J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 131, p.23 ～ 27 (2015)

論　文
Original Paper

# 湛水下の水田表層土における太陽光の透過性と全窒素量の変動

荒生秀紀[1]・粕渕辰昭[2]・安田弘法[2]

# Sunlight transmittance through the surface soil and fluctuations in the total nitrogen contents at the surface of ponded paddy soil

Hideki ARAO[1], Tatsuaki KASUBUCHI[2] and Hironori YASUDA[2]

**Abstract:** It is known that nitrogen is fixed by algae and photosynthetic bacteria at the surface soil of ponded paddy field. The biological nitrogen fixation is one of the main natural nitrogen supply in addition to the irrigation and rainwater supply. The active location of the bacteria and the amount of fixation, however, have not yet well studied. In this report, at first, we investigated the penetrating depth of sunlight into the surface soil using a solar battery with radiometer. Then, we examined the distribution of total nitrogen content under exposed and shielded conditions to the sunlight at interval of 2 mm from the surface. Total nitrogen contents determined by a NC-analyzer increased only in the uppermost (0 – 2 mm) layer from the ponded surface soil for the exposed condition. Since the sunlight reached down to 1 mm from the soil surface, we concluded that the biological nitrogen fixation occurred only at the thin surface layer with the penetrating sunlight.

**Key Words**: ponded paddy field, surface soil, sunlight transmittance, nitrogen fixation, distribution of total nitrogen content

## 1. はじめに

水田表層では藻類や光合成細菌群による窒素固定が行われていることが知られている（Kobayashi et al., 1967; Yoshida et al., 1973; Habte and Alexander, 1980; App et al., 1984）．このことが水田土の窒素天然供給量いわゆる肥沃度の主要な給源になっている（志賀，1986）．しかし，窒素は微生物による固定だけでなく灌漑水や雨水からも供給されている．

光合成細菌群は電磁波の一種である太陽光をエネルギー源としているため，土中の活動域は太陽光の到達深さに依存すると考えられる．一方，同じ電磁波に属するガンマ線（Reginato et al., 1964）などの放射線や高周波（Topp et al., 1980）については土中の挙動が詳細に調べられているが，太陽光の挙動についてはほとんど調べられていない．これは，太陽光の到達深さがごく浅く，物理的には土壌表面（深さ 0）と扱ってもとくに問題が生じなかったことが一因と考えられる．

しかし，この窒素固定が水田のどの深さで，どの程度の量になるのかを明らかにするには，光合成細菌群の活動も考慮に入れると，太陽光が水田表層のどの深さまで到達し，それと窒素の分布とがどのような関係にあるかを明らかにする必要がある．

そこで，この報告では太陽光が土中のどの深さまで到達しているかをまず明らかにし，次いで太陽光の有無が水田土表層付近の全窒素分布にどのような影響を及ぼしているかを明らかにするために，薄層に分けて調べることにした．

なお，本報告では，著者らが光合成細菌を同定する方法を持ち合わせていないため，総称として光合成細菌群を用い，その窒素固定機能を露光と暗黒という 2 つの条件下で評価することにした．

## 2. 方法

### 2.1 実験 1：水田表層土の光透過性

湛水土の表層からどれだけの深さまで太陽光が到達しているかを明らかにするため，水田表層土の深さを変えて太陽光の透過性を調べた．

測定は晴天の屋外で 2015 年 6 月 5 日午前 11 時から行った．土は山形大学農場（鶴岡市高坂，38° 41’ N，139° 49’ E）の水田表層から採取した．なお土は 2008 年以降，無肥料・無農薬で水稲栽培が行われている圃場より採取した．実験には 5 mm 篩を通した生土を湛水状態にして撹拌し，沈降した土を実験に供した．土は灰色低地土（Gleyic Fluvisols, (FAO, ISRIC and ISSS，2006)）に分類されている．

3 mm 厚の透明アクリル板で底面 20.0 × 30.0 cm，深さ 5.0 cm の試験箱を製作し，底面中央に太陽電池（8 × 9 cm）を張り付けた．また太陽光がアクリル板を通して太陽電池に回り込まないように，太陽電池以外の底面および箱の周辺を黒のビニールテープで覆った．

[1]The United Graduate School of Agricultural Sciences, Iwate University. Morioka, Iwate prefecture, Japan. Corresponding author：荒生秀紀，岩手大学大学院連合農学研究科
[2]Faculty of Agriculture, Yamagata University. Tsuruoka, Yamagata prefecture, Japan.
2015 年 7 月 17 日受稿　2015 年 9 月 18 日受理

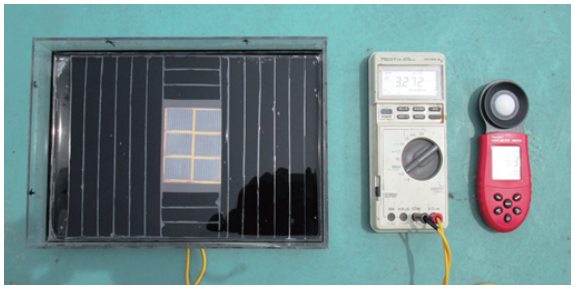


**Photo 1** 水田土における太陽光の透過性を測定するための太陽電池を使った装置（左側の 2 つ）と照度計（右端）．
Apparatus for measuring the sunlight transmittance by solar battery （two on the left side）and the illuminometer (right end).

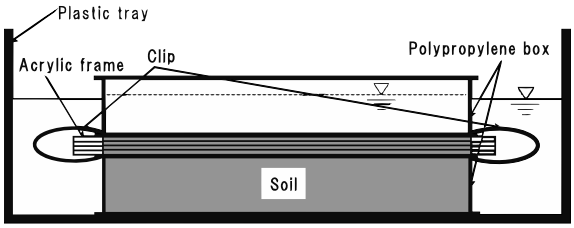



**Fig. 1** 全窒素の分布を調べるための実験装置の概要．
Schematic diagram of apparatus for measuring the distribution of total nitrogen.

供試土を水分飽和状態で 100 $cm^3$ のコアサンプラーに充填し容積重を測定した．この容積重をもとに土を試験箱に広げたときの深さが 0.13，0.25，0.50，1.0 mm になる重量を求めた．

光源には太陽光を用いた．太陽電池の出力はデジタルマルチメータ（7537 型，横河電気製）で測定した．照度は照度計（HS1010, Sunche 製）を用いて光量を測定した．同一の水平な場所に試験箱および照度計を設置した（Photo 1）．

太陽電池の出力は直流電圧であり，出力を照度に変換するため，太陽電池出力と照度計出力との関係を最初に求めた．両方のセンサーを同一平面上に並べ，出力を比較することにより両者の関係を調べた．両者の上に不透明な紙を置き，枚数を重ねることで光量を調節した．

次に厚さ 3 mm の透明アクリル板の有無により光透過性に違いがあるかどうかを調べた．続いて，試験箱に水道水を入れ水深 0 ～ 20 mm（試験箱あたり 0 ～ 1200 g）を変化させ，太陽電池出力への影響を調べた．

土の光透過性は，生土（149.0 g 100 $cm^{-3}$）の一定量をビーカに取り，試験箱内での水深 5 mm に相当する 300 g の水を加えて懸濁させ，試験箱に移し，土を均一に沈降させ測定した．試験箱の底面積が 600 $cm^2$ であるため，土の深さが 1 mm で 60 $cm^3$ となる．0.13，0.25，0.50，1.0 mm に相当する生土は，それぞれ 11.3，22.5，45.0，90.0 g となり，この値にしたがい，土の量を変化させ透過光量を測定した．



**Photo 2** 露光区の概要．
Apparatus for measuring the nitrogen distribution under sunlight.

### 2.2 実験 2：露光区と暗黒区における土の深さごとの全窒素分布

湛水条件下の水田土で太陽光の有無による表層の全窒素量分布を調べた．実験は露光区と暗黒区の 2 つを作り，設置 7 日後に深さ別に土を採取し，NC アナライザーで全窒素量の分布を測定した．

供試土は実験 1 と同じものを水分飽和状態にし，よく撹拌して用いた．実験には上下部にフランジのついたポリプロピレン製（以下 pp 製）の箱（底面 21.5 × 30.5 cm，深さ 5.0 cm），同じ pp 製の箱の底面をくり抜いた無底の箱および pp 製の箱の内法と同じ大きさの内法を持つ 2 mm 厚のアクリル製の自作の枠を使用した．まず，pp 製の箱のフランジ上にアクリル製の枠を 4 枚重ね，その最上部の枠と同じ位置になるように土を充填した．その上に pp 製の無底の箱を載せ，アクリル製の枠を挟むように上下部のフランジをクリップで留めた．pp 製の箱のフランジおよびアクリル製の枠の間に漏水を防ぐため薄くグリスを塗った．上部に載せた無底の pp 製の箱には水を張った．なお，試験箱の下部は前述のように有底であり，水は下方へ流れない（Fig. 1）．

実験は露光区・暗黒区ともに屋外で行った．露光区は水平な場所に大型のプラスチック製の箱（1.2 × 0.8 × 0.2 m）を設置し，深さ約 10 cm の水を張り，できるだけ水田の環境に近似させた．さらに雨水の流入を防ぐため，上部を透明ポリエチレンシートで半円筒状に覆った．ただし，高温になるのを避けるため，両端は解放した（Photo 2）．暗黒区は，露光区の近くに設置し，太陽光を完全に遮蔽できる黒色のプラスチック箱を被せた（Photo 3）．

実験はそれぞれ連続する 7 日間とし，引き続き 3 回繰り返した．第 1 回目：2015 年 5 月 1 日 ～ 7 日，第 2 回目：2015 年 5 月 7 日 ～ 13 日，第 3 回目：2015 年 5 月 13 日 ～ 19 日である．

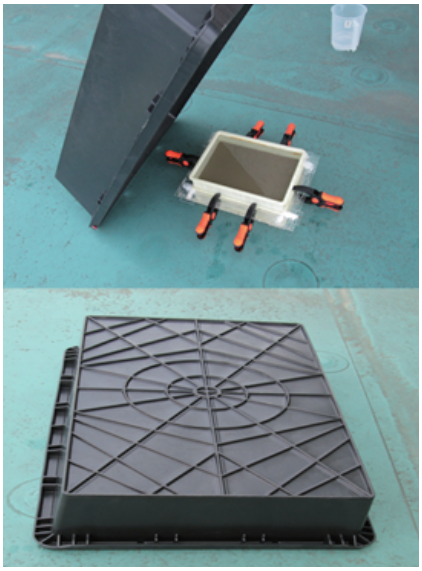


**Photo 3**　暗黒区の概要.
Apparatus for measuring the nitrogen distribution under dark condition.

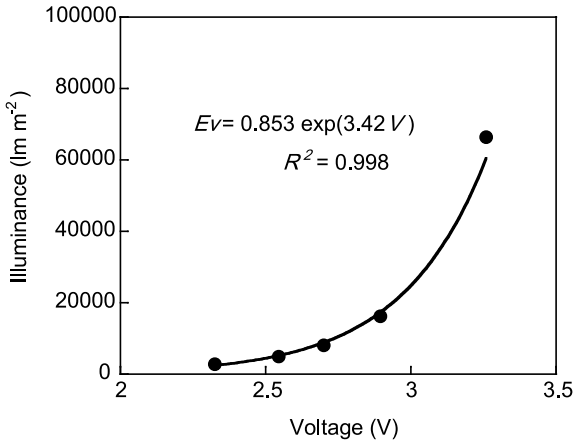



**Fig. 2**　太陽電池出力と照度との関係.
The relation between the output by solar battery and illuminance.

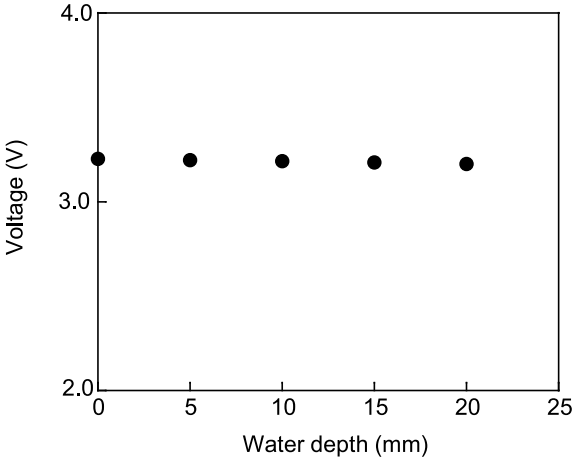



**Fig. 3**　水深と太陽電池出力との関係.
The relation between the water depth and the output by solar battery.

露光区の土のサンプリングは，湛水から試験箱を取出し，クリップを外し，上部の無底の pp 製の箱を土が流れ出ないようゆっくり取除き排水した. 次に表面から 8 mm までの土は，2 mm 厚のアクリル製の枠を一枚ずつ外し，枠に沿って 5 mm 厚のアクリル板を水平に押して，2 mm ごとに土を採取した．さらに 8 mm 以深の土は，100 $cm^3$ のコアサンプラー（直径 50 mm，高さ 51 mm）を用いて採取した．この結果，それぞれの区から表層の 0 ～ 2，2 ～ 4，4 ～ 6，6 ～ 8，8 ～ 58 mm の計 5 個のサンプルを得た．暗黒区の土のサンプリングも露光区同様に行った.

採取した土は直ちに 70 °C の乾燥機に入れて 5 日間乾燥した．70 °C に設定したのは，生物体の分解を極力抑えるため植物体などの乾燥方法にならったためである（植物栄養実験法編集委員会，1990）．乾燥後，鉄乳鉢で粉砕し，よく撹拌して測定試料とした．また，同時に水分測定のため試料の一部をとり，105 °C の乾燥機で炉乾し，全窒素測定後のデータ調整を行った．全窒素は NC アナライザー（Sumigraph NC-220F）を用いて定法により測定した（土壌環境分析法編集委員会，1997）.

## 3. 結果および考察

### 3.1 実験 1：水田表層土の光透過性

#### 3.1.1 太陽電池出力と照度計出力との関係

太陽電池出力と照度計出力との関係を得るため，光量を変えた実験を晴天の屋外で行った．得られた結果を Fig. 2 に示す.

両者の関係は，

$$E_v = 0.853\exp(3.42V) \qquad (1)$$

ただし，$E_v$ は照度（lm $m^{-2}$），$V$ は直流電圧（V）である．決定係数は 0.998 であった．この式により太陽電池出力（V）－照度（lm $m^{-2}$）の変換を行った.

#### 3.1.2 アクリル板と水道水の光透過性

最初に厚さ 3 mm の透明アクリル板の有無により光透過性に違いがあるかどうかを調べた．この結果アクリル板の光透過性は良く，アクリル板による太陽電池出力の低下は，アクリル板なしの場合には 3.20 V であったが，アクリル板ありの場合には 3.21 V と 0.4 % 以下で，透過光測定への影響はほとんどないと判断した.

次にこのアクリル製の試験箱の中に水道水を入れ，水深を 0 ～ 20 mm まで変化させたとき，太陽電池出力に影響するかどうかを調べた．得られた結果を Fig. 3 に示す．図から明らかなように，測定範囲内の水深に対して出力はほとんど変化せず水深の影響はないと判断した.

#### 3.1.3 水田表層土の光透過性

土量を 11.3，22.5，45.0，90.0 g と変化させて透過光量を測定した．得られた結果を Fig. 4 に示す．なお，太

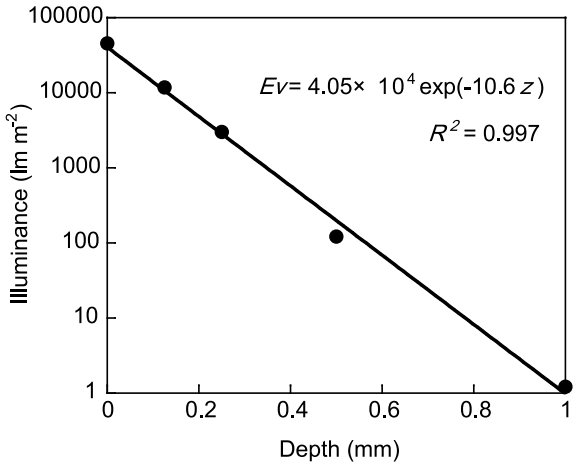



**Fig. 4** 土の深さと太陽光の透過性との関係.
The relation between the soil depth and sunlight transmittance.

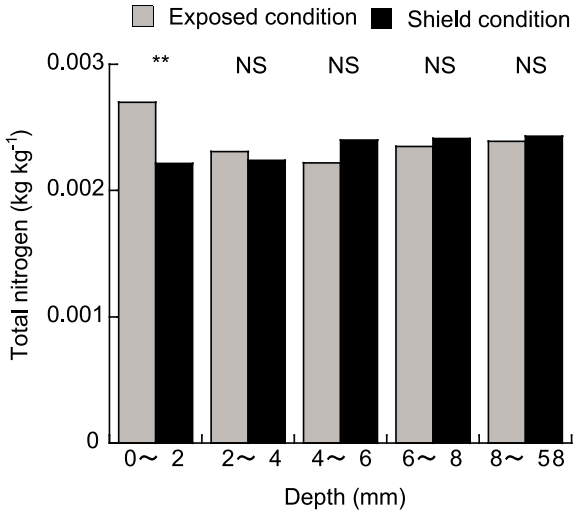



**Fig. 5** 露光区および暗黒区における全窒素の分布（図中のエラーバーは ±1 SD を示す．$n = 3$）有意差検定（スチューデントの $t$-検定）の結果を以下のように図中に示した．**: P< 0.01，NS: P≥ 0.05.
The distribution of total nitrogen of surface soil under exposed and shield conditions. Bars indicate one standard deviation with $n = 3$. The following values indicate significant difference based on Student's $t$-test, **: P< 0.01 and NS: not significant (P≥ 0.05) .

陽電池出力は式（1）を用いて照度に変換し次の関係を得た.

$$E_v = 4.05 \times 10^4 \exp(-10.6z) \qquad (2)$$

ただし，$E_v$ は照度（lm m$^{-2}$），$z$ は土の深さ (mm) である．決定係数は 0.997 であった.

この式から，水田土の深さ 1 mm で土の照度は 1.01 lm m$^{-2}$ となり，この深さでは太陽光がほとんど到達しなくなるということがわかる．なお，土の電磁波の透過性についての報告は，例えばガンマ線や高周波を用いた水分計と関連していくつか見出すことができる．しかし，太陽光の透過性に関する既往の報告はみられなかった．これは今回の実験結果が示すように太陽光の波長領域では，水田土は光をほとんど透過しないことから，物理的に透過しないと仮定しても大きな問題とはならなかったからと考えられる．しかし，本報告に示すように，ごく表層であっても太陽光は透過すること，透過係数は小さいが他の電磁波と同じく透過量は指数的に減少することが明らかとなった.

### 3.2 実験 2：露光区と暗黒区における土の深さごとの全窒素分布

露光区と暗黒区の全窒素分布は，時期を変え連続して 3 回繰り返して測定した．実験の結果，各回とも時期を変えてもほぼ同じ値を示した．これはこの期間同じように晴天が続いたためと思われる．そこで，3 回の測定結果をまとめ，土の深さごとに平均化した全窒素の分布を Fig. 5 に示した．なお，図には標準偏差をエラーバーで示した．また，露光区と暗黒区について深さごとに有意差の検定（スチューデントの t -検定）を行い，その解析結果を Fig. 5 に併せて表示した.

全窒素は露光区の表層 0 ～ 2 mm のみ増加していて，暗黒区の表層 0 ～ 2 mm とは 1 % 以下で有意差があり，他の深さ間では有意の差は認められなかった.

一方，露光区の 2 ～ 6 mm と暗黒区の 0 ～ 4 mm ではそれ以下の層に比べて全窒素量の減少傾向が見られた．これは露光区と暗黒区ともに表層近くで脱窒が生じた可能性があることを示している．下層への移動も考えられるが，下端が閉じていること，および下部の窒素含有量（0.00239 kg kg$^{-1}$）が実験開始時の試料の窒素含有量（0.00230 kg kg$^{-1}$）とほぼ等しいことから，下方への移動はほとんどなかったと考えられた．しかし，今回の実験では実験終了後の全窒素の分布のみを測定したため，測定期間中の脱窒を含む窒素の動態を検討することはできなかった．なお，露光区の表層 2 mm について暗黒区との対比から 0. 49 g kg$^{-1}$ の全窒素が増加したと仮定すると，ha 当たり約 7 kg の増加となる.

以上の結果から，湛水下の土の表層で全窒素は露光区の 0 ～ 2 mm でのみ増大したのに対し，暗黒区の 0 ～ 2 mm では増加しなかったことがわかる.

## 4. 結論

水田表層土の太陽光の透過性について太陽電池を使用し調べた結果，光の到達深さはほぼ 1 mm であった．露光した湛水下の水田表層土を深さ 2 mm ごとの層に分けて全窒素量の分布を調べた結果，全窒素量が 0 ～ 2 mm の層でのみ増加し他の層では変化していなかった．これに対し太陽光を遮蔽した暗黒区ではどの層も全窒素量は増加していなかった.

以上のことから，露光された湛水下の水田表層が窒素固定に重要な役割を果たしているということができる.

## 謝辞

NC アナライザーによる全窒素測定に際し，山形大学農学部・教育研究支援室の高橋拓也氏および岩手大学大学院連合農学研究科の Dina W. Triswanati さんに大変お世話になりました．また，本論文の不十分な諸点をご指摘いただいた査読者の皆様に心から謝意を表します．

## 引用文献

App, A., Santiago, T., Daez, C., Menguito, C., Ventura, W., Tirol, A., Po, J., Watanabe, I., De Datta, S.K. and Roger, P. (1984): Estimation of the nitrogen balance for irrigated rice and the contribution of photosynthetic nitrogen fixation. Field Crop Res., 9: 17–27.

土壌環境分析法編集委員会 (1997): 土壌環境分析法. pp. 226–228, 博友社, 東京.

FAO, ISRIC and ISSS (2006): World Reference Base for Soil Resources 2006. pp. 21–22, FAO, Rome.

Habte, M. and Alexander, M. (1980): Nitrogen fixation by photosynthetic bacteria in lowland rice culture. Appl. Environ. Microbiol., 39: 342–347.

Kobayashi, M., Takahashi, E. and Kawaguchi, K. (1967): Distribution of nitrogen-fixing microorganisms in paddy soils of Southeast Asia. Soil Sci., 104: 113–118.

志賀一一 (1986): 日本の水田土壌の肥沃性. 化学と生物, 24(12): 799–807.

植物栄養実験法編集委員会 (1990): 植物栄養実験法. p. 120, 博友社, 東京.

Topp, G.C., Davis, J.L. and Annan, A.P. (1980): Electromagnetic determination of soil water content: Measurement in coaxial transmission lines. Water Resour. Res., 16: 574–582.

Reginato, R.J. and van Babel, C.H.M. (1965): Soilwater measurement with gamma attenuation. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 28: 721–724.

Yoshida, T., Ancajas, R.R. and Bautista, E.M. (1973): Atmospheric nitrogen fixation by photosynthetic microorganisms in a submerged Philippine soil. Soil Sci. Plant Nutr., 19(2): 117–123.

## 要　　旨

湛水下の水田土では，光合成細菌群による窒素固定が行われていることが知られている．しかし，その深さやどの程度の量の窒素固定が行われているかは明らかにされていない．この報文では，水田表層土における太陽光の到達深さを明らかにするとともに，露光区と暗黒区を設置し湛水土の表層を薄層に分けて一定期間後の全窒素量の分布を調べた．この結果，光の到達深さは約 1 mm であり，露光した湛水下の水田土でのみ 0 ～ 2 mm の深さの全窒素量が増加した．このことから，露光した湛水水田表層では，光がごく表層に限定して到達し，全窒素量はこの光到達深さを含む層内（0 ～ 2 mm）で増大していることを明らかにした．

**キーワード**：湛水田，表層土，光透過性，窒素固定，全窒素量分布