

名古屋地域のクロマツ年輪中の炭素・酸素同位体比から探る環境変動
Environment change estimated from tree-ring carbon and oxygen isotopic ratios of pine trees
in Nagoya

林和樹*
Kazuki Hayashi*

名古屋大学大学院環境学研究科

Earth and Environmental Sciences, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, Nagoya
464-8601, Japan.

Abstract

We analyzed stable carbon, oxygen isotopic compositions of annual ring cellulose of two pine trees (*Pinus thunbergii*), M1 and M2, with annual ring of about 50 years, grown in the campus of Nagoya University in Nagoya, in order to investigate the relationships between the annual tree ring data and climatic and/or artificial factors in the urban area. The result shows that $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values have higher negative correlation with the climate factor of relative humidity of the each growth season. And, late wood of sample pine has higher correlation with relative humidity on the growth season in comparison with early wood. In addition, we examined principal-component regression analysis. As a result, those multiple correlation coefficient can be explained with precision of about 0.5, though this is insufficient for restoring the $\delta^{13}\text{C}$ values in past annual tree ring precisely. This technique can analyze a lot of ingredients of the weather factor or the environmental factor, which act on the growth of the annual ring continually.

Keywords: Cellulose; $\delta^{13}\text{C}$; $\delta^{18}\text{O}$; Relative humidity; Analysis of principal-component regression

キーワード: セルロース; $\delta^{13}\text{C}$; $\delta^{18}\text{O}$; 相対湿度; 主成分回帰分析

1. はじめに

樹木年輪は古気候復元に対する高い分解能と適応範囲の広域性、また埋没木や文化財になっても情報を失わない保存性などにより、古来より様々な手法を用いて研究が行われてきた。樹木年輪の成長は、気候変動や立地条件、生育環境の違いによる外的な環境因子と内的な遺伝生理因子の変動によって影響を受けているが、近年の日本では工業化に伴う化石燃料の大量燃焼や酸性雨による土壌汚染など気象因子以外の環境因子の影響が強いと考えられる。したがって、現代の日本において生育していた樹木年輪を用いて研究を行う場合、気象因子以外の環境因子による影響の強い期間を特定・分離した上で、どの気象因子の影響がより強いかを考察する必要がある。また、年輪データから過去の気候を量的に復元しようとする場合には、年輪データと気象データとの単相関関係を調べるだけでなく、連続的に作用すると考えられる気象データとの重関数関係、およびその関数が説明する年輪データの変動の割合を明らかにする必要がある。本研究では、過去 50 年での環境変動が大きい名古屋の都市部に生育していた樹木から年輪セルロース中の炭素・酸素安定同位体比を測定し、気象データとの単相関関係、および多変量解析を用いた重相関関係を求めた。年輪データは 1 年輪毎ではなく、早材と晩材に分けることによって季節ごとの変動との相関を求めている。また、 ^{14}C 濃度の測定も行ったので、結果をまとめて報告する。

2. 分析試料と分析方法

測定試料は名古屋大学敷地内 (N35° 09' 19.565" E136° 58' 06.928") で伐採された2本のクロマツ (*Pinus thunbergii*) である (クロマツ1: M1, クロマツ2: M2)。樹齢はM1が約49、M2が約70である。生育当時、M1のすぐ近くには焼却炉が存在していた。その焼却炉の稼働時期について詳細は不明だが、同大学内の他の焼却炉のデータから、1970年代頃から1980年代後半まで稼働していたと推測される。試料はマイクロトームを用いて20 μ m毎に切断し、年輪を1年毎に晩材と早材とに分けて剥離した後、亜塩素酸ナトリウムなどを用いてセルロースの抽出を行った。ただし、本研究では後に微量な¹⁴C濃度の測定を行うため、僅かな有機元素の混入も防ぐために脱リグニン処理における酸性条件下を酢酸ではなく塩酸を用いて処理を行っている。試料の測定には、 $\delta^{13}\text{C}$ は、EA (元素分析計) -真空ラインシステムを用いて試料のガス化、CO₂の分離・精製を行い、気体用質量分析計を用いて測定した。 $\delta^{18}\text{O}$ は、抽出されたセルロースから北海道大学低温科学研究所のTCEA (熱分解元素分析計) -IRMSによって測定を行った。

3. 測定結果

本試料の年輪幅の測定結果をFig.1に、 $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{18}\text{O}$ の測定結果をFig.2にそれぞれ示す。測定は樹木の中心部からの放射方向に対して、年輪幅は三方向の測定値から平均値を求め、 $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{18}\text{O}$ は一方向のみの測定を行っている。 $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{18}\text{O}$ の経年変動については、どの放射方向でも年輪幅の変動は高い相関を示すことがわかっている。したがって、一方向の測定値をその樹木の代表する変動値とみることができ (Syo, 2001; Tsuji et al., 2004)。

Fig.1から、M1とM2の年輪幅に相関がないことが分かる ($r=0.008$)。M2は比較的安定した成長がみられるが、M1については急激な肥大生長と委縮が見られる。年輪幅の成長は、同地域の同種の樹木であっても気象因子以外の影響を強く受けるため、特に環境変動が大きい都市部の樹木では年輪幅のみによる古環境復元は難しいと考えられる。

Fig.2の(a)と(b)から、 $\delta^{13}\text{C}$ は早材・晩材間で大きな差がないことが分かる。M1とM2とでは1970年代に特に大きな乖離が存在する。それに対し、(c)から $\delta^{18}\text{O}$ は早材・晩材間で大きな差があり、 $\delta^{13}\text{C}$ に比べてより顕著に成長季節の気象要素の影響を受けていることが分かる。また、同じM1でも $\delta^{18}\text{O}$ には1970年代の高いピークは存在せず、この期間は気象因子以外の影響を強く受けていた可能性がある。しかし、 $\delta^{13}\text{C}$ ・ $\delta^{18}\text{O}$ はともに約50年を通して上昇の傾向があり、共通の影響のある因子が存在すると考えられる。本研究の考察では $\delta^{13}\text{C}$ の値を、異常なピークが存在したM1の1974年~1978年を除いて、M1とM2を平均化した値を気象データとの相関分析に用いる。

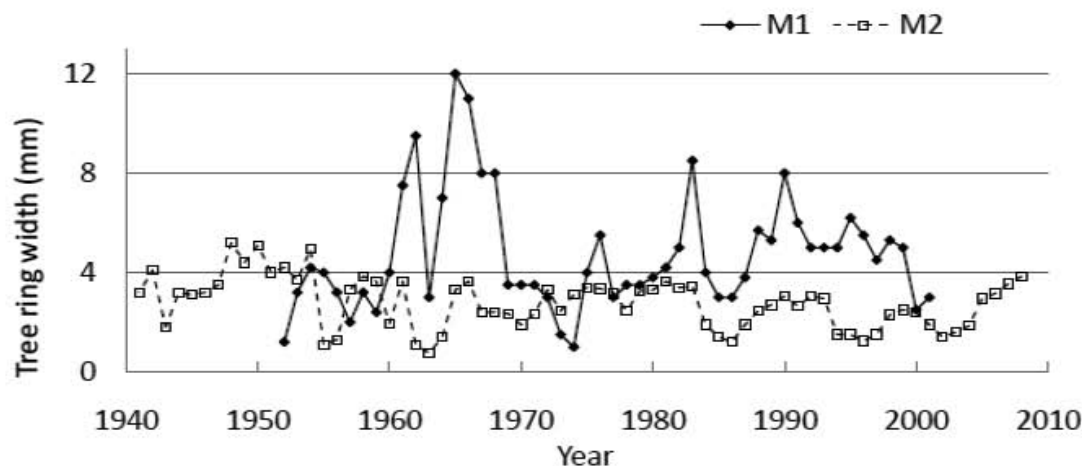


Fig.1 Annual ring width of sample trees (*Pinus thunbergii*).

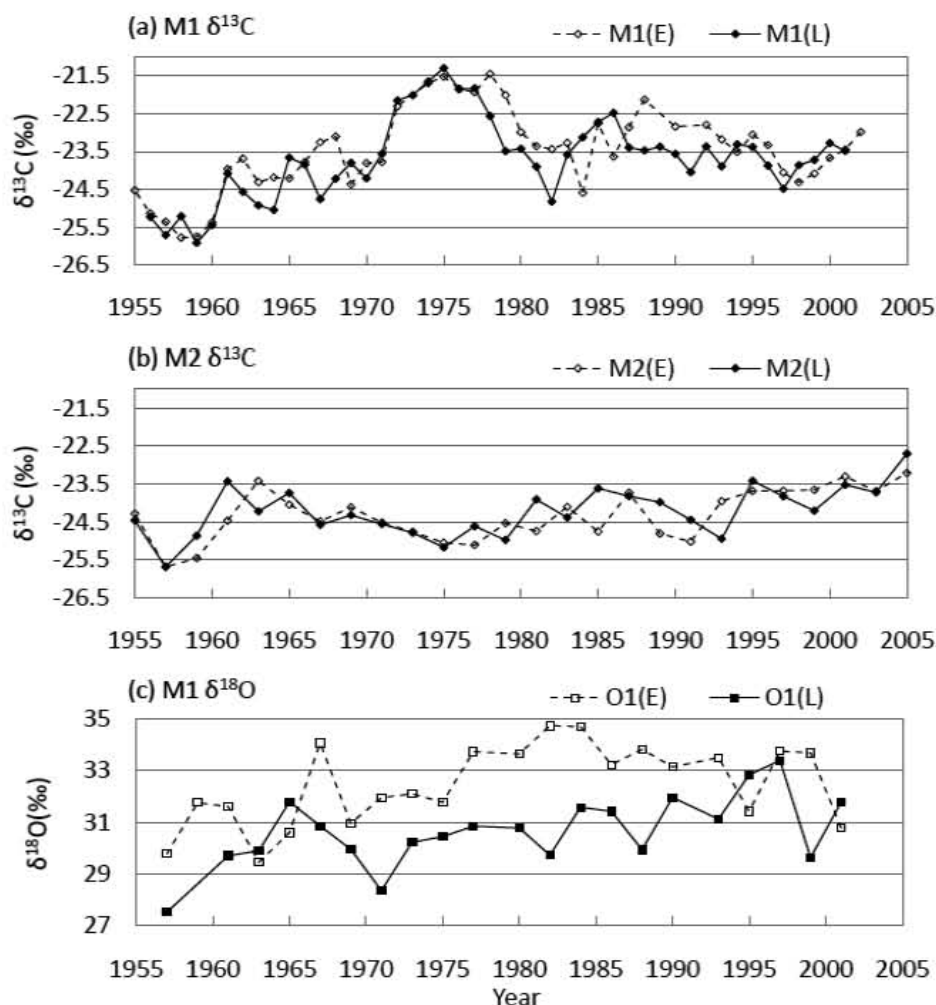


Fig.2 The fluctuation of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ of the sample Japanese pine.

5. $\delta^{13}\text{C}$ ・ $\delta^{18}\text{O}$ と気象要素の単相関関係

本試料マツの $\delta^{13}\text{C}$ ・ $\delta^{18}\text{O}$ の年変動と気象要素との影響を見るために、試料採取地域の各気象要素（日平均気温、気圧、相対湿度、日照時間、降水量）との相関を調べた。気象データは気象庁名古屋気象台の名古屋地域のデータを引用している（引用元: Japan Meteorological Agency, <http://www.jma.go.jp/jma/index.html>）。 $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{18}\text{O}$ の年輪データは早材と晩材に分けているため、気象データも同様に成長季節で平均値をとる。この地域の気象条件では、マツは3月下旬から6月中旬まで早材部が成長し、6月下旬から10月下旬まで晩材部が成長する（Yamashita et al., 2006）。ただし、晩材部の10月の成長分は極めて少ないので、晩材の成長期を7~9月と考え、一年を3か月毎に四分割し（1~3月、4~6月、7~9月、10~12月）、3か月平均の気象データとして使用している。

Table.1 に成長季節の気象データと年輪データとの相関係数を示す。ただし、 $\delta^{13}\text{C}$ は M1 と M2 の平均値（1974年~1978年は M2 の値）を用いて算出している。 $\delta^{13}\text{C}$ ・ $\delta^{18}\text{O}$ とともに最も高い相関が示されたのは相対湿度と晩材で、ともに $r=-0.7$ を示す。相対湿度と早材も $r=-0.5$ 以上の高い負の相関が示された。Fig.3 に、 $\delta^{13}\text{C}$ と相対湿度を年代軸に合わせて図示する。 $\delta^{13}\text{C}$ は、次いで日平均気温との正の相関が高い。 $\delta^{18}\text{O}$ については、Tsuji(2006)などの報告から相対湿度と降水量の2成分との相関が高いと予想されたが、名古屋のクロマツについては降水量より気温や日照時間といった気象要素との相関が高い。

樹木年輪のセルロースの生成過程で炭素同位体比の変動は、気孔を介した CO_2 の交換と、光合成による炭素の固定という大きく分けて2つのイベントに左右される (Farquhar et al., 1989)。この2成分、気孔コンダクタンスと光合成速度は、日本のように湿潤で、かつマツのように乾燥などに強い種であれば、年間を通して十分な土壌水分量を得ることができるので、気孔コンダクタンスは相対湿度に、光合成速度は気温に大きく作用されることが考えられる (Edwards et al., 2000)。本試料のクロマツは名古屋の都市部に生育していた樹木であるため、排ガスなど汚れた大気の影響からより気孔に負荷がかかり、相対湿度と高い相関を示したと考えられる。

	$\delta^{13}\text{C}$		$\delta^{18}\text{O}$	
	Early wood	Late wood	Early wood	Late wood
Temperature	0.351	0.475	0.325	0.392
Atmospheric pressure	-0.217	0.088	-0.193	0.001
Relative humidity	-0.598	-0.705	-0.529	-0.709
Sunshine duration	0.215	0.305	0.401	0.364
Precipitation	-0.131	-0.367	-0.135	-0.276

Table.1 Correlation coefficients on linear regressions between $\delta^{13}\text{C}$ and climatic data.

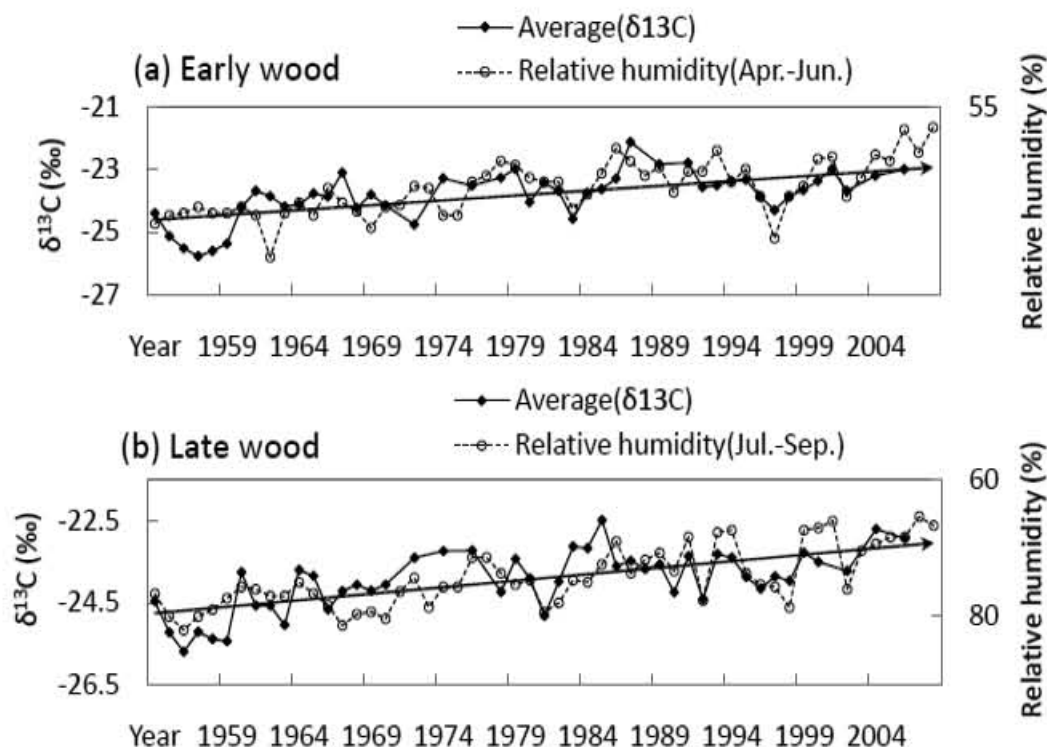


Fig.3 Comparison of inter-annual variations in $\delta^{13}\text{C}$ (the average of M1 and M2) and relative humidity.

6. 早材と晩材の比較

Table.1の結果より、相対湿度については単相関係数から晩材の方が早材より高い負の相関を示すことが分かる。しかし、これは早材晩材ともに成長季節の気象データと比較を行ったものであるため、前後の月や前年度の気象因子の影響を考慮し、考察を行う必要がある。そこで、 $\delta^{13}\text{C} \cdot \delta^{18}\text{O}$ と相対湿度のデータから約50年間の年次変動傾向を取り除き規準化を行い、前後の月との相関を調べた。その結果をFig.4に示す。(b)から、晩材については $\delta^{13}\text{C} \cdot \delta^{18}\text{O}$ ともに成長季節のみ高い負の相関を示し、成長季節の影響を顕著に保存していることがわかる($\delta^{13}\text{C}_{\text{r}}=-0.469$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{r}}=-0.566$)。それに対し、(a)より早材は成長季節に顕著な相関は存在しない。この結果から早材の炭素は、前年度に固定された炭素を使用していることが考えられる。東日本のブナでは、年輪の成長は前年度の気温と高い相関を示すことがHoshino et al. (2008) などにより報告されている。この結果から、成長季節の影響をより顕著に記憶している晩材のみを使用する方が、高い精度をもって古気候復元の研究を行うことができると考えられる。

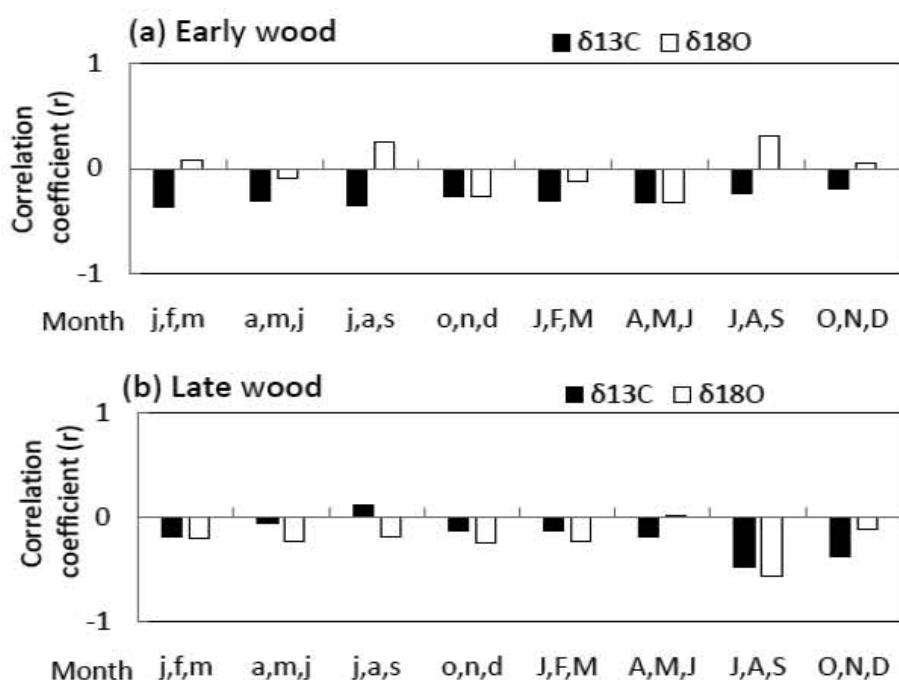


Fig.4 Correlation coefficients of the mean of three months of the relative humidity with the $\delta^{13}\text{C}$ values.

7. 主成分回帰分析法

単相関を調べた結果、名古屋のクロマツは相対湿度と最も高い相関を示すことが分かった。しかし、年輪データから過去の気候を量的に復元しようとする場合には、年輪データと気象要素との単相関関係を調べるだけでなく、連続的に作用すると考えられる気象要素との関数関係、およびその関数が説明する年輪データの変動の割合を明らかにする必要がある。そこで、本研究では多変量解析の主成分回帰分析法を用いて重相関関係を調べることにより、気象因子とそれ以外の外的環境因子の影響の存在する期間の特定などを試みた。主成分回帰分析法とは、多変量解析の主成分分析法と重回帰分析法を組み合わせた手法で、主成分分析による主成分スコアを回帰分析の説明変数に用いることにより、重回帰分析における多重共線性の問題を排した手法である。名古屋地域の気象データ（日平均気温、気圧、相対湿度、日照時間、降水量）について主成分分析を行った結果、固有値1以上で2つの主成分を得た。固有値による寄与率から、これら2つの主成分で名古屋地域の気候変動の72.8%を説明している。これら2つの主成分を用いて重回帰分析により回帰係数を決定した。このようにして得られた回帰方程式による予測値と実測値の比較をFig.5に示す。なおFig.5

は、単相関の考察結果から高い相関を得られた晩材($\delta^{13}\text{C}$)についての主成分回帰分析の結果を示している。予測値と実測値の間の重相関係数は $r=0.624(R^2=0.389)$ であった。これは5%の危険率で有意であるが、推定の精度としてはやや低いものである。Fig.5 から、1970年代だけでなく1965年以前など予測値と実測値の乖離がみられ、気象以外の環境因子の影響の可能性が考えられる。1950年代の乖離は樹木年輪成長の若木効果の可能性などが考えられる。しかし、1985年以降は予測値と実測値で高い相関を示しており、気象以外の環境因子の影響を残していないことが分かる。これがM1の生育時に付近に存在していた焼却炉の影響なのか、名古屋市における高度経済成長期の大気汚染による影響なのか特定は困難であるが、都市部の樹木であっても1985年以降の近年の年輪試料であれば高い精度で復元は可能であると考えられる。

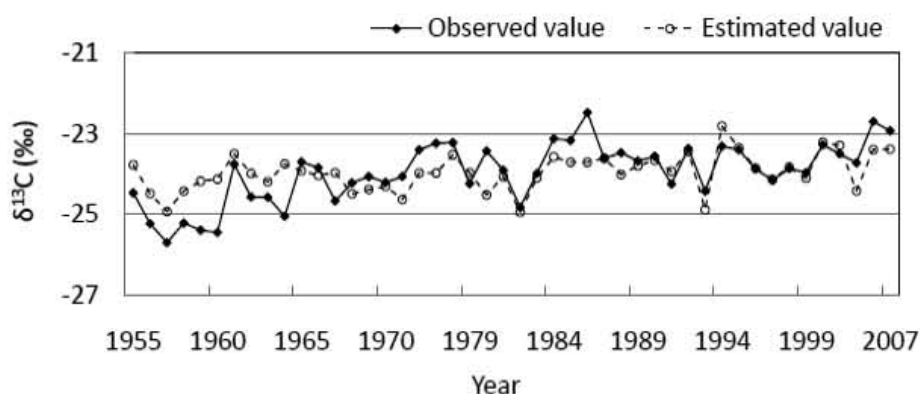


Fig.5 Plots of the estimated and observed $\delta^{13}\text{C}$ values.

8. おわりに

本研究では、 $\delta^{13}\text{C} \cdot \delta^{18}\text{O}$ について測定を行った。 $\delta^{13}\text{C} \cdot \delta^{18}\text{O}$ については、ともに気象因子の相対湿度と高い負の相関が示され、早材に比べ晩材の方が気象因子の影響をより顕著に記録していることが分かった。また、主成分回帰分析による重相関関係を調べた結果、やや低い精度ではあるが、1985年以降で気象データによる予測値との高い相関が示され、近年の年輪ほど気象因子の影響を強く記憶していることが分かった。この主成分回帰分析法は樹木に作用する気象成分を多数同時に扱い、しかも年輪の成長に連続的に作用していると考えられるため、今後の改良によっては気象因子と炭素・酸素安定同位体比だけでなく、多成分因子の変動に対する樹木の反応を知る手段として有効な手法であると考えられる。今後は、早材と晩材の成分を同時に扱うことや、早材の前年度の影響など時間的な遅れを伴った気象因子の影響などをどのようにして組み込むかということが課題となってくる。

9. 謝辞

本研究を行うにあたり、ご指導頂きました南先生、中村先生に心から感謝を申し上げます。そして、 $\delta^{18}\text{O}$ を測定するにあたり多大なご協力を頂いた名古屋大学環境学研究科の中塚先生、樹木試料の採取や焼却炉の情報などについてお世話をかけました名古屋大学環境学研究科の田中先生、セルロース調製を行うにあたりご指導頂きました名古屋大学年代測定センターの小田寛貴博士、試料切断の際に助力を頂きました名古屋大学農学部の竹中先生および技術部の方々、以上の方々に心からの感謝を申し上げます。

1 0. 参考文献

- Boettger, T. (2007) Wood Cellulose Preparation Methods and Mass Spectrometric Analyses of $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$, and Nonexchangeable $\delta^2\text{H}$ Values in Cellulose, Sugar, and Starch: An Interlaboratory Comparison. *Anal. Chem.* 79, 4603-4612.
- Cullen, E. L. and Grierson, F. P. (2006) Is cellulose extraction necessary for developing stable carbon and oxygen isotopes chronologies from *Callitris glaucophylla*. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology* 236, 206-216.
- Edwards, T. W. D., Graf, W., Trumborn, P. (2000) $\delta^{13}\text{C}$ response surface resolves humidity and temperature signals in trees. *Geochimica et cosmochimica Acta*, 64, 161-167.
- Farquhar, G. D., O'Leary, M. H. and Berry, J. A. (1982) On the relationship between carbon isotope discrimination and intercellular carbon dioxide concentration in leaves. *Aust. J. Plant Physiol.*, 9, 121-137.
- Farquhar, G. D., Ehleringer, J. R. and Hubick, K. T. (1989) Carbon isotope discrimination and photosynthesis. *Plant Physiol.* 40, 503-37.
- Fritts, H. C. (1976) *Tree Rings and Climate*. Academic Press, London, 567.
- Fritts, H. C., Blasing, J. T., Hayden, P.B. and Kutzbach, K.E. (1971) Multivariate techniques for specifying tree-growth and climate relationships and for reconstructing anomalies in paleoclimate. *Journal of Applied Meteorology.*, 10, 5.
- Hoshino, Y., Yonenobu, H., Yasue, K. (2008) On the radial-growth variations of Japanese beech (*Fagus crenata*) on the northernmost part of Honshu Island, Japan. *J Wood Sci*, 54, 183-188.
- Kitagawa, H. and Wada, H. (1993) Seasonal and secular $\delta^{13}\text{C}$ variations in annual growth rings of a Japanese cedar tree from Mt. Amagi, Izu Peninsula, Central Japan. *Geochem Journal*. 27, 391-396.
- Leonel da Silveira Lobo O'Reilly Sternberg (2008) Oxygen stable isotope ratios of tree-ring cellulose: the next phase of understanding. *New Phytologist*,
- Loader, N. J., Robertson, I., McCarroll, D. (2003) Comparison of stable carbon isotope ratios in the whole wood, cellulose and lignin of oak tree-rings. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 196, 395-407.
- McCarroll, D. and Loader, N. J. (2003) Stable isotopes in tree rings. *Quaternary Science Reviews*, 23, 771-801.
- Nakatsuka, T. and Ohnishi, K. (2004) Oxygen and carbon isotopic ratios of tree-ring cellulose in a conifer-hardwood mixed forest in northern Japan. *Geochemical Journal*, Vol. 38, 77-88.
- Sakata, M. and Suzuki, K. (1998) Assessment method for environmental stresses in trees using $\delta^{13}\text{C}$ records of annual growth rings. *Geochemical Journal*, Vol. 32, 331-338.
- Sharp, D. Z., Atudorei, V., Durakiewicz, T. (2001) A rapid method for determination of hydrogen and oxygen isotope ratios from water and hydrous minerals. *Chemical Geology* 178, 197-210
- Sho, K. and Takahashi, H. (2002) The stable carbon isotopic composition of annual rings of Japanese cypress grown in the southern coastal region of Lake Biwa and its correlation with climatic factors. *Summaries of Researches using AMS at Nagoya University*, 11, 184-194.
- Takahashi, H. and Yonenobu, H. (2001) Seasonal fluctuation of stable carbon isotopic composition in Japanese Cypress tree rings from the last glacial period-possibility of paleoenvironment reconstruction. *Radiocarbon*, Vol. 43, Nr 2A, 433-438.
- Tsuji, H., Nakatsuka, T., Takagi, K. (2006) $\delta^{18}\text{O}$ of tree-ring cellulose in two species (spruce and oak) as proxies of precipitation amount and relative humidity in northern Japan. *Chemical Geology* 231, 67-76.