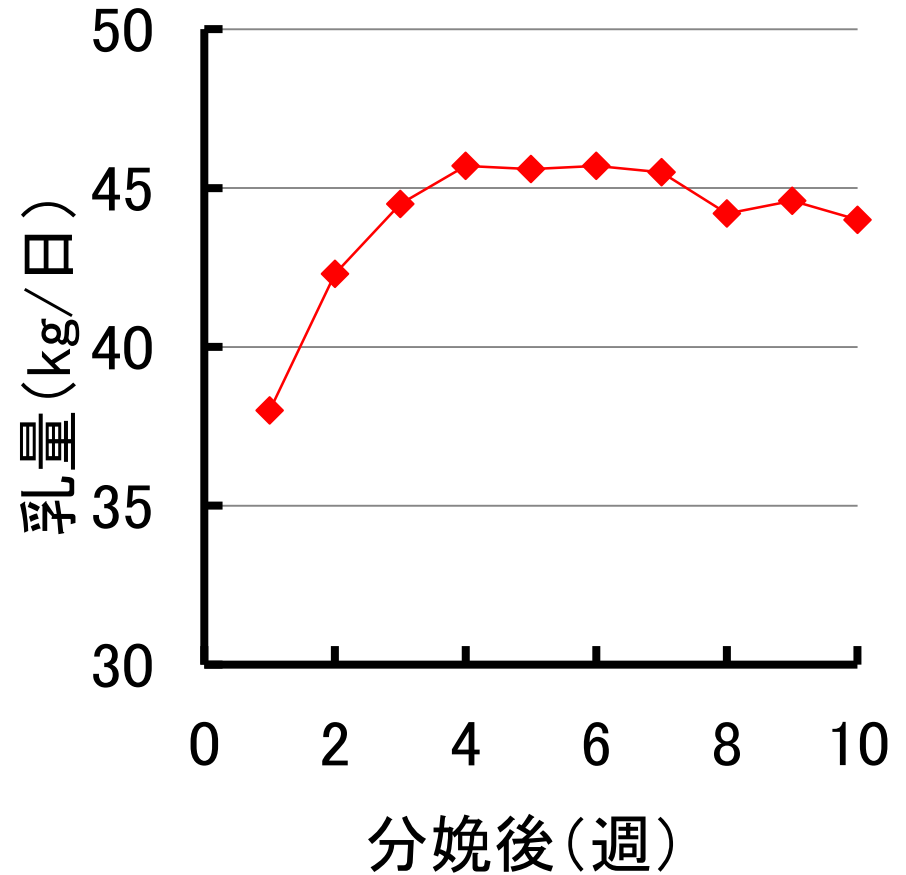
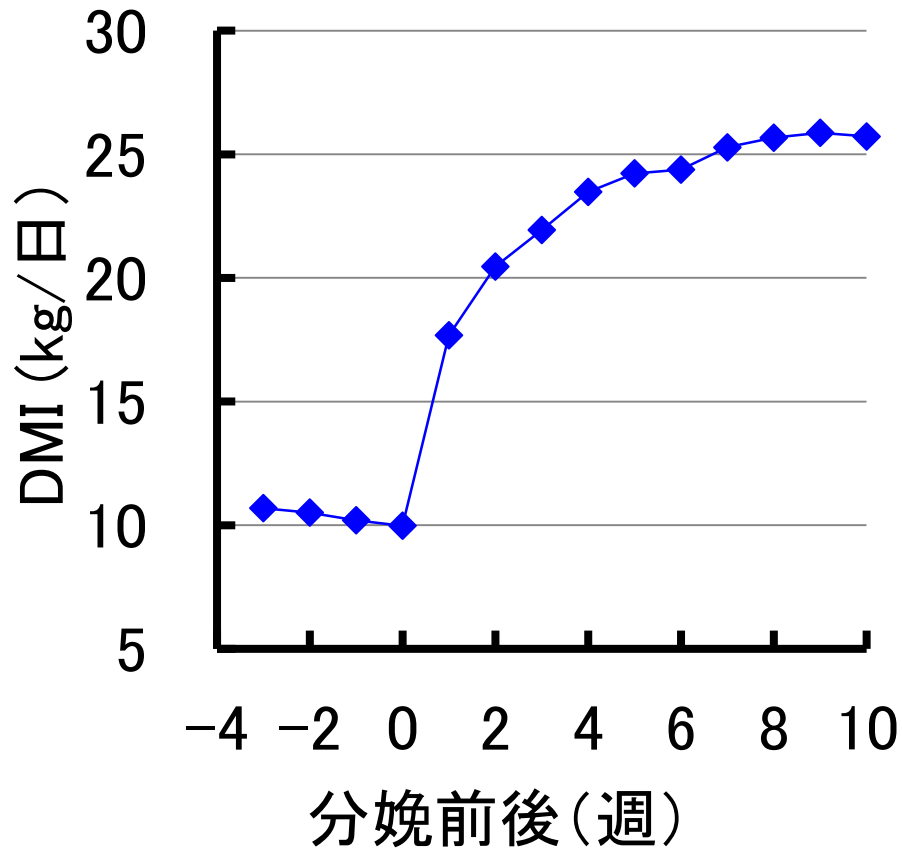
乳牛は分娩直後に大量の飲料水を必要とする

表、乾物摂取量(DMI)、水摂取量(TWI)と 飲水量(DWI)の比較(kg/日)

	乾乳牛	泌乳牛	泌乳牛/乾乳牛
DMI	7.7	20.7	2.69
TWI	30.3	98.4	3.25
DWI	16.0	77.6	4.85

分娩前と比較して、泌乳牛では乾物摂取量の増加率よりも飲水量の増加率が高い:水が飲めないと代謝異常になる

図、乳牛の分娩前後の 乾物摂取量と乳量



図、乳牛の分娩前後の体重と飲水量

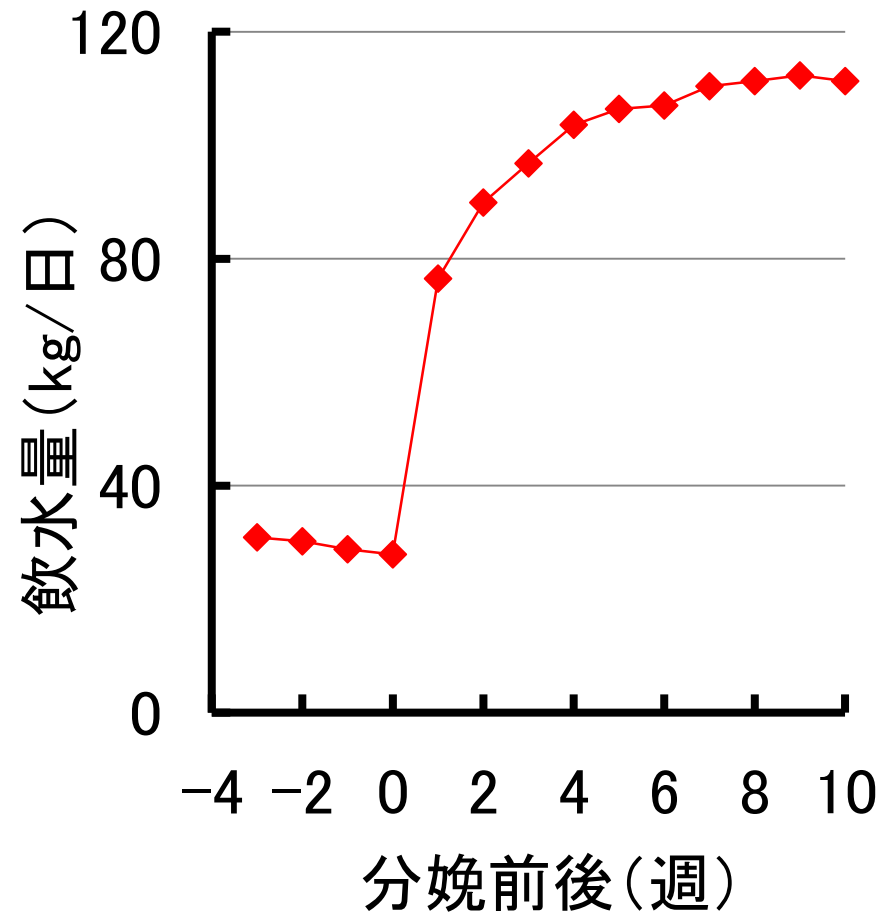
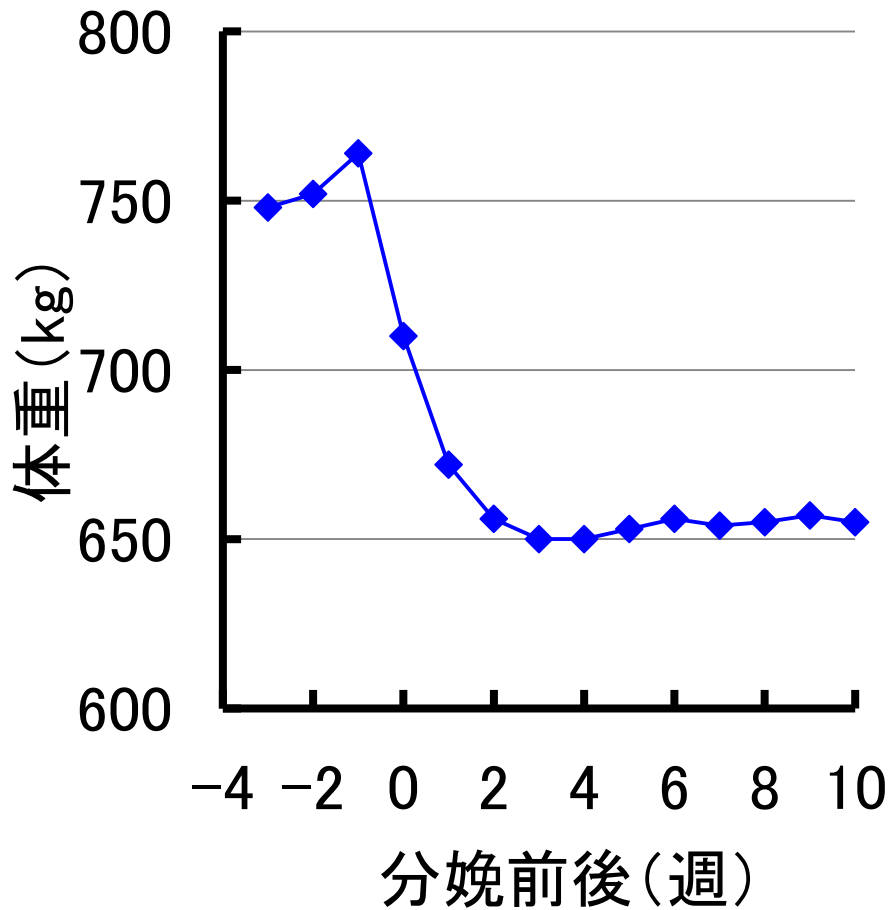


表2, サイレージ給与牛の飼料水、飲料水と水摂取量

	飼料中DM (%)		
	40	50	60
乾乳牛 (kg/日)			
飼料水	13.2	7.5	--
飲料水	17.8	27.0	--
合計	31.0	34.5	--
泌乳牛(kg/日)			
飼料水	29.3	21.7	14.1
飲料水	59.8	75.6	91.4
合計	89.1	97.3	105.5

表. 粗飼料多給酪農家における年間の飼料水と飲料水摂取量 (t/年)

	飼料中DM (%)		
	40	50	60
飼料水	583	423	264
飲料水	1156	1478	1800
合計	1739	1901	2064

(搾乳牛50頭と乾乳牛10頭のモデル農家)

排出器官の機能

- 内部環境を一定に維持するために、生物が取り込んだ物質の量と同量を排出して、体内平衡を維持しなければならない
- 排出系の主要な機能
 1. 適切な溶質濃度の維持
 2. 適切な体の体積(水分含有量)の維持
 3. 代謝最終産物の除去
 4. 外来物質もしくはその代謝産物の除去

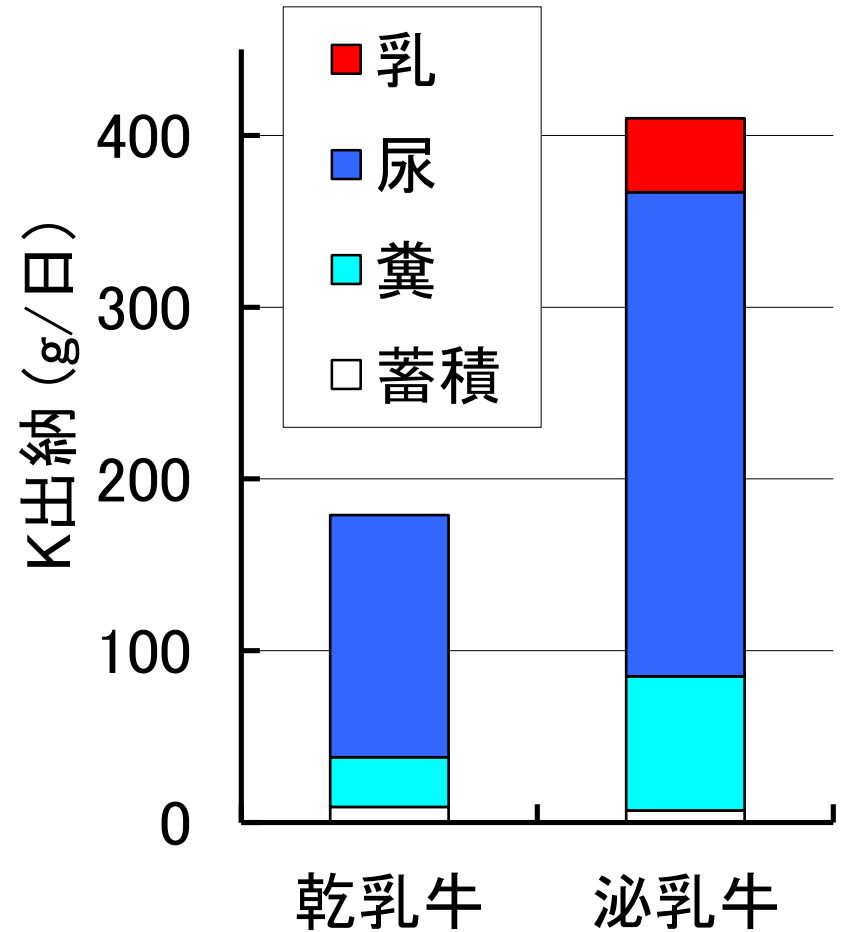
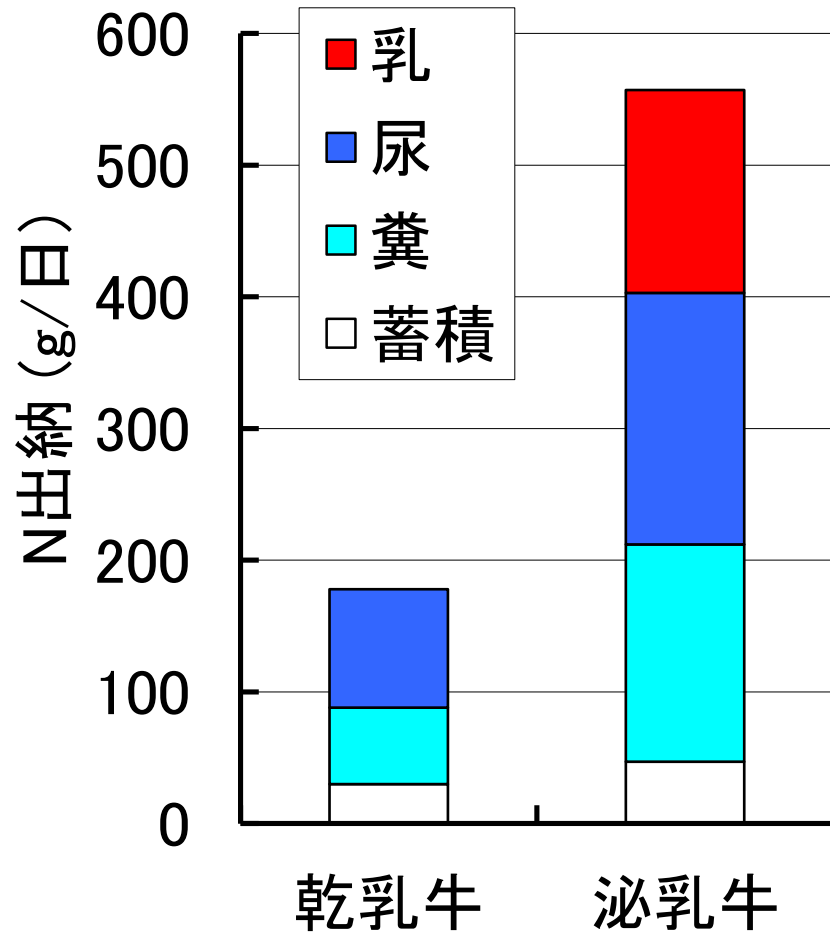
排出過程の基本原則

- 限外ろ過：圧力によって液体を強制的に半透膜を透過させる。半透膜はタンパク質などの大きな分子は通さないが、塩類、糖質、アミノ酸などの小さな分子は通す
- 能動輸送：エネルギーを消費して、動物の中から排出器官の管腔や細胞小器官へ送る（能動分泌）とその逆の管腔から動物体内にもどる（能動再吸収）過程がある
- 多くの場合はろ過（原尿生成）後、能動輸送が行われる

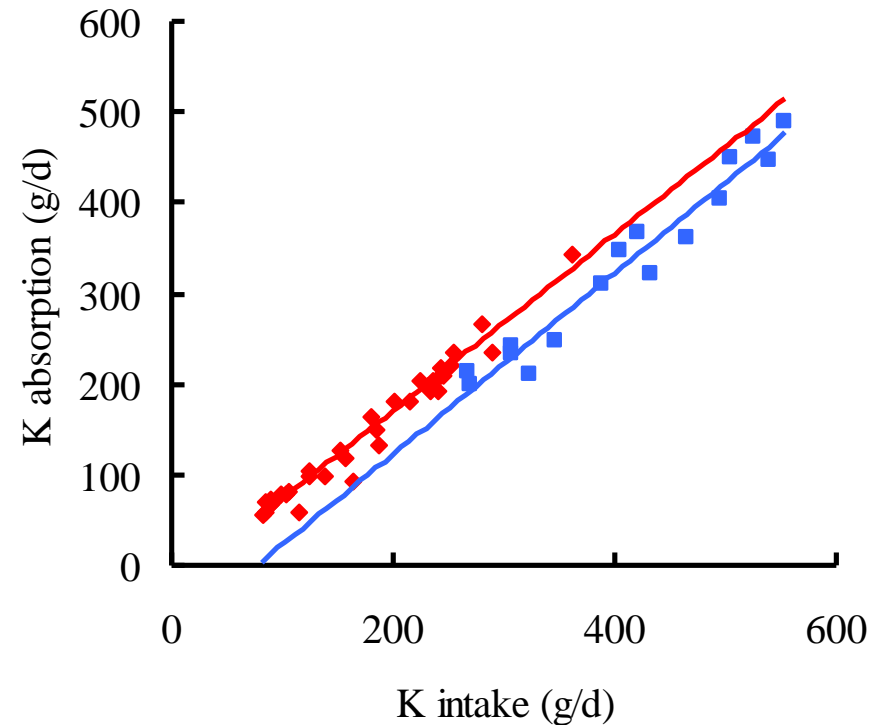
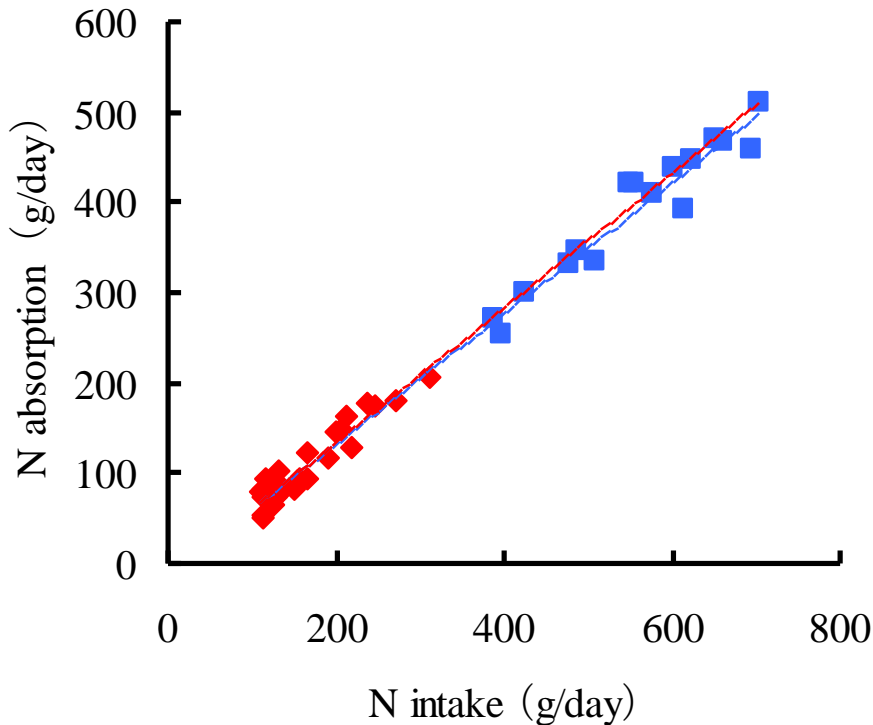
体液量の調節（腎臓）

- 糸球体ろ過量は腎臓に流れ込む血流（腎血流）によって影響されるため、不安定で、ろ過量の調節だけでは血液量の調節ができない
- 尿細管の再吸収量の変化で精密処理が可能
- 大まかな調節を糸球体ろ過、精密な調節を尿細管で実施
- 1本ずつのネフロンが単独でフィードバック機能をもち、体液量を調節している
- 尿は濃縮・希釈する程度が大きい

図、乾乳牛と泌乳牛の窒素とカリウム出納 (g/日)



図、乾乳牛(◆)と泌乳牛(■)の窒素・カリウム摂取量とそれらの吸収量の関係



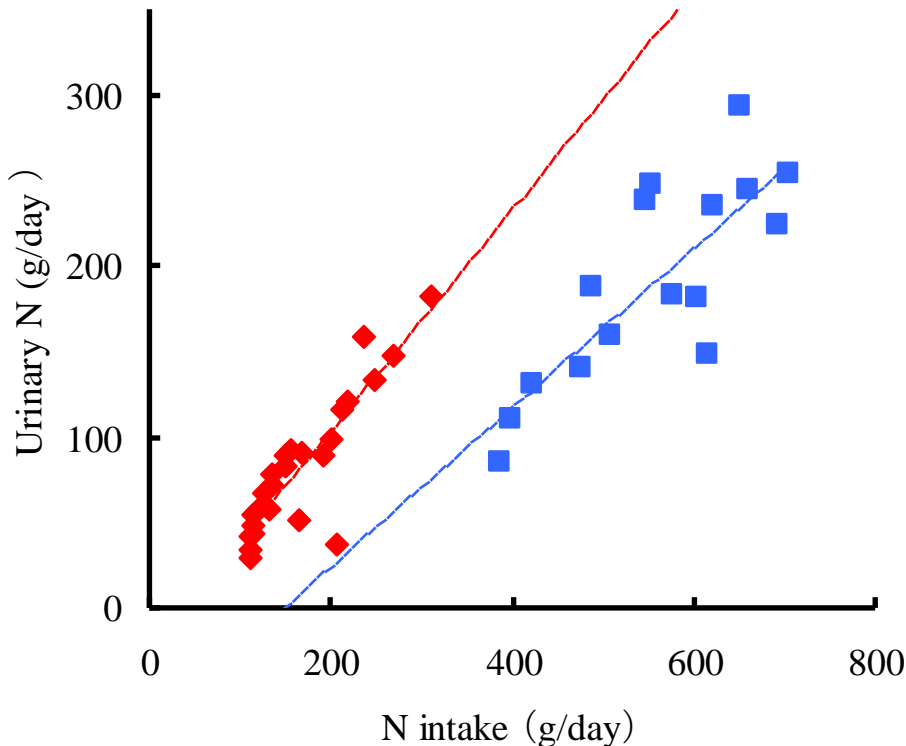
D: $Y = 0.746x - 13.0$ ($R^2 = 0.91$)

L: $Y = 0.723x - 10.7$ ($R^2 = 0.92$)

D: $Y = 0.971X - 23.4$ ($R^2 = 0.97$)

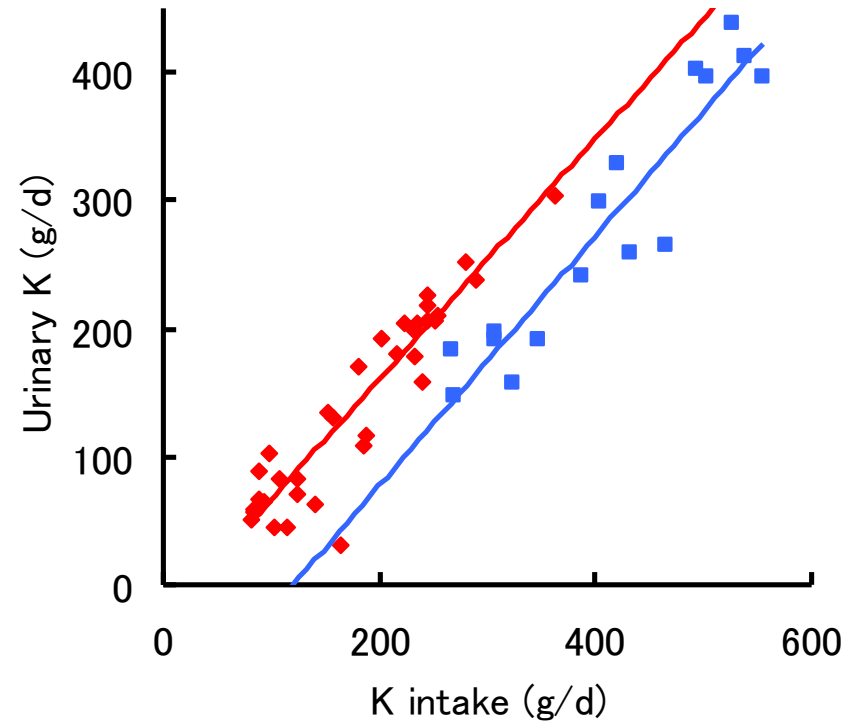
L: $Y = 0.999X - 77.2$ ($R^2 = 0.88$)

図、乾乳牛(◆)と泌乳牛(■)の窒素・カリウム 摂取量とそれらの尿中排泄量の関係



$$D: Y = 0.646x - 24.4 \quad (R^2 = 0.79)$$

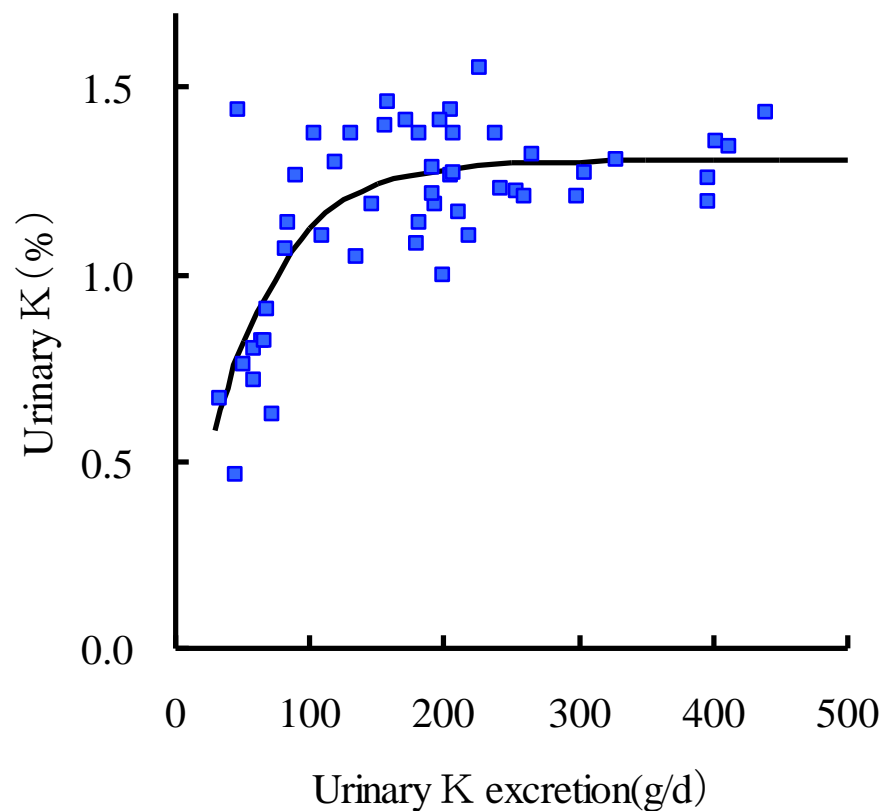
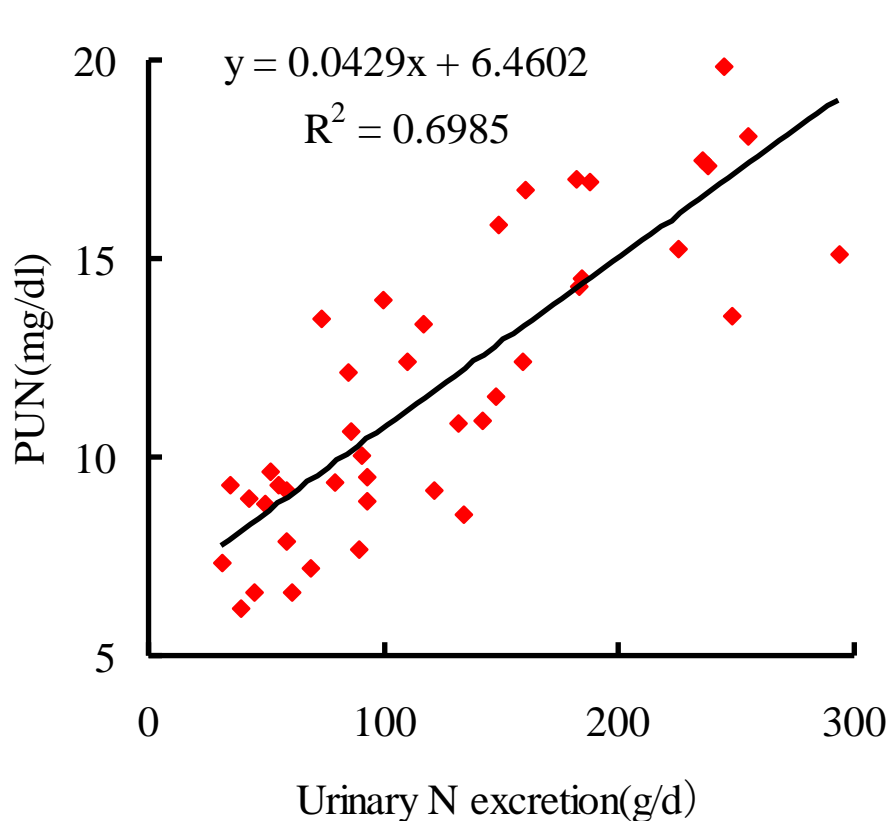
$$L: Y = 0.465x - 67.7 \quad (R^2 = 0.65)$$



$$D: Y = 0.938X - 27 \quad (R^2 = 0.87)$$

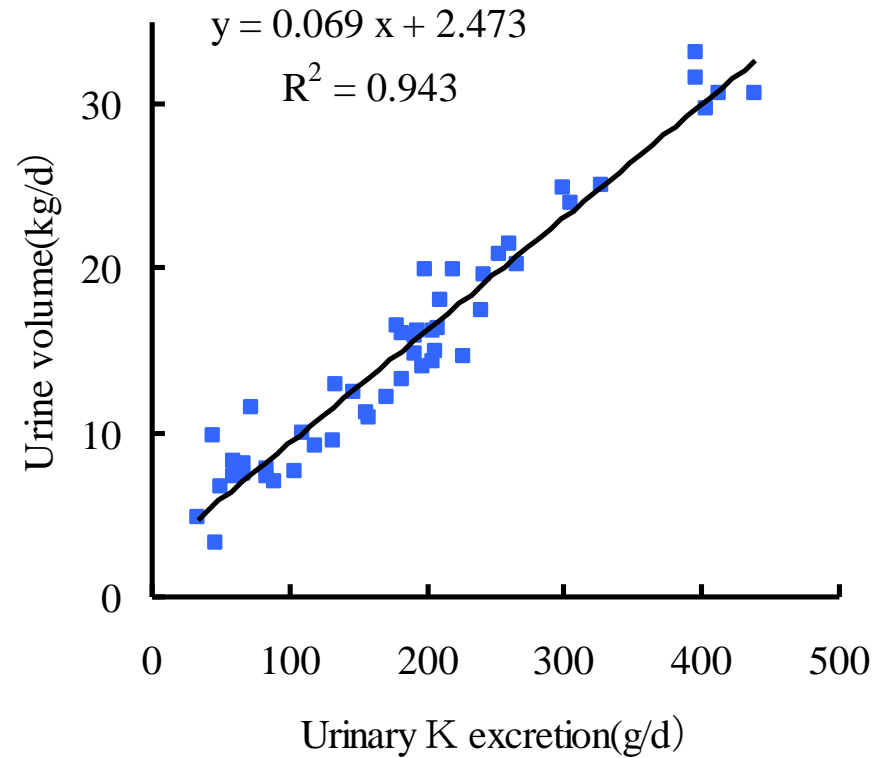
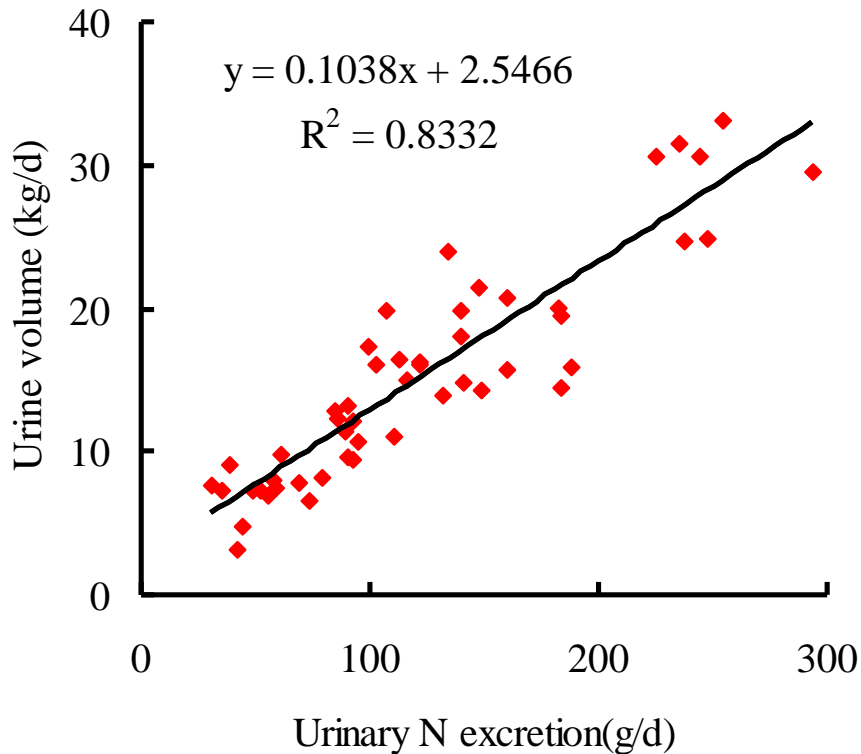
$$L: Y = 0.974X - 117 \quad (R^2 = 0.88)$$

図、乳牛の尿中窒素排泄量と血漿尿素態窒素 (PUN) と尿中カリウム排泄量と尿中カリウム含量 の関係



$$Y = 1.306(1 - 1.012e^{-0.020x}) \quad (R^2 = 0.51)$$

図、尿中N (◆)・尿中K (◆)排泄量 と尿量の関係



腎臓の排泄機能

- ろ過液はタンパク質などの大きな分子以外の栄養素を含み、体に必要のため、塩類、糖質、アミノ酸などを再吸収する
- 腎臓ではろ過液の99%以上が再吸収され、1%未満が尿になる:ろ過された物質は再吸収されない限り尿に排泄されるため、特別な分泌機構を発達させることなく特定の新しい物質を排除できる
- 全ての脊椎動物は血液と等張または低張な尿を生成できるが、鳥類と哺乳類だけが体液よりも濃い尿を生成できる

タンパク質の排泄

- 腎機能障害では初めに血液中の尿素やクレアチニンなどの窒素系廃棄物が上昇する
- 栄養素のうち糖質と脂質は二酸化酸素と水に分解され、気体と水蒸気として肺から排泄されるが、タンパク質中の窒素は気体として排泄されないので腎臓から尿中に排泄する

窒素の腎クリアランス

- CR (L of blood cleared/d/kg BW) の推定値
窒素の腎クリアランス: 窒素を排泄するために
必要な体重1kg当たりの腎血流量/日
肉用繁殖雌牛: 1.00 ± 0.28
乾乳牛: 1.33 ± 0.41 (Kohnら、牛: 1.3 ± 0.12)
泌乳牛: 2.08 ± 0.46



$$\text{尿中窒素排泄量 (g/日)} = \text{CR} \times \text{PUN} \times \text{BW}$$

尿中窒素排泄量の増加: 窒素が無駄になるだけではなく、窒素の処理によるエネルギー消費と尿素としてのエネルギーの損失

濃縮尿の生成

- 体液浸透圧保持のメカニズム: 経口的な水分摂取と腎による濃縮尿の生成が重要
- **腎髄質**: 体液よりも高浸透圧 (NaCl、尿素などの蓄積) となり、その後集合管を通過する間に水が再吸収され、濃縮尿が生成される
- **尿濃縮**: 腎髄質の浸透圧勾配の大きさ (対向流系) と集合管の水透過性 (バゾプレッシンによる調節) によって決まる

限外ろ過の必要性

- 限外ろ過は血圧によって起こされる: 限外ろ過が起こるためには血圧が血中のタンパク質の浸透圧(コロイド浸透圧)を超えることが必要
- 近位尿細管の再吸収で重要な物質の一つはグルコースであり、通常グルコースは能動輸送によってほぼ100%再吸収される
- 再吸収される物質の尿細管再吸収の最大値は、その物質の閾値を超えて血漿中濃度が増加するとその物質が尿中に現れる

尿濃度と尿量

- ヒトでは尿の流量が100倍以上変わることもあるが、近位尿細管でろ過された水の85%は必ず回収され、最大排泄可能量は残りの15%である: グルコースとNaの再吸収(低張)による浸透効果のために水は受動的に吸収され、これは義務的な水の再吸収と呼ばれる
- ヘンレループと集合管では抗利尿ホルモンの働きで尿量が調節され、このホルモンがないと集合管の水透過性は低くなる

利尿(尿量の増加)作用

- 糸球体濾過面の拡張、糸球体毛細血管の血圧増加、尿細管内尿からの水分再吸収の抑制などにより、尿量が増加する
- 水利尿:水を大量摂取すると血液の膠質浸透圧(蛋白質による)が低下し、血液量の増加から尿量の増加につながる
- 浸透圧利尿:尿細管中に再吸収されない物質(カリウム、窒素など)があると水の受動的再吸収が妨げられて、尿量が増加

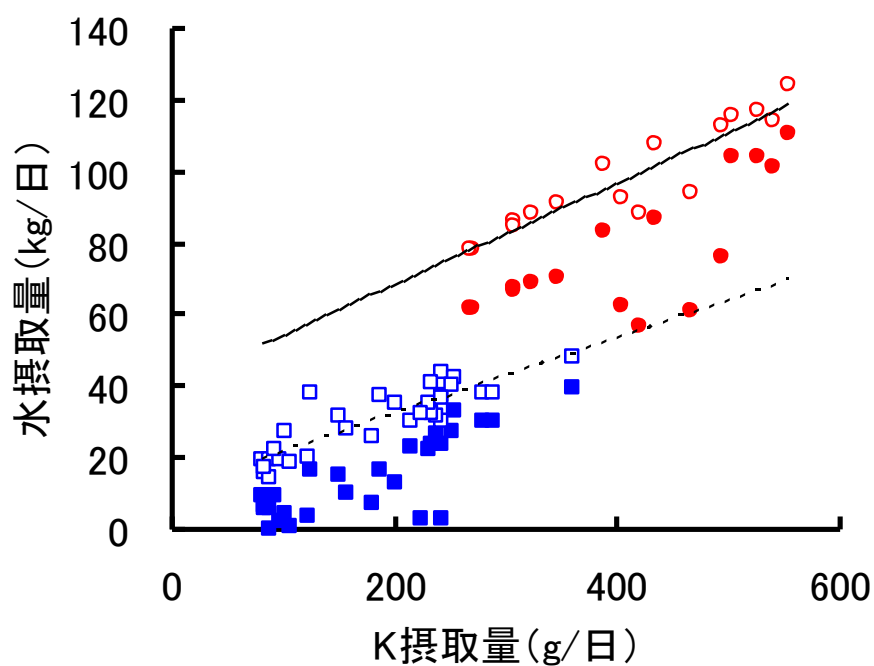
アルドステロンの機能

副腎皮質ホルモンのなかの電解質コルチコイドの
主要なもので、体液量の調節が主な生理作用



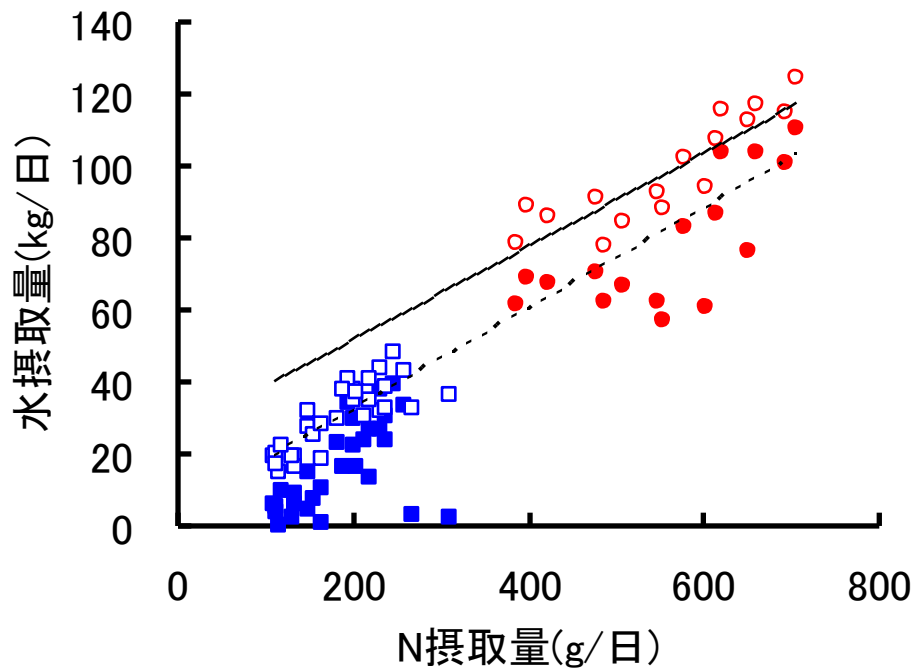
- ・腎集合管細胞に対する作用：腎集合管の主細胞に作用し、細胞内受容体と結合後、核に移行して特定遺伝子の転写活性を高める（Naチャンネル増加、Na⁺、K⁺ATPase活性上昇、Kチャンネル増加）
Naイオンの再吸収とKイオンの排出を促進
- ・腎外作用：唾液腺、乳腺、汗腺などに作用して、
Naイオンの再吸収とKイオンの排出を促進

乾乳牛と泌乳牛の水摂取量 (□; ○) と飲料水摂取量 (■; ●)



$$D: Y = 0.140x + 4.28 \quad (R^2 = 0.63)$$

$$L: Y = 0.129x + 26.4 \quad (R^2 = 0.50)$$



$$D: Y = 0.105x + 11.1 \quad (R^2 = 0.74)$$

$$L: Y = 0.141x + 40.6 \quad (R^2 = 0.85)$$

表3, サイレージ給与と牛の水摂取量 (kg/日)

飼料中CP (%)

12 15 18

乾乳牛 25.7 30.3 34.8

泌乳牛 79.2 91.7 104.1

飼料中K (%)

1.5 2.0 2.5

乾乳牛 23.9 27.7 31.4

泌乳牛 81.9 100.0 118.2

トウモロコシサイレージ



表3. 乾乳牛のK出納

	牧草 (n=24)	牧草+トウモロコシ (n=4)	トウモロコシ (n=6)
DMI、kg/日	7.9 ^a	7.2	6.8 ^b
尿量、kg/日	13.7 ^a	9.4	7.5 ^b
飼料中K、%	2.7 ^a	1.8 ^b	1.3 ^b
K摂取量、g/日	210 ^a	132 ^b	86 ^b
K尿中排泄量	165 ^a	113	65 ^b
K蓄積量	14	-7	2

a,b P<0.05、トウモロコシ給与では大豆粕9%添加