

学 術

乳牛の亜急性第一胃アシドーシスの病態と評価

佐 藤 繁

岩手大学農学部共同獣医学科 臨床獣医学講座 産業動物内科学分野

1. はじめに

近年、給与飼料の改善や育種改良の進展によって、乳牛の泌乳量は飛躍的に増加してきた。一方で高泌乳を維持するための濃厚飼料の多給や飼養管理の失宜によって、亜急性（潜在性）第一胃アシドーシス（subacute rumen acidosis ; SARA）が問題となっている。SARA牛では第一胃液pHが反復して低下することが特徴である（Enemark et al., 2004 ; Enemark, 2008 ; Plaizier et al., 2009）。また、SARA牛では蹄葉炎、食欲の減退や不定、ボディコンディション・スコア（BCS）の低下、低乳脂肪症候群、第四胃の変位や潰瘍、第一胃炎などの発生が増加する（Enemark, 2008 ; Plaizier et al., 2009）。さらに、最近ではSARAと免疫抑制（Kleen et al., 2003）や炎症（Plaizier et al., 2009 ; Khafipour et al., 2009a, 2009b）との関係が指摘されている。このように、SARAは乳牛による生産を阻害する重要な要因と広く認識されている。従って、第一胃液pHをモニターし、SARAを予防することは生産病の予防ばかりでなく、酪農振興において極めて重要な課題となっている。

牛において第一胃液pHの測定は、第一胃液の採取が極めて困難であるため、広く行われてきたとは言えない。従来、第一胃液を採取するためにカテーテルを用いた経口的採取が行われ、海外では穿刺針を用いた第一胃穿刺が用いられてきた（Bramley et al., 2008 ; Duffield et al., 2004 ; Garrett et al., 1999）。これらの方法では、採取者の技術や第一胃液の採取部位によってpHの測定値が異なる（Duffield et al., 2004）ことから、第一胃液pHの測定は、栄養管理の指標として極めて重要な項目と認識されながら、

一般に広く実施されることはなかった。一方、近年第一胃フィステルを装着した牛において、第一胃液pHを測定するための第一胃留置型pH測定システムが開発された（AlZahal et al., 2007 ; Duffield et al., 2004 ; Marden et al., 2005 ; Penner et al., 2006, 2009）。このシステムを用いて乳牛のSARAに関する基礎的研究が行われている（Cottee et al., 2004 ; Keunen et al., 2002 ; Nocek et al., 2002 ; Rustomo et al., 2006）。しかし、このシステムは実験用の機器であり、野外における臨床応用は不可能である。

このような背景のもと、著者らは野外における第一胃液pHのモニターとSARAの摘発および制御を目的として、新たに無線伝送式pHセンサーを開発した（Sato, et al., 2012a ; 2012b）。本センサーは乳牛に経口的に投与して第一胃内に留置し、pHを連続的に測定、体外の受信器でデータを受信するものである。本稿では、乳牛のSARAの病態について概説するとともに、著者らが開発した無線伝送式pHセンサーについて性能評価試験の一部を紹介し、本システムの実用性について言及する。

2. 亜急性第一胃アシドーシス（SARA）の病態

従来から知られている急性第一胃アシドーシスは、濃厚飼料の盗食など易発酵性炭水化物の急激かつ多量摂取によって、第一胃内で*Lactobacillus*や*Streptococcus bovis*などの乳酸産生菌が増殖し、乳酸が蓄積してpHが5.0以下に低下して食欲廃絶、泌乳量の低下ないし停止、起立困難ないし起立不能などの症状を呈する疾病である（小原嘉昭, 2008）。一方、

SARAは急性第一胃アシドーシスと同様、第一胃液pHは低下するが、明らかな臨床症状を伴わない状態であり、第一胃液pHが1日に3時間以上にわたって5.2-5.6に低下する状態と定義されている (Gozho et al., 2005)。SARAの発生率は泌乳初期の乳牛で19%、泌乳中期の乳牛で26%、放牧牛でも10-15%と報告されている (Mulligan and Doherty, 2008)。また、SARA牛では第一胃内に乳酸が検出されるが、乳酸はpH6.0以下に低下しても増加することなく一定濃度を維持しており (Nagaraja et al., 2007)、過剰に産生された乳酸は第一胃で消費されると考えられる。乳酸の生成量が消費量を著しく超過した場合、第一胃内に乳酸が蓄積し、第一胃液pHが低下してSARAが発生する。第一胃液pHの低下は第一胃炎の原因となり、細菌やエンドトキシンなどが第一胃粘膜内に侵入し易くなり、肝膿瘍などの第一胃アシドーシス関連疾病の原因にもなる。さらに、SARA牛において第一胃液pHは低下と回復を繰り返す日内変動を示すが、低下した第一胃液pHの回復には、第一胃内への HCO_3^- の取り込みと血中への解離型短鎖脂肪酸 (SCFA) の放出、血中へのSCFAの拡散、第一胃粘膜上皮から唾液と同レベルの HCO_3^- の分泌、モノカルボン酸供輸送体を介した乳酸と水素イオンの排泄などのpH緩衝作用が関与している (Aschenbach et al., 2011)。

一方、最近、分子生物学手法の発達により急性第一胃アシドーシスあるいはSARA牛における第一胃内細菌叢が解明されつつある (三森真琴, 2012)。急激に濃厚飼料多給へ変更した場合は、急性第一胃アシドーシスと同様、*S. bovis*や*Lactobacillus*の増加がみられるが、ゆっくりと濃厚飼料に変更した場合には、これらの細菌の増殖は明瞭でない (Nagaraja et al., 2007)。実験的にSARAを誘発したヒツジでは、デンプン分解菌 (*Bacteroides*, *Selenomonas*, *Streptococcus*, *Butyrivibrio*, *Lactobacillus*, *Eubacterium*) と乳酸利用菌が増加する (Mackie and Gilchrist, 1979)。しかし、粗飼料主体から濃厚飼料主体の飼料に切り換えた場合、*Prevotella ruminicola*, *Prevotella bryantii*, *S. bovis*, *Anaerovibrio lipolytica*, *Selenomonas ruminantium*, *Succinivibrio dextrinosolvens*などの細菌が一時的に増加する (Li et al., 2009)。また、穀物主体飼料で誘

導された重篤なSARAでは*S. bovis*が、中程度のSARAでは*Megasphaera elsdenii*が優勢菌種であるが、アルファルファペレットで誘導したSARAでは*Prevotella albensis*が優勢菌種となる (Khafipour et al., 2009)。さらに、粗飼料主体から濃厚飼料主体の飼料へ段階的に変更した場合、*S. ruminantium*、*P. bryantii*、*M. elsdenii*は増加するが、*S. bovis*は変化しないと報告されている (Fernando et al., 2010)。今後、SARAの病態解明や第一胃性状の個体間の差異などに関して、分子生物学的手法を用いた研究の進展が期待される。

3. 第一胃液pHの連続測定によるSARAの評価

(1) 無線伝送式pHセンサーと第一胃液pH測定システム

第一胃液pH測定システムは無線式pHセンサー、測定データ受信器、測定データ中継器および専用アプリケーションをインストールしたパーソナルコンピュータ (PC) によって構成されている (図1)。無線システムには日本国電波法に定められている特定小電力無線 (429MHz帯) を採用し、日本国内においては無線従事者資格がなくとも運用可能である。

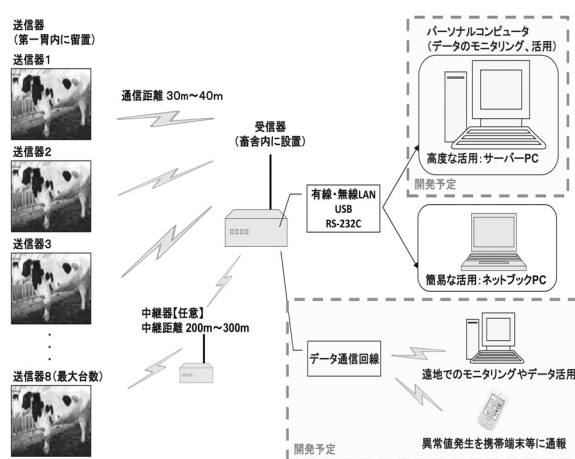


図1 第一胃液pH測定システムの構成

直径30mm、長さ148mmの砲弾型筐体に専用設計のpHセンサー、pHアンプ回路、CPU回路、RF回路および電源が収納されており、重量は約220gである (図2)。無線式pHセンサーは経口的に簡

単に投入することができる。筐体は体内に停留させるので、耐蝕性の高いステンレス（SUS316）と溶出リスクのないポリプロピレン（PP）を主要材質としている。また、pHセンサーには高精度で耐久性が高い、温度補償機能付きのガラス膜式電極を採用しており、第一胃液のpHと温度を正確に同時計測することが可能である。第一胃液のpHを長期間安定して測定するため、ジャンクション材質にテフロンを採用して食渣による目詰まりを防止している。さらに、内蔵する電源にはリチウムイオン電池（3.6V：1700mA）を採用し、無線出力時に必要な大電流の供給と長期間の安定稼働を両立可能な仕様とした。電池は筐体内部に収納され外部と遮断されているので、リチウム等が生体へ影響を与えるリスクはない。なお、内部緩衝液の持続期間は約3ヵ月、内蔵電池の寿命は10分間隔で測定・送信した場合、平均3ヵ月である。また、電波の到達距離は第一胃内部から受信機（または第一胃内部から中継器）間が平均30mである。さらに、無線式pHセンサーは個々のユニットに分解・分割が可能で、それぞれユニット、パーツ単位で交換可能であるため、回収した無線式pHセンサーを再利用することも可能である。

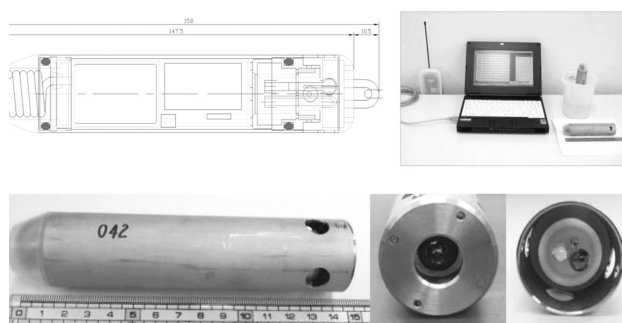


図2 無線式pHセンサーの外観および構成

測定データ受信器は無線式pHセンサーから送信されるデータ（無線電波）の受信、無線通信による無線式pHセンサーの動作条件や校正指示を行うもので、樹脂製ケースに収納されている。内部にはRF回路とCPU回路が収納されている。また、無線式pHセンサーからの送信電波は、生体を通過する際に大きく減衰することから、無線データを直接受信器で受信する場合、無線式pH

センサーと受信器の距離が制限されることがある。この場合、測定データ中継器を無線式pHセンサーの近傍に設置すると、受信器との中継（最大500m程度）が可能となる。

(2) 実験的SARA牛および周産期の健康乳牛における第一胃液pHの変化

本システムを用いてSARAのモニターが可能であるか否かを検討する目的で、第一胃フィステルを装着した育成中のホルスタイン種去勢牛4頭（190-220kg）および周産期の健康乳牛2頭を用いて第一胃液pHを連続測定した。去勢牛にはオーチャードグラス牧草と、大麦圧片およびコーン圧片を等量混合した濃厚飼料で構成した3種類の飼料（A、B、C）を各1週間給与した。A、BおよびC飼料における粗飼料と濃厚飼料の比率は、それぞれ1：9、3：7および7：3、DM中のデンプン濃度は、それぞれ7%、37%および22%とした。pHセンサーはフィステルを介して第一胃腹底部に留置し、pHは4週間にわたって10分間隔で連続測定した。一方、健康乾乳牛としてはフリーストール飼養・TMR飼料給与牛と繋ぎ飼養・分離飼料給与牛を供試し、分娩前に経口的にpHセンサーを投与して分娩後まで10分間隔で連続測定した。

その結果、実験的に作出したSARA牛では、給与飼料の変更に伴って第一胃液pHが明らかに変動し、同一の飼料を給与した場合でも牛個体によってpHの変動パターンが異なることが明らかとなった（図3）。第一胃液pHは朝の給餌後に低

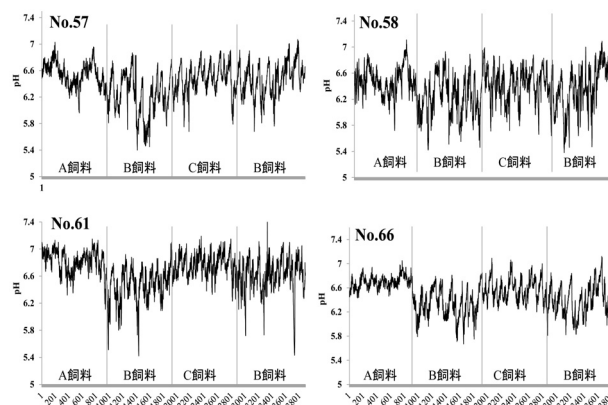


図3 牛個体別の第一胃液pHの連続測定データ
A、BおよびC飼料の構成は本文参照

下、夕方の給餌後にさらに低下して20:00-21:00頃に最低値を示した後、翌朝までに回復する日内変動が認められた。周産期乳牛のうちTMR飼料給与牛では、分離飼料給与牛に比べて分娩前後のいずれの時期においても第一胃液pHの著しい低下がみられず、1日の最大値と最小値の差（日較差）も小さい傾向がみられた（図4）。しかし、分離飼料給与牛では分娩前後のいずれの時期においても日較差が大きく、分娩後3-4日には濃厚飼料の増給に伴って第一胃液pHが著しい低値を示し、その後もpHの変化が不安定な傾向がみられた。

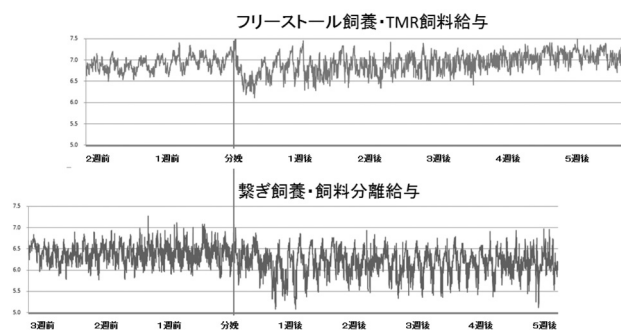


図4 周産期の健康乳牛における第一胃液pHの変動

一方、無線式pHセンサーによる測定値と、センサー近傍から採取した第一胃液について体外に取り出した直後に市販のpH計で測定した値と比較した結果、採取第一胃液のpHは 6.36 ± 0.23 、pHセンサーによる値は 6.22 ± 0.27 で、2つの方法による平均値の差は0.14で、採取第一胃液pHとpHセンサーによる測定値との間に有意 ($P < 0.01$) な正の相関 ($r = 0.986$) が認められた（図5）。

SARA牛における第一胃液pHの日内変動は、すでに有線式の第一胃留置型pHセンサーを用いて検討されている（AlZahal et al., 2007 ; Duffield et al., 2004 ; Marden et al., 2005 ; Penner et al., 2006, 2009）。また、今回の実験で観察された朝の給餌後における第一胃液pHの変動や日内変動は、以前の報告（Krause and Oetzel, 2005 ; Keunen et al., 2002）と同様の变化を示した。これらのことから、無線式pHセンサーを用いてSARAのモニターと摘発が可能であることが明らかとなった。

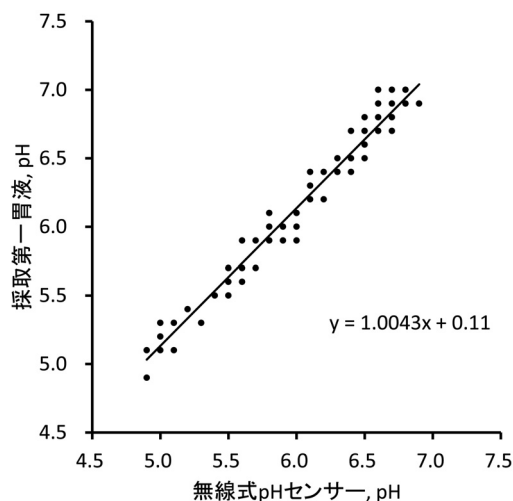


図5 無線伝送式pHセンサーと採取第一胃液のpH値の関係

なお、乳牛の分娩前後において第一胃液pHを長期間連続測定した報告は少ない（Penner et al., 2007）。一方、pHセンサーの測定値と採取第一胃液の測定値を比較した結果、採取第一胃液のpHがセンサー測定値に比べてわずかな高値を示したことは、第一胃液を体外に取り出すことによる二酸化炭素と揮発性化合物の損失（Smith, 1941）に起因したものと考えられることから、pHセンサーは十分な精度を有していることが明らかとなった。

(3) 実験的SARA牛における第一胃および第二胃液pHの比較

第一胃の部位別および第一胃と第二胃のpHを比較する目的で、第一胃フィステルを装着した非泌乳中のホルスタイン種経産雌牛8頭（620-780kg）を用いて実験を行った。供試牛には2種類の飼料（対照飼料と第一胃アシドーシス誘発（RAI）飼料）を各2週間給与し、実験と実験の間は乾草のみを2週間給与した。給与飼料はオーチャードグラス乾草と大麦圧片およびコーン圧片を等量混合した濃厚飼料で構成し、対照およびRAI飼料の粗飼料と濃厚飼料の比率は、それぞれ7:3および3:7とした。無線式pHセンサーをフィステルを介して第一胃腹底部と第二胃内に留置し、さらに有線式pHセンサーを第一胃固相部に留置した。pHは各飼料給与開始後2週目に同時に10分間隔で測定し、1時間ごとの平均値を算出して日内変動を比較した。

対照飼料給与牛では各部位のpHが朝の給餌後に低下し、翌朝までに回復する傾向がみられ、pHは第二胃>底部>固相部の順に高値を示した。一方、RAI飼料給与牛では、各部位ともに午後にpHが低下し、第一胃底部は固相部に比べて低値傾向を示す時間帯が認められた(図6)。両飼料給与牛ともに第二胃液pHは第一胃液pHに比べ高値傾向を示した(図7)。部位別にpHの関係を検討した結果、対照飼料給与牛では第一胃固相部と第一胃底部(相関係数; 0.409)および第一胃底部と第二胃(0.826)において有意

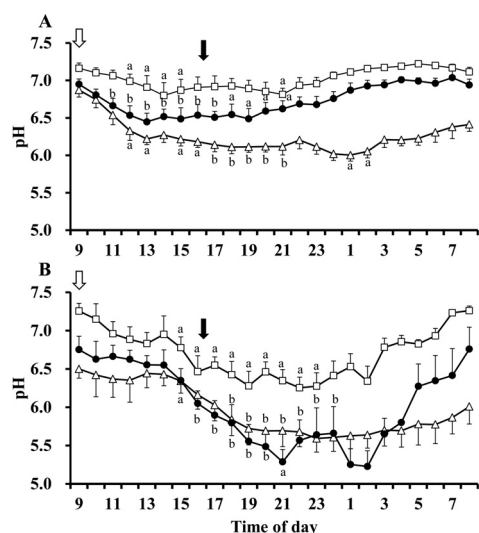


図6 第一胃の腹底部(●)と固相部(△)および第二胃(□)におけるpHの日内変動(1時間平均値の推移)
A: 対照飼料給与牛、B: 第一胃アシドーシス誘発(RAI)飼料給与牛
↓: 朝夕の給餌、M±SE (n=4)、a: $P<0.05$, b: $P<0.01$ (群ごとの9:00値との有意差)

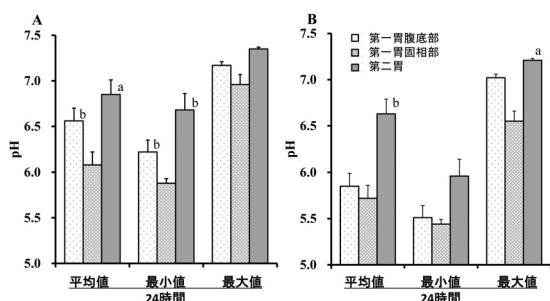


図7 第一胃の腹底部と固相部および第二胃におけるpHの比較
A: 対照飼料給与牛、B: 第一胃アシドーシス誘発(RAI)飼料給与牛
M±SE (n=4)、a: $P<0.05$, b: $P<0.01$ (対応する第一胃固相部との有意差)

($P<0.01$)な相関が、また、RAI飼料給与牛においても第一胃固相部と第一胃底部(0.894)、第一胃固相部と第二胃(0.764)および第一胃底部と第二胃(0.797)において有意($P<0.01$)な相関が認められた。

第一胃液pHと第二胃液pHの日内変動を比較すると、対照飼料給与牛およびRAI飼料給与牛のいずれにおいても、第一胃液と第二胃液pHは朝の給餌後に低下する傾向がみられたが、第二胃液pHの低下は第一胃に比べて軽度であった(図8)。しかし、第一胃液pHと第二胃液pHとの間に有意($P<0.01$)な正の相関がみられた(図9)。また、第一胃液pHが5.6未満を示した時間が1日3時間以上であったSARA牛において、第二胃液pHの平

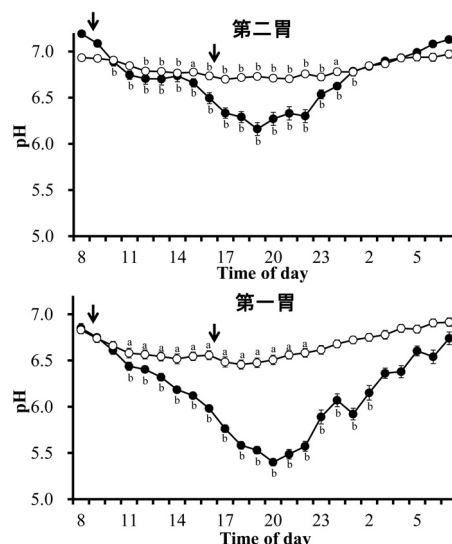


図8 第一胃アシドーシス誘発(RAI)飼料(●)および対照飼料給与牛(○)における第二胃と第一胃液pHの日内変動(1時間平均値の推移)
↓: 朝夕の給餌、M±SE (n=8)、a: $P<0.05$, b: $P<0.01$ (群ごとの8:00との有意差)

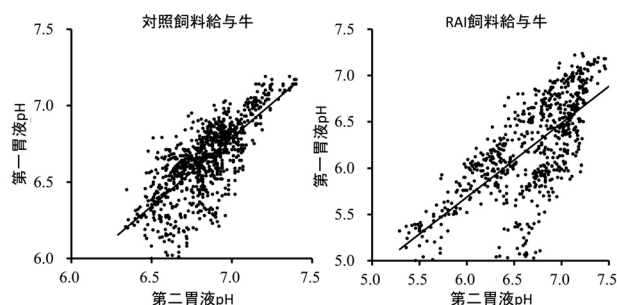


図9 第一胃アシドーシス誘発(RAI)飼料および対照飼料給与牛における第二胃と第一胃液pHの関係

均値は6.3であり、その持続時間は約3時間であった（表1）。

表1 対照飼料給与牛（健康牛）および第一胃アシドーシス誘発（RAI）飼料給与牛（SARA牛）における第二胃および第一胃液pHの比較

項目	第二胃		第一胃	
	健康牛	SARA牛	健康牛	SARA牛
1日の平均 pH	6.81 ± 0.07 ^b	6.70 ± 0.16 ^{bc}	6.64 ± 0.08	6.16 ± 0.19 ^c
1日の最低 pH	6.51 ± 0.06 ^b	6.01 ± 0.16 ^{ac}	6.23 ± 0.07	5.48 ± 0.12 ^c
1日の時間(分)pH < 5.6	0	44 ± 29 ^a	0	241 ± 62 ^c
1日の時間(分)pH < 6.3	1 ± 3 ^b	191 ± 131 ^{bc}	121 ± 80	580 ± 118 ^c

^a: $P < 0.05$, ^b: $P < 0.01$ (牛ごとの第一胃との有意差), ^c: $P < 0.01$ (各部位の健康牛との有意差), $n = 8$

一方、第一胃腹底部のpHと温度の関係を検討した結果（図10）、対照飼料給与牛では第一胃液pHの変動が小さく、温度は採食後に一時的に低下する傾向がみられた。RAI飼料給与牛では対照飼料給与牛に比べて朝の給餌後のpH低下が著しく、夕方の給餌後に最低値を示して翌朝までに回復する傾向がみられた。これに対して第一胃液温度は、朝の給餌後に急激に上昇し、20:00-22:00に最高値を示した後、翌朝までに回復する傾向がみられた。

第一胃内では部位別および飼料内容によってpHが異なる（Plaizier et al., 2009; Tafai et al., 2004）。

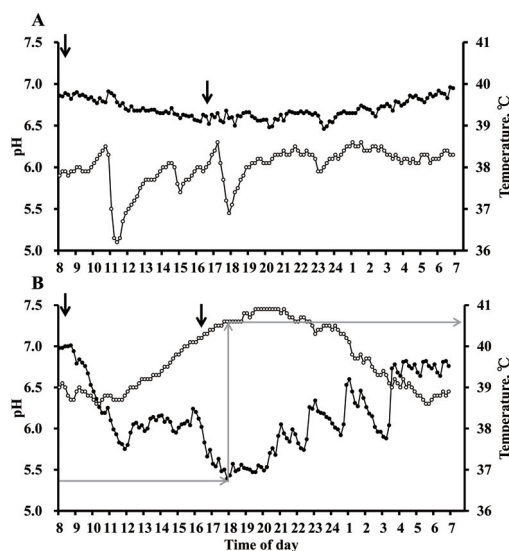


図10 第一胃液のpH（●）と温度（○）の日内変動（典型例）
A：対照飼料給与牛、B：第一胃アシドーシス誘発（RAI）飼料給与牛
↓：朝夕の給餌

Tafajら（2004）は第一胃固相部の表面から5-10cm部分の表層部、25-35cm下部の中央部および第一胃底より5-10cm上部の3か所から内容物を採取して性状を比較し、第一胃固相部の表層部、中央部および第一胃底部の順にVFA濃度が高値を示すこと、第一胃液pHとVFA濃度との間に負の相関関係があることを認めている。今回の実験における第一胃固相部および底部は、Tafajらの実験における第一胃の固相部中央部および底部に相当する。今回、第一胃固相部のpHが他の部位に比べて低値を示したことは、第一胃固相部では活発な発酵によってVFA濃度が高値を示すためと考えられた（Duffield et al., 2004; Tafai et al., 2004）。一方、第二胃液pHの変動については報告が少ないが、第一胃に比べてわずかな高値を示すことが認められている（Bryant, 1964; Duffield et al., 2004; Krause et al., 2005; Lane et al., 1968）。第二胃と第一胃腹底部は同様の内容物が存在し（Hummel et al., 2009）、pH変動も類似している。今回の実験においても既報と同様、第二胃液pHと第一胃液pHとの間に有意な正の相関が認められた（Kimura et al., 2012a）。第二胃液pHが第一胃液pHに比べて高値を示す要因は、唾液の混入と飲水による第二胃液の希釈が関与している（Dado and Allen, 1993; Duffield et al., 2004）。通常、SARAの診断は第一胃液pHの変動に基づいて行われるが、今回の実験結果から、第一胃液pHばかりでなく第二胃液pHによってもSARAの診断が可能であることが明らかとなった（Sato et al., 2012c）。なお、今回認められた第一胃液温度の変化（Kimura et al., 2012b）は、既報（AlZahal et al., 2008; AlZahal et al., 2009; AlZahal et al., 2011; Bewley et al., 2008a; 2008b）と類似していた。

4. おわりに

SARAは乳牛による生産を阻害する重要な要因であることから、SARAの診断と制御は喫緊の課題となっている。本稿ではSARAの病態を概説し、さらに著者らが開発した無線伝送式pHセンサーの実証試験結果の一部を示した。一連の実証試験によって、

無線式pHセンサーは十分な測定精度を有し、給与飼料の変化を的確にモニターできること、周産期の乳牛において長期間の連続測定が可能であること、また、SARAの診断に第二胃液pHを用いた場合、その基準値は1日あたり3時間以上にわたって6.3以下の値を呈するものと定義できることが明らかになった。

無線伝送式pHセンサーは、野外の乳牛におけるSARAの診断と制御において有効なツールであり、高泌乳牛を対象とした栄養管理や牛群管理に広く応用可能である。また、本pHセンサーは家畜福祉の増進に寄与し、飼養管理の改善と濃厚飼料の効率的利用によって生産阻害要因を軽減して、我が国の酪農振興に貢献することが期待される。

参考文献

- Alzahal, O., Rustomo, B., Odongo, N. E., Duffield, T. F. and McBride, B. W. 2007. Technical note: A system for continuous recording of ruminal pH in cattle. *J. Anim. Sci.* **85** : 213-217.
- AlZahal, O., Kebreab, E., France, J., Froetschel, M. and McBride, B. W. 2008. Ruminal temperature may aid in the detection of subacute ruminal acidosis. *J. Dairy Sci.* **91** : 202-207.
- AlZahal O., Steele, M. A., Valdes, E. V., and McBride, B. W. 2009. Technical note: The use of a telemetric system to continuously monitor ruminal temperature and to predict ruminal pH in cattle. *J. Dairy Sci.* **92** : 5697-5701.
- AlZahal, O., AlZahal, H., Steele, M. A., Van Schaik, M., Kyriazakis, I., Duffield, T. F. and McBride, B. W. 2011. The use of a radiotelemetric ruminal bolus to detect body temperature changes in lactating dairy cattle. *J. Dairy Sci.* **94** : 3568-3574.
- Aschenbach, J. R., Penner, G. B., Stumpff, F. and Gabel, G. 2011. Ruminant nutrition symposium: Role of fermentation acid and absorption in the regulation of ruminal pH. *J. Anim. Sci.* **89** : 1092-1107.
- Bewley, J. M., Einstein, M. E., Grott, M. W. and Schutz, M. M. 2008a. Comparison of reticular and rectal core body temperatures in lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* **91** : 4661-4672.
- Bewley, J. M., Grott, M. W., Einstein, M. E. and Schutz, M. M. 2008b. Impact of intake water temperatures on reticular temperatures of lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* **91** : 3880-3887.
- Bramley, E., Lean, I. J., Fulkerson, W. J., Stevenson, M. A., Rabiee, A. R. and Costa, N. D. 2008. The definition of acidosis in dairy herds predominantly fed on pasture and concentrates. *J. Dairy Sci.* **91** : 308-321.
- Bryant, A. M. 1964. Variations in the pH and volatile fatty acid concentration within the bovine reticulo-rumen. *N Z J. Agric. Res.* **7** : 694-706.
- Dado, R.G. and Allen, M.S. 1993. Continuous computer acquisition of feed and water intakes, chewing, reticular motility, and ruminal pH of cattle. *J. Dairy Sci.* **76** : 1589-1600.
- Cottee, G., Kyriazakis, I., Widowski, T. M., Lindinger, M. I., Cant, J. P., Duffield, T. F., Osborne, V.R. and McBride, B.W. 2004. The effects of subacute ruminal acidosis on sodium bicarbonate-supplemented water intake for lactating cows. *J. Dairy Sci.* **87** : 2243-2253.
- Duffield, T., Plaizier, J. C., Fairfield, A., Bagg, R., Vessie, G., Dick, P., Wilson, J., Aramini, J. and McBride, B. 2004. Comparison of techniques for measurement of rumen pH in lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* **87** : 59-66.
- Enemark, J. M. D., Jørgensen, R. J. And Kristensen, N. B. 2004. An evaluation of parameters for the detection of subclinical rumen acidosis in dairy herds. *Vet. Res. Commun.* **28** : 687-709.
- Enemark, J. M. D. 2008. The monitoring, prevention and treatment of sub-acute ruminal acidosis (SARA) : A review. *Vet. J.* **176** : 32-43.
- Fernando, S. C., Purvis, H. T. II, Najar, F. Z., Sukharnikov, L. O., Krehbiel, C. R., Nagaraja, T. G., Roe, B. A. and Desilva, U. 2010. Rumen microbial population dynamics during adaptation to a high-grain diet. *Appl. Environ. Microbiol.* **76** : 7482-7490.
- Garrett, E. F., Pereira, M. N., Nordlund, K. V., Armentano, L. E., Goodger, W. J. and Oetzel, G. R. 1999. Diagnostic methods for the detection of subacute ruminal acidosis in dairy cows. *J. Dairy Sci.* **82** : 1170-1178.
- Gozho, G. N., Plaizier, J. C., Krause, D. O., Kennedy, A. D. and Wittenberg, K. M. 2005. Subacute ruminal acidosis induces ruminal lipopolysaccharide endotoxin release and triggers an inflammatory response. *J. Dairy Sci.* **88** : 1399-1403.
- Hummel, J., Sudekum, K-H., Bayer, D., Ortmann, S., Streich, W. J., Hatt, J-M. and Clauss, M. 2009. Physical characteristics of reticulorumen contents of oxen in relation to forage type and time after feeding. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* **93** : 209-220.
- Keunen, J. E., Plaizier, J. C., Kyriazakis, L., Duffield, T. F., Widowski T. M., Lindinger, M. I. and McBride, B. W. 2002. Effects of a subacute ruminal acidosis model on the diet selection of dairy cows. *J. Dairy Sci.* **85** : 3304-3313.
- Khafipour, E., Krause, D. O. and Plaizier, J. C. 2009a. Alfalfa pellet-induced subacute ruminal acidosis in dairy cows increases bacterial endotoxin in the rumen without causing inflammation. *J. Dairy Sci.* **92** : 1712-1724.
- Khafipour, E., Krause, D. O. and Plaizier, J. C. 2009b. A grain-based subacute ruminal acidosis challenge causes translocation of lipopolysaccharide and triggers inflammation. *J. Dairy Sci.* **92** : 1060-1070.
- Khafipour, E., Li, S., Plaizier, J. C. and Krause, D. O. 2009. Rumen microbiome composition determined using two nutritional models of subacute ruminal acidosis. *Appl. Environ. Microbiol.* **75** : 7115-7124.
- Kimura, A., Sato, S., Goto, H., Yamagishi, N., Okada, K., Mizuguchi, H. and Ito, K. 2012a. Simultaneous estimation of the pH of rumen and reticulum fluids of cows using a radio-transmission pH-measurement system. *J. Vet. Med. Sci.* **74** : 531-535.
- Kimura, A., Sato, S., Goto, H., Kato, T., Ikuta, K., Yamagishi, N., Okada, K., Mizuguchi, H. and Ito, K. 2012b. Relationship between pH and temperature in the ruminal fluid of cows, based on a radio-transmission pH-measurement system. *J. Vet. Med. Sci.* **74** : 1023-1028.
- Kleen, J. L., Hooijer, G. A., Rehage, J. and Noordhuizen, J. P. T. M. 2003. Subacute ruminal acidosis (SARA) : A Review. *J. Vet. Med.* **A50** : 406-414.
- Krause, K. M. And Oetzel, G. R., 2005. Inducing subacute ruminal acidosis in lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* **88** : 3633-3639.
- Krause, K. M., Oetzel, G. R., Kohn, D., Kuhn, D. and Frost, D. 2005. Continuous measurements of reticular and ruminal pH in dairy cows using wireless pH system. *J. Dairy Sci.* **88** (Suppl. 1) : 132.
- Lane, G. T., Noller, C. H., Colenbrander, V. F., Cummings, K. R. and Harrington, R. B. 1968. Apparatus for obtaining ruminoreticular samples and the effect of sampling location on pH and volatile fatty acids. *J. Dairy Sci.* **51** : 114-116.
- Li, M., Penner, G. B., Hernandez-Sanabria, E., Oba, M. and Guan, L. L. 2009. Effects of sampling location and time, and host animal on assessment of bacterial diversity and fermentation parameters in the bovine rumen. *J. Appl. Microbiol.* **107** : 1924-1934.
- Mackie, R. I. and Gilchrist, F. M. 1979. Changes in lactate-producing and lactate-utilizing bacteria in relation to pH in the rumen of shph during stepwise adaptation to a high-concentrate diet. *Appl. Environ.*

- Microbil.*, **38** : 422-430.
- Marden, J. P., Bayourthe, C., Enjalbert, F. and Moncoulon, R. 2005. A new device for measuring kinetics of ruminal pH and redox potential in dairy cattle. *J. Dairy Sci.* **88**, 277-281.
- Mertens, D. R. 1997. Creating a system for meeting the fiber requirements of dairy cows. *J. Dairy Sci.* **80** : 1463-1481.
- 三森真琴. 2012. 亜急性ルーメンアシドーシスにおけるルーメン微生物の動態. 日獣会誌. **65** : 503-510.
- Mulligan, F. J. and Doherty, M. L. 2008. Production diseases of the transition cow. *Vet. J.* **176** : 3-9.
- Nagaraja, T. G. and Titgemeyer, E. C. 2007. Ruminal acidosis in beef cattle: the current microbiological and nutritional outlook. *J. Dairy Sci.*, **90** (Suppl 1) : E17-38.
- Nocek, J. E., Allman, J. G. and Kautz, W. P. 2002. Evaluation of an indwelling ruminal probe methodology and effect of grain level on diurnal pH variation in dairy cattle. *J. Dairy Sci.* **85** : 422-428.
- 小原嘉昭. 2008. 急性ならびに潜在性第一胃アシドーシスの諸課題. 家畜診療. **55** : 309-314.
- Penner, G. B., Beauchemin, K. A. and Mutsvangwa, T. 2006. An evaluation of the accuracy and precision of a stand-alone submersible continuous ruminal pH measurement system. *J. Dairy Sci.* **89** : 2132-2140.
- Penner, G. B., Beauchemin, K. A. and Mutsvangwa, T. 2007. Severity of ruminal acidosis in primiparous Holstein cows during the periparturient period. *J. Dairy Sci.* **90** : 365-375.
- Penner, G. B., Aschenbach, J. R., Gäbel, G. and Oba, M. 2009. Technical note: Evaluation of a continuous ruminal pH measurement system for use in noncannulated small ruminants. *J. Anim. Sci.* **87** : 2363-2366.
- Plaizier, J. C., Krause, D. O., Gozho, G. N. and McBride, B. W. 2009. Subacute ruminal acidosis in dairy cows: the physiological causes, incidence and consequences. *Vet. J.* **176** : 21-31.
- Rustome, B., AlZahal, O., Cant, J. P., Fan, M. Z., Duffield, T. F., Odongo, N. E. and McBride, B. W. 2006. Acidogenic value of feeds. II. Effects of rumen acid load from feeds on dry matter intake, ruminal pH, fiber degradability and milk production in the lactating dairy cow. *Can. J. Anim. Sci.* **86** : 119-126.
- Sato, S., Mizuguchi, H., Ito, K., Ikuta, K., Kimura, A. and Okada, K. 2012a. Development and testing of a radio transmission pH measurement system for continuous monitoring of ruminal pH in cows. *Prev. Vet. Med.* **103** : 274-279.
- Sato, S., Kimura, A., Anan, T., Yamagishi, N., Okada, K., Mizuguchi, H. and Ito, K. 2012b. A radio transmission pH measurement system for continuous evaluation of fluid pH in the rumen of cows. *Vet. Res. Commun.* **36** : 85-89.
- Sato, S., Ikeda, A., Tsuchiya, Y., Ikuta, K., Murayama, I., Kanehira, M., Okada, K. and Mizuguchi, H. 2012c. Diagnosis of subacute ruminal acidosis (SARA) by continuous reticular pH measurements in cows. *Vet. Res. Commun.* **36** : 201-205.
- Smith, V.R. 1941. In vivo studies of hydrogen ion concentrations in the rumen of the dairy cow. *J. Dairy Sci.* **24** : 659-665.
- Tafai, M., Junck, B., Maulbetsch, A., Steingass, H., Piepho, H-P. and Drochner, W. 2004. Digesta characteristics of dorsal, middle and ventral rumen of cows fed with different hay qualities and concentrate levels. *Arch. Anim. Nutr.* **58** : 325-342.