

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 25 日現在

機関番号：64303

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2013

課題番号：23242047

研究課題名(和文)酸素同位体比を用いた新しい木材年輪年代法の開発とその考古学的応用

研究課題名(英文)Development of a new dendrochronological method using oxygen isotope ratios and its archaeological applications

研究代表者

中塚 武(Nakatsuka, Takeshi)

総合地球環境学研究所・研究部・教授

研究者番号：60242880

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,300,000円、(間接経費) 10,590,000円

研究成果の概要(和文)：年輪に含まれるセルロースの酸素同位体比が、樹種の違いに依らず、降水同位体比と相対湿度と言う2つの気象因子のみに支配されて変化することに着目し、日本全国の多様な樹種からなる考古木質遺物の年輪年代決定に利用できる普遍的な年輪セルロース酸素同位体比の標準変動曲線を、過去数千年間に亘って日本各地で作成した。そのために、全国から得られた縄文時代以来のさまざまな年代の長樹齢の年輪試料(自然埋没木、考古木質遺物、古建築物、現生木などのさまざまな檜や杉の木材)の年輪セルロース酸素同位体比を測定すると共に、その成果を縄文時代以降の東海、北陸、近畿などのさまざまな地域の考古遺跡の年代決定に利用することに成功した。

研究成果の概要(英文)：Inter-annual variations in tree-ring cellulose oxygen isotope ratios are in principle dependent only on the two meteorological factors, precipitation isotope ratio and relative humidity, irrespective of differences in tree species. Based on this knowledge, we have established several millennia length of tree-ring cellulose oxygen isotope chronologies all over Japan by analyzing of various types and periods of tree ring samples obtained from wooden materials such as buried natural logs, excavated artefacts and old architectures made of long-living species like cypress and cedar in addition to their living old trees. The newly developed chronologies are now applicable to dating of various species of archaeological wooden materials and in fact have begun to be successfully applied to date many wooden materials excavated from many archaeological sites in various regions, such as Tokai, Hokuriku and Kinki districts since Jomon-era.

研究分野：人文学

科研費の分科・細目：史学・考古学

キーワード：考古学一般 年輪年代法 酸素同位体比 セルロース 暦年代決定

1. 研究開始当初の背景

年輪幅のパターンマッチングに基づく、年輪年代法は、考古学における最も精度の良い暦年代決定法であり、放射性炭素年代法と並んで、木質考古遺物の年代決定に欠かせない方法の一つである。しかし、従来の年輪年代法には、その考古学的な応用に際して、いくつかの大きな制約があった。第一に、年輪幅のパターンマッチングによる年代決定は、気候変動等に伴う樹木の肥大成長量の個体間での同調性を前提にしているため、同じ気候応答特性を持った同じ樹種、もしくは近縁の樹種の個体間でしか、対比は行えない。つまり、樹齢が長い檜や杉などの特定の樹種について作成された年輪幅の標準変動曲線は、広葉樹をはじめとする他の樹種の木材の年輪年代決定には全く利用できないため、これまで日本では、考古遺跡から得られる殆どの木材が年輪年代の検討対象外とされていた。第二に、日本の気候は樹木成長にとって好適で、森林内の樹木個体密度が著しく高いため、年輪幅(成長量)の変動には、隣接個体との間での光を巡る競争等の非気候因子がランダムに作用することが多く、檜や杉でも年輪幅の変動パターンの個体間での相関は低く、年代決定には統計学的に100年以上の年輪数を必要とすることが多かった。

一方で、年輪の主成分の一つであるセルロースの酸素同位体比の変動は、樹種に寄らず、降水(土壌水)の同位体比と相対湿度という純粋に物理化学的な因子で決まることが理論的に分っており、その変動パターンを、檜や杉などの年輪数が多い年代既知の資料と、考古木質遺物の間で対比することにより、樹種の違いを越えて、より少ない年輪数でも、年代決定に至ることが予想できた。従来の年輪年代法によって年代が判明した檜や杉の木材は、中部日本では過去2千年以上に亘って存在しており、また日本の多湿・多雨の気候特性は、砂漠などとは違って、樹木が吸い上げる土壌水の同位体比の広域同調性を保証してくれるため、日本は、この酸素同位体比による新しい年輪年代法を確立する上で最も適した場所であることが予想できた。

しかし、年輪からセルロースを抽出して、その酸素同位体比を分析することは、年輪幅を測ることと比べると、何千倍も手間が掛かるため、従来の分析技術では作業量的にとってもこのアイデアは実用化できず、世界でも誰も試みる研究者は居なかった。分析技術の飛躍的な向上が、この新しい年輪年代法の確立には不可欠な前提となっていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、第一に、日本のできるだけ多くの地域から、過去数千年に亘る木材年輪試料を集めて、そのセルロース酸素同位体比を1年輪ずつ測定して行くことで、できるだけ長い年輪セルロース酸素同位体比の標準変動曲線をできるだけ早く確立すること、

第二に、その作業を効率よく進めるために、新しい分析技術を開発・体系化すること、第三に、作成した日本各地の年輪セルロース酸素同位体比の標準変動曲線を、さまざまな時代の考古木質遺物や古建築材、自然埋没木などの年代決定に利用して行くことである。

3. 研究の方法

第一の目的の達成に必要な様々な時代の木材年輪試料は、以下のような方法で集められた。1) 中部～近畿地方における過去2500年間の檜材。弥生時代以降の日本では平地林の伐採が進んだため、縄文時代とは異なり大量の巨木が泥炭の中から見つかるようなことは殆どない。しかし、長野県南部から岐阜県に至る伊那谷や木曾谷の山岳地域には、現在に至るまで樹齢数百年の檜が自生しており、山岳河川堆積物の中の埋没木や濃尾平野の考古遺跡の井戸枿材、中部・近畿地方の建築古材、そして現生木と言う形で資料が得られる(図1)。本研究では、従来の年輪年代法で年代が決められた檜材に多数の年代未知の檜材を合わせて、それらの酸素同位体比を測定し、過去2千年以上に亘る連続的な酸素同位体比のクロノロジーを作成した。2) 日本各地における縄文時代の杉の埋没林資料。縄文～弥生前期の地層からは、日本海側の湿地や全国各地の火山噴火堆積物などの中に、巨大な杉の丸太が埋没していることが多い。福島大の木村教授の提供によるこれらの資料を、特に縄文時代の年輪酸素同位体比クロノロジーの構築に利用した。3) 屋久島における土埋木。屋久島には樹齢数千年の屋久杉が多数保全されているが、その一部からは年輪コアの採取が可能である。また、過去に伐採されて根株が地中に残された土埋木も、継続的に発掘されている。本研究では、これらから酸素同位体比の測定に利用可能な年輪試料を過去2千年間に亘って収集した。

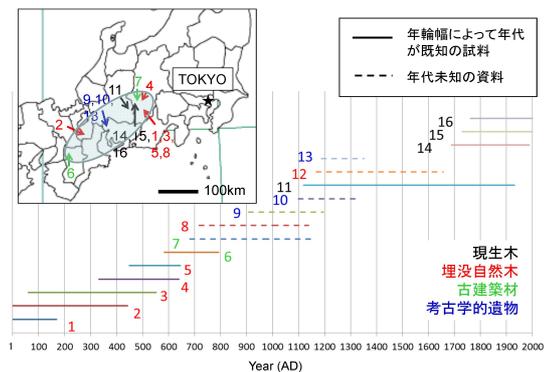


図1. 過去2千年を越える年輪セルロースの酸素同位体比の標準変動曲線の構築に利用した東海・近畿地方の檜年輪資料

第二の目的のために、さまざまなレベルの新しい技術を開発した。従来、年輪を切り分けて粉末化してから、1年輪ずつ化学処理を行いセルロース抽出していたのに対し、木材を木口面に沿った厚さ1mmの薄板にして、数

十～数百の年輪を含む板のまま、セルロース抽出に供する技術を開発した結果、セルロース抽出の時間とコストを10分の1以下にすることができた。また、セルロースの酸素同位体比を測定する際に用いる、熱分解元素分析計と同位体比質量分析計のオンライン装置のオートサンプラーを改良し、また試料を梱包する銀カプセル(12mg, 50円/個)を銀箔(2mg, 1円/個)に変更したことで、同位体比の測定に掛かる時間とコストを、それぞれ数分の1にすることに成功した。その結果、一日当たり200個の年輪セルロース試料の酸素・炭素・水素同位体比のルーチン分析が可能となった。これらは年輪同位体比の研究において、それぞれ最先端の取り組みである。

第三の目的は、本研究の年次進行と共に、酸素同位体比による新しい年輪年代法が、日本各地の考古遺跡の年代決定に有効である可能性が関係者に広く理解されるにつれて、着実に具体化してきた。研究期間内に考古木質資料の分析により、その年代を決定してきた考古遺跡の中には、以下のものが含まれる。愛知県・勝川遺跡、寄島遺跡、一色青海遺跡、清州城下町遺跡、新潟県・青田遺跡、大阪府・難波宮遺跡など。

4. 研究成果

図2に、これまでに年輪セルロースの酸素同位体比を分析(資料を確保)して、その標準変動パターンを確立した(確立できる)地域と時代のリストを示す。縄文時代に関しては、全国各地から資料とデータが得られつつあるが、弥生時代以降については、縄文時代のように大量の巨木がカ所に埋没している事例は少なく、中部・近畿地方の檜材のようにある程度の地域範囲から、さまざまな種類の木材を集めることが現実的であった。

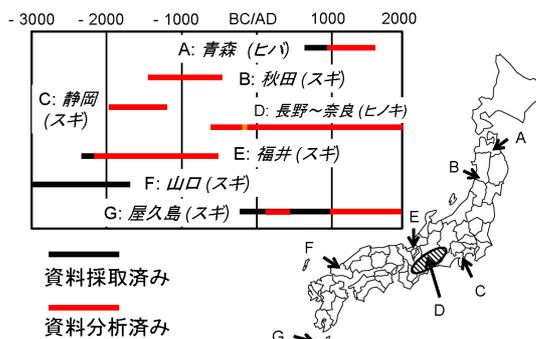


図2. 本研究に用いた年輪資料の場所と年代

図3に、その中部・近畿地方から得られた檜年輪資料16点を用いて、過去2千年を越える連続的な年輪セルロース酸素同位体比のクロノロジーを確立するまでの手順を示す。酸素同位体比の絶対値は、元々の樹木の生息標高の違いなどを反映して大きく異なる(一般に高度が高くなるほど、降水の酸素同位体比が低くなる高度効果が存在する)が、その経年変動パターンの間には、非常に高い相関(0.6-0.9程度)が認められるため、変

動パターンが一致する年代を見つけることは容易であり、従来の年輪年代法で既に年代が決められた資料はもちろん、そうでないものでも、酸素同位体比の変動パターンにもとづいて、正確に年代決定が行えた。檜の酸素同位体比には、成長の初期に100年以上に亘って、徐々に値が低下する樹齢効果が存在するため、負の係数を持つ指数関数で各資料に含まれる樹齢効果を近似して、その効果を生データから差し引いてから、全資料の全データを年毎に平均して、年輪年代の決定に用いる酸素同位体比の標準変動曲線(マスタークロノロジー)を取得した。その結果、データの中の数百年以上の長周期成分は削除されているが、数十年程度の年輪数の木材資料の年代決定には、全く影響はない。

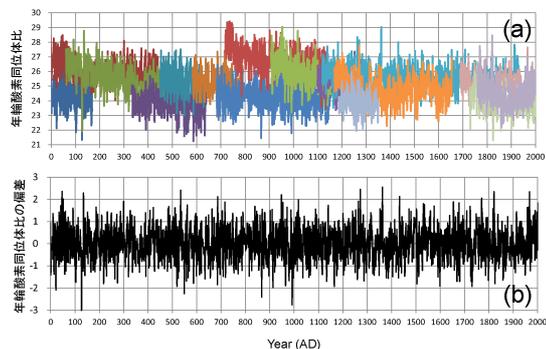


図3. 年輪酸素同位体比の標準変動曲線の作成手順(a)生データ、b)樹齢効果を除去して平均したもの)

表1に、この酸素同位体比のクロノロジーがどの程度有効なのかを示すために、愛知県清洲城下町の近世の遺跡から出土した井戸杵の檜材5点について、その一番古い年層30年分だけの酸素同位体比を測定し、図3のクロノロジーと比較して、年代決定を試みた結果を示す。5点のうち4点については、マスタークロノロジーとの間で、0.8-0.9の極めて高い相関を示す年代が一意的に見つかり、

| ID | 年輪数 | 年代結果(測定は30年) |
|------------|-----|---------------------------|
| KYS1-8897 | 165 | 1290-1454 ($r = 0.874$) |
| KYS2-9804 | 357 | 1218-1574 ($r = 0.861$) |
| KYS3-8862 | 182 | 未確定 ($r_{max} = 0.578$) |
| KYS13-9088 | 166 | 1265-1430 ($r = 0.933$) |
| KYS14-5603 | 193 | 1276-1468 ($r = 0.824$) |

表1. 愛知県清洲城下町遺跡の檜井戸杵材

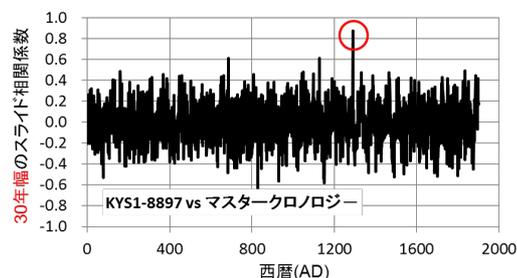


図4. 表1の1資料と図3bの相関解析

統計的(表1)にも視覚的(図4)にも、それらの年代が、この木材資料の測定部位の年代であることが分る。5点中1点のみ年代決定に至らなかったものについても、相関係数0.5以上の年代がいくつか見つかり、その後、測定年輪数を30年から大幅に増やすことで、年代は容易に決定できた。このようにマスタークロノロジーと年輪資料の間で高い相関が得られる理由は、分析に用いた愛知県・清洲の檜材が、おそらくマスタークロノロジーを構成した木材の多くが分布する木曾川流域から来た同じ檜材であったことによると考えられる。

日本中の考古遺跡からは、さまざまな地域のさまざまな樹種の木材が発掘されるが、当然、木材資料の元となった樹木の生息場所が今回の東海・近畿地方から離れば離れるほど、年輪セルロース酸素同位体比の変動パターンとの相関は低くなると考えられ、現生木を用いた検討では、中国・四国で0.4、九州では0.3程度の相関になることが分っている。このことは逆に言うと、年輪数さえ多ければ、木曾檜と屋久杉の間でも、酸素同位体比による年輪年代の決定は可能であることを意味しており、実際、既に従来の年輪年代法で年代が既知の屋久杉と木曾檜の間で、年輪酸素同位体比の変動パターンを比較してみると、相関係数0.3程度で両者はピタリと一致した。問題は、年輪数が100年に至らないような多くの考古木質遺物に関して、どの程度の確率で年代決定に至るのか、ということである。

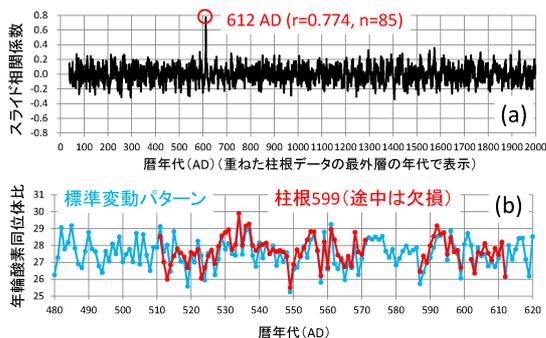


図5 . 大阪・難波宮遺跡の掘立柱根(コウヤマキ a.標準変動曲線と資料の間の相関分析、b.相関が一意的に高い年代での両データ)

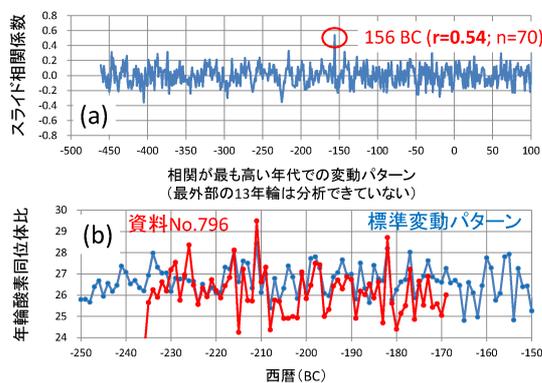


図6 . 愛知・一色青海遺跡の自然木(コナラ a.標準変動曲線と資料の間の相関分析、b.相関が一意的に高い年代での両データ)

図5 - 6に、研究期間内に酸素同位体比による年代決定を行った、大阪・難波宮遺跡の掘立柱根(コウヤマキ:針葉樹)と愛知・一色青海遺跡の自然木(コナラ:落葉広葉樹)の例を示す。このように樹種が全く異なっているにもかかわらず、地域がある程度離れていても、年輪数が50-100年程度あれば、酸素同位体比による年代決定は可能であることが分る。

実際には、本州以南の考古遺跡から普遍的に発掘されるカシなどの常緑広葉樹の場合、年輪セルロースの元となる光合成産物が生産される季節が、落葉広葉樹や針葉樹と異なっているためか、檜のマスタークロノロジーとの相性が必ずしも良くないことも分ってきた。今後、さまざまな樹種の現生木を用いて、そのセルロース酸素同位体比の経年変動のみならず、季節変動(つまり、年層内での変動パターン)を解析するなどして、年輪年代の統計的な決定精度を決めている要因を深く理解すると共に、より少ない年輪数でも、あらゆる樹種に対して、酸素同位体比による年輪年代決定が可能になるように、分析・解析を進めていく予定である。

5 . 主な発表論文等

(雑誌論文)(計11件)

中塚 武・佐野雅規(2014): 酸素同位体比を用いた新しい木材年輪年代法・月刊地球号外63「第四紀研究における年代測定法の新展開:最近10年間の進展-(III) 相対年代と古環境の高精度復元」(山田和芳・下岡順直・奥野 充編)海洋出版, p.106-113 (査読無)

Xu, C., M. Sano, K. Yoshimura and T. Nakatsuka (2014): Oxygen isotopes as a valuable tool for measuring annual growth in tropical trees that lack distinct annual rings. *Geochemical Journal*, in press. (査読有)

Harada, M., Y. Watanabe, T. Nakatsuka, S. Tazuru-Mizuno, Y. Horikawa, J. Sugiyama, T. Tsuda and T. Tagami (2014): Alpha-cellulose extraction procedure for the tropical tree sungkai (*Peronema canescens* Jack) by using an improved vessel for reliable paleoclimate reconstruction. *Geochemical Journal*, 48, pp. 299-307 (査読有)

Xu, C., H. Zheng, T. Nakatsuka and M. Sano (2013): Oxygen isotope signatures preserved in tree ring cellulose as a proxy for April - September precipitation in Fujian, the subtropical region of southeast China, *Journal of Geophysical Research: ATMOSPHERES*, 118, 1-11, doi:10.1002/2013JD019803 (査読有)

Watanabe, Y., S. Tamura, T. Nakatsuka, S. Tazuru, J. Sugiyama, B. Subiyanto, T. Tsuda, and T. Tagami (2013) : Comparison of Sungkai Tree-Ring Components and Meteorological Data from Western Java, Indonesia. *Journal of Disaster Research*, 8, 95-102 (査読有)

Xu, C., M. Sano and T. Nakatsuka (2013): A 400-year hydroclimate variability and local ENSO history in northern Southeast Asia inferred from tree-ring $\delta^{18}O$, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 386, 588-598 (査読有)

Sano, M., P. Tshering, J. Komori, K. Fujita, C. Xu and T. Nakatsuka (2013): May-September precipitation in the Bhutan Himalaya since 1743 as reconstructed from tree-ring cellulose $\delta^{18}O$. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118: 8399-8410, DOI: 10.1002/jgrd.50664 (査読有)

Sano, M., C. Xu and T. Nakatsuka (2012) : A 300-year Vietnam hydroclimate and ENSO variability record reconstructed from tree-ring $\delta^{18}O$, *Journal of Geophysical Research*, 117, D12115, doi:10.1029/2012JD017749. (査読有)

Li, Q., T. Nakatsuka, K. Kawamura, Y. Liu, H. Song (2011) Hydroclimate variability in the North China Plain and its link with El Niño-Southern Oscillation since 1784 A.D. Insights from tree-ring cellulose $\delta^{18}O$. *Journal of Geophysical Research*, 116, D22106, doi:10.1029/2011JD015987. (査読有)

Xu, C., M. Sano, T. Nakatsuka (2011): Tree-ring cellulose $\delta^{18}O$ of *Fokienia hodginsii* in Northern Laos: a promising proxy to reconstruct ENSO?, *Journal of Geophysical Research*, 116, D24109, doi:10.1029/2011JD016694. (査読有)

Li, Q., T. Nakatsuka, K. Kawamura, Y. Liu and H. Song (2011) : Regional hydroclimate and precipitation $\delta^{18}O$ revealed in tree-ring cellulose $\delta^{18}O$ from different tree species in semi-arid Northern China. *Chemical Geology*, 282, 19-28. DOI:10.1016/j.chemgeo.2011.01.004(査読有)

[学会発表] (計 8 件)

中塚武、佐野雅規、許晨曦、大石恭平、岡部雅嵩、大西啓子、河村公隆、坂本稔、尾寄大真、中尾七重、横山操、赤塚次郎、樋上昇、光谷拓実、年輪酸素同位体比による

過去 2 千年間の本州中部における夏季降水量の年々変動の復元 - 歴史水文学への展開 -、日本地球惑星連合 2014 年大会、2014.5.2、横浜 (招待講演)

中塚武、許晨曦、佐野雅規、木村勝彦、木材年輪セルロースの酸素同位体比を用いた新しい高精度年代測定法、日本地球惑星連合 2014 年大会、2014.4.28、横浜 (招待講演)

T. Nakatsuka, M. Sano, K. Ohishi, C. Xu, M. Okabe, K. Ohnishi, K. Kawamura, M. Sakamoto, H. Ozaki, N. Nakao, M. Yokoyama, J. Akatsuka, N. Higami, T. Mitsutani, Periodic amplification of multi-decadal hydroclimate variability at intervals of 400 years in central Japan as a trigger of major political regime shifts during last two millennia, 9th International Conference on Dendrochronology, 2014.1.17, Melbourne Australia.

中塚武、佐野雅規、大石恭平、許晨曦、岡部雅嵩、大西啓子、河村公隆、坂本稔、尾寄大真、中尾七重、横山操、赤塚次郎、樋上昇、光谷拓実、過去 2 千年間の本州中部産の全木材を対象にした年輪酸素同位体比クロノロジーの確立、日本文化財科学会 2013 年年会、2013.7.6、弘前

中塚武、石田朗、岡部雅嵩、佐野雅規、坂本稔、光谷拓実、赤塚次郎、樋上昇、木村勝彦、セルロース酸素同位体比を用いた日本における新しい木材年輪年代法の開発、日本文化財科学会 2012 年年会、2012.6.23、京都

T. NAKATSUKA, A. ISHIDA, M. SANO, J. AKATSUKA, M. SAKAMOTO, T. MITSUTANI, Towards establishment of oxygen isotopic dendrochronology in Japan, 4th Symposium of East Asia- Accelerator Mass Spectrometry, 2011.12.18, 東京 (招待講演)

T. NAKATSUKA, M. SANO, C. XU, Q. LI, K. TAKANO, K. OHNISHI, H. TSUJI, K. YASUE and T. MITSUTANI, Summer monsoon variability recorded in the tree-ring oxygen isotope ratios at humid and temperate Asia, Workshop on the Climate Change over the Past Millennium, 2011.8.25, 北京 (中国) (招待講演)

T. NAKATSUKA, M. SANO, Q. LI, C. XU, K. TAKANO, K. KAWAMURA, A. KAGAWA, K. YASUE and T. MITSUTANI, Development of tree-ring cellulose oxygen isotope chronologies in Asia and Japan: theoretical and technical backgrounds and their applications, 2nd Conference of Asian Dendrochronological Association, 2011. 8. 20, 西安 (中国) (基調講演)

〔図書〕(計 2 件)

中塚 武(2014): 樹木年輪セルロースの
酸素同位体比による気候変動の復元。「現
代の生態学 地球環境変動の生態学」
(原登志彦編) 共立出版, p.193-215
中塚 武(2012): 気候変動と歴史学。「環
境の日本史 日本史と環境-人と自然」
(平川 南編) 吉川弘文館, p.38-70.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中塚 武 (NAKATSUKA, Takeshi)
総合地球環境学研究所・研究部・教授
研究者番号: 6 0 2 4 2 8 8 0

(2) 研究分担者

阿部 理 (ABE, Osamu)
名古屋大学・大学院環境学研究科・助教
研究者番号: 0 0 2 9 3 7 2 0