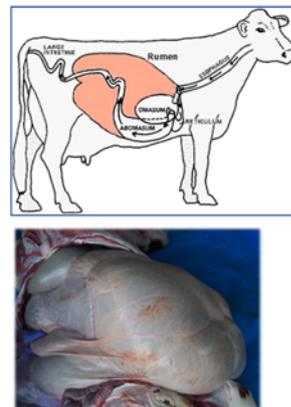
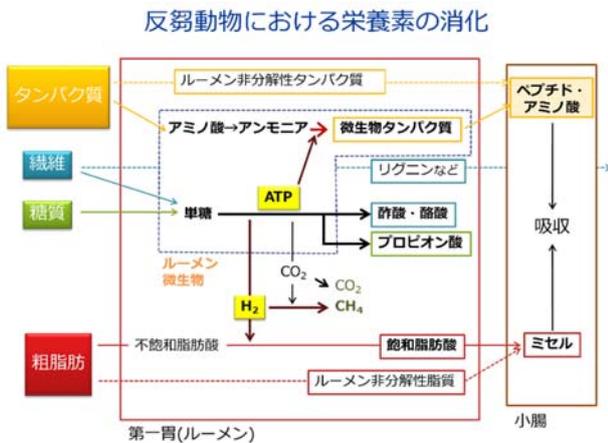


## 反芻動物第一胃の微生物群集と動物生産

成熟したウシ第一胃（ルーメン）の容積は約 100L で、複胃（第一胃～第四胃）全体の約 80% を占めます。ルーメンを発酵タンクと見立てたときに微生物は発酵主体として機能し、飼料成分の効率的なエネルギーへの変換を行っています。ウシが摂取した飼料はこれらの微生物による分解・発酵作用を受け、炭水化物から酢酸、プロピオン酸および酪酸などの揮発性脂肪酸が生成され、吸収された後、ウシの主要なエネルギー源になります。また、これらの微生物は常に増殖し、その細胞は下部消化管に送られ、主要なタンパク質源として利用されます。これを微生物タンパク質と言い、反芻動物の栄養素利用で欠かせない部分なのですが、微生物にとってみれば、自分自身の複製にすぎず、生きるために至極当然の営みをしているまでです。ルーメン微生物を構成するのは様々な種類の単細胞生物-細菌、古細菌、真核生物（原生動物、真菌）-がいて、数え方によりますが、そのうちの細菌と呼ばれるものだけでも約千種類あります。ですが彼らの仕事はだいたい同じで、①食べること→②増えること、以上、です。アミノ酸すなわち窒素化合物を自らの中に取り込み、エネルギーを使ってそれを自分の体の一部分として蓄えそして増殖する、微生物にとっては代謝そのものが生きる目的です。人間も、どんな生き方をするにしても、自身の生物学的な仕事つまり代謝がうまくいって健康であってこそその話です。言ってしまえば、これからお話しするルーメン微生物と、その宿主である牛と、さらにそのことについて話している私（上野）の生き方の違いは実は余り大きくなくて、どこに居てどんなものを食べているか、その違いに拠って決まるとも言えます。次はそのことについて説明します。



### 反芻動物第一胃の構造

反芻動物第一胃（ルーメン）には、多種多数の微生物が棲息している

- 繊維を消化できる
- 微生物細胞を栄養（タンパク質）にできる
- △ 栄養素の利用効率を微生物に依存する

まずは微生物の住環境としてのルーメンについて考えてみます。反芻動物が持つ4つの胃のうち第一胃と第二胃が反芻胃で、両方の胃が連動しつつ複雑な動きをすることにより、取り込んだ飼料を攪拌し、ルーメンで滞留させ、段階的に第三胃以降に送り出します。それらの動きと並行して、飼料の一部を食道～口腔まで逆流させ、再び咀嚼させる、すなわち反芻も行われます。こうした動きのそれぞれは、微生物が活動しやすいようにいわばプログラムされています。つまり、飼料がルーメンに滞留することで、微生物が飼料成分を取り込みそして増殖するのに十分な時間が与えられ、食液が新たに入ってくる分だけ送り出されることで、合成された微生物蛋白質がコンスタントに流出し、そしてルーメン内容物の量や状態が安定化します。そして反芻はいわゆる長物（粗飼料）を、繰り返し細かくしていくことで表面積を徐々に大きくし、微生物が飼料の表面に接触するのを援けます。ルーメン内では、飼料成分のほとんどは水に溶けていません。ですから、微生物のほうから



ーメン内にどんな種類の微生物がいるかについて説明します。前段で述べたように、仕事は同じですが、食べるもの（基質）が少しずつ違い、それに伴って代謝産物も異なります。例外も多数ですが、基質の種類を基準にして表1に示す(I)～(VI)の6種類に集約しました。

表1 ルーメン微生物の代謝パターン

|       | 基質（餌）         |             |             | → | 代謝産物   |    |        |               |
|-------|---------------|-------------|-------------|---|--------|----|--------|---------------|
|       | 繊維<br>(セルロース) | ヘミセル<br>ロース | デンプン・<br>糖類 |   | 揮発性脂肪酸 |    |        | その他か<br>主なもの  |
|       |               |             |             |   | 酢酸     | 酪酸 | プロピオン酸 |               |
| (I)   |               | ○           | ○           | → | ○      | ○  | ○      | コハク酸<br>蟻酸    |
| (II)  | ○             | ○           | ○           | → | ○      | ○  |        | 水素 蟻酸         |
| (III) | ○             | ○           |             | → | ○      |    |        | 水素 蟻酸<br>コハク酸 |
| (IV)  |               |             | ○           | → | ○      |    |        | 乳酸            |
| (V)   |               |             | ○           | → | ○      |    | ○      | 乳酸            |
|       | 乳酸 コハク酸       |             |             | → |        | ○  | ○      |               |
| (VI)  | 水素 蟻酸         |             |             | → |        |    |        | メタン           |

順に説明すると：

- (I)...比較的分解しやすいものを基質として、短時間に消化し、さまざまな代謝産物を作り分ける。ルーメン内で最も多数を占めるのがこのタイプ。
- (II)...分解しやすいデンプン・糖類も、分解に時間がかかる繊維も、両方を基質にできます。(I)に次いで大きい勢力。このタイプには細菌だけでなく、真核生物も含まれる。
- (III)...繊維を主に好む。微生物ごとに代謝産物の種類が限られており、限られたものしか作れない。
- (IV)...デンプンや糖類の分解に特化しており、大量の乳酸を作る。
- (V)...利用しやすい基質（デンプンや糖類）があるときは(I)のような代謝をするが、それらが十分でないときは、他の微生物が作った乳酸やコハク酸を代謝して、VFAを作る。
- (VI)...(V)と同じく、他の微生物の代謝産物である水素や蟻酸（ぎさん）を原料にして、メタンを合成する。

表1ですが、基質の列は左から分解しにくいものが並び、代謝産物のうちVFAについては、右に行くにしたがって合成が難しくなります。VFAを炭素数順に並べると酢酸（2）、プロピオン酸（3）、酪酸（4）の順ですが、圧倒的にプロピオン酸の合成が複雑です。一方でプロピオン酸は3種類の中で唯一、動物体内での糖新生の材料つまりグルコース分子確保に不可欠の分子なので、ルーメンからの安定的供給が絶対条件です。これらを踏まえて表を俯瞰すると、(I)～(III)の3種類について、「分解しやすい基質から合成の難しい代謝産物を作る」または「分解しにくい基質を分解して、合成しやすい代謝産物を作る」のように、基質分解と代謝産物合成のどちらに重きを置いて宿主の役に立っているかということになります。たとえば(I)のグループの細菌が、数的優位性を

も行使して易消化性の炭水化物を優先して利用しつつ、プロピオン酸等重要物質を合成して宿主に貢献している状況が想像できます。「多機能ではないゆえに、何かの機能を捨てて重要な機能を残さなければならない」単細胞生物の宿命かもしれません。

(I)～(IV)の微生物は、無酸素環境でエネルギーを得る能力に長けている一方で廃棄物も多く、あまりエコな生活とは言えません。エネルギーのロスを防ぐためにもルーメン内で再変換する必要があることから、(V)や(VI)のような菌もまた重宝されるのです。とくに(VI)がいわゆるメタン菌で、水素というルーメン環境の不要物をメタンガスに変え、あい気として体外へ排出することで、ルーメンの環境維持に貢献しています。とはいえご承知の通り、肉用家畜全体が地球全体の持続的発展目標 (SDGs) の観点から批判の対象となっている中、さらにメタンを発生する反芻家畜は大敵扱いです。日本国内において、反芻動物生産由来地球温暖化ガス(おもにメタンと一酸化二窒素)の寄与度は、国内全体の排出量(CO<sub>2</sub>換算)で1%未満ですが、世界全体で見るとその10%前後を占めると推定されており、生産を減らさずとも地球温暖化ガス発生低減への取り組む必要は避けられそうにないように思います。また、メタン生成の基質となる水素分子は繊維分解過程で生成することが多い(やることが多すぎて廃棄物処理まで手が回らない)ため、粗飼料の多給によってルーメン酢酸生成量増加を通じて乳脂率上昇が期待できる一方で、最終的な代謝産物としてメタン生成量が増加し、その分エネルギー効率は落ちます。

### 炭水化物消化速度の調節

このようにして、さまざまな種類の微生物が飼料中炭水化物を時に競合し、時に食べ分けるように自らの細胞に取り込んで代謝しています。簡単に言えば、デンプンのように誰もが利用できるものを主食としている細菌は、サッとそれを取り込んで、パッと増殖して、そしてドッと死ぬように、非常に短時間で事を済ませます。そうした文字通り刹那的な細胞生命を送るグループから見ると、粗飼料の分解が得意な菌というのはとてもスローライフ型です。単糖、二糖のような低分子の炭水化物も利用しながら、利用者の少ない繊維もじっくり時間をかけて(といっても秒単位の作業ですが)分解してエネルギーとして利用します。もっとのんびりしているのが上述のメタン菌です。ルーメンとは違う場所にいるメタン菌の場合は、細胞数が倍に増えるのに2週間～2か月かかります。ルーメンメタン菌も似たり寄ったりで、エネルギー源として有機物でなく、他の細胞にとって害でしかない水素を選択しているからそうなるのですが、数を増やすだけのエネルギーがなかなか得られないので、まず細々と食いつなぐことを優先し、結果的に仙人のような生き方になります。こうした様相、陸上動物の生態系で草食動物が草を栄養とし、コアラがユーカリを主食として、もっと言えば本来肉食系のパンダがササを食べて生きていることと、大いに似ています。それぞれの動物が独占的に入手できる食べ物がまずあって、その制約から逆算してどんなふう生きていくかを、何世代にもわたって試行錯誤し継承してきた故の必然であるというエピソードと同じ世界が、1頭1頭の牛のルーメンの中で形成されているのです。

利用する炭水化物によって微生物の代謝速度が異なるということは、ルーメンにおけるVFA吸収も、微生物蛋白質のルーメンからの流出すなわち小腸における微生物蛋白質吸収のどちらも一度にすべて行われるのではなく、時間をかけて分散して行われるということです。またそのことにより、ルーメン微生物という集団に関しても安定・均衡した状態が保たれています(19)。

## ルーメン微生物の制御

ルーメンから流出した微生物群は、第三胃を経て第四胃を通過する際に、胃酸によってほとんどが殺菌され、細胞膜が壊されて菌体成分が溶出します。この菌体成分は他の飼料と同じように、化学的作用を受けて低分子化されますが、水以外の細胞成分のほとんどは蛋白質ですから、小腸でアミノ酸やペプチドとして吸収されます。生きて大腸まで到達するごく少数を除いて、第一胃～第四胃の非常に限られた区間が、ルーメン微生物の空間的な生存域です。微生物にとってルーメンは確かに居心地の良い空間ですが、そこから外に出るとあとは宿主動物のために一生を終えるばかりです。「牛はお人好しで微生物を腹の中に住まわせてやっているのではなく、自分達に都合よく利用するために飼っているのである」と表現している専門家の方もいるのですが、ところがどっこい、ルーメン微生物も同じくらいしたたかで、宿主反芻動物が活着している限り、自己の系譜を絶やさないうように日々勤しんでいる様子を、次に説明します。

私たちの体の中で細胞が常に分裂（増殖）と死滅を繰り返していることが「活着している」ことを示しますが、それは当然単細胞生物にも当てはまり、細胞の死が個体の死となり、わずかですが群集の分布がその時点で変化します。想像の世界で、500ml ペットボトルがルーメン液で満たされているとすると、そこには少なく見積もって5兆個の細胞が居ます。かなり荒っぽい仮定ですが、それぞれの細胞の増殖速度と死滅速度が等しく、平均で2時間とします。見た目の変化はないですが、1秒の瞬きの間に10億個の細胞が減し、そして誕生します。2時間経つと、5兆個が全部入れ替わります。

菌が増える効率つまり増殖速度に大きく影響を及ぼすのは、菌を取り巻く環境です。牛が食べた餌に由来する化学成分の増減、微生物自身の代謝産物つまり廃棄物の出具合、そうした状況は1、2時間のなかでも刻々と変化するので、ある時間帯で有利な環境にある細菌がいて、次の時間帯がチャンスとなる細菌もいて、のよすうに転々とします。そのなかにはメタン菌のように出番が後回しのグループもいます。そこで時間軸を少し伸ばして考えてみます。養われている家畜は1日の同じ時間に食べ、動き、生産し、休むを繰り返しているので、日周期の生活といえます。ということは反芻胃の環境もそれに合わせて1日の中で変動し、同じ時間帯には原則同じような微生物の構成に戻ることを繰り返して、宿主の活動のリズムを作ることに貢献しています。そうした多様性と柔軟性こそが、多少の飼料の変化や環境ストレスに対応できる余裕を与え、安定したルーメン発酵を支えるために不可欠といえます。

個々の細菌の立場に戻って考えると、自身のからだである1個の細胞は（真核生物のそれと比べても）非常に小さいので栄養を蓄える余地がなく、栄養素の取り込みと細胞内での代謝を無駄なく進行する必要があります。自分が死ぬ前に、手の届く範囲に使える資源（栄養素）が潤沢にあれば、それを取り込んで、増殖という形で自身のコピーを作り、同時に蓄積量を増やすことができ、チャレンジ成功です。それができなければ、死んだ細胞はすみやかに分解にさらされ、他の細胞が増殖するための材料となります。ペットボトルの中の5兆個の細菌は、そんなギャンブルをずっと続けているわけです。ルーメン微生物が群集としてきわめてよく統率されており、それが牛に大きな貢献をもたらしているとはいえ、実は彼ら（微生物）にしてみれば強い使命感があるわけでもなく、結局「やりたいようにやっているだけ」の生き方のようにも思えます。

## ルーメン発酵の制御＝微生物を「手なずける」

バランスの取れた飼料を給与している間、ルーメン微生物群集は一見安定していますが、ルーメン微生物＝ギャングラー説？に立つと、本来快適なはずのルーメン環境は鉄火場であり、それぞれの微生物が文字通り生死を賭け続けています。このとき特定の微生物が「勝ちすぎる」ような状況になるとまずいことになるのは容易に想像できます。具体的には、泌乳や成長に必要なエネルギーを補うため濃厚飼料を多給すると、デンプン分解菌が席卷します。するとたちまち、急速な発酵によりルーメン液の pH が低下し、細菌が死滅してエンドトキシンが遊離され、血液に移行して潜在性ルーメンアシドーシス（SARA）を引き起こします。個体差を考慮しつつ、過剰なデンプン供給とならないような栄養管理が重要で、現実社会と同じように、「勝ち組」と「そうでない組」がたまに入れ替わるくらいが丁度よいようです。

表2 ルーメン発酵調節に貢献する素材

| 種類                      | 例                       | 目的・効果                          |
|-------------------------|-------------------------|--------------------------------|
| 微生物<br>(プロバイオティクス)      | 酪酸菌・枯草菌                 | 飼料蛋白質分解の促進<br>酪酸生成の促進          |
|                         | 乳酸菌                     | 発酵速度調節（過剰な乳酸生成の抑制）             |
|                         | 酵母                      | ルーメン内酸素消費<br>デンプン分解の競合→乳酸生成の抑制 |
| 難消化性炭水化物<br>(プレバイオティクス) | オリゴ糖（フラクトオリゴ糖、マンナンオリゴ糖） | 特定細菌の活性化→飼料効率向上                |
|                         | 木材クラフトパルプ               | 繊維分解菌の活性化                      |
| そのほか素材                  | 食品副産物（茶粕、コーヒー粕など）       | 水素を生成する微生物の抑制→メタン発生の抑制         |
|                         | エッセンシャルオイル              | 発生した水素と結合→メタン発生の抑制             |

このように、生産期の牛では、粗濃比のような基本的な指標によってもルーメン微生物群集が顕著に変動するので、介入によって特定の微生物群を選択的に増加・減少させて群集機能を調節する目的で添加剤(サプリメント)が利用されています(表2)。牛用飼料添加物として指定されているものもありますが、治療用途というより、日常的に給与するのが基本的な使い方です。例えば酵母ですが、本来ルーメンにはおらず、製剤を餌に混ぜて与えます。酵母が活着しているときは、ルーメン内酸素を消費することにより嫌気的環境が維持されるとともに、デンプン分解菌と奪い合いをしますので濃厚飼料多給時の pH 低下が緩和されます。この結果、繊維分解細菌と乳酸利用細菌の双方の増殖を促進する方向で、ルーメン環境の改善、飼料効率の改善(とくに繊維利用効率の増加)といった効果が見られます。酵母が死滅した後も、細胞を作っていた糖類やアミノ酸・ビタミンが放出されて、他のルーメン微生物にとって利用しやすい栄養素として供給されます。

人間の健康と同様に、プレバイオティクス（消化管内の有用細菌によって選択的に利用される難消化性炭水化物）給与に対する関心も高まっています。人間などに対するものと違って大腸まで届かず、ルーメン内でしっかり消化されます。プレバイオティクスを子牛に給与すると、ルーメンが未発達のうちは大腸に到達して働き、ルーメンが機能するようになるとルーメンの微生物群集を調節することがわかっており、そうした日々の改善の蓄積で、成熟後のパフォーマンス向上を図ることも可能です。成牛に対しても、ルーメン内微生物群集の調節による飼料効率の改善を期待した補助飼料製品として流通しています。

調節のしくみとしてもうひとつ注目されているのがメタン発生の抑制です。ルーメン細菌による嫌気呼吸の結果としての分子水素生成は、易消化性炭水化物分解の過程よりも、繊維分解の過程で起きやすくなります。場合によっては、繊維分解菌とメタン生成菌が近接していて、繊維分解で発生した分子水素をメタン菌が素早く取り込むような連係プレーが行われていると推測されています。このように、メタン菌の活躍の場は、ルーメン内での繊維分解による水素発生量と、水素を代謝可能な他の細菌の分布量によって決まります。水素をメタン菌に取られないようにすれば、飼料消化を維持しながらルーメンメタン発生（すなわち栄養損失）が抑制できるわけで、その観点での試みも行われてきました。給与する素材として以前は抗生物質（モネンシンなど）が主でしたが、現在は一部の植物油脂（エッセンシャルオイル）やタンニンを含む食品副産物（茶粕、コーヒー粕、果物加工残渣）などが検討されてきています。海外では、より強いメタン発生抑制効果を持つ天然素材も見出されていますが、国内で流通するにはまだ時間がかかるようです。

ルーメン発酵を調節する添加物の利用は、ルーメン微生物群集の自律的な変化をより望ましい方向へ誘導するひとつの手段であると言えます。薬剤と違って即効性はありませんが、家畜用飼料として流通している各種製品の中から適切なものを選択し継続的に用いることで、日常的な飼養管理による望ましい微生物群集をデザインすることも可能になります。

ここからは現在進めようとしている研究の紹介です。前に述べたとおり、ウシやヒツジなど反芻動物では、ルーメンに棲息する嫌気性微生物の働きにより繊維や糖類が分解され、生成した短鎖脂肪酸（VFA）がルーメンで吸収されて宿主のエネルギー源となります。そのため、安定した発育や生産を得るには、ルーメン発酵を安定化させることが不可欠です。ルーメン発酵の正常性を評価する指標として pH があり、そのほかに化合物として VFA、乳酸、アンモニア態窒素が用いられていますが、これらの化合物だけでルーメン内の個々の微生物による基質代謝を表現するのは難しく、ルーメン内の複雑な発酵過程を正確に知るためには、既知の指標だけでは不十分で、新たな指標が必要です。そこで、反芻動物のルーメン機能の「見える化」をめざし、ルーメン微生物環境（微生物構成と発酵産物）がどのように関連し、変動するかを評価することにしていきます(20-24)。

動物消化管微生物生態研究（少々細分化された世界ですが）において、分子生物学的手法は精緻かつ多量の知見を与え、ルーメンの中に何が居るか？については、ある程度分かってきましたが、その次の命題である、「メンバーはそこで何をしているのか？」に対する問いに答えるためには、活性高く存在する微生物群の機能を網羅的にとらえる必要があります。ルーメン生態系の微生物成分を特徴付けるための、各種オミクス技術(ゲノムシーケンシング技術、メタトランスクリプトミクス、メタボロミクス)は、ルーメン微生物代謝が宿主の代謝とリンクしていることを説明しています。メタボローム解析技術が普及してきた 2016 年ごろから、ルーメンへの適用事例が見られる

ようになりました。ルーメン内微生物叢の代謝物の網羅的な同定も始まり、微生物代謝物による宿主活動への影響もわかりつつあります。NGS (次世代シーケンシング) によるルーメン微生物群集の網羅的解析と同様に、ルーメンメタボローム解析を行うことによって得られる結果は、介入によってどのような代謝産物が得られるかという定量的側面と、定性的側面の両方があります。最近、子牛ルーメン液を材料とした水溶性化合物 (有機酸、アミノ酸、ビタミン等) の網羅的検出定量を実施しており、ルーメン内栄養素代謝の状態を反映し、なおかつこれまでの指標よりも、微生物発酵の特徴を的確に表示できる化合物が存在する可能性 私も同様のことに取り組み、ルーメン液から検出可能な低分子極性化合物(有機酸, アミノ酸, ビタミン等)は 200 種類以上存在することがわかっており、ルーメン内栄養素代謝の状態によって濃度が変動し、なおかつこれまでの指標より利用価値が高い(微生物発酵の特徴を的確に表示できる)化合物が存在している可能性は十分にあります。さらに、ルーメン発酵解析にメタゲノムおよびメタボローム解析の手法を持ち込むことによって得られるビッグデータにより新たな知見を生む余地が大きいと考えられますが、一方でビッグデータ=闇雲なデータ収集に終始する危険性もあります。それを避けるためには、ビッグデータと、それ以外の試験結果全体とを重ね合わせる必要があります、実際に動物がどのように応答しているかを正確に観察把握することと、ルーメン発酵の主体である微生物がどのように挙動しているかを正しく解釈することが必要です。家畜は一定の概日周期で行動し、栄養素の摂取と消費 (成長、生産) を繰り返して生きています。そうした一日の活動の中でどのようにルーメン環境は変化するか、すなわち「どのような微生物が」「いつ」「どのような代謝産物を作っているか」について、多面的に解釈し、その調節を図ることが、消化管機能の過度の亢進や無駄な低下を減らし、効率的な生産を行うために不可欠です。その目的でオミクスを駆使し、新たな指標化合物の特定に至る可能性を見出そうとしています。

1990 年代後半から現在まで、分子生物学的手法は動物消化管微生物生態の解明に大きく貢献してきた一方で、「それらの微生物は何をしているか?」といった生態機能の探索に対しての革新も進められてきています。ルーメン微生物群集と宿主との相互作用に対する理解はまだ途上にあります。新しい手法の普及や複合によって、飼料の消化効率や反すう動物のメタン排出など、動物の生産に関連する重要な問題に新たな視点から取り組んだ結果が、より分かりやすく伝えることができるようになると考えています。

動物消化管微生物のコアな世界をご紹介しましたが、まだわかっていないことのほうが多い領域であるのも確かです。どの消化管微生物群集を見ても、10~30%くらいは既知のどのグループにも属していないものが見つかります。つまり、最もよく研究された微生物群集のひとつである動物消化管でさえ、その3分の1程度は分子生態学的にも存在様態が不明の、真に未知の細菌が占めていることとなります。こうしたことから、微生物生態学における微生物群集構造解析の研究に終わりはなく、むしろ今後未培養、未同定微生物群の特徴づけに対する更なる真実究明の余地が残されているといえます。

また、素性がわかっていても役割がわからないものもあります。たとえば、ルーメン細菌叢を調べると光合成細菌 (ラン藻) の仲間である細菌もしばしば検出されるのですが、暗闇 (ゼロルーメン) のルーメンでそんな菌が何をしていた、ほんとうに何かの役に立っているのか?? そんなふう存在様態が不明の細菌がたくさんいます。ひょっとすると、そんな謎メンバーの中には、有事の

際は大活躍する一種の「保険」として存在しているものも、いるかもしれません。何事も1番である必要はないが、そこにいるべき理由があると考えたほうがよさそうです。当研究室では、品種や発育段階が様々に異なる牛群に対して、次世代シーケンシングによるウシルーメン微生物群集構造解析を実施してきており、いろいろな要因により群集構造が変化している状況を明らかにしていますが、それがどのように生産に役立っていくか、踏み込んだ研究を進めていきたいと考えています。

【注】この原稿は、Dairy Japan 連載「誰にも聞けない酪農キーワード」（第7回：ルーメン微生物と微生物蛋白質）（2020年5月号、6月号）掲載記事を再構成し、大学院授業（動植物環境共生学特論）テキストとして使ったものです。

【授業(動植物環境共生学特論)でいつも提示しているレポート課題】講義内容を展開した、次の[1]～[5]の問いのうちから3つを選んで、解答しなさい。(合計で600～1000字程度)

**[1] 動物消化管、発酵食品、極限環境(火山口や海底など)に棲息している微生物が共通して持っている性質はなにか?**

->ほとんどの種類の微生物は、嫌気条件(無酸素の状態)で生きています。そうした微生物はどのようにして、生存や増殖に必要なエネルギーを得ているか、が(他にもある中で)ひとつの答えになります。

**[2]反芻動物からのメタン生成を抑制する実用的な方法を提案してください。その方法は、どのようなしくみでメタンを抑えますか?**

->さまざまに提案されている方法の中で、最も効きそうだとするものを挙げてください。全く別の観点から、新しい方法を挙げてくださっても結構です。

**[3]メタン生成古細菌を腸内に持っている人は、どのような食生活を送っていると考えられるか?**

->ウシなどの第一胃には必ずいるメタン生成菌は、ヒトの腸にいる場合もあります。その人は普段どんなものを食べていることになるだろうか、ということ想像していただければと思います(ただし、腸内細菌叢は食生活だけで決まるわけではないので、必ずしもその通りにはならないことも、踏まえておいてください)

**[4]ウシがルーメンバイパスプロテイン(飼料中のタンパク質で、反芻胃で微生物による分解を受けない成分)を与えられることによるメリットはなんだと考えられるか?**

->反芻胃での炭水化物消化にも、「早く分解されるデンプン」「遅く分解される繊維」のように2種類あり、タンパク質についても、反芻胃でタンパク質分解->微生物がタンパク質を合成ばかりだと、結果的にウシの体内に吸収されるのはとても遅くなってしまいます。そのことがヒントです。