

琵琶湖南岸地域のヒノキ年輪の安定炭素同位体比変動と 気象要素との相関分析

庄 建治朗⁽¹⁾・高橋 浩⁽²⁾・中村 俊夫⁽³⁾

⁽¹⁾ 名古屋工業大学工学部システムマネジメント工学科 〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町
Phone 052-735-5494 Fax 052-735-5503 show@ace.nitech.ac.jp

⁽²⁾ 名古屋大学大学院理学研究科地球惑星理学専攻 〒464-8602 名古屋市千種区不老町
Phone 052-789-2578 Fax 052-789-3095 haoki@gcl.eps.nagoya-u.ac.jp

⁽³⁾ 名古屋大学年代測定資料研究センター 〒464-8602 名古屋市千種区不老町
Phone 052-789-2578 Fax 052-789-3095 g44466a@nucc.cc.nagoya-u.ac.jp

1. はじめに

過去の気候環境を復元するために樹木年輪を利用する研究が多く行われてきた。その初期には年輪幅と気象要素を対応させ、樹木の生育環境の復元を試みるものであった (e.g., Fritts, 1976 ; Duvick and Blasing, 1981 ; 福岡, 1986 ; 佐藤・八嶋・田中, 1989 ; Briffa *et al.*, 1990 ; D'Arrigo and Jacoby, 1993 ; Graybill and Idso, 1993 ; Jacoby *et al.*, 1996 ; Briffa *et al.*, 1998)。著者らは琵琶湖南岸地域のヒノキ現生木(51 個体)の年輪幅解析により、この地域の年輪幅が 2~4 月平均気温と正の相関、5~7 月降水量と負の相関を有することを見出した(庄・池淵・宮井, 1996)。しかし、年輪幅が上記 2 つの気象要素で説明されるものとすれば、年輪幅のデータからある特定の気象要素のみを推定することは容易ではなく、それぞれの気象要素を復元するには年輪幅以外の種類の指標を見出す必要がある。また、その新たな指標は、2~4 月平均気温か 5~7 月降水量と高い相関を持つ必要がある。本研究ではそうした観点から、樹木年輪から得られる年輪幅以外の情報としてセルロース中の安定炭素同位体比($\delta^{13}\text{C}$)に着目し、その気象要素との関連性について分析を試みた。

セルロースは他の化学成分とは異なり、年輪形成時に樹木の細胞壁として合成され、年輪間を移動しない。従って、高い時間分解能を持ち、古環境解析のための試料として適している。さらに、光合成における $\delta^{13}\text{C}$ の分別を左右する樹木の生理条件 (Farquhar *et al.*, 1982) が日照、湿度といった気象条件により大きく変動することや、樹木の水利用効率との相関が多くの研究により報告されている (e.g., Donovan and Ehleringer, 1994 ; Marshall and Zhang, 1994 ; Wright *et al.*, 1994 ; Livingston and Spittlehouse, 1993, 1996)。これらのことから、樹木の $\delta^{13}\text{C}$ を用いることで、本研究の目的を達成する可能性が十分に高いと期待される。

Table 1 List of the sample trees

sample name	sampling date	growing interval	measured interval	diameter (cm)	locality	altitude (m)	direction of slope
TNK-A3	Nov., 1994	1832-1994 (163 rings)	1891-1994 (104 rings)	40	34° 55' 09" N 135° 59' 13" E	460	N
TNK-C8	Nov., 1994	1815-1994 (179 rings)	1902-1994 (93 rings)	40	34° 55' 55" N 135° 59' 20" E	500	SE
TNK-C9	Nov., 1994	1815-1994 (179 rings)	1901-1994 (94 rings)	50	34° 55' 55" N 135° 59' 20" E	500	NE
CHM-B22	Nov., 1994	1921-1994 (74 rings)	1936-1987 (52 rings)	50	35° 10' 30" N 136° 04' 25" E	250	W

2. 測定試料

測定した試料は全てヒノキ(*Chamaesparis obtusa*)で、根元付近(地上高 30~40 cm)を測定に供した。個体数は4つで、琵琶湖南方の太神山地域(大津市南部)から3個体(それぞれ TNK-A3、TNK-C8、TNK-C9 と表記)、約 30km 離れた長命寺地域(近江八幡市)から1個体(CHM-B22 と表記)採取した(Table 1)。試料採取地点の位置図を Fig. 1 に示す。

本研究では、ミクロトームでスライスした木材の柁目面切片(100~200 μ m)を顕微鏡下で1年輪ごとに分割し、各々亜塩素酸ナトリウムを用いた処理とアルカリ処理によりセルロースを単離した。セルロースは酸化銅とともにガラス管に真空封入し、850°C で2時間燃焼させた。その後発生したガスを真空ラインへ導入し冷媒(ethanol slush: -100°C)を用いて二酸化炭素に精製し、名古屋大学年代測定資料研究センターの質量分析計(Finnigan MAT-252)により $\delta^{13}\text{C}$ を測定した(青木・池田, 1996; 青木, 1997)。

3. 測定結果

4つの試料について測定した $\delta^{13}\text{C}$ の経年変動を、同じ測線における対応する期間の年輪幅の変動とともに Fig. 2 に示す。なお、CHM-B22の最外部数年分については、試料の損傷が著しいため $\delta^{13}\text{C}$ は測定できなかった。

TNK-A3の1970~1979年の期間は、約135度方向の異なる他の測線(TNK-A3-1とTNK-A3-2)についても $\delta^{13}\text{C}$ を測定し、同一個体内での測線間の相関を調べた。その結果、相関係数0.85と高い値が得られ、データ数は少ないがある1方向を測定することでその個体の $\delta^{13}\text{C}$ 変動を代表させてよいことが確かめられたといえる。

Table 2は、4個体全ての測定値が得られた1936~1987年の期間について個体間での $\delta^{13}\text{C}$ 値の相関係数を計算したものである。各個体の $\delta^{13}\text{C}$ 変動は、地域の個体に共

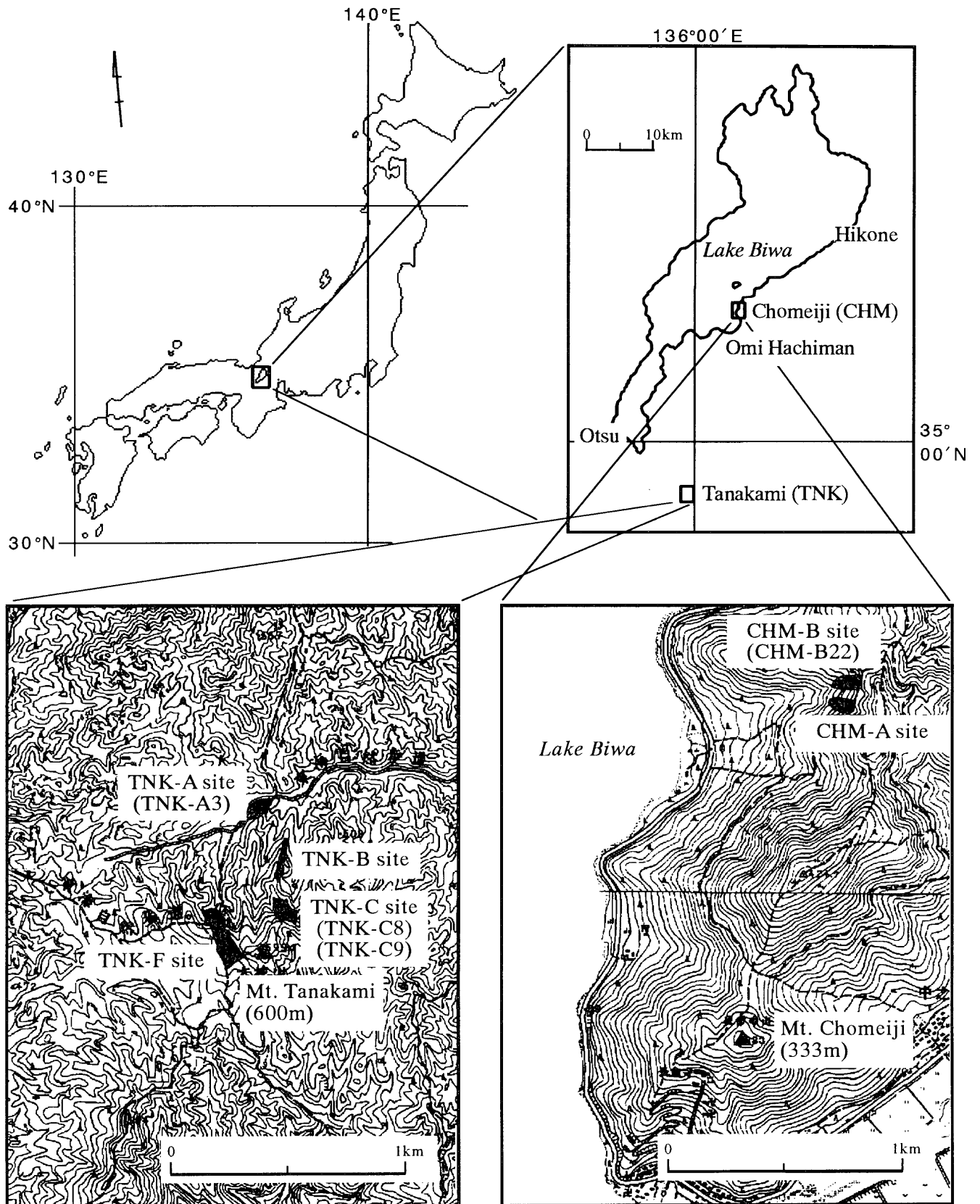


Fig. 1 Location map of the sampling site

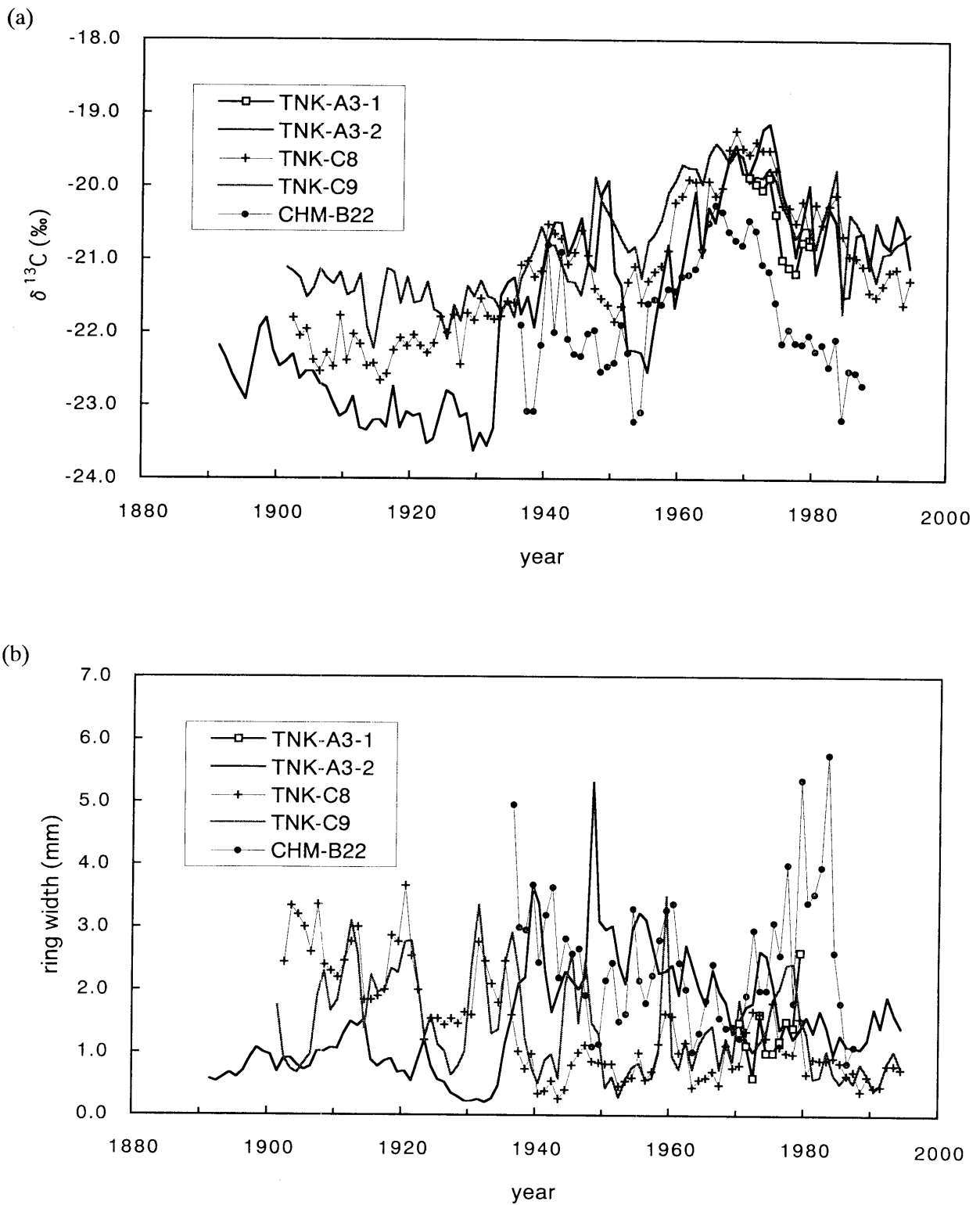


Fig. 2 $\delta^{13}\text{C}$ and tree-ring width records of the sample trees
 (a) Measured $\delta^{13}\text{C}$, (b) Tree-ring width (Sho, 1996)

通して見られる広域的な環境要因と、
 個体差による影響とが重ね合わさったもの
 と考えることができるが、本研究で測定した
 個体間相関は、どの組み合わせについても
 0.6 前後の値を示しており、 $\delta^{13}\text{C}$ 変動が
 主として広域的な環境要因(気象条件もこれ
 に含まれると考えられる)に支配

Table 2 List of cross correlation coefficients for each
 of the measured $\delta^{13}\text{C}$ series (1936-1987)

	TNK-A3-2	TNK-C8	TNK-C9
TNK-C8	0.70		
TNK-C9	0.57	0.62	
CHM-B22	0.52	0.66	0.69

されていることがわかる。また、長命寺地域と太神地域の個体間での相関係数は、太神地域の個体相互間でのそれと同程度に高く、このことから $\delta^{13}\text{C}$ 変動と密接な関係をもつ環境要因は少なくとも 30km 程度の空間スケールをもっていることが推測される。これらのことから、複数個体の測定値を平均することで個体の個別的要因が相殺されることが期待される。よって、本研究では 4 個体の測定値を平均して得た変動パターンを研究地域を代表する変動パターンと考えた。但し、長命寺地域の 1 個体(CHM-B22)は太神地域の 3 個体に比べ全体に値が小さいため、測定値の全期間にわたる平均値が太神地域 3 個体の対応する期間の平均値と等しくなるよう補正を加えた(具体的には CHM-B22 の各測定値に 1.21% を加算する)上で、平均することとした。また、TNK-A3-2 は 1932 年と 1933 年の間で急激な値の増加があり、それ以前では他の 2 個体とは異なる変動傾向を示している(Fig. 2, a)。この原因として近接地における倒木の可能性を著者らは考えている。倒木により日照条件が良くなると同位体比は上昇する(Hanba *et al.*, 1997)。一方、年輪幅はこの翌年以降数年間で急激に広がっている(Fig. 2, b)。同位体比と年輪幅の応答にタイムラグがあるのは、樹木が倒木によって空いたスペースにまず枝を伸ばしたため、樹幹部分の応答が遅滞したのではないかと予想される。これについては、今後検証していく予定である。いずれにしても、この期間については何らかの個別的要因による影響が大きいと考えられるため、代表パターンの計算には用いないこととした。4 個体全ての測定値が得られない期間については測定値の得られる個体のみで平均をとった。

4. 気象要素との相関

Fig. 2 (a)を見ると、樹木年輪の $\delta^{13}\text{C}$ 変動は、年々の変動よりも 10 年程度以上といった長期的な変動が比較的大きいことがわかる。しかし、気象データでは一般的に年々の変動が卓越しており、100 年程度の時間スケールで見ると傾向的な変動は比較的小さい(Fig. 4)。この両者の違いは、近年の大気汚染といった気象条件以外の環境要因が樹木年輪の $\delta^{13}\text{C}$ に強く影響を与えているためと考えられる(Sakata *et al.*, 1998)。本研究では、 $\delta^{13}\text{C}$ の長期変動成分は主として気象以外の環境要因によるものと考え、これを差し引いた上で気象データとの相関分析を行うことにした。具体的には、 $\delta^{13}\text{C}$ の代表パターンの 11 年移動平均(当該年と前後 5 年ずつを含む 11 年間の平均値)をとり、これを大気汚染等による影響分と見積もって当該年の値から差し引いた。こうし

て得られた $\delta^{13}\text{C}$ の変動パターンを基準化代表パターンと呼ぶことにする。一方、比較する気象要素には、月毎に集計した気温(大津)、降水量(大津)、降水日数(近江八幡)、日照時間(彦根)のデータを用いた。なお、樹木年輪は、単一の気象要素のみでなく複数の気象要素やその他の要因が複雑に影響して形成されるため、年輪データと気象データとの相関をとると数多くの要素との間に不明瞭な相関が表れ、その相関が気象条件によるものなのか、他の要因によって偶然に相関が表れたのか判断しにくい場合が多い。それ故、ここでは $\delta^{13}\text{C}$ の基準化代表パターンを奇数年と偶数年とに分け、それぞれについて気象データとの相関分析を行った。そしてその結果を比較し、一致して相関の見られた気象要素を抽出した。ここで、期間を前半と後半とに分割せず奇数年と偶数年とに分けたのは、時期による条件の違いを含まないできるだけ同質なデータの組を2つ作る必要があると考えたためである。

奇数年と偶数年のそれぞれについて計算した $\delta^{13}\text{C}$ と各気象要素との相関係数を、全年を対象に計算した場合とともに **Fig. 3** に示す。樹木年輪の $\delta^{13}\text{C}$ は、その年輪が形成された年の前年の10月から当該年の9月までの気象データと比較している。ヒノキの年輪形成時期が3月初旬から9月の終わりまでであるため(三好, 1952)、このような区切りでのデータ比較を行った。図の上部に*等の印を付したものは、相関係数に95%水準で有意性の認められた要素である(*: 奇数年、†: 偶数年、‡: 全年)。分析の結果、奇数年、偶数年ともに相関係数が95%有意なのは5月日照時間のみであった。2ヶ月以上4ヶ月までを集計した気象要素についても同様に分析を行ったところ、総合して最も高い相関を示したのは4~6月日照時間(相関係数0.44)であった。このように、樹木年輪の $\delta^{13}\text{C}$ 値と春から初夏の日照時間とが高い相関を示した結果は、Farquhar *et al.* (1982) が提唱した光合成における同位体分別を表すモデルから予想される結果とよく合致している。また、年輪幅と同様、樹木年輪の $\delta^{13}\text{C}$ 値にも初夏の降水量や降水日数との間に負の相関が見られた。これはこの時期の日照不足による $\delta^{13}\text{C}$ への影響が負の相関として表れたと見ることができる。 $\delta^{13}\text{C}$ の基準化代表パターンと4~6月日照時間との比較を時系列で表したものを **Fig. 4** に示す。

5. おわりに

本研究では、樹木の $\delta^{13}\text{C}$ 値が、離れた2地点間で類似した変動パターンを示すことが確かめられ、気象等の環境要因を反映している可能性が示された。そして、基準化した $\delta^{13}\text{C}$ の変動パターンと各気象要素との相関を計算したところ、初夏の日照との間に最も高い相関性が見出された。また、初夏の降水量・降水日数との間にも相関(負)が見られた。初夏の降水に関しては、データを2つに分けて分析したときにそれぞれで相関の表れ方がやや異なり、現時点では必ずしも有意とはいえない。しかし、さらに試料個体数を増やすことで変動パターンから個体の個別的要因が除去され、相関性がより明瞭になる可能性は十分にある。この時期の降水との相関は年輪幅についても共通してみられ、これら2つのデータを説明変数とすることで年輪幅や $\delta^{13}\text{C}$ のみを用いるよりも信頼性の高い気候復元を行える可能性が見出されたといえる。今後

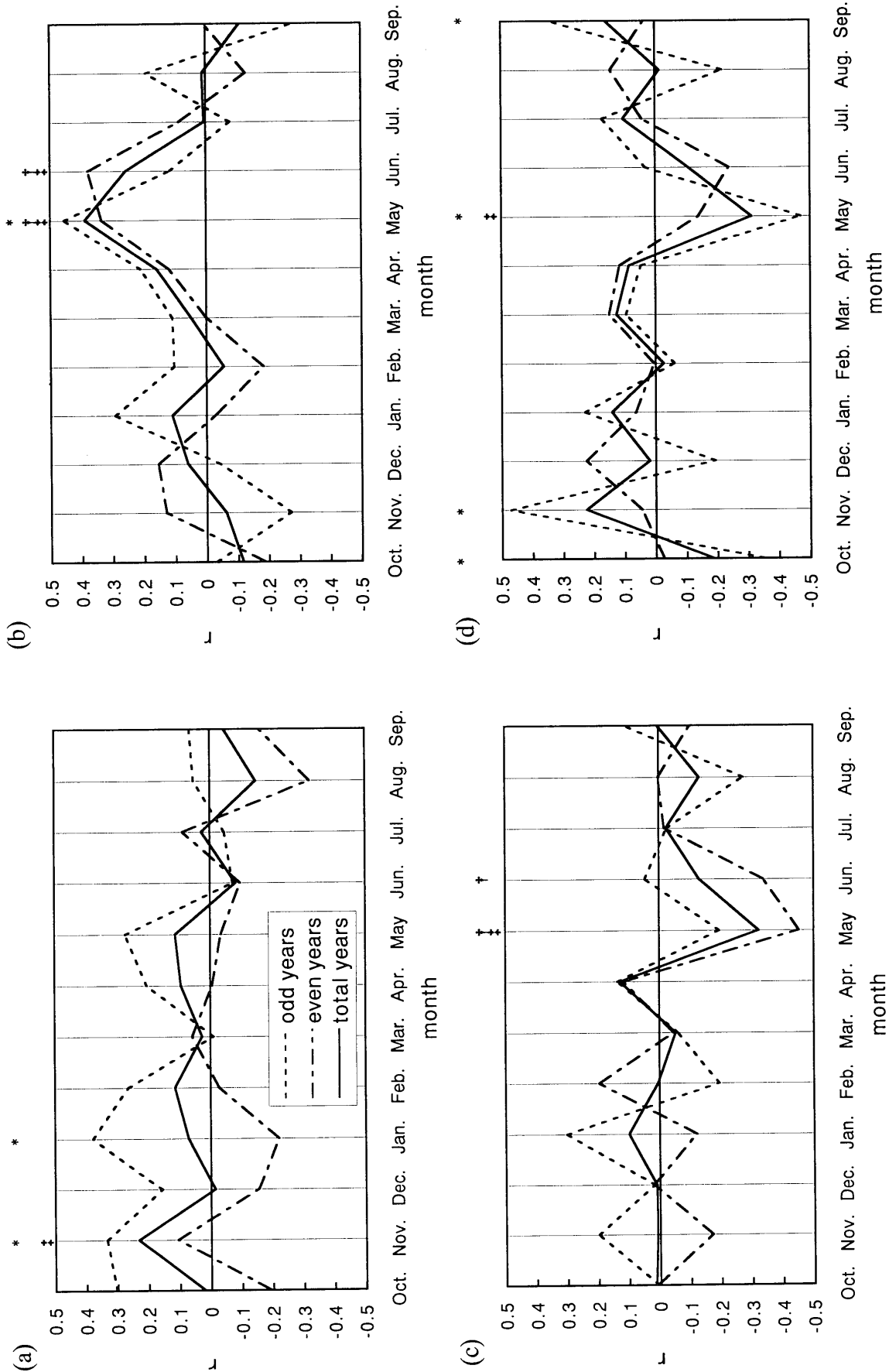


Fig. 3 Correlation between standardized $\delta^{13}\text{C}$ and monthly climatic factors (a : Mean temperature, b : Sunshine duration, c : Precipitation, d : Number of precipitation days)

* , † and ‡ indicate significant correlation at 95% level (* : odd years, † : even years, ‡ : total years)

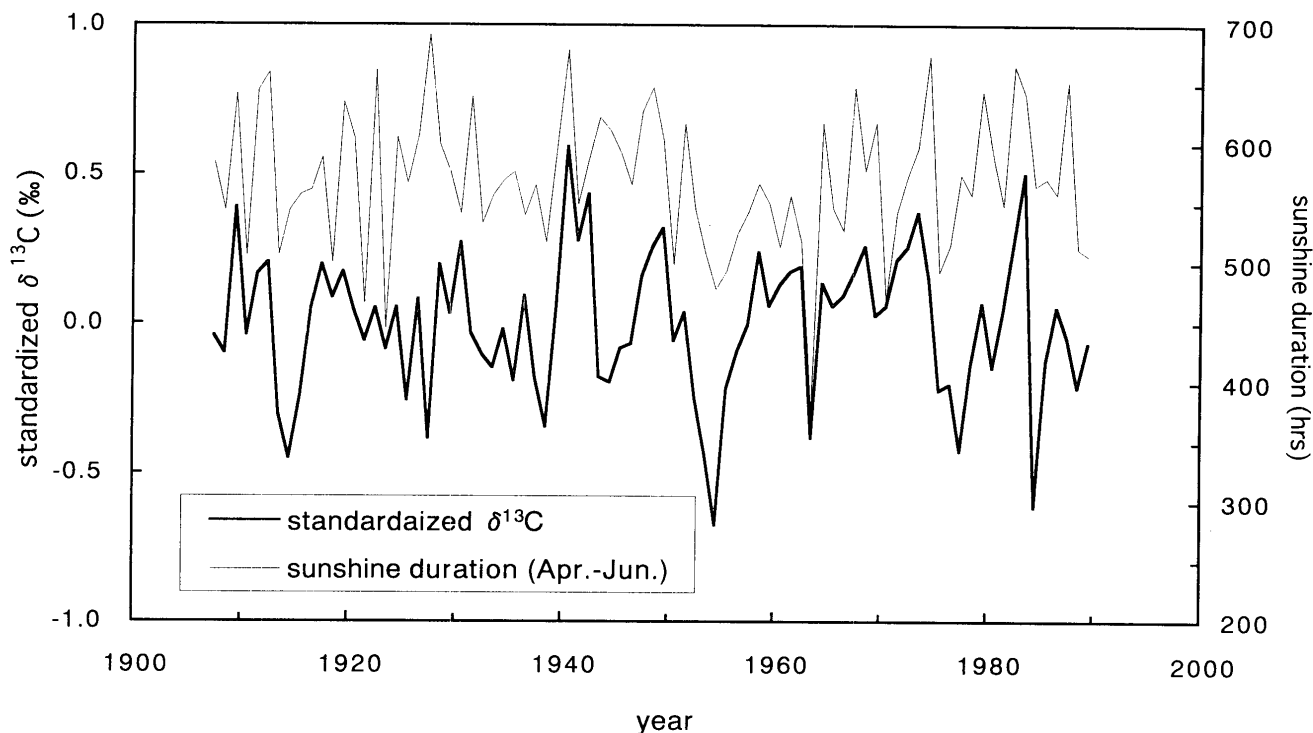


Fig. 4 Annual variations of standardized $\delta^{13}\text{C}$ and sunshine duration (Apr.-Jun.)

は、さらにデータ量を増やし、代表パターンの信頼性を向上させるとともに、年輪最大密度等、他のデータの利用や、古日記の天気記録との照合なども試みたい。

謝 辞

名古屋工業大学工学部学生 原美苗(当時)、同大学院学生 岩崎誠一郎(当時)、奥村千恵の各氏には、同位体比測定の前処理とデータ整理に際して多大の協力をいただいた。記して謝意を表したい。なお本稿は、1997~1998 年度文部省科学研究費補助金(奨励研究 A ; 課題番号 09750593)による成果の一部をまとめたものである。

<参考文献>

- 青木 浩・池田晃子(1996) 微量試料による酸素・炭素安定同位体組成測定について. 名古屋大学加速器質量分析計業績報告書, 7, 300-309.
- 青木 浩(1997) 名古屋大学年代測定資料研究センター・MAT-252 における炭素・酸素の安定同位体組成測定について. 名古屋大学加速器質量分析計業績報告書, 8, 68-80.
- Briffa, K. R., Bartholin, T. S., Eckstein, D., Jones, P. D., Karlén, W., Schweingruber, F. H. and Zetterberg, P. (1990) A 1,400-year tree-ring record of summer temperatures in Fennoscandia. *Nature*, **346**, 434-439.
- Briffa, K. R., Schweingruber, F. H., Jones, P. D., Osborn, T. J., Shiyatov, S. G. and Vaganov, E. A. (1998) *Reduced* sensitivity of recent tree-growth to temperature at high northern latitudes. *Nature*, **391**, 678-682.

- D'Arrigo, R. D. and Jacoby, G. C. (1993) Tree growth-climate relationships at the northern boreal forest tree line of north America: evaluation of potential response to increasing carbon dioxide. *Global Biogeochem. Cycles*, **7**, 525-535.
- Duvick, D. N. and Blasing, T. J. (1981) A dendroclimatic reconstruction of annual precipitation amounts in Iowa since 1680. *Water Resour. Res.*, **17**, 1183-1189.
- Donovan, L. A. and Ehleringer, J. R. (1994) Potential for selection on plants for water-use efficiency as estimated by carbon isotope discrimination. *American Journal of Botany*, **81**, 927-935.
- 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.
- Fritts, H. C. (1976) *Tree Rings and Climate*. Academic Press, London, 567pp.
- 福岡義隆 (1986) 年輪分析による気候変動の周期性と地域性. 気候変動の周期性と地域性, 古今書院, 41-53.
- Graybill, D. A. and Idso, S. B. (1993) Detecting the aerial fertilization effect of atmospheric CO₂ enrichment in tree-ring chronologies. *Global Biogeochem. Cycles*, **7**, 81-95.
- Hanba, Y. T., Mori, S., Lei, T. T., Koike, T. and Wada, E. (1997) Variation in leaf $\delta^{13}\text{C}$ along a vertical profile of irradiance in a temperate Japanese forest. *Oecologia*, **110**, 253-261.
- Jacoby, G. C., D'Arrigo, R. D. and Davaajamts, T. (1996) Mongolian tree rings and 20th-century warming. *Science*, **273**, 771-773.
- Livingston, N. J. and Spittlehouse, D. L. (1993) Carbon isotope fractionation in tree rings in relation to the growing season water balance. In *Stable isotopes and plant carbon-water relations* eds. by J. R. Ehleringer, A. E. Hall and G. D. Farquhar, Academic Press, San Diego, 141-153.
- Livingston, N. J. and Spittlehouse, D. L. (1996) Carbon isotope fractionation in tree ring early and late wood in relation to intra-growing season water balance. *Plant, Cell and environment*, **19**, 768-774.
- Marshall, J. D. and Zhang, J. (1994) Carbon isotope discrimination and water-use efficiency in native plants of the north-central rockies. *Ecology*, **75**, 1887-1895.
- 三好東一 (1952) ヒノキに関する材質の生態的研究 総論. 長野營林局, 5-10.
- Sakata, M. and Suzuki, K. (1998) Assessment method for environmental stresses in trees using $\delta^{13}\text{C}$ records of annual growth rings. *Geochem. J.*, **32**, 331-338.
- 佐藤忠信・八嶋 厚・田中 琢 (1989) 年輪を用いた長期的気候変動特性の抽出. 京都大学防災研究所年報, **32B-1**, 279-289.
- 庄建治朗 (1996) 根元付近の年輪データによる古気候再現の試み. 京都大学大学院工学研究科環境地球工学科修士論文, 62pp.
- 庄建治朗・池淵周一・宮井 宏 (1996) 根元付近の年輪データによる古気候再現の試み. 土木学会第 51 回年次学術講演会講演概要集第 2 部, 662-663.
- Wright G. C., Nageswara Rao, R. C. and Farquhar, G. D. (1994) Water-use efficiency and carbon isotope discrimination in peanut under water deficit conditions. *Crop Sci.*, **34**, 92-97.

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

Kenjiro SHO¹, Hiroshi Aoki TAKAHASHI² and Toshio NAKAMURA³

¹ Department of Systems Management and Engineering, Nagoya Institute of Technology

² Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Nagoya University

³ Dating and Materials Research Center, Nagoya University

Abstract

We investigated that the climatic factors controlling the stable carbon isotopic composition of annual rings of Japanese cypress (*Chamaecyparis obtusa*). Four grubs with more than 100 rings, which were collected at a coastal region of Lake Biwa, were used for isotopic analysis. The $\delta^{13}\text{C}$ values of annual rings from 1936 to 1987 were measured in the all four samples. There was little spatial $\delta^{13}\text{C}$ variation of annual rings in the present study area within a radius of 15 km, since the correlation coefficients in interzonal comparison ($r=0.52$ to 0.69) were identical with those of the individual variations in one forest ($r=0.57$ to 0.70). This result suggested that the $\delta^{13}\text{C}$ values of annual rings were mainly influenced by the extensive environmental factors at least 30 km. The $\delta^{13}\text{C}$ fluctuations of annual rings from the secular trends were compared with the monthly meteorological data, *i.e.*, temperature, precipitation, number of precipitation days and sunshine duration, and showed the best correlation with sunshine (positive, $r=0.44$) and precipitation (negative, $r=-0.32$) in early summer.

<学会発表>

庄建治朗・青木 浩・岩崎誠一郎・中村俊夫（1997）琵琶湖南岸のヒノキ年輪の炭素同位体比変動と気候要素との相関分析．日本地球化学会年会，東京都立大学．

庄建治朗・青木 浩・原 美苗・中村俊夫・岩崎誠一郎・長尾正志（1998）滋賀県太神山産の樹木年輪セルロースの炭素同位体比変動と気候要素との相関分析．土木学会中部支部研究発表会，岐阜大学．

岩崎誠一郎・庄建治朗・高橋 浩・中村俊夫（1998）琵琶湖南岸のヒノキ年輪の炭素同位体比変動と気候要素との相関分析＝第2報＝．日本地球化学会年会，九州大学．

庄建治朗・高橋 浩・奥村千恵・中村俊夫・長尾正志（1999）ヒノキ年輪セルロースの炭素同位体比を用いた気候再現の試み．水文・水資源学会研究発表会，名古屋大学．

奥村千恵・庄建治朗・高橋 浩・中村俊夫（1999）琵琶湖南岸のヒノキ年輪の炭素同位体比の空間的一致性と気象要素との相関性．日本地球化学会年会，工業技術院地質調査所．