

学位論文題名

水稻の不耕起直播栽培における

温室効果ガスの発生実態の解明と削減技術の開発

学位論文内容の要旨

過去 50 年の全球の気温上昇は、人為起源の温室効果ガスが原因であるといわれており、農業と関係のある温室効果ガスは、二酸化炭素、メタンおよび亜酸化窒素である。これらのガスの発生実態は十分明らかになっておらず、急速な温暖化を防ぐためにも農耕地から発生する温室効果ガスの実態把握と削減技術の確立が求められている。水田では、栽培期間中のメタンおよび亜酸化窒素のそれぞれ単独の発生実態についての報告は多いが、メタンと亜酸化窒素を同時に、しかも年間を通じて調査した報告はほとんどない。さらに土壌の炭素貯留機能も含めて総合的に解析した報告はない。そこで本研究では、耕起移植圃場、耕起直播圃場および不耕起直播圃場からの 3 種類の温室効果ガスの発生量や土壌炭素貯留量について実態を解明し、得られた結果を総合的に評価し、温室効果ガスの発生削減のための有効な土地利用について提言した。以下に主要な研究成果を要約する。

1) 不耕起直播栽培がメタン発生量に及ぼす影響

本試験は、岡山県内の減水深が小さい赤磐市山陽地区と岡山市水門地区、および減水深が大きい赤磐市赤坂地区の水田で行った。減水深の多少に関わらず、不耕起直播圃場のメタン発生量は、その継続期間が数年以内の短期間の場合には、耕起移植圃場のメタン発生量の半分以下であった。しかし、稲わらを圃場に毎年還元しながら不耕起直播栽培を継続すると、作土の表層に主として稲わら由来の有機物が集積し、それに伴い土壌中の酸化還元電位が低下した。メタンの土壌中での生成は、土壌中の酸化還元電位が低くなることと、メタン生成細菌の栄養基質が増加することによって多くなるため、不耕起直播栽培を継続するとメタンの生成量および大気中への放出量(発生量)が多くなった。そして、不耕起直播栽培を 7 年以上も継続すると不耕起直播圃場と耕起移植圃場のメタン発生量の有意な差はなくなった。

2) 不耕起直播栽培が亜酸化窒素発生量に及ぼす影響

本試験は、山陽地区の不耕起直播、耕起直播および耕起移植の各圃場を供試して行った。施肥窒素に対する亜酸化窒素の発生割合は、不耕起直播圃場で 1.7~6.3%、耕起移植圃場 0.4~0.5% であり、不耕起直播圃場の亜酸化窒素発生量は耕起移植圃場より明らかに多かった。年間を通じたフラックス測定では、亜酸化窒素フラックスの大きいピークが観察された時期は、不耕起直播圃場では基肥施用から入水期頃と 11 月から 2 月頃であった。不耕起直播圃場で亜酸化窒素の発生が多くなった原因は、基肥施用から入水期までの期間では、播種と同時に施用した基肥窒素が、硝化や脱窒する過程で亜酸化窒素が発生したためであり、11 月から 2 月頃では作土の表層に集積した有機物から無機化した窒素が主に脱窒

されたためと考えられた。これは、作土表層の有機物の集積と不耕起直播土壌独特の土壌構造（耕起しないことによる水稻根由来の孔隙の蓄積によりできる構造）の発達が原因と考えられた。

3) 不耕起直播圃場の二酸化炭素貯留効果

不耕起直播栽培の継続で作土の表層に集積する炭素の量は、耕起移植圃場の値が変化しないと仮定すると、年間 $316 \text{ gCO}_2 \text{ m}^{-2}$ であった。このように、不耕起直播圃場では、耕起されないために有機物の分解が抑えられ炭素が貯留し、その量は投入された稲わら量の28%に相当した。

4) 二酸化炭素発生に及ぼす栽培様式の影響

二酸化炭素は栽培期間中は光合成により吸収されるが、非栽培期間中は、土壌から大気中に放出される。非栽培期間中の二酸化炭素フラックスは、地温が高くなる5、6月頃に大きい値を示したが、この傾向は表層に有機物が集積する不耕起直播圃場で顕著であった。稲わらを還元する耕起移植圃場では炭素量の増減は無いとされているので、耕起移植圃場における非栽培期間中の二酸化炭素発生量は、カーボンニュートラルの考えによれば光合成による二酸化炭素の吸収や収穫物中の二酸化炭素の持ち出し量と相殺されることになる。それ故、温室効果ガス発生量の値にカウントされない。そこで、不耕起直播圃場の非栽培期間中の二酸化炭素発生量から耕起移植圃場の二酸化炭素発生量を差し引いた値は、不耕起直播栽培の継続に伴う二酸化炭素の発生増加量といえ、不耕起直播圃場で2年間の平均で $48 \text{ gCO}_2 \text{ m}^{-2}$ と試算された。前述した炭素の貯留量を考慮すると、不耕起直播圃場での「正味の二酸化炭素発生量」は2年間平均で $268 (48-316) \text{ gCO}_2 \text{ m}^{-2}$ の吸収となった。

5) 二酸化炭素等価発生量に換算した温室効果ガスの年間発生量の比較

メタンおよび亜酸化窒素を二酸化炭素等価発生量に換算して比較したところ、不耕起直播圃場では、メタン発生量が91%、亜酸化窒素発生量が9%であったのに対して、耕起移植圃場ではメタン発生量が98%で、亜酸化窒素発生量は2%であった。また、メタンおよび亜酸化窒素の合計発生量に「正味の二酸化炭素の発生量」を合計した温室効果ガスの総発生量の相対値は、耕起移植圃場を100としたとき、不耕起直播圃場では79.4となり、不耕起直播栽培の導入で約20%の温室効果ガス削減が可能であると判断された。

6) 不耕起直播栽培から耕起移植栽培、あるいは耕起直播栽培への転換がメタンおよび亜酸化窒素発生量に及ぼす影響

5年以上継続した不耕起直播圃場を、耕起移植栽培あるいは耕起直播栽培へ転換して、作土表層に集積した有機物をすき込んでも、メタンも亜酸化窒素の発生も多くならなかった。これは、作土の表層に集積した有機物のC/N比が稲わらたい肥と同等に腐熟化が進んでおり（C/N比は15-17）、一般に腐熟した堆肥化物の施用によりメタンがほとんど増えないことから、妥当な結果であると考えられた。

以上から、水田で発生する温室効果ガスはメタンが大半であり、水田からの温室効果ガスの発生量を削減するためには、メタンの発生を抑制することが重要と考えた。そして、不耕起直播栽培の継続期間が5年以内では、不耕起直播栽培の導入で耕起移植栽培よりメタンの発生量を50%以上削減でき、炭素貯留効果を含めると77%の削減が可能であることが分かった。しかし、不耕起直播栽培をさらに継続すると、不耕起直播圃場のメタンや亜酸化窒素の発生量が耕起移植圃場を上回るようになるが、有機物を作土の表層に集積する炭素貯留効果により、二酸化炭素を含めた温室効果ガスの総発生量は不耕起直播圃場で、耕起移植圃場より約20%削減できることが分かった。なお、不耕起直播圃場を耕起して耕

起栽培に転換してもメタンや亜酸化窒素の発生が多くなることから、5年に一度耕起作業を組み入れた5年不耕起直播栽培-1年耕起栽培体系は、温室効果ガスの削減効果を最大限発揮でき、かつ地力維持、労働分散および省力化を実現できる体系であると考えられた。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 岩 間 和 人
副 査 教 授 佐 野 芳 雄
副 査 教 授 小 池 孝 良
副 査 教 授 山 田 敏 彦

学 位 論 文 題 名

水稻の不耕起直播栽培における 温室効果ガスの発生実態の解明と削減技術の開発

本論文は図 57, 表 10 を含み, 6 章からなる総頁数 163 の和文論文である. 別に参考論文 8 編が添えられている.

地球の温暖化は人為起源の温室効果ガスが原因と考えられており, 作物栽培に関する温室効果ガスは, 二酸化炭素, メタンおよび亜酸化窒素である. メタンと亜酸化窒素は二酸化炭素に比べて発生量は少ないが, 温暖化に対する影響度の尺度である温暖化係数(二酸化炭素の影響度を 1 とした倍率)はメタンが 23, 亜酸化窒素が 276 であり, 二酸化炭素に比べて著しく影響が大きい. 日本におけるメタン発生量の 1/4 が水田から発生すると推定されており, 水田におけるメタンと亜酸化窒素の発生実態の解明と削減技術の開発が急務となっている. 本研究では, 岡山県を中心にした少雨の地域で水稻の省力化栽培として行われている, 不耕起乾田直播栽培(畑状態の圃場で播種溝のみを耕起して施肥・播種し, 発芽後に水田状態で栽培する)において, 温室効果ガスの発生量を冬期の非栽培期間も含めて周年で測定し, 移植栽培から不耕起直播栽培への栽培様式の転換によって削減できる温室効果ガス量を明らかにした.

1. 不耕起直播栽培がメタンおよび亜酸化窒素の発生量に及ぼす影響

不耕起直播栽培の継続期間が 5 年以内の場合は, 移植栽培に比べてメタン発生量が 50% 程度であった. しかし, 稲わらを圃場に毎年還元しながら不耕起直播栽培を継続すると, 作土の表層に主として稲わら由来の有機物が集積し, それに伴い土壤の酸化還元電位が低下した. 土壤中でのメタンの生成は, メタン生成細菌の栄養基質(集積した有機物由来)が増加することと, 土壤の酸化還元電位が低下することで増加する. このため, 不耕起直播栽培を継続すると土壤中でのメタン生成が次第に増加し, 7 年以上継続した場合には,

不耕起直播栽培と移植栽培の間でメタン発生量に有意な差異が認められなくなった。

2. 不耕起直播栽培が亜酸化窒素発生量に及ぼす影響

施肥窒素に対する亜酸化窒素の発生割合は、不耕起直播栽培（1.7～6.3%）では移植栽培（0.4～0.5%）に比べて明らかに多かった。年間を通じたフラックスの測定で大きいピークが観察された時期は、不耕起直播栽培では基肥施用から入水期頃と11～2月頃であった。基肥施用から入水期までの期間では、播種と同時に施用された基肥窒素が硝化や脱窒される過程で発生した。また11～2月頃の期間では、作土の表層に集積した有機物から無機化した窒素が主に脱窒される過程で発生した。これは、作土表層の有機物の集積と不耕起土壌独特の土壌構造（耕起しないことによる水稻根由来の孔隙の蓄積によりできる構造）の発達が原因と考えられた。

3. 不耕起直播栽培が二酸化炭素発生量に及ぼす影響

不耕起直播栽培では、作土の表層に1年間で $316\text{gCO}_2\text{m}^{-2}$ の炭素が有機物層として集積した。集積した有機物の一部は分解されるが、その分解量は、非栽培期間中の不耕起直播栽培圃場から耕起移植栽培圃場の二酸化炭素放出量を差し引いた値（年間 $48\text{gCO}_2\text{m}^{-2}$ ）と考えることができる。したがって、不耕起直播栽培圃場では年間 $268\text{gCO}_2\text{m}^{-2}$ の炭素が土壌中へ貯留されると推察された。

4. 栽培様式の転換がメタンおよび亜酸化窒素の発生量に及ぼす影響

5年以上継続した不耕起直播栽培圃場を、耕起移植栽培あるいは耕起直播栽培へ転換しても、メタンと亜酸化窒素の発生量は増加しなかった。これは、作土の表層に集積した有機物の腐熟化が進んでいた（C/N比は15～17）ためであると考えられた。

5. 不耕起直播栽培と移植栽培における温室効果ガス年間発生量の比較

メタンと亜酸化窒素の発生量に温暖化係数を乗じて二酸化炭素発生量に換算した。この値から、土壌中への炭素貯留量を差し引いて、温室効果ガス（二酸化炭素等価量）の年間発生量を推定した。移植栽培での発生量を100としたとき、継続期間が5年以内の不耕起直播栽培では23、7年以上継続した場合には80になった。この推定に基づき、「5年不耕起直播栽培－1年耕起移植栽培」の栽培体系において、不耕起直播栽培による温室効果ガスの削減効果を最大限に発揮できると結論した。

以上のように、本研究では岡山県地域で行われている水稻の不耕起乾田直播栽培を対象にして水田から発生する温室効果ガスの実態を定量的に明らかにするとともに、移植栽培との組み合わせによって温室効果ガスの発生を削減する栽培体系を提示した。これらの成果は学問的および応用的の両面から高く評価できる。よって審査員一同は、石橋英二が博士（農学）の学位を受けるのに十分な資格を有するものと認めた。