

●環境と石灰窒素

石灰窒素の第三の効果

～農耕地土壌からの一酸化二窒素放出の削減～

独立行政法人 農業環境技術研究所

山本昭範・秋山博子・中島泰弘・八木一行

電気化学工業株式会社

直川拓司

埼玉県農林総合研究センター 茶業研究所

宮崎保博・本多勇介・佐野行正

はじめに

農耕地における
一酸化二窒素放出量削減の重要性

一酸化二窒素（亜酸化窒素）は、京都議定書により削減義務を負うことが決まった温室効果ガスの一つである。一酸化二窒素は、二酸化炭素の約300倍の温室効果を持ち、今後、オゾン層破壊の主な要因になると考えられている(Ravishankaraら 2009)。

農業は、一酸化二窒素の最大の発生源であり、その発生量は人為由来発生量の約42%を占めると推定されている (Solomon

ら 2007)。そのため、農耕地における一酸化二窒素放出量の削減は重要な課題である。農耕地における一酸化二窒素は、窒素肥料や作物残渣などを基質にして、主に好気的環境を好む微生物による硝化（硝化細菌や古細菌が関与）と嫌気的環境を好む微生物による脱窒（脱窒細菌や脱窒カビが関与）の2つのプロセスによって生成される（図-1）。

農耕地からの一酸化二窒素放出量を削減するために、さまざまな技術の研究が行われている。特に、硝化抑制剤は、窒素肥料の損失を防止するために開発された化学資材だが、作物の収量・品質に影響をあたえ

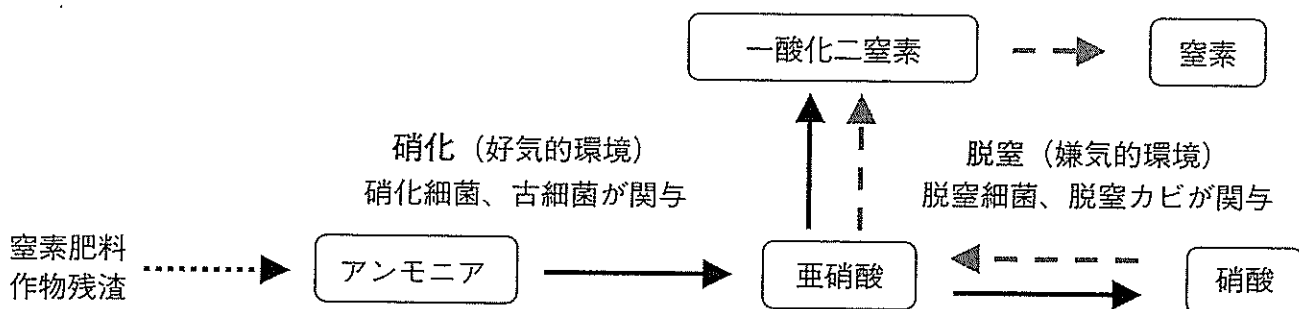


図-1 農耕地における微生物による一酸化二窒素の生成プロセス
黒の矢印は硝化過程を示し、灰色の波線矢印は脱窒過程を示す

ずに一酸化二窒素放出量を削減できることから、さまざまな種類の硝化抑制剤（ニトラピリン、ジシアンジアミドなど）の一酸化二窒素放出削減効果が検証されている（Akiyamaら 2010）。

一酸化二窒素放出削減技術としての石灰窒素の可能性

石灰窒素の分解過程では、硝化抑制剤として用いられているジシアンジアミドが生成される。また、石灰窒素の主成分であるカルシウムシアナミドは、さまざまな微生物に影響する（Haenseler and Moyer 1937; Klasse 1996）。このように、石灰窒素は、一酸化二窒素の生成プロセスに影響することで一酸化二窒素放出を抑制できると考えられる。しかし、これまで石灰窒素の一酸化二窒素放出削減効果はほとんど検証されていない。特に、温室効果ガス制御化学資材としての石灰窒素由来の物質（シアナミドや石灰）の影響は全く解明されていない。

そこで、本研究では、一酸化二窒素放出量や一酸化二窒素生成プロセスが異なると推測される土壌（黒ボク土および灰色低地土）と農耕地（野菜畑と茶園）を選定し、石灰窒素の一酸化二窒素放出削減効果を検証した。石灰窒素の一酸化二窒素放出削減効果とそのメカニズムの解明は、農耕地における一酸化二窒素放出削減技術に新たな選択肢を加えることを可能にする。

土壌からの一酸化二窒素放出速度の測定方法

土壌からの一酸化二窒素放出速度（単位面積・単位時間当たりの一酸化二窒素の放

出量、以降、一酸化二窒素放出）は、クロードチャンバー法によって測定した。チャンバー法は、チャンバーと呼ばれる円筒状の筒を土壌に設置し、蓋をして密閉後、一定時間ごとにチャンバー内のガスを採取する。採取したガスの一酸化二窒素濃度を分析し、濃度変化から一酸化二窒素放出を算出する。

一酸化二窒素放出の測定は、黒ボク土の野菜畑と灰色低地土の野菜畑における試験では、施肥後2週間の期間は週4回、その後から収穫までの期間は週3回、収穫後の期間は週2回の頻度で行った。また、茶園における試験では、各施肥後1週間の期間は週5回、その他の期間は週1～3回、12月から2月の期間は月1回の頻度で行った。

石灰窒素の一酸化二窒素放出削減効果

研究例①：黒ボク土の野菜畑

●試験設計

黒ボク土における試験は、2010年10月5日～2010年12月24日の期間に農業環境技術研究所の試験圃場で行った。試験圃場は600 m²（15×40m）で、その中に30 m²（5×6 m）の試験区を12区画設置した。黒ボク土の試験では次の4処理を3反復で設けた。

慣行肥料区

施肥は化成肥料（窒素含有量8%、リン酸含有量8%、カリ含有量8%）を用いた。

石灰窒素100区

施肥窒素量の100%を石灰窒素（窒素含有量20%）で施用した。リン酸は過リン

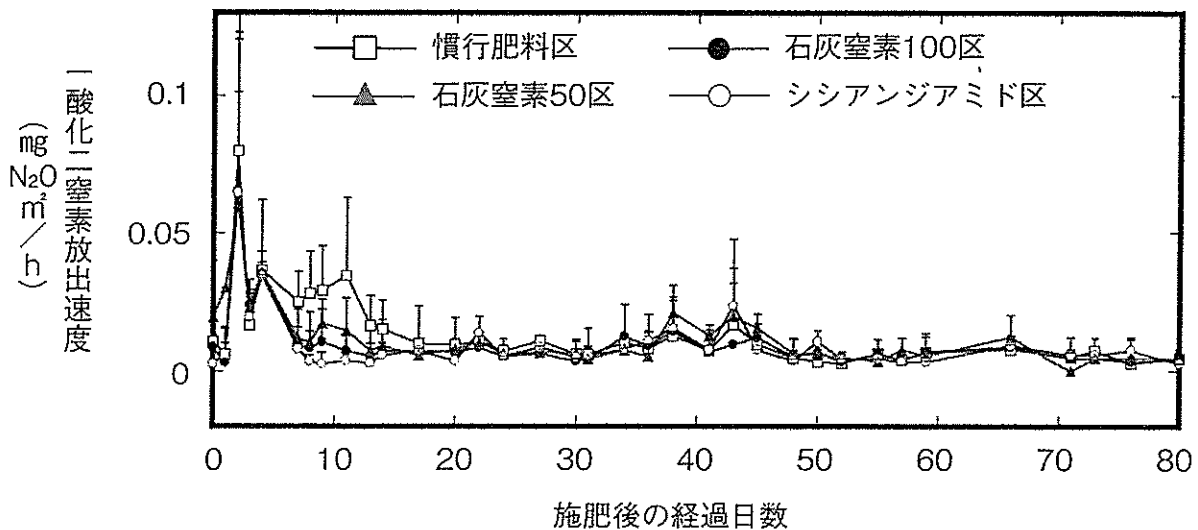


図-2 一酸化二窒素放出速度の時間変動
エラーバーは標準偏差を示す (n=3)

酸石灰、カリは塩化カリを用いた。

石灰窒素50区

施肥窒素量の50%を石灰窒素（窒素含有量20%）で施用した。残りの窒素は慣行肥料区と同じ化成肥料を用い、リン酸、カリはそれぞれ過リン酸石灰、塩化カリを用いた。

ジシアンジアミド区

施肥はジシアンジアミドを含む化成肥料（窒素含有量15%、リン酸含有量15%、カリ含有量15%、ジシアンジアミド含有量2.4%）を用いた。ジシアンジアミドに含まれる窒素は全窒素量の約10%である。

試験ではコマツナ (*Brassica rapa* L. var. *perviridis* L.H. Bailey) を栽培した。窒素 (N)、リン酸 (P_2O_5)、カリ (K_2O) は茨城県の栽培基準に従い、それぞれ120 kg N/ha、120kg P_2O_5 /ha、120kg K_2O /haを施用した。施肥は2010年10月5日、播種は2010年10月15日、収穫は2010年12月6日に行った。

●一酸化二窒素放出の時間変化

一酸化二窒素放出は、試験区間で異なる時間変化を示した(図-2)。慣行肥料区では、施肥後に一酸化二窒素放出が増加し、その後、施肥後2週間までの期間は放出量の高い状態が持続した。これに対し、石灰窒素100区、石灰窒素50区、ジシアンジアミド区では、施肥後7日~14日の期間に、一酸化二窒素放出が慣行肥料区に比べ明らかに減少した。特に、ジシアンジアミド区では、石灰窒素100区、石灰窒素50区よりも一酸化二窒素放出が抑制された。また、施肥後17日以降は、試験区間で一酸化二窒素放出に明らかな違いはみられなかった。

また、試験期間(80日間)における一酸化二窒素の積算放出量は試験区間で異なった(図-3)。慣行肥料区に対する石灰窒素100区、石灰窒素50区、ジシアンジアミド区の一酸化二窒素放出削減効果は、それぞれ約13.8%、約1.3%、約30.9%であった。

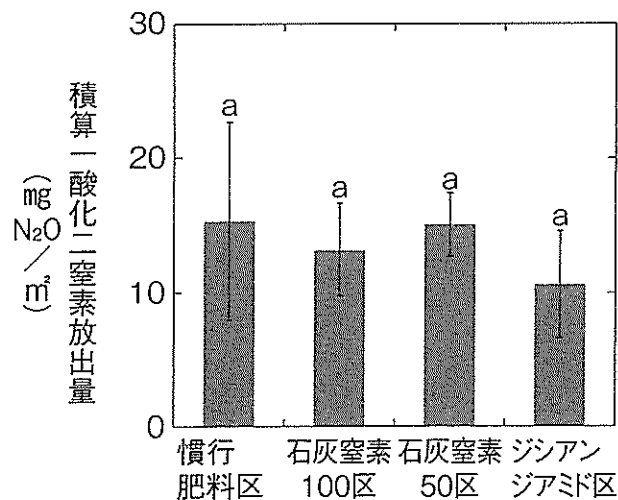


図-3 積算一酸化二窒素放出量(80日間)
 図の棒グラフ上の異なるアルファベットは5%以内の有意差を示す
 エラーバーは標準誤差を示す (n=3)

●石灰窒素およびジシアンジアミドの一酸化二窒素放出削減メカニズム

一酸化二窒素放出削減効果は、石灰窒素区（石灰窒素100区、石灰窒素50区）とジシアンジアミド区で明らかに異なった。そこで、石灰窒素とジシアンジアミドの一酸化二窒素放出削減メカニズムを解析した。その結果、ジシアンジアミドは、硝化の第一過程（アンモニアから亜硝酸への酸化過程、図-1）のみを抑制することで一酸化二窒素放出に影響したと考えられた（Liら 2009; Diら 2010）。

一方で、石灰窒素は、硝化の第一（アンモニアから亜硝酸への酸化過程）と第二（亜硝酸から硝酸への酸化過程）の両方の過程を抑制することで一酸化二窒素放出速度に影響したと考えられる。硝化の第一過程のみを抑制するジシアンジアミドと異なり、硝化の第二過程も抑制したことで、石灰窒素区では蓄積した亜硝酸を基質とする化学脱窒由来の一酸化二窒素放出が増加

し、ジシアンジアミド区よりも一酸化二窒素放出削減効果が低くなったと考えられた。

研究例②: 灰色低地土の野菜畑

●試験設計

灰色低地土における試験は、2011年5月9日～2011年7月17日の期間に農業環境技術研究所の試験圃場で行った。試験圃場は240m²（10×24m）で、その中に18m²（4×4.5m）の試験区を12区画設置した。灰色低地土の試験では次の3処理を4反復で設けた。

慣行肥料区

施肥は化成肥料（窒素含有量8%、リン酸含有量8%、カリ含有量8%）を用いた。

石灰窒素区

窒素施肥は石灰窒素（窒素含有量20%）を用いた。リン酸は過リン酸石灰、カリは塩化カリを用いた。

ジシアンジアミド区

施肥はジシアンジアミドを含む化成肥料（窒素含有量15%、リン酸含有量15%、カリ含有量15%、ジシアンジアミド含有量2.4%）を用いた。ジシアンジアミドに含まれる窒素は全窒素量の約10%である。

試験ではコマツナ (*Brassica rapa* L. var. *perviridis* L.H. Bailey) を栽培した。窒素 (N)、リン酸 (P₂O₅)、カリ (K₂O) は茨城県の栽培基準に従い、それぞれ120 kg N/ha、120kg P₂O₅/ha、120kg K₂O/haを施用した。施肥は2011年5月9日、播種は2011年5月20日、収穫は2011年7月11日に行った。

●一酸化二窒素放出の時間変化

施肥後22日までの一酸化二窒素放出の時間変化は、試験区間で顕著な違いはなか

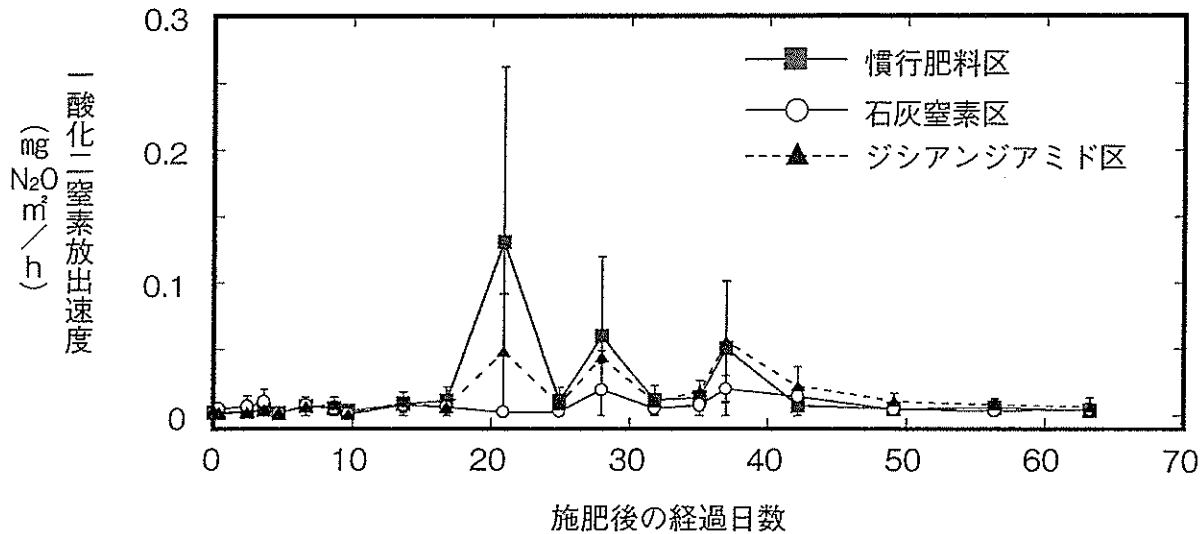


図-4 一酸化二窒素放出速度の時間変動
エラーバーは標準偏差を示す (n=4)

った (図-4)。

一方で、施肥後22日以降の一酸化二窒素放出の変化パターンは試験区間で明らかに異なった。慣行肥料区とジシアンジアミド区では、3回の大きな一酸化二窒素放出のピークが観測された。しかしながら、石灰窒素区では、一酸化二窒素放出のピークは観測されず、慣行施肥区やジシアンジアミド区に比べ一酸化二窒素放出が抑制された。

また、試験期間 (63日間) の一酸化二窒素の積算放出量は試験区間で異なった (図-5)。慣行肥料区に対する石灰窒素区およびジシアンジアミド区の一酸化二窒素放出削減効果は、それぞれ約64.6%、約19.5%であった。

●生成プロセスの変化と一酸化二窒素放出の関係

慣行肥料区とジシアンジアミド区で観測された一酸化二窒素放出のピークの要因を明らかにするために、生成プロセスの変化を検証した。その結果、慣行肥料区とジシ

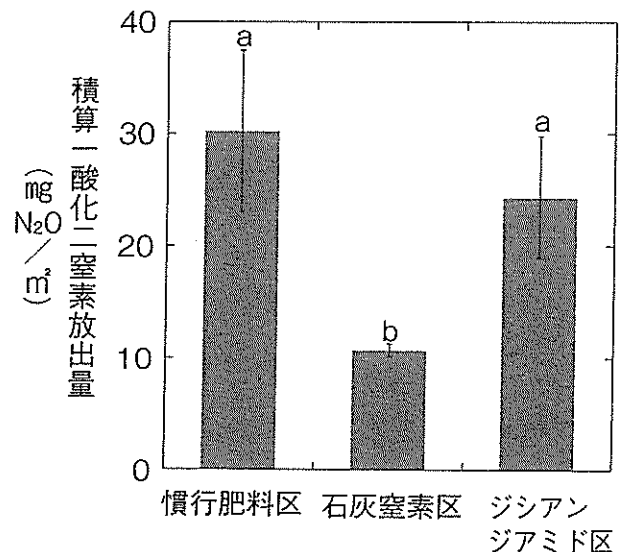


図-5 積算一酸化二窒素放出量 (63日間)
図の棒グラフ上の異なるアルファベットは5%以内の有意差を示す
エラーバーは標準誤差を示す (n=4)

アンジアミド区における一酸化二窒素放出のピークは、土壌水分の増加によって脱窒による一酸化二窒素の生成が増加したことが主な要因であると考えられた (Bateman and Baggs 2005; Davidson 1991)。

●石灰窒素による脱窒抑制と一酸化二窒素放出削減効果

このように、脱窒による一酸化二窒素の

生成が増加した期間に石灰窒素区で一酸化二窒素放出が減少したことから、石灰窒素は主に脱窒を抑制することで、灰色低地土からの一酸化二窒素放出を抑制したと考えられた。

石灰窒素が脱窒を抑制するメカニズムには2つのプロセスが考えられる。一つ目は、石灰窒素の主成分であるカルシウムシアナミドによる脱窒に関与する微生物活性の直接的な抑制である。二つ目は、脱窒の基質となる硝酸の生成(硝化)の抑制による間接的な抑制である。このように、灰色低地土の野菜畑における石灰窒素は、硝化と脱窒の両方の過程を抑制することで一酸化二窒素放出に影響したと考えられる。

研究例③:茶園

●試験設計

茶園における試験は、2011年8月29日～2012年8月29日の期間に埼玉県農林総合研究センターの茶業研究所の試験圃場で行った。試験圃場は521.52 m² (21.2×24.6m) で、その中に57.24 m² (10.6×5.4m) の試験区を8区画設置した。茶園の試験では次の2処理を4反復で設けた。

慣行肥料区

施肥は化成・有機配合肥料(窒素含有量12%、リン酸含有量6%、カリ含有量6%)を用いた。

石灰窒素区

施肥窒素量の約53%を石灰窒素(窒素含有量20%)で施用した。残りの窒素は慣行肥料区と同じ化成・有機配合肥料を用い、リン酸、カリはそれぞれ重焼リン、塩化カリを用いた。

試験圃場では、1971年から「やぶきた」

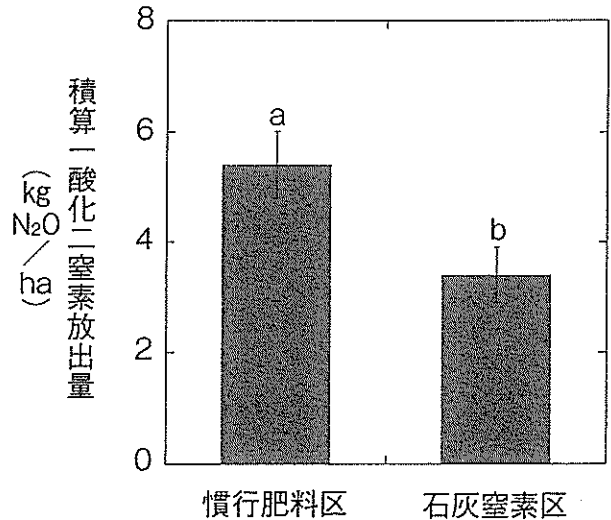


図-6 積算一酸化二窒素放出量(366日間)
図の棒グラフ上の異なるアルファベットは5%以内の有意差を示す
エラーバーは標準誤差を示す (n=4)

(*Camellia. sinensis* (L.) O. Kuntze var. *sinensis* cultivar Yabukita) が栽培されている。窒素 (N)、リン酸 (P₂O₅)、カリ (K₂O) は埼玉県の栽培基準に従い、それぞれ年間450kg N/ha、225kg P₂O₅/ha、225kg K₂O/haを施用した。施肥は年間3回行い、秋施肥(2011年8月29日)と春施肥(2012年3月6日)に年間施用量のそれぞれ4割を施用し、夏施肥(2012年6月4日)に年間施用量の2割を施用した。一番茶の収穫は2012年5月17日に、二番茶の収穫は2012年7月5日に行った。また、試験圃場の土壌は黒ボクである。

●茶園土壌の生成プロセスと一酸化二窒素放出削減効果

一酸化二窒素放出の時間変化は、試験区間で明らかに異なった。慣行肥料区では、施肥後に一酸化二窒素放出が急激に増加した。

一方で、石灰窒素区では、施肥後の一酸化二窒素放出の急激な増加は観測されず、

慣行肥料区に比べ、一酸化二窒素放出が抑制された。このような変化パターンの違いの原因を明らかにするために、茶園土壤における生成プロセスの時間変化と石灰窒素の一酸化二窒素放出削減メカニズムを検証した。その結果、茶園土壤では、年間を通して脱窒が主な生成プロセスであることが明らかになった。さらに、石灰窒素は茶園において、カルシウムシアナミドによる直接的な一酸化二窒素生成の抑制と、石灰による土壤pHの変化を通じた間接的な一酸化二窒素生成の抑制によって一酸化二窒素放出に影響したと考えられた。

また、試験期間（366日間）の一酸化二窒素の積算放出量は試験区間で異なり（図-6）、慣行肥料区に対する石灰窒素区の一酸化二窒素放出削減効果は約36.0%であった。

まとめ

石灰窒素の一酸化二窒素放出削減効果の圃場間での違い

黒ボク土および灰色低地土の野菜畑と茶園における研究によって、石灰窒素には一酸化二窒素放出削減効果があることが明らかになった。加えて、石灰窒素の一酸化二窒素放出削減効果は、圃場間の土壤や栽培体系の違いによって異なることも明らかになった。硝化を抑制した場合（黒ボク土の野菜畑の試験）の一酸化二窒素放出削減効果に比べ、脱窒を抑制した場合（灰色低地土の野菜畑と茶園の試験）の削減効果が大きかったことを考慮すると、石灰窒素の削減効果の土壤や栽培体系による違いは、圃

場間で優占する一酸化二窒素の生成プロセスやその変化パターンの違いに起因していると考えられる。

一酸化二窒素放出削減技術としての石灰窒素の利用

石灰窒素の一酸化二窒素放出削減効果は、硝化が優占する農耕地では一般的な慣行肥料と比べて約1.3~13.8%減少、脱窒が優占する農耕地では約36.0~64.6%減少であった。そのため、石灰窒素を一酸化二窒素放出削減技術の化学資材として用いる場合、硝化が優占する農耕地における利用よりも脱窒が優占する農耕地における利用を促進していくことで、一酸化二窒素放出量を効果的に削減することが可能になると考えられる。

また、本稿では詳しい結果を省略したが、作物の収量・品質は慣行肥料区と石灰窒素区で有意な違いはみられなかった。

今回紹介した黒ボク土および灰色低地土の野菜畑と茶園における研究は、それぞれ1作期の影響しか明らかにできていない。農耕地では、気象（温度や降水量など）や農作業（窒素肥料の施用量や施肥のタイミング、栽培作物の違いなど）の影響を受けるため、環境要因が不規則に変動する。そのため、石灰窒素の一酸化二窒素放出削減効果を正確に評価するためには、今後、さまざまな環境条件下における長期間の試験を実施する必要がある。

また、本稿で割愛した解析方法や結果など詳しい研究内容については、次の3つの論文に記載されている。

1. Yamamoto A, Akiyama H, Naokawa T, Yagi K. 2012: Effect of lime-nitrogen application on N₂O emission from an Andosol vegetable field. *Soil Sci Plant Nutr.*, 58, 245-254.
2. Yamamoto A, Akiyama H, Naokawa T, Yagi K. 2013: Lime-nitrogen application reduces N₂O emission from a vegetable field with imperfectly-drained sandy clay-loam soil. *Soil Sci Plant Nutr.*, 59, 442-449.
3. Yamamoto A, Akiyama H, Naokawa T, Miyazaki, Y, Honda Y, Sano Y, Nakajima Y, Yagi K. in press: Lime-nitrogen application affects nitrification, denitrification and N₂O emission in an acidic tea soil. *Biol. Fertil. Soils*, doi: 10.1007/s00374-013-0830-6.

●引用文献リスト

- ・ Akiyama H, Yan X, Yagi K 2010: Evaluation of effectiveness of enhanced-efficiency fertilizers as mitigation options for N₂O and NO emissions from agricultural soils: meta-analysis. *Global Change Biol.*, 16, 1837-1846.
- ・ Bateman EJ, Baggs EM 2005: Contribution of nitrification and denitrification to N₂O emissions from soils at different water-filled pore space. *Biol. Fertil. Soils*, 41, 379-388.
- ・ Davidson EA 1991: Fluxes of nitrous oxide and nitric oxide from terrestrial ecosystems. In *Microbial Production and Consumption of Greenhouse Gases: Methane, Nitrogen Oxides, and Halomethanes*, Eds. Rogers JE, Whitman WB, pp. 219-235. American Society for Microbiology, Washington, DC.
- ・ Di HJ, Cameron KC, Sherlock RR, Shen J, He J, Winefield CS 2010: Nitrous oxide emissions from grazed grassland as affected by a nitrification inhibitor, dicyandiamide, and relationships with ammonia-oxidizing bacteria and archaea. *J. Soil Sed.*, 10, 943-954.
- ・ Haenseler CM, Moyer TR 1937: Effect of calcium cyanamide on the soil microflora with special reference to certain plant parasites. *Soil Sci.*, 43, 133-151.
- ・ Klasse HJ 1996: Calcium cyanamide, an effective tool to control clubroot: A review. *Acta Hort.*, 407, 403-409.
- ・ Li X, Zhang G, Xu H, Cai Z, Yagi K 2009: Effect of timing of joint application of hydroquinone and dicyandiamide on nitrous oxide emission from irrigated lowland rice field. *Chemosphere*, 75, 1417-1422.
- ・ Ravishankara AR, Daniel JS, Portman RW 2009: Nitrous oxide (N₂O): The dominant ozone-depleting substance emitted in the 21st century. *Science*, 326, 123-125.
- ・ Solomon S, Qin D, Manning M, Marquis M, Averyt K, Tignor MMB, Miller Jr HL, Chen Z 2007: *Climate Change 2007. The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge.