

異なる森林土壌におけるCO₂ガス濃度の 時間的・空間的変動特性

CHARACTERISTICS OF TEMPORAL AND SPATIAL CHANGES OF CO₂ GAS CONCENTRATION IN DIFFERENT FOREST SOILS

縄田孝彦¹・土屋十圀²・保坂香³

Takahiko NAWATA, Mitsukuni TSUCHIYA and Kaori HOSAKA

¹学生会員 前橋工科大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (〒371-0816 群馬県前橋市上佐鳥町460-1)

²正会員 工博 前橋工科大学 工学部建設工学科 (〒371-0816 群馬県前橋市上佐鳥町460-1)

³非会員 前橋工科大学 工学部建設工学科 (〒371-0816 群馬県前橋市上佐鳥町460-1)

The purpose of this study is grasping characteristics of temporal and spatial changes of CO₂ gas concentration on the forest soil of three different types which is examination ground. (Young forest, Cedar forest and Oak forest) Results of this study are shown as follow. (1) CO₂ in every type of forest soil always is larger than 360ppm of that in the atmosphere. And, it also increased with increases of the soil-temperature with seasonal changes. (2) Regularity of CO₂ did not appear clearly in case of continuous observation for 24 hours, and CO₂ in forest soil was not greatly influenced by soil-temperature changes in a short time. (3) The positive correlation coefficient of the variations of two factors was recognized relationships between CO₂ in forest soil and soil temperature. Therefore, an estimated formula was obtained as a result of analysis by the measurement result of three different types examination ground.

Key Words : CO₂ gas concentration , young forest area , cedar forest area , oak forest area , soil-temperature

1. はじめに

森林は人間社会への様々な効用を有し、近年では水源涵養などの国土保全に関わる環境機能に関心が寄せられてきた。中でも森林の大気浄化機能は、地球温暖化に大きく寄与する温室効果ガス、CO₂ガスの吸収源としての役割が期待でき、昨年度に発効された京都議定書の中でも基準年である1990年からのCO₂ガス削減目標の64%を森林による吸収量として認められおり¹⁾、森林のCO₂ガス収支に関する評価は重要性を増している。これまでに、森林生態系内でも主に地上部及び地表における光合成や呼吸などによるCO₂循環、炭素循環については様々な分野の研究者によって明らかにされてきた。また、濱田・田中^{2), 3)}による土壌中CO₂ガス濃度の測定法に関する研究や、三谷ら⁴⁾、島田ら⁵⁾によって土壌中を対象としたCO₂動態に関する研究が行われ、地温や土壌水分量等の環境因子との関係について明らかにされてきている。しかしながら植生を考慮した異なる森林土壌中のCO₂ガスの動態を対象とした研究は多くないのが現状である。

これらの現状を踏まえ、本研究では利根川上流森林域を対象として植生や土壌環境の異なる3タイプの森林土壌を対象として、土壌中のCO₂ガスの時間的・空間的分布を把握することを目的とし研究を行った。また、季節変化や昼夜での時系列変化に関する長・短期での現地調査を行い、土壌・地質特性を考慮した土壌中CO₂ガス濃度の推定式の算出、モデルの構築を目的とし研究を行った。

対象とした群馬県北部の山地森林域では、過去2年間に渡り雨水及び溪流水、気象観測を継続的に行っている。その結果から、この地域では非常に酸性度の高い降雨があることが確認され、首都圏を取り囲む山地森林地形になっていることから、都市域で発生している大気汚染の浄化、CO₂の主な吸収源になっていることが推定でき、この地域でのCO₂収支について評価することは重要な意義を持つと考えられる⁶⁾。

2. 調査対象地域の概要^{6), 7)}

観測対象地域を図-1に示す。観測対象地域は、利根川

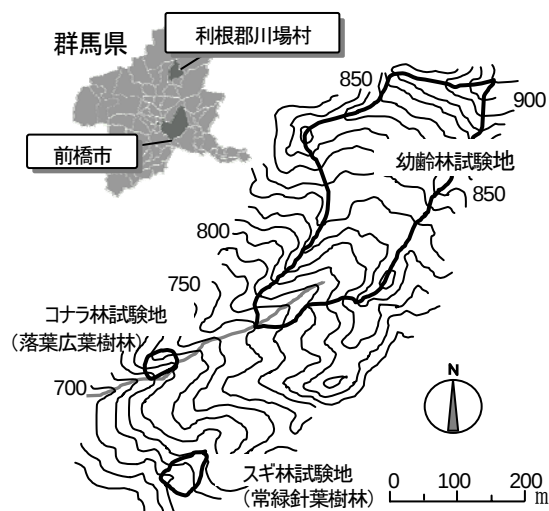


図-1 調査対象地域

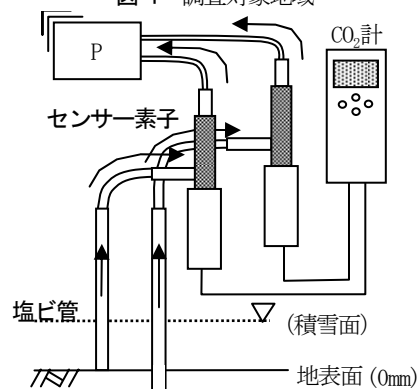


図-2 CO₂ガス濃度の測定方法簡略図

上流域に位置する薄根川の支川、田代川流域である群馬県利根郡川場村試験地、通称ヒロイド地区の幼齢林試験地、針葉樹壮齢林試験地及び広葉樹壮齢林試験地の植生の異なる3試験地である。この地域の2004年の年平均気温は10.2℃（最低気温-2.5℃，最高気温22.5℃），年平均湿度83.9%であり比較的涼しく，根雪期間は12月下旬からの100日程度となっている。各々の試験地の植生，地形，季節変化等の特性を以下に示す。

- (a) 幼齢林試験地：試験地面積9.3haにシイ，クヌギ，ミズナラ等の広葉樹が植林され2～7年経過しているが林分は未閉鎖である。世田谷区民健康村が主催する森づくりの対象地域であり，定期的な下草刈り，つる切りといった保育作業が行われている。林床は光環境が非常に良いため，春から夏にかけて様々な植物が繁茂し，秋から冬にはそれらが枯死して土壌に還元される。
- (b) 針葉樹壮齢林試験地：（以下，スギ林試験地）樹齢約50年生前後の常緑針葉樹のスギに覆われた人工林帯である。樹林地面積は0.38ha，スギ林の樹高は17m程度，樹林密度は180本/1000m²である。幼齢林試験地同様，定期的に間伐や枝打ちが行われているため，年間を通して光環境は良く林床植物は適度に繁茂しているが，落葉がほとんどないため他試験地と比べ表土，腐食土層は薄い。

- (c) 広葉樹壮齢林試験地：（以下，コナラ林試験地）樹齢約50年生前後の落葉広葉樹のコナラに覆われた自然林帯である。他試験地と異なり，人為的管理は一切行われておらず，林床には倒木が目立つ。落葉が多いために光環境は季節によって大きく異なり，林床の植物の繁茂はあまり見られないが，自生によるコナラの若木が所々に存在している。表土，腐食土層の下層には粘土層が厚く堆積する。

3. CO₂ガス濃度の測定方法

(1) 土壌中採気管の埋設

森林土壌中のCO₂ガス濃度を測定するに当たり3試験地に土壌中空気採気管を埋設した。3試験地に地表面を0mmとし鉛直方向に100，200，300，400，500，600，700mmの7本，各採気管の間に150mmから200mm程度の間隔をおきハンドスクリーオーガーで掘削し採気管を埋設した。採気管には水道管などに使われるVP管（内径16mm）を用い，土粒子が入らないように管の底部には網を張り，上口部には着脱可能な専用のキャップで蓋をして採気管を密閉し大気と遮断した。CO₂ガス濃度の測定時には採気管の専用キャップに内径3mmのビニールチューブを施したキャップに代え採気管の底部まで通した。

(2) CO₂ガス濃度の測定

従来，土壌中のCO₂ガス濃度の測定にはガスクロマトグラフィー法が用いられることが多いが，現地での測定にはいくつかのデメリットを有しているため，土壌中CO₂ガス濃度の測定にはスウェーデン製ハンディタイプCO₂計（VAISALA社製—GM70）を用いた。この装置の測定原理は，赤外線吸収法のNDIR単光源二波長比較方式を採用しており，長期安定性に優れ，ほこりや水蒸気などの影響も受けにくく精度の高い測定が可能となる特徴があり，更に2点同時の測定が可能であり現地での作業効率がよいといったメリットを有する⁵⁾。

土壌中CO₂ガス濃度の測定には，管底部より吸引した土壌空気をCO₂計のセンサ素子部分を通気させる方法にて行った。ここで用いた簡易ポンプはごくわずかな吸引力で吸い上げるため測定時の吸引圧は考慮していない。測定作業を簡略化した概念図を図-2に示す。また，土壌中CO₂ガス濃度の測定には，時間帯の影響を極力避けるために午後1時から3時の間に統一し測定を行った。

(3) 地温及び気圧による測定値の補正⁶⁾

本研究で用いているCO₂計測器 - GM70は，大気圧が1013hPa，温度が25℃の条件下で最高の精度を出力する。この条件と大きく異なる測定環境下では測定値に誤差が生じる。よって，現地にてその場の地温，気圧の環境条件を入力し，以下のような補正式を用いて気圧，地温に

よる誤差の補正を行っている。

$$CVC = UCR \times (1013/P) \times \{(t+273)/298\} \quad (1)$$

ここでCVCは補正されたボリューム濃度 (ppm) , UCRは補正前の測定値, P , t はそれぞれ気圧, 地温の測定値である. 本研究では対象地域が比較的高い標高に位置しているためこの補正は必須であり有効である. 各試験地の標高より標準気圧を求め, それぞれ935, 943及び940hpaに設定し補正計算を行った. 現地での観測条件の変化による気圧誤差の影響はほとんどないものと考えられる.

(4) 地下水の影響

過去3年間に亘り, 幼齡林試験地では斜面4ヶ所にテンシオメータを設置し地下水位の観測を行った. その観測結果を基に, 土壌中CO₂ガス濃度測定に関する地下水の影響を検討した. 埋設した土壌空気採気管付近の地下水位は欠測となる根雪期間を除けば, 地表から地下水面までの平均距離は1510mmであり, 最深部の採気管先端700mmまでは達していないためほぼ影響はないと考えられる. しかし, 過去3年間で比較的大規模な降雨イベントに伴い, 地下水面が採気管まで達する事例が何度か確認された. それらのデータから総降雨量約100mm以上で48時間程度(降雨強度2.1mm/h)より大規模な降雨イベントが生じた際には, 地下水面が採気管まで達するためCO₂ガス濃度の測定には注意を要する. また, 他の2試験地では水質観測のためのサンプリング管(最深部1200mm程度)を埋設しているが, 今までの観測では地下水面がここまで達した事例はほとんどなく, 両試験地共に非常に水捌けのよいことが確認されている. よって, 大規模降雨イベントの直後を避ければ土壌中CO₂ガス濃度の測定にはほとんど影響はないと考えられる. 本研究でもこのことを考慮し降雨直後の観測は行っていない.

4. 観測結果と考察

(1) 鉛直分布及び季節変化

3試験地の地温と土層の種類, 土壌中CO₂ガス濃度の鉛直分布を図-3に, また, 地温及び土壌中CO₂ガス濃度の季節変化を図-4に示す. なお, 気温及び降水量の時間変化を図-5に示した. 土壌中CO₂ガス濃度の観測期間は積雪のあった2005/3/22から台風14号の過ぎ去った9/8までを示した. 観測期間中の気象は梅雨期の降雨も比較的小なく, 夏季に雨量は増えたが, 100mmを超える規模の降雨イベントがなかったため土壌中CO₂ガス濃度の測定に関して地下水の影響はないものと考えられる. 土壌中CO₂ガス濃度は, 一般的な大気中のCO₂ガス濃度である360ppmを下回ることではなく, 季節が変化し気温, 地温が

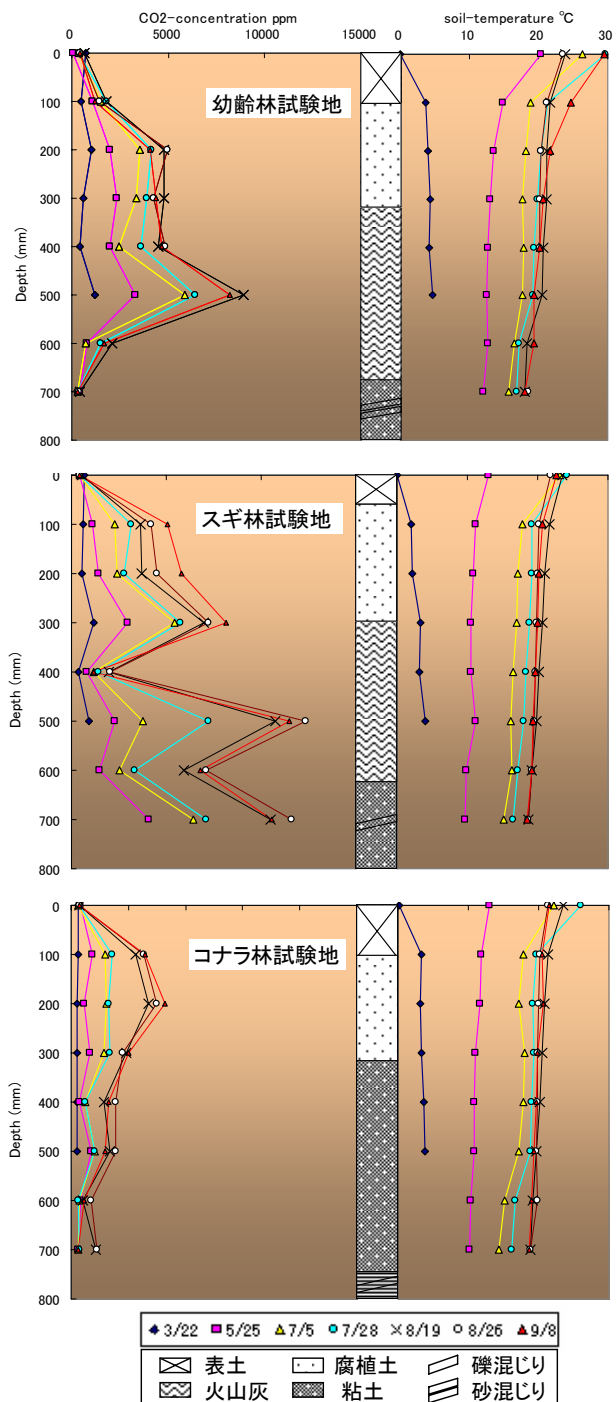


図-3 地温および土壌中CO₂ガス濃度の鉛直分布

上昇するのに伴い濃度が高くなる傾向が確認できた. 特にスギ林, 幼齡林, コナラ林の順に顕著である. また, 9/8の測定の段階で濃度の明確な低減はまだ確認できていないが, スギ林試験地では最大で12320ppmを記録しており, 深層部での濃度が高い傾向が認められた. 幼齡林試験地でもスギ林試験地同様, 地表から500mm付近で濃度のピークがみられ, 最大で8920ppmであったが, それより深層部の粘土層では地表付近と同程度の濃度まで低減する. コナラ林試験地では全体的に濃度は低く, 比較的地表に近い腐食土層で4910ppmのピークが形成されて

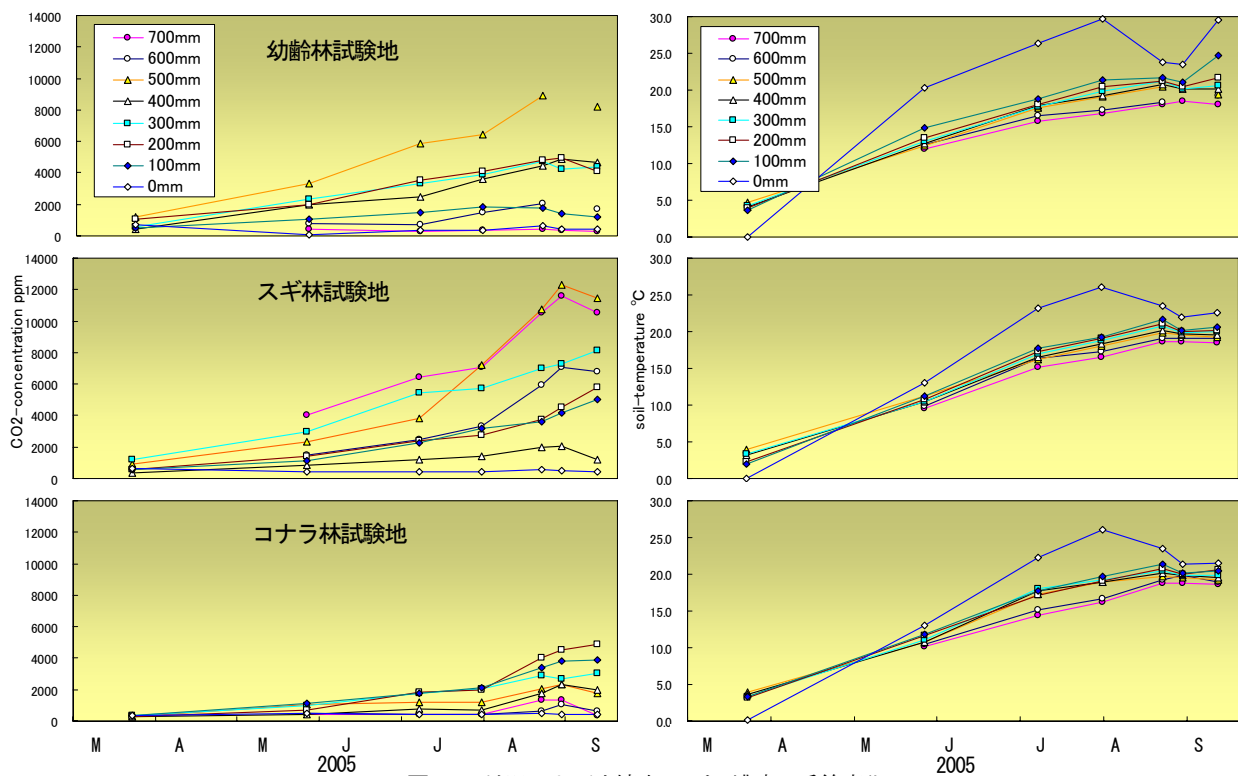


図-4 地温および土壌中CO₂ガス濃度の季節変化

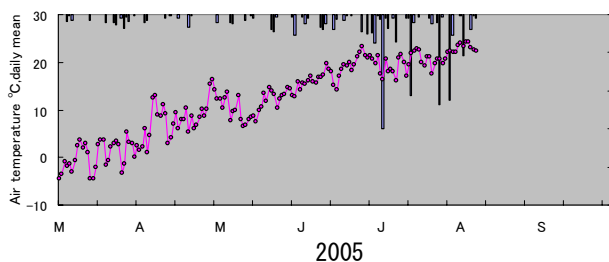


図-5 2005年度の雨量及び気温(～8/10)

いる。粘土層でCO₂ガスの高濃度が確認できたのはスギ林試験地のみであり、その原因は深根性の樹種であるスギの呼吸であることが推測できる。3試験地とも地表付近の濃度は季節に関係なく一定に保たれる傾向があり、土壌中と大気との間に生じる濃度勾配により、土壌から大気へのCO₂フラックスの発生が予想される。

(2) 24時間の気温、地温及びCO₂ガス濃度の変化

昼夜での地温及び土壌中CO₂ガス濃度の変化を検討するために昼夜24時間連続観測を行った。日射量が昼夜で大きく異なり地温の変化も大きいことが予想される晴天時を対象として、7/28の正午から2時間間隔で合計12回、3試験地の土壌中CO₂ガス濃度の測定を行った。観測結果を図-6に示す。3試験地ともに地表から土壌深くになるにつれて地温は安定し一定の温度を保つ傾向がみられたが、その傾向は土壌中ガス濃度には反映されず、昼夜の明確な変化規則は確認できなかった。このことより、土壌中ガス濃度は短期間での地温の変化には大きく影響されないことが推測された。

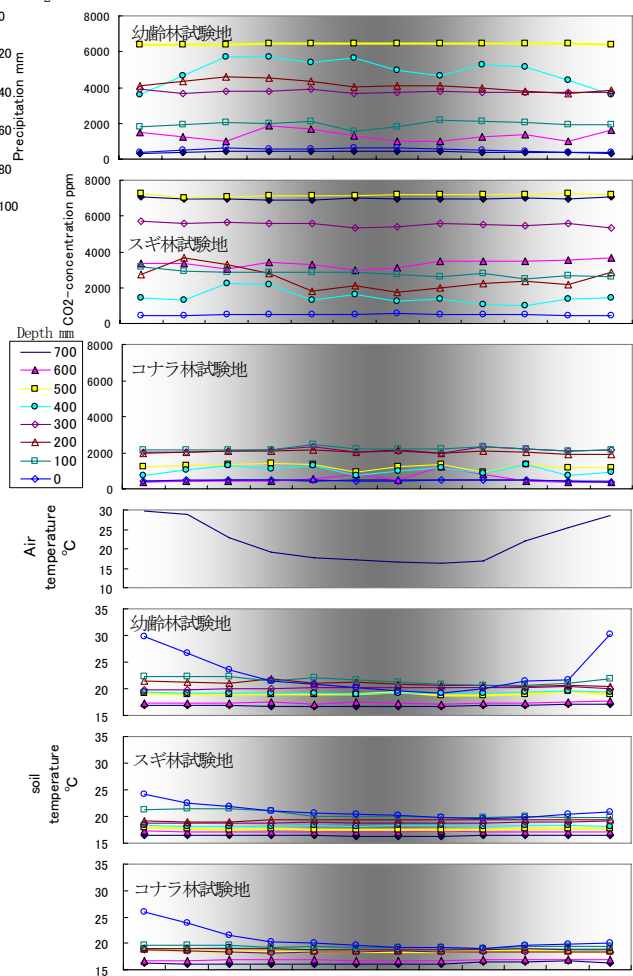


図-6 昼夜連続観測結果

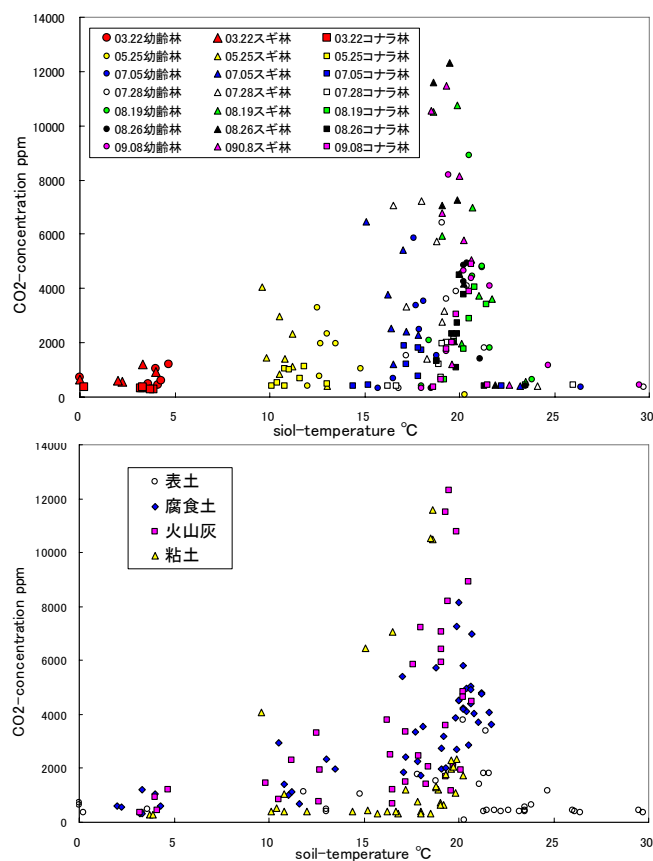


図-7 地温と土壤中CO₂ガス濃度の関係

(3) 地温と土壤中CO₂ガス濃度との関係

3試験地における地温と土壤中CO₂ガス濃度との関係の季節変化についてプロットしたものと併せて、3試験地を構成する土層別の空間分布をあらわしたものを図-7に示す。この図より、季節変化に伴い地温が上昇すると、土壤中CO₂ガス濃度の分布範囲には20℃付近を中心に広がりがあることが確認できる。また、土層別には表土層、スギ林試験地を除く粘土層で濃度は低く、腐食土層、火山灰土層で比較的に濃度が高くなる傾向があった。しかしながら試験地別、土層別にみても一般的に地温と土壤中CO₂ガス濃度の関係で多く報告されている指数関数的関係は確認できなかった^{3), 4), 5)}。

そこで、更に各試験地別で深度別に分けて解析を行った。3試験地の深度別に地温と土壤中CO₂ガス濃度との関係を表したものを図-8に示す。試験地別に深度を考慮することにより、指数関数的な関係が確認することができた。土壌の深さが地表面に近くなるに従い指数関数的分布より線形関数的な分布になっている傾向があり地表面では地温に関係なくほぼ一定のCO₂ガス濃度を示している。従来、土壤中CO₂ガス濃度と地温及び土壌水分量等の環境因子との相関関係はいくつかの研究で解析がなされてきた^{3), 4), 5)}。本研究のCO₂ガス濃度の測定結果でも、試験地別で深さに別けて検討することにより、地温と土壤中CO₂ガス濃度の指数関数的な分布が確認できた。

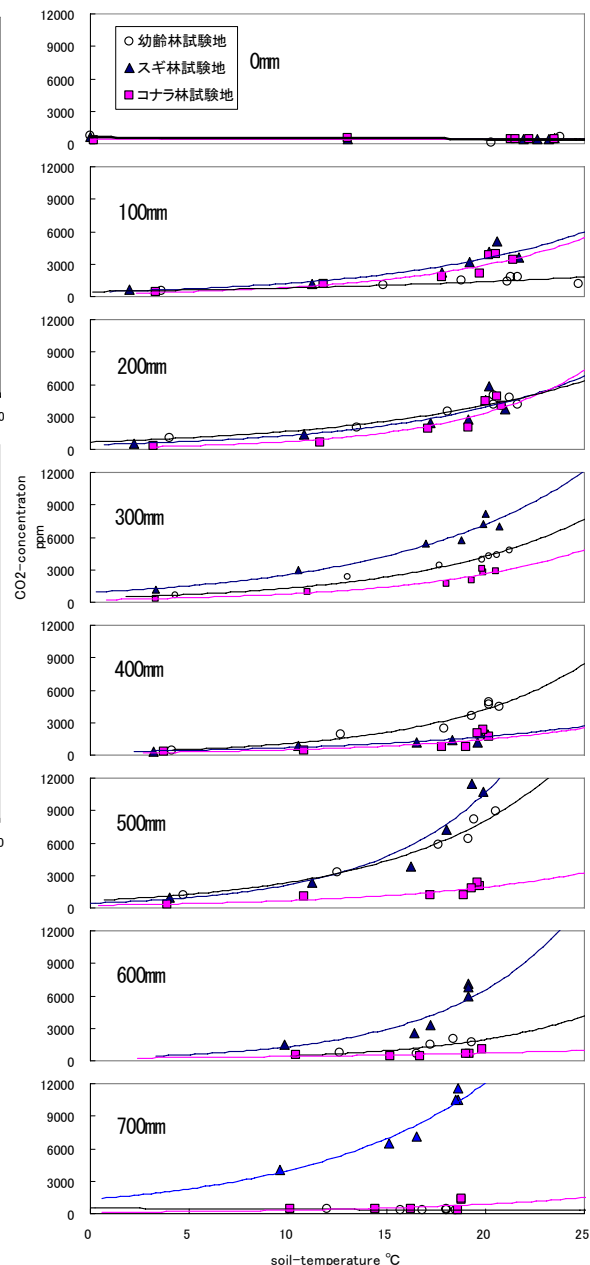


図-8 地温と土壤中CO₂ガス濃度の関係

(4) 土壤中CO₂ガス濃度の推定

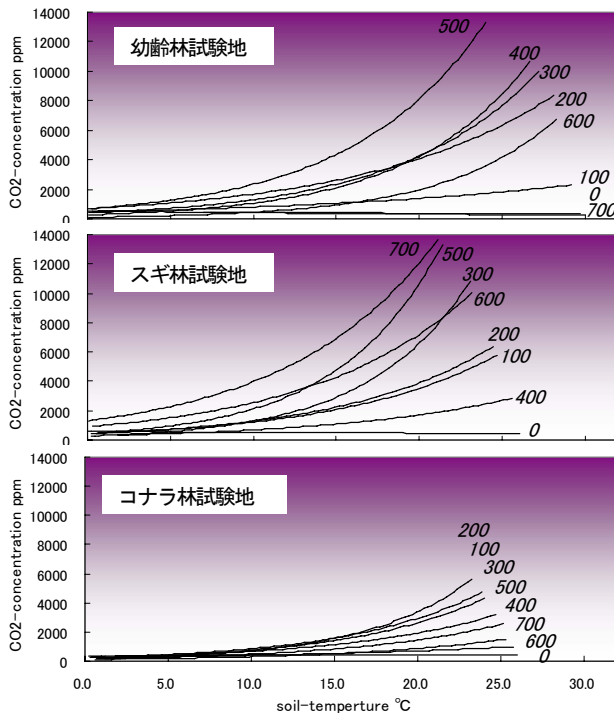
土壤中CO₂ガス濃度を決定する環境要因は、従来行われてきた研究^{3), 4), 5)}より、地温と土壌水分量に大きく依存することが多く報告されている。本研究でも3試験地にて深さを考慮して回帰分析を行った結果、地温と土壤中CO₂ガス濃度には指数関数的な関係性が認められた。それより深さをパラメータとした地温データのみによる土壤中CO₂ガス濃度の推定を試みた。以下に得られた推定式を示す。

$$C = ae^{bt} \quad (2)$$

ここでCは推定される土壤中CO₂ガス濃度を示し、tは実測した地温を示す。また、各試験地での係数a、b及び実測した土壤中CO₂ガス濃度と推定曲線との相関係

表-2 土壤中CO₂ガス濃度推定式の係数及び相関

Depth mm	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>r</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>r</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>r</i>
	幼齡林試験地			スギ林試験地			コナラ林試験地		
0	504.68	-0.0153	0.2037	592.29	-0.0119	0.6132	372.05	0.0075	0.6021
100	457.51	0.0552	0.8694	423.93	0.1058	0.9677	249.65	0.1231	0.9720
200	688.15	0.0888	0.9817	425.17	0.1107	0.9629	153.23	0.1546	0.9628
300	395.87	0.1186	0.9886	902.21	0.1038	0.9909	223.47	0.1231	0.9859
400	262.48	0.1389	0.9837	278.64	0.0907	0.9553	161.78	0.1096	0.8602
500	674.67	0.1242	0.9955	423.39	0.1613	0.9730	232.93	0.1055	0.9334
600	100.37	0.1489	0.7706	254.30	0.1625	0.9235	220.99	0.0581	0.5718
700	506.63	0.0231	0.4427	1308.0	0.1111	0.9705	108.40	0.1042	0.5636

図-9 土壤中CO₂ガス濃度推定曲線 (mm)

数 r を表-2に示す。

比較的にCO₂ガス濃度のオーダーの低い地表付近、幼齡林及びコナラ林試験地の深層部の粘土層を除けば、実測地との相関係数は良く、地温からの土壤中CO₂ガス濃度の推定式はほぼ正確に再現していることがわかる。

5. まとめ

本研究は、利根川上流の森林域を対象に異なる森林土壌におけるCO₂ガス濃度の時間的空間的分布を把握することを目的として行っている。現在までに得られた知見を以下に示す。

- 1) 3試験地の土壤中CO₂ガス濃度は、一般的な大気濃度360ppmを常に上回り、季節変化の気温、地温の上昇に伴って上昇する傾向が確認できた。
- 2) 幼齡林試験地、コナラ林試験地では深層部の粘土層で

CO₂ガス濃度は低くなり、主に腐食土層、火山灰土層で濃度が上昇する特徴がみられた。

- 3) スギ林試験地では、深層粘土層での濃度上昇傾向があり、最大12320ppmと3試験地で最も高い値を記録した。
- 4) 既往研究⁵⁾である名古屋大学構内コナラ二次林(最大13000ppm)や、神奈川県伊勢原のスギ林土壌の(最大47500ppm)に比べ濃度は低い結果となった。
- 5) 昼夜での土壤中CO₂ガス濃度変化に明確な規則性は確認できなかったものの、土壤中CO₂ガス濃度は短期間の地温の変化には反映されにくいことが推測された。
- 6) 土壤中CO₂ガス濃度と地温の関係は、試験地別に深さを考慮することで指数関数的な分布を示し、その相関係数は良いことから、地温からの土壤中CO₂ガス濃度推定式を得ることができた。

謝辞：本研究を行うにあたり群馬県並びに川場村役場からの貴重な資料や観測地の提供があった。さらに、平成15～17年度(財)河川環境管理財団の研究助成を受けていることを記すとともに多くの方々適切な助言を頂いた。ここに記し、深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 環境省：京都議定書目標達成計画，pp. 47-48，2005。
- 2) 濱田洋平・田中正：ガス検知管を用いた簡易な土壌空気中のCO₂濃度の測定法，日本水文科学会誌25，pp. 123-130，1995
- 3) 濱田洋平・田中正：森林土壌空気における二酸化炭素濃度の空間分布，日本水文科学会誌27，pp. 3-16，1997
- 4) 三谷智典・小杉緑子ら：ヒノキ人工林における土壌呼吸量の時間的・空間的変動，日緑工誌，pp. 153-158，2003
- 5) 島田博匡ら：異なる斜面位置の森林土壌におけるCO₂ガス濃度の季節変化，日本土壌肥科学会，pp. 170-177，1997
- 6) 小菅香苗・土屋十朗：森林小流域における物質動態に及ぼす諸要因の影響，修士学位論文，pp. 18-212004
- 7) 川場村国土利用計画，説明資料，pp. 5，1998
- 8) VAISALA：CO₂濃度計と気温影響について，VAISALA NEWS DOCUMENT，pp. 28，2004

(2005. 9. 30受付)