

平成 22 年 5 月 1 日現在

研究種目： 基盤研究(B)  
 研究期間： 2007 ～ 2009  
 課題番号： 19310002  
 研究課題名(和文) 樹木年輪の酸素・水素同位体比を用いた日本各地における長期水循環変動の精密復元  
 研究課題名(英文) Detailed reconstructions of long-term variations in water cycle over all Japan using tree-ring oxygen and hydrogen isotopic ratios  
 研究代表者  
 中塚 武 (NAKATSUKA TAKESHI)  
 名古屋大学・大学院環境学研究科・教授  
 研究者番号： 60242880

研究成果の概要(和文)：樹木年輪のセルロースに含まれる酸素と水素の同位体比が、過去の降水量や相対湿度の変動を、年～月の単位で極めて良く記録しているという知見に基づき、北海道から南西諸島に至る日本各地で、過去数百～数千年に亘る水循環の変動を復元して、梅雨前線活動とエルニーニョの関係の周期変動や、洪水・旱魃のサイクルが日本の歴史に与えた影響、水循環変動に対する植物の長期応答などについて、気候学・歴史学・生態学的解析を行った。

研究成果の概要(英文)：Based on the knowledge that oxygen and hydrogen isotope ratios in tree-ring cellulose can record past changes in precipitation and relative humidity in yearly and seasonal time resolutions, variations in water cycles at many areas from Hokkaido to Southwest islands in Japan were reconstructed during last several hundreds or a few thousands years and analyzed for their climatological, historical and ecological implications, such as long-term changes in Baiu-ENSO relationship, impact of flood and drought cycles on Japanese history and long-term response of vegetation to global warming.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	5,200,000	1,560,000	6,760,000
2008 年度	4,800,000	1,440,000	6,240,000
2009 年度	4,900,000	1,470,000	6,370,000
年度			
年度			
総計	14,900,000	4,470,000	19,370,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：環境学 ・ 環境動態解析

キーワード：樹木年輪、セルロース、酸素同位体比、水素同位体比、水循環、古気候、日本列島

## 1. 研究開始当初の背景

樹木年輪は、気象観測測器の及ばない過去の時代の古気候情報を復元できる媒体として、世界中で活用されてきた。特に、その広い空間網羅性、長い時間スケール(数10～数1000

年)、高精度の時間解像度(1年単位)は、他の古気候復元媒体(堆積物、氷コア、サンゴ等)と比べても、圧倒的な優位性を持っている。しかし、日本においては近年まで、樹木年輪を用いた長期の気候変動の復元は、殆ど

行われてこなかった。その理由として、年輪幅等の従来の樹木年輪パラメーターには、気候以外の因子、即ち植物自身の生理・生態学的要因が大きく作用してしまうということがあり、特に、日本の森林のように樹木密度の高い場所では、年輪幅の長期変動に、「隣接個体との光をめぐる競争」が直接反映されてしまうため、長期の気候復元は原理的に難しいという事情があった。

近年、この状況を変える画期的な技術が開発された。それは、年輪などに含まれる有機物の酸素・水素同位体比を、迅速・簡便に測定することができるオンラインの熱分解元素分析計-質量分析計システム (TCEA-IRMS) である。研究代表者 (中塚) は、平成12年に日本で初めてこの装置を導入し、酸素・水素同位体比が年輪研究にどのように応用できるかについて検討を重ねてきた。

研究代表者 (中塚) は、北海道を初め、本州やロシア・カムチャッカ、中国など様々な地域で、樹木年輪の酸素・水素同位体比と気候因子の関係についての基礎的研究を進め、酸素・水素同位体比は、年輪幅の経年変化パターンが著しく異なる個体間でも極めて良い相関を示すこと、つまり樹木毎に固有の因子ではなく、外部環境 (気候) の情報を純粋に反映しうること、また酸素・水素同位体比は、夏季の相対湿度や降水量と高い相関関係を示し、従来、成長の制限因子ではないことから、年輪幅から復元することが困難であった「湿润地域の降水量」の復元に有効であることなどを明らかにした。更に、酸素同位体比と相対湿度の対応関係を、年輪層の中の微細な季節変化のレベルでも確認することに成功し、月～週単位の気象変化のデータまでが、樹木年輪から抽出できる可能性が出てきた。

その結果、日本のような樹木密度の高いモンスーン多雨地域であっても、酸素・水素同位体比を用いることで、長期的かつ高精度の気候変動、特に水循環変動の復元を行うことが可能になりつつあった。

## 2. 研究の目的

北海道から南西諸島まで、日本は様々な異なる気候区分からなり、それぞれの地域に数百～千年以上の樹齢を持った現生の樹木が無数に存在する。また日本には、歴史的に多くの木造構造物があり、遺跡中の木材や自然の埋没木なども含め、数百～数千年前の木材試料が各地に分布している。研究分担者 (光谷) は、長年に亘り日本全国の現生の年輪円盤を収集し、歴史学・考古学的な多数の木材断片と合わせて、年輪幅の膨大な時系列データを取得し、その短周期変動パターンを前後に組み合わせることで、檜と杉に関する過去3000年間に及ぶ連続的な年輪幅の変動データと、その根拠となる木材を確保していた。

そこで、本研究では、研究代表者 (中塚) が研究分担者 (河村) と共に開発してきた、樹木年輪の酸素・水素同位体比による古気候の復元に関する新しい研究手法を、研究分担者 (光谷・安江) が収集し年代決定してきた、日本各地の現生樹木試料及び過去の木材試料に応用することで、日本における広域かつ長期に亘る気候変動 (特に水循環変動) の復元に、初めて本格的に取り組むこととした。

## 3. 研究の方法

日本各地から、長期に亘って年輪の計測が可能な木材試料を確保して、その年輪からセルロースを抽出し、酸素・水素同位体比の経年変動を測定した。セルロースの抽出に際しては、テフロン製の短い管に、使い捨ての硬質ポリエチレンフィルターを挿入した、簡易型の濾過器を多数製作し、膨大な数の年輪試料から、短時間に純度の高いセルロースを確実に抽出する方法を開発した。

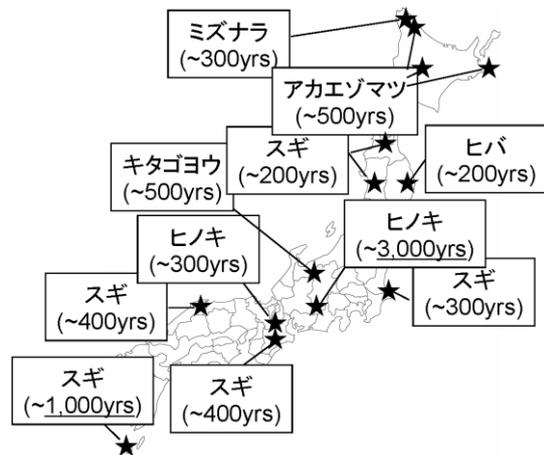


図1. 当初確保されていた樹木年輪試料。

研究開始時点では、図1のような地域、樹種、期間の樹木年輪試料が確保できていたが、実際に同位体比の分析に供した年輪試料は、測定時間の制約などから、北海道北部のミズナラ (18～21世紀)、岩手県東部のヒバ (19～20世紀)、秋田県中部のスギ (19～20世紀)、茨城県南部のスギ (18～20世紀)、長野県南部のヒノキ (18～21世紀、BC1～AD4世紀)、滋賀県南部のヒノキ (18～20世紀)、奈良県北部のスギ (17～20世紀)、島根県東部のスギ (17～20世紀)、鹿児島県屋久島のスギ (18～21世紀) などである。併せて比較検討のために、中国・山西省のカラマツ (17～21世紀) の分析も行った。ほとんどの地点で、複数 (2～10) の樹木個体の試料を分析し、酸素・水素同位体比の測定の再現性の検討も行った。

得られた年輪の酸素・水素同位体比の時系列データは、現生木の場合、まず近傍の気象測候所の気象データ (月別) との相関を解析して、準備研究および理論的予測の通り、樹

木年輪セルロースの酸素・水素同位体比が、実際に、過去の降水量や相対湿度などの水循環の変動を、正確に記録しているかについて、検討を行った。更に古文書資料などの、他の古気候記録媒体から復元された、過去の降水量などのデータとも比較を行って、古い時代の水循環復元の信頼性についても、検証した。

古気候、特に水循環変動を記録していることが証明できた時系列データについては、更に、フーリエ解析、ウェーブレット解析などの時系列解析に供して、その変動の特性を時代毎に検討した。また、同位体比の時系列データを、世界中のさまざまな地域の気候変動インデックスと比較して、相関関係の解析を行い、日本の水循環の変動が、どのような地球規模および地域の気候要素の影響下で、長期的に変動してきたのかを明らかにした。更に、水循環変動と、日本史の各時代における諸々の出来事との関係を、歴史的に解析することを試みた。

#### 4. 研究成果

##### (1) 古気候復元指標としての能力の評価

北海道から屋久島まで、日本各地の樹木年輪セルロースの酸素同位体比の経年変動は、少なくとも過去 50 年間に於いては、近傍の気象測候所で観測された夏季の相対湿度との間で、強い負の相関を示し、樹木年輪酸素同位体比が、日本全国の各地域において、夏季の水循環変動の指標になることが明らかとなった。

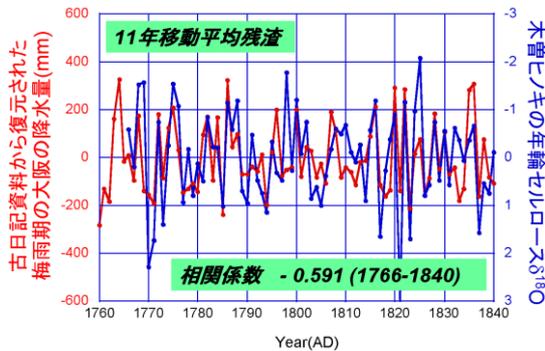


図2. 江戸時代後期における木曾ヒノキの年輪酸素同位体比と古日記資料から復元された大阪の梅雨期の降水量の変化(水越, 1993). それぞれ、11年移動平均値からの残渣成分。

更に、図2に示すように、長野県南部で得られた江戸時代後期の樹木年輪セルロースの酸素同位体比を、古文書の記録から復元された同時代の大阪における梅雨期の降水量の推定値と比較したところ、両者の間には、高い負の相関が認められ、水循環変動の記録としての樹木年輪酸素同位体比の能力は、近年のみならず、過去の時代においても成立していることが証明された。しかし、同時に、ヒノキなどの特定の樹種については、樹木年

輪の酸素同位体比が、幼樹期に顕著に高くなることも確認され、100年を越える長周期変動の復元のためには、樹種を選んだり、樹齢効果を補正したりする取り組みが必要であることも、明らかとなった。

##### (2) 長周期～短周期の気候変動の復元と解析

日本各地の樹木年輪セルロースの酸素同位体比の変動からは、さまざまな気候学的・歴史学的な新しい発見がもたらされた。ここでは、場所ごとにかいつまんで、特徴的な発見について述べる。

##### ① 梅雨前線活動とエルニーニョ南方振動(ENSO)のテレコネクションの長期変動

梅雨期における日本の降水量等、東アジア夏季モンスーンの変動が、ENSOによって規定されていることは良く知られているが、その関係は歴史的に一定しておらず、北太平洋の表面水温分布の数10年周期での変化(PDO)などに伴って逆転する可能性が、20世紀後半の気候学的解析から指摘されてきた。しかし、その関係(テレコネクション)が、小氷期などの大きな気候変動を背景として、過去どのように変化して来たかについては、全く知られていない。今回、「梅雨期の降水量の古気候記録」としての、長野県南部のヒノキ年輪酸素同位体比と、別途様々な研究者の手で復元されてきた「ENSO関連の古気候指標」との間で、長期に亘って相関係数を計算(15年幅の移動相関解析)することで、この問題に世界で初めてチャレンジした(図3)。

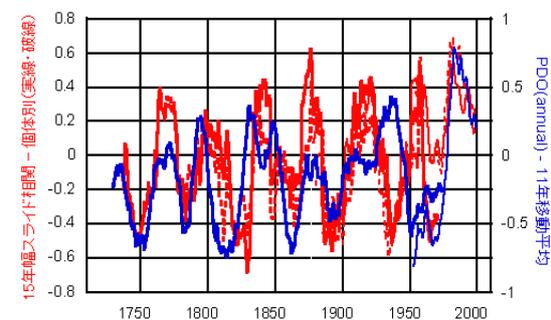


図3. 木曾ヒノキの年輪酸素同位体比と SOI 指数(Stahle et al., 1998) 間のスライド相関と北米の樹木年輪幅から復元された PDO 指数の経年変化。

その結果、日本の梅雨期の降水量と ENSO の関係は、過去約 250 年間に亘り、一貫して、約 40 年の周期で、正負逆転を繰り返してきたこと、そして、その変動は、20 世紀前半の一部の時期を除くと、ほぼ完璧に PDO の変動によって調律されてきていることが明らかとなった。今後、この関係の意味を、それが崩れる唯一の時代である、20 世紀前半の特性と共に、包括的に理解していくために、新しい「長周期の気候学的解析」を進めていくこ

とが求められる。

## ②地球温暖化に伴う日本付近の長期に亘る水循環の変化

地球温暖化に伴って、世界各地の水循環がどのように変動してきたのかは、地球環境問題の最大の関心事のひとつである。日本付近では、過去 30 年間ほどの間に、相対湿度の低下が生じていることが知られているが、小氷期以来の相対湿度の長期変化については、良く分っていなかった。図 4 に、樹齢 500 年以上で幼樹効果の影響が無視できる屋久杉 10 数個体から採取された年輪試料のセルロース炭素・酸素同位体比(多個体混合データ)の過去 3 世紀における経年変化を示す。

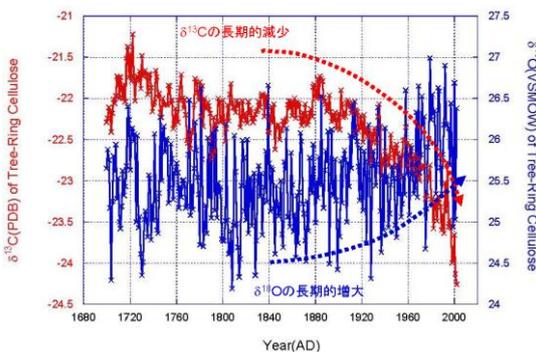


図 4. 屋久杉の年輪セルロースの炭素・酸素同位体比の過去 3 世紀間の経年変化。

炭素同位体比が、化石燃料消費に伴う大気 CO<sub>2</sub> の濃度の増大と同位体比の低下を反映して、近年急激に低下してきているのと対称的に、同じ時期に、屋久杉の酸素同位体比は、一貫して増大を続けている。この事実は、地球温暖化に伴って、日本の南部では、過去 150 年以上に亘って一貫して、相対湿度の低下、つまり、乾燥化もしくは、降水の集中化が進んできたことを示唆するものである。

## ③北東北の樹木年輪酸素同位体比の東西比較によるオホーツク海高気圧の復元

オホーツク海高気圧は、夏季に冷涼湿潤なヤマセを東北地方の太平洋側に吹き付け、歴史上、度重なる冷害を当地にもたらして来た。それ故、ヤマセ及びオホーツク海高気圧の長期に亘る変動メカニズムを理解することは、気候システムの解析のみならず、日本の農業の未来を予測する上でも重要である。樹木年輪の酸素同位体比は、ヤマセがもたらす「夏季の相対湿度の上昇」を復元する上で、もっとも都合の良い指標であると言え、本研究では、北東北の東西、即ち岩手県東部と秋田県中部の間で、樹木年輪酸素同位体比の変動を比較することで、東北地方に東西反対称の影響を与えるヤマセの復元を試みた。

図 5 は、岩手県と秋田県の樹木年輪酸素同位体比の「差」の経年変動を、20 世紀の北半

球全域における 6 月の海面気圧分布の経年変動と比較して、その相関を地図にプロットしたものである。図から明らかなように、北東北の東西で得られる樹木年輪酸素同位体比は、ヤマセの変動に起因する夏季の相対湿度の東西差を介して、オホーツク海高気圧の変動を排他的に復元することに成功しており、今後、東北地方の樹木年輪の同位体比分析から、日本の夏季の気候を大きく支配するオホーツク海高気圧の変動が、解析できることが証明された。

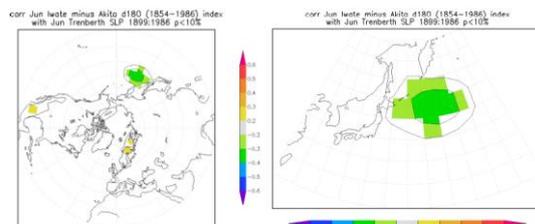


図 5. 北東北の樹木年輪酸素同位体比の東西差と広域海面気圧の経年変動の相関。

## ④弥生時代末期における水循環の変動と日本社会の関係

樹木年輪酸素同位体比による水循環変動の復元は、木材試料さえあれば、例えそれが地層の中に埋もれている埋没木であっても、可能である。気候変動と人間社会の関係を考える上では、初期稲作社会であり夏季の降水量の変動、即ち洪水や旱魃などの影響を極めて大きく受けたであろう弥生時代が、興味深い解析の対象となる。既に過去 3 千年に及ぶ、埋没木などを中心にした樹木年輪試料が確保されている長野県南部において、BC1 世紀から AD3 世紀に亘る樹木年輪セルロースの酸素同位体比の 1 年刻みでの分析を行い、その変動の周期性を解析した(図 6)。

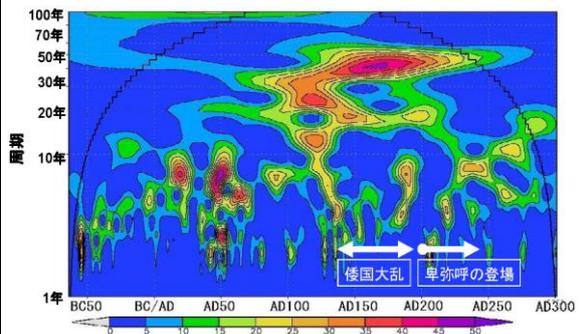


図 6. BC50 年～AD300 年の期間における木曾埋没ヒノキの年輪酸素同位体比の変動周期の変化(Wavelet 解析図)

図からは、「魏志倭人伝」の記述から弥生時代の末期に起きたとされている倭国大乱の時期に、長周期の大きな水循環の変動が起きたことが分る。人間社会と気候変動の関係については、世界各地でさまざまな先行研究例があるが、そこで得られている共通の知見、

即ち、「人間社会は長期に亘る気候災害に弱い」という事実が、弥生時代の末期にも当てはまることが、示唆された。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計5件)

1. Nakatsuka, T., K. Ohnishi and Y. Takahashi (2010): Seasonal changes in relative humidity recorded by intra-ring variations in oxygen isotopic ratio of tree-ring cellulose. in "Earth, Life and Isotope", edited by N. Ohkouchi, Kyoto University Press, Kyoto (in press) 査読有
2. 中塚 武 (2010): 古環境科学の統合と地球環境の将来予測. *月刊海洋*, **42**, 131-132. 査読無
3. 中塚 武 (2010): 地球環境の将来予測のための古環境研究の役割—過去 1000 年間からの教訓—. *月刊海洋*, **42**, 133-141. 査読無
4. Tsuji, H., T. Nakatsuka, K. Yamazaki and K. Takagi (2008): Summer relative humidity in northern Japan inferred from tree-ring  $\delta^{18}\text{O}$  (1776-2002 AD)—Influence of paleoclimate indices of atmospheric circulation. *Journal of Geophysical Research*, **113**, D18103, doi:10.1029/2007JD009080. 査読有
5. 中塚 武・大西啓子・原登志彦 (2008): カムチャッカ半島のカラマツ年輪セルロースの水素・酸素同位体比による夏季気温変動の復元. *月刊地球*, **30**, 207-215. 査読無

[学会発表] (計25件)

1. 中塚 武: 樹木年輪酸素同位体比研究の急速な進展 - 陸と海のプロキシの協同によるアジアの気候変動の解明に向けて、古海洋学シンポジウム、東京、2010年1月8日
2. 中塚 武・大西啓子・河村公隆・尾寄大真・光谷拓実: BC1~AD 3世紀における埋没木曾ヒノキの年輪セルロースの酸素同位体比の経年変動: 考古学・歴史学との接点、日本地球化学会年会、東広島、2009年9月15日
3. 中塚 武: 季節一年レベルの樹木年輪同位体比が語る過去の気候、日本木材学会・組織と材質研究会、つくば、2009年9月12日
4. Nakatsuka, T., Ohnishi, K., Tsuji, H. and Mitsutani, T.: Reconstruction of inter-annual variation in Okhotsk High

from  $\delta^{18}\text{O}$  of tree-ring cellulose in northeastern Japan. PAGES Open Science Meeting, Corvallis, 2009年7月9日

5. Nakatsuka, T., Ohnishi, K., Kawamura, K., Ozaki, H., Mitsutani, T.: Summer hydroclimate variability during BC 1st-AD 3rd centuries in Japan: its potential impact on the integration of Japanese nation. PAGES Open Science Meeting, Corvallis, 2009年7月11日
6. 中塚 武・大西啓子・辻寛之・光谷拓実: 樹木年輪の酸素同位体比を用いたオホーツク高気圧の経年変動の復元、日本気象学会春季大会、つくば、2009年5月31日
7. Nakatsuka, T., Ohnishi, K., Tsuji, H., Yasue, K., Mitsutani, T. and Sampei, Y.: Anomalous decadal variability in O and C isotopic ratios of tree-ring cellulose in southwestern Japan during the little ice age, 日本地球惑星科学連合年会、幕張、2009年5月19日
8. 中塚 武: 地球環境の将来予測のための古環境研究の役割—過去 1000 年間からの教訓—、日本地球惑星科学連合年会、幕張、2009年5月18日
9. 中塚 武: 樹木年輪同位体比による気候-植生相互作用の解析、日本生態学会、盛岡、2009年3月17日
10. Nakatsuka, T., K. Ohnishi, H. Tsuji, T. Mitsutani, K. Yasue, T. Fujiwara and Y. Sampei: Spatial and temporal variations in oxygen isotopic ratios of tree-ring cellulose in Japan during last three centuries. AGU Fall Meeting, San Francisco, 2008年12月17日
11. 中塚 武: 樹木年輪同位体比の精密分析による高時空間分解能での気候変動解析の展望、日本質量分析学会・同位体比部会、新城、2008年11月5日
12. 中塚 武・大西啓子・辻寛之・原登志彦・沢田健・光谷拓実・安江恒・藤原健・三瓶良和: 樹木年輪同位体比による気候変動解析—新たなブレークスルーと異分野との連携の可能性—、樹木年輪研究会年会、東京、2008年9月20日
13. 中塚 武・大西啓子・沢田健・中村英人・塚腰実: 後期中新世(11-10Ma)の木材化石の年輪セルロースの $\delta^{18}\text{O}$ と $\delta^{13}\text{C}$ : 高時間分解能の気候変動解析の可能性、日本地球化学会年会、東京、2008年9月19日
14. 中塚 武・大西啓子・原登志彦・光谷拓実・安江恒: 樹木年輪安定同位体比による気候-植生相互作用の解析の可能性、京大生態研シンポジウム、京都、2008年

- 8月10日
15. 中塚 武・大西啓子・原 登志彦・安江 恒：樹木年輪セルロースの同位体比を用いた気候・植生相互作用の長期変動の解析。日本有機地球化学会年会、名古屋、2008年7月24日
  16. Nakatsuka, T., K. Ohnishi, H. Tsuji, K. Yasue and T. Mitsutani : Changes in Teleconnection Pattern between Baiu and ENSO during Last Three Centuries: Evidences from Oxygen Isotopic Ratios of Tree-Ring Cellulose in Northern, Central and Southern Japan, AOGS Annual Meeting, Busan, 2008年6月8日
  17. 中塚 武・大西啓子・辻 寛之・安江 恒・光谷拓実：過去3世紀における梅雨と ENSO のテレコネクションパターンの周期的変化：樹木年輪セルロースの酸素同位体比からの証拠，日本地球惑星科学連合年会、幕張、2008年5月27日
  18. 中塚 武・大西啓子・辻 寛之・安江 恒・嶋田千春：屋久杉年輪の酸素・炭素同位体比に記録された過去300年間の水循環プロセスの変化、日本気象学会春季大会、横浜、2008年5月20日
  19. Nakatsuka, T., K. Ohnishi and T. Mitsutani: Non-stationary and cyclic teleconnection between Japanese summer monsoon (Baiu) and ENSO during last three centuries: Evidence from oxygen isotopic ratio of tree-ring cellulose in Japanese cypress, IGBP-congress, Capetown, 2008年5月8日
  20. Nakatsuka, T., K. Ohnishi and T. Mitsutani: Baiu front activity in Central Japan during last 276 years recorded by O & H isotopic ratios of tree-ring cellulose : its non-stationary teleconnection to ENSO, International Symposium on Water Isotopes and Climates, Nagoya, 2007年12月2日
  21. 中塚 武・大西啓子・光谷拓実：樹木年輪の酸素同位体比 ( $\delta^{18}O$ ) から復元した過去276年間の日本中部の梅雨前線活動の年々変動—低・高緯度の大気循環場とのテレコネクション解析—、日本気象学会秋季大会、札幌、2007年10月16日
  22. 中塚 武・大西啓子・光谷拓実：ヒノキ年輪の酸素・水素同位体比を用いた過去276年間の日本中部における梅雨前線活動の復元、日本地球化学会年会、岡山、2007年9月20日
  23. 中塚 武・大西啓子・辻寛之・原登志彦・隅田明洋・関幸・光谷拓実・高橋善幸・

犬飼孔：樹木年輪の酸素・水素同位体比の組み合わせによる過去の水循環変動の総合的な復元の可能性、樹木年輪研究会、山形、2007年6月30日

24. 中塚 武・大西啓子・原登志彦・白岩孝行・光谷拓実：カムチャッカのカラマツ年輪セルロースの酸素・水素同位体比を用いた冬季古気温の復元、日本地球惑星科学連合年会、幕張、2007年5月24日
25. 辻 寛之・中塚 武・山崎 孝治・高木健太郎：ミズナラの年輪セルロース酸素同位体比から推定された北日本の夏の相対湿度 (1776-2002年)、日本地球惑星科学連合年会、幕張、2007年5月24日

〔図書〕(計1件)

1. 中塚 武 (2010)：気候と社会の歴史を診る—樹木年輪の酸素同位体比からの解説。地球研叢書「安定同位体というメガネ」(和田英太郎・神松幸弘編) 昭和堂、p. 37-58. 分担執筆

〔産業財産権〕

- 出願状況 (計0件)
- 取得状況 (計0件)

〔その他〕

特になし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中塚 武 (NAKATSUKA TAKESHI)  
名古屋大学・大学院環境学研究科・教授  
研究者番号：60242880

### (2) 研究分担者

光谷 拓実 (MITSUTANI TAKUMI)  
奈良文化財研究所・埋蔵文化財センター・年代学研究室長  
研究者番号：90099961  
(H19→H20: 連携研究者)  
河村 公隆 (KAWAMURA KIMITAKA)  
北海道大学・低温科学研究所・教授  
研究者番号：70201449  
安江 恒 (YASUE KOH)  
信州大学・農学部・准教授  
研究者番号：00324236

### (3) 連携研究者

光谷 拓実 (MITSUTANI TAKUMI)  
奈良文化財研究所・埋蔵文化財センター・年代学研究室長  
研究者番号：90099961