

反芻動物とルーメン(第一胃)

久米新一

京都大学大学院農学研究科

帯広の酪農家



飼養頭数：900頭
出荷乳量：6,000t



牧草の利用



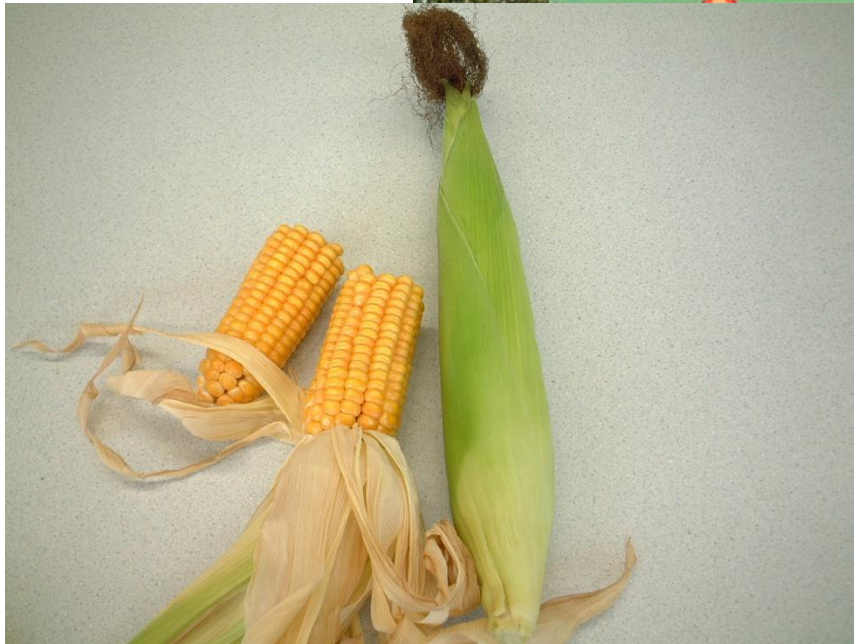
ロールベールの調製



バンカーサイレージ



トウモロコシ



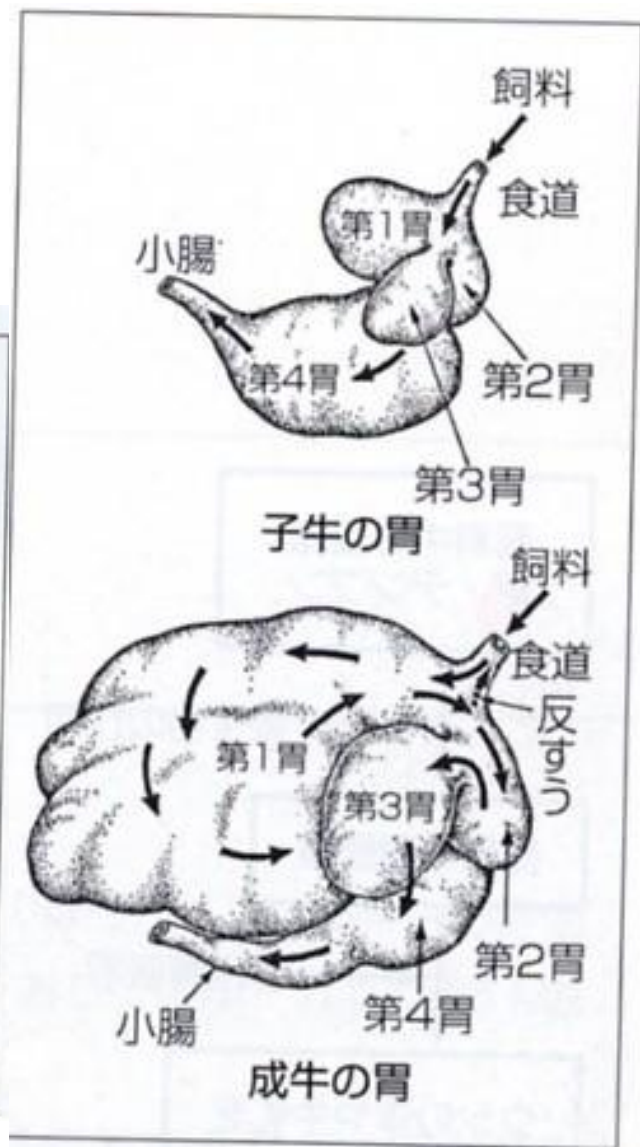
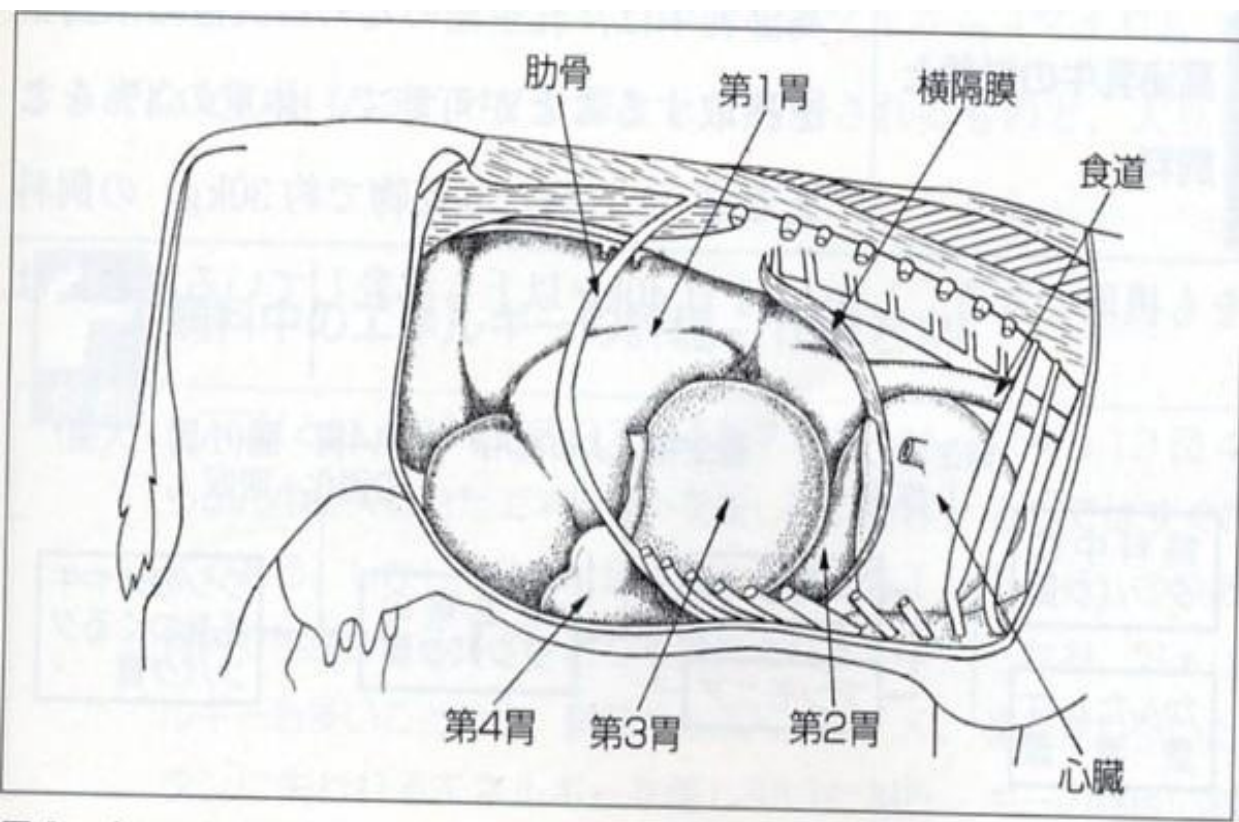
牛のルーメンの特異性

- エネルギー獲得の特異性
 - 無酸素によるエネルギー生成
 - 微生物による繊維の分解・利用
- 微生物タンパク質の合成
 - 栄養価の高いアミノ酸組成
- メタン菌によるメタンの生成
 - 有害物質である水素の除去

反芻

- 反芻家畜は採食時の咀嚼に加えて、反芻時に再咀嚼を行う(食物は小粒子になり、重量あたりの表面積が増加:消化酵素による消化が進む)
- 反芻:ルーメン内容物を口腔へはき戻し、再咀嚼して唾液と混和し、内容物をより微粒化し、再嚥下することで、1日の約1/3を費やす(粗飼料が多いと時間が増える)
- 吐き戻しは第二胃内容物が第二胃の特別の収縮で噴門部、食道を通過して口腔に戻る

牛のルーメン(第一胃と第二胃):ルーメン微生物(細菌、プロトゾア、真菌)と共存



粗飼料摂取量と唾液量の関係

(Erdman, 1988)

	粗飼料摂取比率		
	70	50	30
DMI、kg/日	20	20	20
粗飼料摂取量、kg/日	14	10	6
咀嚼回数	768	676	594
唾液量、l/日	292	284	276
唾液中NaHCO ₃ 、g/日	3066	2982	2898
唾液中Na ₂ HPO ₄ 、g/日	1057	1028	999

反芻家畜の唾液

- 唾液量：牛（100-180l/日）、めん羊（6-16l）
- 耳下腺、舌下腺、下顎腺からNa、重炭酸イオン、P、尿素などを大量に分泌し、これらはルーメンで再吸収され、唾液として再利用される
- 唾液はアルカリ性でpH9前後（他の動物は中性）

ルーメンの容積

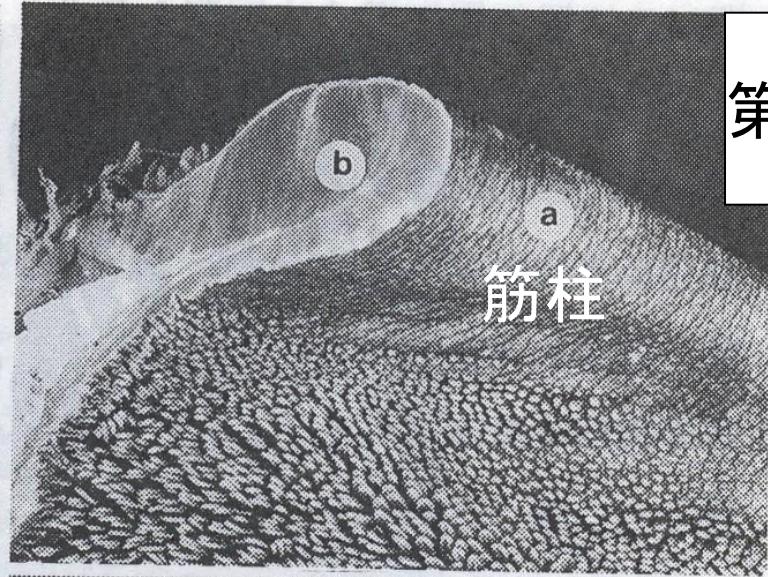
- 第一胃の容積：90～220l(成牛)
 - 大量に飼料を摂取できる：敵から身を守る草食動物の特徴
 - 胃の大きさの比率：
 - 第一胃：80%、第二胃：5%、
 - 第三胃：7～8%、第四胃：7～8%
- (第一胃と第二胃の滞留時間が長くなると、消化率が高まる：低品質の繊維も)

ルーメンの構造

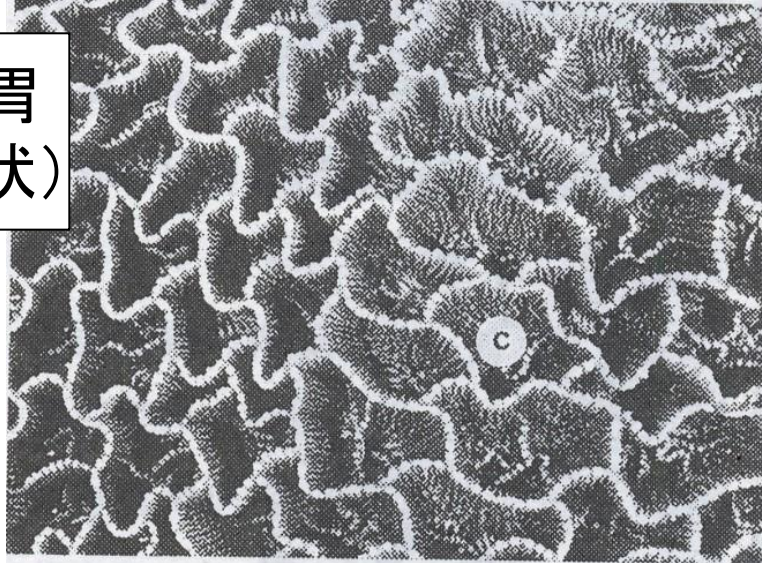
第一胃



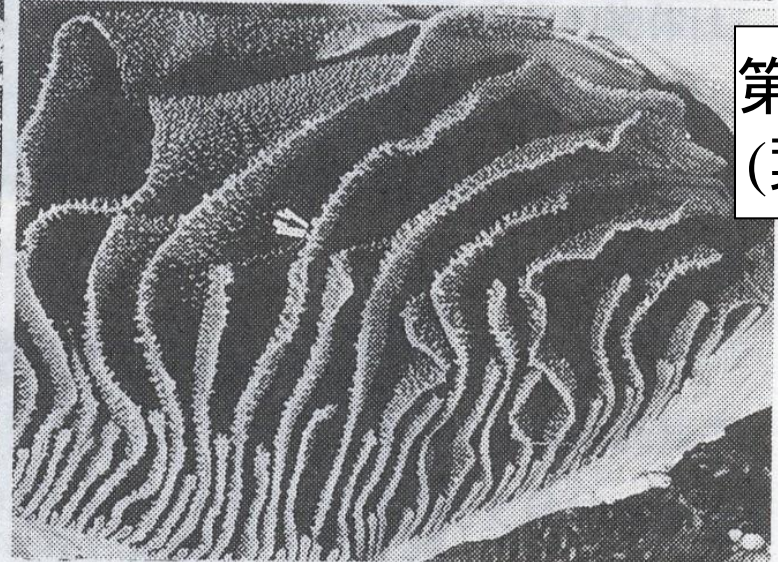
第一胃



第二胃
(蜂巢状)



第三胃
(葉状)



ルーメンの機能

- 第一胃の内腔の粘膜には無数の葉状や円錐状の乳頭が密生し、酵素を分泌せず、大量の飼料を貯蔵・混合し、微生物の働きと第一胃と第二胃の胃運動（攪拌運動によって食塊の破砕）で飼料を消化する
- 1mm以下の小粒子が第三胃に入り、第三胃では胃葉や乳頭による内容物のしわけがなされて水分などが吸収された後、内容物が第四胃に送られ、第四胃で化学的消化が行われる

ルーメン細菌の種類と生成物

種類：約70種類、大きさ：約1 μm 、生息密度：
 $10^{10} \sim 10^{11}/\text{ml}$

- ・セルロース分解菌：酢酸、コハク酸、ギ酸
- ・デンプン分解菌：乳酸、酢酸、ギ酸
- ・水溶性糖類分解菌：VFA、乳酸、コハク酸
- ・中間代謝産物利用菌：酢酸、プロピオン酸
- ・脂質分解菌：酢酸、プロピオン酸
- ・メタン生成細菌：メタン

プロトゾアの種類と生成物

種類：約90種類、大きさ：約100 μ m、

生息密度： $10^5 \sim 10^6$ /ml

- ・貧毛類：プロトゾアの70%以上

栄養源：細菌、デンプン、植物

生成物：酢酸、酪酸

- ・全毛類：10%以下

栄養源：グルコース、フルクトース、シヨ糖

生成物：酢酸、酪酸、乳酸

ルーメン細菌の生活様式

- 遊離型菌群：液状部に生息
- 固形性飼料固着菌群：50～75%は固形性飼料に付着している
- ルーメン上皮固着菌群：上皮細胞に生息
- プロトゾア固着菌群：メタン菌の付着
メタン菌による水素の除去はプロトゾアの発酵能の増強に貢献（共存関係）

ルーメンの物質変換フロー

- VFA、水、窒素化合物(アンモニア、硝酸など)、ミネラル(Na、K、Mgなど)などをルーメンから吸収
- 脂肪・タンパク質・ミネラルは微生物の体成分となり、ルーメンから下部消化管に移動
- ルーメンで消化されなかった栄養素は下部消化管に移動し、吸収あるいは排泄される
- ルーメン微生物がビタミンB群とビタミンCを産生(反芻動物には給与は必要ない)

プロトゾア除去と嫌気的環境

- プロトゾアは酸素を消費でき(ミトコンドリアではなく、ヒドロゲノソームが酸素を消費)、ルーメン内の酸素除去に寄与している
- ルーメン内のプロトゾアを除去すると、飼料給与後酸素濃度が一時的に上昇し、嫌気性細菌の減少により、水素とメタン生成が阻害される
- 繊維分解の主体は細菌とプロトゾアのため、プロトゾア除去により繊維分解が減少する

VFA・酢酸の吸収メカニズム

- ルーメンにおけるVFAの産生

繊維含量が多い場合：

酢酸：プロピオン酸：酪酸 = 7 : 2 : 1 ~ 6 : 3 : 1

デンプンが多い場合：

酢酸：プロピオン酸：酪酸 = 1 : 1 : 1 に近似



ルーメン壁から吸収する

ルーメン容積の変動による VFA吸収量の変化

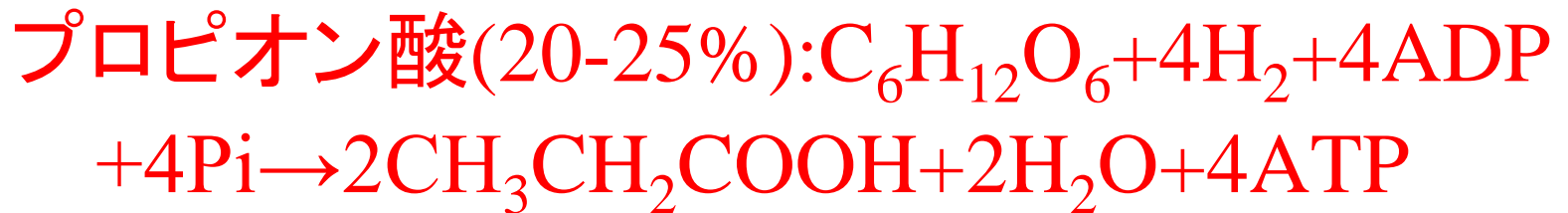
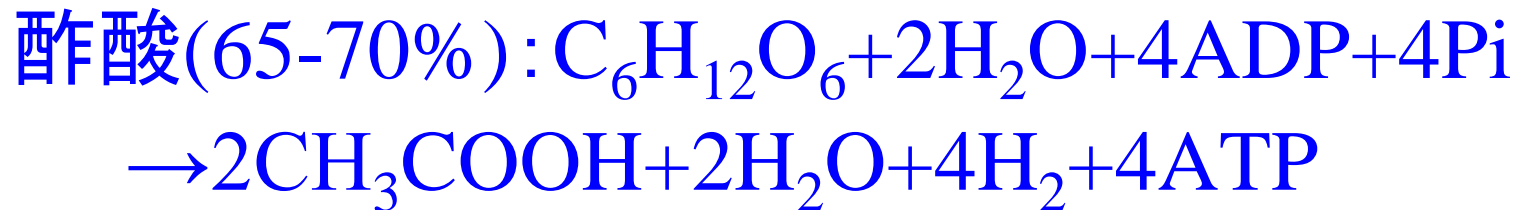
- 第一胃の容積: 90~200l(成牛)
 - 分娩時に小さく、その後採食量の増加とともに大きくなる
- 第一胃の容積を必要に応じて変化できる
- 乳頭が増えるとルーメンの表面積が増加し、VFA吸収量が増加する: 穀類の給与は乳頭の発育(長さなど)を促進する



採食量の増減により、VFA・酢酸吸収量の増減を制御

嫌気性環境のエネルギーの生成

- 嫌気性環境(牛のルーメン)におけるエネルギーの生成: VFA産生時に生成するATPは微生物の主要なエネルギー源となる



反芻動物のエネルギー利用

ルーメン 粘膜 肝臓 末梢血 末梢組織

酢酸 \longrightarrow 酢酸

プロピオン酸 \longrightarrow 糖新生 \longrightarrow グルコース \longrightarrow グルコース

酪酸 \longrightarrow β -ヒト β \longrightarrow β -ヒト β

オキシ酪酸

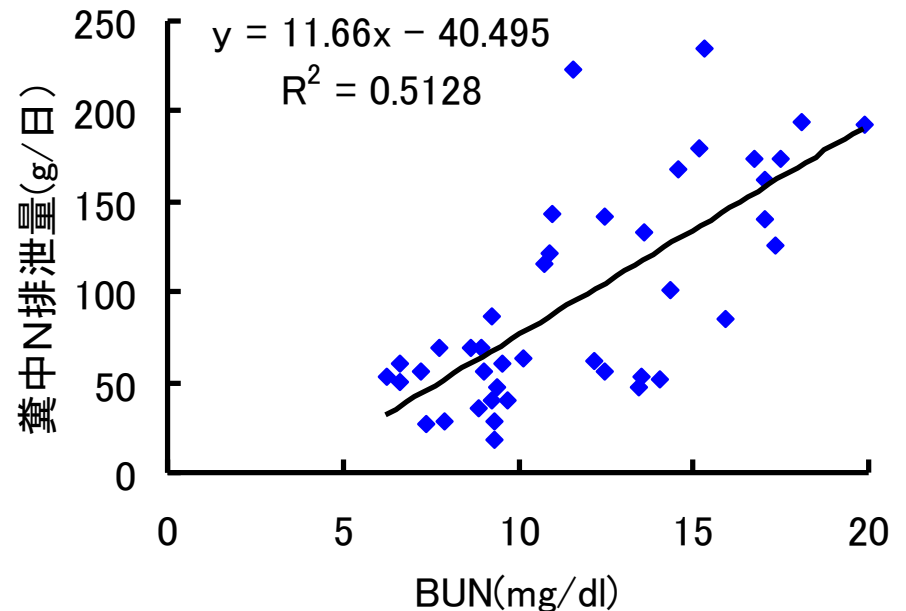
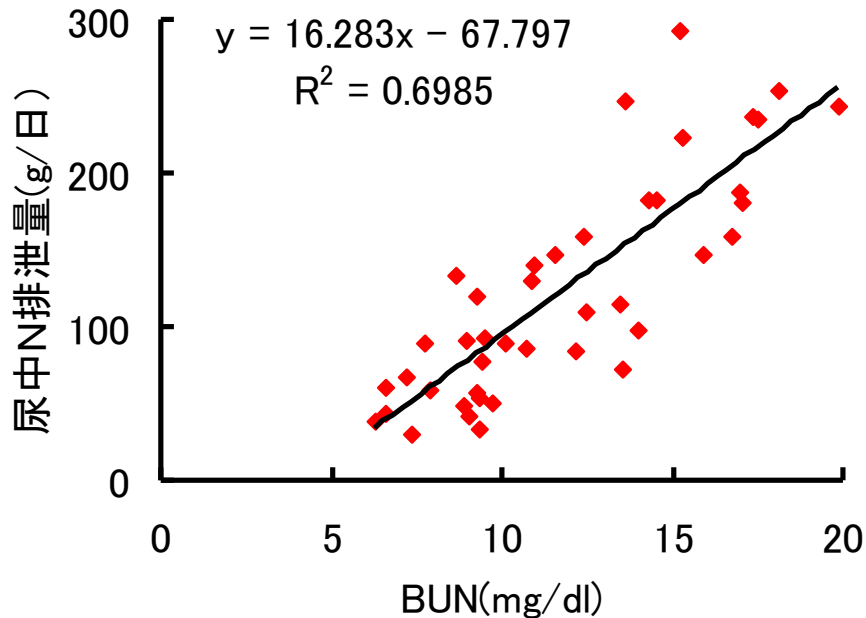
オキシ酪酸

- ・酢酸の78%は骨格筋、心筋、乳腺などで消費
(末梢血VFAの95%は酢酸:アセチルCoAになってエネルギー源)
・分娩前後にはアミノ酸、脂肪などから、糖新生でグルコースを産生する

微生物タンパク質の合成

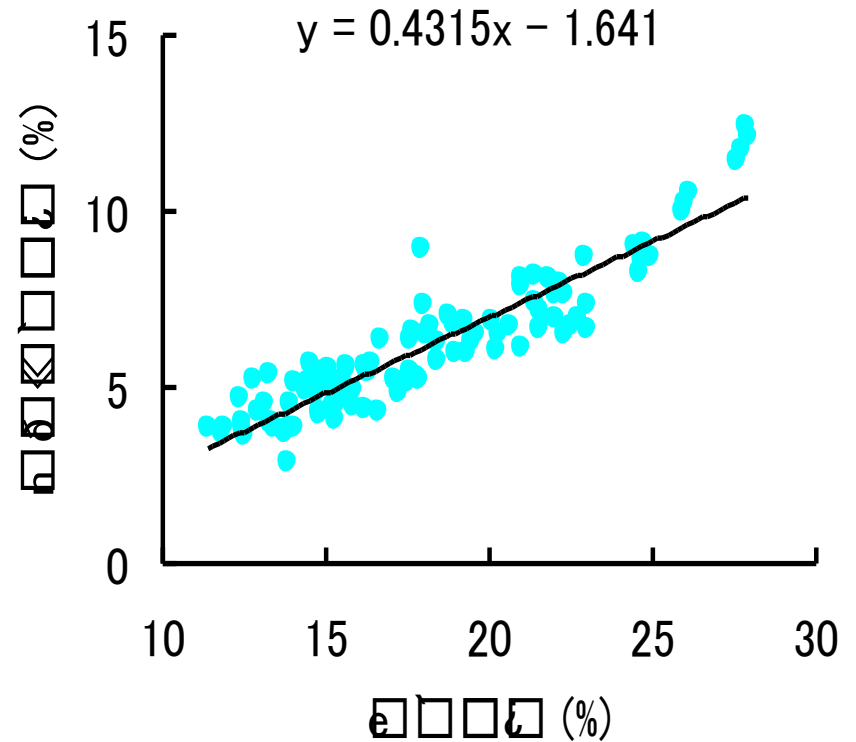
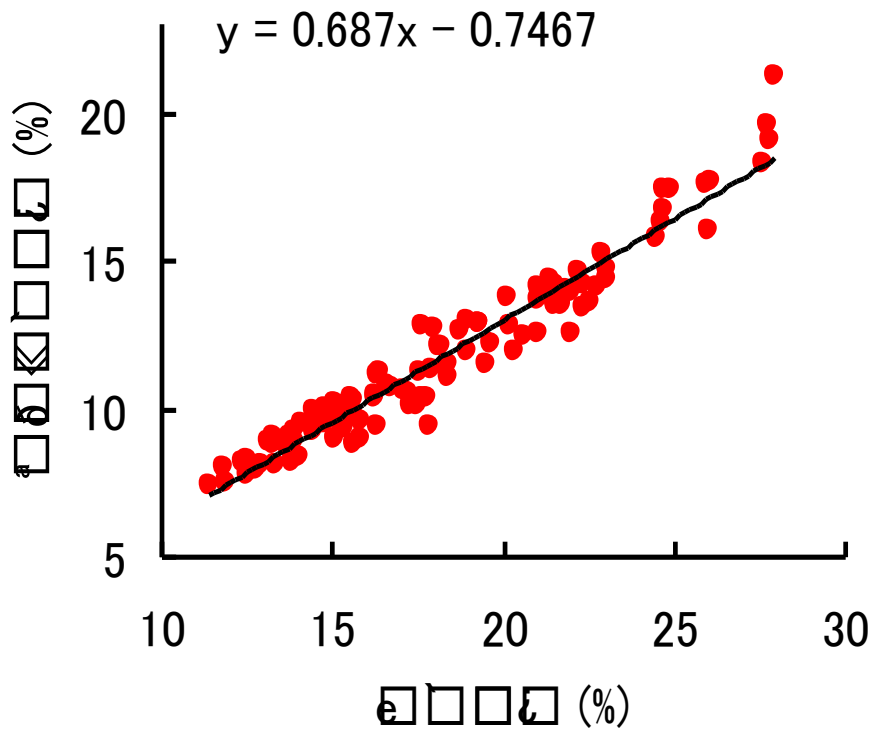
- タンパク質はルーメンで微生物に分解され、アミノ酸やアンモニアとなり、それらを微生物が菌体タンパク質として再合成する
- 菌体タンパク質はアミノ酸組成の優れた良質のタンパク質（牛乳のアミノ酸組成に近似している）
- 乳牛ではタンパク質要求量を満たすために、ルーメンで分解されないタンパク質（ルーメン非分解性タンパク質）を増やすことが重要

図、血漿中尿素窒素(BUN)と糞(◆)・尿(■)中N排泄量の関係



ルーメンで過剰に発生したアンモニアはルーメン壁から吸収され、血漿中尿素態窒素になる

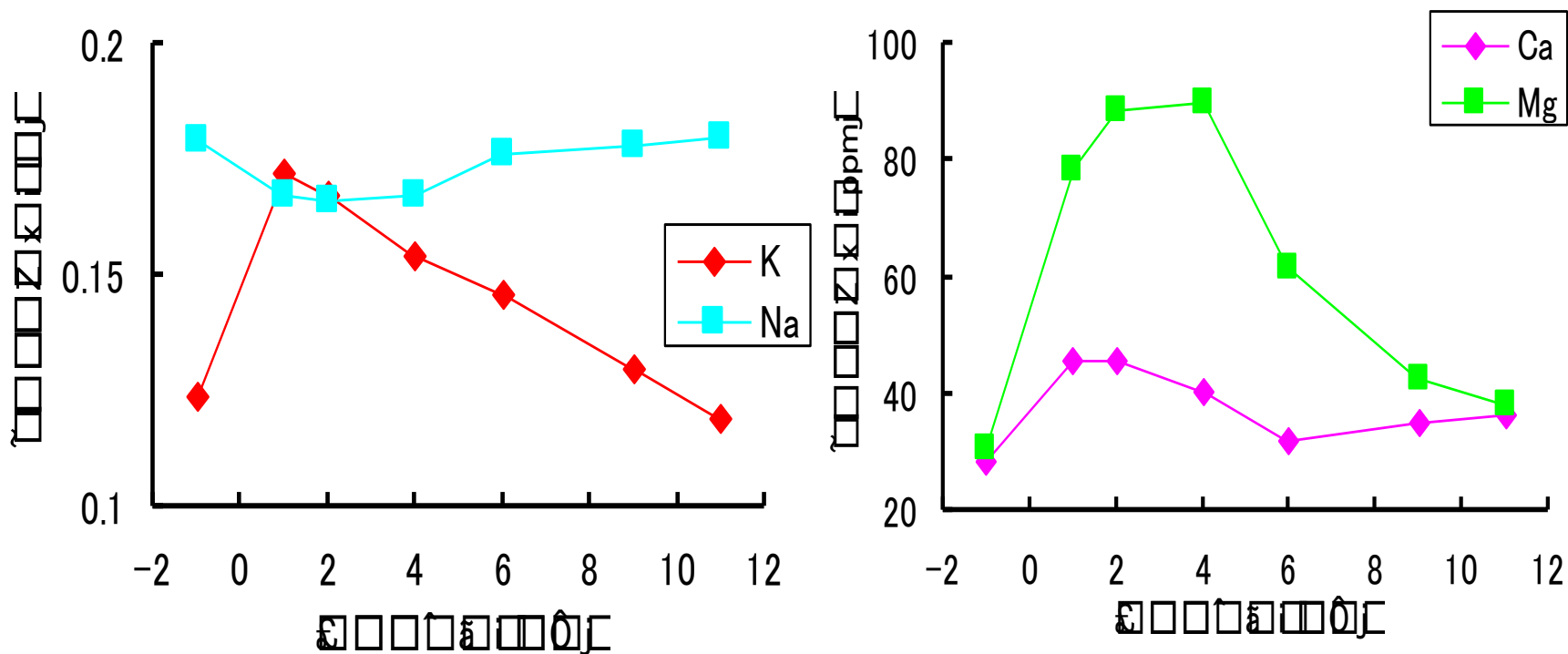
図、アルファの分解性・溶解性 蛋白質の比率



窒素はルーメン内でアンモニアになって微生物に利用されるが
ルーメン内で過剰に分解された窒素は有効利用されない

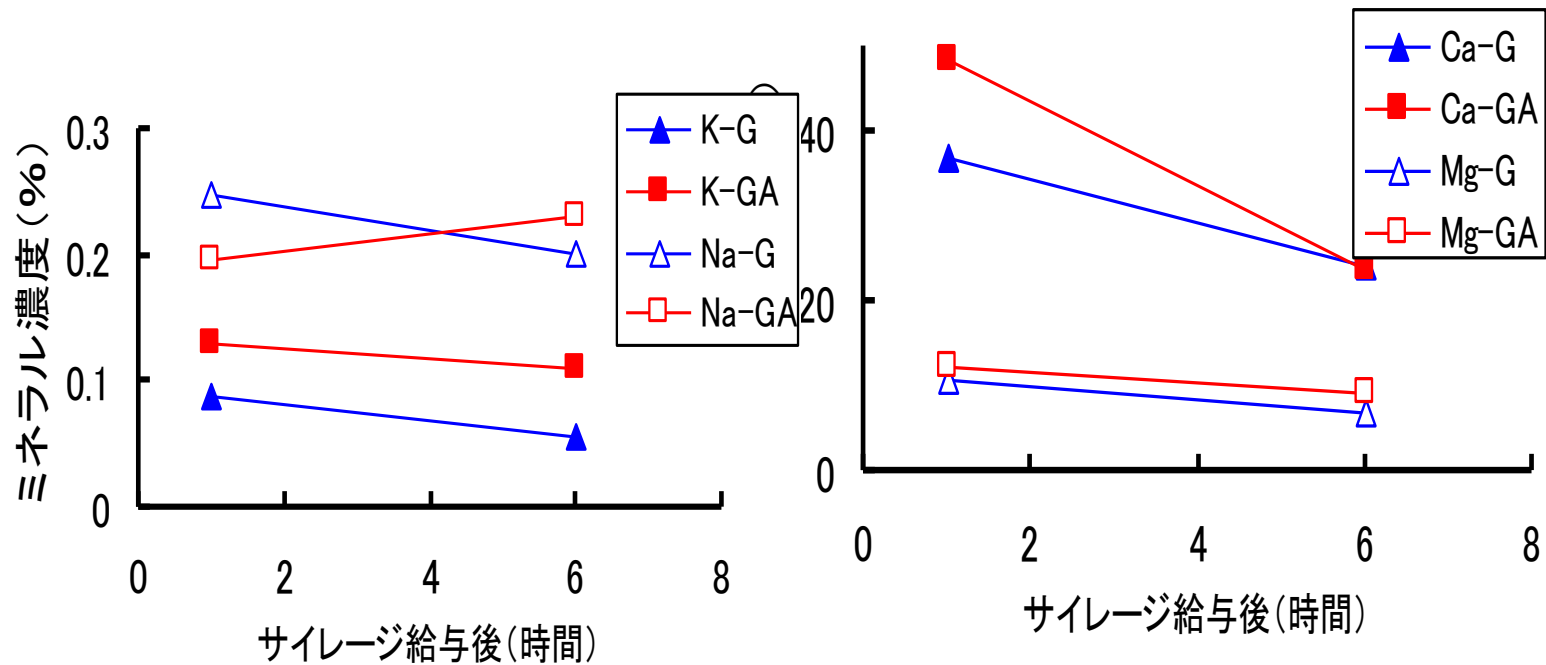
ミネラルとルーメン

- ミネラルは唾液、飼料からルーメンにとけ込み、浸透圧・pHなどの維持に働く
- 細菌・プロトゾアの体成分となる



図、乾草給与後の羊のルーメン液中ミネラル濃度

図、グラス(G)、グラス+アルファルファ(GA)給与後の牛のルーメン液中ミネラル濃度



ルーメン研究の動向

- 消化管内微生物の多様性

 - 分子生物学的手法による細菌叢の系統発生的多様性の解析

- 遺伝子のクローニング、遺伝子発現制御

 - セルロース分解菌は作成されていない

- プロバイオティクスの活用

 - 整腸作用のある微生物など

遺伝子組み換えルーメン微生物

- ルーメン発酵の人為的調節
- 遺伝子工学、分子生物学的手法による新機能のルーメン微生物の開発（繊維の消化を高める新微生物開発）



- ルーメン微生物の遺伝子操作は嫌気性のためスムーズにいかない
- ルーメンに定着しない

エネルギー代謝の測定

- 直接熱量測定法

体から出た熱を水などに吸収させ、その温度上昇度と流量、比熱から熱放散量を求める

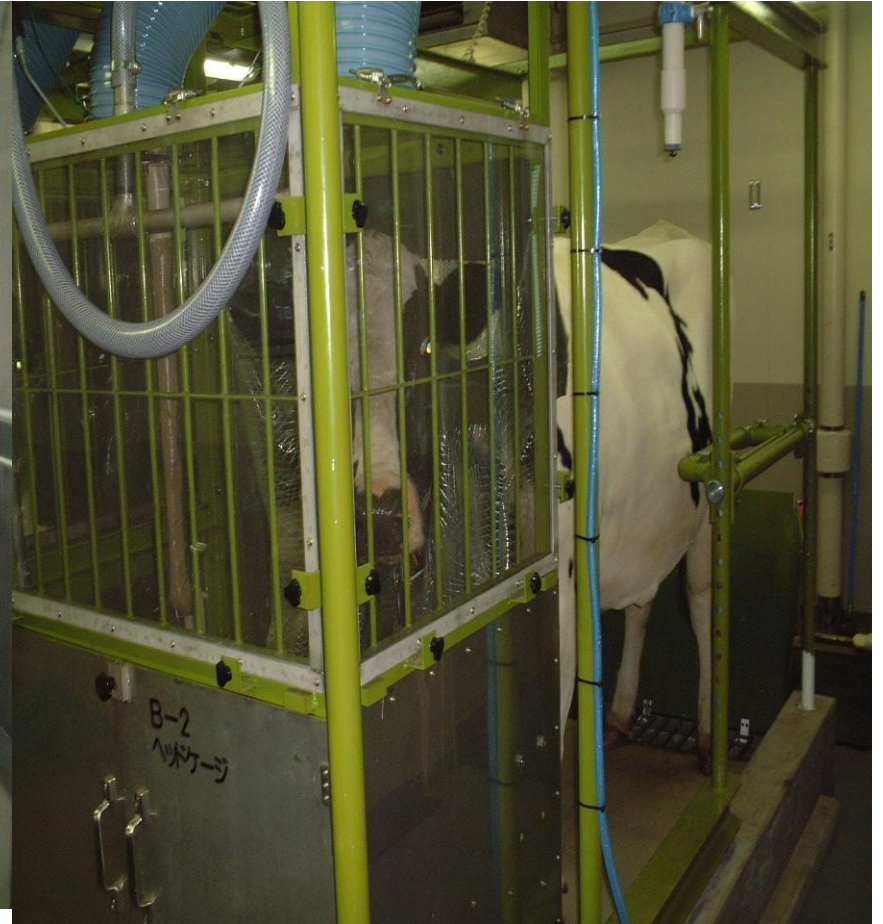
- 間接熱量測定法

酸素、二酸化炭素(メタン)発生量を測定し、熱量を計算する

間接熱量測定法



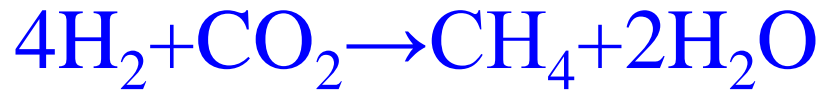
閉鎖式



開放式

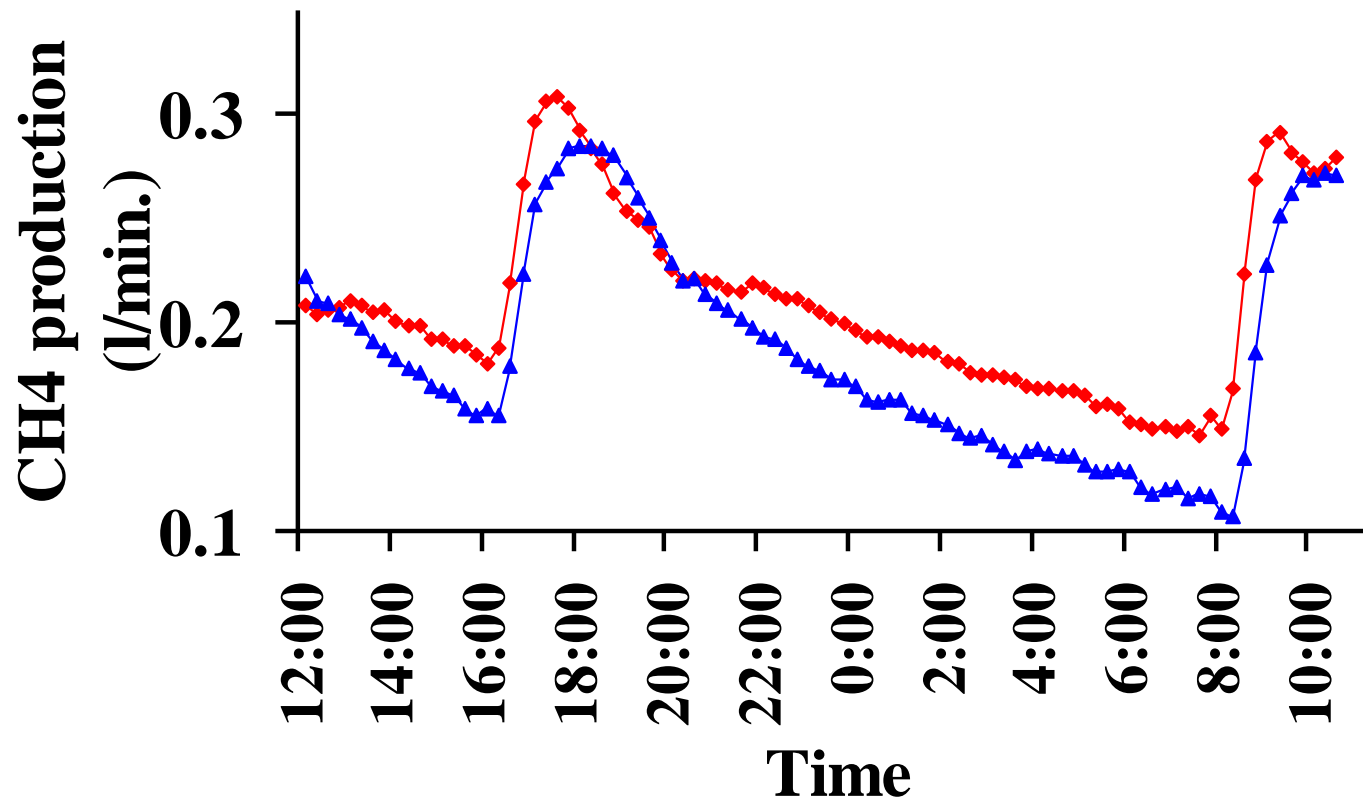
ルーメンにおけるメタン発生

- 酢酸・酪酸生成時における水素発生とその除去（プロピオン酸生成時には水素は除去される：プロトゾアとの共存関係）



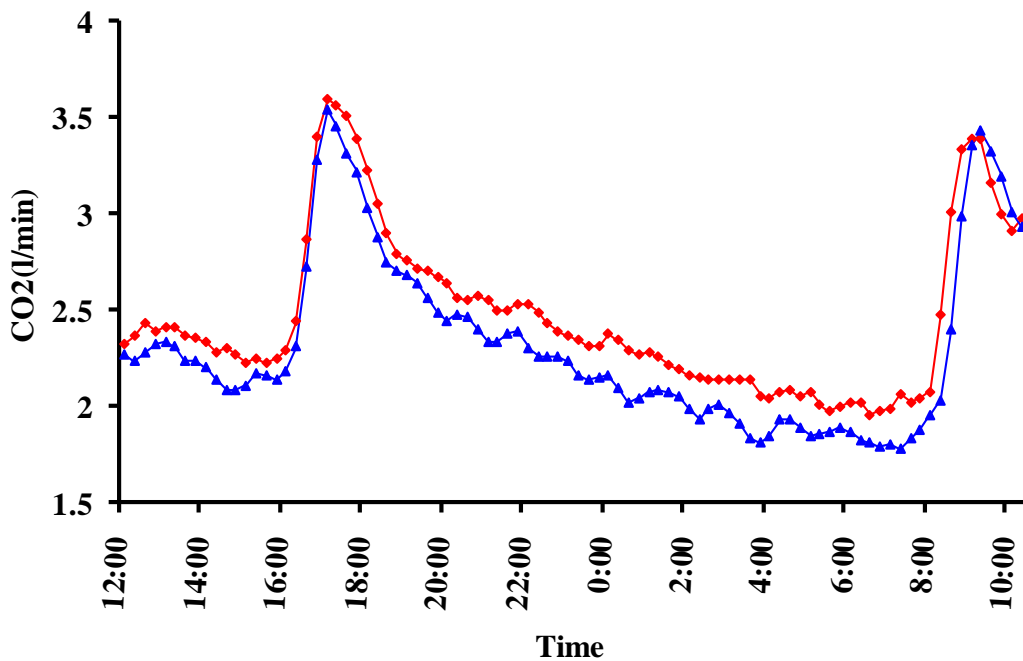
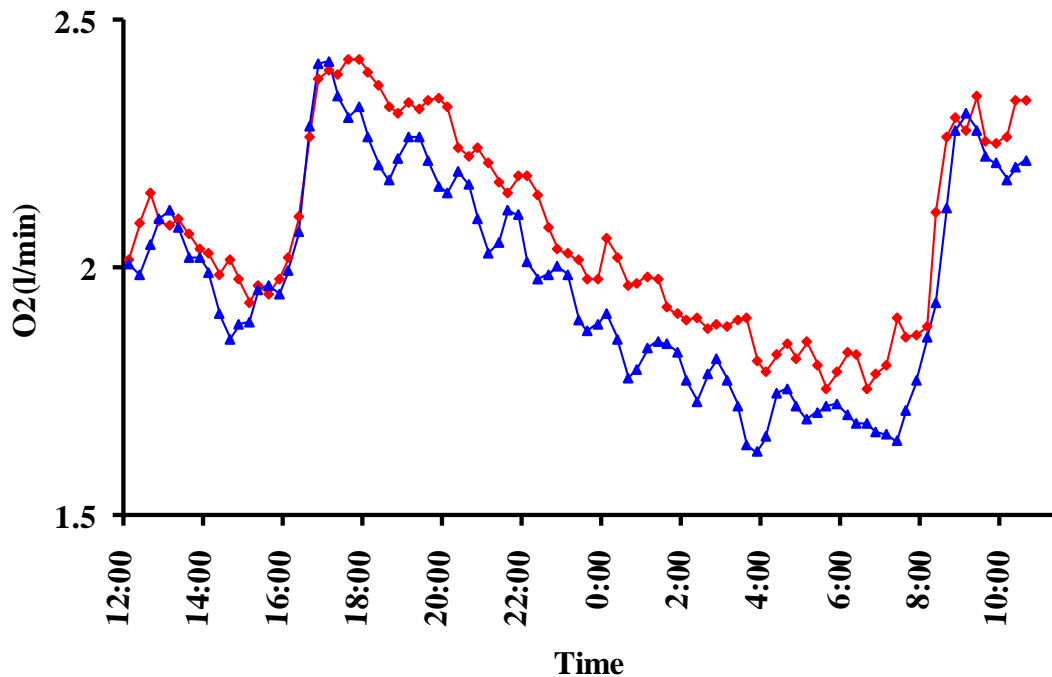
- エネルギーの損失（メタンのエネルギー価：13.15kcal/g）と温室効果ガスの一つのため、低減が必要
- シロアリなども後腸にメタン生成菌を宿し、これらから放出されるメタンの量も非常に多い：地球温暖化の防止

乳牛のメタン発生量(グラス給与区とグラス+アルファルファ給与区)

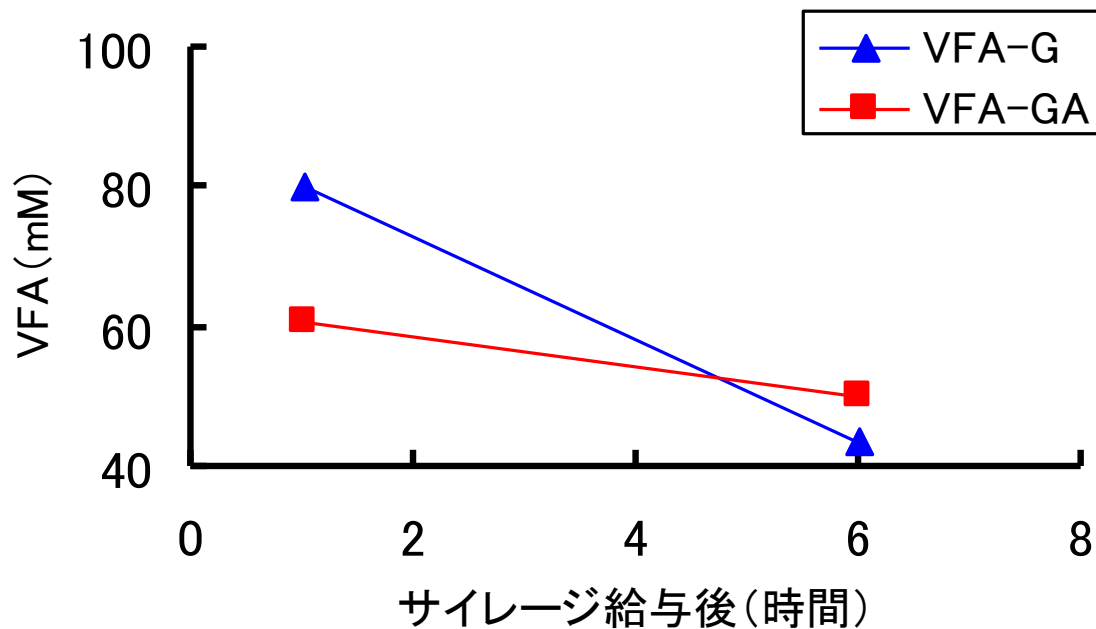
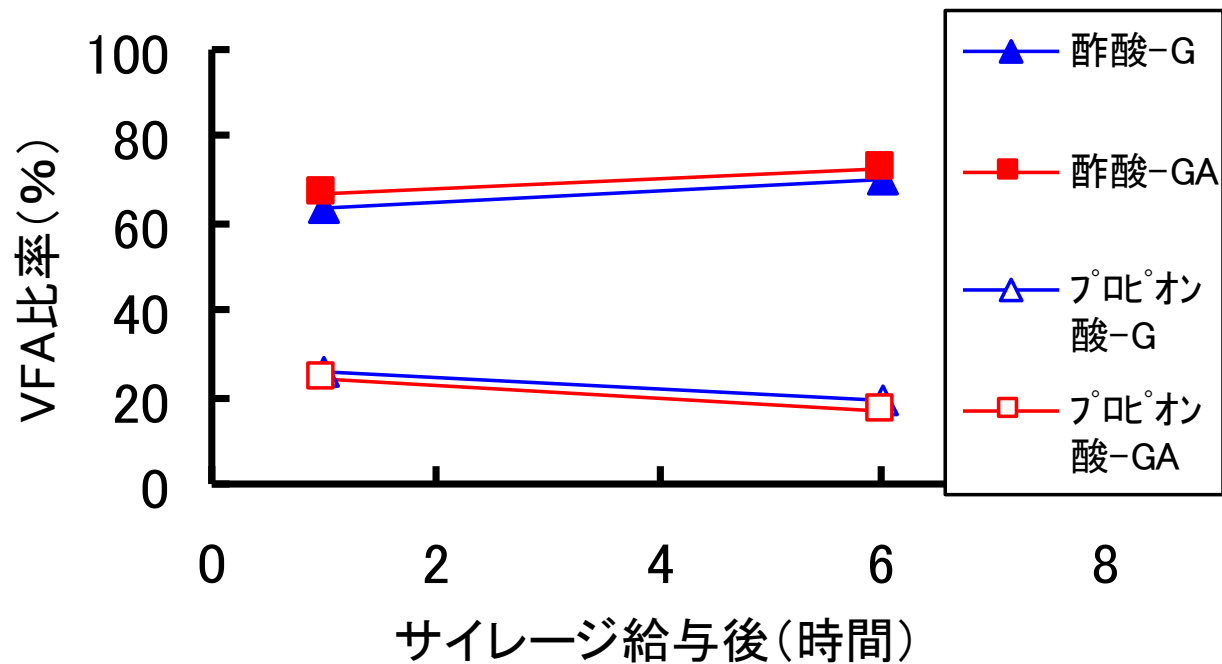


図、グラス給与区(◆)とグラス+アルファルファ(1:1の比率)給与区(■)のメタン発生量.

図、グラス給与区(◆)とグラス+アルファルファ(1:1の比率)給与区(■)の酸素消費量と二酸化炭素発生量.



図、乾乳牛の
VFA産生量
(アルファルファ区と
アルファルファ+グ
ラス区)



飼料成分と消化率(%)

		グラス	グラス+アルファルファ
成分	OM	93.0	91.1
	ADF	39.2	41.3
	NDF	60.8	56.0
消化率	OM	64.0a	59.7b
	ADF	62.0a	50.3b
	NDF	65.0a	52.8b

a, b $P < 0.05$

乾乳牛のエネルギーの利用

	イネ科	アルファルファ	コーン
DMI、kg/日	7.7	8.1	6.9
エネルギー摂取量に対する損失量の比率、%			
糞	34.7	36.0	26.4
尿	4.0	4.9	4.3
メタン	8.6	7.4	9.8
熱発生量	52.5	48.4	58.1
