

牛のルーメンセンサとルーメン内細菌叢に関する 最近の話題と研究

宗田吉広^{1)†} 澤田 浩¹⁾ 岡田浩尚²⁾ 伊藤寿浩³⁾
山中典子¹⁾ 新井鐘蔵⁴⁾

- 1) 国研農業・食品産業技術総合研究機構動物衛生研究部門
(〒305-0856 つくば市観音台3-1-5)
- 2) 国研産業技術総合研究所センシングシステム研究センター
(〒305-8564 つくば市並木1-2-1)
- 3) 東京大学大学院工学系研究科 (〒113-8656 文京区本郷7-3-1)
- 4) 国研農業・食品産業技術総合研究機構企画戦略本部
(〒305-8517 つくば市観音台3-1-1)

(2020年7月27日受付・2020年9月14日受理)

Recent Topics and Studies on Bovine Rumen Sensors and Microbiota

Yoshihiro MUNETA^{1)†}, Hiroshi SAWADA¹⁾, Hironao OKADA²⁾, Toshihiro ITOH³⁾,
Noriko YAMANAKA¹⁾ and Shozo ARAI⁴⁾

- 1) *National Institute of Animal Health, National Agriculture and Food Research Organization, 3-1-5 Kannondai, Tsukuba, 305-0856, Japan*
- 2) *Sensing System Research Center, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 1-2-1 Namiki, Tsukuba, 305-8564, Japan*
- 3) *School of Engineering, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo, 113-8656, Japan*
- 4) *Strategic Planning Headquarters, National Agriculture and Food Research Organization, 3-1-1 Kannondai, Tsukuba, 305-8517, Japan*

はじめに

近年の Internet of Things (IoT) 技術や Artificial Intelligence (AI) 解析技術の急速な進展によって、獣医畜産業においても、生体センシング技術の活用による家畜生体情報のリアルタイムモニタリング技術や個体飼養管理技術及びそのためのセンサ開発は、非常に重要な課題となっている [1, 2]。生体センシング技術によって、牛の第一胃 (ルーメン) 運動や第二胃内温度 [3, 4]、第二胃内 pH [5]、体温 [6, 7]、体表温 [8] 及び腔温 [9]、発情 [8, 9] や分娩 [10, 11]、ストレス、ウェルフェア及び行動 [12, 13]、メタンガスや二酸化炭素等の温室効果ガスの産生 [14] 等のさまざまな生理学的あるいは

は病態の変化を連続的に測定し、疾病の早期発見や省力的な飼養管理技術の開発に貢献することが期待されている。また、2015年に国連が掲げた、2030年までの持続可能な開発目標 (Sustainable development goals: SDGs) を達成するためには、さまざまなセンシング技術や AI 解析技術を取り入れながら、温室効果ガスの削減や食料の増産及びフードロスの削減に取り組み、農業・食品産業及び獣医畜産業における Society 5.0 (https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/index.html)、(参照 2020-07-28) の実現が必要となる。

そこで、本総説では、われわれがこれまで取り組んできた牛のルーメン機能を常時モニタリングするためのルーメンセンサの現状や活用方法、及びルーメン内の細

† 連絡責任者: 宗田吉広 (国研農業・食品産業技術総合研究機構動物衛生研究部門病態研究領域生化学ユニット)
〒305-0856 つくば市観音台3-1-5 ☎・FAX 029-838-7780 E-mail: ymuneta@affrc.go.jp

† Correspondence to: Yoshihiro MUNETA (National Agriculture and Food Research Organization)
3-1-5 Kannondai, Tsukuba, 305-0856, Japan
TEL・FAX 029-838-7780 E-mail: ymuneta@affrc.go.jp

表1 世界で市販されているルーメンセンサとその概要

製品名	販売会社	国	センサ寿命	情報源ウェブサイト
胃診電信	(株)セントラル 情報サービス	Japan	約5年間	http://www.cisnet.co.jp/ishindenshin.htm
moow rumen sensor	Behance	Hungary	3年間まで	http://www.moow.farm/
SmaXtec pH Plus Bolus	SmaXtec animal care sales GmbH	Austria	4年間まで	https://support.smaxtec.com/en/smaxtec-ph-plus-bolus-activation/
DASCOR LRCpH	DASCOR	USA	不明	https://www.dascor.com/
DVM Temp Track	DVM systems LLC	USA	不明	https://www.agriculture-xprt.com/software/dvm-temptrack-automatic-health-monitoring-system-366844
Well Cow	Biosciences KTN	UK	100日	https://www.ed.ac.uk/files/atoms/files/smart_sensor_to_improve_cow_health.pdf
eBolus	eCow	UK	5カ月間まで	https://ecow.co.uk/
San'Phone	Medria	France	不明	https://www.agriexpo.online/prod/new-medria/product-172130-9208.html
Live Care	(株)ユライクコリア	Korea	最大5~6年	http://www.livecare.io/product.asp

菌叢と牛の健康や疾病との関連について最新の知見や報告について解説するとともに、ルーメンセンサのさらなる改良や長寿命化に向けた今後の展望についても述べる。

ルーメンセンサによる牛のルーメン機能モニタリングとルーメン細菌叢

われわれはこれまでに、内閣府 SIP 戦略的イノベーション創造プログラム「生体センシング技術を活用した次世代精密家畜個体管理システムの開発」及び革新的技術開発・緊急展開事業「AIを活用した呼吸器病・消化器病・周産期疾病の早期発見技術の開発」研究プロジェクト等を通じて、牛のルーメン運動 [3, 4] 及び pH [5] を連続的にモニタリングできるルーメンセンサを開発し、牛のルーメンアトニーや鼓脹症の早期発見を可能とする技術について報告してきた [4]。また、Satoら [15] は、第二胃内の pH を連続的に測定することで Subacute rumen acidosis (SARA) の診断が可能であると報告している。

表1に、現在世界で市販されているルーメンセンサについて示す。日本で唯一市販されているルーメンセンサはルーメン内部の温度センサである「胃診電信」であるが、ルーメン内の温度を常時モニタリングすることで、給水回数の検知、発熱検知、発情検知、分娩検知、低温検知及び転倒検知が可能とされている (<http://www.cisnet.co.jp/ishindenshin.htm>)、(参照 2020-07-28)。ルーメン内温度に加えて、われわれが開発してきた pH センサや加速度センサを搭載した多機能型ルーメンセンサを実用化することで、ルーメン機能の異常に起因する各種生産病の予防や治療にも役立つことが可能となる。さらに、牛が排出する温室効果ガス (メタンや CO₂

等) のセンサ等を組み合わせれば、環境負荷や地球温暖化の低減を通じて持続可能な獣医・畜産業の構築にも貢献することが可能である。

牛のルーメンは、牛が消化できない植物由来の食物繊維 (おもにセルロース) をルーメン内の微生物の力を借りて発酵し、栄養やエネルギーに変えるための重要な臓器である [16]。また、ルーメン環境を改善することは、牛の栄養条件の最適化及び環境負荷軽減につながることも提唱されており [17]、従来から獣医療で有効な治療法として行われてきた健康な牛のルーメン液の疾病牛への移植 (Transfaunation) も、そのメカニズムが明らかにされつつある [18]。さらに、ルーメン細菌の抗原刺激によって、牛の免疫機能が発達し [19]、子牛の成長にもよい影響をもたらすことが報告されている [20]。

そこで、ルーメン運動や第二胃液の pH 及び温度を常時モニタリングすることで、ルーメン機能の発達、異常及び機能低下を早期に発見し、牛の各種の生産病 (ルーメンアシドーシス、ルーメンアトニー等) の病態の予防あるいは早期治療につなげることが可能であると期待されている [21-24]。また、このルーメン機能と大きく関連しているのがルーメン細菌叢であることが明らかになってきている [25, 26]。

ルーメン細菌叢の制御と牛の健康及び疾病との関連

牛ルーメン内の細菌叢については、16S rRNA による次世代シーケンズ解析技術の進展により、多くの情報が得られるようになってきている [27]。また、最近では、牛のルーメン細菌叢のデータベースも構築され (Hungate 1000 : <http://www.rmgnetwork.org/hungate1000.html>)、(参照 2020-07-27)、無料で公開されている [28, 29]。疾病との関連では、ルーメン内

表2 牛のルーメン内に見出される細菌（門/科レベル）とその頻度（0.1%以上のもの）

門	科	頻度(%±SE)
Bacteroidetes		58.95±2.34
〃	Prevotella	49.93±2.56
	RF16	0.77±0.22
	Paraprevotellaceae	0.23±0.04
Firmicutes		27.67±2.29
〃	Lachnospiraceae	3.86±0.65
〃	Clostridiales	2.27±0.28
〃	Ruminococcaceae	4.46±0.98
〃	Veillonellaceae	2.47±0.66
〃	Mogibacteriaceae	0.86±0.16
〃	Erysipelotrichaceae	0.33±0.10
Proteobacteria		0.80±0.09
Tenericutes		0.55±0.10
Cyanobacteria		0.55±0.12
Synergistetes		0.26±0.05
Fibrobacters		0.10±0.03
Actinobacteria		0.21±0.07
TM7		0.11±0.02

参考文献：Myer et al., PLOS ONE, 10 (6), e0129174 (2015) より一部改変

This work is made available under the Creative Commons CC0 public domain dedication.

細菌叢のバランスや多様性が失われること（Dysbiosis）によって、さまざまな疾患（SARA等）が引き起こされることが報告されている [30, 31]。また、*Escherichia coli* O157:H7 をルーメン液で48時間処理した後に培養すると、コロニー数がLuria-Bertani (LB) 培地で処理した場合の約1/100～1/1,000に低下することが報告されているため、ルーメン細菌叢は病原性細菌の制御に関与することが示唆される [32]。さらに、最近の報告では、乳房炎に対してもルーメン及び腸内細菌叢の制御が治療法としての可能性があることが報告されている [33]。

これらの報告を別の視点からみれば、牛のルーメン細菌叢のバランスや多様性を正常に保つことで、牛の健康との間に相乗的な効果を生むことができることが提唱されている [34]。表2にMyerら [35] が報告した去勢雄牛のルーメン内に見出された細菌を門/科レベルで示す。Bickhartら [25] のより最近の乳牛における報告でも、ほぼ同様の傾向がみられるが、古細菌としてメタンガスの産生に関与する *Methanobrevibacter* の存在も報告されている。ルーメン細菌叢の変化は、ルーメン内での発酵を通じて揮発性脂肪酸 (Volatile Fatty Acids: VFAs) や短鎖脂肪酸 (Short Chain Fatty Acids: SCFA) の産生を引き起こし、牛の増体重や余剰飼料効率にとってよい影響をもたらすことが報告されている [36, 37]。また、泌乳量の上昇や産肉性の向上及び筋肉内脂肪 (Marbling score) 等にも影響を及ぼ

すとの報告がある [38, 39] し、宿主である牛の一塩基遺伝子多型 (single nucleotide polymorphism) がルーメン細菌叢に影響を及ぼし、そのうちいくつかの多型は牛の飼料効率とも関連することが報告されており、育種によるルーメン細菌叢の改良も期待される [40]。

さらに、最近では食肉処理場で廃棄されている牛のルーメンマット (ルーメン内の飼料消化物: rumen digesta) を牛の飼料として有効活用しようという動きもみられる [41]。これについても、飼料コストの低減、環境への廃棄物軽減等の持続可能な畜産業かつルーメン細菌叢の活用の観点からも、法規制や病原体の不活化技術の開発等の安全性について十分に配慮しながら、今後は利活用を検討すべき技術と考えられる。

長寿命型ルーメンセンサの開発及び発電細菌の 利活用によるルーメンセンサのさらなる 長寿命化の可能性

最近、われわれは、ルーメンセンサの電極にバルブ差動装置 (マイクロ流体制御デバイス) を導入することで、長寿命化を実現した多機能型ルーメンセンサの開発に成功したことを報告した [42]。バルブ差動装置の導入により、内部参照液の流失が抑えられ、計算上2年以上連続動作する参照電極ができ、参照電極によって寿命が律速されることがなくなり、長寿命化が可能となった。

図にバルブ差動装置を搭載したルーメンセンサの模式図を示す。開発された長寿命センサの牛ルーメン内における実際の飼養条件下でのセンサデータの取得や長寿命化の検証が今後の課題となる。

さらに、1988年に発電することのできる細菌として報告 [43] された *Alteromonas putrefaciens* MR-1 (現在は *Shewanella oneidensis* MR-1) が微生物燃料電池として期待されている。近年の報告では、発電細菌であるシュワネラ菌は発電時に発酵という代謝を行っていることが示され [44]、人の腸内細菌である *Enterococcus avium* や *Klebsiella pneumoniae* にも発電能力があり、人の腸内での発酵にも関与していることが報告された [45]。また、興味深いことに牛の鼻頭頭から採取したスワブにおいて細菌叢の解析を行うと、属レベルの解析ではあるがシュワネラ属菌が23.1%を占めているとの報告がある [46]。さらに、2020年には牛ルーメン液からセルロースを分解することで発電する細菌 (*Cellulomonas* 属菌) が分離されたことが報告された [47]。

これらの報告は、牛のルーメン内からも発電能力のある細菌を分離可能であることを示唆している。現在、生活排水等に含まれる有機物を発電細菌が酸化分解することで得られる電子を電極に回収することで微生物燃料電池としての応用が進められているが、牛のルーメンも有機物の貯蔵庫であるため、同様に発電細菌が生み出す電

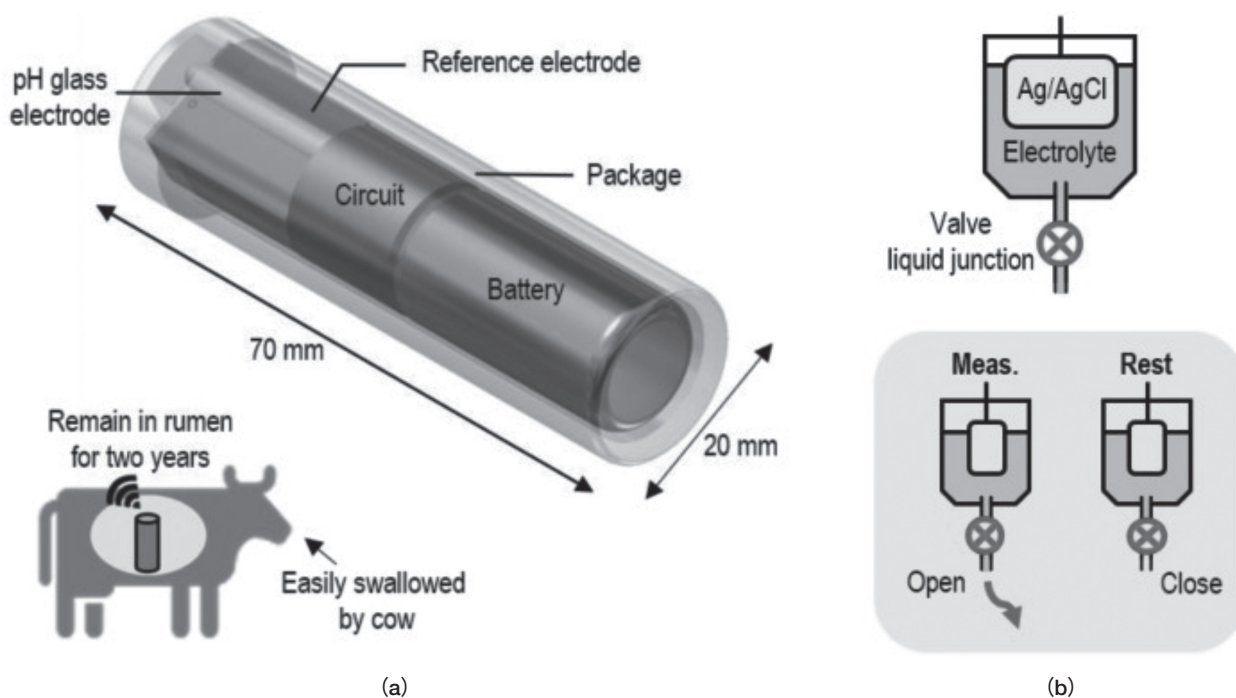


図 バルブ差動装置を搭載した長寿命型の牛用ルーメンセンサの模式図

(a) 牛への投与方法（理論的には2年間の長寿命化）

(b) バルブ差動装置の原理

引用文献：Higuchi S et al., Sensors 20, 1249 (2020)

ライセンスは Creative Commons Attribution (CC BY) license 4.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

子をルーメンセンサの電極に供給すれば、半永久的な寿命を有したルーメンセンサの開発が可能となる。

おわりに

以上、牛のルーメンセンサの現状とルーメン細菌叢の解析や利活用を含めた今後の展望について概説したが、長寿命型多機能ルーメンセンサの実用化、発電細菌による電力をルーメンセンサに利用するための技術開発、ルーメンマットを飼料として再利用する技術等については、今後のさらなる研究が必要である。一方で、現在の新型コロナウイルス感染症（COVID-19）の世界的な流行もあり、世界における社会全体あるいは医療、介護及び健康産業におけるデジタル化の流れは止めようのない動きである [48]。

わが国の農業・獣医畜産業においても、世界のこのような流れに取り残されることなく、生体センシング技術、ロボット技術及び腸内・ルーメン内細菌叢の解析等のビッグデータの活用技術を積極的に農業現場に取り入れて実用化を進め、省力化、生産性及び食料自給率の向上を図り、農業・獣医畜産業及び食品産業における持続可能な新しい生活様式（New Normal）の確立に向けて取り組んでいくべき時代を迎えている。われわれも本研究を通じて、牛の長寿命型多機能ルーメンセンサの実用化、ルーメン内細菌叢の解明と制御及び両者の相互活用

（ルーメンセンサから得られる情報によりルーメン細菌叢の異常を早期発見し、かつルーメン細菌叢の活用によりルーメンセンサの半永久的な寿命を実現する）を目指して、SDGsの達成や持続可能な獣医畜産業のNew Normalの確立に努めていきたいと考えている。

本総説は、科研費基盤研究(B)「マイクロ流体制御デバイスを用いた超長寿命小型ルーメン pH センサの開発」(19H03079)の支援を受けた。

なお、開示すべき利益相反はない。

引用文献

- [1] Gonzalez LA, Kyriazakis I, Tedeshi LO : Review: Precision nutrition of ruminants: approaches, challenges, and potential gains, *Animal*, 12, s246-261 (2018)
- [2] Halachmi I, Guarino M, Bewley J, Pastell M : Smart animal agriculture: application of real-time sensors to improve animal well-being and production, *Annu Rev Anim Biosci*, 7, 403-425 (2019)
- [3] Nogami H, Arai S, Okada H, Zhan L, Itoh T : Minimized bolus-type wireless sensor node with a built-in three-axis acceleration meter for monitoring a cow's rumen condition, *Sensors*, 17, 687 (2017)
- [4] Arai S, Okada H, Sawada H, Takahashi Y, Kimura K, Itoh T : Evaluation of ruminal motility in cattle by a bolus-type wireless sensor, *J Vet Med Sci*, 81, 1835-1841 (2019)
- [5] Andersson LM, Arai S, Okada H : Orally administra-

- ble wireless activity and pH probe for cattle reticulum, *Sensor Mater*, 30, 3029-3038 (2018)
- [6] Bewley JM, Einstein ME, Grott MW, Schutz MM : Comparison of reticular and rectal core body temperatures in lactating dairy cows, *J Dairy Sci*, 91, 4661-4672 (2008)
- [7] Lee Y, Bok JD, Lee HJ, Lee HG, Kim D, Lee I, Kang SK, Choi YJ : Body temperature monitoring using subcutaneously implanted thermo-loggers from Holstein steers, *Asian Austral J Anim Sci*, 29, 299-306 (2016)
- [8] Miura R, Yoshioka K, Miyamoto T, Nogami H, Okada H, Itoh T : Estrous detection by monitoring ventral tail base surface temperature using a wearable wireless sensor in cattle, *Anim Reprod Sci*, 180, 50-57 (2017)
- [9] Higaki S, Miura R, Suda T, Andersson LM, Okada H, Zhang Y, Itoh T, Miwakeichi F, Yoshioka K : Estrous detection by continuous measurements of vaginal temperature and conductivity with supervised machine learning in cattle, *Theriogenology*, 123, 90-99 (2019)
- [10] Sakatani M, Sugano T, Higo A, Naotsuka K, Hojo T, Gessei S, Uehara H, Takenouchi N : Vaginal temperature measurement by a wireless sensor for predicting the onset of calving in Japanese black cows, *Theriogenology*, 111, 19-24 (2018)
- [11] Koyama K, Koyama T, Sugimoto M, Kusakari N, Miura R, Yoshioka K, Hirako M : Prediction of calving time in Holstein dairy cows by monitoring the ventral tail base surface temperature, *Vet J*, 240, 1-5 (2018)
- [12] Pastell M, Aisia AM, Hautala H, Poikalainen J, Praks I, Veermae I, Ahokas J : Contactless measurement of cow behavior in a milking robot, *Behav Res Methods*, 38, 479-486 (2006)
- [13] Caja G, Castro-Costa A, Knight CH : Engineering to support wellbeing of dairy animals, *J Dairy Res*, 83, 136-147 (2016)
- [14] Hristov AN, Oh J, Giallongo F, Frederick T, Weeks H, Zimmerman PR, Harper MT, Hristova RA, Zimmerman RS, Branco AF : The use of an automated system (GreenFeed) to monitor enteric methane and carbon dioxide emissions from ruminant animals, *J Vis Exp*, 103, e52904 (2015)
- [15] Sato S, Ikeda A, Tsuchiya Y, Ikuta K, Murayama I, Kanehira M, Okada K, Mizuguchi H : Diagnosis of subacute ruminal acidosis (SARA) by continuous reticular pH measurements in cows, *Vet Res Commun*, 36, 201-205 (2012)
- [16] 安保佳一 : 反芻家畜の栄養の特異性, *化学と生物*, 17, 149-158 (1979)
- [17] 泉 賢一 : 環境にやさしい牛の飼い方とは—ルーメン環境を最適化する飼料給与戦略—, *酪農ジャーナル*, 66, 20-22 (2013)
- [18] Steiner S, Linhart N, Neidl A, Baumgartner W, Tichy A, Wittek T : Evaluation of the therapeutic efficacy of rumen transfaunation, *J Anim Physiol An N*, 104, 56-63 (2020)
- [19] 佐藤 繁 : ルーメン細菌の抗原刺激による牛免疫システムの発達, *東北家畜臨床研究会誌*, 14, 63-72 (1991)
- [20] 小池 聡 : 子牛の消化管細菌叢と成長, *日本家畜臨床感染症研究会誌*, 4, 88-91 (2009)
- [21] Diao Q, Zhang R, Fu T : Review of strategies to promote rumen development in calves, *Animals*, 9, 490 (2019)
- [22] Dijkstra J, van Gastelen S, Dieho K, Nichols K, Bannink A : Review: Rumen sensors: data and interpretation for key rumen metabolic processes, *Animal*, 14, s176-s186 (2020)
- [23] Hamilton AW, Davison C, Tachtatzis C, Andonovic I, Michie C, Ferguson HJ, Somerville L, Jonsson NN : Identification of the rumination in cattle using support vector machines with motion-sensitive bolus sensors, *Sensors*, 19, 1165 (2019)
- [24] Kilic U : Use of wireless rumen sensors in ruminant nutrition research, *Asian J Anim Sci*, 5, 46-55 (2011)
- [25] Bickhart DM, Weimer PJ : Symposium review: Host-rumen microbe interactions may be leveraged to improve the productivity of dairy cows, *J Dairy Sci*, 101, 7680-7689 (2018)
- [26] O'Hara E, Neves ALA, Song Y, Guan LL : The role of the gut microbiome in cattle production and health: driver or passenger?, *Ann Rev Anim Biosci*, 8, 199-220 (2020)
- [27] Fouts DE, Szpakowski S, Purushe J, Torralba M, Waterman RC, MacNeil MD, Alexander LJ, Nelson KE : Next generation sequencing to define prokaryotic and fungal diversity in the bovine rumen, *PLoS ONE*, 7, e48289 (2012), (online), (<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0048289>), (accessed 2020-07-27)
- [28] Seshadri R, Leahy SC, Attwood GT, Teh KH, Lambie SC, Cookson AL, Eloe-Fadrosch EA, Pavlopoulos GA, Hadjithomas M, Varghese NJ, Paez-Espino D, Hungate1000 project collaborators, Perry R, Henderson G, Creevey CJ, Terrapon N, Lapebie P, Drula E, Lombard V, Rubin E, Krypides NC, Henrissat B, Woyke T, Ivanova N, Kelly WJ : Cultivation and sequencing of rumen microbiome members from the Hungate1000 collection, *Nature Biotechnol*, 36, 359-367 (2018)
- [29] Li J, Zhong H, Ramayo-Caldas Y, Terrapon N, Lombard V, Potochi-Veronese G, Estelle J, Popova M, Yang Z, Zhang H, Li F, Tang S, Yang F, Chen W, Chen B, Li J, Guo J, Martin C, Maguin E, Xu X, Yang H, Wang J, Madsen L, Kristiansen K, Henrissat B, Ehrlich SD, Morgavi DP : A catalog of microbial genes from the bovine rumen unveils a specialized and diverse biomass-degrading environment, *GigaScience*, 9, 1-15 (2020)
- [30] Nagata R, Kim YH, Ohkubo A, Kushibiki S, Ichijo T, Sato S : Effects of repeated subacute ruminal acidosis challenges on the adaptation of the rumen bacterial community in Holstein bulls, *J Dairy Sci*, 101, 4424-4436 (2018)

- [31] Kim YH, Nagata R, Ohkubo A, Ohtani N, Kushibiki S, Ichijo T, Sato S : Changes in ruminal and reticular pH and bacterial communities in Holstein cattle fed a high-grain diet, *BMC Vet Res*, 14, 310 (2018)
- [32] Kudva IT, Stanton TB, Lippolis JD : The *Escherichia coli* O157:H7 bovine rumen fluid proteome reflects adaptive bacterial responses, *BMC Microbiol*, 14, 48 (2014)
- [33] Hu X, Li S, Fu Y, Zhang N : Targeting gut microbiota as a possible therapy for mastitis, *Eur J Clin Microbiol*, 38, 1409-1423 (2019)
- [34] Zeineldin M, Barakat R, Elolimy A, Salem AZM, Elghandour MMY, Monroy JC : Synergetic action between the rumen microbiota and bovine health, *Microb Pathogenesis*, 124, 106-115 (2018)
- [35] Myer PR, Smith TPL, Wells JE, Kuehn LA, Freetly HC : Rumen microbiome from steers differing in feed efficiency, *PLoS ONE*, 10, e0129174 (2015), (online), (<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0129174>), (accessed 2020-07-27)
- [36] Harlow BE, Flythe MD, Kagen IA, Goodman JP, Klotz JL, Aiken GE : Isoflavone supplementation, via red clover hay, alters the rumen microbial community and promotes weight gain of steers grazing mixed grass pastures, *PLoS ONE*, 15, e0229200 (2020), (online), (<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0229200>), (accessed 2020-07-27)
- [37] Elolimy A, Alharthi A, Zeineldin M, Parys C, Loor JJ : Residual feed intake divergence during the preweaning period is associated with unique hindgut microbiome and metabolome profiles in neonatal Holstein heifer calves : *J Anim Sci Biotechnol*, 11, 13 (2020)
- [38] Matthews C, Crisple F, Lewis E, Reid M, O'Toole PW, Cotter PD : The rumen microbiome: a crucial consideration when optimizing milk and meat production and nitrogen utilization efficiency, *Gut Microbes*, 10, 115-132 (2019)
- [39] Kim M, Park T, Jeong JY, Baek Y, Lee HJ : Association between rumen microbiota and marbling score in Korean native beef cattle, *Animals*, 10, 712 (2020)
- [40] Li F, Li C, Chen Y, Liu J, Zhang C, Irving B, Fitzsimmons C, Plastow G, Guan LL : Host genetics influence the rumen microbiota and heritable rumen microbial features associated with feed efficiency in cattle, *Microbiome*, 7, 92 (2019), (online), (doi: 10.1186/s40168-019-0699-1), (accessed 2020-07-27)
- [41] Cherdthong A : Potential use of rumen digesta as ruminant diet - a review, *Trop Anim Health Pro*, 52, 1-6 (2020)
- [42] Higuchi S, Okada H, Takamatsu S, Itoh T : Valve-actuator-integrated reference electrode for an ultra-long-life rumen pH sensor, *Sensors*, 20, 1249 (2020)
- [43] Myers CR, Nealon KH : Bacterial manganese reduction and growth with manganese oxide as the sole electron acceptor, *Science*, 240, 1319-1321 (1988)
- [44] Okamoto A, Tokunou Y, Kalathil S, Hashimoto K : Proton transport in the outer-membrane flavocytochrome complex limits the rate of extracellular electron transport, *Angew Chem Int Edit*, 56, 9082-9086 (2017)
- [45] Naradasu D, Miran W, Sakamoto M, Okamoto A : Isolation and characterization of human gut bacteria capable of extracellular electron transport by electrochemical techniques, *Front Microbiol*, 9, 3267 (2019)
- [46] Holman DB, Timsit E, Alexander TW : The nasopharyngeal microbiota of feedlot cattle, *Sci Rep*, 5, 15557 (2015), (online), (doi: 10.1038/srep15557), (accessed 2020-07-27)
- [47] Cao L, Ma Y, Deng D, Jiang H, Wang J, Liu Y : Electricity production of microbial fuel cells by degrading cellulose coupling with Cr (VI) removal, *J Hazard Mater*, 391, 122184 (2020), (online), (doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.122184), (accessed 2020-07-27)
- [48] Fagherazzi G, Goetzinger C, Rashid MA, Aguayo GA, Huiart L : Digital health strategies to fight COVID-19 worldwide: challenges, recommendations, and a call for papers, *J Med Internet Res*, 22, e19284 (2020), (online), (doi: 10.2196/19284), (accessed 2020-07-27)