

# 家畜ふん堆肥を活用する牧草生産による温室効果ガス削減

国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構  
畜産草地研究所 草地管理研究領域

森 昭憲

## 1. はじめに

1880 から 2012 年の間に気温は 0.85℃ 上昇したことが確認され、温室効果ガス (GHG) 排出抑制に関する追加的努力を行わない場合、21 世紀末に 1986 から 2005 年の平均より 2.6 から 4.8℃ 気温が上昇し、食料生産、自然生態系、健康などに悪影響が及ぶことが懸念されている<sup>4)</sup>。

人為起源の GHG 排出量 (2010 年) の内訳は、化石燃料燃焼などを起源とする二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) が 65%、森林伐採などの土地利用変化を起源とする

CO<sub>2</sub> が 11%、メタン (CH<sub>4</sub>) が 16%、一酸化二窒素 (N<sub>2</sub>O) が 6.2%、フッ素ガスが 2.0% と推定されている<sup>4)</sup>。

このうち、森林伐採などの土地利用変化を起源とする CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> と N<sub>2</sub>O の排出量の一部は、主に農畜産業に由来すると考えることができる。本稿は、採草地で堆肥を最大限に利用し適切な減肥を組合せることで牧草生産と GHG 削減の両立が可能であり、物質循環に立脚した草地管理が温暖化緩和の観点から見ても重要であることを指摘する。

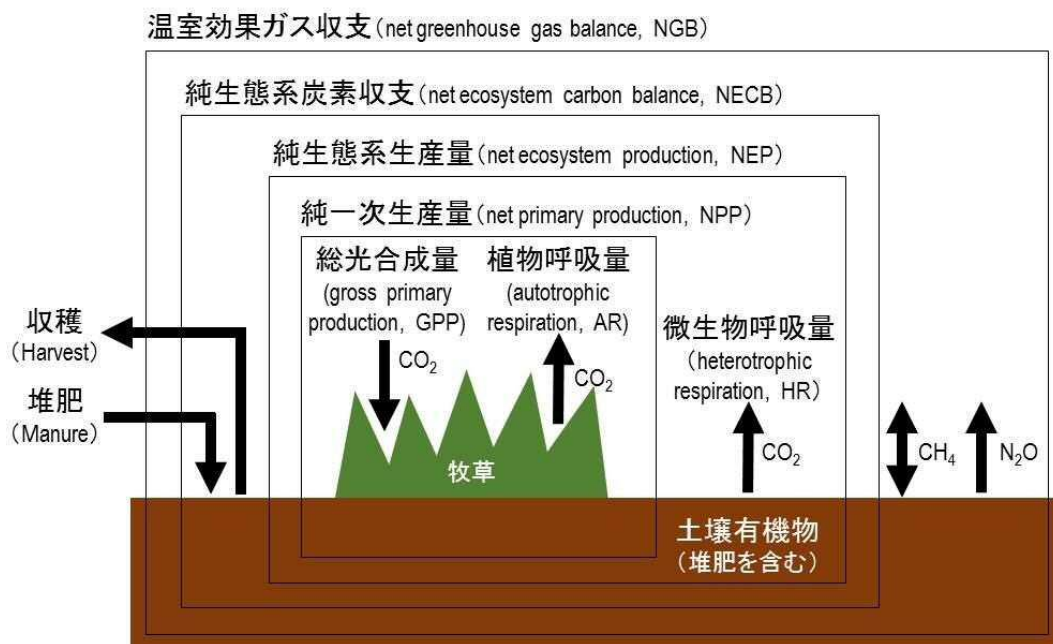


図1 草地生態系の温室効果ガス収支の構成要素

## 2. 牧草生産と GHG の関わり

### (1) 炭素の収支

牧草は、光合成と呼吸により大気と CO<sub>2</sub> 交換を行う。また、地上部の生長量の一部は収穫される。牧草の生長は草地生態系への炭素流入、収穫は草地生態系からの炭素流出と見なされる (図 1)。

牧草生産では、堆肥や化学肥料が利用される。施用堆肥と土壤有機物の一部は、土壤微生物に分解され大気中に CO<sub>2</sub> として放出される。堆肥施用は草地生態系への炭素流入、堆肥と土壤有機物の分解は草地生態系からの炭素流出と見なされる (図 1)。

### (2) CH<sub>4</sub> の収支

酸化的な土壤は、CH<sub>4</sub> を CO<sub>2</sub> に酸化する。このため、草地生態系からの CH<sub>4</sub> 発生量は負値となり、大気中の CH<sub>4</sub> が地表面に吸収されるように見える場合が多い (図 1)。CH<sub>4</sub> 吸収は、土壤微生物の働きによる。

### (3) N<sub>2</sub>O の収支

施用堆肥と土壤有機物の分解に伴う窒素無機化や窒素施肥で土壤中の無機態窒素濃度が高まると、N<sub>2</sub>O が発生する (図 1)。N<sub>2</sub>O は、土壤微生物の働きにより無機態窒素が形態変化 (硝化と脱窒) する過程で生成する。

### (4) GHG の収支

このため、牧草生産と GHG の関係を調べる際には、草地生態系と大気間の GHG (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O) 交換、収穫による炭素流出、堆肥施用による炭素流入の測定が必要となる (図 1)。

## 3. 日本の草地における GHG 観測

### (1) 調査地点

2004 年から道総研・根釧農業試験場 (北海道標津郡中標津町)、北大・静内研究牧場 (北海道日高郡新ひだか町)、農研機構・畜産草地研究所 (栃木県那須塩原市)、家畜改良センター・宮崎牧場 (宮崎県小林市) などの採草地で、GHG 交換のモニタリング研究が実施された<sup>11)</sup>。

### (2) 化学肥料・堆肥施用区の管理

上記 4 地点には、化学肥料のみを施用する化学肥料区 (F 区)、牛ふん堆肥と化学肥料を併用する堆肥化肥区 (MF 区) が設置され、採草地の GHG 収支 (net greenhouse gas balance, NGB, 図 1) に及ぼす堆肥施用の影響が調査された。F 区では地域の施肥標準に則した施肥が毎年繰り返され、MF 区では堆肥からのカリウム供給量を基礎に堆肥を上限値まで施用した上で、堆肥の連用年数を考慮し窒素減肥がなされた (図 2、3)。GHG 交換量は、以下に述べるように、統一された調査法で通年測定され、牧草収量と堆肥施用量が併せて調査された。

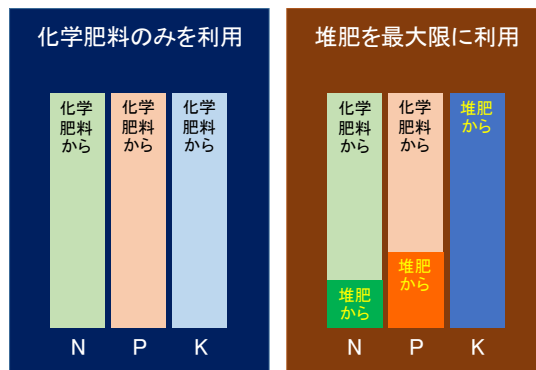


図 2 堆肥施用量の上限値の決め方

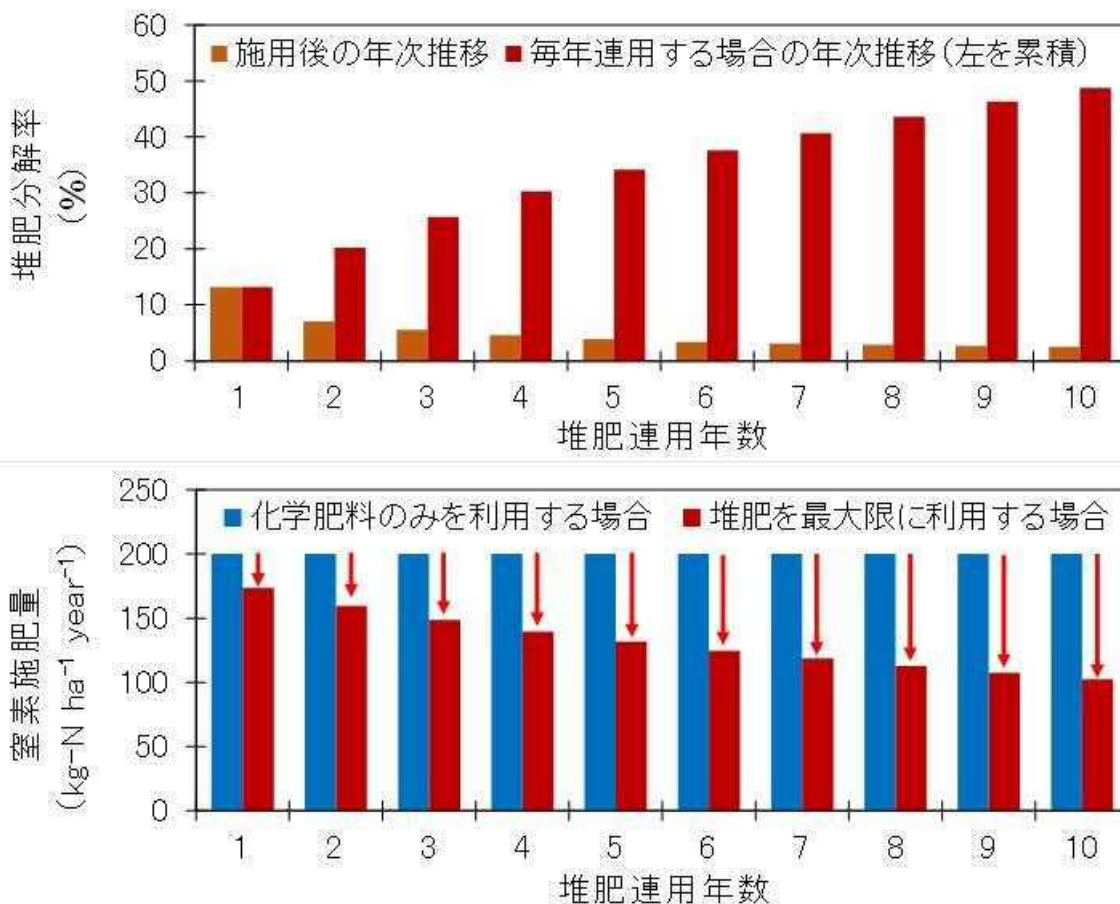


図3 堆肥連用時の堆肥分解率と窒素施肥量の計算例 (文献12から作成)

#### 4. 採草地における GHG 調査法

##### (1) CO<sub>2</sub> のフラックス

牧草による光合成と呼吸、堆肥と土壌有機物の分解を全て含めた草地生態系の正味の CO<sub>2</sub> 収支 (純生態系生産量, net ecosystem production, NEP, 図1) を直接測定する方法として渦相関法が用いられる。本法は、地表面から約 2 m の高さに設置した超音波風向風速温度計と赤外線分析計を組合せ、草地生態系における CO<sub>2</sub> の鉛直輸送量 (フラックス) を測定する<sup>11)</sup>。

##### (2) CH<sub>4</sub> と N<sub>2</sub>O のフラックス

土壌微生物の働きによる CH<sub>4</sub> と N<sub>2</sub>O

のガス交換には、牧草が直接関与しないため、地表面に設置したチャンバー (直径約 40cm、高さ約 30cm) 内の CH<sub>4</sub> と N<sub>2</sub>O の濃度変化を基礎に、CH<sub>4</sub> と N<sub>2</sub>O のフラックスを測定する<sup>11)</sup>。

#### 5. 採草地の炭素収支

##### (1) 純一次生産量と微生物呼吸量

牧草の総光合成量と牧草の呼吸量の差が牧草の生長量であり、「純一次生産量 (net primary production, NPP, 図1)」と呼ばれる。施用された堆肥と土壌有機物の一部が土壌微生物の分解を受けた結果、大気中に放出される CO<sub>2</sub> 量は、

「微生物呼吸量 (heterotrophic respiration, HR, 図1)」と呼ばれる。

(2) 採草地の炭素収支の見積もり

採草地の「純生態系炭素収支 (net ecosystem carbon balance, NECB, 図1)」は、主に NPP、HR と収穫による炭素流出 (Harvest)、堆肥施用による炭素流入 (Manure) で構成され、以下のように求めることができる<sup>17)</sup>。

$$NECB = NPP - HR - Harvest + Manure$$

4の調査法の冒頭で述べたように、

$$NEP = NPP - HR$$

(図1)であるから、

$$NECB = NEP - Harvest + Manure$$

と変形できる。既述のように NEP は渦相関法で測定される草地生態系の正味の CO<sub>2</sub> 収支、Harvest は収穫された牧草中の炭素量、Manure は施用された堆肥中の炭素量で、いずれも直接測定で求

めることができる。

(3) 堆肥施用の効果

既述の4地点の NEP は、MF 区が F 区より小さく、堆肥分解による CO<sub>2</sub> 発生の影響と考えられた<sup>1)</sup>(図4)。F 区では、

$$NEP < Harvest$$

で、草地生態系の正味の CO<sub>2</sub> 収支以上の炭素が収穫により草地生態系から持ち出された結果、NECB は負値となり草地生態系の炭素が消耗した<sup>1)</sup>(図4、5)。

一方、MF 区では、

$$NEP + Manure > Harvest$$

で、堆肥施用により草地生態系に炭素が持ち込まれた結果、NECB は正値となり草地生態系に炭素が蓄積した<sup>1)</sup>(図4、5)。

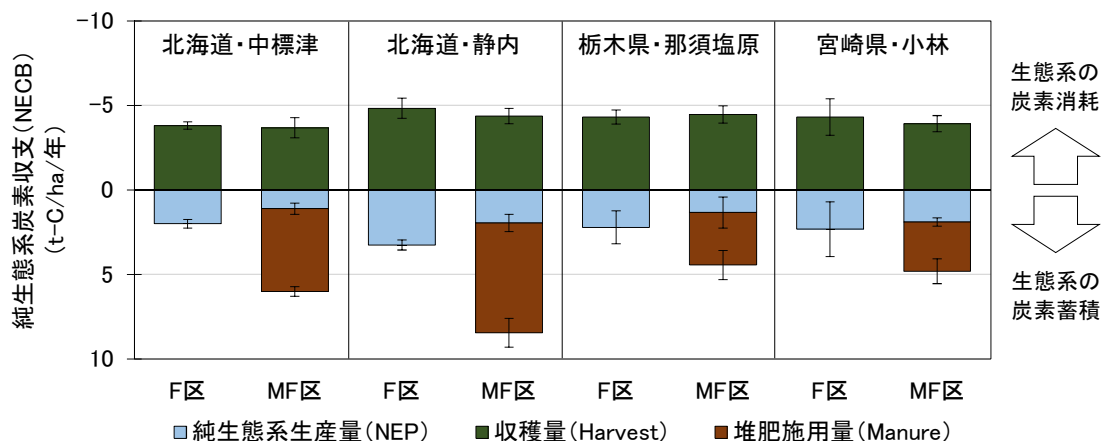


図4 草地生態系の炭素収支に及ぼす堆肥施用の影響 (文献1から作成)

以上は、堆肥連用を始めてから3年間の結果の平均であるが、堆肥施用により国内の採草地の炭素量が維持されていることが確認された。

堆肥の連用開始から3年間の堆肥分

解率は、3年間に施用された堆肥の25% ± 37%で、主に未分解堆肥(残り約75%)が採草地のNECBの増加に寄与したと推定された<sup>15, 16)</sup>。なお、堆肥はスラリーよりNECBを改善する効

果が大きいことが確認されている<sup>9)</sup>。

## 6. 採草地から発生する CH<sub>4</sub> と N<sub>2</sub>O

### (1) CH<sub>4</sub> の発生量

既述の4地点におけるCH<sub>4</sub>発生量は、負値となる場合が多く、堆肥施用の有無による処理間差は認められなかった<sup>14)</sup>。同様の結果は、採草地で多数報告されている<sup>6,8)</sup>。

また、静内では降雨後に土壤水分が高まると比較的大きなCH<sub>4</sub>放出が認められ、CH<sub>4</sub>発生量が正值となる場合が多かった<sup>14)</sup>。

### (2) N<sub>2</sub>O の発生量

N<sub>2</sub>O発生量は、土壤が高温多湿となる条件で窒素を施肥すると増加する。このため、1年間に複数回の施肥を繰り返す採草地からのN<sub>2</sub>O発生量は、明確な季節変化を伴う<sup>5,7)</sup>。既述の4地点においてもN<sub>2</sub>O発生量は、冷涼地より温暖地で多かった<sup>1)</sup>(図5)。

一方、処理間差に注目すると、N<sub>2</sub>O発生量は、堆肥連用を始めてから最初の3年間、F区よりMF区で多かった<sup>1)</sup>(図5)。しかし、堆肥連用を継続すると、小林を除き、堆肥施用の有無による処理間差は認められなくなった<sup>14)</sup>。

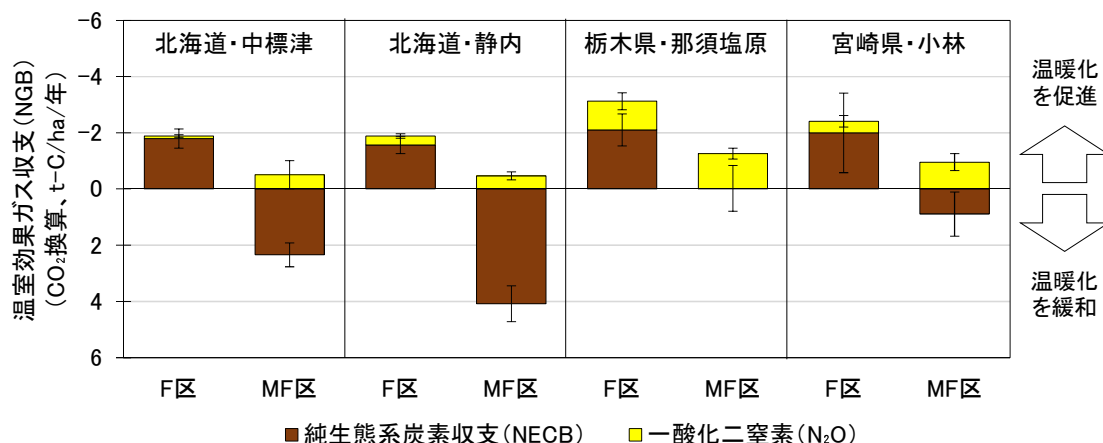


図5 草地生態系の温室効果ガス収支に及ぼす堆肥施用の影響(文献1から作成)

### (3) 堆肥連用の効果

堆肥連用年数が増加すると、堆肥からの無機態窒素の供給量が増加するため、窒素施肥量は毎年少しずつ減らすことができる(図3)。堆肥連用年数が増えると化学肥料の施肥直後に、MF区の土壤中の無機態窒素濃度の上昇がF区の場合より抑制された結果、経年的にN<sub>2</sub>O発生量が少なくなったと推察

される<sup>7)</sup>(図6)。

以上から、採草地のCH<sub>4</sub>吸収量は堆肥連用の影響をほとんど受けないこと、N<sub>2</sub>O発生量は堆肥連用の影響を受けるが、適切な減肥を組合せることで化学肥料のみの場合と比べN<sub>2</sub>O発生量を増やさずに牧草生産を維持できる場合の多いことが確認された<sup>14)</sup>。

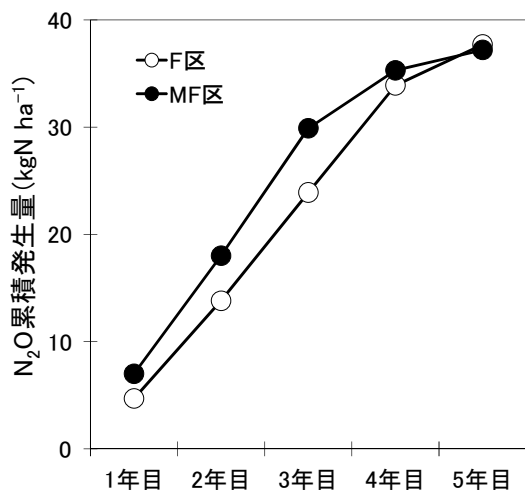


図6 那須塩原の採草地における一酸化二窒素の累積発生量(文献7から作成)

## 7. 採草地の NGB

CH<sub>4</sub> 1 kg は CO<sub>2</sub> 25 kg、N<sub>2</sub>O 1 kg は CO<sub>2</sub> 298 kg、炭素(C) 12 kg は CO<sub>2</sub> 44 kg にそれぞれ相当するため、CH<sub>4</sub> 発生量を 25 倍、N<sub>2</sub>O 発生量を 298 倍、炭素収支は 3.7 倍し加算することで、3 種類の GHG の温暖化影響を CO<sub>2</sub> 相当量として総合評価できる<sup>3)</sup>。

上記を適用すると、NGB は F 区より MF 区で大きく、堆肥施用が温暖化緩和に寄与すること、NECB と比べ CH<sub>4</sub> の温暖化影響は無視できるほど小さいが、N<sub>2</sub>O の温暖化影響は無視し得ないことが確認された<sup>1)</sup>(図5)。

## 8. GHG 削減に寄与する草地管理

堆肥施用量の上限値は、堆肥からの窒素、リン、カリウムの供給量のいずれかが施肥標準に達する量として決まる<sup>2)</sup>。牛ふん堆肥の場合、堆肥からのカリウム供給量で堆肥施用量の上限値

が決まる場合が多い(図2)。堆肥の過剰施用は、牧草品質を低下させ、牛のグラスタニー症や繁殖障害などの原因となるため、堆肥施用量は上限値以下とすることが大切である。

堆肥分解に伴う窒素無機化は、堆肥の畜種と連用年数を基礎に内田式で推定できる<sup>12)</sup>(図3)。このモデルで堆肥からの無機態窒素の供給量を求め、不足する無機態窒素を化学肥料で補うことが、高品質の牧草を生産する上で基礎となる。土壤中で無機態窒素濃度が高まると、N<sub>2</sub>O 発生量が増加するため、上記の適切な減肥で余剰窒素を抑制することは、N<sub>2</sub>O 発生量を抑制する上でも大切である<sup>8, 10, 13)</sup>。

このような草地管理は、堆肥から供給される養分を有効活用し牧草生産を維持する技術として推奨されてきたが、草地生態系の GHG 削減にも寄与することが確認された(図5)。家畜ふん堆肥を最大限に活用し適切な減肥を組合せることで物質循環に立脚した草地管理を行うことの重要性が改めて指摘される。

## 謝辞

本研究は、日本中央競馬会特別振興資金助成事業「環境に配慮した草地管理に係わる調査事業」(日本草地畜産種子協会, 2004-2006 年度), 同「環境に配慮した草地飼料畑の持続的生産体系調査事業(日本草地畜産種子協会)」(2007-2009 年度)、および農林水産省委託プロジェクト研究「気候変動に対応した循環型食料生産等の確立のた

めの技術開発」(2010-2014年度)の支援を受けて実施した。及川棟雄(元日本草地畜産種子協会)、三田村強(元日本草地畜産種子協会)、宮田明(農業環境技術研究所)、松浦庄司(農研機構・畜産草地研究所)、清水真理子(土木研究所・寒地土木研究所)、有田敬俊(道総研・上川農試天北支場)、新美光弘(宮崎大学)、寶示戸雅之(北里大学)、波多野隆介(北海道大学)、築城幹典(岩手大学)の各氏をはじめ、これらの研究の共同研究者に感謝申し上げる。

#### 引用文献(著者名のアルファベット順)

- 1) Hirata, R., Miyata, A., Mano, M., Shimizu, M., Arita, T., Kouda, Y., Matsuura, S., Niimi, M., Mori, A., Saigusa, T., Hojito, M., Kawamura, O. and Hatano, R. (2013) Carbon dioxide exchange at four intensively managed grassland sites across different climate zones of Japan and the influence of manure application on ecosystem carbon and greenhouse gas budgets. (日本の異なる気候帯に分布する4地点の集約管理草地におけるCO<sub>2</sub>の交換と堆肥施用が生態系の炭素収支と温室効果ガス収支に及ぼす影響) *Agricultural and Forest Meteorology*, **177**, 57-68.
- 2) 北海道立農業・畜産試験場家畜ふん尿プロジェクト研究チーム(2004)家畜ふん尿処理・利用の手引き2004, 北海道立畜産試験場, 1-93.
- 3) Intergovernmental Panel on Climate Change (気候変動に関する政府間パネル IPCC) 2007. Climate Change (気候変動)(2007) Synthesis Report. IPCC.
- 4) 環境省(2015) IPCC第5次評価報告書の概要-統合報告書-, 環境省. [http://www.env.go.jp/earth/ipcc/5th/pdf/ar5\\_syr\\_overview\\_presentation.pdf](http://www.env.go.jp/earth/ipcc/5th/pdf/ar5_syr_overview_presentation.pdf)
- 5) Mori, A., Hojito, M., Shimizu, M., Matsuura, S., Miyaji, T. and Hatano, R. (2008) N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> fluxes from a volcanic grassland soil in Nasu, Japan: comparison between manure plus fertilizer plot and fertilizer-only plot. (那須における火山性の草地土壌から発生するN<sub>2</sub>OとCH<sub>4</sub>のフラックス: 堆肥と肥料を組合せて管理した処理区と肥料のみで管理した処理区の比較) *Soil Science and Plant Nutrition*, **54**, 606-617.
- 6) Mori, A. and Hojito, M. (2011) Nitrous oxide and methane emissions from grassland treated with bark- or sawdust-containing manure at different rates. (バークまたはオガクズを含む堆肥の施用量が異なる草地からのN<sub>2</sub>OとCH<sub>4</sub>の発生量) *Soil Science and Plant Nutrition*, **57**, 138-149.
- 7) Mori, A. and Hojito, M. (2012) Effect of combined application of manure and fertilizer on N<sub>2</sub>O fluxes from a grassland soil in Nasu, Japan (堆肥と肥料を組合せた施肥管理が那須の草地におけるN<sub>2</sub>Oのフラックスに及ぼす影響) *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **160**, 40-50.
- 8) Mori, A. and Hojito, M. (2015a) Effect

- of dairy manure type and supplemental synthetic fertilizer on methane and nitrous oxide emissions from a grassland in Nasu, Japan. (乳牛由来の種類が異なるふん尿処理物と合成肥料を組合せた施肥管理が那須の草地における CH<sub>4</sub> と N<sub>2</sub>O の発生に及ぼす影響) *Soil Science and Plant Nutrition*, **61**, 347–358.
- 9) Mori, A. and Hojito M. (2015b) Effect of dairy manure type on the carbon balance of mowed grassland in Nasu, Japan: comparison between manure slurry plus synthetic fertilizer plots and farmyard manure plus synthetic fertilizer plots. (乳牛由来のふん尿処理物の種類の違いが那須の採草地における炭素収支に及ぼす影響: スラリー及び合成肥料を施用した処理区と堆肥及び合成肥料を施用した処理区の比較) *Soil Science and Plant Nutrition*, **61**, 736–746.
- 10) Mu Z., Huang A., Kimura S.D., Jin T., Wei S. and Hatano R. (2009) Linking N<sub>2</sub>O emission to soil mineral N as estimated by CO<sub>2</sub> emission and soil C/N ratio. (土壌からの CO<sub>2</sub> 発生量と土壌の C/N 比から推定した土壌中の無機態窒素の供給量と N<sub>2</sub>O 発生量を関連付ける) *Soil Biology and Biochemistry*, **41**, 2593–2597.
- 11) 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—環境に配慮した草地飼料畑の持続的生産体系調査事業 (普及版) —, 日本草地畜産種子協会.
- <http://souchi.lin.gr.jp/skill/pdf/jikyuuuso-shiryu.pdf>
- 12) 志賀一一・大山信雄・前田乾一・鈴木正昭 (1985) 各種有機物の水田土壌中における分解過程と分解特性に基づく評価, 農業研究センター研究報告, **5**, 1–19.
- 13) Shimizu, M., Marutani, S., Desyatkin, A.R., Jin, T., Nakano, K., Hata, H. and Hatano, R. (2010) Nitrous oxide emissions and nitrogen cycling in managed grassland in Southern Hokkaido, Japan. (北海道南部の管理された草地における N<sub>2</sub>O の発生量と窒素循環) *Soil Science and Plant Nutrition*, **56**, 676–688.
- 14) Shimizu, M., Hatano, R., Arita, T., Kouda, Y., Mori, A., Matsuura, S., Niimi, M., Jin, T., Desyatkin, A.R., Kawamura, O., Hojito, M. and Miyata, A. (2013) The effect of fertilizer and manure application on CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from managed grasslands in Japan. (肥料と堆肥の併用が日本の管理された草地における CH<sub>4</sub> と N<sub>2</sub>O の発生量に及ぼす影響) *Soil Science and Plant Nutrition*, **59**, 69–86.
- 15) Shimizu, M., Hatano, R., Arita, T., Kouda, Y., Mori, A., Matsuura, S., Niimi, M., Mano, M., Hirata, R., Jin, T., Limin, A., Saigusa, T., Kawamura, O., Hojito, M. and Miyata, A. (2014a) Farmyard manure application mitigates greenhouse gas emissions from managed grasslands in Japan. (堆肥施



- 用は日本の管理された草地における温室効果ガス発生を緩和する) pp. 115–132. *In Sustainable Agroecosystems in Climate Change Mitigation* (Ed. Oelbermann M.), Wageningen Academic Publishers.
- 16) Shimizu, M., Hatano, R., Arita, T., Kouda, Y., Mori, A., Matsuura, S., Niimi, M., Mano, M., Hirata, R., Jin, T., Limin, A., Saigusa, T., Kawamura, O., Hojito, M. and Miyata, A. (2014b) Mitigation effect of farmyard manure application on greenhouse gas emissions from managed grasslands in Japan. (日本の管理された草地における堆肥施用による温室効果ガス抑制効果) pp. 313–325, *In Soil Carbon* (Eds. Hartemink A.E., McSweeney K.), Springer International Publishing.
- 17) Shimizu, M., Marutani, S., Desyatkin, A.R., Jin, T., Hata, H. and Hatano, R. (2009) The effect of manure application on carbon dynamics and budgets in a managed grassland of Southern Hokkaido, Japan. (北海道南部の管理された草地における堆肥施用が炭素の動態と収支に及ぼす影響) *Agriculture Ecosystems and Environment*, **130**, 31–40.

## 記号・略号一覧(アルファベット順)

〔編集担当作成〕

記号・略語	和文名・意味	掲載ページ・図
CH <sub>4</sub>	メタン	p.15, 16, 17, 19, 20, 図1
CO <sub>2</sub>	二酸化炭素(炭酸ガス)	p.15, 16, 17, 18, 20, 図1
F区	化学肥料区	p.16, 18, 19, 図4, 5, 6
GHG	温室効果ガス	p.15, 17, 20
Harvest	収穫による炭素流出	p.18, 図1, 4
HR	微生物呼吸量	p.18, 図1
Manure	堆肥による炭素流入	p.18, 図1, 4
MF区	牛ふん堆肥と化学肥料の併用区	p.16, 18, 19, 図6
NECB	純生態系炭素収支	p.18, 20, 図1, 4, 5
NEP	純生態系生産量	p.17, 18, 図1, 4
NGB	温室効果ガス収支	p.16, 20, 図1, 5
N <sub>2</sub> O	一酸化二窒素(亜酸化窒素)	p.15, 16, 17, 19, 20, 図1, 5, 6
NPP	純一次生産量	p.17, 18, 図1