

<報告>

## 志賀高原カヤの平ブナ林における炭素循環モニタリング

### I. 時空間的に不均一な土壌呼吸量の測定法の検討

廣田充<sup>\*1</sup>・八代裕一郎<sup>2</sup>・飯村康夫<sup>2</sup>・志津庸子<sup>2</sup>・大塚俊之<sup>2</sup>・井田秀行<sup>3</sup>

**Carbon dynamics monitoring in an old-growth beech forest in central Japan I. Practical methods for soil respiration and its spatio-temporal variation.** Mitsuru HIROTA<sup>\*1</sup>, Yuichiro YASHIRO<sup>2</sup>, Yasuo IMURA<sup>2</sup>, Yoko SHIZU<sup>2</sup>, Toshiyuki OHTSUKA<sup>2</sup> and Hideyuki IDA<sup>3</sup> (<sup>1</sup>Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba, 1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8572, Japan \*E-mail: hirota@biol.tsukuba.ac.jp, <sup>2</sup>River Basin Research Center, Gifu University, 1-1 Yanagido, Gifu, Gifu 501-1193, Japan, <sup>3</sup>Institute of Nature Education in Shiga Heights, Faculty of Education, Shinshu University, Shigakogen, Yamanouchi-machi, Nagano 381-0401, Japan. \*E-mail: hirota@biol.tsukuba.ac.jp). *Bulletin, of the Institute of Nature Education in Shiga Heights, Shinshu University* 48: 9-14 (2011)

#### はじめに

##### 森林の炭素循環における遷移の役割

森林生態系全体には陸域の3分の2に相当する有機炭素が蓄積しているとされており (IPCC 2007), 地球規模の炭素収支において極めて重要な役割を担っている。また, 様々な条件によって森林生態系は大気CO<sub>2</sub>の吸収源にも放出源にもなることから, 大気CO<sub>2</sub>濃度の上昇と密接に関わる地球温暖化にも多大な影響を及ぼす可能性が高い。よって, 森林生態系の炭素循環の高精度な評価とその変動メカニズムの理解が重要であり, 日本のみならず世界各国で森林生態系の炭素循環研究が精力的に行われている (Pregitzer & Euskirchen 2004; Ohtsuka *et al.* 2009)。

これまでの多くの研究によって, 森林生態系の炭素循環は, 優占種の入替わりを伴う一定方向の植生変化, すなわち遷移にもなって変化することが分かっている (Odum 1969; Pregitzer & Euskirchen 2004)。その結果, 遷移初期から遷移途中にかけての森林はCO<sub>2</sub>の吸収源であるが, 徐々にその吸収能力が小さくなり, 最終的に極相林に達すると吸収源としての機能が無くなるとされている (Odum 1969; Gower *et al.* 1996; 2003)。このような背景もあり, CO<sub>2</sub>の吸収という面では, 極相林は評価対象

外となっている (IPCC 2007)。しかし最近の研究によって, 極相林も依然としてCO<sub>2</sub>を吸収するといった報告が相次いでいる (Luyssaert *et al.* 2008; Lewis *et al.* 2009)。もしこれらが正しいとすると, 極相林のみならず陸域に存在する森林生態系全体の炭素収支が変わることになり, 地球規模の炭素収支における森林生態系の役割も全面的に見直す必要があるだろう。したがって, 今日の陸域の炭素循環研究において, 遷移にともなう森林生態系の炭素循環の変化パターンはもちろん, 極相林の炭素循環を明らかにすることが急務となっている。

#### 3 大学間連携事業における炭素循環研究の概要

2010年から始まった筑波大学, 信州大学, 岐阜大学の3大学による中部山岳地域を対象とした大学間連携事業 (Japanese Alps Inter-University Cooperative Project) は, 中部山岳地域の環境変動とその影響予測と当該地域が有する様々な機能を評価しようとするものである (<http://jalps.suiri.tsukuba.ac.jp/>)。中でも, 森林の占有率が約8割と極めて高い中部山岳地域においては, 森林生態系の炭素循環の把握は大きな柱の一つとなっている。当該地域には, 低標高域から高標高域まで, 遷移段階の異なる様々な森林生態系が存在するので, 地域全体の森林生態系の炭素循環を把握するには, 遷移にともなう炭素循環の変化パターンの理解が不可欠である。そこで我々は, 遷移段階の異なる様々な森林生態系において炭素循環研究を実施することにした。本事業における炭素循環研究のロードマップは以下のよ

<sup>1</sup> 筑波大学生命環境科学研究科持続環境学専攻 (〒305-8572 茨城県つくば市天王台1-1-1 \*e-mail: hirota@biol.tsukuba.ac.jp)

<sup>2</sup> 岐阜大学流域圏科学研究センター

<sup>3</sup> 信州大学教育学部附属志賀自然教育研究施設

うになっている。

- ① 炭素循環を推定するうえで不可欠な調査・観測方法の検討および統一化
- ② 炭素循環に関する調査を行う森林サイトの選定
- ③ 選定された森林サイトにおける炭素循環に関する項目の一斉モニタリング
- ④ 衛星画像と実際の観測データを用いた中部山岳地域の森林全体の炭素循環の広域推定

本稿では、観測手法が統一していない土壌呼吸に焦点を絞り、2010年に行った土壌呼吸量の測定手法の検討と知見の少ない極相林（志賀高原カヤノ平ブナ林）での土壌呼吸の特性について報告する。

### 土壌呼吸とその測定法

土壌呼吸 (soil respiration) は、独立栄養生物の地下部の呼吸量と土壌微生物 (従属栄養生物) の呼吸を足したものを指す (莫&関川 2005)。陸上生態系からの総土壌呼吸量は年間  $77 \times 10^{15} \text{gC}$  にも達し、植物の純一次生産量 (NPP) をも上回るとされている (Raich & Schlesinger 1992)。また、森林生態系全体からの  $\text{CO}_2$  放出量の 60~80% にも達するという報告もあるが (Valentini *et al.* 2000)、正確な見積もりには至っていない。その主な理由として、時間的・空間的変動が極めて大きいことと (Davidson *et al.* 1998; Xu & Qi 2001; Keith & Wong 2006; Webster *et al.* 2008) および測定方法によって値が大きく異なること (Bekku *et al.* 1997; 木

部&鞠子 2004; Keith & Wong 2009) が挙げられている。このような特徴を有する土壌呼吸量を正確に見積もるには、測定手法を統一したうえで土壌呼吸の時間的・空間的変動の把握が重要である。

そこで我々は、対象とする森林生態系における土壌呼吸の時間的・空間的変動を把握するために、チャンバーを用いた二つの異なる測定方法を併用することにした。一つは、自動開閉システムと赤外線  $\text{CO}_2$  分析計を用いた密閉法であり、この方法によって土壌呼吸の時間的変動を把握する。もう一つは、ソーダライムを用いたアルカリ吸収法であり、この方法によって土壌呼吸の空間的変動を把握する。以下に二つの方法について概説する。

#### <自動開閉システムと $\text{CO}_2$ 分析計を用いた密閉法>

土壌呼吸速度の時間的変動を把握するために、自動開閉システムと  $\text{CO}_2$  分析計を併用した連続土壌呼吸測定装置を開発した。これは土壌表面に密閉出来る円筒 (チャンバー) を設置し、チャンバー内の  $\text{CO}_2$  濃度の変化速度から土壌呼吸速度を算出するという密閉法方式を採用したシステムであり、チャンバーの上部を一定時間ごとに開閉させることで、連続的に土壌呼吸速度を測定する仕組みである (図 1)。密閉法自体は、古くから用いられている測定法で、土壌表面への攪乱やチャンバー内の気圧の変化がない限り最も精度の高い測定法である。今回製作したのは、3つのチャンバー (直径30cm x 高さ20cm) を順番に測定していく連続測定システムで

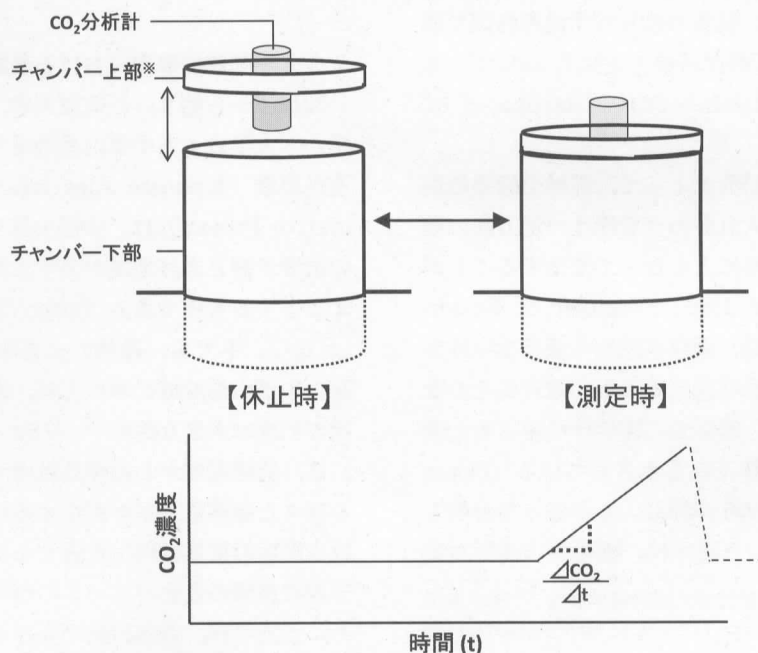


図 1. 自動開閉システムによる密閉法と得られるデータのイメージ

※ プログラム制御により、開閉時間が設定出来る (現在は5分おきに測定するようにしている)

ある。チャンバー下部の筒は、あらかじめ土壌表面から5 cm ほど埋設しておく。チャンバー上部に非分散型赤外線吸収型 (NDIR)  $\text{CO}_2$  分析計 (GMP343, Vaisala Oyj, Finland) を取り付け、 $\text{CO}_2$  分析計および同時に設置してある温度計や土壌水分計のデータは、一定時間ごとに (今回は5 秒毎) 全て小型データロガー (Thermic2300A, ETO-Denki, Tokyo) に記録する仕組みになっている。現在は、小型の車載バッテリーで約2 日間の連続測定が可能であるが、この運用時間をのばすことが今後の課題である。

図2 に、開発した自動開閉システムを用いて実際の現場 (岐阜県高山市のスギ林) において土壌呼吸を測定した結果の一例を示す。異なる2 地点の土壌呼吸は、いずれも土壌温度の変化と密接に連動して変化していること、さらに土壌温度の上昇から少し遅れて変化していることが分かる。さらに、この2 地点は1 m 程度しか離れていないのに関わらず、その値は大きく異なることが分かった。今後は、このシステムを用いることで土壌呼吸速度の日変化と季節変化の把握を行う予定である。

#### <ソーダライムを用いたアルカリ吸収法>

アルカリ吸収法も、密閉状態にしたチャンバー内の  $\text{CO}_2$  濃度の変化速度から、土壌呼吸速度を算出する方法であり、その点では1) と同じである。アル

カリ吸収法の場合は、絶乾させて秤量した (この時の重量を  $W_i$  とする) 後に霧吹き等で水をかけたソーダライム (soda lime) を一定時間チャンバー内に置き、一定時間 ( $t$ ) 後に回収し、再び絶乾させてから秤量する (この時の重量を  $W_{i+t}$  とする)。ソーダライムの重量増加分 ( $W_{i+t} - W_i$ ) を時間 ( $t$ ) で除した値が、土壌呼吸速度となる (木部 & 鞠子 2004; Keith & Wong 2006)。アルカリ吸収法の利点は、簡便で測定に必要な機材等もほとんどなく、かつ安価であることから多点で同時に測定することが出来ることだ。このため、測定対象が広域に及ぶ場合などに多用されている (Keith & Wong 2006)。一方で、アルカリの化学的特性から  $\text{CO}_2$  を過剰に吸収してしまい、結果的に土壌呼吸速度を過大評価してしまう可能性も指摘されている (Bekku *et al.* 1997)。

本研究では、広域な対象地域 (1 ha) の土壌呼吸速度の空間不均一性を把握するためにアルカリ吸収法を用いたが、アルカリ吸収法によって算出される土壌呼吸速度を検討するために、同じ土壌を用いて1) の方法で得た測定値と2) の方法で得た測定値を比較する実験を事前に行った。その比較実験の結果を図3 に示す。これまでの比較実験 (Bekku *et al.* 1997) と同様に、アルカリ吸収法で測定した場合、土壌呼吸速度は過大評価される傾向を示した。しかし、二つの方法で得た土壌呼吸速度には有意な

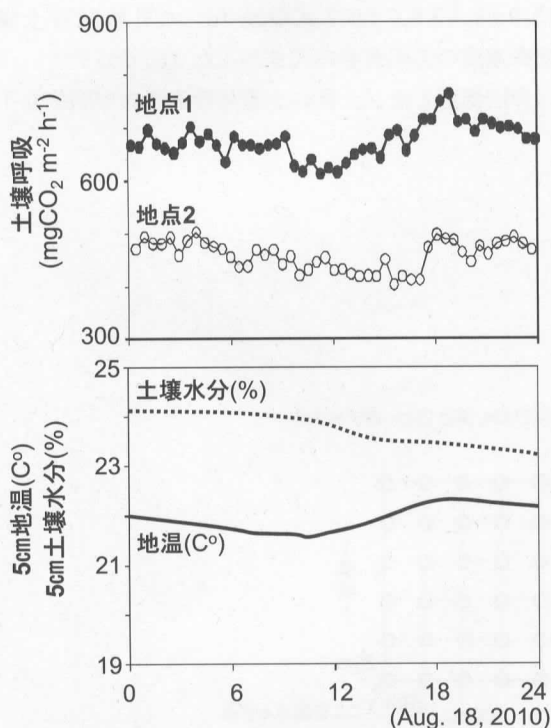


図2. 自動開閉システムを用いた土壌呼吸速度の実測例 (八代ら, 未発表データを含む)。

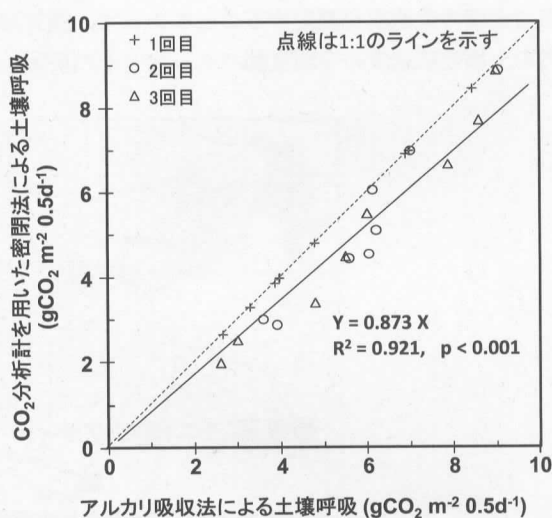


図3.  $\text{CO}_2$  分析計を用いた密閉法とアルカリ吸収法による土壌呼吸速度の比較

温度一定にした培養室内に入れた土壌を用いて同一の地点を通気法とアルカリ吸収法で交互に0.5日ずつ測定し、それぞれの測定値を比較した。比較実験は、筑波大学菅平実験センターの培養器を用いて2008年10月から11月にかけて3回 (各  $n=8$ ) 行った。

一定の相関がみられたことから（アルカリ吸収法による土壌呼吸速度 $=0.87 \times$  密閉法による土壌呼吸速度,  $R^2=0.92$ ,  $p<0.001$ ), 事前にこの相関を把握することで, アルカリ吸収法による土壌呼吸速度の過大評価という問題はクリアできる。今後は, 実際の現場においてアルカリ吸収法による土壌呼吸速度の過大評価の程度を検証してから, アルカリ吸収法によって土壌呼吸速度の空間変動を把握していく予定である。

### 調査地

調査は, 2005年に信州大学教育学部附属志賀自然教育研究施設カヤノ平分施設（カヤの平自然教育園）内に環境省「モニタリングサイト1000」のコアサイト（カヤの平ブナ林）として設置された長期モニタリング用の調査地（1 ha）で行った（図4）。カヤの平ブナ林は, 冷温帯の主な極相種であるブナ（*Fagus crenata* Blume）が優占する極相林（樹齢300～500齢, 廣田ら未発表データ）である。ここでは同自然教育研究施設のスタッフの指導のもとで2005年から毎年, 植生概況調査, 毎木調査, 落葉落枝量調査, ピットフォールを用いた徘徊性甲虫類調査, 陸生鳥類調査等が行われている（<http://www.biodic.go.jp/moni1000/monitoring/index.html>）。2010年6月に調査地内に格子状に設置してある10mごとの目印を参考にして, 20mごとに合計36個のチャンバーを設置した（図4）。この36地点で土壌呼吸速度を測定することによって, 調査地内の土壌呼吸速度の空間変動パターンとその要因に

ついて検討した。

### 方法

2010年7月7日から8日にかけて, 前述したアルカリ吸収法を用いて36地点の土壌呼吸速度の同時測定を行った。まず実験室内において, 乾燥機（105°C, 24時間）で絶乾させたソーダライム（二酸化炭素吸収用, 和光純薬工業（株））を小型のプラスチック容器に5 gずつ分取した後に密閉した。次に, 測定直前にこの容器を開けて霧吹きで1 ml程度の水を吹きかけたものをチャンパー内に静置し土壌呼吸チャンパーを密閉した。静置した時間を記録し, 約24時間後に再び回収し, 実験室内にて絶乾させたのちに精密はかりで再び秤量し, 重量増加分を静置した時間あたりの土壌呼吸速度とした。

### 結果と考察

図5に, 2010年7月に測定した調査地（1 ha）における土壌呼吸速度の測定結果を示す。土壌呼吸速度は, 一地点で非常に高く（ $17.2 \text{ gCO}_2\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ ）, すぐその隣の地点で最低値（ $7.0 \text{ gCO}_2\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ ）を示すといった不規則な空間不均一性を示した。36地点の平均値は $10.8 \text{ gCO}_2\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ , 測定値のバラツキを示す変動係数（CV）は0.16であった。また, 優占種であるブナの植生状況から推定したブナの更新区とギャップにおける土壌呼吸速度は, それぞれ $13.9 \pm 1.8$ と $9.7 \pm 0.7 \text{ gCO}_2\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ で更新区の土壌呼吸速度の方が有意に大きかった（図6）。

今回測定したブナ林の土壌呼吸速度の空間的な不

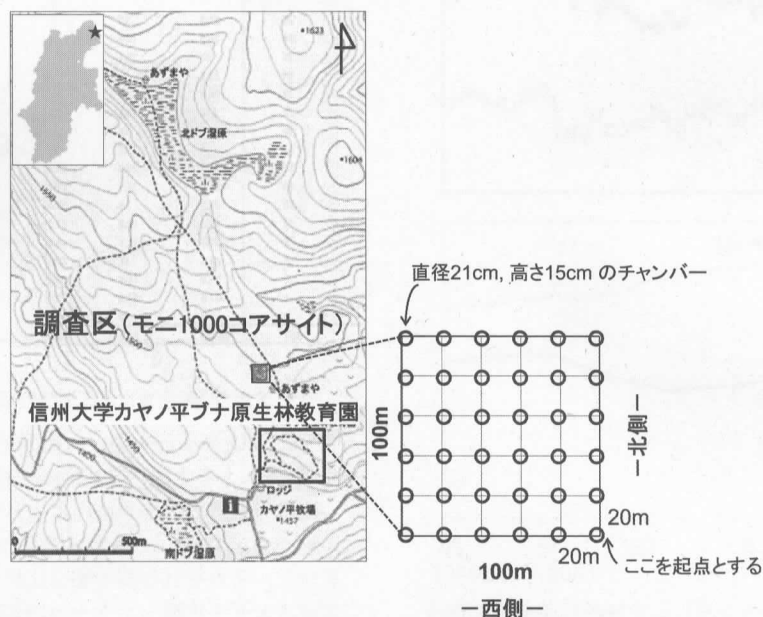


図4. 調査地と土壌呼吸速度の測定地点



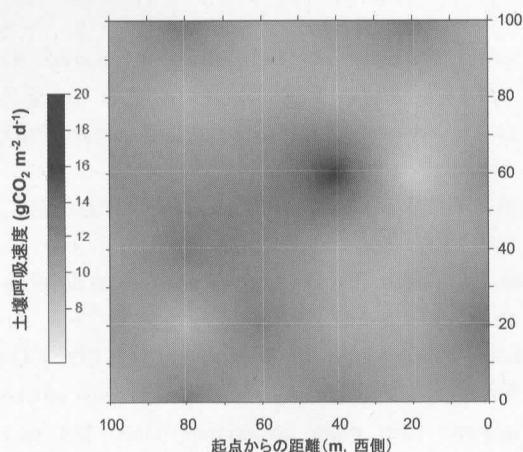


図5. 調査地内の土壌呼吸速度の空間不均一性

均一性 (CV) について、2008年7月に上田市菅平高原の二つの森林（アカマツ林とアカマツ・ミズナラ混交林）で行った同様の測定結果（それぞれ0.38と0.32）と比較すると、ブナ林の土壌呼吸速度の空間的な不均一性は比較的小さい可能性がある。一方、更新区とギャップの両場所間で土壌呼吸速度が大きく異なったことから（図6）、優占種であるブナの密度や分布形式が土壌呼吸速度に大きな影響を与えている可能性が高い。ただし、優占種であるブナの分布は、下層木（ここではノリウツギやテツカエデなど）や林床植生であるクマイザサの分布にも密接に関わっており、優占種だけでなくこれらの植生も含めた植生構造と土壌呼吸速度との関係を検討していく必要がある。さらに、同調査地はほぼ平坦な地形上にあるが、ところどころ凹凸（高低差1 m程度）があり、へこんだ場所は水たまりになることもある。土壌中での植物の呼吸と好氣的呼吸によって生成されるCO<sub>2</sub>は、温度だけでなく土壌水分の影響を受けやすく（Davidson *et al.* 1998; Xu & Qi 2001; Kan *et al.* 2003; Webster *et al.* 2008）、特に日本のような多雨多湿な環境下では、土壌水分が高くなると土壌呼吸速度が低下するという報告もある（Lee *et al.* 2002）。今後は、植生と合わせて微地形および地下水位等の空間不均一性を把握し、土壌呼吸速度の空間不均一性との関係を明らかにしていく予定である。

土壌呼吸は、森林生態系の炭素循環の中でも空間不均一性が特に大きいフラックスであり（Jia *et al.* 2003; Keith & Wong 2006）、森林生態系の炭素循環の不正確さの要因にもなっている。したがって、本研究で示したように土壌呼吸速度の空間不均一性の把握は、一定面積あたりの土壌呼吸速度を精度良く推定するうえで不可欠であろう。さらに、植生構

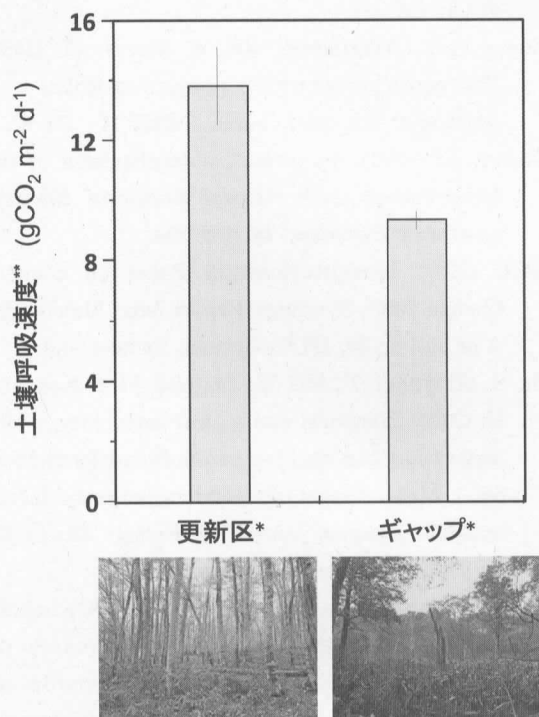


図6. 調査地内の更新区とギャップの土壌呼吸の比較

\* 調査地の植生概況と胸高直径20cmのデータ（2010年調査結果、井田ら未発表）から、ギャップと更新区（胸高直径が10cm以下のブナが多い場所）を推定した。棒グラフ下の写真は、調査地内にある代表的な更新区とギャップの様子。

\*\*それぞれの場所に含まれた土壌呼吸速度の平均値（更新区n=12、ギャップ：n=10）。

造やその他の環境要因との関係を調べることは、土壌呼吸速度の空間不均一性を生み出すメカニズム解明の一助になる可能性が高く、今後も注目していくべきであろう。本研究によって、時間的・空間的な変動が大きいとされる土壌呼吸速度を精度良く定量化する方法を確立することできた。今後は、本研究で提案した二つの方法を併用して土壌呼吸速度を定量化すると同時に、炭素循環に関する他の項目（樹木成長量、枯死脱落量、枯死木の分解量等）を調査することで、冷温帯の代表的な極相林であるカヤの平ブナ林の炭素循環を明らかにする予定である。

## 引用文献

- Bekku, Y., Koizumi, H., Oikawa, T. & Iwaki, H. (1997) Examination of four methods for measuring soil respiration. *Applied Soil Ecology* 5: 247-254.
- Davidson, EA., Belk E. & Boone, RD. (1998) Soil water content and temperature as independent or confounded controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest. *Global Change Biol.*

- ogy 4: 217-227.
- Gower, ST., McMurtrie, RE. & Murty, D. (1996) Aboveground net primary production decline with stand age: potential causes. *TREE* 11: 378-82.
- Gower, ST. (2003) Patterns and mechanisms of the forest carbon cycle. *Annual Review of Environment and Resources*, 28: 169-204.
- IPCC (2007) Intergovernmental Panel on Climate Change 2007; Synthesis Report (eds. Abdelkader A et al.), pp 30, IPCC, Geneva, Switzerland.
- Jia, S., Akiyama, T., Mo, W., Inatomi, M. & Koizumi, H. (2003) Temporal and spatial variability of soil respiration in a cool temperate broad-leaved forest. 1. Measurement of spatial variance and factor analysis. *Japanese Journal of Ecology* 53: 13-22. (in Japanese with English abstract)
- Kang, S., Doh, S., Lee, D., Lee, D., Jin, VL. & Kimball, JS. (2003) Topographic and climatic controls on soil respiration in six temperate mixed-hardwood forest slopes, Korea. *Global Change Biology* 9: 1427-1437.
- Keith, W. & Wong, SC. (2006) Measurement of soil CO<sub>2</sub> efflux using soda lime absorption: both quantitative and reliable. *Soil Biology & Biochemistry* 38: 1121-1131.
- 木部剛, 鞠子茂 (2004) 土壌呼吸の測定と炭素循環. 地球環境 9 (2): 203-212.
- Lewis, SL., Lopez-Gonzalez, G., Sonke, B., Affum-Baffoe, K., Baker, TR., Ojo, LO., Phillips, OL., Reitsma, JM., White, L., Comiskey, JA., K, M-ND., Ewango, CEN., Feldpausch, TR., Hamilton, AC., Gloor, M., Hart, T., Hladik, A., Lloyd, J., Lovett, JC., Makana, J-R., Malhi, Y., Mbago, FM., Ndangalasi, HJ., Peacock, J., Peh, KSH., Sheil, D., Sunderland, T., Swaine, MD., Taplin, J., Taylor, D., Thomas, SC., Votere, R. & Woll, H. (2009) Increasing carbon storage in intact african tropical forests. *Nature*, 457: 1003-1006.
- Lee, MS., Nakane, K., Nakatsubo, T., Mo, W. & Koizumi, H. (2002) Effects of rainfall events on soil CO<sub>2</sub> flux in a cool temperature deciduous broad-leaved forest. *Ecological Research*, 17: 401-409.
- Luyssaert, S., Schulze, ED., Borner, A., Knohl, A., Hessenmoller, D., Law, BE., Ciais, P. & Grace, J. (2008) Old-growth forests as global carbon sinks. *Nature* 455: 213-215.
- 莫文紅・関川清広 (2005) 土壌からの炭素放出の定量. 日本生態学会誌 55: 125-140.
- Odum, EP. (1969) The strategy of ecosystem development. *Science* 164: 262-270.
- Ohtsuka, T., Saigusa, N. & Koizumi, H. (2009) On linking multiyear biometric measurements of tree growth with eddy covariance-based net ecosystem production. *Global Change Biology* 15: 1015-1024.
- Pregitzer, KS. & Euskirchen, EG. (2004) Carbon cycling and storage in world forests: biome patterns related to forest age. *Global Change Biology* 10: 2052-2077.
- Raich, JW. & Schlesinger, WH. (1992) The global carbon-dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus Series B* 44: 81-99.
- Valentini, R., Matteucci, G., Dolman, AJ., Schulze, ED., Rebmann, C., Moors, EJ., Granier, A., Gross, P., Jensen, NO., Pilegaard, K., Lindroth, A., Grelle, A., Bernhofer, C., Grunwald, T., Aubinet, M., Ceulemans, R., Kowalski, AS., Vesala, T., Rannik, U., Berbigier, P., Loustau, D., Guomundsson, J., Thorgeirsson, H., Ibrom, A., Morgenstern, K., Clement, R., Moncrieff, J., Montagnani, L., Minerbi, S. & Jarvis, PG. (2000) Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests. *Nature* 404: 861-865.
- Webster, KL., Creed, IF., Bourbonniere, RA. & Beall, FD. (2008) Controls on the heterogeneity of soil respiration in a tolerant hardwood forest, *Journal of Geophysical Research* 113, G03018, doi: 10.1029/2008JG000706.
- Xu, M. & Qi, Y. (2001) Soil-surface CO<sub>2</sub> efflux and its spatial and temporal variations in a young ponderosa pine plantation in northern California. *Global Change Biology* 7: 667-677.