日本中央競馬会特別
振興資金助成事業

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）－

自走式ハーベスタによる牧草サイレージの収穫

収穫後、ラッピングされた牧草ロール

コントラクタによる飼料用とうもろこしの播種

（写真提供　北海道立根釧農業試験場）

自走式ハーベスタによるとうもこしの収穫

平成２２年３月

（社）日本草地畜産種子協会

ま　え　が　き

わが国の畜産は海外から大量の穀物を輸入して家畜に与え、乳・肉・卵を生産しています。輸入している飼料用穀物生産に要する耕地面積は 363 万 ha と試算され、これはわが国の農地面積の 77%にも達します。さらに排せつされた家畜ふん尿からの窒素量は 74 万トン／年であり、国土への全窒素排出量の 28%にも達します。このような大量の輸入飼料に依存し加工型畜産では排出された膨大な家畜ふん尿は農地に全てを還元することができず、河川への水質汚染などの環境問題をもたらします。

他方、地球温暖化は世界各地で洪水や干ばつなどの気象異変をもたらし、今後、世界の穀物生産は不安定になるといわれています。また世界の人口増加や経済振興国の畜産物需用の高まりに伴って、安価な輸入飼料の安定的確保は、ますます困難になることが予想されます。

農業分野から排出される主な温室効果ガスは二酸化炭素、メタン、亜酸化窒素です。二酸化炭素の１キログラム当たりの温室効果の大きさを１とすると、メタンは 23 倍、亜酸化窒素は 296 倍の影響をもたらします。農業分野のメタン発生は主に水田や牛などの反芻家畜の消化過程から排出されます。また亜酸化窒素は主に家畜のふん尿や堆肥の製造過程から排出されます。このため畜産とくに牛の飼養に伴う温室効果ガスの影響は大きいことが報告されています。

このように牛の飼養は環境にマイナスのイメージばかりと考えられやすいのですが、そうではありません。牛は人間が利用できない牧草や野草を利用することができ、また小麦や玄米を生成する時に生産されるフスマや米ぬかなどの副産物を利用して、栄養に富む美味しい牛乳や牛肉を生産します。また硬い植物繊維を細かく砕き、ふんとして排せつされるので、土壌に還元されると、分解しやすく、物質循環を早める作用があります。このため、わが国の乳肉牛の飼養においては、これまでの加工型畜産から草地や飼料畑の物質循環機能を十分に発揮させた牛乳・牛肉生産を行うことが緊急の課題です。

今回、日本草地畜産種子協会は財団法人全国競馬畜産振興会の助成を受け、草地並びに飼料畑における地球温暖化防止機能について調査を行い、本年度最終報告書を提出しました。しかし、このような調査を組織的に、また体系的に行った調査は本調査がわが国で最初であることから、専門家でなければ、その内容が理解しにくいという意見を耳にします。そこで、これに関する基礎的な知識と本事業から得られた主要な成果を一般の人々にも判りやすく解説書した普及版を作成しました。この普及版がわが国の乳肉牛生産において温暖化防止について広く理解され、乳肉牛飼養活動の一助になれば幸いです。

なお、本普及版を出版するにあたり、北海道大学、岡山大学、岩手大学、宮崎大学、独立行政法人草地畜産研究所の皆様から、多大な協力を賜りましたことに対して、ここに深く感謝を表します。

社団法人日本草地畜産種子協会会長　信國　卓史

目　　次

Ⅰ　基礎知識編

１．地球温暖化発生のメカニズム

１）地球の大気

２）温室効果とは

３）人間活動に伴う温室効果ガス濃度の経年的変化

２．農業活動と温暖化

１）農業分野における温室効果ガス排出の割合

２）物質循環型乳肉牛生産システム

３）我が国の畜産と地球温暖化負荷

４）乳肉牛からの温室効果ガスの排出

５）堆肥からの温室効果ガスの排出

３．温暖化防止に果たす草地の役割

１）世界の草地、

２）日本の草地と飼料畑

３）草地土壌の炭素含量

４．草地・飼料畑における炭素窒素の循環と微生物

１）炭素循環

２）窒素循環

３）草地の微生物

４）微生物が生産する温室効果ガス

５）窒素施肥によるメタン及び亜酸化窒素の放出・抑制メカニズム

６）堆肥施与による土壌環境改善効果と施与基準

７）草地更新と温室効果ガス

５．温室効果ガスの測定法

１）草地における温室効果ガス収支の測定項目

２）メタン、亜酸化窒素収支の測定方法

３）二酸化炭素収支の測定方法

Ⅱ　成果編

１．自給粗飼料生産のライフサイクルアセスメント

１）牛乳生産量の向上は牛乳１トン当たりの地球温暖化負荷を低減させる

２）自給粗飼料利用割合を高めることによって地球温暖化を低減できる

３）堆肥製造過程からの温室効果ガス発生量は高い

４）コントラクターによる粗飼料生産は温暖化負荷量を軽減させる

２．草地・トウモロコシ畑の温室効果ガス排出の特徴

１）草地は水田や畑地よりも温室効果ガス排出量が少ない

２）大気から草地への正味の CO_2 吸収量（NEP）は水田よりも高い

３）草地及び飼料畑における生産の特徴は？
４）草地更新は生産を高め、炭素吸収能力の改善効果がある
３．草地トウモロコシ畑への堆肥施与による温暖化防止効果
１）粗飼料生産への堆肥投入効果
２）土壌炭素への堆肥投入効果
３）亜酸化窒素放出への堆肥投入効果
４）メタン吸収の堆肥投入効果
５）温室効果ガス収支への堆肥投入効果
４．自給粗飼料生産圃場の温室効果ガスをゼロにする管理法
１）温室効果ガス収支をゼロにする土地利用
２）温室効果ガス収支をゼロにする堆肥投入
３）窒素流出を起こさない堆肥投入
４）堆肥過程での温室効果ガス放出

付属：ＬＣＡと温室効果ガスの求め方
１）LCA の計算法
２）温室効果ガス収支の求め方

基　礎　知　識　編

1　地球温暖化発生のメカニズム

1）地球の大気

地球の大気組成は他の地球型惑星と異なり、酸素と大量の水蒸気（水）を保有し、二酸化炭素は少ない。この特徴は地球に大量の水（海）と植物があり、海に大気中二酸化炭素が溶解し固定されたことと、植物活動により二酸化炭素が植物圏に取り込まれ、酸素が大気圏に放出されたことによります。地球大気組成の 99.9%は窒素、酸素、アルゴンですが、残りの 0.1%に地球温暖化に係わる気体である水蒸気、二酸化炭素、メタン、亜酸化窒素（一酸化二窒素）、フロンなどが含まれます。

2）温室効果とは

地球の平均気温は太陽からくるエネルギー（日射）と地球から宇宙へ出る熱放射エネルギー（赤外線）のバランスで決定しています（図 1-1）。日射は大気と地表面を温めます。なお、入射の一部は反射して、そのまま宇宙に戻されます。また、暖められた地表面から赤外線を放出します。もし、温室効果気体がなければ、赤外線はそのまま宇宙に戻されます。しかし、地球大気は温室効果気体を含むので、地表面から出た赤外線（熱放射エネルギー）は直接宇宙に逃げないで、大気で吸収されて大気を暖め（温室効果）、その大気から赤外線が再び放出されて宇宙と地表へ戻されます。大気の温度（気温）は日射と赤外線のエネルギーの吸収と放出のバランスで決定しており、現実の大気では温室効果のない場合の平均気温－18℃に比べて 33℃高い+15℃の気温となっています。

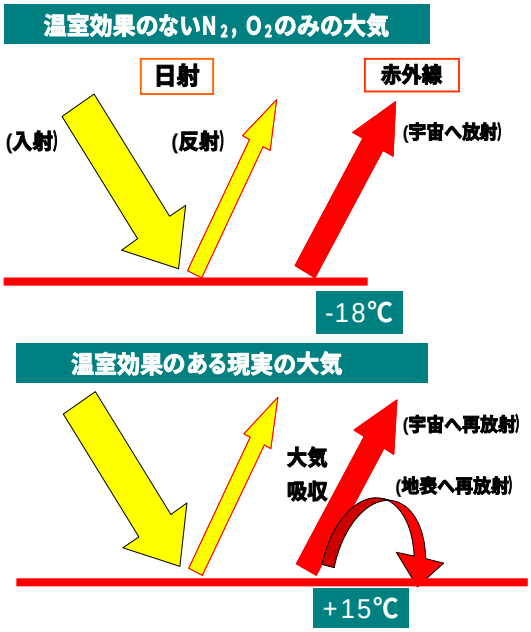


図 1-1　温室効果のメカニズム

3）人間活動に伴う温室効果ガスの温暖化寄与とその濃度の経年的変化

人間活動に伴う温室効果ガスとしては、二酸化炭素（CO_2 0.039%=390ppm）、メタン（CH_4 0.00019%=1900ppb）、亜酸化窒素(N_2O)、代替フロンなどがあります。これらのガスの同一濃度における温室効果の能力が異なっています。この点を考慮して、これらのガスの同一濃度での温室効果を基準化する温暖化係数（CO_2＝１として、CH_4 は 23、N_2O は 296、HFC（ハイドロフルオロカー

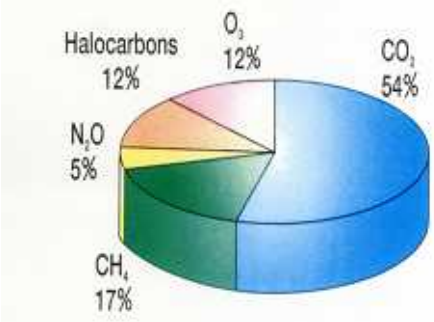


図 1-2　各種温室効果ガスの温暖化寄与率

ボン類）は 1,000 から 10,000 倍程度の温室効果）が決められています。この係数を濃度に掛けて温暖化寄与率を評価します。図には現状でのそれぞれの大気中濃度と温暖化係数から求めた温暖化寄与割合を示します。これから分かるように、二酸化炭素、メタンが大きな寄与割合となっています。

西暦 2000 年までの二酸化炭素、メタン、亜酸化窒素の大気中濃度の変動を図に示しますが、最近 100 年の間にそれらの濃度は急上昇しています。二酸化炭素濃度は産業革命以前には 280ppm 程度でしたが、産業革命以降の石炭、石油、天然ガスなどの化石燃料の大量消費に伴い、二酸化炭素濃度が急上昇して、現在 390ppm に達しています。なお、農業活動から排出される主な温出効果ガスはメタン、亜酸化窒素及び二酸化炭素ですが、現在メタンは 1,900ppb を超え、また亜酸化窒素は 320ppb に達していますが、それらの濃度はさらに上昇しています。

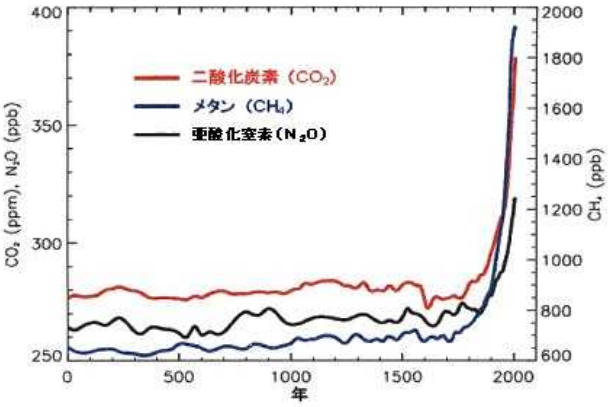


図 1-3　西暦０年から 2005 年までの主な温室効果ガスの大気中の濃度の変化（IPCC 第４次評価報告より）

以上から、農業活動に関連するこれらの温室効果ガスの放出量を削減し、あるいは吸収量を増大させる取り組みと対策が畜産業においても必要となっていることが分かります。

2　農業活動と温暖化

１）農業分野における温室効果ガスの排出割合

農業活動に係わる温室効果ガスは土壌や家畜から直接的に排泄されます。また農業活動に使用する化石燃料や農薬生産などからも間接的に排出されます。世界の農業に起因するこれらの温室効果ガス排出量は、排出される温室効果ガス全体の 17～32%になります。2000 年の世界の農業分野における温室効果ガスの排出割合をみると、肉牛が 36、水田が 29、乳牛が 14、羊山・羊が 8 であり、反芻家畜からの排出割合が 58%を占めます。さらに 2050 年には反芻家畜からの排出割合は 66%に達すると予想されています。

また世界の畜産に係わる温室効果ガスの排出割合は全体の 18%を占めると言われ、畜産分野における温室効果ガスの排出割合をみると、土地利用及び森林から草地への土地利用の変更が 36%、ふん尿の管理に係わる 31%、家畜から 25%、飼料生産から 7%、調整・輸送から 1%です。

他方、わが国における 2007 年の農業分野の温室効果ガスの排出割合は温室効果ガス全体の 1.9%と世界の農業からの排出割合と比較すると少ないのですが、この数値には穀物・牛肉など、輸入食糧の生産に係わる温室効果ガス排出量が含まれていません。

このように農業は温室効果ガスの排出源でありますが、農用地及び家畜の飼養方法並びに排泄物の管理・利用方法を変えることにより、排出量を削減することが可能です。さらに土壌に還元された植物由来の有機物は二酸化炭素となって大気に放出あるいは有機態炭素とな

って土壌に蓄積されます。このため農業は農用地の利用管理方法を改善することによって、土壌中の炭素含量を高めることができます（このことを炭素隔離と呼びます）。とくに草地は炭素蓄積の潜在能力は高いと言われています。

2）物質循環型乳肉牛飼養システム

草食家畜は私たちが利用することのできない、牧草、野草、イナワラなどの作物残渣物及びフスマなどの穀物副産物を摂取し、私たちに乳・肉・毛皮を提供してくれます。また大きな４つの胃（反芻胃）をもつ牛は、採食したこれらの飼料を咀嚼・反芻を繰り返し、反芻胃内微生物及び消化管内微生物によって効率的に分解され、体内に栄養源として吸収されます。分解・吸収されなかった有機物は草地や飼料畑に糞として直接、排泄あるいは牛舎施設で堆肥化されて草地飼料畑に還元されます。還元された糞や堆肥は土壌微生物によって、すみやかに無機態に分解され、牧草や飼料作物の養分となって吸収されます。同時に牧草や飼料作物は大気中の二酸化炭素を光合成によって化学エネルギーに変え、土壌から吸収した養分と合成して有機化合物を作り、成長します。このように牧畜では、植物（生産者）ー動物（消費者）との間に反芻胃内微生物及び土壌微生物（分解者）を介して炭素や窒素などの物質循環及びエネルギーが滞ることなく流れる生態系を形成しています（図 2-1）。

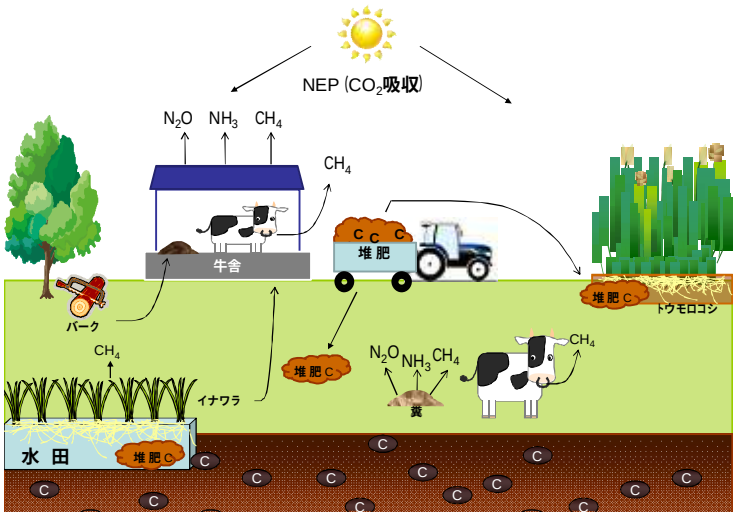


図 2-1　物質循環型乳肉牛生産システム

しかし、わが国の畜産は昭和 36 年以降、海外から大量の飼料を輸入し、それを家畜に給与し、畜産物を得る輸入飼料に依存した加工型畜産になりました。このため排出された膨大なふん尿が国土に排出されますが、適切に管理・利用を行わなければ温室効果ガスの排出を高めます。これらの問題を解決するためには草地・飼料畑を拡大して物質循環型乳肉牛生産システムに変え、イナワラやバークなど、作物及び林産副産物を有効に利用管理して生産された堆肥を農用地に還元することによって、この草地飼料畑は二酸化炭素の吸収源に変えることができます。

3）我が国の畜産と地球温暖化負荷

2007 年度における我が国の農業分野からの温室効果ガス排出量は，二酸化炭素換算で 2650 万トンとなり，全産業分野の温室効果ガス排出量に占める割合は約 1.9%です。このうち，畜産からの温室効果ガス排出は，主に消化管内発酵と家畜排せつ物の管理に由来しています。消化管内発酵からの温室効果ガス排出量は 712 万トンで，農業分野からの温室効果ガス排出量の 27%に相当します（図 2-2）。また，家畜排せつ物の管理からの温室効果ガス排出量は 726 万トンで，農業分野からの温室効果ガス排出量の 27%に相当します。

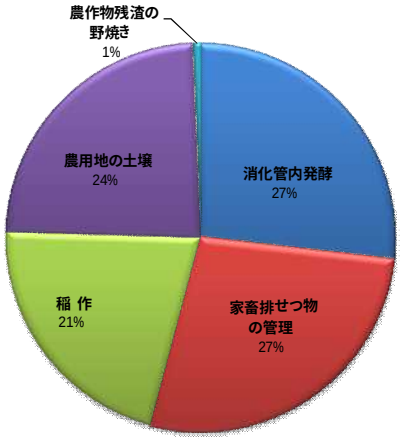


図 2-2　農業分野からの温室効果ガス排出量

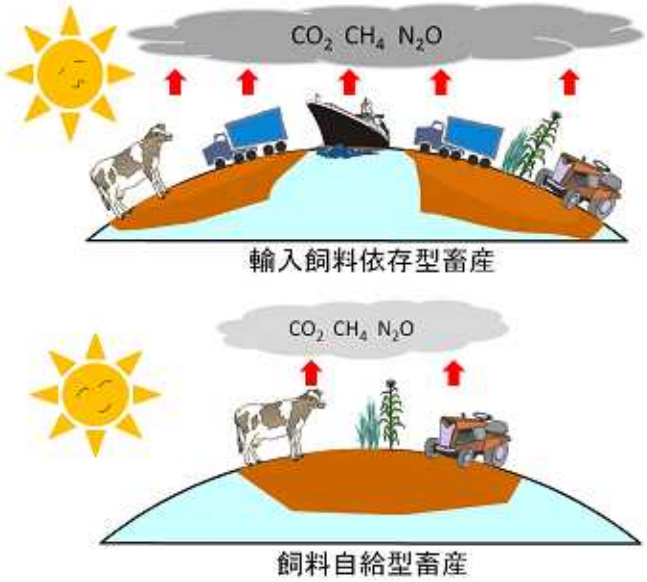


図 2-3　輸入飼料依存型畜産と飼料自給型畜産

これら２つの排出量で農業分野からの温室効果ガス排出量の 54%を占めており，畜産からの温室効果ガス排出低減が重要であることがわかります。

我が国の畜産は，家畜に給与する飼料の多くを輸入に頼る輸入飼料依存型畜産が主流となっています（図 2-3)。2007 年度における酪農，肉用牛繁殖および肉用牛肥育の飼料自給率は，それぞれ 33%，56%および 2%となっており，安定した家畜生産を行う上で飼料自給率の向上は重要です。また，輸入している飼料用穀物，牛肉，乳製品の生産に要した耕地面積を試算すると，それぞれ 363 万 ha，463 万 ha，および 112 万 ha となり，我が国の畜産のために海外の多くの農地が使われていることがわかります。地球温暖化の視点から見ると，飼料の多くを輸入に頼るということは，飼料を輸出国から我が国まで輸送することになり，その分化石燃料を多く消費することになります。また，飼料給与後に排せつされる家畜の糞尿は，飼料自給型畜産では飼料生産を行った農地に還元できますが，輸入飼料依存型畜産では飼料生産を行った農地に還元することはできず，循環型農業の実現が困難になり，地下水汚染などの環境問題を生じます。

参考：飼料をめぐる情勢　(2009 年 4 月，農林
日本国温室効果ガスインベントリ報告書　(2009 年 4 月，地球環境研究センター)
平成 20 年度食糧需給表（http://www.maff.go.jp/j/zyukyu/fbs/index.html）

４）乳肉牛からの温室効果ガスの排出

（１）メタン（CH_4）

乳肉牛に由来するメタンの主な発生源は、消化管内発酵と排せつ物処理です（図 2-4)。消化管

内発酵に由来するメタンは全体の約 4 分の 3 を占めます。残りの約 4 分の 1 は排せつ物処理に由来し、堆積発酵と貯留の過程で多くのメタンが発生します。メタンの消失源は、対流圏での光化学分解と土壌による酸化分解です（図 2-5）。メタンの発生源は乳肉牛以外にも存在しますが、発生量と消失量の差が大気に蓄積します。最近の大気中メタン濃度の増加率は頭打ち状態です。

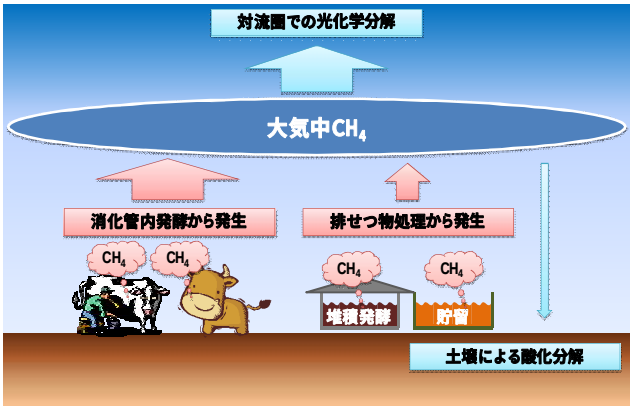


図 2-5　乳肉牛からのメタン（CH_4）の発生と分解

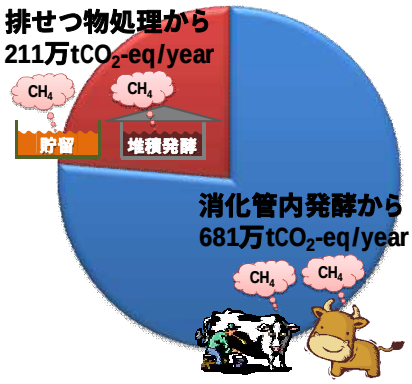


図２－４　乳肉牛からのメタン（CH_4）の排出量

（２）亜酸化窒素（N_2O）

乳肉牛に由来する亜酸化窒素の主な発生源は、排せつ物処理です（図 2-6）。堆積発酵や強制発酵から多くの亜酸化窒素が発生します。さらに、排せつ物処理の過程で大気中に揮散したアンモニアが土壌に沈着したり、排せつ物を施用した土壌から流れ出た窒素が水系を移動したりすることでも亜酸化窒素が発生します。最近の大気中亜酸化窒素濃度の増加率は年に約 0.2%です。

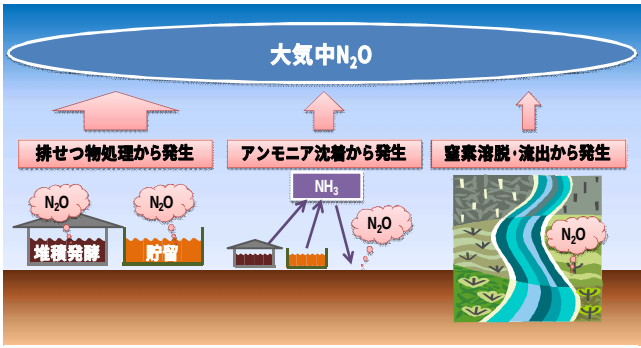


図 2-6　乳肉牛に由来する亜酸化窒素（N_2O）の発生

５）堆肥からの温室効果ガスの排出

家畜排せつ物を堆肥化することは，有機性資源循環を高める上で重要です（図 2-7）。堆肥化は，主に好気性微生物によって行われるので，その微生物の活動を活発にする適正な環境条件を整える必要があります。乳牛からの排せつ物は，水分を調整し通気性を改善するためオガクズ，バーク，イナワラ，モミガラなどの有機物と混合され，数ヶ月間堆肥化された後，草地に散布されます。これらの有機物は，リグニンなどの分解されにくい有機物を多く含んでいます。このような堆肥を草地や飼料畑に施用すると，分解されなかった有機物中の炭素が土壌に供給され，それらが土壌中に蓄積することで温暖化抑制の効果が期待できます。

堆肥化の方式には天日乾燥，強制発酵，堆積発酵などのさまざまな方法があります。天日乾燥は天

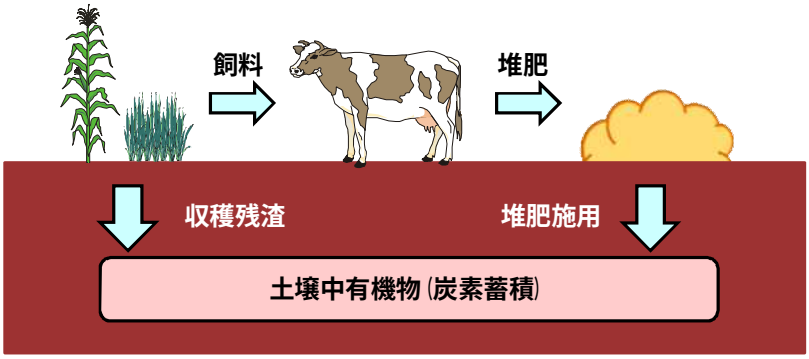


図 2-7　堆肥施用による土壌中への炭素蓄積

日により乾燥し，糞尿の取扱性を改善します（図 2-8）。強制発酵では，開閉式または密閉式の強制通気撹拌発酵槽で数日から数週間発酵させます。堆積発酵では，堆肥盤，堆肥舎などに高さ 1.5～2m程度で堆積し，時々切り返しながら数ヶ月かけて発酵させます。

堆肥化過程から発生する温室効果ガスは，堆肥化の方式によって大きく異なります。堆積発酵はもっとも嫌気的な条件になりやすいため，メタンや亜酸化窒素の発生量が高くなっています。このように，堆肥化方式によって温室効果ガスの発生量が異なることから，温室効果ガスの発生が少ない処理方法を選ぶことで，温室効果ガス発生を抑制することが可能です。

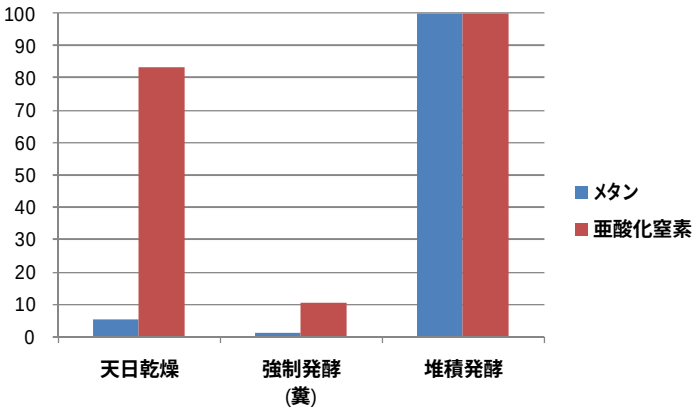


図 2-8　各堆肥化方式でのメタンおよび亜酸化窒素の排出係数
堆積発酵を 100 としたときの相対値

また，化学肥料と同様，堆肥中の窒素の一部は，農地に施用後に亜酸化窒素の形で大気中に放出されます。この亜酸化窒素は土壌中の微生物による硝化や脱窒の過程で放出されるため，窒素の形態や環境条件によって変わることが考えられます。

参考:日本国温室効果ガスインベントリ報告書　(2009 年 4 月，地球環境研究センター)

3　温暖化防止に果たす草地の役割

1）世界の草地

世界の陸域生態系は、森林、草地、砂漠が約 30%ずつ、残りの約 10%を耕地が占めています。草地は全世界に広く分布し、その面積は 49 億 ha と見積もられています。草地の成立は気候条件と撹乱により規定されていると言われています。すなわち乾燥、低温、火災、放牧などにより樹木の侵入が抑制されることで、森林と砂漠の中間に位置する生態系として維持されています。

ツンドラやタイガの草地は、低温や永久凍土の融解による湿潤化により樹木の侵入が阻まれています（写真

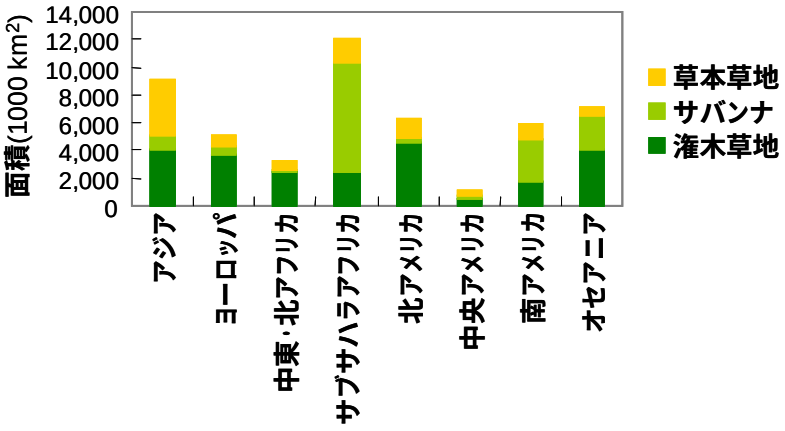


図 3-1　世界の草地分布(Loveland ら、2000)

１）。また、温帯草地（ステップ、プレーリー）は夏期の乾燥と冬期の低温により(写真２、３)、熱帯サバンナ(セラード、ジャノス)は乾燥により(写真４、５、６)、森林の侵入が阻まれています。人工草地は、野焼き、放牧、刈取りにより維持されています。図 3-1 のように、世界の草地の 47%は潅木草地です。とくにヨーロッパ、北アメリカの草地の主体となっています。サバンナは全体の 32%を占め、サブサハラアフリカ、南アメリカ、オセアニアに広く分布しています。草本草地は 21%で、アジアに多くなっています。発展途上国では、過放牧による草地の衰退・砂漠化や、薪炭林の採取のために森林が減少し草地化が進行していると言われています。一方、先進国では、放牧が行われなくなることにより、樹木の侵入が起こり、草地が衰退しており、植生の均質化、草地に依存して生息している動物の衰退がおこっていると言われています。

写真１　ヤクーツク近郊の草地(波多野隆介)

写真２　西オーストラリア州カルグーリ近郊の自然草地（谷山一郎）

写真３　内モンゴルの草地(築城幹典)

写真４　パラグアイの草地（神山和則）

写真５　ブラジルセラード(三田村強)

写真６　ベネズエラのジャノスにおける乾季の放牧(三田村強)

２）日本の草地と飼料畑

日本列島はアジアモンスーン地帯に位置し、世界的に見て比較的温暖かつ多雨な気候です。また、南北に細長く延び、亜寒帯から亜熱帯までの気候を有し、年平均気温は北海道の10 以下から沖縄の20 までにも及んでいます。

わが国の牧草・飼料畑の作付け面積は902千ha（牧草708千ha、飼料作物等194千ha、平成20年）。さらに、野草のうち採草あるいは放牧に使われている面積は105千haです（平成20年）。なお、単なる野草地ではこれの約4倍（388千ha、平成17年）あります。したがって、家畜の飼料生産に関わる野草地も含めた草地・飼料作面積は、1,007千haになります。

これらの草地や飼料畑を使った家畜生産は、資源循環型畜産といえます。即ち、土－草－家畜の循環系を構成しており、太陽エネルギーを受けた牧草、飼料作物、野草による飼料生産という一次生産、それをエサとして家畜は乳肉を生産する二次生産を行い、人への食料提供として貢献してくれます。家畜から排せつされたふん尿は土壌に還元され、それを牧草・飼料作物、野草が吸収し、太陽エネルギーを使って光合成し、再びそれが家畜のエサになるという物質の循環が行われます。

また、この循環型畜産は農業生産から見た機能は、土壌有機物の減少や塩類の集積、連作障害の防止、土壌流亡防止の土壌保全機能、堆肥の施用やマメ科牧草に共生した根粒菌による窒素固定などの地力維持機能、また、傾斜地・乾燥地・寒冷地などの穀類の生産に不向きな土地でも生育する牧草、野草を家畜を通じて人の食料を得る資源利用型で、さらに自然植生や野生動物を保護する自然環境保全と景観保持の機能などの多面的機能も有しています。

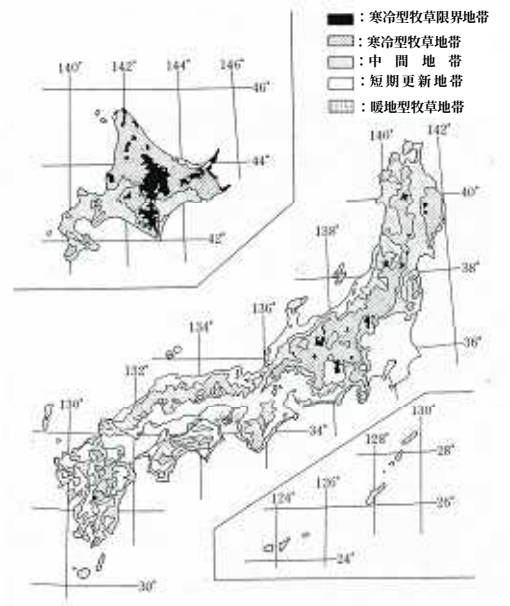


図 3-2　気象地帯区分（農林水産省生産局、平成 19 年）

（１）地帯ごとの草地の特徴

わが国の牧草の生産力を気温と日射量から算出された気象生産力（潜在生産力）に寒地型牧草の夏枯れ程度や暖地型牧草の栽培の可能性などを加えて区分された5地帯およびこれらの地帯区分における基幹となる草種について、草地開発整備事業計画設計基準（農林水産省生産局、平成19年）を引用して紹介します（図3-2、表3-1）。

寒地型牧草限界地帯

気象生産力が乾物で800kg/10a未満とされる寒地、高標高地で、寒地型牧草にとっても厳しい気象条件にあります。チモシーが適しており、オーチャードグラスでは冬枯れが発生することがあります。年平均気温が8 以下のところであり、北海道の東部・北部、東北の高標高地、関東・中部では標高2,000m以上の山岳地帯などがこれに該当します。

寒地型牧草地帯

気象生産力が乾物で800kg/10a以上であり、夏の暑さは弱く、それによる夏枯れが生じにくい地帯です。オーチャードグラスを中心とする寒地型牧草の栽培に適し、草地の永続性も高いといえます。年平均気温が8～12 のところであり、北海道の南部、東北の低～中標高地、関東・中部の中～高標高地、中国・四国・九州の高標高地などが該当します。

中間地帯

夏枯れが起きやすく、草地の維持年限が短くなります。寒地型牧草は限定されトールフェスクが適するが、オーチャードグラスは品種の選択などに注意する必要があります。年平均気温が12～14 のところであり、北関東・北陸の低～中標高地、中国・四国・九州の中標高地などが該当します。

表3-1 気象地帯区分別の基幹草種（農林水産省生産局、平成19年）

地帯区分（平均気温）	利用目的	基幹となる草種
寒地型牧草限界地帯（8 以下）	採草	ﾁﾓｼｰ、ｵｰﾁｬｰﾄﾞｸﾞﾗｽ、ｱﾙﾌｧﾙﾌｧ
	放牧	ﾁﾓｼｰ、ｵｰﾁｬｰﾄﾞｸﾞﾗｽ、ﾒﾄﾞｰﾌｪｽｸ
寒地型牧草地帯（8～12 ）	採草	ﾁﾓｼｰ、ｵｰﾁｬｰﾄﾞｸﾞﾗｽ、ｱﾙﾌｧﾙﾌｧ
	放牧	ｵｰﾁｬｰﾄﾞｸﾞﾗｽ、ﾍﾟﾚﾆｱﾙﾗｲｸﾞﾗｽ
中間地帯（12～14 ）	採草	ｵｰﾁｬｰﾄﾞｸﾞﾗｽ、ﾄｰﾙﾌｪｽｸ、ｱﾙﾌｧﾙﾌｧ
	放牧	ｵｰﾁｬｰﾄﾞｸﾞﾗｽ、ﾄｰﾙﾌｪｽｸ
短期更新地帯（14～16 ）	採草	ﾄｰﾙﾌｪｽｸ、ｲﾀﾘｱﾝﾗｲｸﾞﾗｽ
	放牧	ﾄｰﾙﾌｪｽｸ
暖地型牧草地帯（16 以上）	採草	ﾛｰｽﾞｸﾞﾗｽ、ｷﾞﾆｱｸﾞﾗｽ、ﾊﾟﾝｺﾞﾗｸﾞﾗｽ（ﾄﾗﾝｽﾊﾞｰﾗ）
	放牧	ﾊﾞﾋｱｸﾞﾗｽ[1)]、ｷﾞﾆｱｸﾞﾗｽ、ﾊﾟﾝｺﾞﾗｸﾞﾗｽ（ﾄﾗﾝｽﾊﾞｰﾗ）[2)]、ｽﾀｰｸﾞﾗｽ[2)]

[1)]宮古・八重山諸島を除く。 [2)]沖縄での栽培に適する。

短期更新地帯

寒地型牧草の夏枯れが激しく、暖地型牧草の安定生産も難しいところです。寒地型牧草のなかでも耐暑性の比較的強いトールフェスクが草地の維持に良好です。年平均気温が14～16 のところであり、南関東・東海・近畿の低標高地、中国・四国・九州の低～中標高地が該当します。

暖地型牧草地帯

暖地型牧草の安定栽培が可能とされる年平均気温が16 以上のところです。関東・東海・近畿・四国の太平洋岸、九州南部の平地～低標高地、沖縄などがこれに当たります。

なお、本州以南の草地は山間部に多く位置し、高標高、傾斜地形にある場合が一般で、放牧に供される事が多く、施肥としては放牧家畜からの排泄物と化学肥料に頼りがちで、家畜ふん尿堆肥の施用はその運搬や散布作業の困難性から少なくなります。

（2）地帯ごとの飼料作物

表3-2に、草地管理指標で示されている地域別の主要適応飼料作物を示します。草地と異なり一般に低標高のほ場で作付けされることが多く、そのため、緯度だけの差による地帯別に作付けできる飼料作物を示すことが可能です。温暖な地域ほど栽培可能な作物の種類が多くなり、二毛作や二期作が可能になります。飼料畑は牛舎から近く平坦地にあるため、施肥として堆肥が施用され、また二期作、二毛作栽培で化学肥料との施用量は一作栽培より多くります。

表3-2 地域別の主要適応飼料作物（農林水産省生産局、平成13年、一部修正）

地帯（地域）	夏作	冬作	備考
亜寒帯（北海道）	ﾄｳﾓﾛｺｼ、ｴﾝﾊﾞｸ	ﾗｲｺﾑｷﾞ、ﾗｲﾑｷﾞ	
寒冷冷温帯（東北・北陸・東山）	ﾄｳﾓﾛｺｼ、ｿﾙｶﾞﾑ、飼料ｲﾈ	麦類	二毛作可能
温帯（関東～中国）	ﾄｳﾓﾛｺｼ、ｿﾙｶﾞﾑ、暖地型1年生牧草類の一部、飼料ｲﾈ	ｲﾀﾘｱﾝﾗｲｸﾞﾗｽ、麦類	二毛作可能、夏期二期作が一部で可能
暖温帯（四国・九州）	ﾄｳﾓﾛｺｼ、ｿﾙｶﾞﾑ、暖地型1年生牧草類の一部、飼料ｲﾈ	ｲﾀﾘｱﾝﾗｲｸﾞﾗｽ、麦類	二毛作・夏期二期作可能

3) 草地土壌の炭素含量

土壌有機物は、土壌に枯死した植物体が投入されることにより増加し、土壌有機物が微生物により分解されることにより減少し、それらの差額で蓄積します。放牧や収穫で植物体が持ち出されたり、侵食により土壌が流出するとその分、土壌有機物の蓄積量は低下することになります。自然条件では、植物生産と微生物分解の差が主な土壌有機物の蓄積です。両者はともに気象条件に強く影響を受けます。十分な水と栄養がある場合には、図 3-3 のように植物生産(A)と微生物分解（好気的条件 B1、嫌気的条件 B2）のいずれも温度上昇とともに増加すると考えられます。ただし、植物は微生物よりも低温で活性が高いため、低温のほうが土壌有機物は蓄積しやすくなります。さらに、土壌有機物の微生物による分解には酸素が必要なため、土壌水分が増加し土壌中への酸素供給が低下すると、微生物分解は強く抑制されるので、湛水下の土壌では、通気性の良い土壌よりも多くの土壌有機物が蓄積します。そのほか、微生物分解を抑制する要因としては、土壌の粘土含量や有機物の質も知られています。土壌有機物は粘土の水酸基と結合すると、微生物により分解されにくくなります。とくに火山灰由来の粘土鉱物はアルミノール基の水酸基に富み、土壌有機物が多量に結合します。さらに、セルロースのような高分子有機物や、さらにフェノールを含むリグニンのような木質系有機物は分解されにくく、分解速度の目安である半減期はグルコースが 5 日であるのに対して、セルロースは 12 日、リグニンは 100 日と、リグニンは著しく分解されにくいことが示されています。

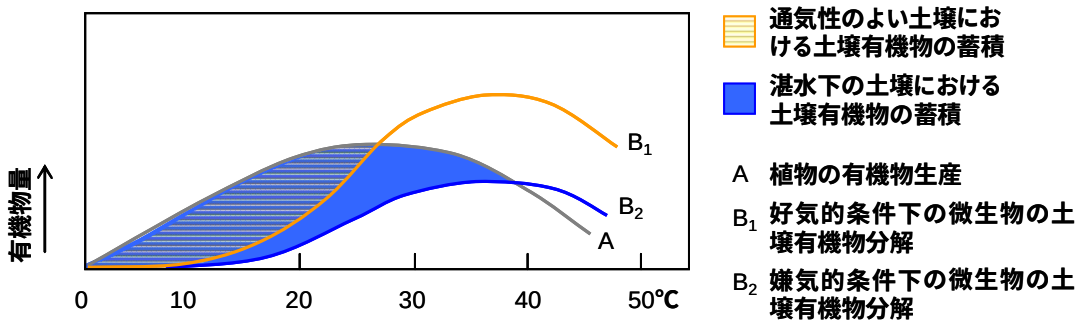


図 3-3　土壌温度と植物の有機物生産量、土壌有機物の分解量の関係の模式図

表 3-3 はわが国の土壌群別の単位面積当たりの 0-30cm までの炭素ストック量です。草地は赤色土+黄色土＋暗赤色土を除く、すべての土壌群でその他の土地利用より炭素ストックが多くなっています。樹木に比べて草本は、分解されやすい有機物が多いのですが、なぜ草地で有機物の蓄積が多いかについては、次のように考えられます。草地は人工的につくられたものであっても耕起されずに長年管理され枯死した茎葉、放牧中の家畜の糞尿もすべて土壌表面に投入され、土壌表面近傍に養分が集積します。その養分を吸うために根は表層に偏り、いわゆるルートマットが発達します。その根も、牧草の根部は普通作物や樹木に比べて大きく、根部/地上部比（R/T 比）で見ますと、イネやトウモロコシでは 0.1、樹木で 0.3 に対して、牧草はイタリアンライグラス 0.2、ペレニアルライグラス 0.3、オーチャードグラス 0.6、リードカナリーでは 4.4 です。そして、草食動物が踏みつけることで土壌が圧縮されて、土壌内部への空気の供給が少なくなり、有機物の微生物による分解が抑制されると考えられます。このように、表面への有機物の蓄積、土壌水分が高まりやすいことが草地で土壌有機物が蓄積しやすい主要因だと考えられます。

表 3-3　わが国の土壌群別の単位面積当たり土壌炭素ストック量

土壌群	土壌炭素ストック量(0-30cm)				
	tC/ha				
	森林 1)	田 2)	普通畑 2)	樹園地 2)	草地 2)
岩屑土+砂丘未熟土	39	-	33	59	79
黒ボク土（普通+多湿＋グライ）	130	112	112	119	154
褐色森林土	87	59	65	68	101
台地土（灰色＋グライ）	-	60	75	71	125
赤色土+黄色土＋暗赤色土	69	63	46	64	65
褐色低地土	-	60	50	69	108
灰色低地土	-	62	54	57	79
グライ土	92	65	66	-	-
泥炭土＋黒泥土	172	106	180	61	325
ポドゾル	106	-	-	-	-
平均	90	71	87	77	135

1) Morisada ら(2004)

2) 温室効果ガスインベントリオフィス（2009）

土壌へ有機物を蓄積させることは、大気からの炭素を隔離することになり、温暖化防止の観点からも重要です。その意味でも、草地が土壌有機物を多く蓄積するメカニズムを明らかにすることは、農業による温暖化防止に貢献すると考えられます。ここでは堆肥施与による土壌有機物の蓄積効果の例を示します。図 3-4 は、安城土壌で、堆肥を施与した場合と、施与しなかった場合の土壌有機物の変化を見たものです。堆肥を施与しなかった場合には土壌有機物は順次減少していきましたが、堆肥を施与した場合には増加していったことが示されています。実線は、有機物の蓄積と分解のメカニズムを以下のように仮定して数式化して計算した結果です。すなわち、1）土壌へ投入された植物残渣や堆肥の有機物は、微生物により分解され CO_2、微生物バイオマス、腐植の 3 者に分配される、2）CO_2 は大気へ放出され、微生物バイオマス

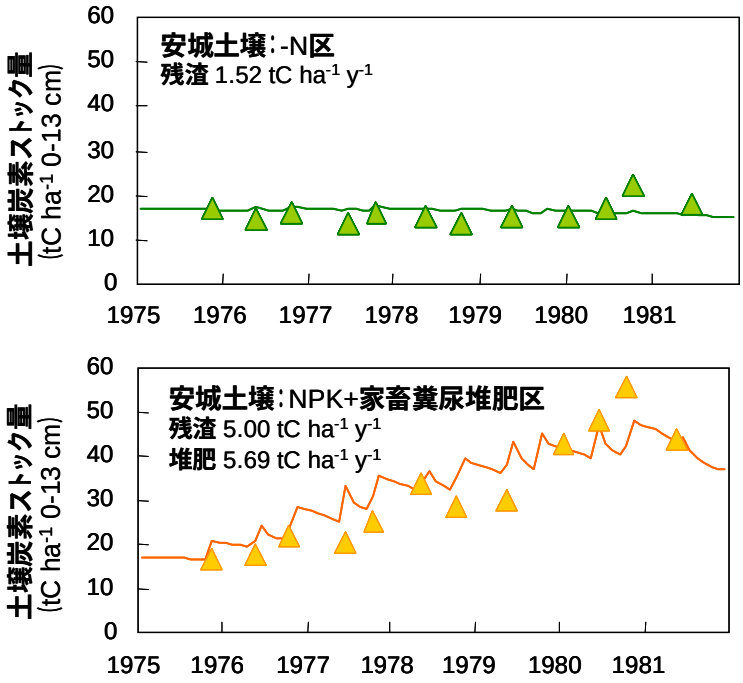


図 3-4　安城土壌における肥培管理の違いが土壌炭素ストック量の変化に及ぼす影響（Shirato and Taniyama、2003）

と腐植は土壌有機物として蓄積する、３）これら土壌有機物は、さらに微生物による分解を繰り返し受けるというものです。計算結果は、実測結果とよく一致しており、将来予測も可能であることがわかります。

4　草地飼料畑における炭素窒素の循環と微生物

１）炭素循環

植物は、光合成によって大気中の二酸化炭素から有機物を生産します。生産された有機物の一部は、植物自身の呼吸に利用され、大気へ二酸化炭素として放出されますが、残りは葉や茎、根などの組織、すなわち植物の正味の生産量（純一次生産量）となります（図 4-1）。

植物の一部は収穫などで持ち出されますが、残りは枯死脱落により土壌に供給されます。さらに、土壌に供給される有機物には、植物の枯死体だけでなく、投入された堆肥も挙げられます。これら植物の枯死体や堆肥は、土壌中に存在する土壌生物（土壌動物、微生物）によって分解され、二酸化炭素として大気に放出されるほか、土壌有機物として集積します。土壌有機物は、粘土鉱物と化合した有機無機複合体となった腐植のような、微生物に分解されにくい比較的安定した形で集積しますが、それでもその一部は、再び微生物によって分解されます。

植物の枯死体や堆肥、土壌有機物が微生物に分解されるとき、好気的な状態では上に述べたように二酸化炭素が放出されますが、水分が高い嫌気的な状態ではメタンが放出されます。しかし、土壌中にはメタンを酸化する微生物も生息しており、大気中や土壌中のメタンは消費もされます。

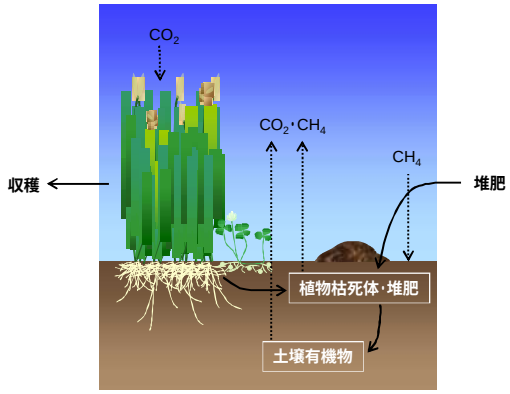


図4-1　草地における炭素の循環（模式図）
（CO_2は二酸化炭素、CH_4はメタンを示す）

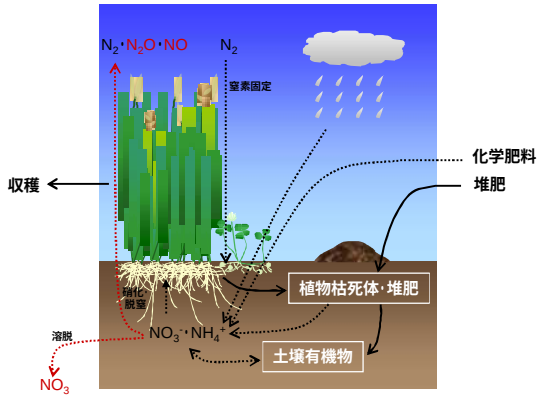


図4-2　草地における窒素の循環（模式図）
N_2は窒素、N_2Oは亜酸化窒素、NOは一酸化窒素、
NO_3^+は硝酸イオン、NH_4^-はアンモニウムイオンを示す。

２）窒素循環

窒素は植物の生長にとって必要不可欠な養分でありますが、植物は、大気中に大量に存在する窒素ガスを直接利用することはできません。大気中の窒素をとりこめるのは、窒素固定能を持つ窒素固定菌のみです（図 4-2）。クローバーのようなマメ科植物は、窒素固定をおこなう根粒菌と共生していますが、一般的な植物は土壌中に存在する無機態窒素（アンモニア態窒素と硝酸態窒素）を利用するしかありません。

土壌中の無機態窒素は、降雨、化学肥料、土壌有機物の分解、植物枯死体の分解、堆肥の分解

によって供給されます。微生物による有機物（土壌有機物、植物枯死体、堆肥）の分解は、二酸化炭素を大気へ放出するものの（炭素循環を参照)、同時に無機態窒素を供給するという重要な役割を担っているのです。

土壌中の無機態窒素は、全てが牧草に吸収されるわけではありません。一部は硝化細菌や脱窒菌といった微生物に利用され、窒素、亜酸化窒素、一酸化窒素が大気に放出されます。また、土壌中の硝酸態窒素は地下へ溶脱して、地下水や河川の汚染源ともなり得ます。

３）草地の微生物

土壌微生物は、有機物を分解し、窒素をはじめとする養分の加給化や消失を起こすなど土壌中で大きな役割を持っています。さらに温室効果ガス（二酸化炭素(CO_2)、メタン(CH_4)、亜酸化窒素(N_2O)）の生産も土壌微生物の活性の一つです。土壌微生物はその大きさにより細菌、放線菌、糸状菌、原生動物に大別されます。細菌は土壌団粒中の細孔隙に生息し、大型の糸状菌や原生動物は団粒間の粗孔隙に生息します。細菌、放線菌、糸状菌、原生動物のいずれもが有機物を分解して CO_2 を放出します。また細菌には CH_4 を酸化分解し CO_2 にするメタン酸化菌もあります。さらに土壌の団粒が水で飽和されて還元状態になると、メタン生成菌が CH_4 を生成するようになります。N_2O は、硝化菌による硝酸化成の副産物および、脱窒菌による脱窒の中間産物として生産されます。

草地は耕起されず、ルートマットを持ち、土壌表面近傍に養分が集積していることから、草地土壌の微生物は、表層に偏っている傾向にあります。耕起される畑土壌よりも、落葉落枝が表面にある森林土壌に類似しています。表に示すように、草地は畑に比べて表層(0-5cm)で嫌気性菌数が多く、次表層（5-10cm）で好気性菌、糸状菌が少ない傾向にあります。草地で畑より嫌気性菌が多い理由として、収穫や放牧のために表層が締固められたためとも考えられます。

表 4-1　供試土壌の微生物数(沢田・新田 1975)

土地利用	好気性細菌				嫌気性細菌				糸状菌			
	×10^6/g 土壌				×10^5/g 土壌				×10^4/g 土壌			
	0-5cm		5-10cm		0-5cm		5-10cm		0-5cm		5-10cm	
採草地	100	a	14	a	25	ab	17	a	55	ab	13	a
放牧地	93	a	20	a	38	a	14	a	72	a	16	a
畑	53	a	38	b	18	b	14	a	48	b	30	b
未耕地	35	a	12	a	22	ab	14	a	28	ab	9	a

４）微生物が生産する温室効果ガス

草地のように酸化的な土壌条件では、堆肥や肥料に含まれるアンモニア態窒素（NH_4^+）が、土壌微生物のはたらきによって亜硝酸態窒素（NO_2^-)、次に、硝酸態窒素（NO_3^-）に酸化され、前者の過程の副産物として亜酸化窒素が生成されます。さらに、硝酸態窒素の一部は土壌微生物のはたらきによって最終的に、窒素（N_2）にまで還元されますが（図 4-3)、この過程の中間産物と

して亜酸化窒素が生成されます。亜酸化窒素の排出量は、施肥量、地温、降水量などの影響を受けることが知られています。草地による炭素吸収機能を最大限活用するため亜酸化窒素の排出量を出来るだけ少なくする草地管理が求められています。草地のように酸化的な土壌はメタンの吸収源として機能する場合が多いと言われています。草地によるメタン吸収は、土壌微生物のはたらきによります（図 4-4）。土壌表層の通気性が降雨などで低下するとメタン吸収が低下します。施肥もメタン吸収を低下させます。

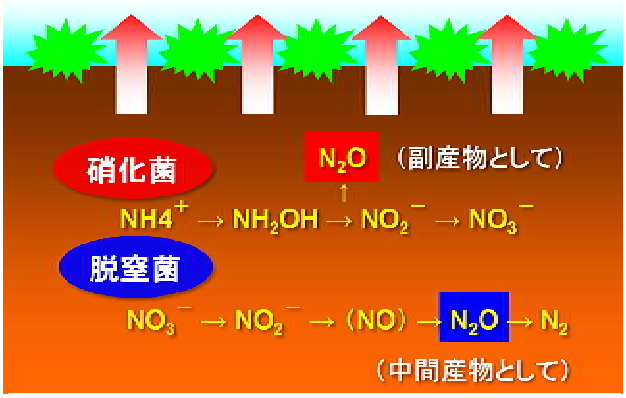


図 4-3　微生物による亜酸化窒素（N_2O）の生産

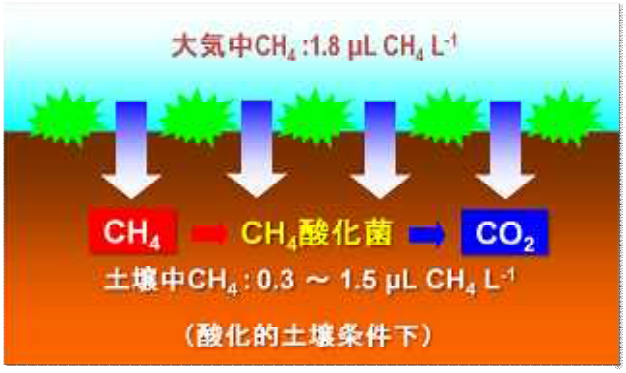


図 4-4　微生物によるメタン（CH_4）の吸収

５）窒素施肥によるメタン及び亜酸化窒素の放出・抑制メカニズム

（１）メタン

草地のメタン吸収量は窒素施肥により減少します。原因は土壌微生物相の変化，分子形状の類似するアンモニア態窒素によるメタン酸化の阻害，亜硝酸生成や土壌酸性化によるメタン酸化菌の活性低下など複合的です（図 4-5）。

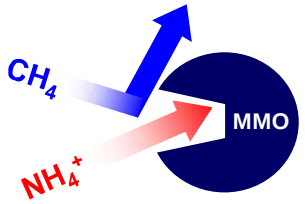


図 4-5　窒素施肥によるメタン（CH_4）吸収阻害

（２）亜酸化窒素

草地への窒素肥料の施与は、土壌中に存在するアンモニウム態窒素と硝酸態窒素の量を増やします。これらは植物にとって重要な養分ですが、同時にアンモニウム態窒素は硝化細菌のエネルギー源、硝酸態窒素は脱窒菌にとっての電子授与体ともなります（窒素循環を参照）。亜酸化窒素は硝化、脱窒によって生成されるため（草地の微生物と温室効果ガスを参照）、窒素肥料の施与は亜酸化窒素の生成を促進します。

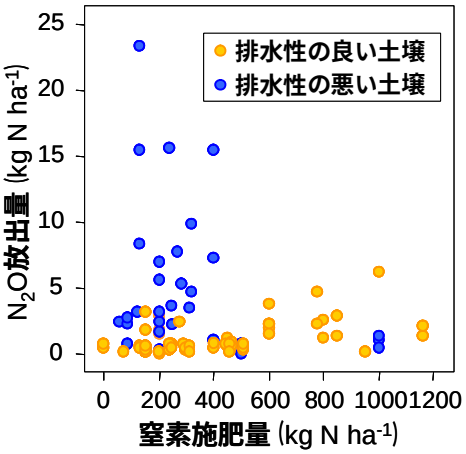


図 4-6　日本の畑地および草地における窒素投入量と亜酸化窒素（N_2O）放出量の関係（Akiyama et al., 2006）

畑地や草地への窒素施与量を増やすと、土壌表面からの亜酸化窒素放出量も増えることはよく知られています。さらに、排水性の悪い土壌では、排水性の良い土壌に比べると、同じ窒素施与量であっても亜酸化窒素放出量が大きいことも報告されています（図 4-6）。これは、硝化菌や脱窒菌による亜酸化窒素の生成が、土壌の水分状態に大きく影響を受けるためです。日本の畑地や草地では、施肥した窒素に由来する亜酸化窒素の放出割合は、排水性の良い土壌で 0.3%、排水性の悪い土壌で 1.4%と見積もられています。

６）堆肥施与による土壌環境改善効果と施与基準

堆肥施与は、団粒構造の維持に効果があります。団粒構造の形成により、孔隙量が増加し、保水性、通気性、透水性が向上します。図は、北海道立十勝農試において実施された堆肥施与の効果の実証試験の結果です。30 年間の堆肥施与により、団粒量が増加し、容積重が低下したことを示しています。容積重の低下は、孔隙量の増加を意味します。

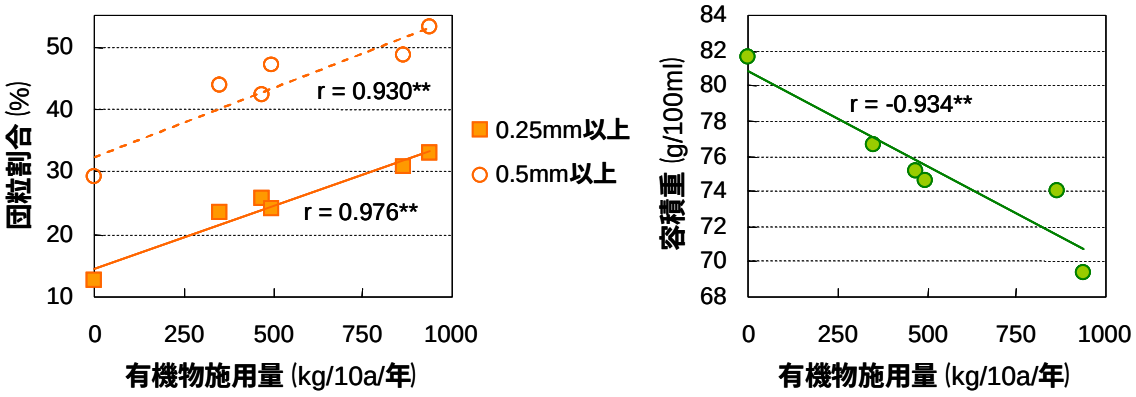


図 4-7　有機物施与量と団粒割合および容積重の関係(十勝農試)（有機物は乾物率 32%（窒素 5.9kg/t 生重）の堆肥）

草地、飼料畑における適正な堆肥施与量の決定は、堆肥施与により牧草や飼料作物の元素組成が、施肥標準に準じて栽培したものに比べて劣化しないことを前提として行われます。堆肥には牧草や飼料作物に必要な栄養元素が含まれていますが、家畜の飼料として優良なバランスをとっているわけではありません。例えば、牛糞堆肥にはカリウムと窒素がとくに多く含まれています。このため、多量に牛糞堆肥を施用すると、これらの元素が、牧草、飼料作物中に過多となります。カリウムが土壌中に多量に存在すると、牧草のマグネシウム吸収が阻害され、低マグネシウム含有率の牧草を牛が摂取すると、グラステタニーという家畜疫病が生じます。また高窒素含有率の牧草を牛が摂取すると、体内でマグネシウムを沈殿させるために、グラステタニーが発症しやすくなります。さらに、牧草中に硝酸態窒素含有率が高まると、家畜の硝酸中毒も発生するようになります。堆肥施与は、堆肥から供給されるこれらカリウムや窒素量が、施肥標準を超えないように行われなければなりません。

7）草地更新と温室効果ガス

牧草の収量は、草地造成から 2～3 年後に最大となり、その後は、徐々に低下します。牧草の収量低下の原因は、牧草の夏枯れによる雑草繁茂、施肥による土壌の酸性化、トラクタ走行による土壌の緻密化など様々です。そこで、草地の生産性を回復させるため、7～8 年に 1 回、草地更新を行うことが推奨されています。草地更新では、古い牧草を土壌にすき込み、土壌酸性を改善するため石灰質資材を混和し、地表面を鎮圧後、施肥と播種を行います。草地更新時には、古い牧草の根や刈株が土壌微生物により分解され亜酸化窒素（N_2O） と二酸化炭素（CO_2）が排出されますが、更新後、牧草が順調に生育し始めると光合成量と収量が増加し、牧草の炭素固定量が増加するため、更新前の草地に比べて温室効果ガスの収支が改善します。適期に草地更新を行うことで、牧草生産の向上と炭素吸収機能回復を両立させることができます。

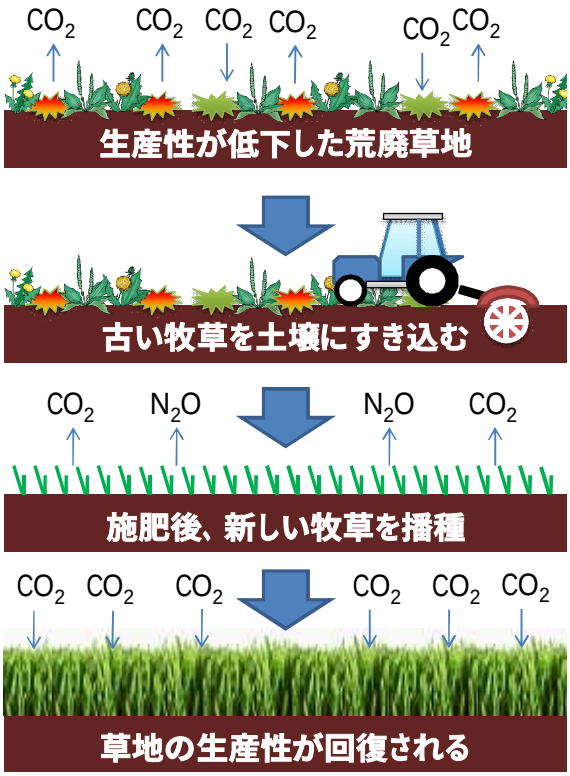


図 4-8　適期の草地更新による炭素吸収機能の回復

5　温室効果ガス収支の測定法

1）草地における温室効果ガス収支の測定項目

採草地で吸収もしくは放出する温室効果ガスは、二酸化炭素、メタン、亜酸化窒素です（図 5-1）。メタンと亜酸化窒素は土壌中の微生物のはたらきによって吸収または放出されるので、その収支を求めるには土壌表面からの吸収、放出量を測定します。土壌表面からの吸収・放出量は、チャンバー法で測定することができます。チャンバー法の説明は次節に述べます。

二酸化炭素は、微生物のはたらきによって土壌表面からも放出されるだけでなく、植物によって吸収もされます（草地の炭素循環を参照）。さらに、植物に吸収された二酸化炭素は有機物に変換され、収穫物と

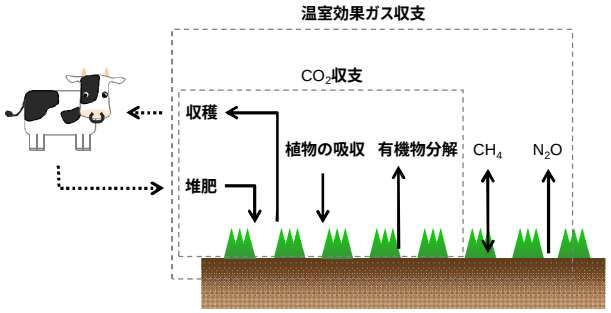


図5-1　草地の温室効果ガス収支を構成する要素
（CO_2は二酸化炭素、CH_4はメタン、N_2Oは亜酸化窒素を示す）

して草地の外へ持ち出されるし、その後堆肥として草地へ還元されます。そこで、二酸化炭素収支を求めるにはこれらを全て考慮しなければならず、その測定方法は複雑となります。二酸化炭素収支の測定方法には、生態学的手法と呼ばれる古典的な方法の他に、二酸化炭素の測定機器の発達により可能となった渦相関法などが使われます。二酸化炭素収支の測定手法の詳細は、次節に述べます。

2）メタン、亜酸化窒素収支の測定方法

土壌表面からの温室効果ガスの吸収・放出量は、チャンバー法で測定することができます。まず、土壌表面にチャンバーと呼ばれる箱を設置します（図 5-2）。その後、チャンバーを密閉し、チャンバー内の温室効果ガス濃度の増減を測定します。土壌に温室効果ガスが吸収されていると、チャンバー内の温室効果ガス濃度は低下しますが、逆に土壌から温室効果ガスが放出されていると、チャンバー内の温室効果ガス濃度は上昇します。そこで、密閉したチャンバー内の空気を一定時間毎に採取し、その濃度を測定することで、チャンバー内の温室効果ガス濃度の増減速度を計算します。さらに、単位面積あたりの温室効果ガスの吸収・放出量を計算することができます。

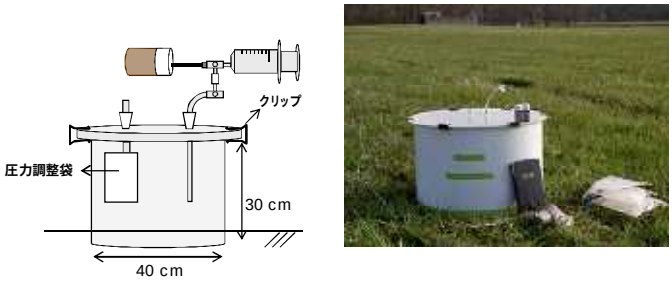


図5-2　チャンバー模式図と写真

3）二酸化炭素収支の測定方法

採草地における二酸化炭素収支は、植物の吸収量、有機物の分解、堆肥による投入炭素量、収穫炭素量を全て考慮することで求めることができます。

二酸化炭素（CO_2）収支＝植物の正味の吸収量－有機物の分解量＋堆肥による投入炭素量－収穫炭素量

この二酸化炭素収支は、その圃場が蓄えたもしくは損失した炭素の量を示し、プラスの値なら炭素の蓄積（二酸化炭素の吸収）、マイナスなら炭素の損失（二酸化炭素の放出）を意味します。

堆肥による投入炭素量は投入量と堆肥の炭素含有率の積として、収穫炭素量は収穫量と収穫物の炭素含有率の積として求められます。上の式中で、理論的には「植物の正味の吸収量－有機物の分解量」は「草地・飼料畑の正味の吸収量」となります。植物の正味の吸収量と有機物の分解量を、それぞれ別個に測定する方法を『生態学的手法』といいます。一方、草地・飼料畑の正味の吸収量を直接求める方法を『渦相関法』といいます。以下にその 2 つの方法を説明します。

（1）生態学的手法

植物や土壌における個々の炭素の流れ（生態学的プロセス）を測定して炭素収支を求める方法です。炭素収支は植物の正味の吸収量と有機物分解量の差として求められます。なお、有機物分解量は、土壌有機物、植物枯死体、堆肥の分解量の 3 者の合計量です（図 5-3）。生態学的手法では、１）植物の刈り取り、重量測定、炭素含有率の測定、２）裸地区での土壌表面からの二酸化

炭素放出量の測定、３）植物枯死体および堆肥を含む区、含まない区での二酸化炭素放出量の測定が必要です。

植物の正味の吸収量は、植物体の炭素の現存量の変化量から求めます。すなわち、生育期間中、植物を数回刈り取り、その重量と炭素含有率の積として炭素現存量を求め、刈取り毎の現存量の差が期間中の植物の正味の吸収量となります。

土壌有機物の分解量は、植物の根を取り除いた「裸地区」で、土壌表面から放出する二酸化炭素をチャンバー法（メタン、亜酸化窒素の測定方法を参照）により測定し、それを生育期間中積算して求めます。植物の根を取り除く理由は、植物の根も呼吸により二酸化炭素を放出するからです。

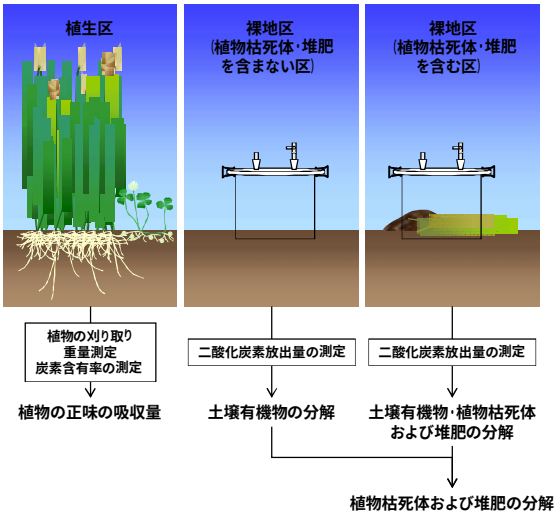


図5-3 生態学的手法による炭素収支の求める方法

植物枯死体および堆肥の分解量は、植物枯死体および堆肥を含む区と、含まない区を設け、土壌表面からの二酸化炭素放出量を同様にチャンバー法により測定し、それらを期間中積算します。植物枯死体および堆肥の分解量は、植物枯死体および堆肥を含む区と含まない区の二酸化炭素放出量の差として得られます。

（２）渦相関法による CO_2 フラックス（輸送量）などの野外観測

渦相関法を用いたフラックスの観測は風の乱れ（風向・風速の変動）と気温や水蒸気、CO_2 などの各種の濃度変動が高速（10Hz 程度）で測定できる測器の開発が進むことにより可能となりました（図 5-4）。風の乱れや気温の変動は超音波の伝達速度が風向・風速により変化すること、超音波の伝播速度が気温により変わることを利用した「超音波風向風速温度計」により観測します。また、水蒸気・CO_2 濃度変動は水蒸気、CO_2 が赤外線を吸収することを利用した「赤外線分析計」を用いて測定します。渦相関法では、このような方法で測定した風の乱れ（鉛直成分）と気温、水蒸気量、CO_2 濃度などの時間変動の相関関係を求めて熱、水蒸気、CO_2 の鉛直輸送量（フラックス）を計算します。たとえば CO_2 のフラックスの測定

図 5-4　渦相関法による CO_2 フラックス（輸送量）などの野外観測

で見ると風の乱れが下向きの時に、もし CO_2 濃度が高い場合は高濃度の CO_2 を含む空気が下向きに運ばれたことを示し、風の乱れが下向きの時に、逆に CO_2 濃度が低い場合は低濃度の CO_2 を含む空気が下向きに運ばれたことになります。このように、風の乱れと CO_2 濃度を同時に測り、それらの変動の相関関係を調べることにより、CO_2 が下向きあるいは上向きのどちらに運ばれたかが分かります。図には草地に超音波風向風速温度計と赤外線分析計を小塔に並べて設置して、風の乱れ、気温変動、CO_2 濃度、水蒸気量の測定している様子を示します。

渦相関法による測定の特徴は時々刻々の CO_2 フラックス（輸送量）などが連続的に観測されることで、各種物質などのフラックスの日内変化、季節変化などを詳細に調べることができて、気温や日射などの気象条件、植生活動の日変化、季節変化との関係を解析できることにあります。また、渦相関法により炭素収支（植生と大気間の炭素の出入り）を前述の生態学的な手法とは独立して調査することができることから、両手法による調査をあわせて行い、それらの特色を生かした解析、測定結果や測定誤差などの相互検証が可能となります。

４）地球温暖化指数の計算方法

二酸化炭素、メタン、亜酸化窒素それぞれのガス 1 キログラム当たりの温室効果の大きさ（地球温暖化に対する影響）は同一でなく、二酸化炭素を 1 とすると、メタンが 23、亜酸化窒素が 296 とされている（気候変動に関する政府間パネルの 2001 年報告書より）。このように、ガスの種類による温室効果の大きさの違いを考慮した温室効果ガスの総合的な収支を地球温暖化指数と呼びます。すなわち、

地球温暖化指数（kg CO_2 eq ha^{-1} $year^{-1}$）
＝CO_2 放出量（kg CO_2 ha^{-1} $year^{-1}$）×1
＋CH_4 放出量（kg CH_4 ha^{-1} $year^{-1}$）×23
＋N_2O 放出量（kg N_2O ha^{-1} $year^{-1}$）×296

地球温暖化指数がプラスなら、その圃場は地球温暖化を促進し、地球温暖化指数がマイナスならその圃場は地球温暖化を抑制すると言えます。

成　果　編

１　自給粗飼料生産のライフサイクルアセスメント

１）牛乳生産量の向上は牛乳１トン当たり地球温暖化負荷を低減させる

- LCA にもとづいて求めた，2006 年度での生産牛乳１トン当たり地球温暖化負荷は約 1,150kgCO_2等価量です。
- わが国全体での牛乳生産に伴う地球温暖化負荷のうち，直接農家から排出されているのは約 5Tg/年で，農業全体の温暖化ガス排出の約 19%です。

LCA にもとづいて求めた，化学肥料・農薬・資材・機械・施設の製造，購入飼料および自給飼料の栽培，飼養管理，排せつ物処理を含む，生産牛乳１トン当たりの地球温暖化負荷の推移を図 1 に示しました。1994 年までは負荷量が低下する傾向が見られ，それ以降はほぼ横ばいの結果になりました。1994 年までの低下は，乳牛の泌乳能力の向上や飼料品質の向上による乳量増加が影響したと考えられます。このことから，乳牛の遺伝的改良や飼料の改善による乳量増加は，生産牛乳当たりの地球温暖化負荷を低減させる効果が期待されます。

図１の結果にわが国全体の生産乳量を乗じて求めた，牛乳生産による地球温暖化負荷の推移を図２に示しました。牛乳生産は 1996 年前後に最大となり，最近は漸減傾向にありますが，牛乳生産からの地球温暖化負荷は 1992 年前後がピークで，それ以降は漸減傾向にあります。わが国の 2006 年度の温室効果ガス排出量は約 1,342Tg/年，そのうち農業からの排出量は約 27Tg/年とされています。図 2 の地球温暖化負荷のうち，直接農家から排出されているのは約半分の 5Tg/年前後で，農業全体の約 19%となります。

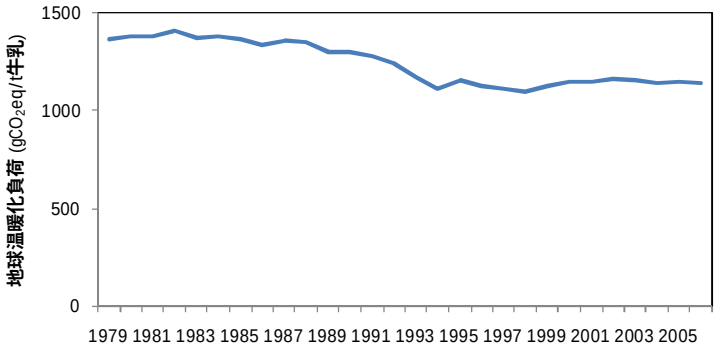


図１　生産牛乳１トン当たりの地球温暖化負荷の推移

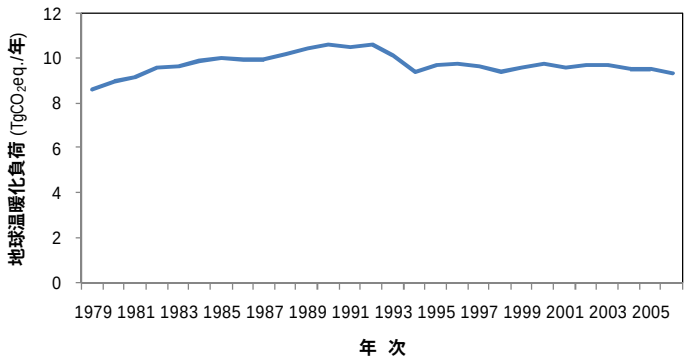


図２　酪農からの地球温暖化負荷の推移

築城幹典（岩手大学農学部）

2）自給飼料利用により地球温暖化負荷を低減できる

- 搾乳牛の頭数規模別生産牛乳１トン当たり地球温暖化負荷は，頭数規模が大きいほど低い傾向が見られました。
- 地域別でみると，購入飼料への依存割合が高い北陸，四国地方では高い傾向が見られ，依存割合の低い北海道で低い傾向が見られました。

LCA にもとづいて求めた，生産牛乳１トン当たりの地球温暖化負荷を，搾乳牛の飼養頭数規模別にみた結果を図１に示しました。頭数規模が大きい農家ほど，生産牛乳１トン当たりの地球温暖化負荷は低い傾向が見られました。飼養頭数の多い農家ほど１頭当たり乳量が高い傾向が見られ，それが影響したと考えられます。

地域別にみた地球温暖化負荷を図２に示しました。北海道で低い傾向が見られ，北陸，四国地方では高い傾向が見られました。１頭当たり乳量は地域間で差はみられませんでしたが，負荷量の高かった北陸，四国地方では購入飼料への依存割合が高く，負荷量の低かった北海道では購入飼料への依存割合が低い傾向がみられました。このことから，自給飼料利用により地球温暖化負荷を低減できると考えられます。

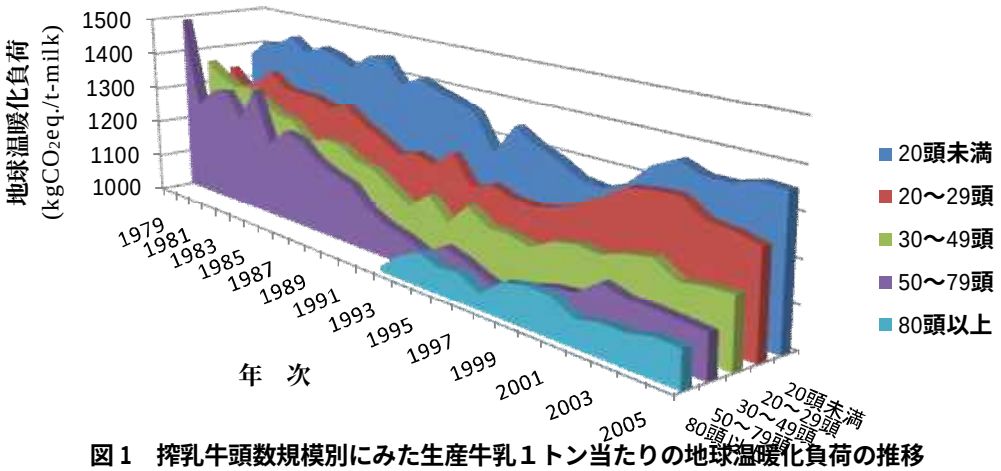


図１　搾乳牛頭数規模別にみた生産牛乳１トン当たりの地球温暖化負荷の推移

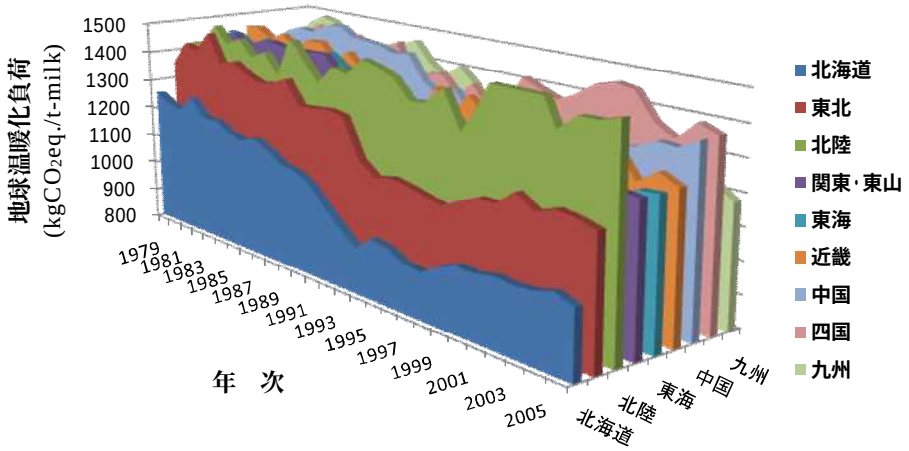


図２　地域別にみた生産牛乳１トン当たり地球温暖化負荷の推移

築城幹典（岩手大学農学部）

3）堆肥製造過程からの温室効果ガス発生量は高い

- わが国の農業からの温室効果ガスは，稲作，農地土壌，消化管内発酵，家畜排せつ物管理が主な発生源となっており，家畜排せつ物管理の主体となっている堆肥製造過程での温室効果ガス発生の抑制は重要です。

わが国の農業からの温室効果ガスは，稲作，農地土壌，消化管内発酵，家畜排せつ物管理が主な発生源となっており，家畜排せつ物管理の主体となっている堆肥製造過程も重要な発生源となっています(図 1)。今回の調査においても，堆肥施用量が比較的多かった地域の例では，LCA による地球温暖化負荷に占める堆肥製造の割合が高くなっていました(図 2)。堆肥化過程では，温室効果の高いメタンと亜酸化窒素の両方が発生し，いずれも嫌気的な条件で発生量が多くなります。これらの温室効果ガスは，堆肥化の手法によって発生量が変わります。図 3 に，天日乾燥，強制発酵，堆積発酵という 3 種類の堆肥化手法での温室効果ガス発生量を，堆積発酵を 100 としたときの相対値で示しました。メタンでは，堆積発酵 100 に対し天日乾燥 5，強制発酵 1，亜酸化窒素では，堆積発酵 100 に対し天日乾燥 83，強制発酵 10 となり，堆肥化手法によって温室効果ガスの排出が大きく変わることがわかります。したがって，堆肥化に際しては，こうした手法間での差を考慮し，温室効果ガス発生の少ない堆肥化手法を選択することが重要です。

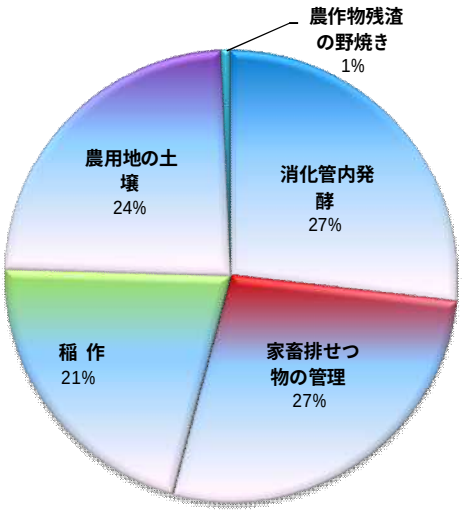


図1　農業分野からの温室効果ガス排出割合

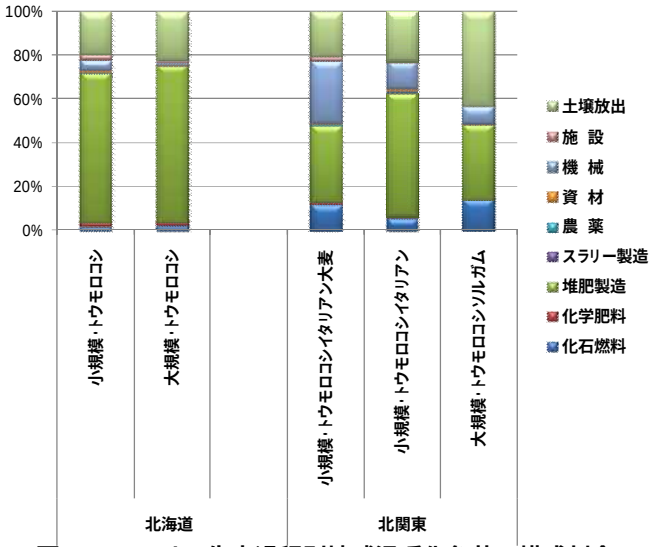


図2　LCA による生産過程別地球温暖化負荷の構成割合

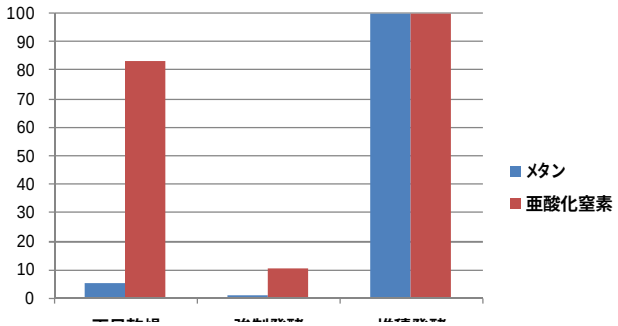


図3　各堆肥化方式でのメタンおよび亜酸化窒素の排出係数
堆積発酵を 100 としたときの相対値
(国立環境研究所 2009)

築城幹典（岩手大学農学部）

4）コントラクターによる粗飼料生産は地球温暖化負荷量を軽減させる

- コントラクターは個別経営に比べ，飼料作物乾物当たりの地球温暖化負荷が低い。

飼料作物の収穫・調製作業の効率化と作業受委託による労働時間の短縮のため，コントラクターの利用が広まってきています。コントラクターでは，飼料作物の収穫・調製作業の高性能機械導入とその利用密度の向上による効率化が期待できます。LCA では，飼料生産に用いられる機械や資材の製造過程での温室効果ガス排出もカウントされるため，機械，施設の効率的な利用は地球温暖化負荷を引き下げると期待されます。図 1 は，肥培管理の比較的類似している個別経営とコントラクターによる，トウモロコシ生産に伴う地球温暖化負荷を生産過程別に示しています。コントラクターでは，機械および施設の製造に伴う地球温暖化負荷が個別経営よりも少なくなっています。同じような機械を使っていても稼働時間が長く収量が増えれば，収量当たりの負荷は小さくなることになります。一方，この事例では，個別経営とコントラクターの間で化石燃料の消費にあまり差はみられませんでした。コントラクターは広域をカバーして作業する場合もあり，そのような場合には圃場間の移動などで燃料を多く消費することになります。したがって，請負圃場の集中化，サイロや貯蔵場所の効率的な配置，作業の効率化が地球温暖化負荷削減に重要となってきます。

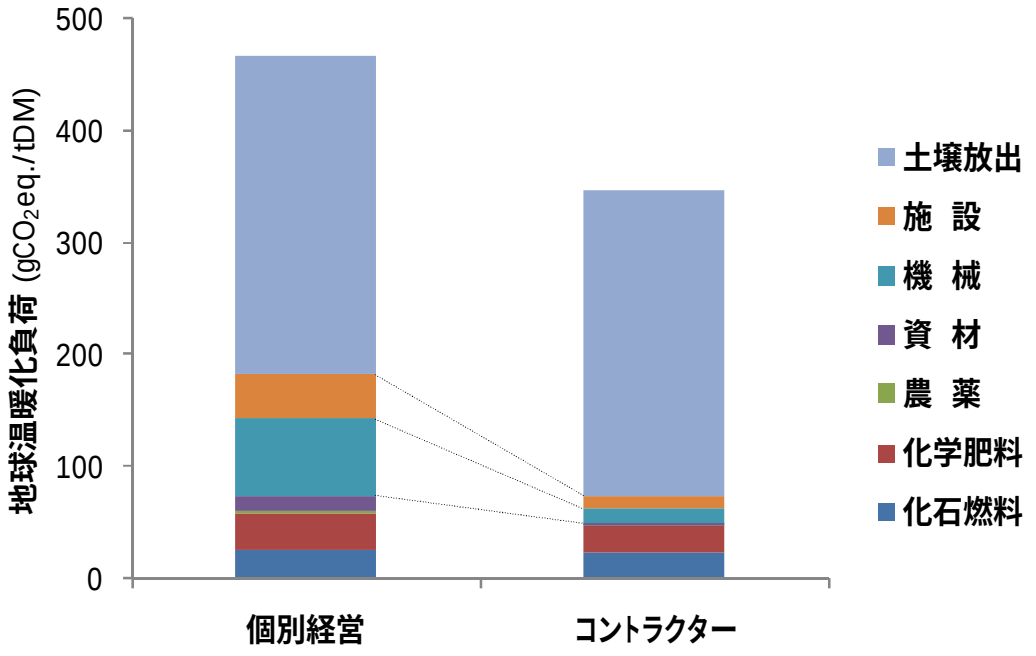


図1　トウモロコシ生産による地球温暖化負荷の生産過程別構成

築城　幹典（岩手大学農学部）

２．草地・トウモロコシ畑の温室効果ガス排出の特徴

１）草地では他の土地利用に比べて温室効果ガス排出量が少ない

- 草地は、不耕起で管理され、地表面に有機物が蓄積するため、炭素の排出量を小さくします。堆肥施与により土壌炭素貯留量を高めます。

草地がもつ地球温暖化防止効果を明らかにするために、平成１６年度から平成２２年度まで、図１に示すように全国４ヵ所の測定地点を設け、北海道から九州の草地に化学肥料区と堆肥区を設置して、炭素収支と、N_2O 排出量、CH_4 排出量から温室効果ガス収支(温暖化指数、GWP）を測定しました（『温室効果ガス収支の求め方』参照)。

図２は草地の結果を、道央で測定されてきた休閑地、畑作（化学肥料および堆肥施与)、水田（鉱質土壌および泥炭地）の結果と比較したものです。GWP が正ですと圃場から温室効果ガスが排出、負ですと吸収を意味します。草地の GWP は比較的小さいことがわかります。堆肥区では負となりました。堆肥を投入した畑も負の値となっており、堆肥投入は GWP を低下させる効果を持っていることがわかりました。GWP がとくに大きかったのは休閑地と泥炭地の水田でした。休閑地は植物の炭素同化量が小さいことが原因です。水田にワラを残すと CH_4 排出量が増加します。泥炭地の水田では、収穫後ぬかるんで圃場からワラを搬出できないため、CH_4 排出量が増加したことが高い GWP の原因でした。草地の特徴である不耕起栽培、堆肥施与は温暖化抑制に効果的な技術であると期待されます。

図１　草地試験区の位置

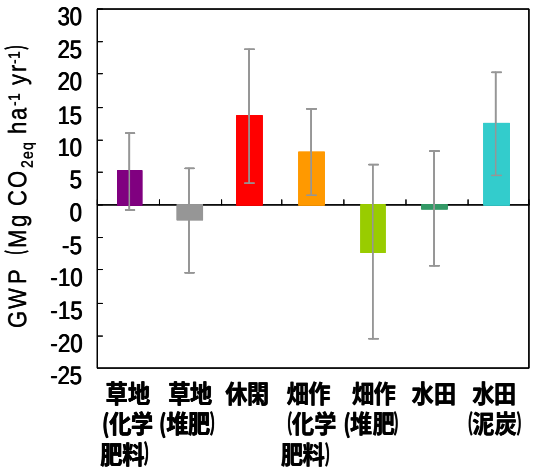


図　２　草地の化学肥料区、堆肥区およびさまざまな土地利用における温室効果ガス収支（GWP）の比較

波多野　隆介（北海道大学大学院）

２）草地の正味の二酸化炭素の吸収量（ＮＥＰ）の特徴は？

渦相関法によって大気から草地への正味の CO_2 吸収量（NEP）を４地区で調査しました（図）。

1) **草地は水田に比べて植物の生育期間が長いため、草地による正味の CO_2 吸収がみられる期間が長い。もっとも生育期間が短い中標津でも、年間で約 7 ヶ月間は日中、NEP が正値を示した。これに対して、水田では NEP が日中、正値を示す期間は年間で約 4 ヶ月間であった。**
2) **草地の NEP の吸収と放出の最大値を水田と比較すると、吸収の最大値は水田とほぼ同程度であり、放出の最大値は水田よりもやや大きいことから、草地の NEP は水田よりも大きい。**
3) **草地の正味の二酸化炭素の吸収量は暖かい地域ほど高く、宮崎では冬でも CO_2 の吸収は高い。**

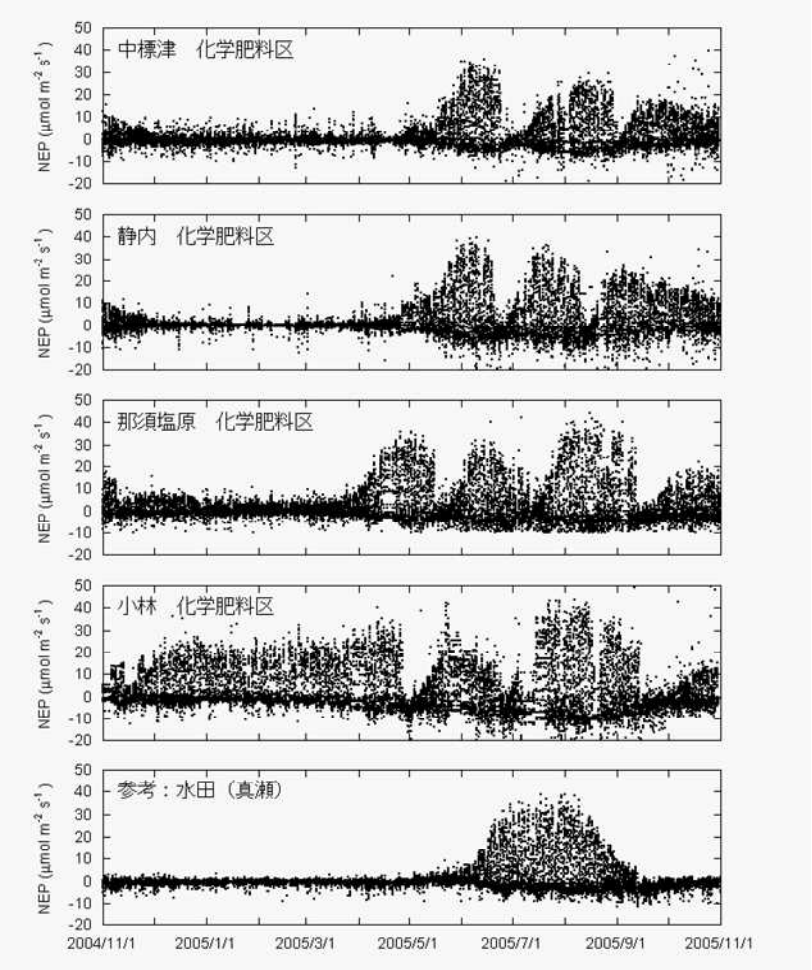


図　各調査地点の化学肥料区で観測された NEP の季節変化（2004 年 11 月～2005 年 10 月）

（個々のデータは 30 分毎の NEP の値（1m² の土地面積の草地が 1 秒間に吸収・放出する CO_2 のモル数）を示し、正の値は草地による CO_2 吸収、負の値は草地からの CO_2 放出を表す。比較のために、茨城県つくば市真瀬の水田（イネ単作田）で、同じ時期に観測された NEP を最下段に示す）

宮田　明（農業環境研究所）

３）草地及び飼料畑における生産の特徴は？

・わが国の草地や飼料畑を使った家畜生産は、資源循環型畜産です。
・草地は永年的に採草や放牧に使われ、草地更新により収量が高まります。
・飼料畑は通常毎年１回播種され、飼料畑の収穫量は暖地で大きい傾向があります。

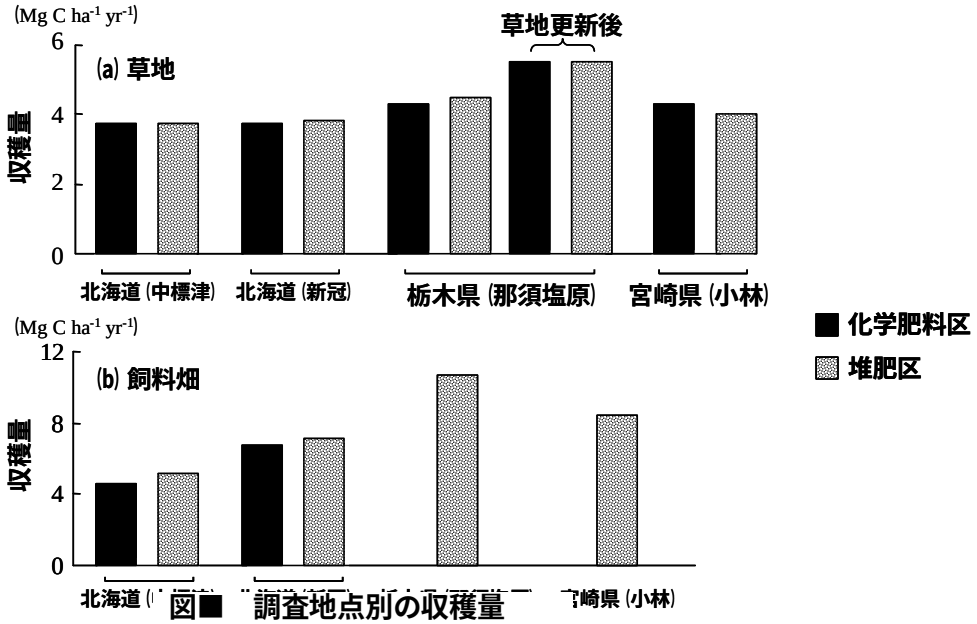
わが国の草地や飼料畑を使った家畜生産は、資源循環型畜産といえます。即ち、土－草－家畜の循環系を構成しており、家畜から排せつされたふん尿は土壌に還元され、それを牧草・飼料作物、野草が吸収し、太陽エネルギーを使って光合成し、再びそれが家畜のエサになるという物質の循環が行われます。なお、わが国の平成20年の牧草・飼料畑の作付け面積は902千ha（牧草708千ha、飼料作物等194千ha）。

（１）草地の特徴

草地の牧草には寒地型牧草と暖地型牧草があります。寒地型牧草の生育適温は15～20℃で、北海道から九州の広い地域で生産され、採草や放牧の利用がされています。また暖地型牧草は、生育適温が25℃以上の暖地である九州から沖縄先島諸島に至る地域で採草および放牧のために栽培されています。採草地は年に2～3回収穫が行われ、その作業には大型機械が稼働可能な平坦な所に作られますが、放牧地は山間の傾斜地にも作られています。草地は一度造成されると数年にわたって利用され、牧草生産量の低下時には草地更新が行われます。草地には施肥が行われますが、図■に示すようにいずれの地域も化学肥料区と堆肥区の間に大きな違いはありません。また草地更新により、収穫量が増加することが分かります。

（２）飼料畑の特徴

わが国では飼料作物はトウモロコシ、イタリアンライグラスがよく作られ、収穫後はサイレージなどに調製・利用されます。草地と異なり毎年播種栽培されます。温暖な地域ではトウモロコシの二期作が可能です。それ以外の地域では、トウモロコシとイタリアンライグラスなどの組み合わせの二毛作が行われています。図■に示すように、収穫量は暖地で寒冷地より多い傾向があります。



図■　調査地点別の収穫量

梨木　守（畜産草地研究所）

４）草地更新は生産性の向上および炭素吸収能力の改善に効果がある

- 草地更新により牧草の生産性向上に一定の効果がある
- 草地更新により NEP は増加する
- 草地更新によって温暖化負荷軽減の可能性がある

栃木県那須塩原市の永年採草地

栃木県那須塩原市の永年採草地（オーチャードグラス草地）では、夏枯れや夏雑草の繁茂等の影響で植生の衰退が進み生産性の低下が認められたため、2007 年 9 月に草地更新を行いました。

草地更新時の温室効果ガスフラックスの推移

CO_2 は、草地更新直後に化学肥料区で 6.6 g C m^{-2} d^{-1}、堆肥区で 9.1 g C m^{-2} d^{-1} まで放出量が増加し、徐々に減少しながらも 5〜6 週間放出が続きました。CH_4 は、草地更新時には観測開始以来最大の吸収が堆肥区（−41 μg C m^{-2} h^{-1}）と化学肥料区（−37 μg C m^{-2} h^{-1}）で観測されました。N_2O は、化学肥料区では更新から 10 日後に放出が高まり（2,406 μg N m^{-2} h^{-1}）、堆肥区では更新直後（1,612 μg N m^{-2} h^{-1}）と更新から 10 日後（1,573 μg N m^{-2} h^{-1}）に N_2O の放出が高まりました。また、堆肥散布や耕起後の降雨によって N_2O の放出量が増加ました。CO_2 や N_2O の放出量の一時的な増加は牧草の残渣や堆肥が土壌にすき込まれたため、CH_4 の吸収量の一時的な増加は草地更新により表層土壌の通気性が改善されたためと考えられます。

草地更新前後の比較

草地更新前と草地更新後の年間収穫量は、化学肥料区で 3.9、5.9 Mg C ha^{-1}、堆肥区で 3.9、5.0 Mg C ha^{-1} となり、増加傾向にありました。草地更新前後の年間 NEP は、化学肥料区で 1.3、3.1 Mg C ha^{-1}、堆肥区で−0.24、0.20 Mg C ha^{-1} となり、更新後に増加しました。CH_4 は草地更新後に吸収量が増加、N_2O は更新後に放出量が増加しました。

このように、草地更新は生産性の向上に一定の効果があり、また、草地更新により炭素吸収機能が改善すると考えられました。しかしながら、収穫量も NEP も増加したため、炭素収支（NBP）には草地更新の明確な効果が認められませんでした。GWP は、化学肥料区では CO_2 と N_2O の影響で更新後に増大し、温暖化の促進を示しました。堆肥区では温暖化の促進が軽減されましたが、これには更新時の堆肥投入量が大きかったことが影響しています。更新時の堆肥投入や、更新後に炭素吸収量に合わせた収穫を行うことにより、温暖化負荷が軽減される可能性があります。

表 1.　那須塩原の草地における地球温暖化指数（GWP; Mg CO_2 eq ha^{-1}）

期間	化学肥料区				堆肥区			
	CO_2	CH_4	N_2O	計	CO_2	CH_4	N_2O	計
2007（草地更新前）	9.5	−0.006	3.2	12.7	2.2	−0.005	2.8	5.0
2008（草地更新後）	10.3	−0.016	6.1	16.4	−3.6	−0.025	5.3	1.7

正の符号が温暖化の促進、負の符号が温暖化の抑制を示す。

宮崎県小林市の永年草地

宮崎県小林市の永年性採草地では、夏季の高温による夏枯れとメヒシバなどの夏雑草の繁茂の

影響を受けるため、寒地型牧草の生産性はあまり高くありません。そこで高温条件下で生産性が高い暖地型牧草バヒアグラスを用い、2007 年 8 月 6 日と 2008 年 6 月 4 日に簡易更新機による部分更新を行いました。

草地更新時の温室効果ガスフラックスの推移

CO_2 は 2007 年、2008 年ともに草地更新前後で放出量がほとんど変わらず、更新の影響は認められませんでした。CH_4 は両年ともに草地更新前は吸収を示しましたが、更新後に放出に転じました。しかしながら、その放出量はごくわずかでした。N_2O の草地更新前の放出量はほぼ 0 μg N m^{-2} h^{-1} でしたが、2007 年は更新後数日で放出量が化学肥料区で 377 μg N m^{-2} h^{-1}、堆肥区で 833 μg N m^{-2} h^{-1} まで増加し、その後徐々に低下しました。また、2008 年は更新後約 10 日間で、化学肥料区で 1,341μg N m^{-2} h^{-1}、堆肥区で 1,139μg N m^{-2} h^{-1} まで増加し、その後 3 週間掛けて 100 μg N m^{-2} h^{-1} 以下に低下しました。

草地更新前後の比較

夏期の乾物収穫量は、草地更新により一時的に低下しますが、2 年後の 2009 年には概ね草地更新前と同程度まで回復しました。NEP については、乾物収穫量と同様に一時的に低下しますが、2 年後には概ね更新前と同程度まで回復しました。CH_4 収支については、いずれの年次においてもほぼゼロで、更新の影響はほとんどないと考えられました。N_2O 収支については、草地更新した年次で高かったものの、2009 年には更新前年とほぼ同程度になりました。

バヒアグラスの初期生長が遅く、播種後しばらくの間は乾物収穫量および CO_2 吸収量が一時的に低下しましたが、2 年後には播種前と同程度に回復しています。今後もバヒアグラスの生長は続き、年次の進行とともに乾物収穫量や NEP は高まることが予想されるので、草地更新は生産性の向上および炭素吸収能力の改善に効果があると考えられました。

表 2. バヒアグラス播種前後における夏期の乾物収量、NEP、CH_4 収支および N_2O 収支

	DM (Mg ha^{-1})		NEP (Mg C ha^{-1})		CH_4 (kg C ha^{-1})		N_2O (kg N ha^{-1})	
	Fe	Me	Fe	Me	Fe	Me	Fe	Me
2005-2006	7.12	6.33	1.06	-0.01	-0.09	-0.15	1.64	3.85
2007	2.67	2.86	-4.50	-0.04	-0.02	-0.07	3.51	5.02
2008	3.63	3.97	0.37	0.02	0.11	0.18	11.03	6.82
2009	6.65	5.95	1.35	0.02	-0.48	-0.33	1.95	4.12

2007 年 8 月 6 日ナンオウ播種、2008 年 6 月 4 日 Tifton–9 播種、Fe：化学肥料区、Me：堆肥区。

松浦　庄司（畜産草地研究所）、新美　光弘（宮崎大学）

３．草地トウモロコシ畑への堆肥施与による温暖化防止効果

１）飼料生産への堆肥投入の効果

- 窒素化学肥料を 20%以上削減して堆肥を投入することにより、化学肥料区と同等の牧草を生産できました。

草地、飼料畑における適正な堆肥施与量は、堆肥施与により牧草や飼料作物の収量や元素組成が、施肥標準に準じて栽培したものに比べて劣ったものにならないように決められなければなりません。堆肥には牧草や飼料作物に必要な栄養元素が含まれていますが、家畜の飼料として優良なバランスをとっているわけではありません。例えば、牛糞堆肥にはカリウムと窒素がとくに多く含まれます。とくにカリウムが土壌中に多量に存在すると、牧草のマグネシウム吸収が阻害され、低マグネシウム含有率の牧草ができ、これを牛が摂取すると、グラステタニーという家畜疫病が生じます。また、牧草中に硝酸態窒素含有率が高まると、家畜の硝酸中毒も発生するようになる。堆肥施与は、堆肥から供給されるこれらカリウムや窒素量が、施肥標準を超えないようにおこなわれなければなりません。

堆肥に含まれる養分の放出率は、牛糞堆肥の場合、1 年目で窒素で 13%、カリウムで 70%、リンで 20%です。放出されず残った養分も翌年以降に放出されていきます。この放出率に基づいて、地域ごとに決められている施肥基準量をいずれの養分も超えないように堆肥投入量を決め、不足する養分を化学肥料で補います。例えばカリウムの施肥基準量にあわせると、窒素とリンが施肥基準に足りない場合は、その足りない養分量を化学肥料で補います。

堆肥からの養分放出量を考慮することにより、窒素化学肥料を 20%以上削減することができました。そのように削減しても、牧草、トウモロコシの収穫量は、いずれの地域も化学肥料と違いがありませんでした。図をみますと、堆肥施与による無窒素区に対する増収効果は 50 から 80%でした。草地更新による増収効果は、堆肥施与、化学肥料ともに 20%に達しました。

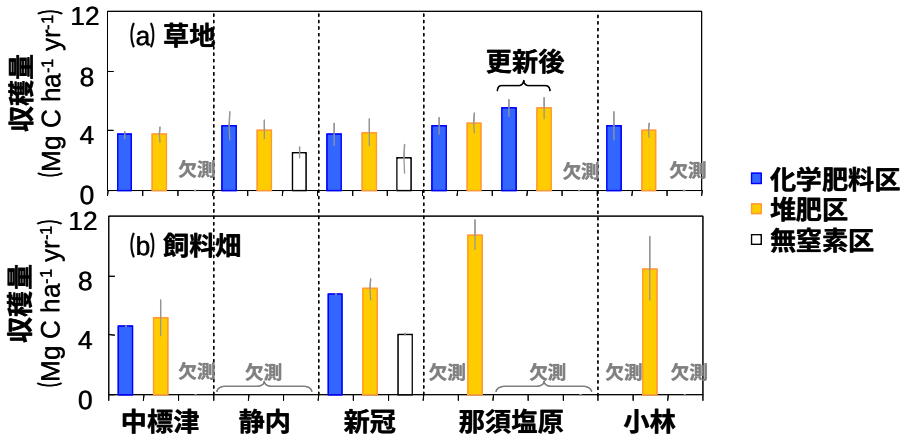


図１ 北海道から九州までの草地･飼料畑の化学肥料区、堆肥区における収穫量

波多野隆介（北海道大学大学院）

2）土壌炭素蓄積への堆肥投入の効果

- **牧草生産への堆肥の連用は土壌炭素を増加させ、トウモロコシ生産への堆肥投入は、土壌炭素の消耗を軽減しました。**

農地の管理に伴う炭素収支は純生物相生産(NBP)と呼ばれ、農地における有機炭素の増加と、農地からの炭素の流出の差により得られます（『室効果ガス収支の求め方』参照)。農地への有機炭素の増加は、植物の有機物生産とともに、堆肥の投入によっても生じます。農地からの炭素の流出は、CO_2 排出（枯死有機物および土壌有機物の微生物による分解、堆肥投入の場合には堆肥有機物も微生物により分解されます）および収穫により生じます。NBP は植物の有機炭素の変化量と土壌の有機炭素の変化量の合計ですが、植物のほとんどを収穫する農地では、土壌有機炭素の変化量にほぼ等しいとみなされます。

図をみると、調査を行ったいずれの地点も草地の化学肥料区の NBP は負の値となっています。このことは、化学肥料のみでの牧草生産により土壌炭素が消耗していることを示しています。一方、堆肥区での NBP は、那須塩原の更新前の草地を除き、いずれの地点も正の値をとり、那須塩原でも更新後の草地の NBP は正の値をとりました。すなわち、堆肥投入により土壌炭素が増加したことが認められました。トウモロコシ畑では、堆肥の投入により正の値になったのは、４箇所の調査地の１箇所だけでした。トウモロコシ畑では、堆肥投入により土壌炭素の消耗は改善されていますが、草地よりもその効果は小さくなっています。このことは、草地は不耕起で管理されるのに対して、トウモロコシ畑では耕起されることが原因と考えられます。有機物の微生物による分解には、酸素が必要ですが、耕起により空気が多く土壌に混入されるために、土壌有機物の分解が促進されること、植物枯死体などの粗大な有機物は耕起により破砕されて表面積が増えることなどが考えられます。

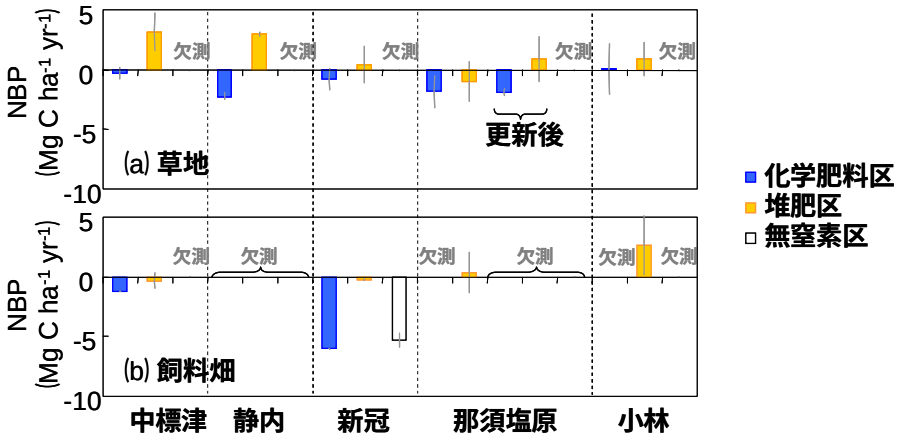


図 1 北海道から九州までの草地･飼料畑の化学肥料区、堆肥区における炭素収支 (純生物相生産、NBP)

波多野　隆介（北海道大学大学院）

３）亜酸化窒素排出への堆肥投入の効果

- **堆肥連用開始当初は、年間の亜酸化窒素（N_2O）排出量が増加しましたが、年をおうにつれ次第に低下し、化学肥料区と同等かそれ以下になりました。**

N_2O は、CO_2 の 300 倍近くの温室効果を示すガスです。それとともに、成層圏のオゾン層の破壊も起こすことが知られています。土壌中では N_2O は微生物反応により生成されて排出します。N アンモニウム態窒素(NH_4-N) が硝酸態窒素(NO_3-N) に変化する硝酸化成のときの副産物として、NO_3-N が N_2 に変化する脱窒のときの中間産物として排出します。したがって NH_4-N や NO_3-N などの無機態窒素が土壌中に多いと N_2O 排出量も増えます。IPCC によりますと、N_2O の排出量の大まかな見積もりとして、化学肥料、堆肥による窒素施与量の１％とされています。

図をみると、年間の N_2O 排出量 は、堆肥連用開始の当初は、化学肥料区より多かったことがわかります。しかし、年を経るにつれて次第に低下し、４年目では化学肥料区より有意に低下しました。この理由として、堆肥区では、堆肥の連用により、堆肥から無機化する窒素量が増加することから、窒素化学肥料施与量を減少でき、土壌に NH_4-N や NO_3-N が一度に多量に存在することがなくなったからではないかと考えられます。また、土壌 pH が低いと N_2O を多く生産する微生物が優先する場合があることが指摘されています。窒素化学肥料施与により多量に土壌に添加された NH_4-N の硝酸化成は土壌 pH を低下させます。また化学肥料に含まれる硫酸、塩素などの酸根の残存も土壌 pH を低下させます。一方、堆肥からの NH_4-N の無機化は土壌 pH を上昇させるので、硝酸化成による土壌 pH の低下を緩和します。堆肥分解により CO_2 が多く排出することによる pH の低下がおこりますので、長期的にはこのことへの注意が必要ですが、化学肥料のような酸根の残存による土壌 pH の低下はほとんどありません。このような堆肥施与、化学肥料施与への土壌環境に与える違いが N_2O 排出量に影響を与えたと考えられます。

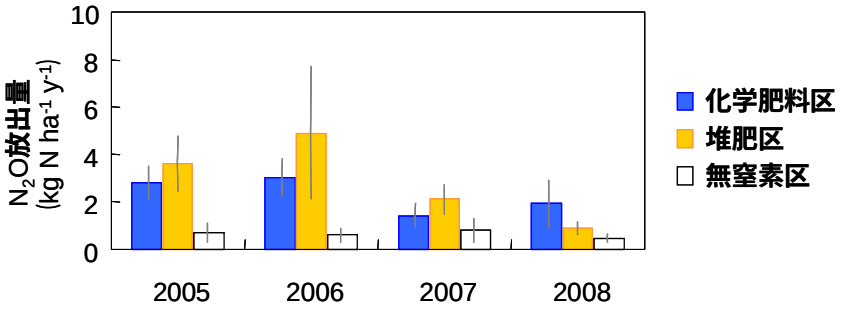


図１ 静内の草地の学肥料区、堆肥区、無窒素区における N_2O 排出量

波多野　隆介（北海道大学大学院）

４） メタン吸収への堆肥投入の効果

- **堆肥投入は、草地・飼料畑土壌のメタン(CH_4)吸収量に影響を与えませんでした。**

CH_4 は CO_2 より 23 倍も温室効果が強いガスです。CH_4 は湿潤な土壌から排出されますが、通気性、排水の良い土壌では微生物により CH_4 は酸化分解され吸収されます。窒素施与は、土壌の CH_4 吸収を低下させる場合が多いと言われています。その原因には土壌微生物相の変化，分子形状の類似する NH_4 による CH_4 酸化の阻害、土壌の酸性化による CH_4 酸化菌の活性低下などが上げられています。

図をみると、静内を除き、草地、飼料畑ともに CH_4 排出量は負の値となり、CH_4 吸収が見られることがわかります。それぞれの地域での CH_4 吸収量は化学肥料区、堆肥区に差は認められませんでした。無窒素区での結果がある場合には、無窒素区にも差は認められませんでした。一方、静内の草地では、顕著な排出が認められました。この原因には、観測した圃場がやや過湿であったためと考えられます。有意な差は認められませんでしたが、堆肥投入では CH_4 排出量が低下したことも示されました。したがって、草地、飼料畑での CH_4 排出および吸収は、堆肥投入には影響をうけないと結論されました。

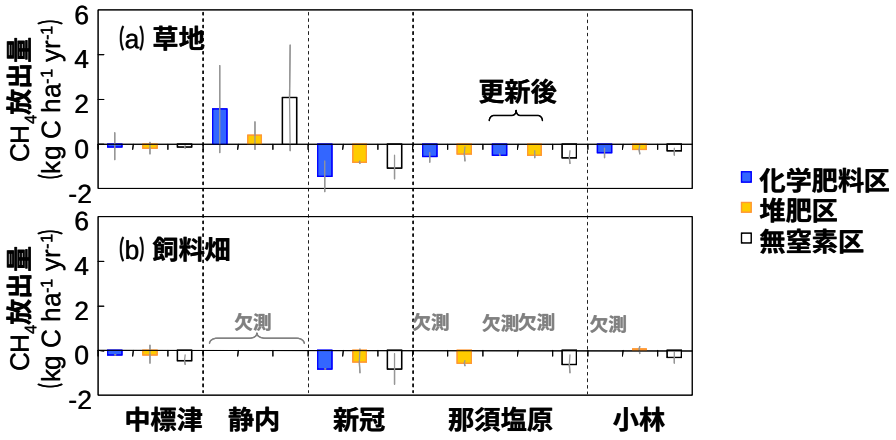


図 1 北海道から九州までの草地･飼料畑の化学肥料区、堆肥区における CH_4 排出量

波多野　隆介（北海道大学大学院）

５）温室効果ガス収支への堆肥投入の効果

- **堆肥投入により草地の温室効果ガス収支(温暖化指数 GWP)を負にすることができました。とくに炭素収支の改善が大きく貢献しました。**

温室効果ガス収支（温暖化指数 GWP）の構成要素は、圃場管理における炭素収支（NBP）、N_2O 排出、CH_4 排出で、GWP＝CO_2 排出量（－NBP）＋CH_4 排出量×23＋N_2O 排出量×296 で表されます（『室効果ガス収支の求め方』参照）。したがって、NBP の増加により圃場へ炭素が持ち込まれますと GWP は減少します。N_2O および CH_4 排出量が増加すると GWP は増加することになります。

図は、北海道、本州、九州の採草地の化学肥料区、堆肥区それぞれ 19 個のデータから算出し、箱ひげ図にまとめたものです。堆肥施与により採草地の GWP は、化学肥料区より小さくなりました。GWP の中央値は、化学肥料区で 3.4 Mg CO_2 ha^{-1} yr^{-1} 、堆肥区で-4.3 Mg CO_2 ha^{-1} yr^{-1} と、堆肥区で負の値となり、温室効果ガスの吸収源とみなすことができます。

NBP、CH_4、N_2O の 3 者は、化学肥料でそれぞれ－3.1、-0.015、2.0 Mg CO_2 ha^{-1} yr^{-1}、堆肥区でそれぞれ-5.0、-0.010、2.6 Mg CO_2 ha^{-1} yr^{-1}でした。すなわち、CH_4 排出はほとんど貢献がなく、NBP と N_2O の貢献が大きいことがわかります。化学肥料区と堆肥区の違いは、とくに NBP に見られました。堆肥区での大きな炭素貯留が GWP を小さくすることが判りました。堆肥投入は炭素収支を改善することで、温暖化を抑制します。

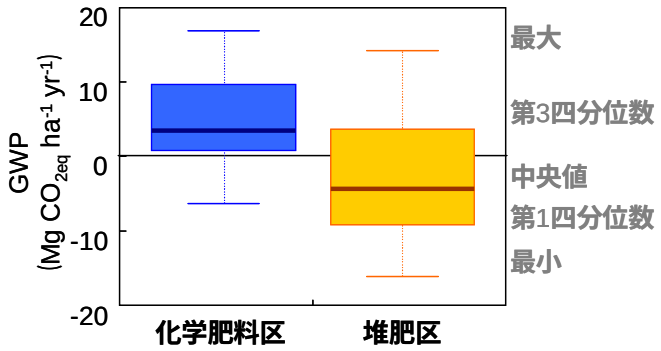


図１　草地の化学肥料区と堆肥区における温室効果ガス収支（GWP）の比較

波多野　隆介（北海道大学大学院）

４．自給粗飼料生産圃場の温室効果ガスをゼロにする管理法

１） 温室効果ガス収支をゼロにする土地利用

- **堆肥施与による温室効果ガス収支(温暖化指数 GWP)をゼロにする土地利用が考えられました。しかし、自給飼料だけで生産される堆肥量だけでは不足していました。**

新冠牧場では、温室効果ガス収支(温暖化指数 GWP)を負にして吸収源として働く草地（-3.1 Mg CO_2eq ha^{-1}）と、GWP が正で排出源となるトウモロコシ畑(3.9 Mg CO_2eq ha^{-1})が観測されました。したがって、GWP をゼロにする草地：トウモロコシ面積割合は 0.56：0.44 となります。
この面積割合での飼料生産量は、12.5 Mg ha^{-1} と見積もられます。そしてこの飼料生産量は、乳牛 1 頭（体重 650kg，乳量 30kg，乳脂肪率 3.5%）に必要な飼料乾物重(20.3kg d^{-1} 日本飼養標準)に基づくと、1.7 頭 ha^{-1} を飼養できます。

ところが、この頭数では必要な堆肥投入量をまかなうことができません。必要な堆肥量を生産するには、3.3 頭/ha 必要です。

すなわち、1.6 頭 ha^{-1} 分購入飼料が必要です。別の言い方をすれば、温室効果ガス収支を改善するために、そこで生産される約 2 倍の堆肥を必要としていることになります。

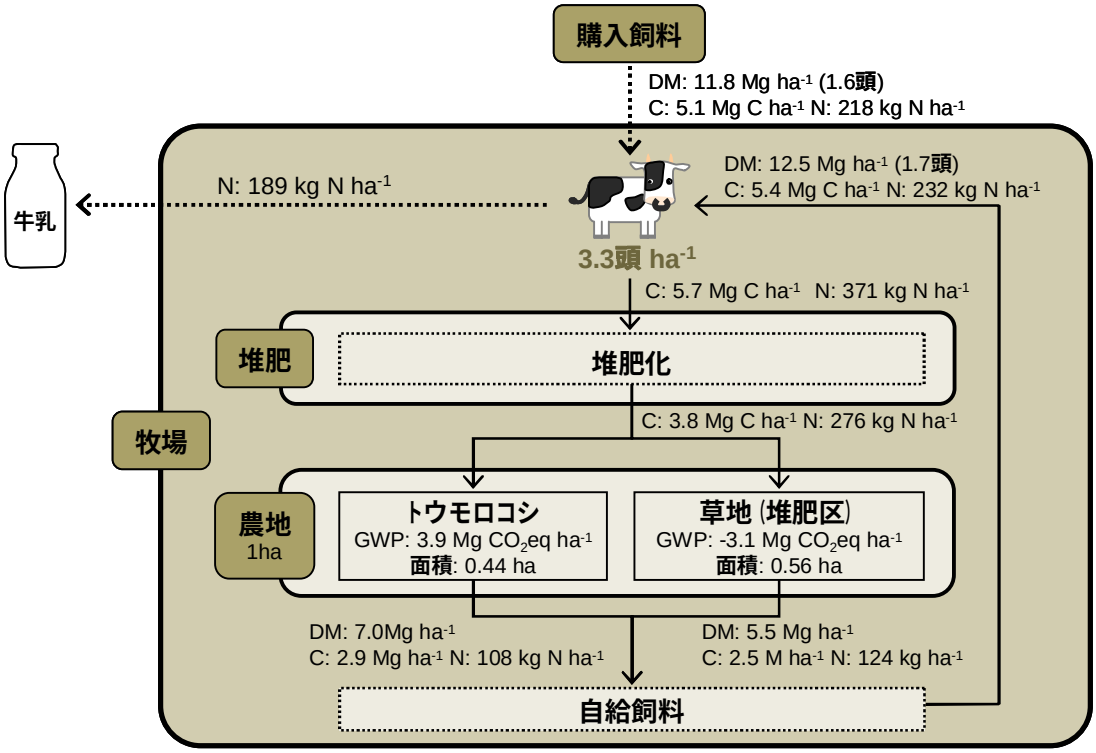


図 1 新冠牧場における温室効果ガス収支(GWP)をゼロにする土地利用と家畜飼養頭数

波多野　隆介（北海道大学大学院）

2） 温室効果ガス収支をゼロにする堆肥投入

- **圃場の温室効果ガス収支をゼロにする堆肥炭素の投入量を求めることができます。**

堆肥 炭素の 投入は土壌有機物分解による土壌炭素の消耗を相殺し、土壌炭素を増加 させます。この効果により N_2O 排出を含めた温室効果ガス収支(地球温暖化指数 GWP) をゼロにし、さらにマイナスにし、土壌を吸収源にする効果をもたらします。

図の例は、北海道の新冠牧場の採草地での観測結果を、全国の結果と合わせてモデル化して、堆肥炭素投入量に対する GWP をプロットしたものです。CN 比が 10 と 15 の 2 種類の堆肥で検討していますが、堆肥炭素投入量と GWP の関係は CN 比にほとんど関係ありませんでした。

GWP をゼロにする堆肥炭素投入量は 3100 kgC ha^{-1} y^{-1} となります。ただし、自給飼料で生産される堆肥を考えると、堆肥炭素投入量は CN 比 10 の場合は 809 kgC ha^{-1} y^{-1} 、CN 比 15 の場合は 1490 kgC ha^{-1} y^{-1} となります。いずれも GWP をゼロにできませんが、CN 比が高い堆肥のほうが自給飼料のみの堆肥生産で多くの炭素を圃場に返していることがわかります。

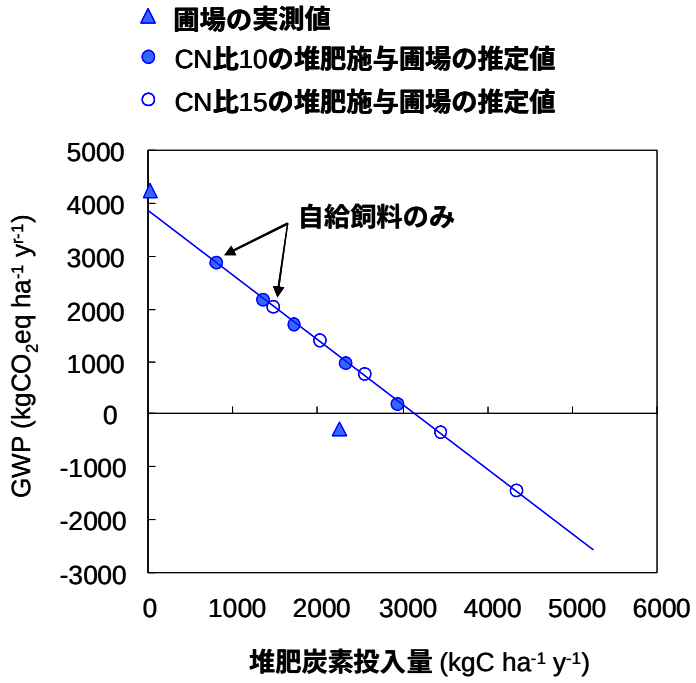


図 1 圃場への堆肥炭素投入量と温室効果ガス収支 (GWP) の関係

波多野　隆介（北海道大学大学院）

３） 窒素流出を起こさない堆肥投入

- **堆肥に含まれる窒素が地下水や河川水を汚染しないように堆肥投入量を決める必要があります。CN 比の高い堆肥は有利です。**

地下水汚染は、流域の農地土壌の余剰窒素量が多くなると生じます。農地土壌の炭素貯留量を上げるために、堆肥を沢山入れると、農地の余剰窒素が増加します。農地土壌の余剰窒素は化学肥料、堆肥、豆科作物の窒素固定、大気降下物による窒素投入量と、収穫による窒素持ち出し量の差です。地下水濃度が高まりやすい流域は、農地面積が広く、降水量が少なく、地下水が河川へ流出しにくいところです。地下水の硝酸態窒素濃度が飲用水基準の 10mgN L^{-1} 以下にするように、農地土壌の余剰窒素を適正に保たねばなりません。堆肥に含まれる窒素量を考えて、許容できる余剰窒素の範囲内で堆肥散布を行うことになります。

許容できる余剰窒素を 180 kgN ha^{-1} としますと（農地面積割合が 50%、降水量が 1000mm の流域での最大値)、CN 比 10 の堆肥は 3300kgC ha^{-1} しか炭素を投入できませんが、CN 比 15 の堆肥は 5000kgC ha^{-1} の炭素を投入できます。堆肥との CN 比が大きいほど、許容できる余剰窒素量以内で投入できる堆肥炭素量が大きくなります。CN 比が大きい堆肥は余剰窒素を少なくして炭素を多く投入でき、水環境の保全と、温暖化防止に有利です。

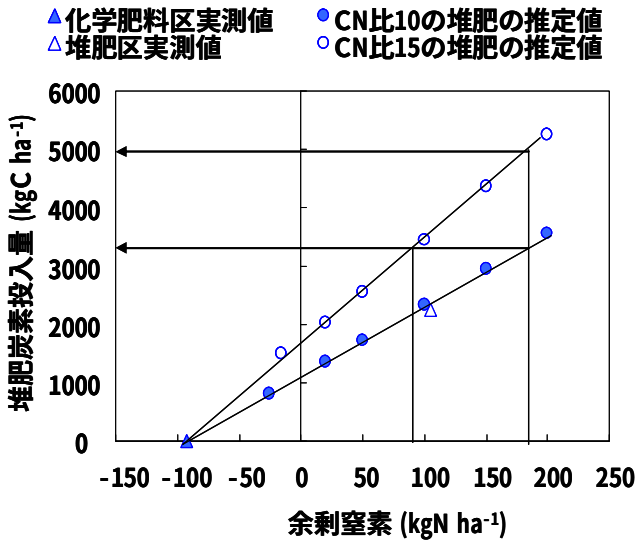


図 1 農地の余剰窒素と堆肥炭素投入量の関係

波多野　隆介（北海道大学大学院）

４）堆肥化過程での温室効果ガス排出

- **堆肥化過程でも温室効果ガスが排出します。CN 比の高い堆肥を製造するほうが、温室効果ガス排出量は低下します。温室効果ガスの排出改善を図った良質な堆肥生産は、圃場での堆肥の効果を生かします。**

堆肥化過程では CH_4、N_2O が排出されます。その排出量は製造方法によって違いますが(『堆肥製造過程からの温室効果ガス発生量は高い』参照)、製造する堆肥の質によっても違います。

図は、堆肥炭素投入量に必要な堆肥を製造する間に排出される CH_4、N_2O を見積もったものです。堆積発酵の場合の排出係数（CH_4:38.0 gCH_4/kg 有機物、N_2O：37.7 N_2O/kgN）を用いて計算し、温暖化指数(GWP)に換算してプロットしたものです。堆肥化過程の GWP は CN 比 10 の堆肥で 15 の堆肥より著しく大きいことがわかります。さらに、圃場における GWP よりも大きいことがわかります。

なお、堆肥を投入しないで原料を廃棄しても、堆肥化するのと同じように CH_4、N_2O が排出されます。堆肥投入による圃場の温室効果ガス収支の改善効果を生かすためには、良質な堆肥を生産すること、堆肥化過程の温室効果ガス排出を改善することが大事です。

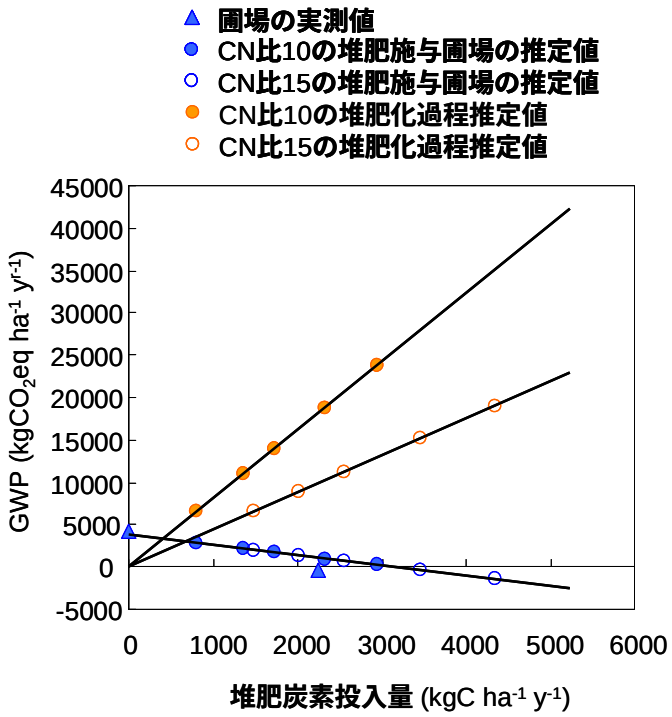


図１　堆肥炭素投入量に相当する堆肥を生産する間に発生する温室効果ガス（GWP）

波多野　隆介（北海道大学大学院）

付属　LCA と温室効果ガス収支の求め方

１）ＬＣＡの計算方法

- ライフサイクルアセスメント（LCA）は，生産に使われる原材料の生産から，製造，使用，処分に至るライフサイクル全体を通しての環境影響評価を行う手法です。
- 本調査における LCA の評価範囲は，化学肥料，農薬，資材，および作業機械の製造と使用施設の建設，飼料栽培段階での作業と輸送，栽培圃場での吸収・蓄積と放出，収穫過程での作業と輸送です。
- 堆肥・スラリー製造時の負荷を含めない場合と，自給飼料に由来すると推定される堆肥・スラリー量を除いた分の製造時温室効果ガス発生のみを評価する場合を検討しました。

ライフサイクルアセスメント（LCA）は，従来の環境アセスメントが環境負荷の発生する段階での影響評価であったのに対し，生産に使われる原材料の生産から，製造，使用，処分に至るライフサイクル全体を通しての環境影響評価を行う手法です。

LCA では，あらかじめ評価する範囲を設定しておく必要があります。たとえば，飼料生産にトラクターを使用する場合，圃場作業でトラクターが消費する軽油，トラクター製造過程での電気・化石燃料消費，トラクター製造工場建設に要した作業機械の化石燃料消費，その作業機械製造過程での電気・化石燃料消費・・・といったように，そのもとをたどっていくと芋づる式に際限なく続いていってしまいます。これを避けるために，あらかじめ評価する範囲を設定しておくことが LCA では不可欠です。

本調査における LCA の目的は，使用する機械，施設，資材の製造段階も含んだ，飼料生産における環境影響を明らかにすることです。図１に本調査における評価範囲を示しました。化学肥料，農薬，資材，および作業機械の製造と使用施設の建設，飼料栽培段階での作業と輸送，栽培圃場での吸収・蓄積と放出，収穫過程での作業と輸送などが評価範囲に含まれています。

堆肥・スラリー製造時の負荷は，農業からの温室効果ガス発生源として重要であり，本調査においても算定を行っていますが，家畜生産からの廃棄物処理とみなし本評価からは除くこととしました。一方，堆肥・スラリーの製造と利用を適正に評価するため，図 2 に示したように，自給飼料に由来すると推定される堆肥・スラリー量を算定し，これを除いた分の製造時温室効果ガス発生のみを評価する方法も検討しました。

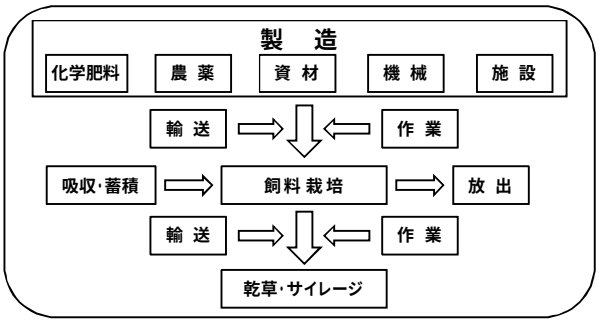


図１　飼料生産の LCA における評価範囲

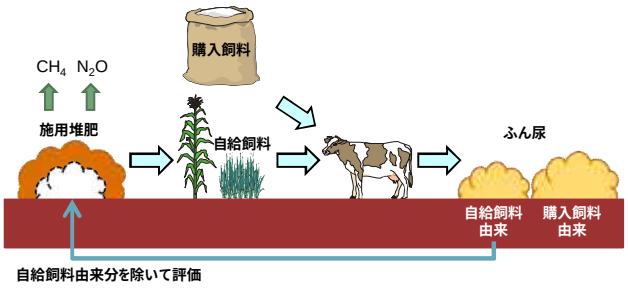


図２　自給飼料由来堆肥・スラリーを除いた評価

築城　幹典（岩手大学農学部）

2） 温室効果ガス収支の求め方

- 二酸化炭素（CO_2）収支
  ＝純生物相生産（NBP）
  ＝植物の正味の吸収量（NPP）－有機物の分解量－収穫量＋堆肥投入量
  ＝純生態系生産（NEP）－収穫量＋堆肥投入量
- メタン（CH_4）収支
- 亜酸化窒素（N_2O）収支
- 地球温暖化指数（GWP）
  ＝CO_2 放出量（－NBP）＋CH_4 放出量×23＋N_2O 放出量×296

草地や飼料畑で吸収もしくは放出する温室効果ガスは、二酸化炭素、メタン、亜酸化窒素です。圃場の二酸化炭素収支は、純生物相生産量（NBP）と呼ばれ、次の式で求められます。

NBP＝植物の正味の吸収量（NPP）－有機物の分解量－収穫量＋堆肥投入量
＝純生態系生産量（NEP）－収穫量＋堆肥投入量

純生態系生産量（NEP）の測定には、植物の正味の吸収量（NPP）と有機物の分解量をそれぞれ測る『生態学的手法』と、直接測定する『渦相関法』があります。NBP がプラスであれば圃場で炭素が蓄積していることを、マイナスであれば圃場の炭素が消耗していることを意味します。圃場への炭素蓄積を促進することで、大気中の二酸化炭素を減少することができます。

メタンと亜酸化窒素は、土壌中の微生物のはたらきによって吸収または放出されます。メタンおよび亜酸化窒素の収支は、プラスが圃場からの放出、マイナスが圃場への吸収を意味します。

二酸化炭素、メタン、亜酸化窒素それぞれのガス 1 キログラム当たりの温室効果の大きさは、二酸化炭素を 1 とすると、メタンが 23、亜酸化窒素が 296 とされています（気候変動に関する政府間パネルの 2001 年報告書より；2007 年報告書ではメタンが 25、亜酸化窒素が 298 と訂正）。そこで、ガスの種類による温室効果の大きさの違いを考慮した温室効果ガスの総合的な収支を地球温暖化指数（GWP）と呼び、次の式で求めます。

GWP（kg CO_2 eq ha^{-1} $year^{-1}$）＝ －NBP（kg CO_2 ha^{-1} $year^{-1}$）×1
＋CH_4 放出量（kg CH_4 ha^{-1} $year^{-1}$）×23
＋N_2O 放出量（kg N_2O ha^{-1} $year^{-1}$）×296

GWP がプラスなら、その圃場は地球温暖化を促進し、マイナスならその圃場は地球温暖化を抑制すると言えます。

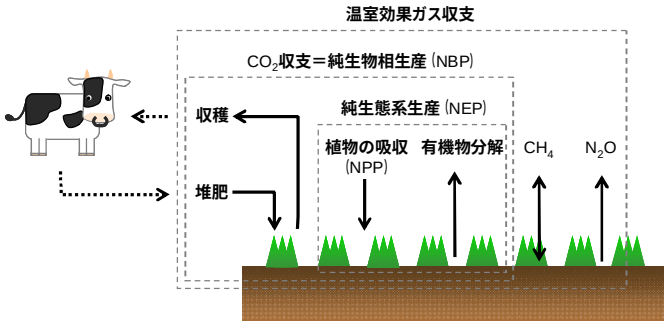


図　草地・飼料畑の温室効果ガス収支を構成する要素
CO_2 は二酸化炭素、CH_4 はメタン、N_2O は亜酸化窒素を示す。

清水　真理子（北海道大学大学院）

附表　　環境に配慮した草地飼料畑の持続的生産体系調査事業に係る用語集

草地･飼料畑における温室効果ガス

草地・飼料畑における**温室効果ガス**の収支は、一定面積の圃場に、流入する温室効果ガスの量と、流出する温室効果ガスの量の差である。流入量の方が多ければ、温室効果ガスを吸収することから地球温暖化を抑制し、流出量の方が多ければ草地は温室効果ガスを放出するため地球温暖化を促進するということになる。

草地・飼料畑から吸収・放出される温室効果ガスには、**二酸化炭素（CO_2）**、**メタン（CH_4）**、**亜酸化窒素（N_2O）**の 3 つがある。CO_2 は、光合成によって、大気から植物体に吸収され、有機物として蓄積されるが、枯死体や残渣、堆肥、土壌中の有機物が分解することで大気中に放出される。さらに、植物体に蓄積された有機物は、収穫時に系外へ持ち出されるが、肥料として投入される堆肥には多量の有機物を含む。そこで，CO_2 収支には、これらを全て勘定に入れなければならない。CH_4 と N_2O は土壌中の微生物の活動によって吸収・放出される。とくに、N_2O は堆肥や化学肥料の施用によって、その放出が増大する。そのため、草地・飼料畑における温室効果ガスの年間収支を考える場合は、施肥や収穫に伴うこれらのガスの収支を求める必要がある。なお N_2O や CH_4 の地球温暖化に及ぼす影響は、単位ガス重量あたりで比較すると CO_2 よりも大きく、CO_2 量に換算して求める（**地球温暖化指数**）。

京都議定書

1997 年 12 月に京都で開催された気候変動枠組条約第 3 回締約国会議（COP3 京都会議）で採択された気候変動枠組条約の議定書。

先進締約国に対し、2008～2012 年の第一約束期間における温室効果ガスの排出を 1990 年比で、5.2%（日本 6%、アメリカ 7%、EU8%など）の削減を義務付け。削減数値目標を達成するために、京都メカニズム（柔軟性措置）を導入。2005 年 2 月 16 日に発効した。

気候変動に関する政府間パネル(IPCC)

各国が地球の温暖化問題について議論を行う公式の場として、国連環境計画（ＵＮＥＰ）及び世界気象機関（WMO）の共催により 1988 年 11 月に設置された。①温暖化に関する科学的な知見の評価、②温暖化の環境的・社会経済的影響の評価、③今後の対策のあり方の三つの課題について検討している。これらの検討結果は気象変動枠組み条約締結国会議に反映される。

2006 年 IPCC ガイドラインでは 2013 年に向けて農地及び草地を含めた土地利用による温室効果ガス排出吸収量の推計を求めており、EU ではこれに対応した農業政策を実施している。

温室効果ガス

二酸化炭素（CO_2）、**メタン（CH_4）**、**亜酸化窒素（N_2O）**、クロロフルオロカーボン（CFC）などは、温室のガラスと同じように、太陽からの日射エネルギーをほぼ完全に通過させるが、地表から放射させる熱（赤外線）を吸収し、熱が地球の外に放出されるのを妨げる。**温室効果ガス**はこのような大気圏の気温を上昇させる効果（温室効果）をもつ気体の総称である。

地球温暖化指数（GWP）

ガスの種類ごとに異なる地球温暖化への影響を、**二酸化炭素（CO_2）**を基準として相互に比較するための係数である。**IPCC** の 2001 年報告書によれば、今後 100 年間の積算効果を考える場合、各ガス種の単位重量当たりの **GWP** は、**CO_2** の 1 に対して、**メタン（CH_4）**が 23、**亜酸化窒素（N_2O）**が 296 倍の影響をもたらすとされている。

二酸化炭素（CO_2）

主に石炭、石油、天然ガス、木材など炭素分を含む燃料の燃焼により発生する。大気中濃度は、産業革命以前 280ppm 程度であったが、産業革命以降、化石燃料の燃焼、吸収源である森林の減少などによって、年々増加し、2005 年に 379ppm にまで上昇した。地球温暖化の原因の 60%を占める。

メタン（CH_4）

有機物が嫌気状態で腐敗、発酵するときに生じる。有機性の廃棄物の最終処分場や、沼沢の底、家畜のふん尿、下水汚泥の嫌気性分解過程などから発生する。大気中濃度は、産業革命以前 0.715ppm 程度であったが、2005 年に 1.774ppm にまで上昇した。単位重量あたりの温室効果は CO_2 の 23 倍。地球温暖化の原因の 20%を占める。

亜酸化窒素（N_2O）

有機物の燃焼や窒素肥料の施肥などが発生原因であると言われている。大気中濃度は、産業革命以前 0.270ppm であったが、2005 年に 0.319ppm にまで上昇した。近年、中国など発展途上国の農業は生産性向上のために多量の化学肥料が使用されるようになり、大気への亜酸化窒素ガスの放出が急増し、地球温暖化に大きな影響を及ぼすことが懸念されている。単位重量あたりの温室効果は、CO_2 の 296 倍。

ライフサイクルアセスメント（LCA）

製品やサービスの環境への影響を評価する手法で、対象とする製品を産み出す資源の採掘から素材の製造・生産だけでなく、製品の使用・廃棄段階までのライフサイクル全体を考慮し、資源消費量や排出物量を求め、その環境への影響を総合的に評価する。

本調査事業におけるライフサイクルアセスメントの調査は、草地飼料畑の耕起、肥料の運搬・散布、種子の播種、牧草等の刈り取り・梱包・運搬等に係る燃料・電力料、肥料の成分、プラスチック廃棄物、飼料の収穫量等のデータを収集・分析し、温暖化への影響を評価する。

フラックス

ある境界面を考えて、そこを通しての物理量の出入りのことを**フラックス**という。牧草の草丈表面や牧草地の土壌面を、単位時間に通って輸送される**二酸化炭素（CO_2）**、**メタン（CH_4）**、**亜酸化窒素（N_2O）**等のガスの移動量のことである。

渦相関法

森林、牧草地等でポール等を用い、生物圏（木や牧草が生育している空間）とその上部空間との境界における気体などの移動量（**フラックス**）を測定する手法のこと。生物圏とその上部空間では、上昇流方向と下降流方向が渦巻きのように動くが、気体の移動とその中の微量成分は相関していることを前提として測定する。本測定法は、長期間に連続観測が可能であり、国際的に認定された測定法である。

チャンバー法

渦相関法には、高分解能で応答時間の速い測器が必要であり、今のところ**メタン**（CH_4）と**亜酸化窒素**（N_2O）を渦相関法で測定することは困難である。そのため、草地・飼料畑の土壌表面に**チャンバー**（箱）を被せて、内部空間の空気の CH_4 および N_2O 濃度を測定し、土壌面からの吸収・放出量（**フラックス**）を求める。

土壌炭素含量

土壌は 2000Gt 植物体量の約 4 倍の炭素を保持する。土壌へ炭素を蓄積させることは、大気への**二酸化炭素**（CO_2）放出の抑制、つまり地球温暖化を抑制することを意味する。そこで、土壌に炭素を多く含む堆肥を施与することは、地球温暖化の緩和策として期待される。また、草地は陸地の 37%を占め、また耕地よりも炭素蓄積能力が高い。このため、ＥＵでは土壌へ炭素を蓄積させる農法、特に永年草地の維持及び耕地から永年草地への転換を奨励している。

インベントリ分析

LCA において、対象となる製品やシステムの一生についてエネルギーや材料などがどれだけ投入され、排気ガスや廃棄物がどれだけ放出されたかを分析することである。インベントリ分析を行う手法には、産業連関表を用いる方法と、生産の各プロセスの積み上げによる方法がある。産業連関表による解析では、 業種間の取り扱い金額から環境影響物質の排出量を推定する。一方、積み上げ法では、製品の製造工程などでの環境影響物質の排出量を推定し、そのデータを積み上げて求める。

ISO14040 シリーズ

国際標準化機構（International Organization for Standardization: ISO）が発行した環境マネジメントシステムに関する国際規格である ISO14000 ファミリーのうち、論理的かつ客観的に LCA 評価を行うためのガイドラインとして国際規格化されたのが ISO14040 シリーズである。1997 年６月に、LCA の原則と枠組みの規格として発行された。ISO14040 では、LCA は(1)目的および調査範囲の設定、(2)インベントリ分析、(3)環境影響評価、(4)解釈の４つの要素で構成されると規定している。

環境に配慮した草地飼料畑の持続的生産体系調査事業検討委員会の委員及び実務担当者

1.環境保全推進委員会

	氏　名	役　　職	所　　属
1	波多野隆介	教授（委員長）	北海道大学大学院農学研究院環境資源学部門
2	山　本　晋	教授	岡山大学大学院環境学研究科
3	八木一行	上席研究員	(独)農業環境技術研究所物質循環研究領域
4	宮　田　明	領域長	(独)農業環境技術研究所大気環境領域
5	三枝信子	室長	国立環境研究所地球環境研究センター陸域モニタリング推進室

2．環境保全調査作業委員会

	氏　名	役　　職	所　　属
1	川　村　修	教授（委員長）	宮崎大学農学部生物環境科学科草地環境科学講座
2	平野高司	教授	北海道大学大学院農学研究院環境資源学部門
3	寳示戸雅之	チーム長	(独)農業・食品産業技術総合研究機構畜産草地研究所多面的機能研究チーム
4	松本武彦	科長	北海道立根釧農業試験場草地環境科

3．草地飼料畑生産体系構築委員会

	氏　名	役　　職	所　　属
1	梨　木　守	研究管理監（委員長）	(独)農業・食品産業技術総合研究機構畜産草地研究所（那須）
2	池　内　豊	技術部長	(独)家畜改良センター技術部
3	菅　野　勉	チーム長	(独)農業・食品産業技術総合研究機構畜産草地研究所飼料作生産性向上研究チーム
4	石井康之	准教授	宮崎大学農学部生物環境科学科草地環境科学講座
5	築城幹典	准教授	岩手大学農学部農学生命課程
6	三宅俊輔	研究員	北海道立根釧農業試験場経営科
7	佐々木政紀	係員	(独)家畜改良センター新冠牧場飼料課
8	室原盛也	課長	(独)家畜改良センター宮崎牧場飼料課

4．環境に配慮した草地飼料畑の持続的生産体系調査実務担当者

	氏　名	役　　職	所　　属
1	有田敬俊	研究員	北海道立根釧農業試験場研究部草地環境科
2	清水真理子	大学院博士課程院生	北海道大学大学院農学研究院環境資源学部門
3	森　昭憲	主任研究員	(独)農業・食品産業技術総合研究機構畜産草地研究所草地多面的機能チーム
4	松浦庄司	研究員	(独)農業・食品産業技術総合研究機構畜産草地研究所草地多面的機能チーム
5	新美光弘	助教	宮崎大学農学部生物環境科学科草地環境科学講座

基礎知識編執筆者

１．地球温暖化発生のメカニズム

１）地球の大気：山本晋（岡山大学大学院）

２）温室効果とは：山本晋（岡山大学大学院）

３）人間活動に伴う温室効果ガス濃度の経年的変化：山本晋（岡山大学大学院）

２．農業活動と温暖化

１）農業分野における温室効果ガス排出の割合：三田村強（草地畜産種子協会）

２）物質循環型乳肉牛生産システム：三田村強（草地畜産種子協会）

３）我が国の畜産と地球温暖化負荷：築城幹典（岩手大学農学部）

４）乳肉牛からの温室効果ガスの排出：森昭憲（畜産草地研究所）

５）堆肥からの温室効果ガスの排出：築城幹典（岩手大学農学部）、森昭憲（畜産草地研究所）

３．温暖化防止に果たす草地の役割

１）世界の草地：波多野隆介（北海道大学大学院）

２）日本の草地と飼料畑：梨木守（畜産草地研究所）

３）草地土壌の炭素含量：波多野隆介（北海道大学大学院）

４．草地・飼料畑における炭素窒素の循環と微生物

１）炭素循環：清水真理子（北海道大学大学院）

２）窒素循環：清水真理子（北海道大学大学院）

３）草地の微生物：波多野隆介（北海道大学大学院）

４）微生物が生産する温室効果ガス：森昭憲（畜産草地研究所）

５）窒素施肥によるメタン及び亜酸化窒素の放出・抑制メカニズム：森昭憲（畜産草地研究所）、清水真理子（北海道大学大学院）

６）堆肥施与による土壌環境改善効果と施与基準：波多野隆介（北海道大学大学院）

７）草地更新と温室効果ガス：森昭憲（畜産草地研究所）

５．温室効果ガスの測定法

１）草地における温室効果ガス収支の測定項目：清水真理子（北海道大学大学院）

２）メタン、亜酸化窒素収支の測定方法：清水真理子（北海道大学大学院）、山本晋（岡山大学大学院）

３）二酸化炭素収支の測定方法：清水真理子（北海道大学大学院）