

32. シベリア北極圏における大気環境汚染調査

Measurements of Atmospheric Pollution in the Siberian Arctic.

太田 幸雄*・榎本 恭一**・深沢 達矢*・村尾 直人*・山形 定*
OHTA Sachio, ENOMOTO Kyoichi, FUKASAWA Tatsuya, MURAO Naoto, YAMAGATA Sadamu

ABSTRACT; Atmospheric concentrations of aerosol chemical species and SO₂ have been measured at Tiksi, Yakutsk and Norilsk in Siberia from 1993. Concentrations of SO₄²⁻, Pb, Cu, Ni and V at Tiksi increase in winter and spring, and decrease in summer. Soil, moss and larch leaf samples were collected at Norilsk and Yakutsk, and soil samples at Tiksi. Concentrations of SO₄²⁻, Ni and Cu in the moss and larch leaf samples decreased with the distance from nickel and copper smelters in Norilsk. Moss and larch leaf, thus, can be used as bio-monitor of the air pollution. Concentrations of pollutants in the surface soil were higher than those in the soil 20-30cm below in Norilsk and Tiksi. It suggests that the long range transported atmospheric pollutants deposit on the surface and accumulate in the upper layer of permafrost in the Siberian Arctic.

KEYWORDS; arctic haze, Norilsk, bio-monitor, accumulation of pollutants, permafrost.

1. はじめに

かつて北極は、人間活動による影響の及ばない、地球上で最も清浄な地域の一つと考えられていた。しかしこの北極圏において、1950年代から冬～春季にかけて「北極ヘイズ」(arctic haze)と呼ばれる煙霧層が出現するようになってきた。この北極ヘイズは、煤粒子や硫酸粒子、重金属粒子、有機塩素化合物粒子さらには二酸化硫黄ガスなどから成っており、北極圏の気候を変化させ、さらには住民の健康や動植物生態系に対して悪影響を与えていることが懸念されている。ところで、この北極ヘイズについては、1970年代から北欧およびアラスカ、カナダ地域において精力的に調査・観測が行なわれて来た。しかし、北極圏の約3分の1を占めるシベリア地域においては、ほとんど調査が行なわれて来なかった。

本研究室では、ペレストロイカが始まった1991年以降、ロシア各地への外国人の立ち入りが可能となったため、東シベリアのヤクーツク市、ティクシ市およびノリリスク市において、大気汚染物質の濃度測定と、土壌、コケ類およびカラマツ等の植物葉中に含まれている各種の汚染物質成分の濃度測定を行ってきた。今回、それらの結果について報告する。

2. 測定地点

図1に、我々がこれまで行ってきた調査地域を示す。

ヤクーツク市は、ロシア連邦サハ共和国の首都であり、レナ川中流の北緯62度、東経130度に位置する人口20万人の農業・牧畜都市である。このヤクーツク市南端の永久凍土研究所において、大気エアロゾル成分

* 北海道大学大学院工学研究科 Graduate School of Engineering, Hokkaido University

** 東洋エンジニアリング株式会社 Toyo Engineering INC.,

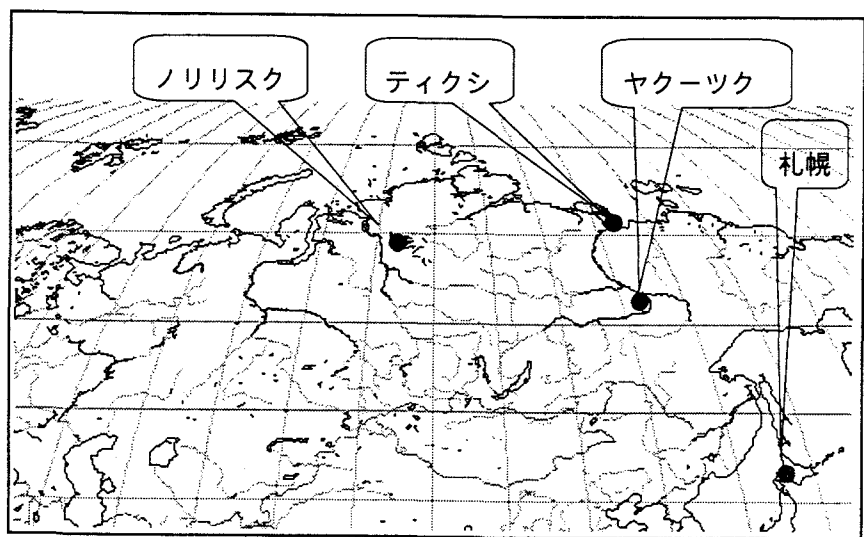


図1. シベリア北極圏の観測地点

濃度の連続測定を行なっている。また1997年の夏季に、郊外の6地点において、土壌、コケおよびカラマツ葉試料のサンプリングを行なった。

ティクシ市は、同じレナ川の河口のデルタ地帯東端の北緯72度、東経129度に位置し、北極海に繋がるラプテフ海に面した港町である。人口は7000人で国防軍の駐屯地および巨大なレーダー基地がある。このティクシ市中心部から内陸に7 km程入った郊外の宇宙物理観測所において、大気エアロゾル成分濃度の連続観測を行なっている。さらに1995年の夏季に郊外6地点において、土壌試料のサンプリングを行なった。

一方ノリリスク市は、北極海に突き出たタイミール半島の下部、エニセイ川の河口に近い北緯69度、東経89度に位置する人口29万人の鉱業都市である。ニッケル、コバルト、銅、白金等の採鉱、選鉱、精錬を行っており、ニッケル、コバルトに関しては全ロシアの生産量の70%、白金に至っては90%の生産量を誇っている。ただし、その操業に伴って大量に発生する排煙の処理が全く行なわれていないため、年間200万トンものSO₂が排出されている。ちなみに日本全体のSO₂の年間排出量は88万トンであり、このノリリスクだけで日本全体からの2倍以上のSO₂が排出されている。以上のように、ノリリスクはシベリア北極圏における最大の大気汚染物質発生源都市であり、北極ヘイズの主要な発生源のひとつと考えられている。

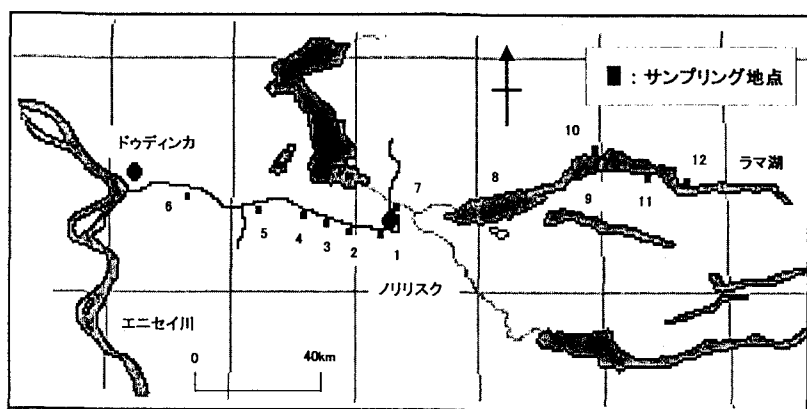


図2. ノリリスク周辺のサンプリング地点

図2にノリリスク周辺のサンプリング地点を示す。地点1と7の間にノリリスク市街があり、市の北西端

および南東端にニッケル、銅の精錬工場（ノリリスク製錬所）がある。このノリリスク市内のノリリスク・ニッケル公社調査センターにおいて、1993年～1996年まで大気エアロゾルおよびSO₂、HN0₃ガス成分濃度の連続測定を行なった。また1998年の夏季に、ノリリスク市から東西方向各100kmまでの12地点において、土壌、コケおよびカラマツ葉試料のサンプリングを行なった。なお、地点2と3の間の北方向500mにも、ニッケル、銅の精錬工場（ナジェジダ製錬所）がある。

3. 測定および分析法

3.1 大気エアロゾルのサンプリングおよび成分分析

直径47mm のテフロンフィルターおよび石英繊維フィルターを通して、毎分5ℓの流量で半月間あるいは一か月間毎に試料大気を連続吸引し、フィルター上に大気エアロゾルを捕集した。採気したフィルターを札幌に持ち帰るか、あるいは郵送してもらい、当研究室において成分分析を行なった。捕集済のテフロンフィルターの半分を用いて蒸留水抽出し、イオンクロマトグラフィーにより水溶性成分（酸性、塩基性成分）を分析した。また捕集済テフロンフィルターの1/4をキャップ付ポリプロピレン製試験管に入れ、硝酸1.5ml、フッ化水素酸0.5mlを加え、15分間超音波抽出し、2日間室温放置した後、超純水10mlを加え、ICP-MS（誘導結合プラズマ質量分析装置）により金属成分を分析した。一方、捕集済の石英繊維フィルターについては、1/4をそのまま用いてカーボンアナライザーにより全炭素粒子濃度を分析した。また、捕集済石英繊維フィルターの1/4を電気炉で空气中300℃で30分間加熱して有機物を除去した後、カーボンアナライザーにより黒色純炭素濃度を分析した。両者の差から、有機炭素濃度を算出した。

3.2 土壌、コケおよびカラマツ葉のサンプリングおよび成分分析

付近が荒らされていない地点を選び、葉つきのよいコケについて、スコップで20cm四方を切り取り、コケ上層の緑色部分を採取し、容量250mlのプラスチックボトルに封入した。なお今回採取したコケの種類は、スギゴケ、シッポゴケおよびヒモゴケである。次に、その下層の、深さ5～10cm、10～20cm、20～30cmの地点の土壌をスコップですくい取り、各々250mlのプラスチックボトルに封入した。なお、落葉や小石はあらかじめ取り除いた。これらの試料を札幌まで持ち帰った。

また、葉試料については、ヤクーツクにおいてはヨーロッパアカマツおよびダフリアカラマツの針状葉、ノリリスクにおいてはシベリアアカマツの針状葉を枝ごと採取し、チャック付きポリ袋に封入し、札幌まで持ち帰った。

札幌まで持ち帰ったこれらの試料について、以下の手順で分析した。各試料について、磁皿に移し、乾燥器で105℃、24時間乾燥し、次にミル（粉碎器）により粒径数十μm以下にまで粉碎し均質化した。この粉碎・均質化した試料を用いて、蒸留水抽出後、イオンクロマトグラフィーにより水溶性成分（酸性、塩基性成分）の分析を行なった。また、この粉碎・均質化した試料を用いて、蛍光X線法により、ケイ素、アルミニウム、鉄、カルシウム、カリウム等の土壌主要成分濃度を分析した。他の金属成分については、針状葉については、均質化した試料0.1gをとり、密閉テフロン容器に入れ、硝酸3mlとフッ化水素酸0.5mlを加えてマイクロウェーブ分解を行ない（分解条件：40psi-6分、85psi-6分、150psi-10分）、常温まで冷却後、1%硝酸で20～1000倍まで希釈し、ICP-MSにより、分析を行なった。コケおよび土壌試料については、均質化した試料0.02gをとり、密閉テフロン容器に入れ、フッ化水素酸2.0mlを加えてマイクロウェーブ分解（80psi-10分）した。室温で冷却後、さらに硝酸3mlを加え、マイクロウェーブ分解（120psi-30分）した。得られた溶液の上澄み0.5mlをキャップ付プロピレン製容器にとり、1%硝酸を加えて20～1000倍希釈し、ICP-MSにより金属成分の分析を行なった。なお、ICP-MS分析においては、すべての試料溶液に対してインジウムを10μg/ℓとなるように加えて分析器の感度を監視し、感度が大きく変動した場合にはインジウム濃度を基に補正を行なった。

4. 測定結果

4.1 大気エアロゾル成分

図3にティクシにおける大気中の鉛、銅、ニッケル、バナジウム等、鉱工業活動に由来する重金属エアロゾル成分濃度の季節変化を示す。いずれも冬～春季に高濃度、夏季に低濃度となっており、また硫酸イオンエアロゾル濃度もやはり冬季～春季にかけて高濃度、夏季に低濃度であった。これらのことから、チクシーにも北極ヘイズが出現していることがわかる。

一方、ノリリスクにおける大気中の重金属エアロゾル成分濃度（単位 ng/m^3 ）は、銅：2～300（平均58）、鉛：0.5～83（平均22）、ニッケル：1～48（平均19）であった。ちなみに札幌におけるこれらの成分の年間平均の大気中濃度（単位 ng/m^3 ）は、銅：10～20、ニッケル：1～4、鉛：10～20 であり、やはりノリリスクにおいて銅およびニッケルが大量に排出されていることがわかる。

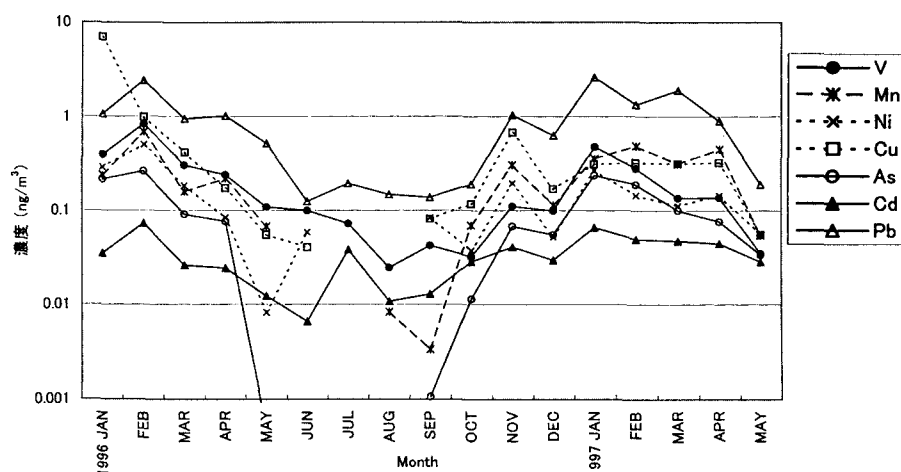


図3. ティクシにおける大気中の重金属エアロゾル成分濃度

4.2 カラマツ針状葉中の汚染物質濃度

図4に、ノリリスク市街から東方向に100km、西方向に70kmまでの地域にわたってサンプリングしたシベリアカラマツの針状葉中の重金属成分濃度の分析結果を示す。銅、ニッケル、コバルト、鉛、バナジウムの濃度が、ノリリスク市街に近いほど高濃度となっている。硫酸イオン濃度も同様にノリリスク市街に近いほど増加していた。このようにカラマツの葉中の汚染物質濃度は大気中の汚染物質の濃度を良く反映しており、カラマツの葉をbio-monitorとして、大気汚染物質の濃度分布を推定できる可能性があることがわかる。

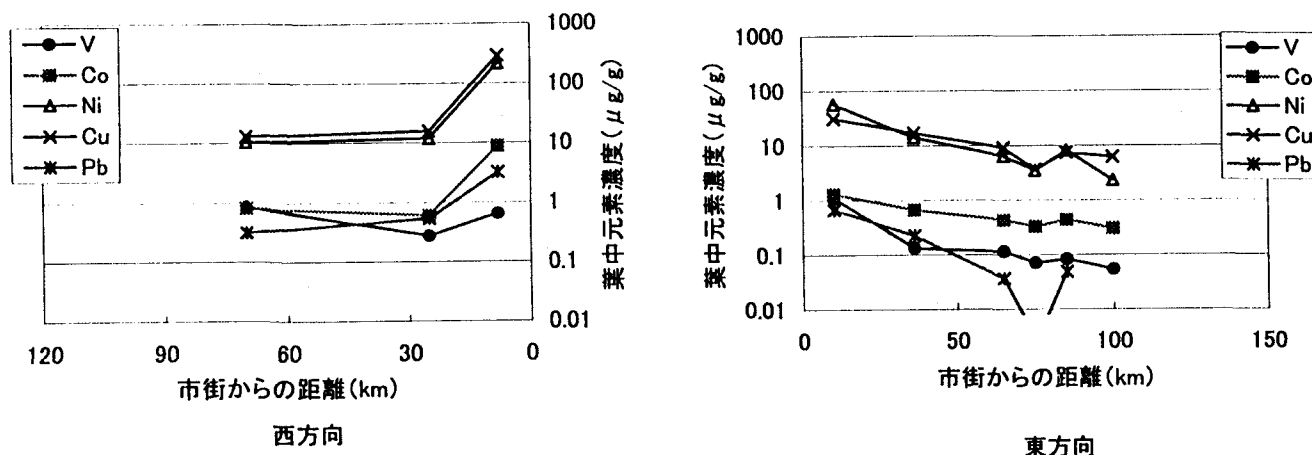


図4. シベリアカラマツの葉中の重金属濃度とノリリスク中心部からの距離との関係

4.3 コケおよび土壌中の成分濃度

(1) 陰イオン成分

図5に、ノリリスクのコケおよび各深さでの土壌中の陰イオン成分濃度の変化を示す。地点2ではコケ中の SO_4^{2-} 濃度が非常に高いが、ノリリスク市街から遠く離れるに従い、半分～1/4に減少していること、一方、土壌中の SO_4^{2-} 濃度はそれほど高くないことがわかった。この結果から、今回採取した種類のコケは SO_2 ガスおよび SO_4^{2-} 粒子を大気中濃度に応じて吸収しており、カラマツ葉と同様に大気中の硫黄酸化物濃度のbio-monitor として使用できる可能性があることが分かる。

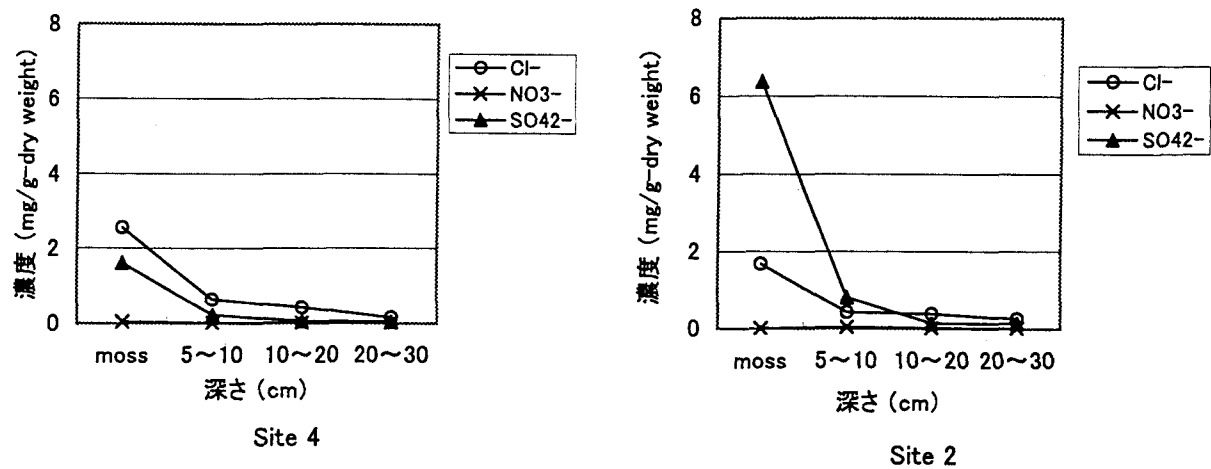


図5. ノリリスクにおけるコケおよび土壌中の陰イオン成分濃度

(2) 金属成分

大気エアロゾルの発生源としては、自然発生源（土壌）、鉱業活動、暖房等の燃料燃焼起源、自動車、および工業活動等が考えられる。そこで、ノリリスクにおいて採集されたコケおよび土壌試料中の各金属成分濃度について、土壌起源の指標であるケイ素との相関、精錬所排煙の指標であるニッケルとの相関、およびノリリスクでは石炭を暖房やエネルギー源として使用していることから、石炭排煙の指標であるテルルとの相関を検討し、その結果、以下のようなグループに分けることができた。

- グループ1（土壌起源）： Si, Al, K, Ti, Fe, V, Ba, Ce, (Cr)
- グループ2（精錬鉱業起源）： Ni, Co, Cu, Pb, (Cr)
- グループ3（石炭燃焼起源）： Te, As, Se, Cd, Sb, (Cr)

なお、Crについては、Si, Ni, Te のいずれともある程度の相関が見られた。

ノリリスクの各地点におけるコケおよび土壌中の精錬鉱業起源（グループ2）の重金属濃度について調べたところ、ノリリスク市街に近いほど、コケおよび深さ5~10cmの表層土壌中のニッケルおよび銅の濃度が高かった。図6に、ノリリスクの各地点における精錬鉱業起源の各元素濃度のケイ素の濃度に対する割合を示す。なお、地点2、地点7の図の右端に、世界平均の土壌中の各元素濃度のケイ素濃度に対する割合を示した。地点2や地点7等、発生源に近い地点では、コケはもちろんのこと、深さ5~10cmの土壌表中のニッケルおよび銅のケイ素に対する割合が、深さ20~30cmでの値の百倍以上高くなっている。深さ20~30cmでのケイ素に対するこれらの元素の割合が土壌の世界平均値とほとんど変わらないこと、および表層ほどこの比が大きくなることから、ノリリスクにおいて鉱業活動が開始される以前のこのあたりの元素濃度はほぼ世界平均値と変わらない濃度であったが、ニッケル、銅コンビナートが操業を開始して以来、排出されたこれらの汚染物質が表層土壌に蓄積され、その結果このように高濃度になったことが推察される。ノリリスク周辺は永久凍土層からなっており、この永久凍土層は夏季に表層がわずか30~50cm融解するだけで、秋には再び凍結してしまう。そのため地表面に沈着した汚染物質は、温帯地域のように土壌溶液により下方に流出除去

されることがなく、土壌表層に蓄積されていく。

また、図7に示す様に、ティクシの土壌においても、マンガン、コバルト、銅、ニッケルについて、深さ5~10cmでの濃度が20~30cmでの濃度に比べて数倍程度高い傾向が見られた。

このように大気汚染物質が長距離輸送され、北極圏の永久凍土地帯に沈着し・蓄積されていることが推察されることから、今後、この汚染物質の蓄積に伴う北極圏の住民の健康への影響評価や動植物生態系への影響の評価等が、北極圏における重要な研究課題のひとつとなってくるものと思われる。

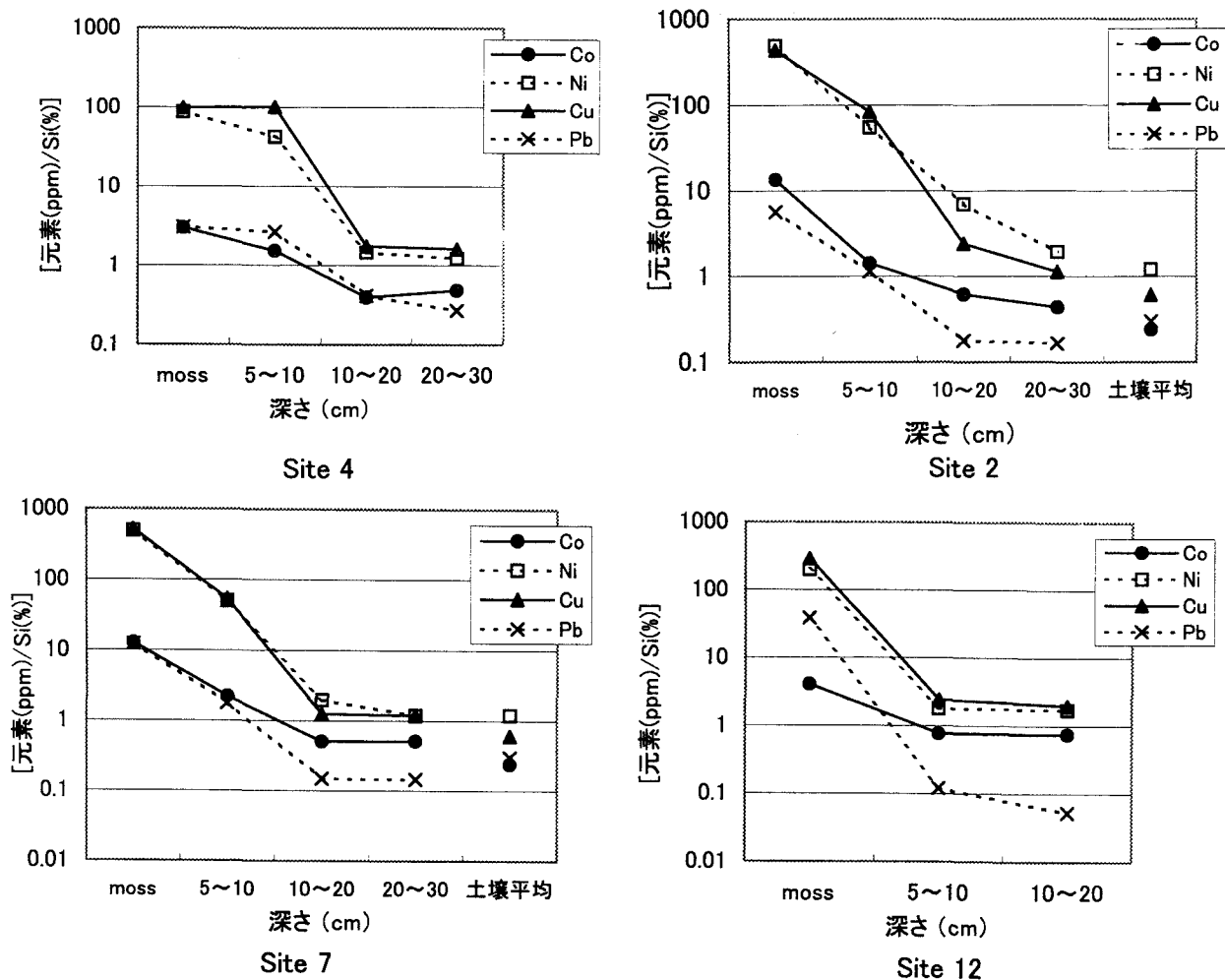


図6. ノリリスクにおけるコケおよび土壌中の精錬業起源の重金属濃度のケイ素濃度に対する割合

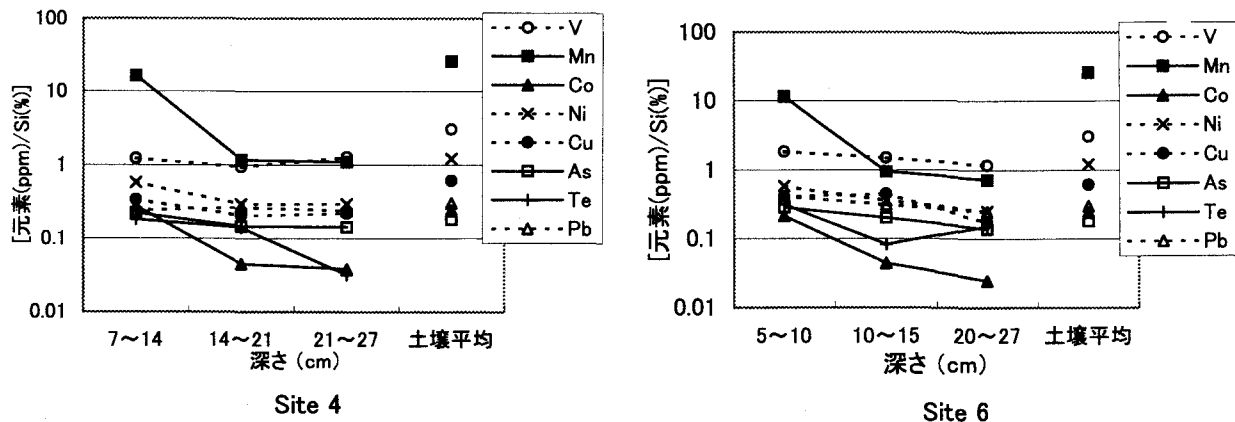


図7. ティクシにおける土壌中の重金属濃度のケイ素濃度に対する割合