

# 年輪セルロース酸素同位体比の年層内変動データを用いた年代照合の可能性に関する検討

庄 建治朗

(名古屋工業大学大学院工学研究科)

## 1. はじめに

木質遺物が出土する考古遺跡では、「年輪年代法」による年代決定がしばしば行なわれる。これは、気候条件の共通する地域内で生育した樹木が共通する年輪幅変動パターンを示すことを利用し、出土した木質遺物の年輪幅パターンを、年代が既知のその地域を代表する年輪幅パターン（暦年標準パターン）と照合することにより、遺物の木材が生育した年代を決定するというものである。ただし、この方法で確実な年代決定を行なうためには、木質遺物から十分に長い年輪幅パターンが得られなければならない。もし十分に長くなければ、暦年標準パターンとの間に正しい照合箇所以外の箇所で「偶然に」照合が成立する可能性が高くなり、誤った年代が得られたり、年代が唯一に決まらず複数の候補が現れるといったことが生じ得るからである<sup>1)</sup>。日本では、年輪幅に及ぼす気候因子の影響が比較的弱く、樹木個体間の年輪幅パターンの相関があまり高くないことから、2つの年輪幅パターンの間で年代照合を検討するためには、およそ100年以上の重複期間が必要とされている<sup>1),2)</sup>。

そこで近年では、年輪幅の代わりに年輪セルロースの酸素同位体比を用いる「酸素同位体比年輪年代法」が行なわれることがある。年輪セルロース酸素同位体比は、基本的には樹木生長期の相対湿度と土壌水の酸素同位体比のみによって決まり、樹木の生理的要因が介在しない。そのため、年輪幅よりも変動パターンの個体間相関が高く、より短い年数のデータで年代照合が可能な上、異なる樹種間でも照合可能という利点がある。それでも、確度の高い年代決定を行なうためには、50年程度の重複期間が必要と

され<sup>3)</sup>、木質遺物がそれだけの年輪数を含まない場合も少なくない。

セルロース酸素同位体比は、年輪幅のように1年1個の値ではなく、年層内の各部分について測定可能な量である。酸素同位体比を年層内の生長方向に（時間軸に沿って）多数に分割して測定すると、その年層内の変動は、月単位ないしそれ以下の時間スケールで相対湿度の変動と密接に対応し、1年輪ごとに測定した場合の年層間の変動幅よりもはるかに大きい変動幅をもつことが確かめられている<sup>4)</sup>。同一年の年層内変動パターンは共通する気候条件の個体間で高い共通性を示すことから、2つの酸素同位体比変動パターン間の年代照合でも、1年輪ごとのデータによる照合では重複期間が不足する際に、年層内変動のデータを用いることで照合可能になる場合があると考えられる。

従来、セルロース酸素同位体比の測定には多大な時間と労力を要したが、近年の同位体比分析装置と試料作製技術の進歩により、現在ではその年層内変動を含む暦年標準パターンを作成することも展望できる段階にある。その研究計画を立てる上では、年層内をいくつに分割して測定するのが適切か、また作成した暦年標準パターンはどのくらいの広がりのある地域を代表しうるのか、といった情報が重要である。現時点ではそうした検討ができるだけの酸素同位体比年層内変動データが蓄積されていないが、先述のとおりセルロース酸素同位体比には生長期の気候条件が直接的に反映されているため、気象観測データを解析することである程度の目安が得られるものと考えられる。本稿では、セルロース酸素同位体比の年層内・年層間変動が相対湿度（または降水量）の変動を忠実に反映していることを前提に、相

対湿度（または降水量）の時系列データを用いて、年層内の分割数と年代照合の確度向上との関係、離れた地点間での年代照合の可能性に関する検討を行なう。

## 2. 解析方法と結果

用いた気象観測データは、月単位、旬単位または日単位の平均相対湿度と降水量である。近畿・東海地方から西日本にかけて木質考古遺物が多く出土することに鑑みて、比較的長期にわたる観測データが得られる気象官署として京都、彦根、名古屋、境、福岡の5地点を選び（図1）、この地域における典型的な樹木生長期として5～9月の5カ月間のデータを用いた。5地点の資料期間はそれぞれ、1880-2014年（135年間）、1894-2014年（121年間）、1891-2014年（124年間）、1886-2014年（129年間、相対湿度）と1883-2014年（132年間、降水量）、1890-2014年（125年間）である。ただし、旬単位及び日単位の相対湿度については、長期にわたる観測データを容易には入手できないため、京都のデータのみを用いた。

### 2-1. 1年輪ごとのデータによる年代照合

まず、気象資料期間とおなじ長さの暦年標準パターンがあり、これと同一地点で生育した年輪数5～50

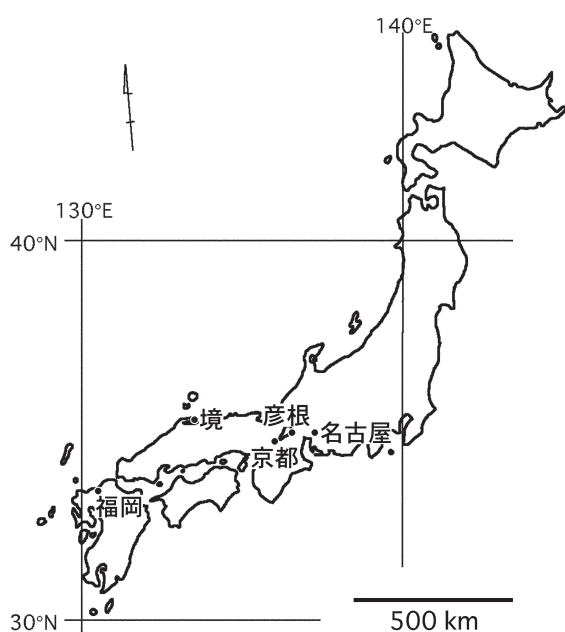


図1 気象観測所位置図

の標本との年代照合を1年輪ごとのデータで行なう場合を想定する。上記5地点における5-9月平均相対湿度と5-9月降水量のそれぞれについて、以下1)～4)の手順で年代照合の確度の高さに関する解析を行なった。

- 1) 全期間  $N$  個の時系列データから  $n$  個の部分時系列を取り出す。部分時系列の取り出し方は  $N - n + 1$  とおりある。ここでは  $N = 121 \sim 135$ （観測資料期間の長さ）であり、 $n$  は 5, 10, 15, 20, 30, 50 の6とおりとする。
- 2)  $N - n + 1$  とおりの部分時系列それぞれについて、全期間  $N$  個の時系列と重複する（重なりが  $n$  となる）全ての箇所における相互相関係数を計算する。相関係数を計算する箇所数は  $N - n + 1$  となる。なお、長さ  $n$  の部分時系列は全期間  $N$  個の時系列の一部を取り出したものであるから、ラグ0における相関係数は1となる。
- 3)  $N - n + 1$  とおりの部分時系列について算出された相互相関係数（相互相関関数）のそれぞれについて、次式で定義される「マッチング指数」 $MI$  を計算する。

$$MI = r_0 / r_1$$

ここに、 $r_0$  は正しい照合箇所（ラグ0）における相関係数、 $r_1$  はそれ以外で最も相関の高い照合箇所における相関係数である。

マッチング指数は、正しい照合箇所における相関が、ほかの偶然に相関が高くなる照合箇所における相関よりもどれだけ際立っているかを表す指数であり、大きいほど照合成立の唯一性が高いことを示す。大まかな目安は、 $MI$  が概ね2以上のとき照合成立箇所は唯一に決まり、1～1.5程度であれば唯一には決まらないが複数箇所に絞り込める可能性があり、1を大きく下回る場合には年代照合不可能、というものである。ただし、 $MI$  の値は照合を検討する箇所の数 ( $N - n + 1$ ) に依存するため、 $N - n + 1$  が大きく異なるようなケース間での単純比較はできないことに留意する必要がある。たとえば、ここでは  $N = 121 \sim 135$  であるから、 $N - n + 1$  は  $n = 50$  のとき 72～86、 $n = 5$  のとき 117～131 となる。照合を検討する箇所の数 ( $N - n + 1$ ) が小さい  $n = 50$  のケースの方

が、正しい照合箇所以外で偶然に相関係数が高くなる機会も少ないため、*MI* が大きめに算出される可能性がある。

4)  $N - n + 1$  とおりの部分時系列について算出されたマッチング指数の平均値を求める。

5 地点における相対湿度と降水量のそれぞれについて、マッチング指数 (*MI*) の平均値と部分時系列の長さ ( $n$ ) との関係を図 2 に表したものが図 2 (黒丸と実線) である。各地点とも、 $n$  が概ね 30 以上のとき *MI* は 2 前後かそれ以上の値をとるが、 $n$  が 5~10 では *MI* は 1 に近づき、正しい照合箇所以外に偶然に相関が高くなる照合箇所があることを示している。また、相対湿度に比べて降水量の方が部分時系列が長いときの *MI* が大きくなっているが、これは降水量の方が年々の変動が大きく、頻度が低く極端に大きい値が生じる（これに対して相対湿度は 100% より大きくはならない）ためと考えられる。年輪セルロース酸素同位体比の場合には、このような低頻度の極端な値が生じることは考えにくく、同様の解析を行なった場合には相対湿度の方に近い結果になると予想される。

つぎに、年代照合を行なう標本が暦年標準パターンと離れた地点で生育した樹木である場合を想定して、全期間  $N$  個の時系列データと  $n$  個の部分時系列とが異なる地点の場合について検討した。図 3 (黒丸と実線) は、全期間  $N$  個の時系列データを京都の 5-9 月平均相対湿度（または 5-9 月降水量）、部分時系列をほかの 4 地点における 5-9 月平均相対湿度（または 5-9 月降水量）として、上記 1) ~ 4) と同様の解析を行なった結果を表したものである。とくに、相対湿度の京都-彦根より離れた地点間の照合では、 $n = 50$

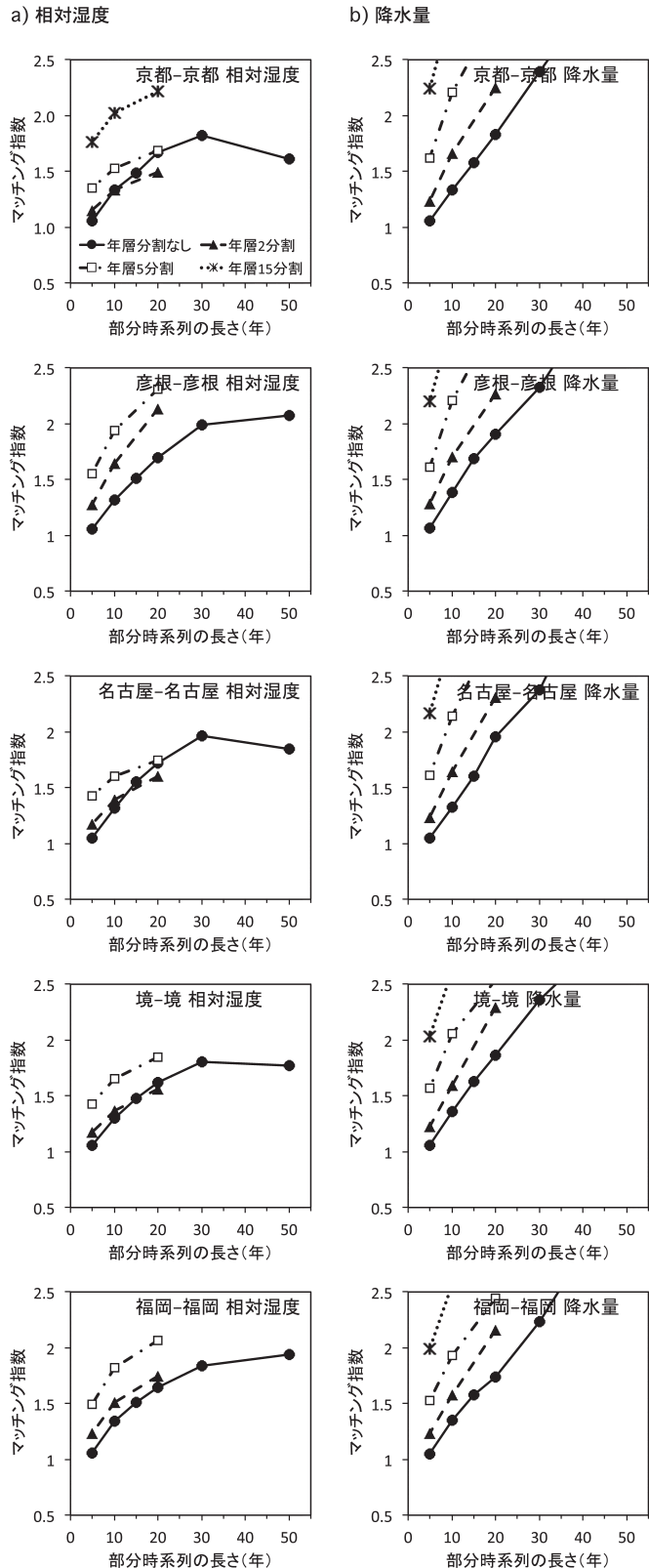


図 2 5 地点における気象観測データを解析して得られた、1 年輪（生長期 5-9 月）ごと、及び年層（生長期）を 2, 5, 15 分割した場合の、マッチング指数の平均値と部分時系列の長さとの関係（直列照合）。

a) 相対湿度, b) 降水量.

でも  $MI$  は1前後であり、年代照合が困難であることを示している。

## 2-2. 年層内分割したデータによる年代照合

前節で検討した1年輪ごとのデータを用いた年代照合に対して、年層内を2分割、5分割または15分割したデータを用いた場合にマッチング指数 ( $MI$ ) がどのように変化するかを検討する。年層内を  $m$  分割すれば時系列のデータ数は  $m$  倍になるが、そこには年周期の変動成分がかなりの程度含まれており、1年輪ごとのデータが  $m$  倍になったのと同様ではないことは明らかである。

年層内2分割の場合には5-6月と7-9月の平均相対湿度(または平均月降水量)、5分割の場合には5月から9月までの月ごとの平均相対湿度(または降水量)、15分割の場合には5月上旬から9月下旬までの旬ごとの平均相対湿度(または降水量)のデータを用いて、前節1)~4)と同様の解析を行なった。その結果を1年輪ごとのデータによる解析結果とともに図2及び図3に示す。ほとんどのケースにおいて、年層内の分割数を多くするほど  $MI$  が大きくなっている。たとえば、相対湿度の京都のデータどうしを照合したケース(図2の最上段左図)では、年層内2分割した場合(黒三角と破線)の  $MI$  は、年層分割しない場合(黒丸と実線)からほとんど変わらないかやや低下しているが、5分割した場合(白四角と一点鎖線)の部分時系列の長さが5年、10年のとき、それぞれ年層分割しない場合の部分時系列の長さ10年、15年のときと同程度の  $MI$  の値となっており、年層を5分割することによって1年輪ごとのデータが5年分追加されたのと同程度に年代照合の確度が向上することを示している。15分割の場合には、部分時系列の長さ5年で年層分割しない場合の20~30年と同程度の  $MI$  となっている。図2

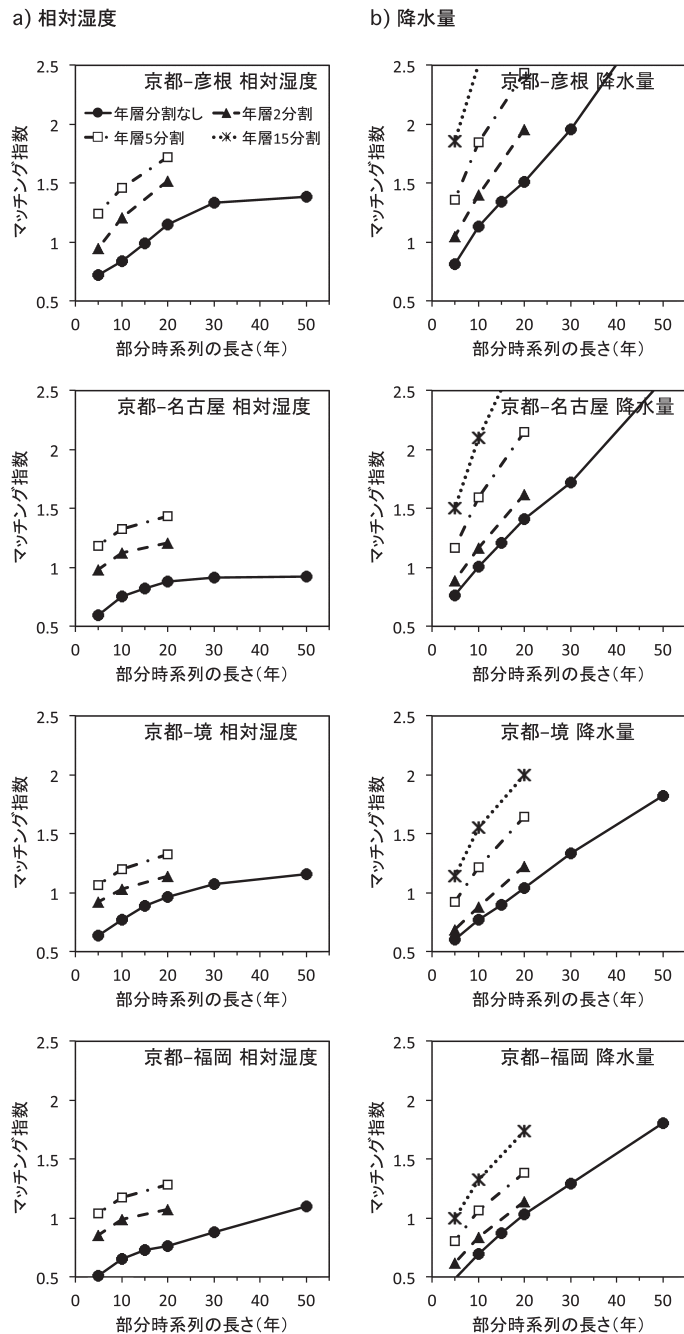


図3 図2におなじ。ただし、京都とほかの4地点それぞれとの気象観測データを照合した場合。

を全体的に見ると、年層を2分割した場合には1年輪ごとのデータが数年分追加されたのと同程度に、5分割した場合には2~3倍に増加したのと同程度に、15分割した場合には5~6倍に増加したのと同程度に、それぞれ年層分割しない場合に比べて  $MI$  が上昇しているケースが多い。

離れた地点間の時系列データを照合した図3のケース

スでは、年層分割することによる  $MI$  の上昇幅は図 2 よりさらに大きくなっているが、年層分割しない場合の  $MI$  が非常に低く、年層分割しても部分時系列の長さ 5～20 年で  $MI$  が 2 前後に達しているケースは少ない。相対湿度の京都-彦根より離れた地点間の照合では、何れの年層分割数・部分時系列の長さでも  $MI$  は 1.5 より小さく、確実な年代決定は難しいことが分かる。

### 2-3. 年層内分割位置のばらつきを考慮した年代照合の確度評価

前節において、年層内を 2～15 分割したデータを用いることにより、1 年輪ごとのデータを用いるよりも年代照合の確度が向上し、より短い年数の時系列データで年代決定が可能となることが定量的に示された。ただし、この結果は、じっさいのセルロース酸素同位体比のデータで年代照合を行なう場合に照らして考えると、年層内を分割したそれぞれのセグメントが、照合する双方の時系列の全ての年において、年内のおなじ期間に正確に対応していることを前提としたものであり、現実にはこのようなことは不可能と考えるべきである。たとえば年層内を 2 分割する場合、現実の標本で年層内のどこが 6 月と 7 月の境界に対応するのか目印があるわけではなく、じっさいには年輪幅を等分割することになるが、肥大生長速度の季節変化パターンには個体間でも同一個体の年ごとでもばらつきがあるため、年輪幅を 2 等分する位置が全個体の全年層で同一の月日に対応していることは期待できない。本節では、年層内分割した各セグメントの形成時期が年ごと・個体ごとにばらつく場合に、そのことが年代照合の確度向上にどのような影響を及ぼすかについて検討する。

具体的には、日単位の平均相対湿度または降水量のデータを用い、生長期を 5 月 1 日から 9 月 30 日と仮定して、年層分割しないケースでは 5 月 1 日から 9 月 30 日、年層 2 分割のケースでは 5 月 1 日から 6 月 30 日と 7 月 1 日から 9 月 30 日、年層 5 分割のケースでは 5 月から 9 月の月ごと、年層 15 分割のケースでは 5 月上旬から 9 月下旬の旬ごと、の平均値からなる時系列を作成したが、その際に平均 0、標準偏差  $\sigma$  の正規乱数を必要数発生させ、それらを整数に丸め

た日数分だけ、各年の生長開始日と終了日、年層分割する場合にはその境界日をそれぞれ移動させた。図 4 は、そのように作成した時系列データを用いて前節と同様の解析を行なった結果を示したものである。ただし、日単位の気象データが必要となることから、前節で検討したケースのうち、日単位のデータを入手できなかった京都以外の地点における相対湿度を用いたケースを除き、部分時系列の長さ 20 年、10 年、5 年の 3 とおりについて、マッチング指数 ( $MI$ ) と標準偏差 ( $\sigma$ ) との関係グラフで表した。 $\sigma$  は 0、5、10 の 3 とおりとした。

全てのケースにおいて、年層分割位置のばらつきを考慮しない  $\sigma = 0$  では、年層を 15 分割した場合に  $MI$  が最も大きい。しかし、その値は  $\sigma$  の増大とともに急激に低下し、ほとんどのケースにおいて  $\sigma = 5$  では年層を 5 分割した場合の  $MI$  を下回り、 $\sigma = 10$  では年層分割しない場合の  $MI$  をも下回っている。一方で、年層分割しないか分割数が少ない場合には、 $\sigma$  が大きくなっても  $MI$  はあまり低下しない。年層分割位置のばらつきを 5 日より十分小さくすることはほとんど不可能と考えられるため、15 分割といった多数に年層分割したデータを年代照合に用いるのは現実的ではないといえる。

### 2-4. 「並列照合」による年層内分割データを用いた年代照合

前節までは、年層分割したデータを時間順に一列に並べた時系列を用いて年代照合を行なう場合について検討した。しかし、このような時系列は年周期の変動成分をかなりの程度含んでおり、これは年ごとの変動パターンの一致度を見る年代照合という目的からすれば、必ずしも望ましい性質ではない。ここでは、このような周期成分を含まない時系列による照合方法として、年層内を  $m$  分割した場合に、照合する双方の時系列について、各年層の第 1 セグメント、第 2 セグメント、・・・、第  $m$  セグメントのみを取り出し、そうして得た  $m$  組の時系列によって年代照合を行なう場合を考える。ここでは、このような照合方法を「並列照合」と称することにする。これに対し、前節までで行なった年層分割したデー

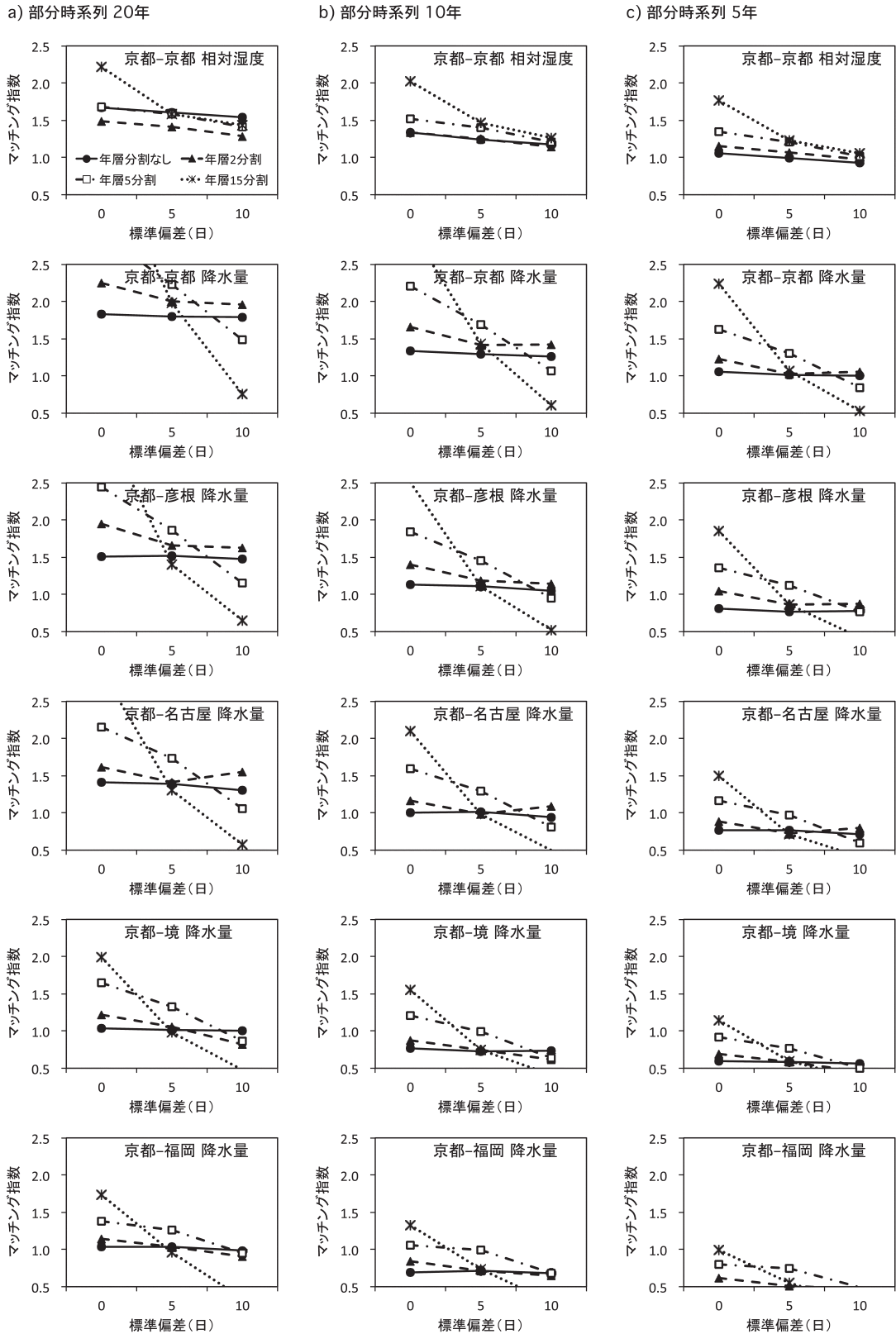


図4 京都、及び京都とほかの4地点との間で、1年輪(生長期)ごと、及び年層(生長期)を2、5、15分割した気象観測データを照合した場合の、マッチング指数の平均値と年層分割位置のばらつき(標準偏差)との関係(直列照合)。

a) 部分時系列の長さ20年, b) 同10年, c) 同5年.

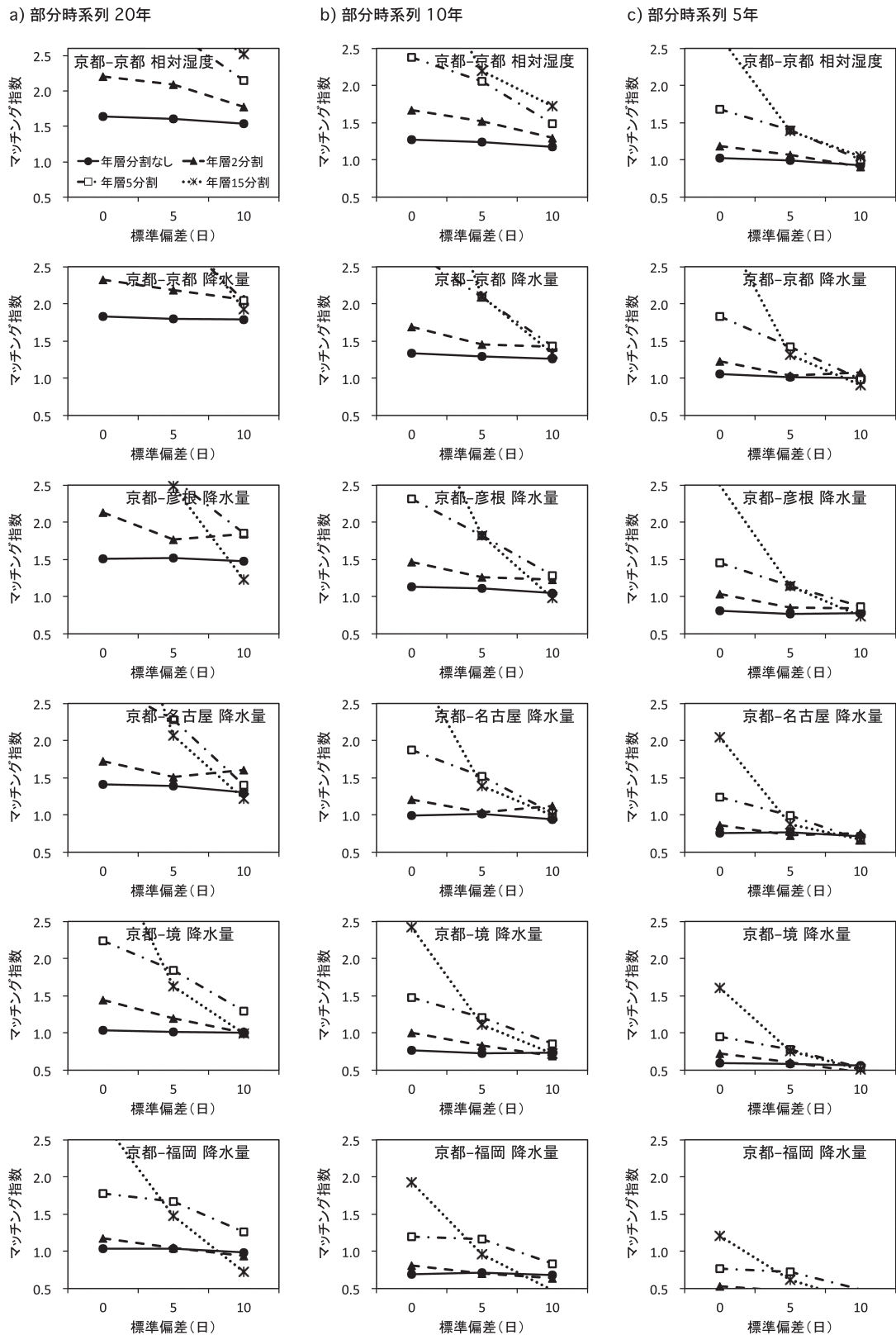


図5 図4におなじ。ただし、並列照合の場合。

タを一列に並べた時系列による年代照合の方法を「直列照合」と称する。

本節では、並列照合による年代照合の確度評価を以下のような手順で行なった。

- 1) 暦年標準パターン（を想定した時系列）の年数を  $N_1$ 、それと照合する部分時系列を取り出す時系列の年数を  $N_2$  とする。同一地点間の照合では  $N_1 = N_2$  となる。
- 2)  $m$  本の長さ  $N_2$  年の時系列データから  $n$  個（年）の部分時系列を、それぞれおなじ部分から取り出す。部分時系列の取り出し方は  $N_2 - n + 1$  とおりある。 $n$  は 5, 10, 20 年の 3 とおりとする。
- 3) 取り出した部分時系列と長さ  $N_1$  年の時系列とが重複する（重なりが  $n$  となる）全ての箇所における相互相関係数を計算する。相関係数を計算する箇所数は  $N_1 - n + 1$  となる。第 1 セグメントから第  $m$  セグメントまでそれぞれについて相互相関係数（相互相関関数）を求め、その平均をとる。
- 4)  $m$  とおりの相互相関係数（相互相関関数）を平均したものについて、マッチング指数を計算する。
- 5) 部分時系列の取り出し方、 $N_2 - n + 1$  とおりの全てについて上記 2) ~ 4) を行なう。 $N_2 - n + 1$  とおりのマッチング指数が算出されるため、その平均値を求める。

図 5 は、上記の手順で求めたマッチング指数 ( $MI$ ) の平均値を図 4 とおなじケースについて示したものである。直列照合の結果 (図 4) と比べると、全体的に年層分割したケースの  $MI$  が大きくなっており、とくに分割数が多いケースでその差が大きい。年層 15 分割のケースでは、直列照合の場合と同様に、分割位置のばらつき（標準偏差  $\sigma$ ）が大きくなると  $MI$  は急激に低下するが、時系列の性質がセルロース酸素同位体比により近いと考えられる相対湿度のデータを解析したケース (図 5 最上段) では、 $\sigma = 10$  のときにも部分時系列の長さ ( $n$ ) 10 ~ 20 年では分割数がより少ないケースの  $MI$  を上回っている。図 5 最上段で  $\sigma = 0$  以外のときに  $MI$  が 2 以上となるのは、 $\sigma = 10$  の場合には  $n = 20$  で年層 5 分割以上のとき、 $\sigma = 5$  の場合には  $n = 10$  で年層 5 分割以上また

は  $n = 20$  で年層 2 分割以上のときとなっている。近接した地点間の照合では、適切な年層分割数のデータを用いることにより、年輪数 10 ~ 20 程度の標本でも年代決定できる可能性が高いといえる。

つぎに、離れた地点間の照合について検討した結果 (図 5 第 3 段以下) を見ると、 $\sigma = 0$  以外で  $MI$  が 2 以上となるのは、京都 - 彦根間または京都 - 名古屋間で  $n = 20$ 、 $\sigma = 5$ 、年層 5 分割以上のケースのみである。しかし、これは降水量データを解析した結果であり、図 3 を参照すると、降水量データを用いた照合では  $n$  が 20 年程度以上で相対湿度を用いた照合より  $MI$  が大きくなる傾向があるため、このケースでもじっさいのセルロース酸素同位体比のデータではもっと小さい  $MI$  となる可能性がある。

### 3. まとめ

本稿では、年輪セルロース酸素同位体比の年層内・年層間変動が相対湿度（または降水量）の変動を忠実に反映していることを前提として、相対湿度（または降水量）の時系列データを解析することにより、酸素同位体比の年層内変動データを用いた年代照合の可能性について「マッチング指数」を指標に検討した。ここで得られた知見をまとめると、以下のようになる。

- 1) 個体ごと・年ごとの年層分割位置のばらつきが無視できる場合には、年層の分割数を多くするほどマッチング指数が大きくなり、年代照合の確度が高まる。年層を 2 分割した場合には 1 年輪ごとのデータが数年分追加されたのと同程度に、5 分割した場合には 2 ~ 3 倍に増加したのと同程度に、15 分割した場合には 5 ~ 6 倍に増加したのと同程度に、マッチング指数が上昇するケースが多い (直列照合の場合)。
- 2) しかし一方で、年層分割数が多いほど、分割位置のばらつきが大きくなるとマッチング指数は急激に低下する。肥大生長速度の季節変化パターンが照合に用いる個体間や年ごとでどのくらい変わらうかを検討した上で、適切な分割数を決定する



- 必要がある。同位体比測定にかかる時間と労力も考慮すれば、通常は5分割程度かそれ以下にするのが現実的といえるが、一定の条件下では、さらに分割数を増やすことで年代照合の確度が高まり、より少ない年輪数での年代決定が可能になる場合もあると考えられる。
- 3) 年層分割したデータを時間順に一例に並べた時系列を用いる「直列照合」よりも、分割したセグメントごとに別の時系列として照合に用いる「並列照合」の方が、ほとんどのケースで年代照合の確度が高く、より優れた照合方法といえる。
  - 4) 同一地域における暦年標準パターンと照合できる場合、年層を5分割程度にしたデータを用いた並列照合を行なうことで、年輪数10～20程度の標本を年代決定できる可能性が高い。離れた地域における暦年標準パターンと照合する場合（本研究における検討では京都－名古屋間より離れている場合）には、年層内変動のデータを用いても20年輪程度の標本の年代を確定することは難しい。

以上から、従来の1年輪ごとの酸素同位体比データでは年輪数が不足するために年代を確定できなかった木質考古遺物について、年層内変動を測定することで年代決定が可能になるケースも少なくないと考えられる。そのためには、まず年層内変動を含む年輪酸素同位体比の暦年標準パターンの作成を各地で進める必要がある。また、ここでは年層分割位置のばらつきとして平均値0の正規分布を仮定したが、異なる樹種間や離れた地点間、あるいは近接していても標高差が大きい地点間などでは、生長期の長さが異なったり、肥大生長速度の季節変化パターンが全体的にずれている（年層分割位置のばらつきに偏りがある）ことも十分に考えられる。そのような場合の適切な分割数や、そうしたずれを許容するような照合方法についても検討する必要があるだろう。

## 引用文献

- 1) 米延仁志・大山幹成・星野安治・光谷拓実・Dieter Eckstein：年輪年代学におけるクロスデーティングのガイドライン－日本産材を用いた方法論の分析とモンテカルロシミュレーションによる統計的クロスデーティ

- グの再検討－, 考古学と自然科学, 60, pp.1-12, 2010.
- 2) 奈良国立文化財研究所（編）：年輪に歴史を読む－日本における古年輪学の成立－, 奈良国立文化財研究所学報, 48, 1990.
- 3) 中塚武：酸素同位体比年輪年代法がもたらす新しい考古学研究の可能性, 考古学研究, 61 (4), pp.14-15, 2014.
- 4) 中塚武：樹木年輪セルロースの酸素同位体比による古気候の復元をめざして, 低温科学, 65, pp.49-56, 2007.