

酪農・肉用牛生産と温室効果ガス —メタン排出削減を中心に—

専任研究員 平田郁人
主席研究員 河原林孝由基

〔要　　旨〕

温室効果が相対的に高いメタンを巡っては、昨今、国内外で排出削減に向けた動きが加速している。そこで本稿では国内外の情勢を顧み、農林水産分野の温暖化対策の枠組みと政策の連関を整理したうえで、わが国の酪農・肉用牛生産に焦点を当てメタンを中心とした温室効果ガスの影響と削減に向けた取組み・課題等について考察する。

イノベーションの実現には関連する産業も含めた多面的な研究が必要であり、従来型に加えムーンショット型研究開発の成果等も活用しつつ、産官学による研究体制の構築や連携を強め基礎研究への対応力・応用力の強化が求められる。

温室効果ガス削減が待ったなしの状況にある現在、家畜として飼養する牛などの反すう動物からメタン産生量を減らすことは「地球温暖化の緩和」に貢献すると同時に、畜産経営面で「反すう家畜の生産性向上」が期待できる。

目　　次

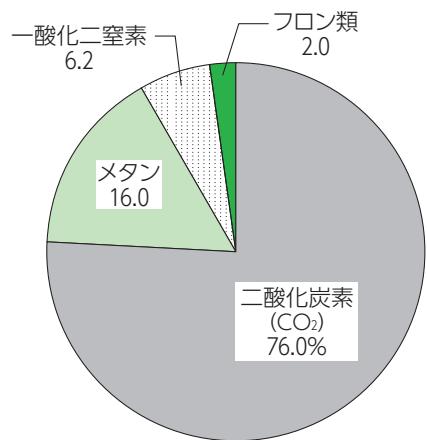
- はじめに
- メタン排出削減を巡る国内外の情勢—
- 1 農林水産分野の温暖化対策の枠組みと各政策の連関
 - (1) 農林水産分野の温暖化対策の枠組み
 - (2) みどり戦略を中心とした各政策の連関
 - (3) 畜産分野の脱炭素化に向けた政策動向
- 2 温暖化による酪農・肉用牛生産への影響
 - (1) 直接的な影響と適応策
 - (2) 間接的な影響
- 3 酪農・肉用牛生産における温室効果ガス削減へ向けた研究開発と課題
 - (1) 二つのアプローチ
 - (2) 従来型の各組織での取組み
 - (3) ムーンショット型研究開発の取組み
- おわりに

はじめに —メタン排出削減を巡る国内外 の情勢—

昨年9月、わが国は「グローバル・メタン・プレッジ」への参加を表明した（第2回日米豪印首脳会合）。世界全体のメタン排出量を国内対策や国際協力により2030年までに20年比30%削減することを目標とするもので、わが国は水田や畜産分野におけるメタン削減技術を通じてイニシアティブを発揮するとしている。昨年11月には、岸田首相が英国グラスゴーで開催されたCOP26（国連気候変動枠組条約第26回締約国会議）の首脳級会合（世界リーダーズ・サミット）に出席し改めてグローバル・メタン・プレッジへの参加をコミットし、COP26では欧米を中心に100を超える国・地域が参加を表明している。

温室効果ガスの中でもメタンは二酸化炭素（CO₂）に次ぐ排出量（CO₂換算で全体の16%）であり、CO₂に次いで地球温暖化への影響が大きいガスである（第1図）。温室効果ガスにはCO₂、メタン、一酸化二窒素（N₂O）、フロン類があり、メタンはCO₂の25倍の温室効果（地球温暖化係数）があるなど、それぞれに特徴がある（第1表）。世界気象機関（WMO）によると、CO₂をはじめメタンなど主な温室効果ガスの大気中の濃度は観測史上最高値を更新し、いずれも増加量が過去10年間の平均を上回る速度である（最新の公表データは20年、この傾向は21年も

第1図 人為起源温室効果ガス総排出量に占めるガス別排出量の内訳



資料 IPCC第5次評価報告書、全国地球温暖化防止活動推進センターウェブサイト
(注) CO₂換算ベース。

続いている）。新型コロナウイルス感染症拡大による影響で年間の排出量が一時的に減少しても、温室効果ガスは大気中に長期間とどまることから排出を実質ゼロに近づけない限り濃度は上昇し気温は上昇し続けることになる。

メタンの人為的な排出源には、石油・天然ガスの開発・漏出に伴うもの、家畜（主に反すう動物）の飼養、水田稲作、廃棄物の処分・埋立てなどがあり、世界全体でみれば家畜の消化管内発酵（いわゆる“げっぷ”）に由来するものが目立っている。翻って、わが国ではこれまでメタン排出削減に向けた取組みを進めてきており、総排出量は米国の約23分の1、EUの約15分の1、人口1人当たりの排出量では米国の約9分の1、EUの約4分の1と欧米に比較し低い水準にある。今般のグローバル・メタン・プレッジは世界全体でのメタン削減目標を設定するもので各国に個別の目標やセクター別の

第1表 温室効果ガスの種類と特徴
国連気候変動枠組条約と京都議定書で取り扱われる温室効果ガス

温室効果ガス	地球温暖化係数 ^(注)	性質	用途・排出源
CO ₂ 二酸化炭素	1	代表的な温室効果ガス。	化石燃料の燃焼など。
CH ₄ メタン	25	天然ガスの主成分で、常温で気体。よく燃える。	稲作、家畜の腸内発酵、廃棄物の埋め立てなど。
N ₂ O 一酸化二窒素	298	数ある窒素酸化物の中で最も安定した物質。他の窒素酸化物(例えは二酸化窒素)などのような害はない。	燃料の燃焼、工業プロセスなど。
HFCs ハイドロフルオロカーボン類	1,430など	塩素がなく、オゾン層を破壊しないフロン。 強力な温室効果ガス。	スプレー、エアコンや冷蔵庫などの冷媒、化学物質の製造プロセス、建物の断熱材など。
PFCs パーフルオロカーボン類	7,390など	炭素とフッ素だけからなるフロン。 強力な温室効果ガス。	半導体の製造プロセスなど。
SF ₆ 六フッ化硫黄	22,800	硫黄の六フッ化物。 強力な温室効果ガス。	電気の絶縁体など。
NF ₃ 三フッ化窒素	17,200	窒素とフッ素からなる無機化合物。 強力な温室効果ガス。	半導体の製造プロセスなど。

資料 全国地球温暖化防止活動推進センターウェブサイト

(注) 地球温暖化係数とは、温室効果ガスそれぞれの温室効果の程度を示す値。ガスそれぞれの寿命の長さが異なることから、温室効果を見積もる期間の長さによってこの係数は変化する。ここでの数値は、京都議定書第二約束期間における値。

コミットメントを求めるものではないが、日本政府としては昨年10月に改定した国の総合計画である「地球温暖化対策計画」(閣議決定)に基づき対策・施策を強力に推進していくことで貢献するとしている。

わが国のメタン排出削減の取組状況をみると、19年度において1990年度比約35%削減、13年度比で約5.4%削減しており、「地球温暖化対策計画」では30年度までにメタン排出量を13年度比11%削減(19年度比6%削減)することを目標に掲げている。農林水産分野からの温室効果ガス排出はCO₂を含めたガス全体でみればわが国の総排出量の3.9%であるが、ガスの種類別にみるとCO₂34.1%、メタン46.2%、一酸化二窒素19.7%とCO₂よりもメタンの排出割合が大きいことにその特徴がある(第2図)。メタン

の主な排出源としては、家畜の消化管内発酵・排せつ物管理と水田稲作とでほぼ半々(45:55)となっている。家畜の排せつ物管理では一酸化二窒素も排出することから、家畜の飼養によって排出される温室効果ガスはメタンを含めて農林水産分野全体の3割弱(28.6%、燃料燃焼によるCO₂排出分を除く)を占めており、その半分以上(農林水産分野全体では15.9%)が家畜の消化管内発酵によるメタン排出である。

消化管内発酵によってメタンを排出するのは主として反すう動物であり、その代表が牛である。牛は四つの胃を持ち、牧草やトウモロコシなどの飼料を飲み込んだ後、胃から口に戻して再び咀嚼する反すうを繰り返す。四つの胃の中で最大の第1胃(ルーメン)には様々な大量の微生物が存在し、

いわば“発酵タンク”となっており分解が難しいセルロースなどの繊維質も消化しエネルギーとしている。この過程（嫌気性発酵）でメタンを含むガスが発生し、あい氣（げっぷ）となって牛の体外に排出されるのである。家畜の飼養では、牛（乳用牛、肉用牛）、豚、鶏（採卵鶏、ブロイラー）といったわが国的主要家畜の中で反する動物は牛に限られることから、メタン排出削減を中心とした温暖化対策では酪農・肉用牛生産への対策・施策が主となる。なお、世界的にみれば、牛と同様に反する動物である羊やヤギについても対策・施策が求められていることを付言しておく。

そこで本稿ではメタン排出削減を巡る国内外の情勢を顧み、わが国の酪農・肉用牛

生産に焦点を当てメタンを中心とした温室効果ガスの影響と削減に向けた取組み・課題等について考察することしたい。まずその前段として、農林水産分野の温暖化対策の枠組みと各政策の検討状況やその連関を次に整理する。

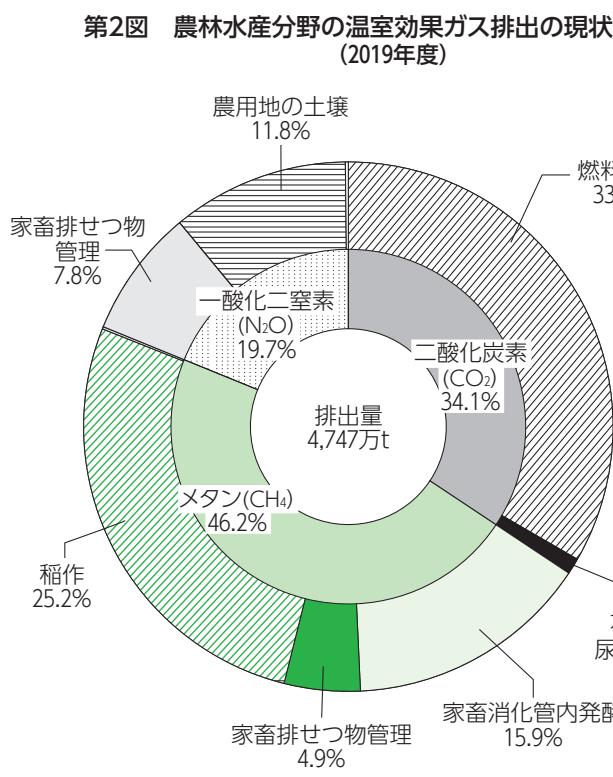
（注1）外務省・農林水産省・経済産業省・環境省「グローバル・メタン・プレッジ（GMP）に係る考え方」（21年9月25日）から一部援用。

1 農林水産分野の温暖化対策の枠組みと各政策の連関

（1）農林水産分野の温暖化対策の枠組み

20年10月、わが国は50年までにCO₂をはじめとする温室効果ガスの排出を全体としてゼロにするカーボンニュートラルを目指すことを宣言した。昨年4月には、30年度において温室効果ガス46%削減（13年度比）を目指すこと、さらに50%の高みに向けて挑戦を続けることを表明している。排出を全体としてゼロというのは、人為的な温室効果ガスの排出量から植林・森林管理等による吸収量を差し引いて実質的にゼロにするということである。この新たな温室効果ガス削減目標を踏まえ、昨年10月に国の総合計画である「地球温暖化対策計画」を改定（前出）し、削減目標の裏づけとなる対策・施策を記載し目標実現への道筋を描いている。

こうした政府全体の取組みに加え、



農林水産分野の対策としては昨年5月に決定した「みどりの食料システム戦略」（農林水産省決定。以下「みどり戦略」という）等を踏まえ、昨年10月に「農林水産省地球温暖化対策計画」（以下「農水省温対計画」という）を改定（農林水産省決定）した。同計画では、みどり戦略が掲げる「50年までに農林水産業のCO₂ゼロエミッション化の実現」および50年カーボンニュートラルを目指し、30年（計画期間は国の総合計画との整合を図り30年度まで）に向けて既存の技術を最大限活用し、取組みの拡大・普及を加速化させることを狙いとしている。

農水省温対計画は気候変動の緩和策（温室効果ガスの排出抑制等）に関するものであり、同時改定した気候変動の適応策（気候変動の影響による被害の回避・軽減等）に関する「農林水産省気候変動適応計画」と一体となって、今後、農林水産分野の地球温暖化対策を最大限推進していくことになる。

（2）みどり戦略を中心とした各政策の連関

昨年10月にわが国は国連に温室効果ガス削減目標「日本のNDC（国が決定する貢献）」を提出し、50年カーボンニュートラル、30年度46%削減（13年度比）は国際公約となつた。その中で、「NDCの明確性、透明性及び理解のための情報」として、「計画プロセス」における「NDCの作成に関するベストプラクティス及び経験」で「食料・農林水産業においては、『みどりの食料システム戦略』に基づき、イノベーションにより生産

力向上と持続性の両立の実現を目指す」としている。岸田首相はCOP26の世界リーダーズ・サミットにおいて日本の温室効果ガス削減目標（NDC）をコミットし、先述のとおりグローバル・メタン・プレッジへの参加についてもコミットしている。

みどり戦略は農水省温対計画のほか、昨年6月に決定した「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」（関係府省庁が連携して策定・改定。以下「グリーン成長戦略」という）、「地域脱炭素ロードマップ」（国・地方脱炭素実現会議決定）、「経済財政運営と改革の基本方針2021」「成長戦略実行計画」（閣議決定）にも位置づけられている。官邸サイドでは「農林水産業・地域の活力創造本部」（本部長：内閣総理大臣、副本部長：内閣官房長官、農林水産大臣）が引き続き農林水産政策の司令塔となるが、昨年12月に「農林水産業・地域の活力創造プラン」を改定（同本部決定）し、みどり戦略に基づく新たな取組内容を盛り込んだ。

みどり戦略の実現に向けては、基本理念を法定化し環境負荷低減の取組みを継続的・安定的に支援すべく、その枠組みとして「環境と調和のとれた食料システムの確立のための環境負荷低減事業活動の促進等に関する法律」（みどり戦略法）が22年4月今通常国会で成立をみた。みどり戦略に掲げる目標実現に向けて取り組む農林漁業者や事業者等を税制面や金融面で支援していく。法律の公布から6か月以内に施行し、施行から5年を目途として見直すこととなっている。

以下では、畜産分野の脱炭素化に向けた気候変動の緩和策を中心に対策・施策をみていくこととしたい。

(3) 畜産分野の脱炭素化に向けた政策動向

みどり戦略が掲げる「50年までに農林水産業のCO₂ゼロエミッション化の実現」は農水省温対計画の改定・実践を通じて実現していくとしており、同計画では50年カーボンニュートラルを見据え30年度までの目標・具体的取組みについて工程表を示している。その中で畜産関連をみると「畜産分野の温室効果ガス排出削減対策」として、「家畜改良やICTの活用等による飼養管理の改善を通じた生産性の向上」「温室効果ガス排出の少ない家畜排せつ物管理方法の普及」「アミノ酸バランス改善飼料の給餌の普及」を目標に置いている。工程表ではみどり戦略と関連づけをし、具体的取組みでは施策として「強制発酵等、温室効果ガス排出の少ない家畜排せつ物管理方法の普及や、豚等におけるアミノ酸バランス飼料の給餌の普及等」「家畜改良による増体性などの遺伝的能力の向上等やICTの活用等による飼養管理の改善を通じた生産性向上」を実施するとし、「ICT等を活用した飼養管理技術の高度化、ルーメン微生物の制御技術の開発」「メタン削減飼料の開発」の技術開発を行うとしている（第3図）。

脱炭素化に向けた産業政策全体をみれば、グリーン成長戦略において14の重点分野の一つとして「食料・農林水産業」が位置づ

けられており、その中で工程表を示し「家畜由来メタン・N₂Oの排出削減」に取り組むとしている。これらの対策・施策にはイノベーションの創出を必要とするものもあり、科学技術・イノベーション政策として20年1月に策定した「革新的環境イノベーション戦略」（統合イノベーション戦略推進会議決定）において、農林水産分野では「農畜産業からのメタン・N₂O排出削減」について新たな技術開発に取り組むとしている。イノベーションを創出していくには畜産農家やJAグループといった生産者サイドの取組みだけではなく、関係する事業者、研究機関、行政も含めた分野横断的な取組みが求められる。

なお、酪農・肉用牛生産に関連する施策の運用指針となる「酪農及び肉用牛生産の近代化を図るための基本方針」（酪肉近）では、家畜排せつ物の適正処理とエネルギー利用としてメタン発酵処理施設での発電や熱等のエネルギー生産、メタン発酵で得られる消化液（発酵済み残さ）の場散布を想定するが、メタン排出削減そのものへの直接的な言及はない。酪肉近は「酪肉振興法」（酪農及び肉用牛生産の振興に関する法律）に基づきおおむね5年ごとに見直しをし、策定することとなっており、現行の酪肉近は20年3月に策定されたもので以降のカーボンニュートラル宣言等の情勢変化を踏まえ、次回策定時にはメタン排出削減についても重要なテーマになるだろう。以上、第4図に酪農・肉用牛生産を中心に農林水産分野の温暖化対策の枠組み、主要政策とその連

第3図 「畜産分野の温室効果ガス排出削減対策」工程表

		(年度)																
		2020	2021	2022	2023	2024	2025	～	2030	2031～								
目標		・家畜改良やICTの活用等による飼養管理の改善を通じた生産性の向上 ・温室効果ガス排出の少ない家畜排せつ物管理方法の普及 ・アミノ酸バランス改善飼料の給餌の普及																
温室効果ガス排出量が少なく、低成本な家畜排せつ物処理施設の開発・普及		研究開発								実証								
AIやICT等を活用した飼養管理技術の高度化		研究開発								実証								
家畜排せつ物由来のN ₂ Oを削減するアミノ酸バランス改善飼料の開発		研究開発								実証								
みどり戦略	牛げっぷ(消化管内発酵)由来メタン排出を抑制する飼料の開発・ルーメン環境制御技術	研究開発								実証								
	微生物機能を活用した乳用牛のメタン削減生産システムの開発	研究開発								実証								
	養豚汚水処理由来N ₂ Oを削減する炭素繊維リアクター	研究開発								実証								
	飼料利用性の高い家畜の改良(少ない餌でよく太る等)	研究開発																
	強制発酵等、温室効果ガス排出の少ない家畜排せつ物管理方法の普及や、豚等におけるアミノ酸バランス飼料の給餌の普及等																	
	家畜改良による増体性などの遺伝的能力の向上等やICTの活用等による飼養管理の改善を通じた生産性向上																	
	ICT等を活用した飼養管理技術の高度化、ルーメン微生物の制御技術の開発																	
具体的な取組		メタン削減飼料の開発																

【参考:関連計画等】

- ・2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略
- ・みどりの食料システム戦略

【工程表の見方】

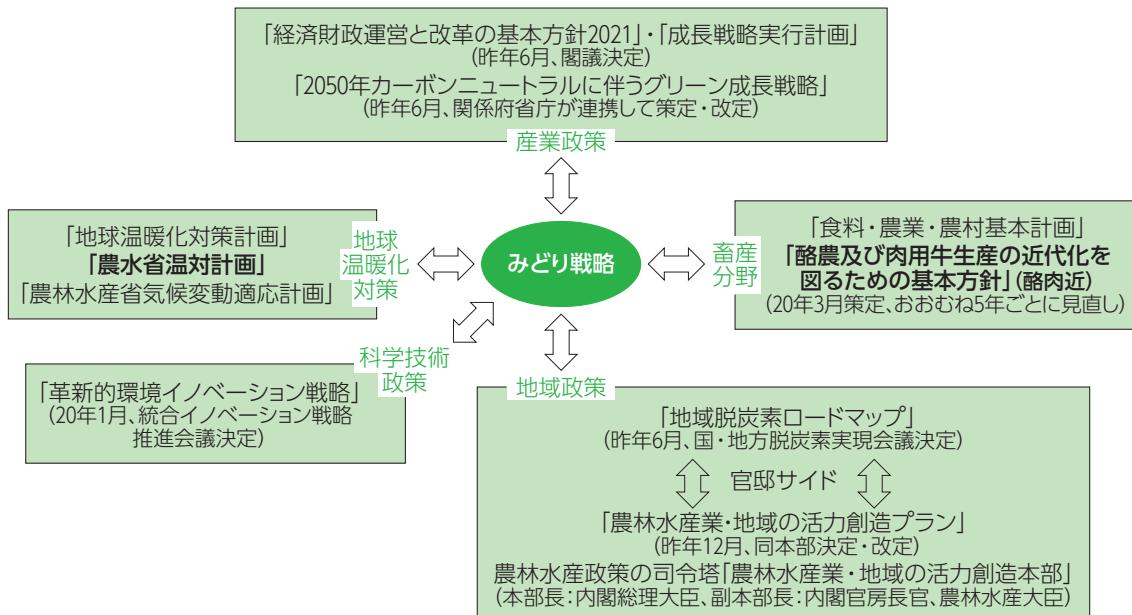
- ・みどり戦略:「みどりの食料システム戦略」における2050年までの技術の工程表の中の温室効果ガス削減分野の技術・取組内容を抜粋。
- ・具体的な取組:矢印の内容は、以下のとおり。

□:施策

■:技術開発

出典 農林水産省「農林水産省地球温暖化対策計画」(別表)工程表

第4図 酪農・肉用牛生産の温暖化対策の枠組み
—主要政策とその連関—



資料 筆者作成

関について改めて整理しておく。

それでは、本論である酪農・肉用牛生産におけるメタンを中心とした温室効果ガスの影響と削減に向けた取組み・課題等について次に考察する。

2 温暖化による酪農・肉用牛生産への影響

温室効果ガスの排出量増加により、地球の温暖化が促進され、それが気候変動にも影響していると想定される。その乳・肉用牛への影響は、直接的な影響と間接的な影響の二つに大別される。

(1) 直接的な影響と適応策

生産への直接的な影響として、温暖化そのものの牛個体への影響があげられる。乳・

肉用牛は高温に弱く、夏季の暑熱で家畜生産性が低下する。具体的には、へい死、増体不良、搾乳量減少、受胎率低下等が発生する。従来、夏場に酷暑となる地域では、牛舎屋根に散水装置を取り付け、日中稼働させて気化熱により屋根の温度を下げ、屋根から乳・肉用牛への熱放射を防ぐケースはあった。しかし近年の気温上昇には効果が不十分となり、牛舎の軒先に換気扇を設置し乳・肉用牛へ風を送ることや、ミスト散布を行うことで、直接個体の健康を保つケースも増加した。また、飲み水を冷水にすることや、つなぎ牛舎では水分蒸散が多い牛の肩腰へのスポット冷房等の研究も行われている。ただし、これらの装置は電気を大量消費するので、発電・動力源が温室効果ガスを排出するものであれば、更なる温暖化を招き悪循環に陥る懸念がある。

牧草も栄養価が高い寒地型永年牧草（北海道・東北・高地）の栽培面積が縮小し、相対的に栄養価の低い暖地型牧草（関東以西）が拡大することで、乳・肉用牛の栄養状態の変化が懸念される。加えて、温暖化は牛の異常産を引き起こす懸念もある。それは熱帯・亜熱帯に分布し、蚊等を媒介に人や家畜に感染するアルボウイルス類が、九州地域以外へも拡大する懸念があるからである。

温暖化以外にも、気候変動による豪雨・長雨や干ばつ等の拡大・頻発の影響が考えられる。酪農・肉用牛生産のための主原料であるトウモロコシ生産が、今世紀に入り不安定になっている。国際需給を反映するシカゴ市場のトウモロコシ価格の水準は、バイオ燃料向けの需要拡大や新興国の買入れ増により、07年以降上方へシフトするとともに、米国中西部の長雨（08年）、ロシアの干ばつ（10年）、米国56年振りの大干ばつ（12年）、アルゼンチンの干ばつ（20年）、ブラジルの干ばつ（21年）、およびこれらに伴う投機資金の流入により、約20年の間に5回ほど高騰している（第5図）。これにより、

輸入飼料に相当程度依存するわが国酪農・肉用牛経営は、一時深刻な事態になりかけた。なお、国産飼料作物や牧草も、異常気象に伴う生育不順等の被害を受け、代替飼料の調達に苦慮するなど、気候変動は乳・肉用牛の飼養環境に影響を及ぼしていると考えられる。

（2）間接的な影響

上記の乳・肉用牛への直接的影響や温室効果ガス削減に向けた対策により、生乳や牛肉の生産・流通コストが上昇し、生産者の経営を圧迫することが懸念される。例えば、再生可能エネルギーへの転換により生じる当面の追加的な費用負担がある。加えて、今後他産業でも、一層の温暖化対策や電気自動車等の新製品の導入により温室効果ガス削減に注力するであろう。仮に酪農・肉用牛生産がこれまで同様の対応をしていると、他産業の温室効果ガス削減スピードについていけず、乳・肉用牛生産による温室効果ガス排出割合が相対的に高まることとなる。このとき、乳・肉用牛生産に良質なタンパク質の供給源という社会的意義があるにもかかわらず、環境面においては、生産の意義が低下していく可能性がある。生産の意義が薄れれば、乳・肉用牛生産に対する行政や金融機関からの支援も受けにくくなり、酪農・肉用牛経営が更に厳しくなるといった悪循環に陥ることが心配される。

また、既に流通している豆乳をはじめアーモンド等を原料にした植物乳や、大豆・

第5図 シカゴ市場のトウモロコシ価格推移



ジャガイモ等による代替肉の需要は、健康志向とも相まって増加している。同様に、可食部の細胞を体外で培養する培養肉の生産・販売も拡大するだろう。今後、従来の牛乳・乳製品や牛肉がどの程度これらに置き換わるかは不明であるが、畜産部門における温室効果ガス排出削減を推し進めていかなければ、需要の代替が進む可能性は高まっているだろう。

3 酪農・肉用牛生産における温室効果ガス削減へ向けた研究開発と課題

(1) 二つのアプローチ

温室効果ガス削減は、基本的に研究開発に依存しているが、その取組みは二つに大別される。一つめの取組みは、従来型の取組みである。わが国では2000年前後から、国や県の農業試験研究機関、大学、企業が、家畜由来の温室効果ガス、すなわち消化管内発酵に由来するメタン、排せつ物由來のメタンや一酸化二窒素削減の研究に取り組んできた。これらは、個別組織が基礎的で主要な研究を行い、隨時プロジェクトや共同研究を行う従来型のスタイルで進められている。

もう一つの取組みは、ムーンショット型研究開発制度に基づく研究である。これは重要政策会議の一つで、内閣総理大臣が議長である総合科学技術・イノベーション会議（Council for Science, Technology and Innovation、以下「CSTI」という）において

制度化された。本制度を所管する内閣府では「我が国が抱える様々な困難な課題の解決を目指し、失敗を許容しつつ基礎研究領域の独創的な知見・アイデアを取り入れた挑戦的な研究開発を推進する」と説明している。18年度補正予算で1千億円が基金造成され、各年度にも予算計上されつつ最長10年間プロジェクトを支援する。ムーンショット型研究開発の九つの目標はCSTIが決定（目標7は内閣に設置の健康・医療戦略推進本部が決定）することになっている（第2表）。各目標にはプログラムディレクターが任命、配置され、目標内のプロジェクト構成や資源配分等を管理し、最終的に研究推進法人が全体を俯瞰した研究ポートフォリオを決定する（第6図）。

農業・食料関係の目標5では国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構（以下「農研機構」という）の生物系特定産業技術研究支援センターが、研究推進法人を担っている。目標5の10のプロジェクトの中に、家畜由来の温室効果ガス排出削減が組み込まれている。

(2) 従来型の各組織での取組み

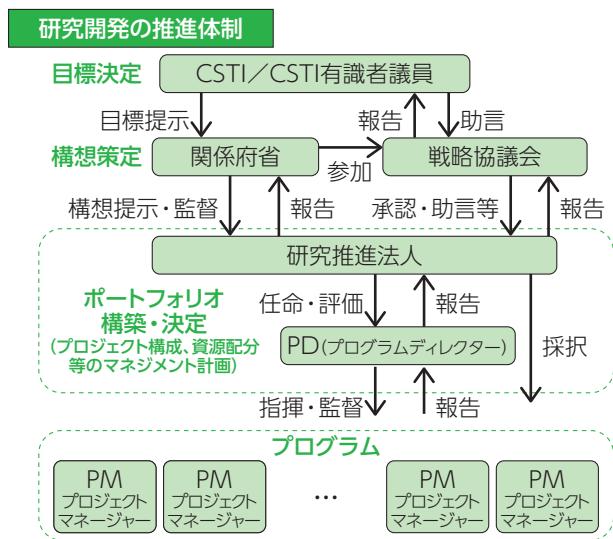
温室効果ガス排出削減に向け、国・県の家畜改良機関が家畜生産性の向上（飼料効率・繁殖効率の向上、供用期間長期化、出荷期間短縮等）に取り組むとともに、乳・肉用牛各々の中で温室効果ガス排出の少ない牛同士の交配による改良も進められている。大家畜の改良には時間を要するので、短期間で大きな成果を得ることは難しいが、長期

第2表 ムーンショット型研究開発の目標

目標の内容		研究推進法人 (全て国立研究開発法人)
目標1	2050年までに、人が身体、脳、空間、時間の制約から解放された社会の実現	科学技術振興機構
目標2	2050年までに、超早期に疾患の予測・予防をすることができる社会を実現	科学技術振興機構
目標3	2050年までに、AIとロボットの共進化により、自ら学習・行動し人と共生するロボットを実現	科学技術振興機構
目標4	2050年までに、地球環境再生に向けた持続可能な資源循環を実現	新エネルギー・産業技術総合開発機構
目標5	2050年までに、未利用の生物機能等のフル活用により、地球規模でムリ・ムダのない持続的な食料供給産業を創出	農業・食品産業技術総合研究機構 生物系特定産業技術研究支援センター
目標6	2050年までに、経済・産業・安全保障を飛躍的に発展させる誤り耐性型汎用量子コンピュータを実現	科学技術振興機構
目標7	2040年までに、主要な疾患を予防・克服し100歳まで健康不安なく人生を楽しむためのサステイナブルな医療・介護システムを実現	日本医療研究開発機構
目標8	2050年までに、激甚化しつつある台風や豪雨を制御し極端風水害の脅威から解放された安全安心な社会を実現	科学技術振興機構
目標9	2050年までに、こころの安らぎや活力を増大することで、精神的に豊かで躍動的な社会を実現	科学技術振興機構

資料 筆者作成

第6図 ムーンショット型研究開発の推進体制



出典 内閣府科学技術・イノベーション推進事務局「ムーンショット型研究開発制度の概要」

的には温室効果ガス排出削減に有効である。しかし、家畜由来の温室効果ガス排出の過半を占める消化管内発酵によるメタン削減は難しい。なぜなら、消化管内微生物によ

る牧草の纖維質等の発酵（栄養化）を阻害することなく、メタン産生を抑制しなければならないからである。

このため、メタン産生の抑制のみを行う飼料添加物については世界的に研究開発が進められている。わが国では11年からいち早く出光興産株式会社がメタンを20~40%削減するアナカルド酸を主成分とするカシューナッツ殻液 (Cashew Nut Shell Liquid、以下「CNSL」という) を商品化している。さらに、北海道大学ではこのCNSLを用い、研究室での人工消化管で最大70%程度のメタンが削減されることが確かめられた（小林（2013））。海外でも、オランダの国際的化学企業Royal DSMが飼料添加物を開発し、乳牛のメタンを27~40%削減できることを試験で実証している。同社は21年にはニュージーランドの酪農協同組合フォンテ

ラ（Fonterra）と、低メタン排出畜産業への移行促進に向け、協力協定を締結した。このほか、オーストラリアやスウェーデンでの「カギケノリ」という赤い海藻を材料とした飼料添加物、スイスではスパイスの「クローブ」と「コリアンダー」の実を使用した添加物の販売に向け研究している。さらに、米国でもメタンを削減する添加物を研究しているが、いずれも高水準でのメタン削減の実用化には、今しばらく時間を要するとみられる。

一方で、排せつ物は堆肥化を通じ耕種農業との関係が深く、比較的研究が進んでいる分野である。^(注2) 堆積発酵を地下から空気を噴き上げる強制通気式堆肥発酵に変更すれば、メタン排出をほとんど削減することができる。また、酪肉近で生産基盤強化のための具体策として示されている家畜排せつ物のメタン発酵処理施設での発電や熱等のエネルギー利用については、メタン排出削減技術としても有用である。密閉した発酵槽でふん尿を嫌気性発酵させて得られたメタンガスを燃焼し発電（メタン発酵ガス化バイオマス発電。以下「畜産バイオマス発電」という）するもので、再生可能エネルギーで発電した電気として固定価格買取制度（買取価格39円/kWh税抜き・期間20年）の対象になっている。発酵済み残さは消化液と呼ばれ液肥（有機肥料）として利用可能である。畜産バイオマス発電は固定価格買取制度のもと経済性のある事業として成立する素地が整ったものの、北海道を中心に一部での取組みにとどまっている。^(注3) 河原林（2017c）

では、畜産バイオマス発電の仕組み等を概説したうえで、酪農経営での実践事例を基に事業モデルを考察し全国展開に向けた論点を整理しており、事業化のポイントとして、①安定的な事業収入の確保には発電の燃料となるメタンガス（“量”と“質”的問題）の確保、②処理後残さ（消化液）処分先の見通しがあることなどを指摘している。^{（注4）}

（注5）
一酸化二窒素抑制の研究も行われている。
堆肥発酵時に亜硝酸酸化細菌を含む完熟堆肥を添加することや、炭素繊維担体を用いた生物膜法により、従来の排出量の80%を削減できることが確認されている（白石ほか（2018））。農研機構では一層の一酸化二窒素削減を目指し排せつ物中の窒素含有量を減らすため、大豆かす等のタンパク質を最小限にし、これにより不足するリジン等（必須アミノ酸）を添加したアミノ酸バランス飼料の開発・改良に取り組んでいる。なお、22年3月に農研機構と農林中央金庫間で「農業・食品産業における地球温暖化問題の解決に向けた連携協定」を締結し、温室効果ガス削減努力の適切な算定手法や削減技術の普及等を促すこととしている。

農業分野からの温室効果ガス排出割合はわが国では前述のとおり比較的低いが、世界的には高い水準にあり、農業分野での各国との温室効果ガス削減にかかる連携や、技術面等でのわが国のリーダーシップの発揮が求められる場面も想定される。現時点では、わが国が2000年頃から研究開発してきた、家畜を対象としたメタン排出の測定技術等の指導・支援が考えられよう。

(注2) 排せつ物堆肥化過程におけるメタン産生は主に二つの産生経路がある。一つは酢酸資化性メタン古細菌による経路であり、もう一つは酢酸酸化細菌による水素を用いたCO₂還元による産生経路である。いずれも嫌気条件下で働くDNAを包む核を持たない原核生物が、牛等の家畜排せつ物を分解する過程で産生される。

(注3) 家畜ふん尿を原料にしたメタンガスを燃焼する際にCO₂が発生するが、これは家畜が餌として食べた植物に由来するものであり、燃焼で発生するCO₂の量が植物がその成長過程で光合成により吸収した量を超えない限り、大気中のCO₂量の増減に影響は与えないという考え方(カーボンニュートラル)に基づくもの。

(注4) 農林水産省では、みどり戦略の実現に向けて農林水産業者等が脱炭素化の実践に取り組む際の参考資料「フードサプライチェーンにおける脱炭素化技術・可視化(見える化)に関する紹介資料」(21年6月公表)を作成しており、畜産バイオマス発電では河原林(2017c)が出典・参考情報として採用されていることから、詳しくは当該論文を参照されたい。

<https://www.nochuri.co.jp/report/pdf/n1710re2.pdf>

(注5) 排せつ物堆肥化過程による一酸化二窒素の産生も、堆肥内の窒素循環において二つの産生経路がある。一つは好気条件下でアンモニアから、アンモニア酸化細菌により亜硝酸になる過程で一酸化二窒素が産生され、もう一つは、一酸化窒素が嫌気条件下において脱窒(窒素化合物を分子状窒素として大気中へ放散させる作用)の過程で、一酸化二窒素が産生され排出される。一酸化二窒素は、好気条件下、および嫌気条件下いずれでも産生される。

(3) ムーンショット型研究開発の取組み

ムーンショット型研究開発の目標5「2050年までに、未利用の生物機能等のフル活用により、地球規模でムリ・ムダのない持続的な食料供給産業を創出」のプロジェクトの一つに「牛ルーメン・マイクロバイオーム(微生物群)完全制御によるメタン80%削減に向けた新たな家畜生産システムの実現(FS採択課題)^(注6)」が位置づけられており、そこでは難題の消化管内発酵によるメタン削

減にテーマが絞られている。本プロジェクトの基本的な方針は、消化管内に共生する微生物の最適化あるいは完全制御を図ることで、消化管内発酵によるメタン産生を抑制するとともに飼料エネルギー損失を削減して、牛の乳肉生産効率の10%向上を目指している。

本プロジェクトで、メタンを強力に抑制する飼料や、消化管内微生物によるメタン産生を最小化する新たな調製物を開発しようとしている。そして、これらの効能を確認するために、消化管内にカプセルを留置し、センサーにより発酵状況等をリアルタイムで体外へ発信するスマートピルを利用する。受信した牛の個体別発酵データをスーパーコンピュータでAI解析し、飼養管理を含めた精密給餌プログラムの提案につなげる。これにより、個体別に消化管内微生物とVFA(揮発性脂肪酸)を制御・管理できる飼養管理システムが確立されるかもしれない。^(注7)この管理システムを拡充および普及させることで、メタン削減と乳肉生産量増加の世界的展開を目指している。

プロジェクトマネージャーは北海道大学小林泰男教授である。研究担当機関の役割は、同大学が飼料添加物等のメタン削減資材の科学的探索、一般社団法人日本科学飼料協会が科学的知見に基づいた飼料化、農研機構が消化管内微生物の制御戦略の策定、東京大学と国立研究開発法人物質・材料研究機構がスマートピルの開発であり、それぞれがメタン削減において確固とした役割を担える研究・技術化基盤を有している。

このプロジェクトの連携機関として、出光興産株式会社が、既に製品化されているメタン抑制剤CNSLの提供と海外展開を含む更なる普及を目指し、株式会社扶桑コーポレーションが新規メタン抑制資材候補を提供し、飼料化プロセスおよび製造ラインの確保では全国農業協同組合連合会、明治飼糧株式会社、雪印種苗株式会社が名を連ねている。また、海外とは北海道大学がカセサート大学（タイ）、イリノイ大学（米国）と、農研機構がワーゲニンゲン大学（オランダ）^(注8)、SRIインターナショナル（米国）と連携している。

さらに、小林教授はムーンショット型研究開発の目標達成に向けた工程のなかで、乳・肉用牛に対し、もう一つのビジョンを持っている。それは、乳・肉用牛の消化管内からのメタンの排出量を大幅に削減し、同時に穀物飼養から牧草飼養中心に切り替え飼料用穀物は食用にすることである。これにより国連食糧農業機関（FAO）が懸念している温室効果ガス削減と世界的食料不足解消のジレンマ解決に向けた貢献が期待されるところである。本研究開発は、これらの目標やビジョンを達成することで、酪農・肉用牛経営が改めて環境にやさしく、かつ牛乳・乳製品や牛肉が良質なタンパク質の供給源として認識されることを標ぼうしている。ただし、この転換過程で穀物飼養の牛肉から若干淡白な牧草飼養の牛肉を食べことになるため、牛肉食に

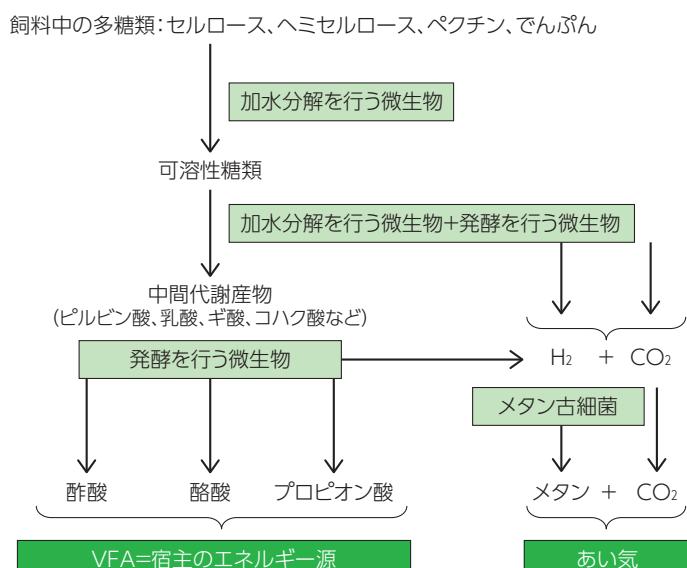
についての価値観や調理方法を転換することが必要になろう。

(注6) FSとは実行可能性調査 (Feasibility Study)のことであり、現段階では文字どおりプロジェクトの実行可能性を調査する研究として採択されたもの。

(注7) 消化管内のメタン古細菌の作用により、メタンがあい気となって体外排出されるということは、摂取された飼料成分の一部が体外に放出されるということであり、飼料効率が妨げられているということを意味する。乳・肉用牛の主要なエネルギー源は、微生物の働きにより產生される揮発性脂肪酸 (VFA) であるが、その一部がメタン古細菌の作用によるメタン產生の影響で減少する（参考図）。

(注8) SRIインターナショナルは、70年にスタンフォード大学から独立した研究機関であり、産業界等と多くの共同研究実績がある。iPhoneに搭載されバーチャルアシスタントになったSiriは、07年に分離した同研究所の人工知能研究から誕生したものである。

(参考図) ルーメン内でのメタン产生メカニズム



出典 RuminantDigestiveSystem.comウェブサイト、筆者一部修正

おわりに

これまでみてきたのは、畜産農家内の生産過程とりわけ消化管内のメタン排出削減と、排せつ物由来のメタンと一酸化二窒素の削減に関する最近の動向であった。翻って、畜産は他産業との連関が強く、飼料用穀物生産（主に国外）、飼料輸送（国内外）、生乳・食肉処理加工、小売店への配送等、乳・肉用牛関連のサプライチェーン全体の中で温室効果ガスが発生している。したがって、家畜飼養にかかる温室効果ガス削減の研究だけでなく、関連する産業も含めた多面的な研究が必要である。しかし、研究予算や人的資源の確保が十分とは言えず、かつ短期的成果が見込めるテーマへの絞込みがあった一時期の政策も影響し、国公立の研究機関等といった従来型の各組織での取組みには限界がある。そこで、こうしたムーンショット型研究開発の成果等も活用しつつ、産官学による研究体制の構築や連携を強め基礎研究への対応力・応用力を強化し、酪農・肉用牛の生産・流通全体を網羅する温室効果ガス排出削減に取り組むことが求められると考えられる。

気候変動を巡る情勢を顧みると温室効果ガス削減は待ったなしの状況にあり、今後ますますの削減努力が求められる。温室効果ガスは大気中に長期間とどまるが、メタンはCO₂より温室効果（地球温暖化係数）が高いものの、CO₂ほど超長期にわたり大気中に滞留しない（CO₂の100年スケールに対し

メタンは10年程度）。つまり、CO₂排出量削減の効果が実際に気候変動の緩和として現れるには相当の時間がかかるが、メタン排出量削減の取組みを進めれば当面の気候変動での緩和への効果が期待できる。COP26でグローバル・メタン・プレッジを主導した欧州委員会のフォン・デア・ライエン委員長はその意義を「メタンは素早く削減できる温暖化ガスの一つだ。削減することで、気候変動の影響をすぐに遅らせることができる」と語っている（21年11月2日ロイター配信）。気候変動対策でもメタンは今後ますます注目されるだろう。

最後に、反すう動物にとって飼料を分解する過程でメタンを排出することは、摂取した飼料のエネルギーの一部を損なうことであり、家畜として飼養する反すう動物からのメタン産生量を減らすことは「地球温暖化の緩和」のみならず「反すう家畜の生産性向上」にもつながることを今一度強調しておきたい。

＜参考文献＞

- ・浅沼成人（2001）「ルーメン微生物の代謝制御によるメタンの生成の抑制」『日本比較内分泌学会ニュース』第103号、31～38頁
- ・長田隆（2016）「家畜排せつ物処理過程における温室効果ガスの発生と抑制」『畜産環境情報』第67号、1～10頁
- ・長田隆（2021）「日本、世界の畜産業のGHG排出削減の必要性（講演動画ダイジェスト版）」（農業・食品産業技術総合研究機構 研究成果発表会「地球温暖化対策の要請に応える日本の家畜生産」）
- ・河原林孝由基・村田武（2015）「JAが取り組める再生可能エネルギー——畜産バイオマス発電の実態と事業化をめぐる諸課題——」『にじ—協同組合研究誌—』第650号、158～170頁
- ・河原林孝由基（2016）「酪農経営を下支えする畜産

バイオマス発電と再生敷料—北海道江別市・(有)小林牧場の取組み—』『農中総研 調査と情報』web誌、11月号、14~15頁

- ・河原林孝由基 (2017a) 「耕畜連携による液肥利用と高付加価値化—千葉県いすみ市・(有)高秀牧場の取組みを中心にして—』『農中総研 調査と情報』web誌、5月号、22~23頁
- ・河原林孝由基 (2017b) 「JAが『電力の地産地消』をリード—JA土幌町でのエネルギー地域循環型農業の実践—』『農中総研 調査と情報』web誌、9月号、20~21頁
- ・河原林孝由基 (2017c) 「再生可能エネルギーによる農業経営の多角化—畜産バイオマス発電の可能性—』『農林金融』10月号、22~38頁
- ・河原林孝由基 (2019) 「第7章 ドイツ・バイエルン州にみる家族農業経営」村田武編著『新自由主義グローバリズムと家族農業経営』筑波書房、211~237頁
- ・河原林孝由基 (2020a) 「2020年を迎えるにあたり2015年を振り返る—SDGs時代にパリ協定がいよいよ本格スタート—』『農中総研 調査と情報』web誌、1月号、22~23頁
- ・河原林孝由基 (2020b) 「再生可能エネルギーと内発の発展—SDGsと協同組合の視点を交えて—』『農林金融』3月号、26~46頁
- ・河原林孝由基 (2020c) 「固定価格買取制度は抜本的見直しへ—再生可能エネルギーに『地域活用要件』を導入—』『農中総研 調査と情報』web誌、7月号、16~17頁
- ・河原林孝由基 (2021) 「気候変動を巡る情勢と脱炭素化に向けた政策動向—温室効果ガス実質ゼロ宣言のインパクト—』『農林金融』3月号、42~58頁
- ・国際連合食糧農業機関 (FAO) 編 (2017) 『気候変動と農業、食料安全保障』(国際農林業協働協会訳)世界食料農業白書2016年報告
- ・小林泰男 (2013) 「カシューナツツ副産物給与によるウシからのメタン生成削減』『環境バイオテクノロジー学会誌』Vol.13、No. 2、89~93頁
- ・小林泰男 (2021) 「牛ルーメンマイクロバイオーム完全制御によるメタン80%削減に向けた新たな家畜生産システムの実現」
<https://anim-func-nutr.agr.hokudai.ac.jp/project/research/>

- ・白石誠・水木剛・山下恭広・長田隆 (2016) 『家畜排せつ物の処理過程における温室効果ガス排出削減技術の開発—炭素繊維担体を用いた生物膜法による温室効果ガス緩和技術—』『岡山県農林水産総合センター畜産研究所研究報告』第6号、19~23頁
- ・白石誠・水木剛・山下恭広・長田隆 (2018) 『家畜排せつ物の処理過程における温室効果ガス排出削減技術の開発—炭素繊維担体を用いた生物膜法による温室効果ガス緩和技術 (2) —』『岡山県農林水産総合センター畜産研究所研究報告』第8号、1~5頁
- ・新エネルギー・産業技術総合開発機構 技術戦略研究センター (2021) 「温室効果ガスN₂Oの抑制分野の技術戦略策定に向けて」『技術戦略研究センターレポートTSC Foresight』Vol.105
- ・畜産環境整備機構 (2018) 『畜産分野における地球温暖化緩和技術レビュー報告書』
- ・内閣府科学技術・イノベーション推進事務局未来革新研究推進担当 (2022) 「ムーンショット型研究開発制度の概要」
- ・中村明靖・河原林孝由基 (2017) 「エネルギーも含めた地域レベルでの循環型農業への示唆—(有)デリバリーフィードセンター名寄の取り組みを中心に—』『にじ—協同組合研究誌—』第658号、130~139頁
- ・日本草地畜産種子協会 (2010) 『自給粗飼料生産による温室効果ガス削減』
- ・農業・食品産業技術総合研究機構 (2010) 「温室効果とオゾン層破壊をもたらす一酸化二窒素ガスの発生を抑制する豚ぶん堆肥化技術を開発」
- ・農林水産省農林水産技術会議事務局編 (2002) 『肉用牛からのメタン産生抑制技術の開発』
- ・村田武・河原林孝由基編著 (2017) 『自然エネルギーと協同組合』筑波書房

執筆分担

＜はじめに、第1節、おわりに＞

河原林孝由基 (かわらばやし たかゆき)

＜第2、3節＞

平田郁人 (ひらた いくひと)

