

## 論文の内容の要旨

生物・環境工学専攻

平成 11 年度博士課程 進学

氏 名 藤川 智紀

指導教官名 宮崎 毅

論文題目 微生物活性を考慮した土壌中のガス挙動に関する研究

近年、環境問題として取りざたされている地球温暖化の原因物質として、大気中の温室効果ガス( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$ など)が注目されている。しかし、これまでの研究は、主として大気中でのガス挙動に注目しており、土壌中での挙動や土壌から大気への発生に関しては未だに不明な点が多く残されている。土壌の利用・管理法により、土壌から大気へのガス発生は大きく変化するため、土壌の状態と土壌中のガス挙動の関係を正確に把握することは、地球温暖化抑制のために重要であると考えられる。

本研究では、土壌中のガスのうち、土壌微生物の好気的な呼吸に関する  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$  ガスに注目した。 $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$  ガスは土壌中において、他のガスにより高濃度で存在し、代表的なガスといえる。土壌中での  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$  ガス挙動は、土壌微生物による発生及び消費、濃度勾配に基づく拡散移動、主に  $\text{CO}_2$  ガスの溶解に代表される化学反応に影響を受けると考えられるが、これらの要因の相互作用は明らかではない。中でも微生物活性は、土壌中の  $\text{CO}_2$  ガスの起源であり、ガス濃度の時間・場所による変化に大きな影響を与えると考えられるが、その影響を解明した研究は見あたらない。

そこで、本研究の目的は、土壌中の  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$  ガス挙動における、微生物活性・ガス拡散・ガス溶解の影響を明らかにすることとした。特に土壌中のガスの発生源となる微生物活性に注目し、現場測定・カラム実験・シミュレーションをそれぞれ行った。

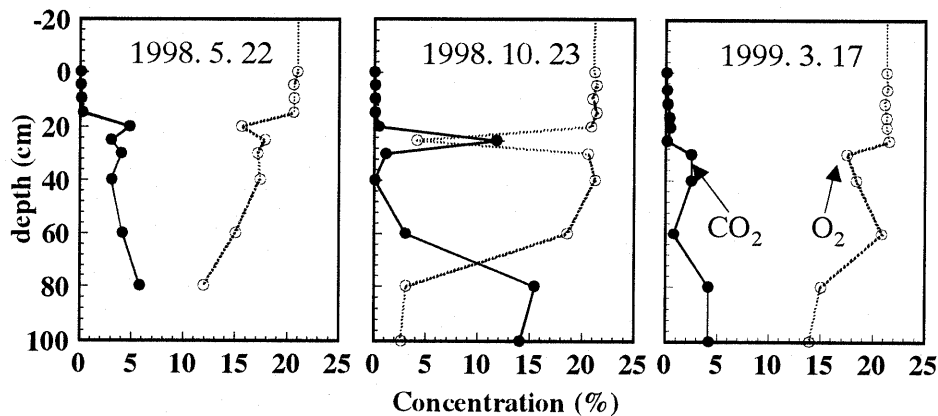


Fig. 1 現場のガス濃度分布  
グラフの中の数字は測定日

現場測定では、圃場の  $\text{CO}_2$ 、 $\text{O}_2$  ガス濃度を測定した。同時に、ガス挙動に影響を与える物理性として、微生物活性に影響を与える土壌微生物数、地温、土壌水分量と、ガス拡散に影響を与えるガス拡散係数を測定した。調査対象は宮崎県都城市の田畑輪換圃場とし、ガス濃度や物理性の季節、作目による変化を調べた。Fig.1 に現場の  $\text{CO}_2$ 、 $\text{O}_2$  ガス濃度分布を示す。土壌中の  $\text{CO}_2$ 、 $\text{O}_2$  ガス濃度は、深さ 0~20cm までは大気中とほぼ同様であったが、耕盤層のある 20cm 近傍で急激に  $\text{CO}_2$  ガス濃度が上昇し、 $\text{O}_2$  ガス濃度が低下した。耕盤層より深い部分では、ガス濃度は大きく変動した。耕盤層における  $\text{CO}_2$  ガス濃度の最高値は 18%、 $\text{O}_2$  ガス濃度の最低値は 3% であった。ガス濃度の測定から、耕盤層がガス濃度分布に影響を与えることが示唆された。各季節のガス濃度の比較からは、深さ 0~20cm の  $\text{CO}_2$ 、 $\text{O}_2$  ガス濃度は、一年を通じて殆ど変化しないのに対して、耕盤層以深のガス濃度は季節により大きく変化することが分かった。特に水田利用後の 1998 年 10 月の圃場では、他の時期に比べて  $\text{CO}_2$  ガス濃度が高く、 $\text{O}_2$  ガス濃度が低くなった。ガス挙動に影響を与える物理性の測定からは、地温、水分量が季節・作目により変化するのに対し、微生物数が一年を通じて殆ど変化しないことが、またガス拡散係数分布は作目によって変化することが明らかになった。これらの物理性の季節変化から、水田利用後の  $\text{CO}_2$  ガス濃度上昇、 $\text{O}_2$  ガス濃度低下の原因は、水分量の増加と地温の上昇による微生物活性の増加及び表層のガス拡散フラックスの低下による  $\text{CO}_2$  ガスの蓄積であると考えられた。また、ガス発生量が 0 になった場合の  $\text{CO}_2$  ガス濃度の時間変化を Fick の法則を用いて計算した結果、計算値が数時間で大きく変化するのに対して、現場でのガス濃度測定値の日変化が小さいことから、微生物からのガス発生とガス拡散がガス濃度に与える影響が大きいことが分かった。

現場測定で指摘された耕盤層(乾燥密度の高い層)がガス濃度分布に与える影響を調べることを目的に、耕盤層を設けたカラム実験を行った。カラム内の  $\text{CO}_2$ 、 $\text{O}_2$  ガス濃度分布を Fig.2 に示す。

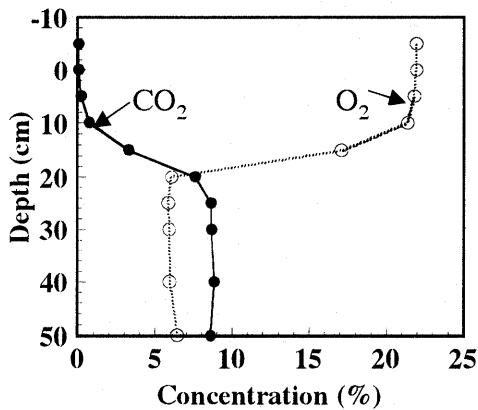


Fig. 2 カラム内のガス濃度分布  
実験開始から32日目

CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>ガスの濃度は、表層0~10cmでは大気と同様であるのに対し、耕盤層の深さ10~25cmで、急激にCO<sub>2</sub>ガス濃度が上昇し、O<sub>2</sub>ガス濃度が低下した。また、耕盤層より深い部分のガス濃度はほぼ一定であった。カラム実験で測定されたガス濃度分布は、表層及び耕盤層では現場のガス濃度分布をよく再現し、耕盤層がガス濃度分布に影響を与えることが明らかになった。しかし、耕盤層以深では、現場のガス濃度が深さ方向に大きく変動するのに対して、カラム実験で測定されたガス濃度はほぼ一定となった。耕盤層より深い部分において現場とカラムのガス濃度分布が異なった原因として、現場における微生物数とガス拡散係数の不均一性及び現場とカラムにおける下方の境界条件の違いが考えられた。土壌水分量の急激な変化が微生物活性とガス拡散およびガス溶解に影響を与えることに注目し、水分量の変化(浸潤)による土壌中のガス濃度の変化を調べた。浸潤によって地上部及び耕盤層以深では、CO<sub>2</sub>ガス濃度が低下、O<sub>2</sub>ガス濃度が上昇したのに対し、表層ではCO<sub>2</sub>ガス濃度が上昇し、O<sub>2</sub>ガス濃度が低下した。給水後のCO<sub>2</sub>ガス濃度の変化は、深さ20cmで最大2.9%、また深さ5cmで最大0.46%となった。浸潤によるガス濃度の変化の原因として、地上部及び表層部では地上部の気相率低下によるガス拡散移動量の減少が、また耕盤層以深では含水量の増加による微生物活性の低下とCO<sub>2</sub>ガス溶解量の増加が考えられた。

土壌中のガス拡散移動に影響を与えるガス拡散係数の測定を行った。既往の研究では、土壌

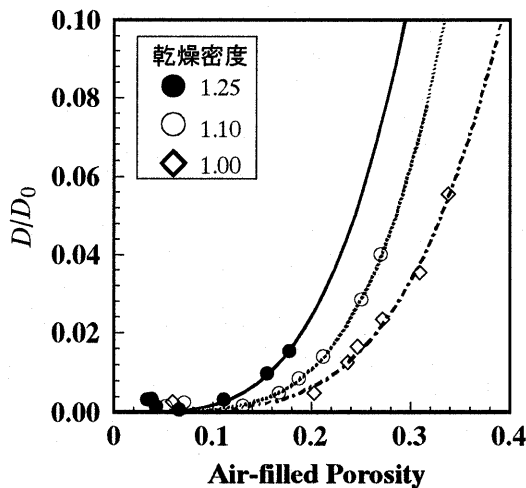


Fig. 3 乾燥密度が拡散係数に与える影響  
曲線は、 $D/D_0 = a \times e^b$  ( $D/D_0$ : 相対拡散係数,  $e$ : 気相率,  $a, b$ : パラメータ)で測定値を近似した曲線

中の相対拡散係数(以下  $D/D_0$ : 土壌中のガス拡散係数を大気中のガス拡散係数で割った値, 1 以下)が、土壌の気相率、乾燥密度、攪乱・不攪乱、土性に影響を受けることが明らかにされているが、これらの要因が同時に比較されたことはない。そこで、様々な試料のガス拡散係数を測定し、 $D/D_0$ に及ぼす乾燥密度、攪乱・不攪乱、ガス種、土性の影響を調べた。実験の結果、乾燥密度に関して、同じ気相率で比べると乾燥密度が大きい方が、 $D/D_0$ が大きく(Fig.3)、気相率と  $D/D_0$ の近似曲線からは、気相率0.2の時に乾燥密

度  $1.25\text{g/cm}^3$  の試料の  $D/D_0$  は  $1.00\text{g/cm}^3$  の試料の約 4 倍になることが推測された。乾燥密度に伴う  $D/D_0$  増加の原因として、乾燥密度の高い試料では、土壌圧縮を受けた際に、拡散移動に関与しない dead space が圧縮され、間隙の拡散効率が上昇することが考えられた。試料の攪乱・不攪乱に関しては、不攪乱試料の  $D/D_0$  が攪乱試料の  $D/D_0$  よりも大きくなったが、これは不攪乱試料の内部に、屈曲度の小さいマクロポアが存在し、その中をガスが優先的に拡散移動したことが原因であると考えられた。ガス種に関しては、溶解度の大きな  $\text{CO}_2$  ガスの  $D/D_0$  が  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$  ガスの  $D/D_0$  に比べ大きくなり、土性に関しては、SL (Sandy Loam) と CL (Clay Loam) の試料では、 $D/D_0$  の違いが表れなかった。

シミュレーションでは、ガス挙動の支配方程式を用いて  $\text{CO}_2$  ガス濃度の時間変化を計算し、カラム実験の実測値と比較した。本研究では、水分移動が平衡に達した場合を仮定し、ガス濃度の計算を行った。初期条件には、カラム実験で水分移動が十分平衡に達した後に測定された  $\text{CO}_2$  ガス濃度 ( $t=0$ ) を用い、72 時間後 ( $t=72$ ) のガス濃度の計算値と測定値を比較した。仮定より、ガス溶解は無視できるため、支配方程式には、微生物活性とガス拡散を含んだ以下の方程式を用いた。

$$\varepsilon \frac{\partial C}{\partial t} = r + D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}$$

$\varepsilon$  は気相率、 $C$  は注目するガスの濃度、 $r$  はガス発生速度、 $D$  はガス拡散係数である。 $\varepsilon$ ,  $D$  にはそれぞれカラム実験、拡散係数測定実験で測定された値を用いた。 $r$  は様々な仮定をおき、値を変化させた。まず、ガス発生がない場合を仮定し、 $\text{CO}_2$  ガス濃度の変化を計算した結果、計算されたガス濃度は測定値と大きく異なり、測定値と比べて耕盤層直上では高い濃度を、耕盤直下では低い濃度を示した。次に、耕盤上下における測定値と計算値の違いを考慮し、表層のガス挙動に 2 種類の仮定をおいて計算した結果、それぞれの計算で、実測値と計算値が良く一致した。仮定 1 では、

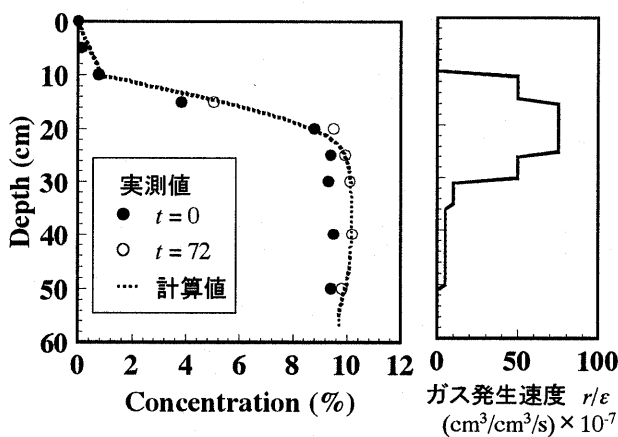


Fig. 4  $\text{CO}_2$  ガス濃度のシミュレーション  
5~10cmに拡散係数の小さい層を仮定  
左: ガス濃度変化の実測値と計算値  
右: 計算に用いたガス発生量分布

耕盤直上に拡散係数の小さい層を仮定し、耕盤直上の拡散係数を測定値の  $1/100$  にして計算を行った (Fig.4)。仮定 2 では、表層部のガス濃度がより大気に近いことを仮定し、表層の  $\text{CO}_2$  ガス濃度計算値に 1 より小さい係数を掛けた。どちらの仮定を用いた場合も、耕盤層で大きな発生速度を仮定することにより、計算結果は測定値と良く一致し、耕盤層のガス発生速度が大きいことが示唆された。