水文・水資源学会誌

J. Japan Soc. Hydrol. & Water Resour.

Vol. 16, No. 5 (2003) pp. 518-526

安定同位体比分析を用いた豪州乾燥地域における 樹木の水源推定に関する研究

Water sources estimation of trees in an arid area of
Western Australia by stable isotope ratio analysis

小島紀徳^{*}・池田裕弥^{*}・加藤 茂^{*} (成蹊大学工学部応用化学科)

Toshinori KOJIMA・Yuya IKEDA・Shigeru KATO

Department of Applied Chemistry, Seikei University

松本 剛^{*†‡} (成蹊大学工学部応用化学科 新エネルギー・産業技術総合開発機構)

Tsuyoshi MATSUMOTO

Department of Applied Chemistry, Seikei University, NEDO

濱野裕之^{*†‡} (成蹊大学工学部応用化学科, 科学技術振興事業団)

Hiroyuki HAMANO

Department of Applied Chemistry, Seikei University, JST

岡田直紀^{**}・坪山良夫^{**}・斉藤昌宏^{**} (森林総合研究所)

Naoki OKADA・Yoshio TUBOYAMA・Masahiro SAITO

Forestry and Forest Products Research Institute

安部征雄^{***} (筑波大学農林工学系)

Ikuo ABE

Institute of Agricultural and Forest Engineering, University of Tsukuba

高橋伸英^{†‡‡} (信州大学繊維学部精密素材工学科, 科学技術振興事業団)

Nobuhide TAKAHASHI

Department of Fine Materials Engineering, Shinshu University, JST

山田興一[†] (信州大学繊維学部精密素材工学科)

Kouichi YAMADA

Department of Fine Materials Engineering, Shinshu University

^{*}成蹊大学工学部応用化学科 〒180-8633 武蔵野市吉祥寺北町3-3-1

Department of Applied Chemistry, Seikei University, Kichijouji-kitamachi, Musashino, Tokyo, 180-8633, Japan.

[†]新エネルギー・産業技術総合開発機構養成技術者

NEDO (New Energy and Industrial Technology Development Organization), Fellow

^{**}森林総合研究所研究員 〒305-8687 茨城県稲敷郡笠崎町松の里1

Forestry and Forest Products Research Institute, Matsunosato, Kukizaki, Inashiki, Ibaragi, 305-8687, Japan

^{***}筑波大学農林工学系 〒305-8572 つくば市天王台1-1-1

Institute of Agricultural and Forest Engineering, University of Tsukuba, Tennodai, Tsukuba, Ibaragi, 305-8572, Japan.

[†]信州大学繊維学部精密素材工学科 〒386-8567 上田市常田3-15-1

Department of Fine Materials Engineering, Shinshu University, Tsuneta, Ueda, Nagano, 386-8567, Japan.

^{††}科学技術振興事業団研究員

Postdoctoral fellow of Japan Science and Technology Corporation (JST), Fellow

It is required to sequester CO_2 for solving global warming problem. One of the measures proposed for CO_2 sequestration is large-scale afforestation in arid land. From this viewpoint, we set a demonstration/research area in Leonora, Western Australia (Abe *et al.*, 1997; Matsumoto *et al.*, 2000; Yamada *et al.*, 1999). In the present study, the stable isotopes analyses (D , ^{18}O) was conducted for roots and branches of natural tree species, and ground water and soil water in the specific arid area. It was estimated that the water source of *Eucalyptus camaldulensis* is ground water, and *Acacia aneura* and *Hakea preissii*, soil water. The time variation of the ratio through before to after a rainfall event was also measured for several tree species including those artificially planted under different conditions. It was found that the response of trees to the event has varieties depending on not only their species but also their environmental conditions. The present results show the possibilities of selection of tree species fitting for the actual water conditions and application of suitable water management technologies to a specific tree for the most efficient afforestation of arid areas.

Key words: Arid land, Afforestation, Stable isotope ratio analysis, Estimation of water sources

地球温暖化の最も重要な原因物質である CO_2 の有効な削減策の提示が急がれている。近年、 CO_2 削減策の1つとして、乾燥地植林による炭素固定が提案されており、西オーストラリア州レオノラ地域で実証試験がなされている(安部ら, 1997; 松本ら, 2000; Yamada *et al.*, 1999)。そこで本研究では、レオノラ地域に自生する主要樹種の枝、根中の水の安定同位体比分析(D , ^{18}O)を用い、地下水や表層土壌水のそれと比較した。これから、*Eucalyptus camaldulensis* は地下水、*Acacia aneura* および *Hakea preissii* は表層土壌水が主たる水源であることが推定された。人工的に植林された樹木を含む、様々な条件下で生育する種々の樹種について、降雨の前後にかけて同様な測定を行い、樹木の水源の変化についても考察した。その結果、降雨に対する応答は、樹種ばかりではなく、樹木の環境条件によっても影響を受けることがわかった。水条件に適した樹種を選択し、あるいは樹木に適した水条件を人工的に作り上げることにより、限られた水を効率的に利用し、効率的な植林が可能となると期待される。

キーワード: 乾燥地, 植林, 安定同位体比分析, 水源推定

I. 緒言

地球温暖化の最も重要な原因物質である二酸化炭素の大気中濃度削減法の一つとして、乾燥地における大規模植林による炭素固定が提案されている。対象乾燥地としてさまざまな地域が考えられるが、著者らは西オーストラリア州レオノラ地域を研究調査対象地として選択した(安部ら, 1997)。レオノラ地域は典型的な内陸性乾燥気候を示しており、年平均降水量は約220mm/yと乏しい。また、場所的、季節的にも降水パターンは不規則であり、これらを予測することは非常に難しい。効率的な植林のためには、このわずかな降雨を有効に用いることが必要であるが、まれに観測される大雨の際には大量の雨水が表面流出し、塩湖に至る。また、表面流出しなかった雨水についても、樹木に用いられることなく蒸発してしまう量が多いと考えられる。

この地域における様々な調査研究が、著者らのグループにより実施されてきた。これまでに、本地域における植林による CO_2 固定量の定量的把握が行われてきた(Yamada *et al.*, 1999)。また、 CO_2 固定量と土壌の透水性、深度、栄養塩濃度値との相関も報告された(松本ら, 2000)。一方、上述の無駄に流出、蒸発している水を、樹木に有効に供給する手段を提案するためには、これらの樹種の水源を正確に推定

することが重要である。しかしながら、どの樹種がどのような水源を用いているのかについては、未だ明らかにされてこなかった。

水の由来を定量的に推定する方法として、安定同位体比分析法が提案され、分析法の改善(吉田・水谷, 1987)、様々な因子の影響の考察(池田, 1998; 町田, 2000; Mizota and Kusakabe, 1994)もなされてきた。さらに、樹木についても、植物体中の水を抽出し、この分析結果と雨水のそれとの比較から、雨期の推定を行った例(Ehleringer, 1991; Silveira *et al.*, 1987; Takahashi, 1998)に加え、本研究と同様に樹木の水源を推定した論文(Weltzin, 1997; Lisa *et al.*, 1994; Peter *et al.*, 1993)も報告されている。さらに、水源と植物の根の分布との関係についても報告されている(Canadell, 1996; Dawson, 1996, 1998; Jackson *et al.*, 1996)。しかしながら、このような研究を乾燥地に適用した例はみられない。これは、対象地が乾燥地である場合には、現状では土地の経済的価値が低く、水文学的研究の必要性が乏しいという理由からだけではなく、乾燥条件下でのサンプル取得が難しいことも一因と考えられる。

上記の観点から、本研究では、まず以下に詳細に記載する実験1では、レオノラ地域に自然に生育する数種の樹種について、その水源の推定を試みた。フトモモ科ユーカリ属 *E. (Eucalyptus) camaldulensis*

は現地で最も生育が早く、水条件がよい、すなわち乾期でも根域に利用可能な水が存在すると考えられるクリーク（水路・ただし、乾燥地では通常は枯れており、強降雨時のみ水が流れる）沿いに生育する。この樹種は、耐乾性、耐塩性を持つといわれている（森ら、1996）。塩性土壌においては、電気伝導度 40mS/cm （＝塩濃度約 2 % 0.02g/cm^3 ）まで生育可能といわれている（森ら、1996）。耐乾性については、降水量の少ない時期は、地下水を水源としていると推定している報告も見られ（Lisa, J. M. *et al.*, 1994; Peter, J. T. *et al.*, 1993）、乾燥地においても根の成長が早く、水が得られる土壌深くまで、また広域に根を伸ばすことができるためとも考えられる。

一方、当該地域に最も広く分布するマメ科アカシア属 *A. (Acacia) aneura* は、年降水量 $200 \sim 500\text{mm/y}$ 、年間降雨日数 $30 \sim 60$ 日の地域に広く生育しており、耐乾性を持った樹種である。ただし、耐塩性は有さないといわれている（森ら、1997）。

本研究では、これらの主要な 2 樹種に加え、これらの樹種との比較という観点からヤマモガシ科ハッケア属 *H. (Hakea) preissii* も測定対象とした。*H. preissii* は、粘土層やローム層または砂丘によく見られ、樹木ではあるが、成木樹高は最大 2 m 程度である。*A. aneura* と性質が良く似ており、耐乾性を持つ樹種である。

また、現地で試験的に植林がなされている Site を対象とした実験 2 では、上記の代表 2 樹種に加え、両者の中間的な成長速度を有するとされるモクマオウ科モクマオウ属 *C. (Casuarina) obesa* をも対象とした。*C. obesa* は、現地にはまれな樹種であるが、その耐乾性から、試験植林での主要対象樹種としているものである。

本測定により、地下水を主たる水源としている樹種が確定されたならば、以下の植林戦略が可能となろう。すなわち、地下水脈が多く存在する地域であれば表面流出水、あるいは地表において蒸発する水を積極的に地下水に導くことで、水資源の有効活用になると期待される。一方、地下水脈が無い地域への植林は、表層土壌水を主として用いる樹種を用いることとなろう。さらに、水を人工的に与える際には、これらの樹種の主たる水源を特定した上で実施することにより、節水が図れることとなる。

本研究においては、レオノラ地域に生育する樹木数種中の水、ここに存在する代表的な井戸水、土壌水について安定同位体比分析（ D 、 ^{18}O ）を行い、

その大規模な水源推定の検討を行った（実験 1）。現地が日本から離れていること、さらには上述のように乾燥地では降雨が得られることが非常にまれであることから、連続的な測定は困難であったが、現地滞在中に降雨を得ることができ、また、その後の植物中の安定同位体比変化に関するデータをも取得することができ（実験 2）、興味深い結果を得られたため、ここで報告する。

II. 調査地および研究方法

1. 研究調査地の概要

研究調査地は、西オーストラリア州・レオノラ地域の東西 150km 、南北 130km に広がるスタウト・メドウズに存在する。自然状態での植生調査地（Site は数字で表示）、灌水等の技術導入により植生改善を試みた地域（Site は大文字英字で表示）および、付近の井戸の位置（×印）を Fig. 1 に示した。

2. 研究方法

1) 2000年8月30日から9月6日までの現地調査（実験 1）

本調査では、樹種および生育条件の違いによって、

図 - 1 調査地域の詳細

Fig. 1 Detail of the research area

樹木の水利利用状況に与える影響が、どの程度であるか測定した。

本研究で対象とした各 Site の特徴をまず示す。Site 1 はクリークのそばに位置する Site であり、*E. camaldulensis* が主に群生している。Site 2A は、*A. aneura* が数10m の範囲で群落をなして生育している地域である。Site 2B は、Site 2A の周囲に位置し、一面草地となっており、一部土壌も露出している。Site 2A の中心から130m 離れた地点には、*H. preissii* がまばらに生育している。また、Site 1 と Site 2 とは位置的に近く、ほぼその中央に Doyles well (地表から水面までの深さ 3.1m) が存在する。

サンプル採取を行った時期は、2000年8月17日、19日にそれぞれ4mm の降雨があった後の8月30日から9月6日にかけてである。サンプル条件を以下に示す。

樹木中の水の採取にあたっては、枝及び根を対象とした。枝は、採取する樹高や方角を変えた。各 Site で2種類ずつ採取した。根や土壌は採取する場所の深さを変えた。根は、Site 1 では、深さ0~140cm で20cm 毎に8種、160~200cm で40cm 毎に2種採取した。Site 2A, 2B ではそれぞれ20~50cm、10~30cm で10cm 毎に4種、3種を採取した。土壌は、Site 1 では、0~100cm で20cm 毎に6種、150~200cm で50cm 毎に2種採取した。

採取する際、枝に関しては、なるべく成熟した枝(茶色い枝)を選択した。成長過程にある枝は、光合成によって水が消費されることによる同位体比の変化が懸念されるためである。また、根、土壌に関しては、根が存在した深さに注意して採取している。地下水は、井戸からポリ瓶に直接採取した。蒸発による同位体比の変化が無いように、採取した全てのサンプルを冷凍保存した。採取すると同時に樹木の枝、根に関して観察を行なった。

Site 1 では樹高14m、樹冠幅8.0m、幹の周囲長0.6mの*E. camaldulensis*の枝、根を採取した。枝は北西3.1m、南東2.8mの方向の枝を採取した。土壌を2mまで掘り、最も根が多く分布していた深さは60cmであった。根は、水平方向にも鉛直方向にも分布していた。これらのことから、表層土壌水と地下水の両者を利用しているのではないかと推測される。

Site 2A では、樹高9.0m、樹冠幅5.0m、幹の周囲長60cmの*A. aneura*の枝、根を採取した。土壌を50cmまで掘り、最も根が多く分布していた深さは20cmであることを確認した。また、根は水平方向

のみに分布していた。これらのことから、主に降雨後の表層土壌水を利用しているのではないかと推測される。

Site 2B では、樹高約1.5mの*H. preissii*の枝、根を採取した。土壌は1mまで掘り、最も根が多く分布していた深さは20cmであることを確認した。また、根は水平方向のみに分布していた。これらのことから、主に降雨後の表層土壌水を利用しているのではないかと推測される。

2) 2001年9月5日から9月15日までの現地調査(実験2)

降雨後、樹木の利用している水の同位体比が、どのように変化しているかを把握するため、牧場拠点(牧場内での唯一の人の居住地であり、宿舎もここに併設)内にあり、サンプルを採取しやすい Site A で、*E. camaldulensis*, *C. obesa*を対象として、各樹木の枝を採取した。尚 Site A は前述のように人工的植林サイトであり、4.5m間隔で種々の樹種90本が植林されており、成長に及ぼす灌水頻度の影響が調査されている。本サンプルを採取した極乾燥時には最頻で半月程度の間隔で、地下水を用いた灌水を行っている。調査日前後には9月3日に40mmに相当する灌水を行っている。

また、人工的植林サイトである Site A に加えて、Site A 付近で自然状態にある樹木も測定対象とした。降雨(4mm)があった9月6日の1日前(5日)、1(7日)、4(10日)、9日後(15日)の各樹木の枝を採取した。採取時間は、朝、夕刻あるいは夜である。雨水は、降雨を直接ポリ瓶に溜めて採取した。地下水は宿舎での日常生活および灌水に用いている直近の井戸(Well Site A と記載)から採取した。実験1と同様に全てのサンプルを冷凍保存した。

3. 分析方法

地下水、雨水はそのまま得られたものを試料とした。土壌水については、採取した土壌から、高速冷却遠心分離器(佐久間製作所製50A-IVD)を用い、8,8700rpmの条件(pF2-4)で、2時間かけて抽出して得られた水を試料とした。枝や根については、採取した試料を、万力を用いて圧搾することで水を抽出した。このように得られた水をガス同位体比質量分析計(Finning社、MAT252)で分析した。

なお、枝や根の試料については本邦への輸送の困難さから、試料量を最低限に抑えたため、一部の試料量の不足を招き、十分な水量が得られず、精度あ

る測定結果が得られなかったことがある。

4. 安定同位体比分析

水を構成する主要な安定同位体として、水素 (H に対する D)、酸素 (^{16}O に対する ^{18}O) に注目した。慣例に従い、安定同位体比分析結果を、次式で定義される (D , ^{18}O) 値で表した。

$$= (R_{\text{SA}} - R_{\text{ST}}) R_{\text{ST}} \quad [\text{‰}, \text{千分率}] \quad (1)$$

ここで R_{SA} はサンプル中の、また R_{ST} は標準平均海水 (SMOW) 中の、D/H あるいは $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ の存在量比であり、値は標準物質からの同位体存在量比の偏差を表す。地下水あるいは表層土壌水と樹木水との値の差が小さいほど、樹木がその水資源に水源を依存していることを意味する。

III. 結果及び考察

1. 実験 1

1) Site 1 (*E. camaldulensis*) の場合

Fig. 2 に、Site 1 で採取した *E. camaldulensis* についての結果を、表層土壌水 (深さ 60cm のみ、十分な量が抽出された)、近辺の井戸水の分析結果と共に示す。結果については、水素についての偏差を縦軸に、酸素を横軸に取った。左あるいは下に行くほど、値が小さいすなわち軽い水であることを示す。ここで根、土壌についての数字は地表面からの深さ、枝についての英字は方向を表す。

E. camaldulensis の枝、根の値には、方向や深さによる大きな違いは見られず、また根と枝の違いもはっきりとは見られない。また、これらの値 ($\text{D} = -46\text{‰}$, $^{18}\text{O} = -5.9\text{‰}$) は、周辺地下水である Doyles well の値とほぼ一致していることがわか

る。一方、表層土壌水の結果とは異なった値を示している。これらの結果から、*E. camaldulensis* は、地下水を主な水源としていていると考えられる。

E. camaldulensis が生育している表層土壌中には、他の Site で多く見られたハードパン (西豪州に広く分布する不透水層。シリカを主成分とし、鉄分、カルシウムを含むことも多く、これらの作用により堆積土壌が固化して形成されたとされている。) の存在は認められず、地下水を水源としているとの上記の推定とは矛盾しない。*E. camaldulensis* が生育する地域は、降雨が起こればクレークに水が流れ、そのクレーク沿いの深層に水が溜まる地域である。通常、耐乾性が高いといわれている *E. camaldulensis* ではあるが、降水量 200mm 程度の本乾燥地域では、その中でも水条件のよい地域でしか生育していないことから、この樹種の育成のためにはこのような水条件で、さらには、根が地下水脈に到達するまでに十分な灌水などの手段を施すことが必要であると本研究で推定される。

尚、本結果中では Doyles well の地下水の D , ^{18}O 値は表層土壌水よりも低い。すなわち、軽い水であるとの結果を得ている。降雨自身の同位体比には季節変動があることから、降雨後から長時間かけて集積したと思われる地下水の同位体比が、比較的直近に得られた雨水を反映する表層土壌水と大きく異なることは不思議ではない。

さらに、一般的には、表層土壌水は以下の理由により地下水より重くなる傾向があるものと考えられる。すなわち、表層土壌水は、表面から浸透した雨水が蒸発することにより、雨水より重い可能性が高い。また、降雨開始直後の水が重い水であるとすれば、乾燥土壌に降り始めた雨はまず蒸発するが、次いで乾燥土壌がこれを強い力で吸収する。一方、地下に浸透する水は、土壌が飽和状態になった後の比較的軽い水であると考えれば、地下水は雨水より軽くなると考えることができる。

2) Site 2A (*A. aneura*) 2B (*H. preissii*) の場合

測定結果を Fig. 3 に示す。Site 2A での表層土壌水は、深さ 20cm 付近でのみ抽出することができた。Site 2B では十分な量の水の抽出が出来なかった。

Site 2A に生育する *A. aneura* については、*E. camaldulensis* と同様に枝と根の同位体比には、試料採取深さによる大きな違いが見られないことがわかる。*A. aneura* の枝、根の D は約 -30‰ であり、 ^{18}O は約 5.0‰ である。これらの値は、表層土壌水の値と近

図 - 2 安定同位体比分析結果 (サイト 1)

Fig. 2 Result of stable isotope ratio analysis (Site 1)

図 - 3 安定同位体比分析結果 (サイト 2 A, 2 B)
Fig. 3 Result of stable isotope ratio analysis (Site 2A, 2B)

い値となっており、一方、地下水とは大きく異なっている。更には、この地域のハードパンまでの深さは約40cmであり、このことから主な水源が地下水とは考えにくい。以上のことから、水源としては、表層土壌水が最も主要なものとして考えられる。

Site 2B の *H. preissii* に関しては、Site 2A に成育する *A. aneura* と同様に、水源が地下水とはいえないばかりではなく、その植物中の水は *A. aneura* よりさらに重い水となっていた。これは、降雨後に表層に存在した水を主に利用していたか、あるいは表層土壌水を用いていたが、蒸発により Site 2A より重い水となっていたと推定できる。なお、Site 2B の土壌の含水率は小さく、水を抽出することが出来なかった。このことから蒸発が進んでいたことが裏づけられる。また Site 2A の樹木密度は高く、表面からの蒸発は Site 2B に比べ、相当小さいものと考えられる。

E. camaldulensis と *A. aneura* との結果を併せて Fig. 4 に示す。また、それぞれの平均値も示した。

両者の平均値を比較すると、*A. aneura* は *E. camaldulensis* より、重い水を利用していたことがわかる。また、土壌水についても、Site 2A の値は Site 1 の値より重かった。これより、蒸発の進み易い方から、Site 2B, Site 2A, Site 1 の順であったと考えられる。また、地下水を吸水している *E. camaldulensis* が樹高、胸高直径のいずれについても最も大きく成長し、次に *A. aneura* が大きく、*H. preissii* は最も小さい。すなわち、深いところから水を吸う樹種ほど大きく成長するとの関係がみられた。

図 - 4 安定同位体比分析結果 (サイト 1, 2 A, 2 B)
Fig. 4 Result of stable isotope ratio analysis

2. 実験 2

実験 2 で得られた結果を Fig. 5 および 6 に示す。Fig. 5 は自然に近い状況で成育している樹木のデータであり、Fig. 6 は人工的に成育させた Site A の結果である。降雨水についての結果は両図に示したが、

図 - 5 安定同位体比分析結果 (自然)
Fig. 5 Result of stable isotope ratio analysis (natural)

図 - 6 安定同位体比分析結果 (サイト A)
Fig. 6 Result of stable isotope ratio analysis (Site A)

地下水の結果は作図の都合上、Fig. 5 のみに示している。図中にある数字は、サンプルを採取した日付を表している。また、採取時間として 8～9 時を a、17～19 時を b、21～23 時を c と表記する。

自然に近い状態で生育している 3 本の *E. camaldulensis* を区別するため、T (tall) は樹高約 15 m、M (medium) は約 6 m、S (short) は約 4 m ものとする。他の樹木についても、参考のため、上記と同様な基準で、T、M、S と記載した。尚、natural と記載されている樹木の中で、*E. camaldulensis-natural* (S) および *A. aneura-natural* (S) は牧場拠点からも離れており、完全に自然な状態で生育しているものであるが、*E. camaldulensis-natural* (T) および (M) は、牧場拠点にも近く恣意的ではないが付近にはスプリンクラーもあり、地下水が若干灌水されている可能性がある。

また、このときに得られた雨水は、実験 1 よりもさらに重い水であり、一方、地下水については、実験 1 に比して若干重い。

まず、Fig. 5 中に示した自然に生育している樹木に関するデータについて述べる。ほとんど全てのデータが、雨水を除き、右上と左下とを結ぶ直線上に存在している。雨水のみ、この直線からはずれ、大きな D の値を示している。雨水については、採取時間や採取場所による違いも原因の一つとして今後検討する必要があるが、ここでは以下のように整合性のある解釈が可能であった ^{18}O の値のみで考察を行なう。また、他の一部のデータについても、下記のように、D の変化が ^{18}O と異なることについて、さらに検討が必要である。

前述のように、直前の灌水からは時間が経っているが、灌用水に用いた水も軽い地下水であり、一方、本実験 2 では土壌水の測定は行ってはいないものの、実験 1 で示したように土壌水は、重い水であると考えられる。降雨直前 (5 日) の植物中の水は、自然に生育する *A. aneura* のみについては重く、表層付近の水を使用している比率が高いと考えられる。

一方、*E. camaldulensis* については、地下水より重い、*A. aneura* に比べれば軽く、一部表層土壌水を用いているものの、地下水あるいは灌漑水への依存度が高い。

降雨後の変化を見ると、*A. aneura* については軽い方向への変化が顕著に見られる。これは、降雨前には乾燥状態にある *A. aneura* 中の水が重かったのに対し、降雨後には降雨水を大量に、かつ迅速に吸収

したことによると推定される。

また、元々の樹木中の水が、非常に重い水であったため、以下の他の樹種に見られた表層土壌水の乾燥による重い方向への変化が表れなかったものと考えられる。

一方、自然状態で灌水の影響を全く受けていない *E. camaldulensis* (S) の値をみると、降雨前は、今回測定した全ての樹種の内、最も地下水に近い値を示した。降雨後は若干重くなる傾向が見られ、雨水の値に近づいたものの、降雨による変化は比較的小さい。このことから、この樹高は 4 m ほどと低いにも関わらず、地下水が主たる水源であり、この程度の降雨ではあまり大きな影響を受けていないことがわかる。

牧場拠点近くにある樹高約 15 m (T) と樹高約 6 m (M) の *E. camaldulensis* の水の値については、いずれも降雨前の測定は行っていないものの、降雨後は重くなる方向への変化が見られ、降雨後の表層土壌水をも吸い、かつその後の乾燥の進行による変化を表しているように思われる。しかしながら、樹高 6 m の *E. camaldulensis* (M) については、D の変化は ^{18}O と異なる方向性を示しており、さらに検討が必要である。

次に、Fig. 6 に示した人工的植林 Site である Site A に生育している *E. camaldulensis* と *C. obesa* についてのデータについて述べる。

降雨前については、同じ *E. camaldulensis* であっても、Site A に植栽されている樹木中の水は、自然に育成している樹木に比べより重い。これは、表層から灌水されている地下水が、乾燥に伴って重くなり、木がその水を吸っていたためと考えられる。

さらに、Site A に育成する *E. camaldulensis* の降雨前後の変化は、自然状態にある *E. camaldulensis* とは異なり、変化の方向はむしろ自然に生育する *A. aneura* に近い、軽くなる方向が示された。これは、Site A では表層からの灌水によって水条件が改善されており、根系が比較的表層にも発達し、降雨にも反応したためと考えられる。他の植林 Site ではあるが、Site C で *E. camaldulensis* の根の発達状況を観察し、実際に比較的太い根が下方および水平方向の両者に伸びていることも確認した。また、土壌も、植林の際に掘り起こしているため、降雨水も土壌中に浸透しやすかったと考えられる。一方、降雨後の乾燥による重い方向への変化がみられなかった理由は、現地の様子を見ると表層が枯れ草などで覆われてお

り、降水後の乾燥が進みにくかったためと考えられる。

一方、同様な水条件にある *C. obesa* については、降雨前には *E. camaldulensis* に近い値を示していたが、降雨後は D の変化は小さいものの、 ^{18}O は一度軽い方向に動いた後、大きく重い方向に変化した。この樹種は成長が比較的速く、同様に Site C での観察によれば、根は *E. camaldulensis* に比して細く、多数が全体に密に広がっていることが確認されている。このことから、降雨によりまず雨水に反応して軽くなったが、乾燥に伴い重い方向に移行したものと考えられる。しかし、降雨前には、この値より軽い、地下水に近い値であったことを考えると、細かい根が状況に応じて水源を変えている可能性が示唆されよう。

IV. 結 言

レオノラ地域に自生する主要樹種の枝、根中の水の値 (D , ^{18}O) 分析を用い、地下水や表層土壌水のそれと比較した。これから、現地で水条件の良い所に生育する *E. camaldulensis* は地下水、現地で最も広く見られる *A. aneura*、さらに乾燥条件下で生育する *H. preissii* は表層土壌水が主たる水源であることが推定された。これらの結果は、樹木の根分布測定、ハードパンの有無の観察結果とも良い整合性を示した。

また、降雨前後について同位体比の変化を測定した。*E. camaldulensis* と *A. aneura* の2樹種に加え、人工的に植林された Site では両者の中間的な成長速度を有するとされる *C. obesa* をも選択して同様な測定を行ったところ、結果は、条件や樹種により異なる挙動を示した。耐乾性を持ち、表層土壌で水平方向に根をよく伸ばす *A. aneura* は、降雨に迅速に応答した。一方、自然状態にあり、鉛直方向の太い根を有する *E. camaldulensis* は、地下水を主たる水源とすることから、降雨に対する応答はわずかであった。一方、地下水を用いた灌水を行っている *E. camaldulensis* 中の水は、自然状態の *E. camaldulensis* に比してもともと重く、また降雨後の応答も *A. aneura* に近い軽い方向に向かう応答が見られた。灌水を行なったことで、表層付近にも根が発達していたと考えることが出来る。一方、灌水を受けていた *C. obesa* については、降雨前は *E. camaldulensis* に近い値であったが、多方向に細かい根が発達していることを反映し、降雨に敏感にかつ変化の方向も大き

く変化し、水条件により水源を変えている可能性が示唆された。

水条件に適した樹種を選択し、あるいは樹木に適した水条件を人工的に作り上げることにより、限られた水を効率的に利用し、効率的な植林が可能となると期待される。

謝辞: 本研究は、科学技術庁・戦略的基礎研究「乾燥地植林による炭素固定システムの構築(代表 山田興一)」によって実施された。ここに記し、謝意を表する。

引用文献

- 安部征雄・小島紀徳・山田興一(1997): 二酸化炭素対策としての乾燥地における大規模植林, 沙漠研究, **7-1**, pp. 77-81.
- 池田光良・高田 茂・松枝大治(1998): 「北海道の環境水中のトリチウム濃度および D , ^{18}O の高度効果の推定値について」, *Radioisotopes*, **47**, pp. 812-823.
- 町田 功(2000): 「東京都三宅島における降水の酸素安定同位体時空間変化」, **13-2**, pp. 103-11.
- 松本 剛・田中淑子・小島紀徳・加藤 茂・斉藤昌宏・安部征雄・山田興一(2000): 西オーストラリア・レオノラ乾燥地域における CO_2 固定大規模植林技術の検討(1) 塩と植生との関係, 日本海学会, **54**, pp. 196-204.
- 森 徳典(1996): 熱帯樹種の造林特性 第1巻 テキスト NO. 8, (財)国際緑化推進センター, pp. 200-208.
- 森 徳典(1997): 熱帯樹種の造林特性 第2巻 テキスト NO. 9, (財)国際緑化推進センター, pp. 104-118.
- 吉田尚弘・水谷義彦(1987): 「水試料の酸素同位体比測定の簡略化」, **21**, pp. 83-90.
- James, R. E., Susan, L. P., William, S. F. S., and Darren, R. S. (1991) Differential utilization of summer rains by desert plants, **88**, pp. 430-434.
- J. Canadell, R. B. Jackson, J. R. Ehleringer, H. A. Mooney, O. E. Sala, E. D. Schulze (1996) Maximum rooting depth of vegetation types at the global scale, *Oecologia*, **108**, pp. 583-595.
- Leonel, S. L. S. and Peter K. S. (1987) Utilization of freshwater and ocean water by coastal plants of southern Florida, *Ecology*, **68-6**, pp. 1898-1905.

- Lisa, J. M., Peter, J. T., Steve, D. T. and Glen, R. W. (1994) Sources of water used by riparian *Eucalyptus camaldulensis* overlying highly saline groundwater, *Oecologia*, **100**, pp. 21-28.
- Mizota, C. and Kusakabe, M (1994) Spatial distribution of δ , ^{18}O values of surface and shallow ground waters from Japan, south Korea and east China, *Geochemical Journal*, **28**: pp. 387-410.
- Peter, J. T. and Glen, R. W. (1993) The Source of Water Transpired by *Eucalyptus camaldulensis*: Soil, Groundwater, or Stream? Stable Isotope and Plant Carbon-Water Relations, pp. 511-527.
- R. B. Jackson, J. Canadell, J. R. Ehleringer, H. A. Mooney, O. E. Sala and E. D. Schulze (1996) A global analysis of root distributions for terrestrial biomes, *Oecologia*, **108**, pp. 389-411.
- Takahashi, K (1998) Oxygen isotope ratio between soil water and stem water of trees in pot experiments, *Ecological Research*, **13**, pp. 1-5.
- Todd, E. D. (1998) Fog in the California redwood forest: ecosystem inputs and use by plants, *Oecologia*, **117**: pp. 476-485.
- Todd, E. D. and John, S. P. (1996) Seasonal water uptake and movement in root systems of Australia phraeatophytic of dimorphic root morphology: a stable isotope investigation, *Oecologia*, **107**, pp. 13-20.
- Yamada, K., Kojima, T., Abe, Y., Williams, A. and Law, J. (1999) Carbon Sequestration in an Arid Environment Near Leonora, Western Australia. *J. Arid Land Studies*, **9-2**, pp. 143-151.

(受付 : 2002年 8 月 8 日 , 受理 : 2003年 2 月22日)