

氏名・(本籍)	たか むら ちか こ 高 村 近 子
学位の種類	博 士(理 学)
学位記番号	理博第2553号
学位授与年月日	平成22年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科, 専攻	東北大学大学院理学研究科(博士課程)地球物理学専攻 中部日本の冷温帯落葉広葉樹林における大気中二酸化炭素の 酸素同位体比の変動とその解釈
学位論文題目	(Variations of the oxygen isotopic ratio of atmospheric CO ₂ at cool-temperate deciduous broadleaf forest in the central part of Japan)
論文審査委員	(主査) 教授 中 澤 高 清 教授 青 木 周 司, 川 村 宏 准教授 山 崎 剛 主任研究員 村 山 昌 平 (産業技術総合研究所)

論 文 目 次

第1章 序論	1
第2章 観測	6
2-1 観測場所	6
2-2 観測手順	8
2-2-1 観測概要	8
2-2-2 空気試料の採取	8
2-2-3 水試料の採取	11
2-2-4 気象要素、CO ₂ 濃度、CO ₂ フラックスの測定	13
2-3 試料分析	14
2-3-1 CO ₂ 濃度の測定	14
2-3-2 CO ₂ 濃度の標準試料	16
2-3-3 CO ₂ 精製	16
2-3-4 CO ₂ と水の同位体分析	17
2-3-5 δ ¹³ Cとδ ¹⁸ Oの導出方法	22
2-3-6 CO ₂ と水の同位体標準試料	26
2-4 補正とデータセレクション	29
2-4-1 N ₂ O補正	29
2-4-2 同位体スケール補正	31
2-4-3 ストアリング補正	32
2-4-4 データセレクション	33

第3章 大気中 CO ₂ の δ ¹⁸ O の日変動	35
3-1 日変動の特徴.....	35
3-2 日中の変動とその要因.....	36
3-2-1 日中の変動の特徴.....	36
3-2-2 日中の同位体分別の推定.....	37
3-2-3 日中の同位体フラックスの変動.....	51
3-3 夜間の変動とその要因.....	53
3-3-1 夜間の変動の特徴.....	53
3-3-2 夜間における呼吸の δ ¹⁸ O の推定.....	54
3-3-3 夜間における呼吸の δ ¹⁸ O の比較.....	57
第4章 大気中 CO ₂ の δ ¹⁸ O の季節変動	61
4-1 データセットとカーブフィッティング.....	61
4-2 日中の季節変動とその要因.....	62
4-2-1 日中の季節変動の特徴.....	62
4-2-2 春季から秋季の変動の要因.....	64
4-2-3 大気中 CO ₂ の δ ¹⁸ O の収支解析.....	66
4-2-4 冬季から春季の変動の要因.....	71
4-3 夜間の季節変動とその原因.....	74
4-3-1 夜間の季節変動の特徴.....	74
4-3-2 夜間における呼吸の δ ¹⁸ O の季節変動.....	75
第5章 結論と今後の課題	80
表	84
図	97
Appendix	177
参考文献	189
謝辞	203

論文内容要旨

大気中 CO₂ の酸素同位体比 (δ¹⁸O) は陸域炭素循環の解明に役立つと期待されている。第1章においては、本研究の背景と意義、目的、およびこれまでになされた大気中 CO₂ の δ¹⁸O の研究の成果と問題点についてまとめた。

本研究においては、陸上生物活動に関わる大気中 CO₂ の δ¹⁸O の変動およびその支配プロセスを理解するために、岐阜県高山市の中心部から東方向約 15km に位置する冷温帯落葉広葉樹林 (36°08'N、137°25'E、標高 1420 m) において、大気と水を対象とした系統的観測を2004年1月から2008年5月までの約4年半に渡って実施した。その際、生物季節の異なる時期における大気中 CO₂ の δ¹⁸O の日変動を明らかにするために、5-10月の期間に計12回の大気の集中的な観測を行い、多高度・高頻度の大气中の CO₂ 濃度と δ¹⁸O、水の δ¹⁸O、各種気象要素を測定した。また、大気中 CO₂ の δ¹⁸O の季節変動を明らかにするために、

全ての季節を含む定期的な観測を行い、大気中の CO_2 濃度と $\delta^{18}\text{O}$ 、水の $\delta^{18}\text{O}$ 、各種気象要素を測定した。第2章ではこれらの観測手法について詳述した。

第3章では5-10月の期間に観測された大気中 CO_2 の $\delta^{18}\text{O}$ の日変動について考察した。大気中の CO_2 濃度は、光合成と呼吸の影響を強く受け、日中に低く、夜間に高くなる日変動を明瞭に示した。一方、 $\delta^{18}\text{O}$ は CO_2 濃度とは逆に日中に高く、夜間に低くなる傾向を示したが、振幅や位相が CO_2 濃度の変化とはやや異なる場合も観測された。観測で得られた大気中 $\delta^{18}\text{O}$ の日変動を日中と夜間に分け、その要因を考察した。まず、日中の変動について気象要素と比較したところ、相対湿度と強い負の相関があることが判明した。このような関係は、日中の相対湿度の低下に伴う蒸散の活発化により $\delta^{18}\text{O}$ が高くなった葉内水と大気から葉内へ侵入した CO_2 が酸素同位体平衡し、その一部の CO_2 が大気へ戻ることによって生じたものと考えられる。日中における大気中 CO_2 の $\delta^{18}\text{O}$ の変動を定量的に解釈するために、光合成と呼吸の同位体フラックスを計算し、観測された大気中 CO_2 の $\delta^{18}\text{O}$ の時間変動率と比較した結果、両者の変動は概ね一致しており、大気中 CO_2 の $\delta^{18}\text{O}$ は生物活動の影響を強く受けていることが明らかとなった。また、呼吸の同位体フラックスに比べて光合成の同位体フラックスの変動が大きく、日中の大気中 CO_2 の $\delta^{18}\text{O}$ の変動は、葉内水の $\delta^{18}\text{O}$ を反映した光合成の同位体フラックスによって引き起こされていることが明らかになった。

光合成の同位体フラックスを計算する際に必要となるパラメータ ρ (光合成によって植物体内に取り込まれる CO_2 フラックスに対する、葉に一旦入り再び大気に戻る CO_2 フラックスの割合) を、呼吸によって放出される CO_2 の $\delta^{13}\text{C}$ を用いて推定し、日中の平均的な値を求めたところ、過去に報告された値と概ね一致していた。また、 ρ の時間変動を計算し、それをを用いて光合成の同位体分別を求め、日中の平均的な $\delta^{18}\text{O}$ を用いて計算した光合成の同位体分別と比較した結果、相対湿度が低く乾燥している条件下では、時間変動を考慮しないと、光合成の同位体分別を過大評価することが明らかになった。

夜間における大気中 CO_2 の $\delta^{18}\text{O}$ の変動は、従来は土壤呼吸によって決定されると考えられていたが、本研究においては、土壤呼吸の寄与だけでは説明できない変動も観測された。そこで、土壤呼吸に加えて葉呼吸の $\delta^{18}\text{O}$ も推定し、大気測定から得られた生態系呼吸の $\delta^{18}\text{O}$ と比較した。その結果、生態系呼吸の $\delta^{18}\text{O}$ は土壤呼吸と葉呼吸の2つの影響を受けて変化しており、特に落葉樹の展葉期に葉呼吸の寄与が大きくなることが新たに判明した。

第4章では、2004年1月から2008年5月の期間に定期的に観測された大気中 CO_2 の $\delta^{18}\text{O}$ の季節変動を日中と夜間に分けて考察した。まず、日中の観測から得られた大気中 CO_2 の $\delta^{18}\text{O}$ の季節変動を、2004-2007年に日本上空の0-4 kmで観測された平均的な季節変動と比較した結果、春季から秋季の $\delta^{18}\text{O}$ は生物活動の影響を強く受けていることが示唆された。そこで、この期間に着目し、本観測地を含む世界の様々な観測地において測定された大気中 CO_2 の $\delta^{18}\text{O}$ を諸気象要素と比較したところ、光合成有効放射量 (または日射) および相対湿度と良い相関があることが見いだされた。光合成フラックスが光合成有効放射量に強く依存するとともに、光合成の同位体分別に影響を与える葉内水の $\delta^{18}\text{O}$ が相対湿度と深い関係にあることを考慮すると、このような良い相関は、両者の効果によって決定される光合成の同位体フラックスが大気中 CO_2 の $\delta^{18}\text{O}$ の季節変動を主に支配していることを意味する。

2005-2007年に観測された大気中 CO_2 の $\delta^{18}\text{O}$ の季節変動は、ヨーロッパや北米で観測された結果とは明らかに異なっており、東アジア域の特徴である梅雨の影響を受けて夏季に低い値を示した。一方、2004年は梅雨がほとんどなかった特異な年であったため、この年の $\delta^{18}\text{O}$ の季節変動は梅雨がないヨーロッパや北米での変動と類似していた。

日中における大気中 CO_2 の $\delta^{18}\text{O}$ の季節変動を定量的に解釈するために、光合成と呼吸の同位体フラッ

クスを計算し、実際に測定された大気中 CO_2 の $\delta^{18}\text{O}$ の時間変動率と比較した。その結果、春季から秋季にかけて両者は似た変動を示しており、春季には光合成の同位体フラックスによって大気中 CO_2 の $\delta^{18}\text{O}$ が時間の経過とともに増大し、夏季には光合成の同位体フラックスが低下し、呼吸の同位体フラックスが増加することにより、大気中 CO_2 の $\delta^{18}\text{O}$ が時間的に減少することが明らかになった。

一方、冬季から春季にかけては、大気中 CO_2 の $\delta^{18}\text{O}$ の時間変動率は、生態系の同位体フラックスとは異なった変動を示した。すなわち、冬季から春季における大気中 CO_2 の $\delta^{18}\text{O}$ は時間の経過とともに増加しており、本観測地付近の呼吸活動による同位体フラックスでは説明することができない。そこで、高い $\delta^{18}\text{O}$ を持つ空気塊が周囲から輸送されてきたためと考え、後方流跡線解析を行って空気塊の起源を調べたところ、成層圏でオゾンと酸素同位体交換を行って $\delta^{18}\text{O}$ が高くなった CO_2 を含む大気が対流圏上部に侵入し、長距離輸送されて本観測地に到達している可能性が高いことが明らかになった。

次に、夜間に観測された大気中 CO_2 の $\delta^{18}\text{O}$ の季節変動について考察した。夜間の CO_2 濃度は夏季に下層で大きく増加し、 $\delta^{18}\text{O}$ は逆に大きく低下し、結果として両者の季節変動の振幅は下層ほど大きかった。このような高度による振幅の違いは、 CO_2 の主な放出源が土壌呼吸であることを反映し、その影響を下層ほど強く受けるために生じたと考えられる。大気中の CO_2 濃度への生物呼吸の影響を調べるために、夜間から日中の CO_2 濃度を差し引いて得られた値の季節変動を呼吸の CO_2 フラックスと比較したところ、呼吸活動の季節性を反映して、各層において両者の変動パターンは良く一致していることが明らかとなった。 $\delta^{18}\text{O}$ についても同様な比較を行ったところ、下層では同位体フラックスの季節変動と変動パターンは一致していたが、高度によって変動パターンに違いが見られ、上層では土壌呼吸とは異なる $\delta^{18}\text{O}$ を持つ葉呼吸の寄与があると考えられた。

夜間の $\delta^{18}\text{O}$ の季節変動への土壌呼吸と葉呼吸の寄与を調べるために、全ての季節を含む夜間の大気観測データから生態系呼吸の $\delta^{18}\text{O}$ の季節変動を求めた。また、比較のために、 CO_2 フラックス観測とチャンパー観測から得られた葉・土壌呼吸 CO_2 フラックス、および生態系モデル Biome-BGC から計算された葉・土壌呼吸 CO_2 フラックスを用いて生態系呼吸の $\delta^{18}\text{O}$ を計算した。これらの方法によって得られた生態系呼吸の $\delta^{18}\text{O}$ を比較することにより、展葉期には葉呼吸の寄与が増大しており、秋季にはほとんど土壌呼吸によって支配されていることが確かめられた。また、冬季から春季には、日中の季節変動と同様に、高い $\delta^{18}\text{O}$ を持つ空気輸送の影響がある可能性が示唆された。

第5章では、本研究を遂行することによって得られた大気中 CO_2 の $\delta^{18}\text{O}$ の変動とその解釈をまとめ、今後の課題について検討した。

論文審査の結果の要旨

大気中 CO_2 の 酸素同位体比 ($\delta^{18}\text{O}$) の挙動を明らかにするために、岐阜県高山市近郊の冷温帯落葉広葉樹林 (36°08'N、137°25'E、標高1420m)において、大気と水を対象とした観測を2004年1月から約4年半に渡って実施した。また、得られた結果を解析することにより、 $\delta^{18}\text{O}$ の日変動と季節変動の特徴を明らかにするとともに、変動を支配するプロセスを検討した。

その結果、(1) 日中における大気中 CO_2 の $\delta^{18}\text{O}$ の変動は、主に大気の相対湿度に呼応して変化する葉内水の $\delta^{18}\text{O}$ の影響を強く受けた光合成の同位体フラックスによって引き起こされる、(2) 光合成の同位体フラックスを推定する際には、光合成によって植物体内に取り込まれる CO_2 フラックスに対する、葉に一旦入り再び大気に戻る CO_2 フラックスの割合を表す ρ の時間変化を考慮する必要がある、(3) 生態系呼吸の $\delta^{18}\text{O}$ には土壌呼吸と葉呼吸が関与しており、夜間の大気中 CO_2 の $\delta^{18}\text{O}$ の変動には、従来から知られていた土壌呼吸のみならず葉呼吸の $\delta^{18}\text{O}$ も重要な役割を果たしている、(4) 生態系呼吸の $\delta^{18}\text{O}$ に対する葉呼吸と土壌呼吸の寄与は、植物の成長期間においては時間の経過とともに変化しており、特に落葉樹の展葉期に葉呼吸の寄与が大きくなる、(5) 日中の大気中 CO_2 の $\delta^{18}\text{O}$ の季節変動は、5-10月には主に光合成の同位体フラックスの影響を受けており、特に光合成有効放射量と相対湿度が重要な支配要素となっている、(6) 日中の大気中 CO_2 の $\delta^{18}\text{O}$ の季節変動は、東アジアの特徴である梅雨による相対湿度の上昇と光合成有効放射量の減少の影響を強く受ける、(7) 冬季から春季にかけての大気中 CO_2 の $\delta^{18}\text{O}$ は、成層圏から沈降してきた高い $\delta^{18}\text{O}$ を持つ空気の輸送によって支配されている、ということが明らかになった。

以上の結果は、高村近子が自立して研究活動を行うために必要な高度の研究能力と学識を有していることを示している。したがって、高村近子提出の博士論文を博士（理学）の学位論文として合格と認める。