

## 第44回土壌物理学学会シンポジウム総合討論

井上久義\*

### Discussion in the 44th Symposium on Soil Ecosystem and Gases behavior in Soil

Hisayoshi INOUE\*

\* National Agricultural Research Center for Western Region, Ikano-cho 2575,  
 Zentsuji, Kagawa 765-0053, Japan

2002年11月23日に東京大学において開催された第44回土壌物理学学会シンポジウム—土壌生態系とガス環境—における総合討論（座長：加藤英孝 取出伸夫の両氏）の模様を取りまとめたので今後の研究活動の資料として報告する。

#### 座長：

最初の半分は個別の課題についての質疑を行い、後の半分はあるテーマについてみんなで議論するというふうに進めたい。後半の議論のテーマとしては、講演の中でも触れられていたが、水田とか火山灰土などをキーワードとして何か日本固有の問題について議論し、スペシャリストにもコメントをもらっていきたい。

#### 八木氏講演についての質疑

##### 質問：

落水に伴うガス発生メカニズムがよく分からない。また、ガス発生を抑制するための方策について何か提案はないか。

##### 八木：

落水時にメタンの高いピークが出るという現象のメカニズムは非常に単純だ。湛水期間中にメタンが生成され、土壌中はメタンの過飽和状態になっている。その一部は土壌中に気泡として存在すると考えられる。メタンの場合は気相と液相の分配係数が2桁違っている。つまり、気相と液相がある場合、メタンは約100:1の割合で気相に行くことになる。この結果、土壌中気泡内のメタン濃度は非常に高くなり、%オーダーになると言われている。落水時にメタンの高いピークが出るという現象は、このようなメタンを高濃度で含む気泡が大気中に解放される、というメカニズムで生じる。これを抑えることは難しく、その前にメタンを土壌中で生成させないよ

うにすることが重要かと思う。

##### 質問：

土壌ガスの分野でスケールアップの問題がどのようになっているか情報をお持ちなら教えていただきたい。

##### 八木：

非常に大きな問題だ。IPCCの報告書が1990年、1995年そして2001年に1次、2次、3次と出されており、1次と2次には世界の水田からのメタン発生量の推定値が示されている。1次と2次の間で推定値は大きく変わってきているが、2次報告書（1995年）には、そのベストエスティメーションが60 Tg/年（ $10^{12}$ g）、誤差範囲が20~100 Tg（ $\pm 40$  Tg）という数字が示されている。ところが、昨年出された第3次の報告書には新たな数字は示されず、あの研究者はこう言っている、この研究者はこう言っているというような表が示されたにすぎない。つまり、この6年間で研究はほとんど進んでおらず、今だに20~100 Tgという非常に大きな誤差を含んだ値が生きている。これはスケールアップがうまくいっていないことを示している。世界中の色々な水田で色々な研究者がメタン発生量を計測しているが、各水田からの発生量が2桁違ってきている。例えば、日本の火山灰土の水田ではメタンの発生量は非常に低く1シーズン当たり1g以下の数字ととなっている。これに対して非常に肥沃な水田、鉄が溶脱した水田では100gを越える場合が見られ、メタン発生量は2桁以上違ってきている。こうした違いは様々な要因が関わり合って生じてきている。1つは気候条件、2つ目は土壌の理化学性、特に酸化還元に関わる化学性が大きいと言われている。3つ目は有機物管理、水管理といった管理手法の違い、4つ目は水稻の品種、生育などが挙げられる。スケールアップするためにはこうした要因全てを扱い、条件の異なる水田からの

\* 近畿中国四国農業研究センター 〒765-0053 香川県普通寺市生野町 2575

キーワード：土壌ガス環境、温室効果ガス、土壌生態系、ガス移動



写真-1 シンポジウム会場風景

メタン発生量をシミュレートする、予測するという作業が必要となってくる。このためにはきちんとしたモデル的なアプローチが重要であり、これを進めることが現状をブレイクスルーするのに必要であると考えている。

**質問：**

八木さんの資料にはメタン発生が自然湿地では115 Tg/年 (22%)、水田では60 Tg/年 (11%) となっている。我々は湿地を改良して水田を作ってきた。また、最近では水田の一部を湿地に戻そうという動きもある。これをメタン発生という観点から評価するとどのようになるか。今のお話だと発生量のばらつきは非常に大きなものになると思うが、湿地と水田のメタンの発生量の違いはどのようになっているのか。

**八木：**

メタン発生量の違いは有機物の供給量がどの程度違うのかが大きく影響している。湿地での自然植生でヨシやアシの類のように非常にバイオマスの大きな植物が生育するような環境だと有機物の還元量が毎年相当な量になるのでそれをもとに多くのメタンが作られることになると思われる。水田においては食糧生産ということで人為的な有機物の投入の下に毎年米が作られている。窒素やその他の肥料成分も多く投入されているため、一般的に言えば、普通の湿地より水田の方が有機物の供給量が多く、それに伴いメタンの発生も多くなると思われる。

**質問：**

グロースチャンバー等でメタンの発生量を計る場合、再現性というか、同じような条件で計測すると同じような結果となるものなのか。また、続けて2回測定したとすると同じような結果となるものなのか。

**八木：**

メタンの発生は、大きな時間変動、空間変動を持っている。まず、時間変動については、昼間高く夜間に低いという日変動が見られ、温度に依存する変化が見られる。このため、続けて計った場合、例えば、朝の9時に計ったものと、その1時間後の10時に計ったものを比べると、後者の方が気温が高くなるためメタンの発生量

も大きくなる。また、空間変動も大きなものがある。Rolstonさんが以前 $N_2O$ 発生量の空間変動について研究されているが、それによると、小さなチャンバーだと非常に隣接していても発生フラックスが1オーダー違うような結果が得られている。このため、メタン発生量の計測に当たっては、我々は、できるだけ大きなチャンバーを用いるようにし、反復をきっちり取って統計処理をして対象間の違いを出すように心がけている。

**質問：**

そのような配慮をしても、平均を60 Tg/年として±40 Tg/年もの誤差が生じるような結果となるのか。

**八木：**

その通りだ。きちんと統計処理をした結果があのようにになっている。

### 澤本氏講演についての質疑

**質問：**

黒ボク土などの火山灰土の結果をモデルに適用すると大きな誤差が生じてしまい、この場合、保水性や透水性などの物理的な特性を考慮していく必要があるというお話だったと思う。多分、それは水文学的な水循環の影響を受けるためだと私は思うが、モデルに火山灰土を適用するときに透水性や保水性を考慮しなくては行けない理由についてももう少し詳しく説明してもらいたい。また、暗渠排水中や地下水中に温室効果ガスが過飽和で存在していることについて、なぜなのか説明してもらいたい。

**澤本：**

最初の質問について、水文学的循環と言うより top soil のことを考えている。講演では詳しくお話ししなかったが、モデルは0~30 cmの深さを対象としたもので、水文学的循環という大きなスケールではなく top soil という local な場を前提としている。この場において透水性や保水性はその土壌水分変動に直接的に関与し、土壌水分は $N_2O$ 、メタン、 $CO_2$ の発生にダイレクトに関与するということが一般的なもので、それを考慮でき

る方がベターであろうと考えている。2点目の質問だが、 $N_2O$ が地下水や暗渠排水に溶存しているということについては大きく二つのプロセスが考えられる。土壌から大気中に出てくる $N_2O$ のほとんどは表層土中で作られるが、その表層土中で作られた $N_2O$ が土壌水にとけ込みそのまま地下水や暗渠排水まで輸送されるというプロセスと、溶脱された $NO_3^-$ なりが地下水域で $N_2O$ へと変換されるというプロセスが考えられる。これらのプロセスにおいて地下水などへの移動量は暗渠の深さや地下水に至るまでの水みちによって大きく変わってくるため、それが、現象の予測を困難にしている大きな原因の一つとなっている。また、そこで $N_2O$ が過飽和になっているのはそれが抜ける場所がないためで、一旦暗渠排水や湧水として出てくると、過飽和として溶け込んだものが脱ガスによって大気中に解放される。このようなプロセスがindirect emissionと呼ばれている。

### Prof. Rolston 講演についての質疑

#### 質問：

示された式の中に吸着項が見られるが、揮発性有機物の拡散現象に水蒸気吸着がなにかの影響を及ぼしているのか。

#### Rolston：

質問は水蒸気吸着と揮発性有機物の吸着がどのように競合しているかという意味か。この分野における研究は数多くなされているが、この現象についてはこれまでの幾つかの理論で十分に説明し得ると思っている。例えば、水蒸気吸着と揮発性有機物の吸着がどのように競合しているかという問題に対してはBrunauer-Emmett-Teller (BET) 理論が適用できる。一般的に全ての化学物質は水蒸気と吸着競合関係にある。しかしながら、土壌が強く乾燥したような場合には土壌中にair filled poresが増加し、粒子表面は水の数分子層のみが残るようになり、このとき吸着の余裕が大きくなる。またある場合には水分子の吸着が全く見られなくなった部分がパッチ状に生じることがある。こうした状況では揮発性化学物質の吸着が指数関数的に増加することになる。こうした強乾燥条件下での揮発性化学物質の吸着現象、及びそのモデル化については私とDr. Moldrupらとの共著で示してきた。水分子が完全に表面を覆ってしまうような湿潤条件下では、Henry則のような線形分配則が適用されるが、乾燥条件下では、上のように吸着競合について何層の水分子吸着があるのか等を考慮するような別の概念で対処していく必要がある。

#### 質問：

液相での移動の場合、高温域から低温域への移動現象

一いわゆるconvection—がよく見られるが、土壌システム中でのガス移動においてこうしたconvectionの影響はどのように扱っているのか。

#### Rolston：

我々のガス移動に関わる研究では、実験はできるだけ均一な温度条件下で行うようにしており、またそのモデル化に当たっても一様な温度場を前提としており、温度勾配による移動現象—convection—は無視している。そのため、この問題は今回の報告とはまた別の検討課題であるといえる。つまり、水のような液相の移動を扱っている場合には温度によるその体積変化は極めて小さく、それによる影響はほとんど無視しうる。しかしながらガスのような気相の移動を扱うような場合、温度の変化に伴って非常に大きな体積変化を示すため、現象が非常に複雑となる。ガス移動において温度変化によって生じる浮力効果は非常に重要な問題であるが、これまでほとんど研究された例が無く、すぐにでも研究を開始したいと思っている。数年前、Parlangeは土壌中の極めて地表面に近い層での水・熱移動をPhillips-DeVries則で表現しようとする非常に興味深い研究を行っていた。その中では地表面に向かった水蒸気の移動はPhillips-deVries則による予測よりもかなり速く、こうした現象においてはPhillips-deVries則によるものとはまた別のメカニズムが働いているのではないかと結論づけられていた。これは上で述べたものと同様な要因によって生じているものとする。つまり、地表面が熱せられ温度が上昇すると気体は膨張し密度が小さくなる。この結果、密度差による上方への気体の移動、言い換えれば浮力効果によるガス移動が生じることになる。今回の報告では、密度が大きなガスの下方への移動については触れたが、温度変化によるガス移動への影響も重要な課題であり、今後研究を進めていく必要があるものと思われる。

#### 質問：

報告中の式にslip velocityの項があるが、どのような場合にこれを考慮するのか。我々は、物質の移動を扱うとき、多くの場合Fickの拡散則を基礎にしているもの考えるが、このslip velocityについて説明してもらいたい。

#### Rolston：

言われるとおりの我々のほとんどは物質の移動を扱うときには濃度勾配に基づく拡散、Fickの拡散をその中心的なプロセスとして扱う。私は現在、大きな分子量を持つ揮発性有機物を対象としその特異な挙動について研究を行っているが、それ以前は私もFickの拡散則を物質移動の中心的プロセスとして取り扱ってきた。揮発性有機物は分子量が大きく、拡散係数も $O_2$ や $CO_2$ 、 $N_2$ 等と

いう通常ガスの拡散係数と大きく違っている。このため両者の分子フラックスの間には非常に大きな差が生じ、こうした場合に slip velocity がガス移動に大きな影響を与えることになる。多くの研究では  $O_2$  や  $CO_2$ ,  $N_2$ ,  $O$  等を扱っているが、この場合には slip velocity は無視しても構わない。ただ、メタンを扱う場合には注意が必要だ。メタンは軽いガスだが、拡散係数が通常ガスと大きく異なるため、その移動には slip velocity の影響が大きく表れるものと考えられる。ガスの移動は圧力勾配や重力など多くの要因によって生じており、当然のことながら slip velocity が全てを決定するわけではなく、この影響は多くの要因の内の一つに過ぎない。ただ、重力項については空気と大差のないガスを使っている限りにおいては無視されることが多い。最後に、ガス濃度が低い場合には、slip velocity はそれほど大きな影響を与えないものと考えられる。つまり、分子量や拡散係数の値が空気と大きく異なるガスの濃度が高い場合にのみ slip velocity は大きな影響を与えるものと言える。

#### Dr. Moldrup 講演についての質疑

##### 質問：

ガス移動で通気係数と拡散係数の違いは何かと考えている。ご講演の図から判断すると拡散係数は含水量によっているものと考えられ、通気係数はさらにそれに加えて孔隙の連続性などの要素が絡んでくるものと思われるのだが、お考えをお聞かせ願いたい。

##### Moldrup：

まさにその通りだ。ガスの移動を扱う場合においても大きな孔隙の連続性や伝達性を表しうる何かの構造的なパラメータが必要となる。拡散においては現象が非常にゆっくりと進むため、排水され空気で満たされた孔隙の全てがその対象となる。一方、移流の場合は、拡散とは異なり、ある一方向への比較的迅速な移動現象であり、空気の含有率（または含水率）の他に孔隙径の分布及びその連続性に大きな影響を受けることになる。圧力勾配がある時に物質の移流が生じるが、このとき土壌系内の孔隙径が大きい場合、ある種の選択流のようなものが生じる。つまり、系内に大きな孔隙がありそれが連続しているような場合には、通気係数は飛躍的に大きくなる。現段階ではこれをうまく表現することはできず、今後こうした連続性をうまく表現しうる概念を追究していく必要がある。

##### 質問：

御報告では圃場用水量として pF2.0 が使用されている。日本ではこれまで、通常、pF1.8 の値を使用してきた。両者間にはさほど大きな差はないと思うがなぜ

pF2.0 を使用したかお聞かせ願いたい。

##### Moldrup：

幾つかの理由はあるが、ヨーロッパ、特にデンマークでは伝統的に圃場用水量に相当する値として pF2.0 を用いてきたため、特段深く考えずその値を用いた。

##### 質問：

研究の対象として日本の Andisols が用いられている。この Andisols に関する基本的なデータの多くは pF 1.8 が用いられており、結果を適切に比較するためには pF1.8 を用いた方がいいように思う。しかしながら pF 1.8 と pF2.0 の間の排水量はごくわずかで、実際問題としてはほとんど差はないと思われるが。

##### Moldrup：

以前、私も両者の違いについて調べたことがあるが、pF1.8 を使った場合と pF2.0 を使用した場合の間には顕著な差は認められなかった。しかしながら、空気が侵入して生じる air-filled pore の始まりを一体どの値からすればいいのかということが大きな問題となる。試料排水に伴う連続した air-filled pore の形成は、おそらく一般的には 50 cmH<sub>2</sub>O でも 100 cmH<sub>2</sub>O と同様に十分だと思う。しかしながら、デンマークのある種の土壌においては 50 cmH<sub>2</sub>O では十分な連続性が得られず、的確な結果が得られなかった場合が見られた。また、同様にデンマークでは降雨後数日経って計測した場合、pF2.0 となっていた場合も見られた。これらから私は、デンマークの土壌を扱う場合には、pF2.0 の値を用いるようにしている。

#### 藤川氏講演についての質疑

##### 質問：

耕盤が境界領域となっており、それを境として現象に差があることがよく理解できた。データから耕盤が確かにできているということは分かるのだが、深さが 20 cm というのはかなり深いのではないか。実際そんなにあると作業上大変になる。そこでこの場合、作物の生育に影響があったのか、また耕盤の上と下では根の分布がどうであったのか教えていただきたい。

##### 藤川：

耕盤層の存在位置が深さ 20~40 cm であり、実際の水田と比べるとかなり深いと思う。しかし、対象圃場は田畑輪換を行っており水田としての耕盤だけでなく、機械走行等に伴う畑作時の硬盤も含まれており多少深くなっている。しかしながら、この深い耕盤の作物生育への影響はほとんど見られなかった。この圃場はもともと作物生育が良く収量が非常に高い圃場である。この圃場でなぜ生育が良いのか、その原因を微生物やガス濃度の観点

から調べることができないか、ということがこの研究の出発点だった。深層のガス濃度は、今までにないほどCO<sub>2</sub>濃度が高く、一方O<sub>2</sub>濃度が5%を切るような状態が見られ、非常に強い還元状態になっている可能性もあり作物への影響も懸念されたが、今のところその影響は表れていない。根の分布については、水稻の場合耕盤層を通して深さ数十cmまで根の分布が認められた。先ほどの報告ではこうした根穴を通してのメタンの上方への移動について触れたが、こうした根穴のようなマクロポアを通してガスが下方へと移動することも考えられる。ガス移動の拡散係数が不攪乱土壌では通常大きくなることも知られており、こうしたプロセスでのガス移動についても検討する必要があると思われる。

**質問：**

水稻以外はどうか。水稻以外の作物で問題がなければ深さ20cmに耕盤があっても問題はないと私は考える。

**藤川：**

他の作物にも影響は見られず、むしろ良いくらいだと言われている。今回、畑状態で三相分布を示したが、水田後では耕盤層前後で気相率が非常に小さくなってしまっていた。このときに、水管理や土壌管理または機械作業などを間違えると湿害となり、酸素濃度の低下を招くため注意が必要だが、今のところは問題は生じていない。

**座長：**

日本には諸外国と異なり非常に多くの水田が分布し、また、同様に諸外国とは異なり Andisols という火山灰土が広く広がっている。この中でガスの移動に関する研究が、その発生メカニズムから八木さんの御報告のような地域レベルでの発生量の推定まで幅広く行われている。ここで海外から来られた特別ゲストのお二方に、日本で行われている研究に関して何かコメントがあれば伺いたい。

**Rolston：**

確かに司会者が言われるように日本には水田が広がっており、これを対象とすることによって、我々がやっている研究とはまた異なった現象のプロセスを研究することが可能となっている。また、Andisolsは、Dr. Moldrupも明確に述べているように、ガス移動に関わる物理学についてもっと良く知るのに役立つプロセスやメカニズムを研究する機会を与えてくれている。私もその一端について報告させてもらったが、土壌から大気等へのガス放出に関わる問題は我々が持っている拡散等の知識のみでは単純に説明できない場合がしばしば見られ

る。それは土壌中から大気等へのガス移動に関わるメインプロセスとして我々は拡散を仮定してしまっているため、今は、この現象に関して他のプロセスについても考えを巡らせるべき時期に来ているものと考えられる。ガスの移動についてその駆動力となる圧力勾配の形成については、大気圧や風そして以前私が取り扱ったような雨や灌漑水の浸潤など種々の要因について非常に優れた研究が進められ既に30~40年が経過してしまっている。これらの中には圃場に設置しうる計測器で当時としては十分に測定し得ない項目もあったと思われる。しかしながら、現在ではテクノロジーも進歩しており、それをうまく利用して拡散だけではなくそれに続く移動現象を引き起こす他のプロセスについて検討すべき段階に入っていくべき時期だと思っている。そうすることによって、チャンバーでのガスフラックスの測定やもっと大きなスケールでの気象学的な移動現象を取り扱う場合によく見られる変則的な移動現象を説明するのに有用な情報が得られるのではないかと考えている。実際の土壌やフィールドでガスが一体どう移動しているのか分からない、我々の理解を超えるような現象を説明するのに役立つのではないかと考えている。先ほども言ったが、Andisolsはこれまでとは違った側面から現象を扱うのに非常に適した素材である。というのは、この土のように非常に低い乾燥密度と非常に高い孔隙率を持つ素材を対象とする場合、これまで水分率の高い粘土を対象として実験していたためその影響が無視されてきた風や大気圧変化などの種々の影響が非常にクローズアップされて現れてくるものと考えられる。そこで、何度も言うようであるが、Andisolsという日本の土壌を対象として研究することによって、これまでのガス移動に関わる知識を超えるような新たな側面が見えてくるのではないかと期待している。さらに、ここでも報告されていたような、あるスケールでの温室効果ガスの発生を予測するような実際的な問題を取り扱うような場合にも同様なことが言え、より良い予測を得るためには、これまで無視されることが多かった異なるメカニズムを考慮しなければならない場面も出て来るであろう。そして、さらにこの予測に関しては、重要な問題として scaling の問題が出てくる。この会場でも幾つかの質問が出ていたが、予測の関してスケールを local なレベルから圃場レベル、流域レベル、地域レベルと拡大していくことは、世界中のどこであっても今日の重要なチャレンジであるといえる。土壌科学者や地理学者の多くは、我々が通常行うレベルでの測定結果をどのように大きなレベルまで拡大していくのか現在大いに頭を悩ませている。こうした場合、スケールアップするためにはモデルを利用することが極めて有用であり、今日、日本

におけるこのシンポジウムにおいて土壌からの温室効果ガスの発生に関する種々のモデルに触れることができ、またそれに関する種々の議論を聞くことができたことは、私にとっての大きな喜びである。繰り返すが、現場での結果をスケールアップするために適切なモデルを考案するという事は極めて重要な手段であると私は考えている。そしてモデル化に当たっては、より忠実に実際の現象を再現できるモデル、圃場における土壌中に見られる変動性をうまく表現できるモデルを考案することが必要になってくる。圃場でのガス移動を取り扱っている研究者にとって、水や溶質のフラックスの変動性に比べてガスフラックスの変動性が遙かに大きいということは周知のことと思われるが、より大きなスケールへと拡大していくときにこの大きな変動特性をどのように扱っていくかということも、今後の重要な検討課題になるものと考えている。

**Moldrup :**

これまで日本の多くの研究所や大学を訪れて、数多くの優れた土壌空気や水の移動に関わる研究に接してきた。私は、土壌の基本的な物理的特性についての研究を行っているが、日本の研究者はこうした面で非常に恵まれていると感じている。というのは、日本では、例えば

鳥取砂丘の砂土から通常の水田に見られる粘質土そして関東ロームと極めて特性の異なる種々の土壌を取り扱うことができ、我々の知識を確認しうる重要な試験を行うことができるからだ。そして、鳥取砂丘の砂土や関東ロームを用いて現象を単純化してモデル化することによって、非常によいモデルができるのではないかと考えている。私は、これまでに移動現象に関わる多くのパラメータについての優れた多くの研究を見てきた。例えば、ガス拡散係数、通気係数、溶質の拡散係数、不飽和透水係数、伝熱係数、熱拡散係数、電気伝導度等々がある。もしこれらの諸パラメータが同じ種類の土壌、同じ土壌で計測することが可能ならば、それは非常に興味深いことであり、多孔体としての土壌における移動現象を理解する上での大きな進歩をもたらすであろうと考えている。このほか、封入された空気の水やガス移動に与える影響、水、空気二相系での移動現象も今後の重要な課題であろうと思う。最後に繰り返すが、もう既に行われているとは思いますが、同じ土壌で種々パラメータが計測されると言うことは非常に重要であり、今後とも精力的に行われんことを強く望んでいる。

受稿年月日：2003年9月5日

受理年月日：2003年9月5日