

短 報

厚い土層中における CO₂ 濃度および地温の多深度同時測定濱田洋平^{*1}・田中 正¹

濱田洋平・田中 正：厚い土層中における CO₂ 濃度および地温の多深度同時測定 日林誌 90: 415~419, 2008 土壤中に高濃度で存在する CO₂ は水質形成や風化作用に寄与する因子の一つであるが、濃度測定のために土壤深層の空気を採取する簡易な手法が存在しなかった。そこで、複数の深度において土壤空気の採取と地温の測定を同時に行うことができる測器を、市販の安価な部材を用いて製作した。本測器を最大で 5 m に達する厚い土層をもつ源流域斜面に適用した結果、地温は典型的な季節変化を示したが、CO₂ 濃度については夏季に地表面付近でピークに達し、秋から冬にかけてピーク深度が下方へ移動する現象が観測された。本測器を用いることで、土壤深層における特徴的な CO₂ 動態とそれが地下水の水質や基岩の風化に及ぼす影響についての解明が進むことが期待される。

キーワード：厚い土層、貫入式多深度型採気測温管、地温、土壤 CO₂

Y. Hamada and T. Tanaka: **Simultaneous Measurement of the Profiles of CO₂ Concentration and Temperature in Deeply Developed Soils.** *J. Jpn. For. Soc.* 90: 415~419, 2008 High concentrations of CO₂ in soil air affect subsurface water quality and weathering reactions; however, few simple methods have been proposed for the collection of soil air from deep soils. Therefore, we have developed a gas sampler that enabled soil air collection and soil temperature measurement at several depths using commercially and reasonably available materials. The sampler was then used at a headwater hillslope that had a thick soil layer (a maximum depth of approximately 5 m). The soil temperature showed typical seasonal changes, whereas the CO₂ concentration in soil air reached the maximum and formed a peak near the ground surface in summer. The depth of the peak then moved downward from autumn to winter. The sampler developed in this study can be used to clarify the characteristics of CO₂ dynamics in deep soils and its effect on groundwater quality and basal weathering.

Key words: deep soil layer, penetrative soil gas/thermo profiler, soil CO₂, soil temperature

I. はじめに

地中水の水質を決定する重要な因子の一つに、土壤中の生物活動に伴って生産される CO₂ がある。地中水に溶解した CO₂ は溶液中で解離し、プロトン (H⁺) を生じて pH を低下させるほか、鉱物の炭酸風化に寄与することでその水質に影響を及ぼす。森林生態系における Ca・Mg などの塩基の 8 割は風化起源という指摘もあり (生原, 1994), 土壤中の高い CO₂ 濃度に起因するこれらの作用は、流域スケールの生物地球化学における重要な過程の一つである。このような重要性のため、森林土壤中の CO₂ 動態に関する研究は数多く行われてきているが、溶存 CO₂ が水質形成や風化作用に主要な役割を果たす場である、地下水表面や基盤面に近い深度における測定事例は、浜田ら (1996) などきわめて限られている。その理由の一つとして、土壤深層まで容易に埋設可能な土壤空気採取管（採気管）が存在しないことが考えられる。

土壤深層の CO₂ 濃度を測定した事例の多くは、大きめに掘った埋設孔内に採気チューブを降ろした後、埋設孔を元の土壤やベントナイトで埋め戻して構築した大掛かりなシステムを使用しており (Reardon *et al.*, 1979; Wood *et al.*,

1993), 作業効率や土壤攪乱の点で問題が多い。埋設孔の掘削回数を減らす工夫としては、1 本のプローブに複数の測定深度を備えた多深度型採気管（マルチ採気管）の利用が考えられるが (Burton and Beauchamp, 1994; Sotomayor and Rice, 1999; Yu and DeLaune, 2006), これまでに開発されたマルチ採気管はいずれも土壤深層への埋設に適した構造にはなっていない。

著者らはこのような状況を踏まえ、厚い土層の基盤面深度付近まで簡便に埋設でき、生化学反応を律速する地温を同時に測定可能なマルチ採気管を、市販の安価な部材を用いて製作した。本稿では、この装置の構造と埋設の手順について詳述し、実際の山地斜面に適用した結果について報告する。

II. 方 法

1. 測器の概要

本研究で開発した貫入式多深度型採気測温管の概要を図-1 に示す。本測器は、土壤空気採取用チューブの開口部（採気口）および熱電対の測温接点（測温点）を備えたセンサー部（図-1a）と、センサー部間を接続してチューブと熱電対を保護する塗ビ管からなり（以下、単に採気測温管と

* 連絡・別刷請求先 (Corresponding author) E-mail: hamada@suiri.tsukuba.ac.jp

¹ 筑波大学陸域環境研究センター (305-8577 つくば市天王台 1-1-1)

Terrestrial Environment Research Center, University of Tsukuba, 1-1-1 Tennodai, Tsukuba 305-8577 Japan.
(2008 年 4 月 25 日受付; 2008 年 7 月 2 日受理)

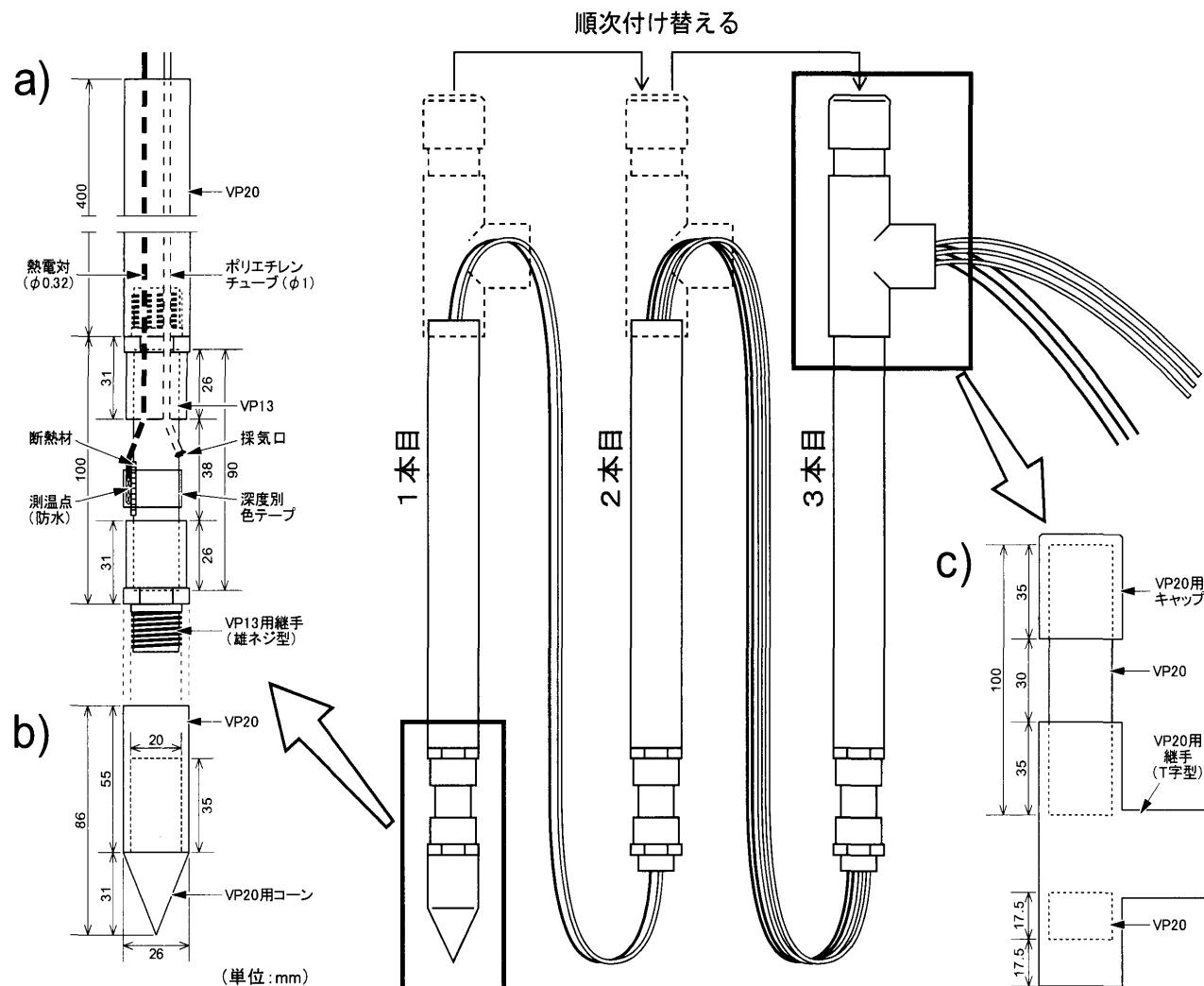


図-1. 貫入式多深度型採気測温管の概要およびセンサー部(a), 先端コーン(b), 打ち込みヘッド(c)の詳細
Schematic diagram of a penetrative soil gas/thermo profiler with detailed illustrations of (a) sensing part, (b) nose cone, and (c) hammering head of the instrument.

記した場合はこの基本単位を指す), 深度に応じて必要な数の採気測温管を順次追加しながら埋設する。

測器の筐体となる塩ビ管は厚肉タイプのもの(VP規格)で, センサー部の塩ビ管にはVP13(外径18mm・内径13mm)を, センサー部間を接続する塩ビ管にはVP20(外径26mm・内径20mm)を使用した。これは, センサー部の塩ビ管の外面と埋設孔の壁面との間に隙間を設け, 埋設時における採気口の目詰まりや測温点の破損を防ぐためである。測定深度の間隔はVP20の長さによって調節可能で, 本研究では50cm間隔で統一した。VP20とVP13の接続には片方が雄ネジになっているVP13用継手を使用し, 継手のネジ山を薄く削ってVP20にちょうど差し込めるように加工した。塩ビ管内の空気が周囲の土壤空気と混合しないよう, 接着剤を十分に塗布して各部材を接続した。

土壤空気採取用のポリエチレンチューブ(外径2mm・内径1mm; サンケイ理化および大起理化)は, VP13のほぼ中央に開けた穴に通して採気口とし, チューブと穴の間に接着剤を充填した。チューブと塩ビ管は完全には接着し

ないため, チューブの先端を炙って扁平にすることでチューブが穴から抜けるのを防止した。地温の測定には二重被覆されたT型熱電対を使用した。熱電対自体を介した熱伝導の影響を低減するため, 直径0.32mmの細い素線を使用した。測温接点はエポキシ樹脂系接着剤で防水加工を施し, 採気口の反対側に固定して測温点とした。VP13と測温点の間には厚さ約1mmの断熱材を挟み, 両者が直接接触するのを防いだ。

2. 調査地の概要

調査地とした川上試験流域の概要と設定した測線の位置, ならびに測器の配置を含めた斜面の断面図を図-2に示す。本流域は千曲川水系三沢川の源流域に相当し, 流域の標高は1,500~1,680m, 流域面積は0.14km²である。流域一帯は冷涼寡雨な内陸性の気候下にあり, 年平均気温は6.2°C, 年降水量は1,400~1,500mmである(辻村, 1993)。

設定した測線は, 北谷右岸側の南西向き斜面に位置する。測線のうち, 斜面基底部の急崖より下側は飽和した河畔域となっているため, 本研究では急崖より上側に六つの観測

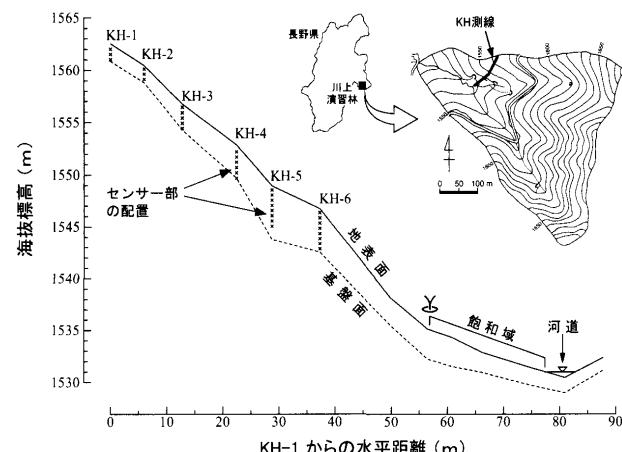


図-2. 川上試験流域の概要と測線の位置（右上）および調査斜面の断面図

Cross section along the slope of KH transect with a map of Kawakami experimental basin and the location of the transect.

地点を設定した。先行研究によれば、この斜面における土層厚は斜面上部 (KH-1~2) では 2 m 未満と浅いが、中部 (KH-3~4) では 2~3 m となり、下部 (KH-5~6) では 4~5 m に達する (石井, 1986; 萩沼ら, 1988)。

3. 埋設の手順

埋設孔の掘削には、斜面調査用簡易貫入試験器 (先端コーンの直径 25 mm・先端角 60°; 筑波丸東) を使用した。本装置は、山地斜面における土層厚や基盤面深度の測定に広く利用されている。装置の詳細ならびに測定結果の解釈については逢坂 (1996), 大貫 (1999)などを参考されたい。本研究では調査斜面における先行研究 (石井, 1986; 萩沼ら, 1988) にならい、 N_c 値が 30 を超えたところを基盤面と見なし、その深度まで埋設孔を掘削した。

掘削後、埋設孔底部の深度に対応する採気測温管を選定し、その下端に先端コーン (図-1b) を接続し、上端には打ち込みヘッド (図-1c) をはめ込んだ。センサー部から伸びるチューブおよび熱電対は、打ち込みヘッドの T 字継手の下方から側方へ通すことで打ち込み時の破断を防いだ。なお、T 字継手をそのまま使用すると採気測温管の上端に圧着してしまうため、継手の下側の穴にはあらかじめ短い VP20 を圧着しておき、これを防止した。この状態にした採気測温管を埋設孔に挿入した後、打ち込みヘッドをウレタンハンマーで叩いて土中に打ち込んだ。ある程度打ち込んだらヘッドを取り外し、一つ上の深度に対応する採気測温管を接続した。打ち込まれた 1 本目から伸びるチューブおよび熱電対を、追加する 2 本目の内部に通し、さらに 2 本目の上端から出た両方のチューブおよび熱電対をまとめて T 字継手に通した後、ヘッドを叩いてさらに打ち込んだ。この作業を、先端コーンが基盤面深度に達するか、それ以上貫入しなくなるまで繰り返した。

埋設作業終了後、最上部の採気測温管の地上に突き出た部分の長さから、各センサー部の正確な深度を算出した。

チューブの先端にはコネクター (サンケイ理化) を介して三方活栓を取り付け、チューブを通した土壤中への大気の混入を防いだ。熱電対の先端には T 型熱電対用ミニチュアコネクター・オスを取り付けた。

調査斜面における埋設作業は 2002 年 7 月下旬に行った。作業の結果、KH-5 では高い土圧のため先端コーンが基盤面深度 (5.20 m) まで到達できず、貫入深度は約 4 m にとどまったが、それ以外の地点ではほぼ基盤面まで貫入させることができた。

4. 土壤中の CO_2 濃度および地温の測定

土壤中の CO_2 濃度および地温の測定は、埋設から約 2 週間後の 2002 年 8 月上旬に開始し、2003 年 5 月上旬まで計 8 回行った。 CO_2 濃度の測定は濱田・田中 (1995) による手法にしたがい、ガス検知管 (ガステック) を用いて 100 mL の土壤空気を採気測温管のチューブを通して吸引し、含まれている CO_2 の濃度を現地で測定・記録した。測定値は濱田・田中 (1995) の補正式を用いて真値に変換したほか、試験流域の標高から現地の気圧を 840 hPa として気圧補正を行った (濱田・田中, 1997; Hamada and Tanaka, 2001)。KH-5 および KH-6 の最下部 (それぞれ深度 3.91 m および 3.89 m) では、おそらくは高い飽和度のために土壤空気が吸引できず、 CO_2 濃度の値は得られなかった。地温の測定にはデジタル温度計 TX10 (横河メータ & インスツルメンツ) を使用した。各深度の熱電対用コネクターを温度計に順次接続し、1~2 分安定させてから温度を記録した。

III. 結果および考察

1. 土壤中の CO_2 濃度の鉛直分布

観測された土壤中の CO_2 濃度プロファイルのうち、2002 年 8 月および 11 月、2003 年 2 月および 5 月に得られた結果について図-3 に示す。土壤中の CO_2 濃度は、夏季には 0.4~0.9% と大気中の 10 倍以上に達し、冬季も 0.1% を超える高濃度を維持した。プロファイルの形状およびその季節変化には地点ごとに違いがみられた。まず、土層の薄い斜面上部においては、KH-1 では深度 1 m まで増加しそれ以深ではほぼ一定となり、KH-2 では最下部まで増加し続けた。これに対して、土層の厚い斜面中部に位置する KH-3~4 では、表層からある深度までは CO_2 濃度が増加するものの、それ以深では逆に減少するプロファイルを示すものが多くかった。 CO_2 濃度のピーク深度は、8 月は 1 m 以浅、11 月は 1~1.5 m、翌年 2 月は 2 m 以深と、夏季から冬季にかけて下方へ移動した。この傾向は、さらに土層の厚い斜面下部の KH-5~6 にかけても同様に認められた。なお、2003 年 5 月には表層の濃度が再び増加し、いずれの地点においても深度間の濃度差が小さくなった。

森林土壤中の CO_2 濃度については一般に、地表面からある深度まで増加し、それ以深ではほぼ一定になるプロファイルが季節によらず観測されている。一方、KH-3~6 で観測されたような、途中に濃度ピークをもつプロファイルについても、わずかではあるが観測事例がある (Reardon *et al.*,

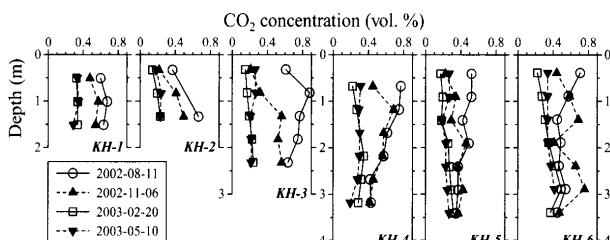


図-3. 地点別の土壤中のCO₂濃度プロファイルの季節変化

Seasonal change of the profile of soil CO₂ concentration at each site.

1979; Wood *et al.*, 1993)。両者の事例を比較すると、前者の多くが深度1m程度までを対象としているのに対し(たとえば、Solomon and Cerling, 1987; Uchida *et al.*, 1997; 島田ら, 1998),後者はいずれも厚さ5m以上の土層を対象とし、深度1~3mで濃度ピークを観測している。このことから、濃度ピークが観測される深度には一定の範囲があること、観測事例が少ない理由の一つとして、従来の研究の多くがその深度より表層側の土壤のみを対象としていることが考えられる。KH-3~6におけるCO₂濃度の測定深度は最下部で2.3~3.4mに達しており、これらの地点におけるプロファイルは妥当なものと考えられる。

なお、KH-5の深度1.41mおよびKH-6の深度1.89mでは2002年夏季~秋季にかけて、プロファイルの全般的な傾向に対して低いCO₂濃度が観測された。2002年冬季以降はこの現象はみられず、また2003年5月以降の測定も行っていないため断定はできないが、これらの深度では採気口付近の塩ビ管が埋設時の衝撃で損傷し、地上大気と連続している管内の空気が土壤中に混入した可能性もある。本測器の構造および設置の手法上、一度埋設した測器を回収し点検・修理することはきわめて困難である。この影響を事前に低減する工夫としては、埋設の際に採気測温管内にコーキング剤を充填し、塩ビ管内の空気をセンサー部ごとに遮断することなどが考えられる。

今回示した結果は単一の測線における事例に過ぎず、CO₂濃度プロファイルと土層厚や斜面位置との一般的な関係を確立するためには、さまざまな土壤における観測事例を積み重ねる必要がある。本研究で開発した測器を用いることで、従来観測事例の少ない土壤深層のCO₂濃度の測定が容易になり、厚い土層におけるプロファイルの形成過程やCO₂動態の解明が進むことが期待される。

2. 地温の鉛直分布

土壤中のCO₂濃度と同時に観測された地温のプロファイルを図-4に示す。プロファイル形状とその季節変化は地点間でほぼ共通しており、深層ほど変化の位相が遅れ、振幅が小さくなる結果を示した。このような傾向は地温の季節変化や日周変化に典型的にみられるもので、採気測温管による測定値はこの現象をよく捉えている。また、測温点の損傷を示唆するような異常値も記録されなかった。

本測器のように、1本の筐体に複数のセンサーを取り付け

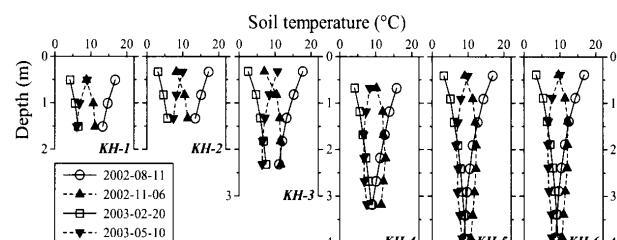


図-4. 地点別の地温プロファイルの季節変化

Seasonal change of the profile of soil temperature at each site.

て地温プロファイルを測定する場合、筐体の熱伝導率および熱容量の影響を検討する必要がある。まず熱伝導率についてみると、硬質塩ビの熱伝導率は0.15~0.21 W·m⁻¹·K⁻¹であり(日本熱物性学会, 2000), この値は乾燥土壤の0.1~0.2 W·m⁻¹·K⁻¹とほぼ同程度、湿潤土壤の1.0~2.0 W·m⁻¹·K⁻¹より1オーダー小さい値である(宮崎ら, 2005)。したがって、採気測温管の存在は深度間の熱伝導の促進には寄与しない。

次に熱容量であるが、空気および有機物の寄与を無視できるとすると、土壤の体積比熱C_hは次式で求められる(中野ら, 1995)。

$$C_h = C_s \cdot \rho_b + C_w \cdot \rho_w \cdot \theta_w$$

ここで、C_sおよびC_wはそれぞれ固相および液相の比熱、ρ_bおよびρ_wは土壤の乾燥密度および土壤水の密度、θ_wは体積含水率である。C_sおよびC_wをそれぞれ0.85および4.18 J·g⁻¹·K⁻¹(中野ら, 1995)、ρ_wを1.0 g·cm⁻³とし、また調査斜面における過去の調査結果に基づき、ρ_bおよびρ_wの代表的な値として表層には0.5 g·cm⁻³および0.40、深層には1.1 g·cm⁻³および0.55を与えると、C_hは表層で2.1、深層で3.2 J·cm⁻³·K⁻¹となる。これに対して硬質塩ビの比熱は1.05~1.22 J·g⁻¹·K⁻¹、その密度は1.36~1.54 g·cm⁻³であり(日本熱物性学会, 2000)、両者の積である体積比熱は約1.6 J·cm⁻³·K⁻¹と土壤の値よりやや小さい程度となる。塩ビ管内は空洞であり、実際に塩ビが占める体積は測器外周部のみであることを考慮すると、筐体の熱容量が地温に及ぼす影響は十分小さいといえる。

本研究を進めるに当たり、(独)森林総合研究所研究員の飯田真一博士ならびに西ジャワ農業技術アセスメント研究所所長のKasdi Subagyono博士には、調査地での野外作業にご協力いただいたほか、本稿の執筆に当たって有意義な助言を賜りました。筑波大学大学院生命環境科学研究科(当時)の森美幸氏には、測器の埋設作業に協力していただきました。(財)北海道科学技術総合振興センター幌延地圏環境研究所主任研究員の井岡聖一郎博士には、先端コーンの製作に必要な部材を提供していただきました。なお、本研究は平成14年度科研費・若手研究(B)(課題番号14740271)による助成を受けた。

引用文献

- Burton, D.L. and Beauchamp, E.G. (1994) Profile nitrous oxide and carbon dioxide concentrations in a soil subject to freezing. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 115–122.
- 生原喜久雄 (1994) 溪流水の水質形成に及ぼすプロトン (H^+) の影響. *水文・水資源学会誌* 7: 325–331.
- 浜田美鈴・大手信人・小橋澄治 (1996) 森林流域における土壤 CO_2 ガス濃度の鉛直分布. *日林誌* 78: 376–383.
- 濱田洋平・田中 正 (1995) ガス検知器を用いた簡易な土壤空気中の CO_2 濃度の測定法. *ハイドロロジー* 25: 123–130.
- 濱田洋平・田中 正 (1997) 森林土壤空気中における二酸化炭素濃度の時空間分布. *日本水文科学会誌* 27: 3–16.
- Hamada, Y. and Tanaka, T. (2001) Dynamics of carbon dioxide in soil profiles based on long-term field observation. *Hydrol. Process.* 15: 1829–1845.
- 石井秀樹 (1986) 山地斜面の地形と土層の構造・生成に関する研究. 筑波大学大学院環境科学研究科修士論文: 55 pp.
- 宮崎 育・長谷川周一・柏淵辰昭 (2005) 土壤物理学. 138 pp, 朝倉書店, 東京.
- 中野政詩・宮崎 育・塩沢 昌・西村 拓 (1995) 土壤物理環境測定法. 236 pp, 東京大学出版会, 東京.
- 日本熱物性学会編 (2000) 热物性ハンドブック 訂正第2版. 615 pp, 養賢堂, 東京.
- 荻沼威如・田中 正・島野安雄 (1988) 土層構造と流域貯留量. (山地森林流域における流出機構と物質循環に関する研究. 田中 正編, 昭和 61・62 年度文部省科学研究費補助金研究成果報告書). 47–85.
- 大貫靖浩 (1999) 土壤深度調査法. (森林立地調査法—森の環境を測る一. 森林立地調査法編集委員会編, 博友社, 東京). 16–19.
- 逢坂興宏 (1996) 斜面土層構造の測定. (水文地形学—山地の水循環と地形変化の相互作用—. 恩田裕一・奥西一夫・飯田智之・辻村真貴編, 古今書院, 東京). 15–23.
- Reardon, E.J., Allison, G.B., and Fritz, P. (1979) Seasonal chemical and isotopic variations of soil CO_2 at Trout Creek, Ontario. *J. Hydrol.* 43: 355–371.
- 島田博匡・戸田浩人・生原喜久雄・小池孝良 (1998) 異なる斜面位置の森林土壤中における CO_2 ガス濃度の季節変化. *土肥誌* 69: 170–177.
- Solomon, D.K. and Cerling, T.E. (1987) The annual carbon dioxide cycle in a montane soil: Observation, modeling, and implications for weathering. *Water Resour. Res.* 23: 2257–2265.
- Sotomayor, D. and Rice, C.W. (1999) Soil air carbon dioxide and nitrous oxide concentrations in profiles under tallgrass prairie and cultivation. *J. Environ. Qual.* 28: 784–793.
- 辻村真貴 (1993) 厚い上層からなる急峻な森林斜面における土壤水の挙動について. *ハイドロロジー* 23: 3–18.
- Uchida, M., Nojiri, Y., Saigusa, N., and Oikawa, T. (1997) Calculation of CO_2 flux from forest soil using ^{222}Rn calibrated method. *Agric. For. Meteorol.* 87: 301–311.
- Wood, B.D., Keller, C.K., and Johnstone, D.D. (1993) *In situ* measurement of microbial activity and controls on microbial CO_2 production in the unsaturated zone. *Water Resour. Res.* 29: 647–659.
- Yu, K.W. and DeLaune, R.D. (2006) A modified soil diffusion chamber for gas profile analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70: 1237–1241.