

PIXE法による塩害激害地の郷土樹種材中の元素濃度

-東北タイにおける塩害発生前後の比較-

酒井正治¹、世良耕一郎²、後藤祥子³、Somsak Sukchan⁴、岡田直紀⁵

¹森林総合研究所立地環境研究領域
305-8687 茨城県つくば市松の里1

²岩手医科大学サイクロトロンセンター
020-0173 岩手県岩手郡滝沢村滝沢字留が森348-58

³日本アイソトープ協会滝沢研究所
020-0603 岩手県滝沢市留が森348-1

⁴Department of Land Development, Ministry of Agriculture and Cooperatives
Phaholyothin Rd., Chatuchak, Bangkok 10900, Thailand

⁵京都大学大学院地球環境学堂
606-8502 京都府京都市左京区吉田本町

1. はじめに

地球規模で、水や風による浸食、有機物の損失、表土圧密、塩類化、土壤汚染および栄養損失を引き起こす農法を実践することで土壤の劣化が止まらない。例えば、地球の土地資源の現状についての世界的な評価（FAO,SOLAW,2011）によれば、25%は非常に劣化しており、8%は中程度に悪化、36%は安定またはわずかに劣化、「改善している」はわずか10%である。残りの土地は草木がない（18%）か、内陸の水系（約2%）で食料生産できない土地である。地球規模の炭素プール量は大きな幅を持って示すことが多いが、IPCC（気候変動に関する政府間パネル）の最新の報告書（AR5,2013）によれば、土壤の炭素蓄積量は 1500-2400 PgC、植物バイオマス炭素量は 450-650 PgC および大気炭素蓄積量は 828 PgCと推定され、土壤の炭素蓄積量は平均でそれぞれ3.5倍、2.3倍も蓄積しており、土壤有機物が分解するか、堆積するか、どの方向に向かうかによって、大気中の二酸化炭素濃度の増減に大きく影響する。このように、土壤の不適切な管理により生じる土壤の質の劣化は地球規模の食料安全保障、気候

変動問題できわめて重要な懸念材料である。このような状況を踏まえ、国連は2015年を国際土壌年と定め、土壌の重要性を再認識する年としている。

前述のFAOの報告書（SOLAW, 2011）によれば、すべての大陸の大部分は土地の劣化を経験しており、とりわけアメリカ西海岸、南ヨーロッパと北アフリカの地中海地方、サヘルとアフリカの角、アジア全体において劣化の状況が著しい。タイも例外ではなく、東北部の面積の17%に相当する、約2.85百万haが塩害の被害を受けている（Arunin, 1992）。この主な原因は、1950年代から始まった森林伐採、

あるいは地下水をくみ上げる近代的な製塩法にともなう不適当な塩水の管理に起因すると考えられるが、近年、農民から灌漑施設の開設が塩類土壌へ誘導したのではとの苦情が寄せられようになった。この地域は、もともと少ない降水量、砂質土壌に起因する痩せ地のため、食料の生産に不向きであった。そこで、タイ政府は農民の生活向上のため、灌漑施設による耕作地の拡大を図ってきたところであるが、灌漑事業と塩害との関連性が指摘されるようになったため、塩害発生年代の特定を科学的に証明する手法が求められている。そこで、酒井ら（2014）は水分ストレスがかかった樹木の葉は高い炭素安定同位体比（ $\delta^{13}\text{C}$ ）を示すことを利用して、塩害地に残存する郷土樹種の材の炭素安定同位体比のクロノシーケンス（年代系列）を調べ、塩害発生年代推定の可能性を示した。その一例として図-1に、東北タイの塩害激害地に残存する郷土樹種、*Acasia tomentosa* 材の安定炭素同位体比（ $\delta^{13}\text{C}$ ）を示す。木の表面から約55mmのところ、安定炭素同位体比（ $\delta^{13}\text{C}$ ）が急激に上昇している。この点を塩害発生年と仮定すると、塩害発生後、海水の主要な成分であるCl, Na, Mg, S, Ca, K元素などが材へ蓄積することが予想される。このことは塩害発生年代を特定するもう一つの指標として材中の元素濃度が候補となることを示唆している。そこで、多元素同時分析ができるPIXE分析法を使って、塩害発生前後の材の元素濃度を分析し比較検討したので報告する。

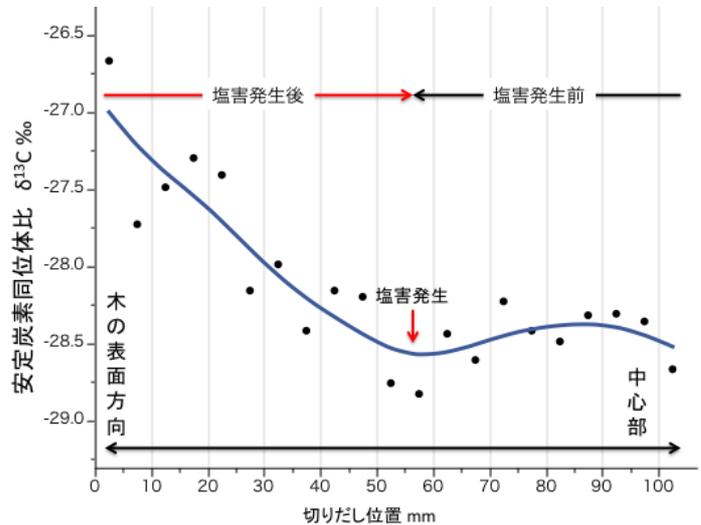


図-1 *Acasia tomentosa* 材の安定炭素同位体比の年代系列
(横軸の右から左方向に向かい、年代が新しくなる)

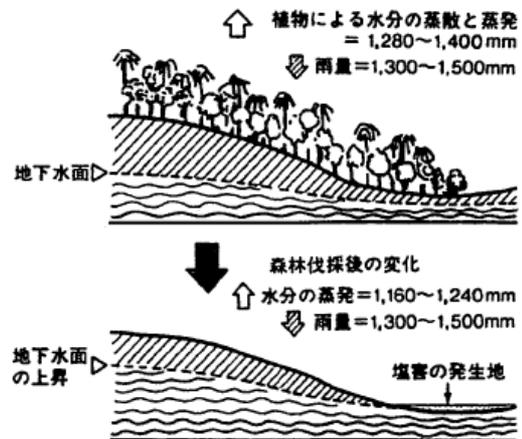


図-2 森林破壊による塩害発生メカニズム
(田坂敏雄:タイの森林環境と生態系の攪乱より改図) ㊦

なお、塩害の主な要因について簡単に説明する。東北タイの塩害は、自然要因として地下に厚い岩塩層が存在することが根本的な原因であるが、それに人為影響、つまり森林伐採、ため池・灌漑施設の開設、近代的製塩が関与している。このうち森林の伐採が塩害の大きな誘因の一つとされ、このメカニズムは科学的に説明されており、概略は図-2の通りである（酒井, 1993）。つまり、森林に覆われている土地では、樹木の蒸散量（1200~1400 mm/年）があるため、地下水が土壌表面から一定の深さに保たれているが、一旦森林が伐採されると、地下水を多量に消費する樹木の蒸散作用が失われ、地下水面が上昇する。塩分を含んだ土壌水は毛管現象により容易に上昇し、低地では塩類が析出することになる。なお、森林の伐採は、1950年代初期に頻繁に行われるようになり、1990年代には、森林率（土地に対して森林のカバーする割合）が10%前半まで減少している（Vityakon et al.2004, Royal Forest

Department, 2004)。但し、上記のメカニズム解明のための実証実験は極めて少なく、三浦ら（1991）が東北タイで行った土壌塩類集積の実態把握とユーカリ植林による地下水面の変動調査で、はじめて上記の森林破壊による土壌の塩類化のメカニズムが実証された。

2 方法

2.1 試験地

タイ東北部のほぼ中央部のコンケン県バンパイ郡に位置し、コンケン市内から直線距離で約45 km南に試験地（MP プロット、N 16-05-21.0, E 102-41-11.7）を選定した。塩害被害程度はタイ土地開発局による被害区分、レベル1に相当する激害地である。なお、タイ土地開発局は激害のレベル1（激害）から被害のないレベル4までの4段階に区分している。地形は平坦で、この地方の塩害地でよく見受けられる高さ1 mほどのとげのある矮性植物、現地名ナムプロム、ナムデー、サケーなどの下層植生が散見され、樹木は郷土樹種3種、*Acacia tomentosa*（現地名、piman）、*Azadirachta indica*（現地名、sadao）、*Sindora siamensis*（現地名、ma hkaa tae）が孤立的にそれぞれ数本残存している。調査時（2013年6月）には、ほぼ土壌表層全面に塩の析出が認められ、周辺部の低地に小池があり、その縁に高さ30 cmほどの湿性植生、現地名ヤーワイが密生していた。

2.2 材採取方法

*Acacia tomentosa*を対象木とし、成長錐（長さ50 mm、φ5.15 mm、スレッド2、Haglof製）を使って、胸高部の1.3 m高さの所で表層から中心部に向かって材コアを採取した（図-3）。なお、木材コアは東西2方向で採取し、それぞれをコア-1、コア-2とした。木の樹高、胸高直径はそれぞれ9.5 m、21.7 cmであった。



図-3 成長錐を木に挿入した様子と採取した材サンプル

2.3 材コアの前処理法

現地で採取した材コアは紙製ホルダーに収納し、日本へ持ち帰った。その後材コアは、幅5 mm、厚さ1.2 mmの薄片に加工され、スキャン画像を保存後、5 mm間隔に切断し、安定炭素同位体比サンプルとした。5 mm幅に切断した材は、往復振動式粉碎器（Wig-L-Bug Grinding Mill, Model-3110-3A）で微粉末にしたのち、元素分析計-質量分析計（NC2500-Mat252）を使って安定炭素同位体比を測定後、その残りサンプルを使ってPIXE分析で元素を分析した。スキャン画像は材構造のチェックおよび心材/辺材の境界を明確に把握するために使用した。

なお、PIXE分析には1点につき約50 mgのサンプル量が必要であったが、安定炭素同位体比測定後の残りサンプル量が少なかったことから、分解能の高い時系列解析を行うことはできなかった。ここでは、塩害発生前後で、材中の元

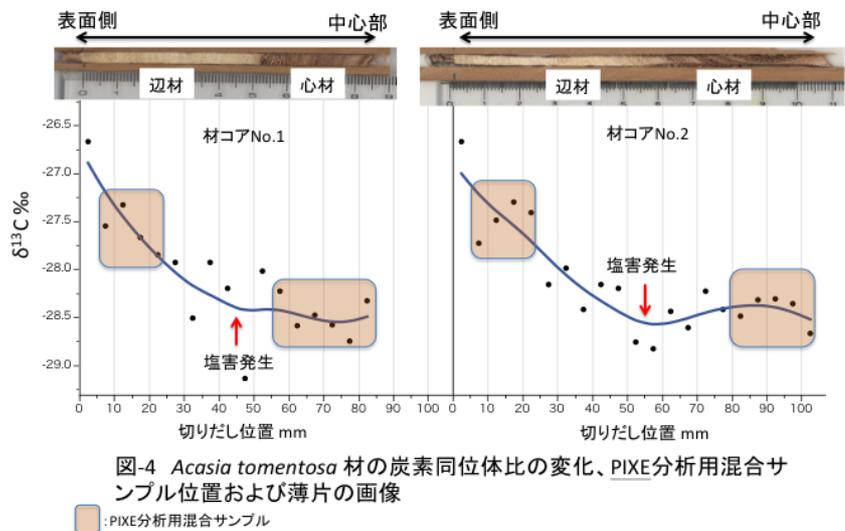


図-4 *Acacia tomentosa* 材の炭素同位体比の変化、PIXE分析用混合サンプル位置および薄片の画像

■: PIXE分析用混合サンプル

素濃度が海水の影響をどのように受けているかを把握することを目的に、安定炭素同位体比の経年変化から推定される塩害発生年の前後の材サンプルをPIXE分析に供試することとし、安定炭素同位体比サンプルから連続する4~6サンプルを選び、それらを合算した混合サンプルをPIXE分析に供試した(図-4)。

2.4 PIXE 分析

PIXE 分析は、パラジウムカーボン (Pd-C) を用いた粉末内部標準法で元素濃度を定量した。材の粉末サンプル 50 mg を秤量し、内部標準として Pd-C を 10,000 µg/g の割合で加え、メノウ乳鉢内で均質化した。その微量をポリプロピレンバックリング膜上に載せ、コロジオンで固定し、ターゲットとした。

なお、得られた元素濃度データは JMP(Mac 版、ver.10)で統計解析および図化を行った。

3 結果と考察

3.1 *Acacia tomentosa*材の元素濃度

表-1および図-5に、*Acacia tomentosa*材の元素濃度 (µg/g) を示した。PIXE分析で 18元素が検出された。なお、材薄片の切断にカッターナイフ (刃はステンレス製)、粉碎にステンレス製容器及びボールを使ったため、ステンレスの材料であるFe、CrおよびNi元素がサンプルに混入した可能性がある。そのため、上記 3元素を除く15元素について解析を行った。また、今回と同じPIXE分析法による小藤田ら (2005) および景守ら (2002) の日本産の材の分析結果を図-5中に示した。なお、景守ら (2002) のデータは、数値で示されていないため図から読み取った。

表-1 塩害発生前後の *Acacia tomentosa* 材の平均元素濃度

元素	元素濃度 µg/g	
	塩害発生前	塩害発生後
Br	11.74	8.046
Ca	6041	2949
Cl	8204	3295
Co	19.56	35.62
Cr	822.5	834.8
Cu	16.32	20.41
Fe	2935	3024
K	1139	3154
Mg	2112	1832
Mn	46.66	54.68
Na	2032	3222
Ni	310.9	319.9
P	236.1	573.0
Pb	8.685	23.66
S	253.2	615.8
Si	777.3	907.2
Sr	39.64	13.37
Zn	18.73	23.46

網掛けは材薄片の切断、粉碎時に汚染の可能性のある元素

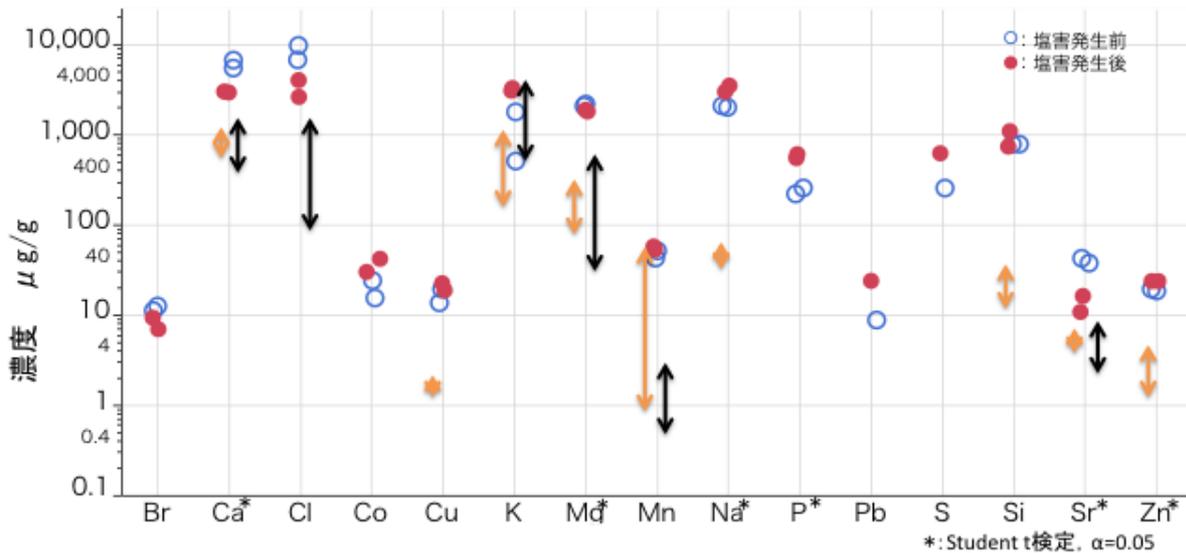


図-5 塩害発生前後の *Acacia tomentosa* 材の元素濃度

- ↑: 日本の5樹種(スギ、カラマツ、アカマツ、ブナ、ミズナラ)のPIXE測定例(小藤田ほか,2005)
- ↑↓: 日本スギのPIXE測定例(景守ほか,2002)

*Acacia tomentosa*材および日本産材で検出された共通の元素は10元素 (Ca、Cl、Cu、K、Mg、Mn、Na、Si、SrおよびZn) で、そのうち、Kを除く9元素は、塩害発生前後とも、*Acacia tomentosa*材で明らかに高く、Kは日本産材と同等あるいはそれより高い傾向であった。この原因として、生育場所の土壌成分が異なっていることが考えられる。つまり、タイ東北部では、地下に厚い岩塩層が存在し、土壌はその影響を受けていると思われる。表-2に海水中の元素濃度を示したが、*Acacia tomentosa*材と日本産材との比較で明らかに高い、あるいは高い傾向にあった10元素の内、CuおよびZnの2元素を除く 8元素 (Cl、Na、Mg、Ca、K、SrおよびSi) は海水中の主要元素および微量元素であった。このことは、*Acacia tomentosa*材は、塩害発生後はもちろん、塩害発生前においても、海水中の塩類の影響を強く受けていることを示唆していた。

3.2 *Acacia tomentosa*材の塩害発生前後の元素濃度比較

この地域は、過去の海底が隆起して台地を形成したため、地下に岩塩層がある。その岩塩に由来する土壌水が表層に析出するため、塩害発生後、海水由来元素 (表-2) の材中濃度が高くなることが予想される。そこで、塩害発生前後の元素濃度を比較した所、6元素 (Ca、Mg、Na、P、SrおよびZn) で統計的 (Student t 検定、 $\alpha=0.05$) に違いが認められた (図-6)。塩害発生後に高くなった元素はNa、PおよびZnの3元素、一方低くなった元素はCa、MgおよびSrの3元素であった。Pが塩害発生後高くなった原因は、耕作地での肥料 (一般的成分はN-P-K) 施用の増加が考えられるが、Zn濃度が高くなった原因は不明である。一般的にZnは焼却炉、金属精錬などの人為発生源と見なされていることから今後の解析にはこれも考慮する必要がある。

表-2 海水中の元素の平均濃度

	元素	濃度 g/l
1	O	878.82
2	H	110.74
3	Cl	19.85
4	Na	11.04
5	Mg	1.34
6	S	0.93
7	Ca	0.44
8	K	0.39
9	N	0.34
10	Br	0.07
11	C	0.03
12	Sr	0.0007973
13	B	0.004649
14	F	0.00133
15	Rb	0.00012
16	P	0.000046
17	I	0.000032
18	Si	0.000003

出典:川幡穂高(2014)

赤字はPIXE法で分析可能元素

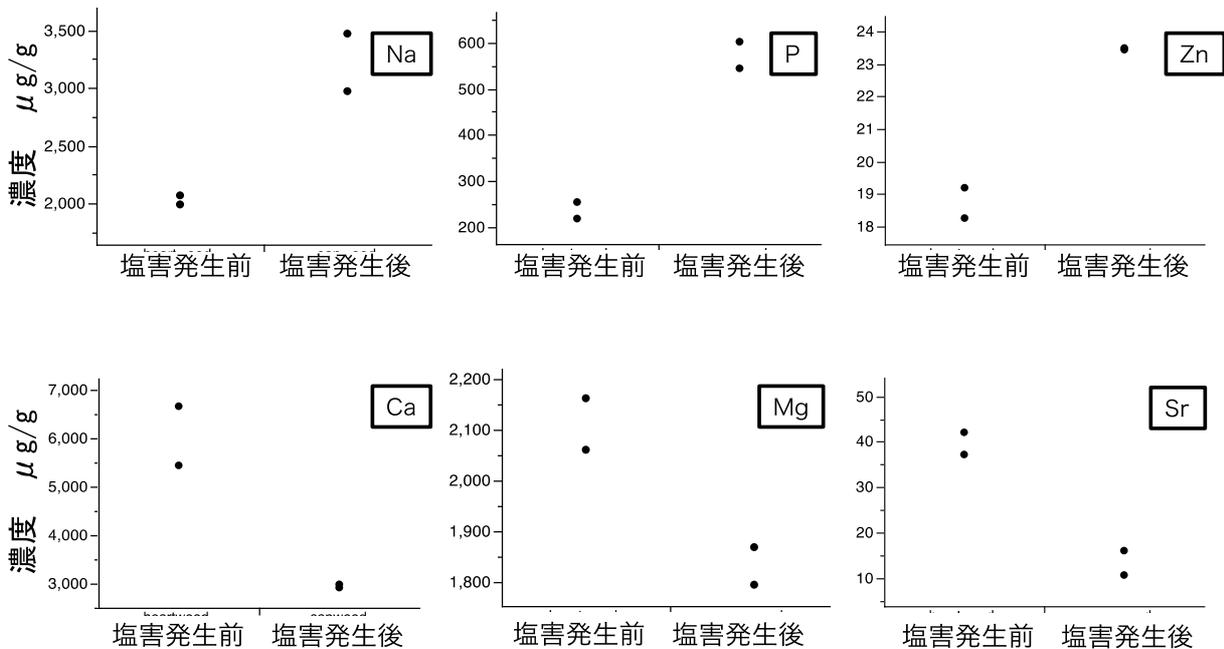


図-6 塩害発生前後で*Acacia tomentosa*材の元素濃度に違いが認められた6元素

人為の影響が大ききと考えられる上記の P および Zn を除く、Na、Ca、Mg、Sr 元素は海水の主要元素であるため、塩害発生後、材の成分は海水の含有元素の影響をうけると考えられる。Na 濃度は、塩害発生後に高くなったが、他の主要成分である Ca および Mg および微量成分である Sr は、予想に反して、塩害発生後低下した。この原因は明確ではないが、樹幹中における微量元素の分布を調べた報告(岡田、1987)によれば、心材形成をはじめとする生理作用が元素分布に大きく影響する。図-4 の薄片画像から、PIXE 分析に供試した塩害発生前、発生後のサンプルはそれぞれ心材、辺材であると判断されることから、塩害発生前後のサンプルの元素濃度の違いの原因は生育環境のみならず、心材-辺材の部位の違いであるとも考えられるが、現時点では、樹幹中の元素濃度の分布様式に、一定の傾向が見いだせないため、Ca、Mg および Sr が塩害発生後に濃度低下を招く原因は不明であった。今後は、塩害発生が材中の元素濃度に及ぼす影響をくわしく解析するため、塩害被害のない土壌に生育する郷土樹種について、同様の試験を行う予定である。なお、今回、PIXE 分析に供試できるサンプル量が少なかったため、塩害発生の前後の 2 サンプルについてのみ PIXE 分析を行わざるをえなかったが、塩害発生後に、Na 元素濃度は 1.6 倍高まることが認められたことから、土壌水中の塩類に敏感に反応すると予想される材中の Na を指標に、年代系列の分解能を高めた解析を行うことが重要と考えられた。

4 まとめ

タイ東北部では、約2.85百万haの塩害地が広がっている。タイ研究者から依頼された塩害発生年代の特定する方法として、塩害地に残存する郷土樹種の材の炭素安定同位体比のクロノシーケンス解析が有効であると提案したが、塩害発生後は、炭素安定同位体比ばかりではなく、海水の主要成分であるNa、Ca、Mgなどの元素の材中の濃度が上昇することが見込まれることから、今回は、炭素安定同位体比で推定した塩害発生年の前後の材の成分に変化があるかどうかを調べた。6元素(Ca、Mg、Na、P、Sr およびZn)で統計的(Student t検定、 $\alpha=0.05$)に違いが認められた。塩害発生後の人為影響の大きい元素、P、Znを除くNa、Ca、Mg、Sr元素のうち、Na濃度は、塩害発生後に高くなったが、他の主要成分であるCaおよびMgおよび微量成分であるSrは、予想に反して、塩害発生後低下した。この原因は明確ではないが、心材形成をはじめとする生理作用が大きく影響するため、塩害発生後の濃度が低くなったと考えられた。従って、害発生後に、1.6倍も濃度が高まるNa元素を指標に、年代系列の分解能を高めた解析を行うことが重要と考えられた。

参考文献

1. FAO: THE STATE OF THE WORLD'S LAND AND WATER RESOURCES FOR FOOD AND AGRICULTURE (SOLAW) - Managing systems at risk, 2011
2. IPCC: Climate Change 2013 the Physical Science Basis, Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013
3. Arunin, S.: Strategies for utilizing salt affected lands in Thailand. In: Proceedings of the International Symposium on Strategies for Utilizing Salt Affected Lands. Bangkok, 17-25 February 1992. Bangkok: Department of Land Development, Ministry of Agriculture and Cooperatives. 26-37.1992
4. Yuvaniyama A.: MANAGEMENT OF PROBLEM SOILS IN THE NORTHEAST OF THAILAND
5. 酒井正治、Somsak S.、岡田直紀：タイ東北部塩害地の発生年代推定の可能性—炭素安定同位体比の応用、第24回日本熱帯生態学会年次大会(宇都宮)講演要旨集、p39-39、2014
6. 酒井正治：木を切れば塩の原、熱帯林の100不思議、日本森林技術協会編、p180-181、1993

7. Patma VITYAKON, Sukaesinee SUBHADHIRA, Viriya LIMPINUNTANA, Somjai SRILA, Vidhaya TRELO-GES, and Vichai SRIBOONLUE: From Forest to Farmfields: Changes in Land Use in Undulating Terrain of Northeast Thailand at Different Scales during the Past Century, *Southeast Asian Studies*, Vol. 41, No. 4, 2004
8. Royal Forest Department: *Forestry Statistics of Thailand*, 2004
9. 三浦憲三、タルサク サブハサム: 東北タイにおける森林破壊による土壌の塩類化と植林による防止対策、土壌の物理性、1991
10. 小藤田久義、渡部久哉、世良耕一郎、二ツ川章二: PIXE法による樹木組織中の無機微量元素の定量、岩手大学演習林報告36、2005
11. 景守紀子、川井秀一、矢野健一郎、二ツ川章二、世良耕一郎: 日本産スギ・ヒノキのPIXE 分析—文化財試料への応用をめざして、NMCC共同利用研究成果報文集10、2002
12. Okada, N., Katayama, Y., Nobuchi, T., Ishimaru, Y., Yamashita, H., Aoki, A., Trace Elements in the Stems of Trees I, *Mokuzai Gakkaishi*, 33 (12), 1987

謝辞

この研究は、科研費（課題番号: 22405026、24658144）の補助のもと行った。材の採取法および材薄片の作製法について、アドバイスを頂いた香川聡博士に感謝いたします。

A PIXE analysis of wood element concentrations of local trees surviving in
severe saline soil
– A case study in the northeastern Thailand –

M.Sakai¹, K.Sera², S.Goto³, S.Sukchan⁴ and N.Okada⁵

¹Forestry and Forest Products Research Institute
1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki, 305-8687, Japan

²Cyclotron Research Center, Iwate Medical University
348-58 Tomegamori, Takizawa, Iwate 020-0603, Japan

³Takizawa Laboratory, Japan Radioisotope Association
348-1 Tomegamori, Takizawa, Iwate 020-0603, Japan

⁴Department of Land Development, Ministry of Agriculture and Cooperatives
Phaholyothin Rd., Chatuchak, Bangkok 10900, Thailand

⁵Graduate School of Agriculture, Kyoto University
Kitashirakawa-oiwakecho, Sakyo, Kyoto 606-8502, Japan

Abstract

In the northeastern Thailand, a salt damage is actualized for several decades, and approximately 17% of total area are estimated at salt-affected soils. The main causes are regarded as deforestation and salt manufacture, but some farmers are in doubt about the relationship between the establishment of the irrigation system and saline soils. To solve this problem, it is demanded scientifically to identify the year of salt damage emergence. We showed possibility of the estimation of the year from the carbon stable isotopic ratio of the stems that remain in saline soil. In this study, we analyzed the element concentrations of wood by PIXE method to investigate whether we can estimate the salt damage emergence year by the chronosequence analysis of element concentration. The wood cores of stem were sampled by using a increment borer from *Acacia tomentosa* which remain in severely saline soil in Khonkean province, the northeastern Thailand. Core samples were separated to two parts, before and after the salt damage emergence year. The elements of these wood samples were analyzed by PIXE method in MNCC. In 6 elements, Ca, Mg, Na, P, Sr, and Zn, there were differences of element concentrations between before and after the salt damage emergence year. After salt damage emergence, concentrations of Na, P, and Zn increased, but these of Ca, Mg, and Sr decreased.