# Wiggle Matchingを用いた中世樹幹試料の高精度年代決定

奥村晃史（広島大学文学部地理学教室）
〒739-8522　広島県東広島市鏡山１－２－３
Phone: 0824-246657 Fax: 0824-240320
*E-mail: kojiok@ipc.hiroshima-u.ac.jp*
小疇　尚・石井正樹（明治大学文学部地理学教室）
〒101-8301　東京都千代田区神田駿河台１－１
松島信幸（伊那谷自然友の会）
〒399-3103　長野県下伊那郡高森町市田2091
寺岡義治（飯田市林務課）
〒395-8501　長野県飯田市大久保町2534

## １．はじめに

$^{14}$C年代測定法は，過去数千年間の絶対年代を測定する手法として最も広く利用されている．しかし，$^{14}$C年代測定値の一般的な測定誤差（1σ）はβ線計数法でも加速器質量分析計の場合でも40-80年程度である．この$^{14}$C年代に年輪年代にもとづく暦年補正を施した場合，確率分布として表現される補正年代のとりうる幅は通常100年以上となる．その結果，$^{14}$C年代から推定される事象の年代と歴史記録の厳密な対比を行うことは困難な場合が多い．これは，特に地震や火山噴火のような突発的な地質事象と歴史記録を対照する場合に顕著な問題である．

この問題を解決するには，樹木の年輪年代や氷縞粘土，あるいは一部の湖底堆積物のように年縞をもつ試料で現在を基準とした絶対年代を決定することが最も精度の高い方法である．しかし，現実には年代測定に適した試料が普遍的に得られないことや，大量の標準データの蓄積を必要とすることから，これらの手法による絶対年代の決定を幅広く実施することは不可能に近い．

$^{14}$C年代の測定方法，および測定値の組み合わせからより高精度の年代測定値を得る方法としては，(1) バックグラウンドの低い計数装置でカウント数を増して統計誤差を減少させる方法（extended measurement），(2) 同一年代をもつ試料を分割し，それぞれの分画から得られた複数の年代値を平均化する方法（Ward and Wilson, 1978），(3) 層序・堆積速度などの情報を年輪年代補正された年代値の確率分布を拘束する条件として定量的に用いる方法（Bayesian approach: Biasi and Weldon, 1994），(4) および(3)の応用として，年縞によって年代間隔が計数できる試料から複数の試料を年代測定した結果を，年輪補正曲線の変化と比較する方法（wiggle matching）がある．本稿では，中部地方の２地点から得られた中世の樹幹試料の年代測定値に，wiggle matchingを用いて高精度化を試みた成果を報告する．

## 2．Wiggle Matching

樹幹試料のwiggle matchingでは数十以上の年輪をもつ木材試料から年輪を数えて年代間隔の明らかな（たとえば10年ごと），1～10年分の年輪を複数個試料として取り出し，それぞれの試料について$^{14}$C年代測定を行う．この$^{14}$C年代を，年輪からわかる相対年代に対してプロットすると初生$^{14}$C濃度の経年変化を示すダイアグラムが得られる．ここでいう相対年代とは，たとえば樹皮直下の年代を0年として試料がそれより何年前の年輪であるかという年代値である．$^{14}$C年代測定値を得た時点で，相対年代が絶対年代（暦年）のどの年に対応するかは不明であるが，個々の$^{14}$C年代が暦年でどれだけの間隔をもつかは，年輪の計数から正確に決定することができる．

このダイアグラムは，$^{14}$C年代の年輪年代による補正のために公表されている補正曲線に近い形態をもつはずである．しかし，実際には測定誤差や初生$^{14}$C濃度の局地的な変化によって必ずしも両者は一致しない．また，既存の補正曲線は5～20年分の年輪を試料として測定しており，その期間の平均値を測定期間の中間値に対してプロットしたもので

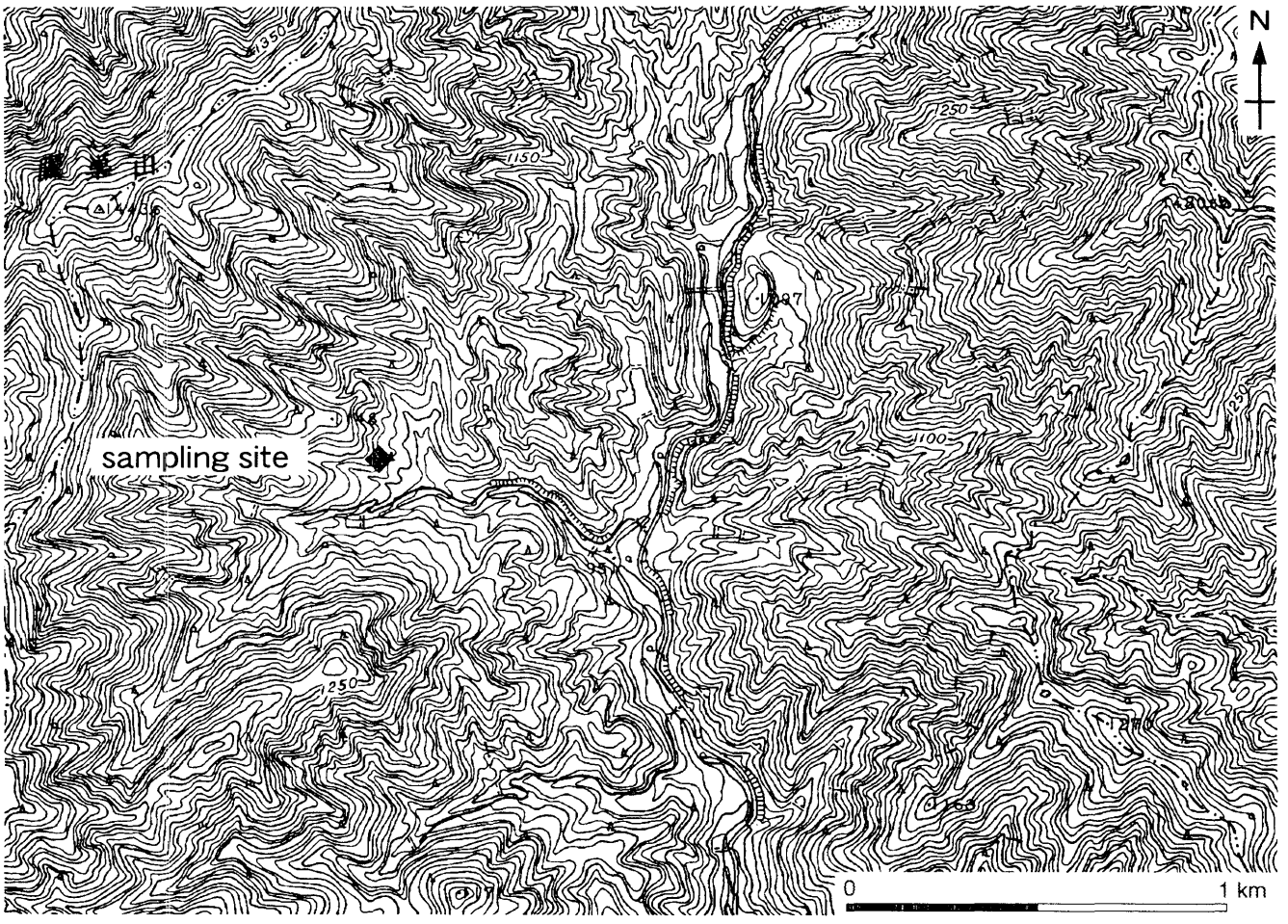


Figure 1 Locality of IDF sample.
Based on 1:25,000 topographic map "Iida" by Geographical Survey Institute.

ある．この補正曲線に対応させようとする未知試料は年輪年代が不明なため，測定する試料のもつ年輪年代の幅が補正曲線の平均値を導いた期間と一致しない可能性も考えられる．古城（1995）はこの点を強調して，測定する年輪の絶対年代幅が補正曲線の試料の年代幅と厳密に一致しない場合wiggle matchingは不可能であると述べている．しかし，年輪年代が不明であるからこそwiggle matchingを行うのであり，この条件は現実的でない．

Stuiver (1993) による，1年ごとの年輪を1510 A.D. から1954 A.D. まで年代測定した結果では，特定の試料の初生$^{14}$C濃度は，年（年輪）ごとに$^{14}$C年代にして10～30年の変動をもつことが示されている．さらに，この変動には地域的な差異があり試料特有のものである可能性もある．また，1年ごとの年代測定結果による10年ごとの移動平均値を補正曲線として用いた場合と，10・20年分の試料に基づく補正曲線を用いた場合の暦年補正の結果がほぼ一致することも示されている．この結果から，10～20年分の試料の測定から得られる平均値と，それを補間して推定される初生$^{14}$C濃度の連続的な変化は，長期的・普遍的な初生$^{14}$C濃度変化の傾向を表していると考えられる．したがって20年ごとの年代測定値に基づく補正曲線と任意の年を基準とした年輪試料の年代測定値のmatchingは意味のあるものと判断できる．

年輪年代補正のためのプログラムであるOxCal v2.18 (Ramsey, 1995) には，$^{14}$C年代値の組み合わせや比較を行うための各種のプログラムが付属しているが，その一つにwiggle matchingのプログラムがある．このプログラムはBayesian aproachによる確率分布の組み合わせと試料の暦年代上の年代差をもとに，個々の$^{14}$C年代に対応するwiggle matchingで高精度化された暦年代を求めるものである．

## 3. 試料と年代測定

(1) IDF

試料IDFは長野県南部の伊那谷断層帯の活動時期を検討する目的で採取された．採取地点は長野県飯田市上郷畑ノ沢（図1）で，風越山断層［活断層研究会，1991：または松島（1995）による本高森山・野底川断層］に沿う小谷を埋積する崩壊堆積物から採取された扁平なカラマツの樹幹である（図4）．一部に樹皮を残し，約100枚の年輪を数えることができた．この試料からは，外周部の年輪の幅が狭く試料を取り出しにくいため，最も外側の年輪から数えて30枚目（IDF-30）から，75枚目（IDF-75）まで年輪5枚ごとに試料を採取した．このうち，IDF-30，35，40，50，60，75の6点を地球科学研究所／β-Analytic Inc. に依頼して加速器質量分析計を用いた$^{14}$C年代測定を実施した．測定と補正の結果を表1にまとめた．

(2) OTR

試料OTRは糸魚川―静岡構造線活断層系北端部の活動時期を検討する目的で，糸魚川市蒲原沢下流，姫川との合流点から約150m上流右岸（図2）で採取された．試料は直径約50cmの針葉樹の樹幹で，中心部は失われていたが，樹皮および表層の約50の年輪が

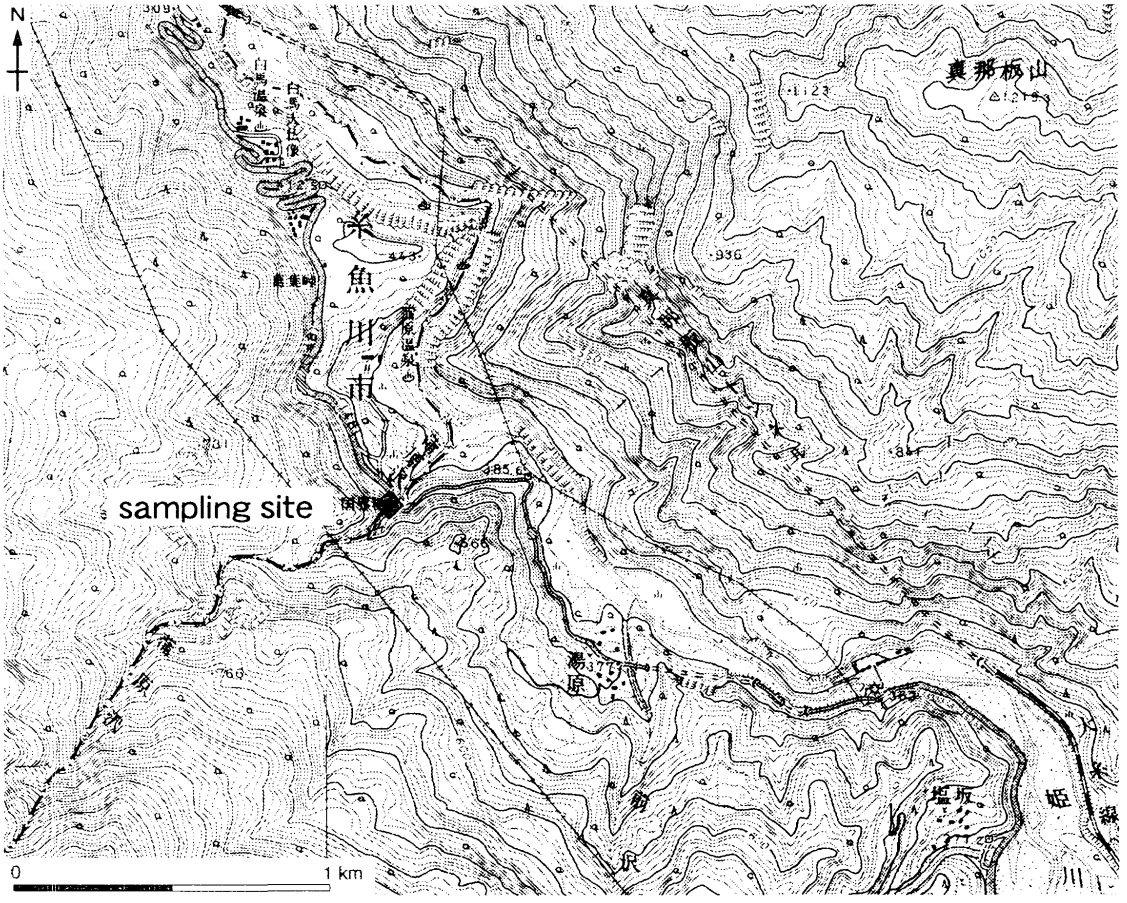


Figure 2 Locality of OTR sample.

The west-facing concaved slope on the eastern side of Hime-kawa about 1 km north of the sample locaity failed to cause a huge landslide damming up the stream. Based on 1:25,000 topographic map "Amakazariyama" and "Echigohiraiwa" by Geographical Survey Institute.

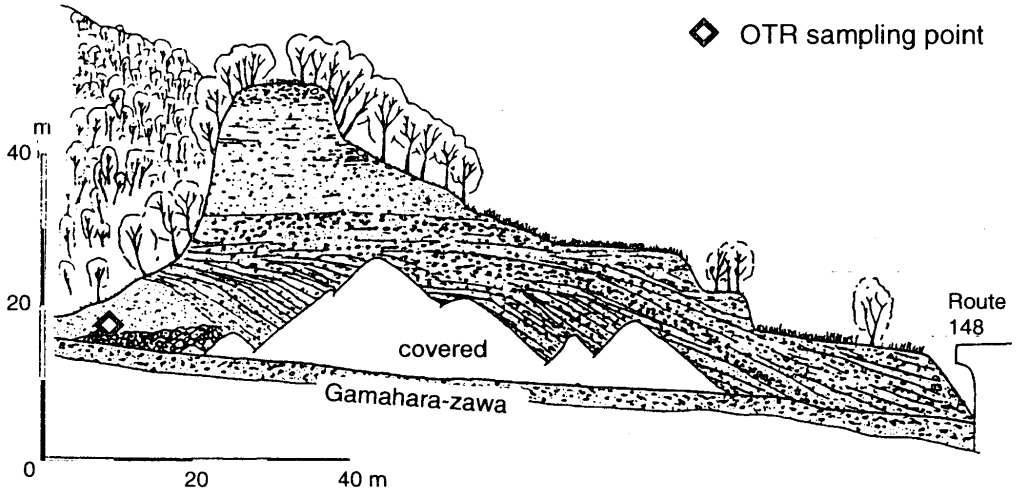


Figure 3 Lake deposits overlying the OTR sample (Koaze and Ishii, 1996).

The OTR sample lied at the top of the landslide deposits under massive sand deposits covered with foreset thin layers of deltaic sediments deposited in the landslide-induced lake.

Table 1 Conventional dates, prior and posterior probability distribution by wiggle matching of the IDF and the OTR trunk samples.

Sample number indicates the number of rings counted from the outermost ring of the sample. Prior is probability distribution based on dendrocorrection before wiggle matching. Posterior is probability distribution after wiggle matching. 1σ and 2σ represent respective 68.2% and 95.4% confidence levels. Prob. is a sum of probability of the respective age range. All calibration and calculation were made using OxCal v2.18 (Ramsay, 1995) on VirtualPC® in PowerMacintosh 9500/200.

| | Date | Prior [cal. age in AD] | | | | Posterior [cal. age in AD] | | | | agree- |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| sample | BP | 1σ | prob. | 2σ | prob. | 1σ | prob. | 2σ | prob. | ment, % |
| ***Sample IDF*** | | | | | | | | | | overall agreement: 110.9 % [171.8% excluding IDF-30] |
| IDF-75 | 610±50 | 1290 - 1400 | 1.00 | 1280 - 1410 | 1.00 | 1384 - 1396 | 1.00 | 1376 - 1403 | 1.00 | 105.8 |
| *Beta-95808* | | | | | | | | | | |
| IDF-60 | 570±40 | 1310 - 1360 | 0.63 | 1290 - 1430 | 1.00 | 1399 - 1411 | 1.00 | 1391 - 1418 | 1.00 | 108.2 |
| *Beta-95807* | | 1380 - 1410 | 0.37 | | | | | | | |
| IDF-50 | 520±50 | 1320 - 1350 | 0.21 | 1290 - 1460 | 1.00 | 1409 - 1421 | 1.00 | 1401 - 1428 | 1.00 | 156.6 |
| *Beta-95806* | | 1390 - 1440 | 0.79 | | | | | | | |
| IDF-40 | 510±40 | 1400 - 1437 | 1.00 | 1310 - 1360 | 0.16 | 1419 - 1431 | 1.00 | 1411 - 1438 | 1.00 | 135.6 |
| *Beta-95805* | | | | 1380 - 1460 | 0.84 | | | | | |
| IDF-35 | 490±40 | 1409 - 1440 | 1.00 | 1320 - 1350 | 0.05 | 1424 - 1436 | 1.00 | 1416 - 1443 | 1.00 | 133.6 |
| *Beta-95804* | | | | 1390 - 1470 | 0.95 | | | | | |
| IDF-30 | 380±50 | 1440 - 1520 | 0.69 | 1430 - 1640 | 1.00 | 1429 - 1441 | 1.00 | 1421 - 1448 | 1.00 | 39.7* |
| *Beta-95840* | | 1580 - 1630 | 0.31 | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | *warning for poor agreement < 60% |
| ***Sample OTR*** | | | | | | | | | | overall agreement: 111.8% |
| OTR-40 | 710±60 | 1240 - 1310 | 0.77 | 1200 - 1400 | 1.00 | 1275 - 1295 | 0.42 | 1260 - 1310 | 0.46 | 113.2 |
| *Beta-94496* | | 1350 - 1390 | 0.23 | | | 1355 - 1375 | 0.58 | 1340 - 1390 | 0.54 | |
| OTR-30 | 620±60 | 1280 - 1400 | 1.00 | 1270 - 1420 | 1.00 | 1285 - 1305 | 0.42 | 1270 - 1320 | 0.46 | 110.7 |
| *Beta-94495* | | | | | | 1365 - 1385 | 0.58 | 1350 - 1400 | 0.54 | |
| OTR-20 | 680±60 | 1260 - 1320 | 0.59 | 1230 - 1410 | 1.00 | 1295 - 1315 | 0.42 | 1280 - 1330 | 0.46 | 90.3 |
| *Beta-94494* | | 1350 - 1390 | 0.41 | | | 1375 - 1395 | 0.58 | 1360 - 1410 | 0.54 | |
| OTR-10 | 610±60 | 1290 - 1400 | 1.00 | 1270 - 1420 | 1.00 | 1305 - 1325 | 0.42 | 1290 - 1340 | 0.46 | 102.5 |
| *Beta-94493* | | | | | | 1385 - 1405 | 0.58 | 1370 - 1420 | 0.54 | |
| OTR-5 | 520±60 | 1310 - 1350 | 0.29 | 1290 - 1470 | 1.00 | 1310 - 1330 | 0.42 | 1300 - 1340 | 0.46 | 106.0 |
| *Beta-94492* | | 1390 - 1450 | 0.71 | | | 1390 - 1410 | 0.58 | 1380 - 1420 | 0.54 | |
| OTR-0 | 520±50 | 1320 - 1350 | 0.21 | 1290 - 1460 | 1.00 | 1315 - 1335 | 0.42 | 1300 - 1350 | 0.46 | 107.0 |
| *Beta-94491* | | 1390 - 1440 | 0.79 | | | 1395 - 1415 | 0.58 | 1380 - 1430 | 0.54 | |

保存されていた（図５）．この樹幹は崩壊堆積物を覆う三角州の前置層堆積物下位の崩壊堆積物直上から採取された．三角州性の堆積物は，姫川右岸の真那板山西斜面が崩壊して姫川をせき止めた際，せき止め湖を埋積して形成されたものと考えられている（図３：小疇・石井，1996），OTR試料では，最も外側の年輪（OTR-0）から，40枚目（OTR-40）まで年輪５枚ごとに試料を採取した（図５）．採取に際しては１年分の年輪を正確に切り取ることをめざしたが，OTR試料の場合，年輪幅が狭いため多少前後の年の年輪も分析試料に含まれる結果となった．このうち，特に隣接年輪の混入が大きい試料を除いて，IDF-0，5，10，20，30，45の６点を地球科学研究所／β-Analytic Inc. に依頼して加速器質量分析計を用いた$^{14}$Ｃ年代測定を実施した（表１）．

## ４．結果

(1) $^{14}$Ｃ年代プロットと補正曲線の比較

図４，５には，直感的なパターン合わせとしてのwiggle matchingの結果を示す．比較の対象とした補正曲線はStuiver and Becker (1993)による10年ごとのデータをプロッ

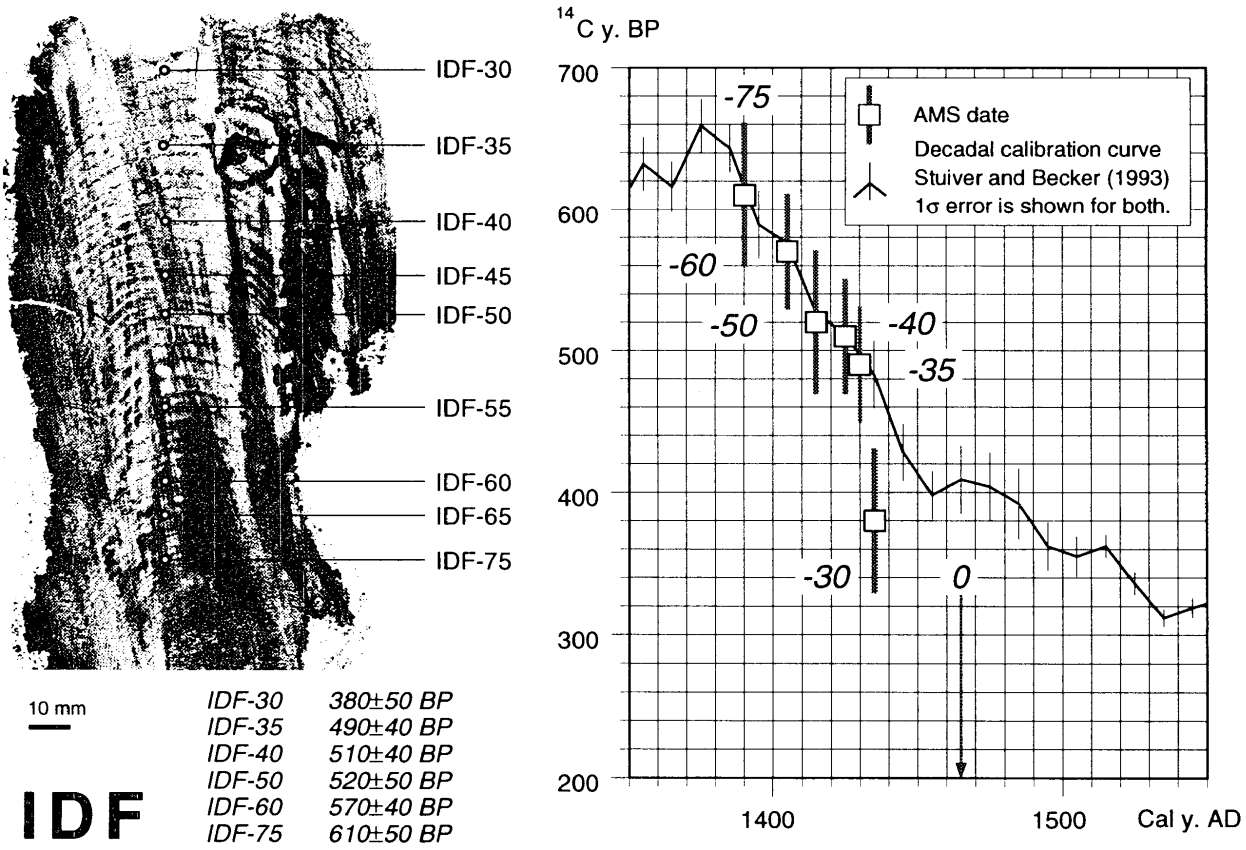


Figure 4 The IDF sample with individual tree-ring sample spots (left) and the conventional dates plotted with a decadal calibration curve by Stuiver and Becker (1993).
Arbitrary graphic wiggle matching showing its idea. Note the good matching of the samples except IDF-30.

トしたものである．このプロットでは，試料の$^{14}$C年代の縦軸方向の位置と横軸方向の間隔が固定されている．$^{14}$C年代のプロットを横軸方向に平行移動させて，補正曲線とプロットが一致する状態での，最も外側の年輪の年代がその樹木が死んだ年代を示す．本節ではまずグラフィックなパターン合わせについて検討し，次節でOxCal 2.18による定量的なmatchingの結果を示す．

IDF試料では図4のように，IDF-30の年代を1435 AD付近にプロットするとIDF-35からIDF-75までの$^{14}$C年代の平均値はほぼその時期の補正曲線と一致し，最も外側の年輪の年代は1465 AD頃と予想できる．1点だけ補正曲線から大きく離れるIDF-30を除外して，その他のサンプルの$^{14}$C年代値がおよそ1σの範囲で補正曲線と重なり合う範囲は，最も外側の年輪の年代でおよそ1430～1490 ADの範囲であろう．ここにプロットした個々の$^{14}$C年代を年輪年代によって暦年補正した場合の1σに対応する暦年の幅は120年前後であるから，$^{14}$C年代のプロットが補正曲線と一致する場合wiggle matchingの効果は大きいことが予想される，

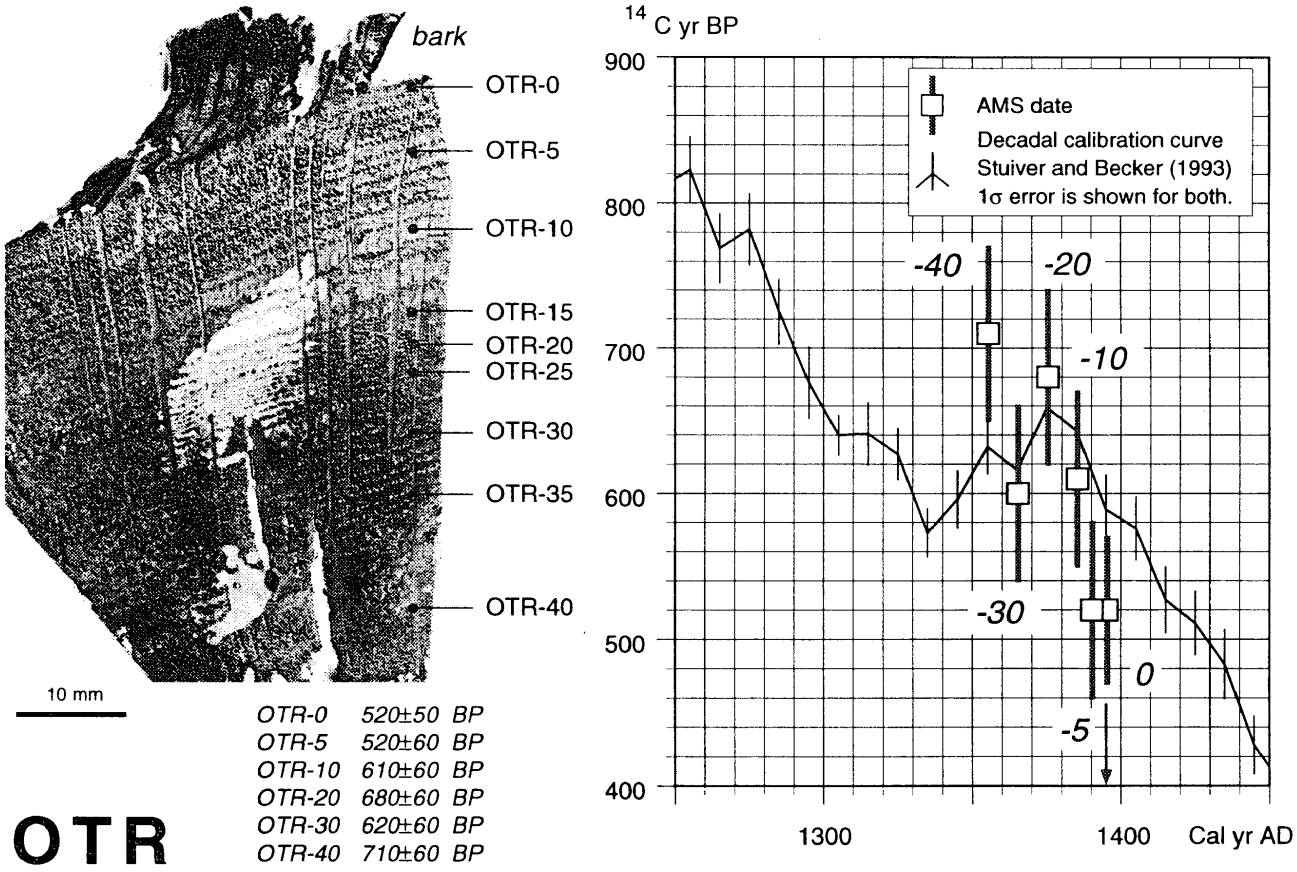


Figure 5 OTR sample with individual tree-ring sample spots (left) and the conventional dates plotted with a decadal calibration curve by Stuiver and Becker (1993).
Arbitrary graphic wiggle matching is shown for example. It correlates the older date of IDF-30 with the low of the calibration curve at 1360 AD. This kind of qualitative matching is proved to be fallacious especially when the mean age of conventional dates do not fall onto the calibration curve.

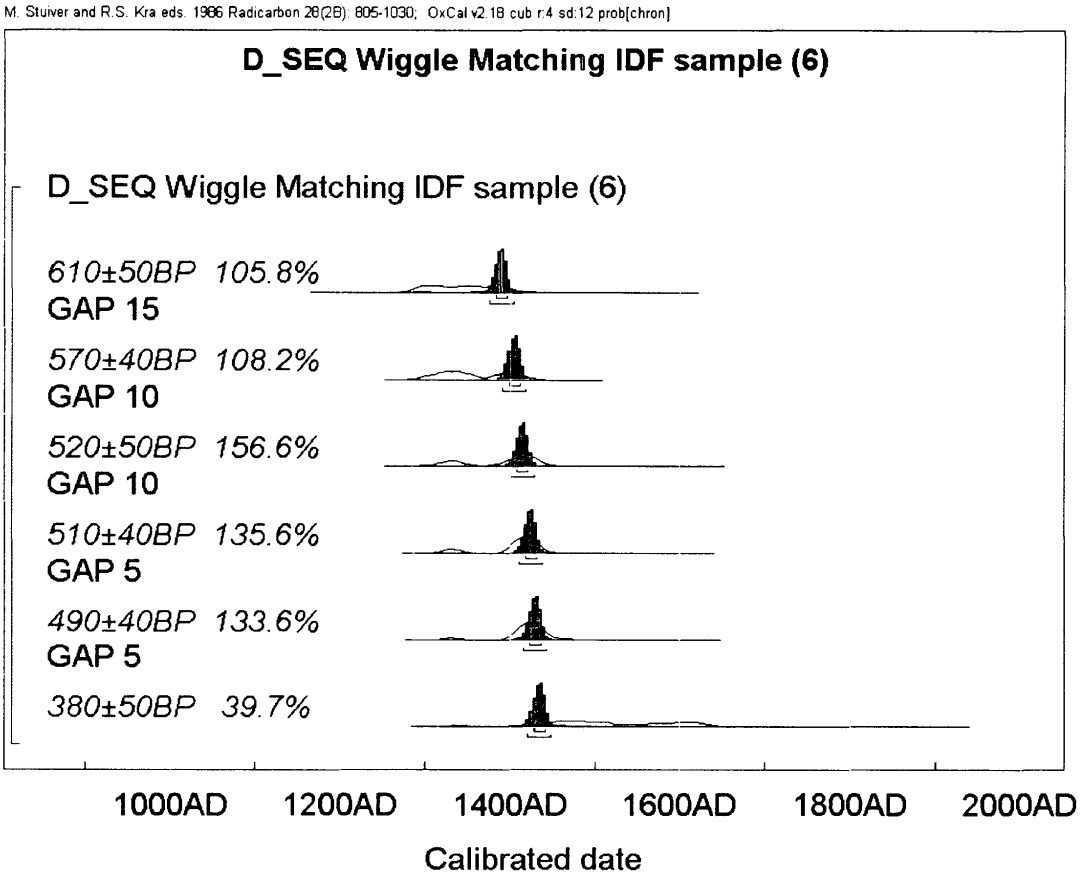


Figure 6 Prior (open) and posterior(solid) probability distribution against calendar age of individual IDF samples. Calcuration and graphic output by Ramsey (1995).

OTR試料の場合，年代測定値のプロットは補正曲線から大きく外れるが，OTR-20とOTR-30がそれぞれ極大と極小を示す．また，OTR-5からOTR-20までは単調に年代が古くなる．この傾向は補正曲線の1375 ADの極大前後の変化と一致している．先にも記したようにStuiver (1993)の結果からは，1年ごとの$^{14}$C年代の変動（初生$^{14}$C濃度の変動）は10～20年の平均値の変動の数倍に達することがわかっている．これらを考慮して，matchingを試みた例を図5に示した．この例では最も外側の年輪の年代，すなわち試料の樹木が生存を終えた年代は1395 ADと推定できる．仮に平均値の極大・極小，単調増加の絶対値ではなく，パターンだけが一致することだけに着目すると，matchingの誤差は±10年である．また，一年ごとの年代値の変動を補正曲線±50年［Stuiver (1993)の経年変動幅のおよその値］として，すべての年代値が±1σの範囲でこの変動幅に含まれるようmatchingを行うと，OTR-0のとりうる暦年は1295～1440ADとなる．OTR試料の場合，補正曲線が1300 ADから1400 ADまでほぼフラットとなるため，正確に年代を決定することは困難な時期である．

(2) OxCal v. 2.18によるmatching

IDF試料では，IDF-30を除いて補正曲線の変化パターンとよく一致する．そして，予

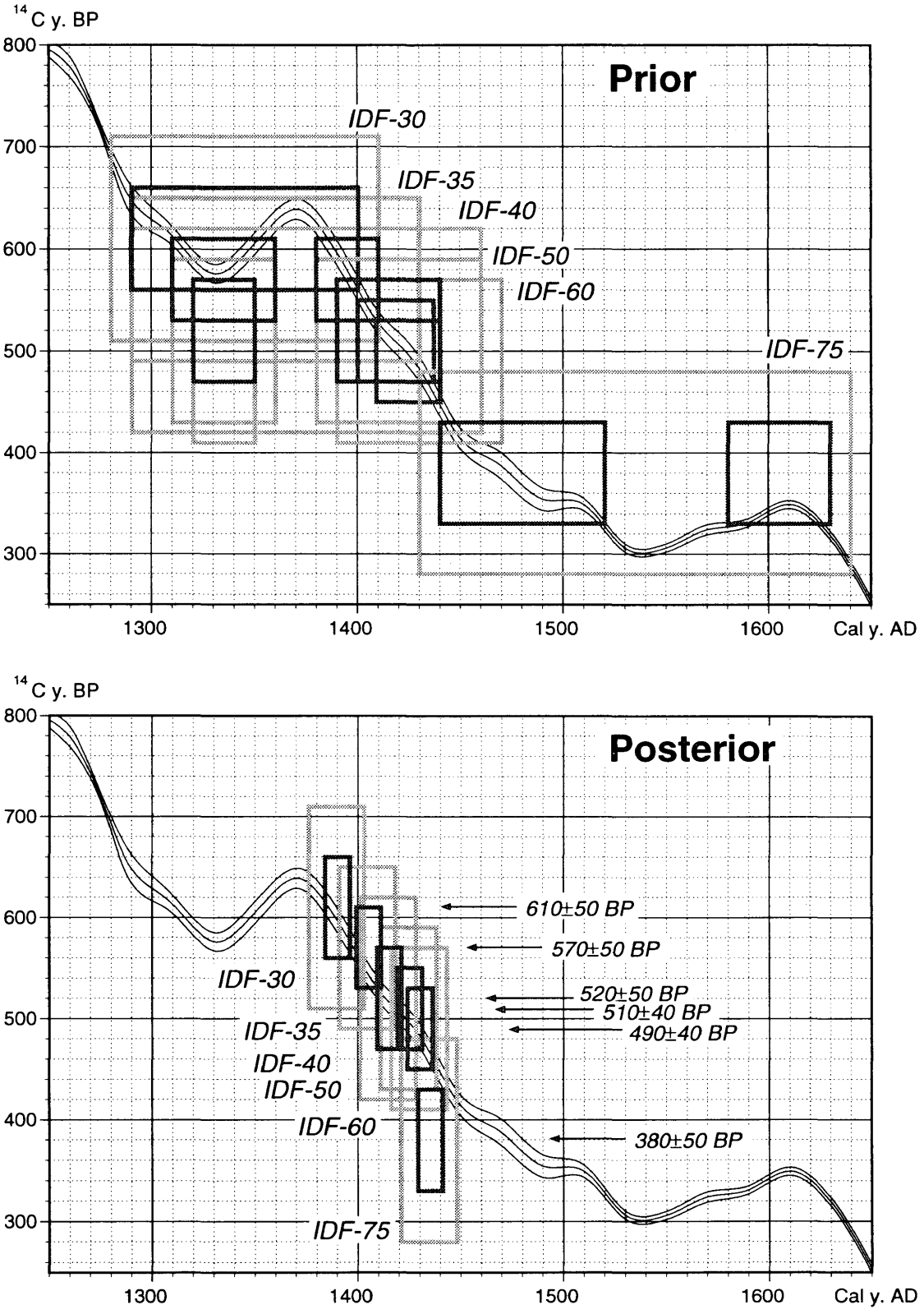


Figure 7 Diagrams showing prior (upper) and posterior (lowere) ranges of conventional and dendrocorrected age. In each diagram,a pair of rectangulars with the same center point value of radiocarbon age indicates the range for 1σ (68.2% confidence) by darker perimeter and the range for 2σ (95.4% confidence) by lighter perimeter. Calibration curves are based on the standard data file prepared for the Oxcal v2.18 (Ramsey, 1995). Upper and lower curves show the range of 1 curve s. Spline fitting is applied for all curves.

想されたようにOxCal v2.18 (Ramsey, 1995)を用いたwiggle matchingでも年代値に顕著な改善がみられる（図6・7，表2）．表2から明らかなように，wiggle matchingを行う前の暦年補正値の，$^{14}$C年代の1σ，2σに対応する年代幅はそれぞれ，30～110年，130～170年であるが，wiggle matching後の年代幅はそれぞれ12年，27年と求められている．その結果から，IDF試料を埋めた崩壊は1459～1471 AD（1σ）あるいは1451～1478 AD（2σ）に発生したと推定できる．

OTR試料の場合は（図8，表2），補正曲線が平坦な時期にあたること，$^{14}$C年代の逆転や補正曲線とのずれが大きいことから，wiggle matchingを行っても年代精度にほとんど改善はみられなかった，$^{14}$C年代の1σ，2σに対応する補正後の年代幅はそれぞれ，110～150年，150～200年であるが，wiggle matching後の年代幅はそれぞれ100年，130年と求められている．その結果から，OTR試料の最も外側の年輪の年代は1315～1415 AD (1σ) あるいは1300～1430 AD（2σ）と推定できる．前節に記したような平均値の極大・極小の一致は，年代値の差や標準偏差，確率分布を考えた場合意味のあるmatchingの根拠とはならないといえる．

## 5．まとめと考察

以上に述べた年代測定とwiggle matchingの結果，IDF，OTR各試料の最も外側の年

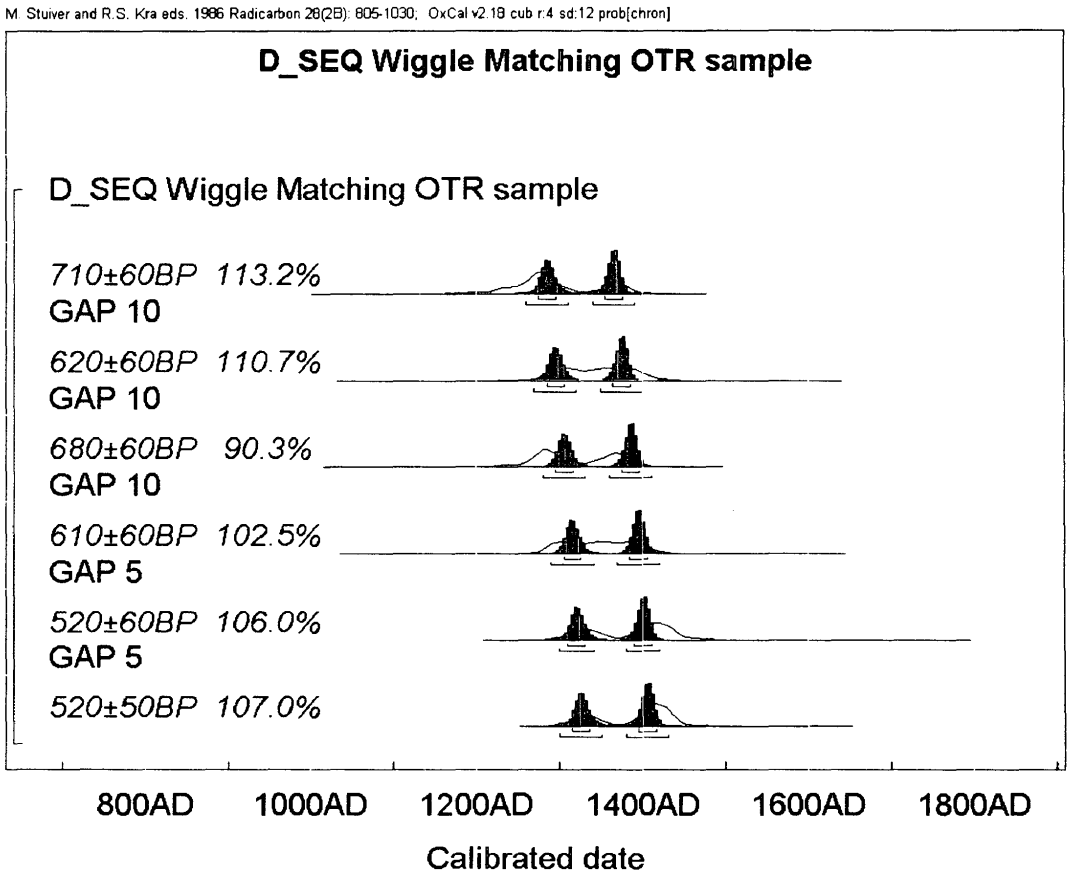


Figure 8 Prior (open) and posterior(solid) probability distribution against calendar age of individual OTR samples. Calculation and graphic output by Ramsey (1995).

輪の暦年代（1σ）は1459～1471 AD, 1315～1415 ADと求められた．IDF試料を得た長野県伊那谷地域では，この時期の古地震や崩壊についての歴史記録は知られていない．またOTR試料に関連する糸魚川―静岡構造線活断層系北部での地震や崩壊による姫川のせき止めを記録する史料も知られていない．これらの崩壊・地すべりが地震に関連するものか否かを明らかにするためには，同時に発生した崩壊が他に存在することを確認する必要がある．そのためには伊那谷断層帯・糸魚川―静岡構造線活断層系周辺地域での調査と多数の年代測定を引き続き行わなければならない．

IDF試料の結果からも明らかなように，補正曲線が単調に変化してかつ傾きが大きい時期の$^{14}$C年代値は，wiggle matchingなど高精度年代決定の手法によって最終的な年代の精度を著しく改善することができる．逆にOTR試料をいかに高精度に年代測定してもその結果は必ずしも精度のよい年代とはならない．したがって，高精度年代決定を行うためには，補正曲線の変化を念頭において，もっとも効率よく精度を上げるための戦略をもつ必要がある．

## 謝辞

本研究をすすめるにあたって，Dr. Bryan Atwater (U.S. Geological Survey) とのディスカッションが大変役に立った．また，成果の発表と討論の機会を与えて下さった名古屋大学年代測定試料研究センターの皆様に厚く感謝する．なお年代測定には地質調査所の研究費を使用した．

## 引用文献

Biasi G. and Weldon R. J. II (1994) Quantitative refinement of calibrated $^{14}$C distribution. Quaternary Research, 41, 1-18.

活断層研究会 (1991) 新編日本の活断層－分布図と資料－，東京大学出版会，437p.

小疇　尚・石井正樹（1996）真那板山の崩壊と姫川の堰き止め．日本地理学会予稿集，49，192-193.

古城　泰（1995）測定値の平均化とウイグルマッチング－高精度年代決定のための二，三のテクニックについて－．第四紀研究，34，129-134.

松島信幸（1995）伊那谷の造地形史－伊那谷の活断層と第四紀地質－．飯田市美術博物館調査報告書，3，145p.

Ramey, C. B. (1995) OxCal v 2.18: Radiocarbon Calibration and Statistical Analysis Program, Research Lab. for Archaeology, Oxford (http://www.rlaha.ox.ac.uk/oxcal/oxcal_h.html) から無償配布されている．

Stuiver, M. (1993) A note on sigle-year calibration of the radiocarbon time scale, AD 1950-6000 BC. Radiocarbon, 35, 67-72.

Stuiver, M. and Becker, B. (1993) High-precision decadal calibration of the radiocarbon time scale, AD 1950-6000 BC. Radiocarbon, 35, 35-66.

Ward, G.K. and Wilson, S.R. (1978) Procedures for comparing and combining radiocarbon age determinations: a critique. Archaeometry, 20, 19-31.

# Radiocarbon dating of medieval trunks in central Japan
## -- high precision age determination using wiggle matching--

Koji Okumura,
Department of Geography, Faculty of Letters, Hiroshima University
Higashi-Hiroshima, 739-8522 Hiroshima, Japan *e-mail: kojiok@ipc.hiroshima-u.ac.jp*
Takashi Koaze and Masaki Ishii
Department of Geography, Faculty of Letters, Meiji University
Nobuyuki Matsushima and Yoshiharu Teraoka
Iida City Office

Radiocarbon dating is one of the most useful dating methods for historic age within a few thousand years. However, the dates are in most cases not precise enough to correlate a dated event with historic records, for common standard deviation (1σ) of 40 to 80 years results in dedndrocorrected age range of more than 100 calendar years. To reduce this uncertainty wiggle matching was applied to trunk samples from central Japan. The dates might indicate timing of earthquakes. One sample named IDF from under debris flow deposits near Iida, Nagano had about 100 tree rings. The 30th, 35th, 40th, 50th, 60th, and 75th single rings counting from the outermost ring are dated by AMS method. 40 to 60 year standard deviation (1σ) of conventional dates brought 30 to 110 calendar year age ranges prior to wiggle matching. Numerical wiggle matching based on Bayesian rules in Oxcal v2.18 reduced this unceratinty to 12 years. The outermost ring of the IDF sample is hence estimated as between 1459 and 1471 AD with 68.2% confidence or between 1451 and 1478 AD with 95.4% confidence. This well-constrained result is mostly owing to the steep inclination of the calibration curve in the period between 1380 and 1450 AD. Another sample named OTR trunk lied in the lowest part of landslide-induced lake deposits along the Hime-river in Itoigawa city, Niigata. The age of the death and burial of the tree is probably comparable with the age of the landslide itself. From the 50 rings of the trunc sample, the outermost, 5th, 10th, 20th, 30th, and 40th rings were dated by AMS method. Wiggle matching for this sample did not significantly refined the dendrocorrected dates as the conventional dates do not match well with the calibration curve and the dates are located right on a distinct wiggle of the curve around 1370 AD. The estimated age of the outermost ring is 1315 to 1335 and 1395 to 1415 AD with 68.2% confidence or 1300 to 1350 and 1380 to 1430 with 95.4% confidence. For both dates there is no known historic record on an earthquake or landslides. Further collection and high-precision dating of samples of similar age and area to these samples will help to reconstruct the events.