

## 六甲山の7箇所のスギ林における土壌溶液の ( $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^{+}$ )/Al モル濃度比

小林 禧 樹<sup>1</sup>      中 川 吉 弘<sup>1</sup>      駒 井 幸 雄<sup>2</sup>

( $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^{+}$ )/Al molar ratio in soil solution collected at seven stands  
of *Cryptomeria japonica* on Mt. Rokko in Kobe

Tomiki Kobayashi<sup>1</sup>, Yoshihiro Nakagawa<sup>1</sup> and Yukio Komai<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Atmospheric Environment Division, <sup>2</sup>Water Environment Division, Hyogo Prefectural  
Institute of Public Health and Environmental Sciences, 3-1-17, Yukihiro-cho,  
Suma-ku, Kobe 654-0037, Japan

### SUMMARY

In order to study ( $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^{+}$ )/Al molar ratio in soil solution for *Cryptomeria japonica* stands, measurements of both soil solution and throughfall were carried out for two years in seven stands at the altitude from 240m to 845m on Mt. Rokko in Kobe.

Annual molar ratio of ( $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^{+}$ )/Al in soil solution collected at the altitude from 670m to 845m was 1.9 to 5.9. The ratio at the altitude of 845m was equal to or less than the minimum values measured at *Cryptomeria japonica* stand in Japan.

As significant correlations between ( $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^{+}$ )/Al molar ratio and both cloud water deposition and  $\text{H}^{+}$  deposition to *Cryptomeria japonica* stands were found for the stand at the altitude of 845m, it was suggested that cloud water deposition promoted the decrease of ( $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^{+}$ )/Al molar ratio in soil solution.

If the relation between relative dry mass of *Cryptomeria japonica* seedlings cultured with soil and ( $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^{+}$ )/Al molar ratio in soil solution could be applied to *Cryptomeria japonica* in the field, the ratio in soil solution collected at the altitude from 750 to 845m of Mt. Rokko might be considered to be on the level to influence the growth of *Cryptomeria japonica*.

### I はじめに

国内における樹木（スギ、アカマツなど）に対する土壌

酸性化の影響に関する実験的研究から、樹木の生長・生理機能を制限する最も重要な要因が土壌溶液中に溶出したアルミニウムであり、土壌溶液の ( $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^{+}$ )/Al モル濃度比（以下、BC/Al モル比と略）は樹木に対する土壌酸性化の影響を評価する有用な指標であることが指摘されている<sup>1)</sup>。ヨーロッパではドイツウヒやヨーロッパアカマツを中心にした実験から得られたデータをもとに、土壌溶液の BC/Al モル比 1.0 が植物に影響が発現する臨界値（クリティカルポイント）とされ、その値は欧州での越境汚染に関するコンセンサスを得るため

<sup>1</sup>大気環境部, <sup>2</sup>水質環境部

\* 別刷請求先: 〒654-0037 神戸市須磨区行平町3-1-27  
兵庫県立健康環境科学研究所センター  
大気環境部 小林 禧 樹

の RAINS モデルにも採用されている<sup>2)</sup>。

スギ林ではヒノキ林と異なり林齢が進むと腐植層の分解によりカルシウムなどの塩基が表層土壌に蓄積するため土壌の酸中和能は大きいと考えられているが、表層土壌に酸中和能を上回る酸性沈着がもたらされるとアルミニウムが溶出してくる<sup>3)</sup>。六甲山の高標高にあるスギ林には霧水により多量の酸性沈着がもたらされている<sup>4)</sup>ことから、著者ら<sup>5)</sup>はスギ林土壌からのアルミニウム溶出の程度を検証するために六甲山の7箇所のスギ林で2年にわたり林内雨と土壌溶液を測定した。そして、年間降水量を上回る霧水が沈着する標高845mのスギ林では、土壌の酸性化により土壌溶液の水素イオン及びアルミニウム濃度が高く、スギ林でこれまでに報告された値を上回ることが明らかになった。

国内の森林については土壌溶液の BC/Al モル比の測

定事例は非常に少ない。本報では、六甲山の7箇所のスギ林における土壌溶液の BC/Al モル比の測定結果を示し、土壌溶液の BC/Al モル比がスギ林の立地条件や幹からの距離によってどう変動し、また土壌の酸性化とどのように関係しているかについて検討した。

## II 方 法

### 1. 調査林分

調査は六甲山（神戸市灘区）の標高240～845mにある7箇所のスギ林で行なった。調査した7つの林分の位置を Fig. 1 に示す（図中の St. は Stand の略である。表や本文中でも同様である）。図中の太線は六甲山において霧水沈着が多くなる標高700mの等高線を示す。調査地域の土壌は花崗岩質を母材とする乾性褐色森林土（BB）に分類される。

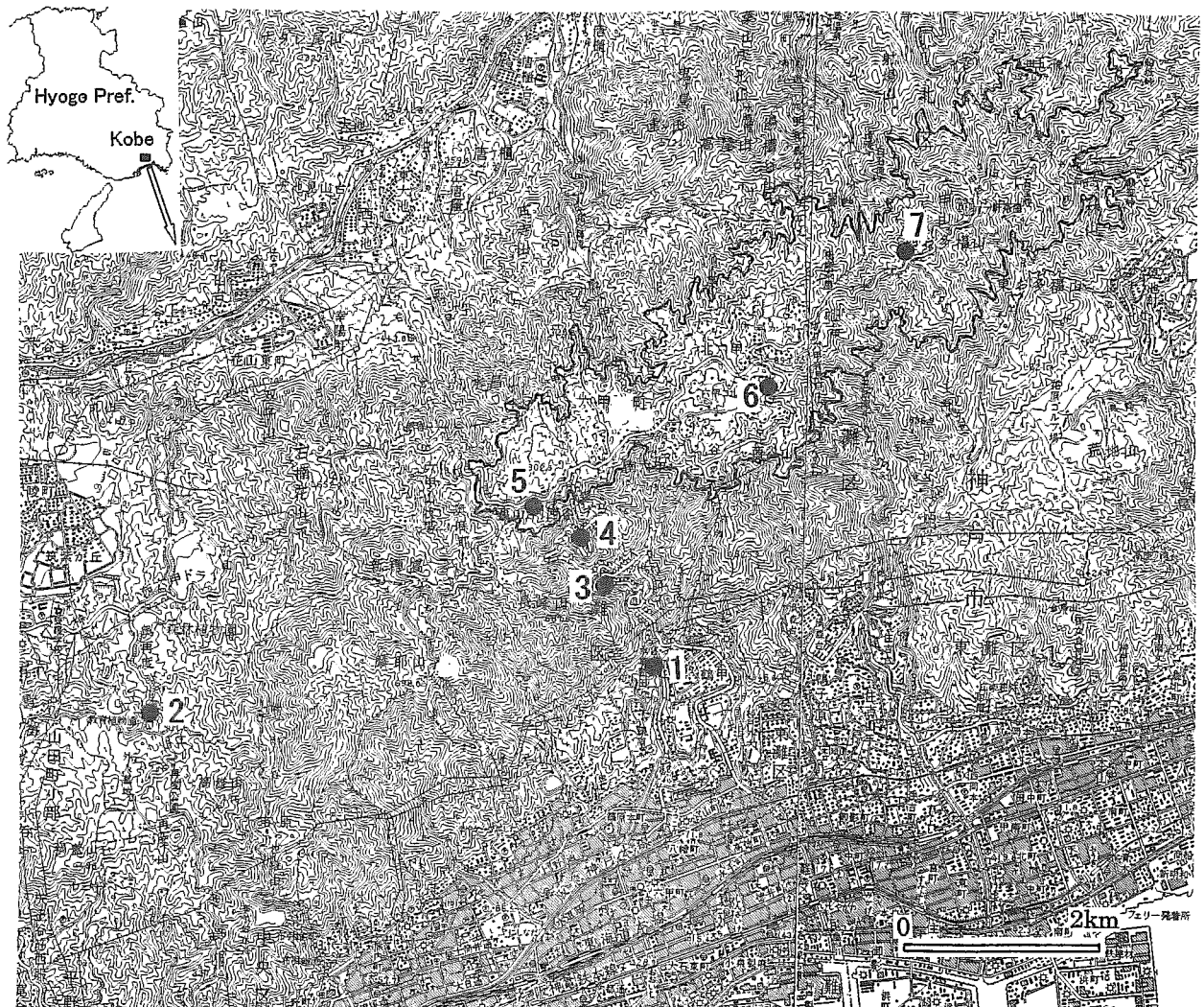


Fig.1 Map showing the seven *Cryptomeria japonica* stands for collecting throughfall and soil solution at Mt.Rokko in Kobe

## 2. 土壌溶液の採取・分析

各林分とも1本のスギについて、幹から30cm (St.1は根の張り出しのため60cm)、深さ30cmの位置にポーラスカップ(東洋電子商事製)を埋めて、吸引圧力70cmHgで土壌溶液を採取した。測定は2000年4月～2002年6月に行ない、年間を通して2週間毎の間隔で採取した。なお、St.6,7については、採取ポイントを増やし、幹から10～100cmの3～4箇所土壌溶液を採取した(測定期間2001年3月～12月)。ポーラスカップの地上部には塩ビ製のクッション材を巻いて凍結防止を図った。土壌溶液は、脱炭酸を防ぐためにシリンジを用いて100mlの分液ロートに移して持ち帰り、大気との接触を少なくしながら、pHを測定した。溶存態アルミニウム(以下、Alと略)をICP発光分光法、イオン8成分( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ )をIC法で分析した。なお、ICP分析用の試料はろ過をせず、IC分析用の試料はミリポア製メンブランフィルター(ポアサイズ0.22 $\mu\text{m}$ )でろ過し、分析に供した。

## 3. 林内雨・林外雨の測定と霧水沈着量の算出

土壌溶液を採取したスギ調査木の幹から30～50cm位置で林内雨を、標高800mにある開けた空き地で林外雨を、土壌溶液と同じ期間、同じ測定間隔で採取した。

霧水沈着量は既報<sup>4)</sup>に従い、霧発生時の蒸発などによる降水遮断率を0%と仮定し、林内雨量と樹幹流下量の合計量から林外雨量を差し引きして求めた。

## III 結果と考察

### 1. 六甲山のスギ林における土壌溶液のBC/Alモル比

#### 1) スギ林の標高とBC/Alモル比

六甲山の7箇所のスギ林における土壌溶液(幹から30cm)のpH,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ , Alの濃度及びBC/Alモル比について測定期間中の平均値をTable 1に示した。St.1～3(標高240～430m)の土壌溶液のBC/Alモル比が56～272に対して、St.4～6(標高670～835m)のBC/Alモル比は3.2～5.9と小さく、St.7(標高845m)で最小値1.9を示した。このように、六甲山の高標高のスギ林分では低標高の林分に比べ、土壌溶液のBC/Alモル比が小さくなる明らかな傾向がみられた。

わが国の森林における土壌溶液のBC/Alモル比の報告事例をみると、スギ林の3.4(幹から10cm)<sup>6)</sup>, 185(幹から100cm)<sup>6)</sup>, 122～816<sup>7)</sup>, ヒノキ林の0.77～124<sup>7)</sup>, 17～1091<sup>8)</sup>, 1.71～492<sup>9)</sup>などの報告があるほか、Satoら<sup>10)</sup>はわが国の花崗岩地域のスギ林(13林分)における土壌溶液のBC/Alモル比として、1.5～150(幹から10cm), 4.5～200(幹から100cm)という値(いずれもSatoら<sup>10)</sup>の図から読み取った)を報告している。六甲山のスギ林(標高845m)の幹から30cmにおけるBC/Alモル比は、Satoら<sup>10)</sup>が報告したスギの幹から10cmにおける最小値に匹敵するかそれを下回る値であった。

#### 2) 幹からの距離とBC/Alモル比

六甲山の2つの林分(St.6,7)におけるスギの幹からの距離と土壌溶液のBC/Alモル比の関係をTable 2に示す。

Table 2 BC/Al molar ratio in soil solution at St.6 and St.7 versus the distance from a trunk of *Cryptomeria japonica*

|      | St. 6                 |      |      |       | St. 7                 |      |       |
|------|-----------------------|------|------|-------|-----------------------|------|-------|
|      | Distance from a trunk |      |      |       | Distance from a trunk |      |       |
|      | 10cm                  | 30cm | 50cm | 100cm | 30cm                  | 50cm | 100cm |
| mean | 5.0                   | 6.1  | 7.0  | 264   | 1.8                   | 4.5  | 4.2   |
| min  | 2.7                   | 3.6  | 4.5  | 77    | 1.3                   | 2.1  | 2.5   |
| max  | 6.2                   | 10.4 | 9.7  | 857   | 2.2                   | 5.7  | 5.6   |

Sampling duration: Feb.-Dec.2001

St.6における土壌溶液のBC/Alモル比は、幹から10～50cmでは5.0～7.0とわずかし増加しなかったが、幹から50～100cmでは7.0から264に急増した。一方St.7のBC/Alモル比は幹から30～50cmでは1.8から4.5に増加したが、幹から100cmでは50cmより値が小さくなった。このように2つの林分とも、幹から50cmまでは幹から離れるほどモル比は大きくなったが、50cm以遠については林分により様相が異なった。これは2つの林分におけるスギの立ち木密度が異なるためと考えられる。St.6ではスギの立ち木密度が低く隣接木から離れていて、それらからの影響がないのに対して、St.7では立ち木密度が高く隣接木と樹冠が接して、隣接木の樹冠通過雨による影響を受けていると推測される。St.7

Table 1 Chemical composition and BC/Al molar ratio of the soil solution for seven *Cryptomeria japonica* stands at Mt.Rokko

| Stand No. | Altitude(m) | pH   | Concentration (mM) |                  |              |       | BC/Al molar ratio |            |
|-----------|-------------|------|--------------------|------------------|--------------|-------|-------------------|------------|
|           |             |      | $\text{Ca}^{2+}$   | $\text{Mg}^{2+}$ | $\text{K}^+$ | Al    |                   |            |
| 1         | 240         | 5.20 | 0.66               | 0.16             | 0.25         | 0.023 | 56                | (26～91)    |
| 2         | 360         | 5.55 | 0.32               | 0.07             | 0.08         | 0.004 | 187               | (24～528)   |
| 3         | 430         | 5.71 | 0.36               | 0.12             | 0.02         | 0.002 | 272               | (180～342)  |
| 4         | 670         | 4.51 | 0.18               | 0.08             | 0.04         | 0.067 | 5.9               | (2.4～13.6) |
| 5         | 750         | 4.23 | 0.34               | 0.11             | 0.03         | 0.164 | 3.2               | (1.8～6.4)  |
| 6         | 835         | 4.44 | 0.28               | 0.14             | 0.05         | 0.088 | 5.7               | (3.6～10.4) |
| 7         | 845         | 4.11 | 0.24               | 0.06             | 0.02         | 0.175 | 1.9               | (1.3～2.7)  |

Sampling duration: Apr.2000-Dec.2001

BC/Al = ( $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+$ )/Al, values in parentheses show the range of BC/Al

の幹から100cmでは隣接木の樹冠通過雨からの酸性沈着も加わり、50cm地点よりもBC/Al モル比が小さくなったと考えられる。

Baba ら<sup>9)</sup>はヒノキ林の幹から50cm, 100cm, 170cmの位置(深さ20cm)で土壌溶液のBC/Al モル比を測定し、モル比が幹から離れるにつれて大きくなることを示した(幹から50cmから100cmで2.82→8.77及び21.8→139)。BC/Al モル比が増加する傾向は六甲山のスギ林(St.6)と似ているが、モル比の増加の程度は六甲山のスギ林の方が大きかった。

### 3) BC/Al モル比の季節変化

六甲山のスギ林におけるBC/Al モル比(幹から30cmの値)の月変化をFig. 2に示す。モル比が小さい高標高の林分(St. 4~7)では、モル比が大きい低標高の林分(St. 1~3)に比べてモル比の変動幅が小さく、特にSt. 7の変動幅は1.3~2.7と小さかった(Table 1)。季節変化をみると、St. 5~7のBC/Al モル比は降水量が多い夏~秋期に大きく、降水量の少ない冬期に小さくなる傾向がみられたが、その他の林分については、そのような傾向はみられなかった(Fig. 2)。佐藤ら<sup>11)</sup>はスギ林における調査で土壌溶液のBC/Al モル比が12~2月の少雨期に小さくなると報告しており、六甲山の高標高のスギ林については佐藤らの結果とほぼ一致した。

## 2. 土壌溶液のBC/Al モル比に及ぼす霧水沈着の影響

著者らは前報<sup>5)</sup>で六甲山の高標高のスギ林分では土壌のpH及び $\text{Ca}^{2+}$ が低く、土壌が酸性化していること、またこれら林分における土壌の酸性化や土壌からのAl溶出にスギ林への霧水沈着が関与していることを示した。スギ林への霧水による酸性沈着が土壌溶液のBC/Al モル比にどのような影響を及ぼしているかをみるため、標高670~845mの4つの林分について、土壌溶液のBC/Al モル比と土壌溶液の $\text{H}^+$ 濃度、スギ林への霧水沈着量及び $\text{H}^+$ 沈着量との間の相関関係を調べた。その1例として、St. 7における霧水沈着量及び $\text{H}^+$ 沈着量と土壌溶液のBC/Al モル比との関係をFig. 3に、また4林分における相関係数をまとめてTable 3に示した。

相関分析の結果、土壌溶液の $\text{H}^+$ 濃度とは、St. 4, 6, 7で有意な負の相関関係がみられ、土壌溶液のpHが低いほどBC/Al モル比は小さくなることが示された。St. 7においては、スギ林への霧水沈着量及び $\text{H}^+$ 沈着量との間で有意な負の相関関係が認められ、土壌溶液のBC/Al モル比の低下にスギ林への霧水沈着や酸性沈着が関与していることが示唆された(Fig. 3)。一方、St. 4~6については、土壌溶液のBC/Al モル比と霧水沈着量及び $\text{H}^+$ 沈着量との間に有意な相関は認められなかった。これは、アルミニウムの土壌からの溶出はスギ林土壌へ

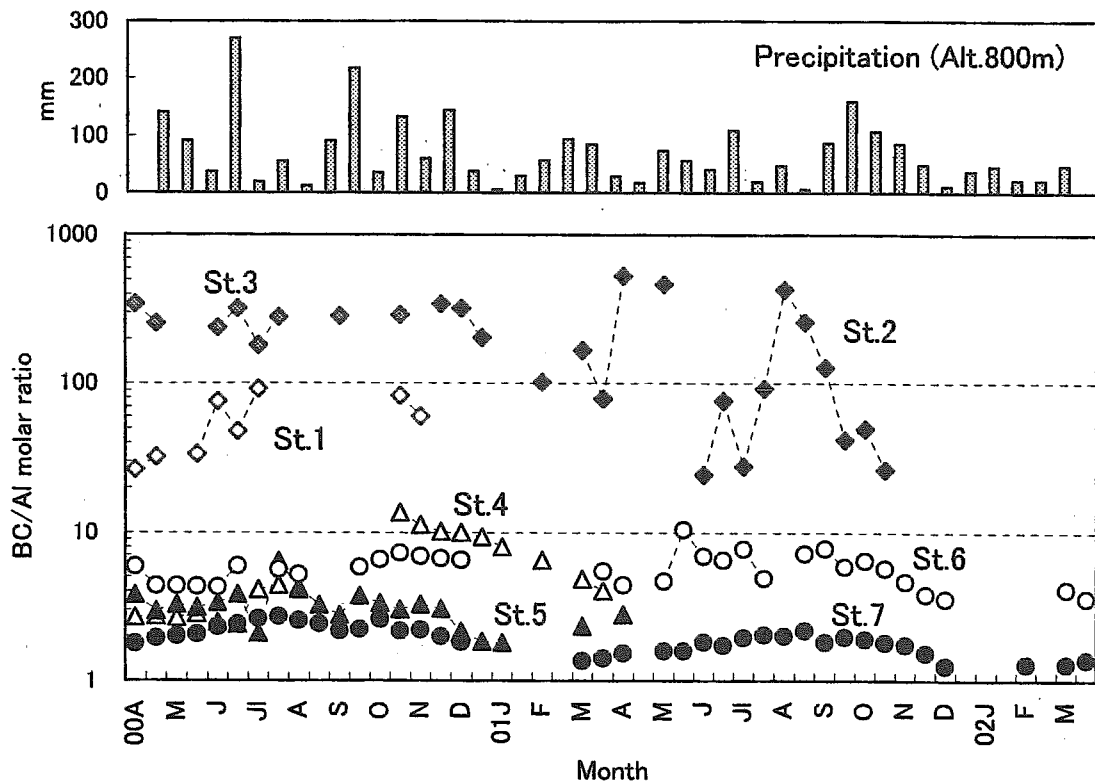


Fig 2 Monthly variation of BC/Al molar ratio in soil solution at seven *Cryptomeria japonica* stands (240-845m) on Mt. Rokko

の酸性沈着量にほぼ比例している<sup>5)</sup>のに対して、塩基の溶出はスギ林の土壌条件により左右されているためと考えられた。すなわち、St. 7では土壌の酸性化により塩基の溶脱が進んでいるため、降水に伴う土壌溶液への $\text{Ca}^{2+}$ の供給が少ない<sup>5)</sup>のに対して、St. 4～6では土壌からの $\text{Ca}^{2+}$ の供給が比較的多くなされているために、土壌溶液の中でのBC/Alモル比と霧水沈着量及び $\text{H}^+$ 沈着量との相関は、St. 7では高く、St. 4～6では低くなったと推測される。

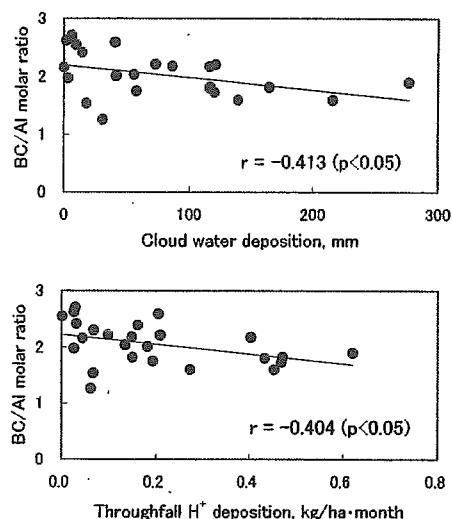


Fig 3 Relation between BC/Al molar ratio of the soil solution for *Cryptomeria japonica* stands at Mt. Rokko (St. 7)

Table 3 Correlation coefficients between BC/Al molar ratio in soil solution and  $\text{H}^+$  concentration in soil solution and acid deposition by cloud water to four *Cryptomeria japonica* stands at Mt. Rokko

| Stand | Correlation coefficients to BC/Al molar ratio |                        |                                     |
|-------|-----------------------------------------------|------------------------|-------------------------------------|
|       | $\text{H}^+$ concentration                    | Cloud water deposition | Throughfall $\text{H}^+$ deposition |
| 4     | -0.497*                                       | 0.303                  | 0.188                               |
| 5     | -0.276                                        | 0.401                  | 0.397                               |
| 6     | -0.702***                                     | 0.385                  | 0.283                               |
| 7     | -0.287+                                       | -0.413*                | -0.404*                             |

\*\*\* $p < 0.001$ , \* $p < 0.05$ , +  $p < 0.10$

Sampling duration: Apr.2000-Dec.2001

### 3. 植物影響の指標としての土壌溶液のBC/Alモル比

伊豆田ら<sup>1)</sup>は樹木に対する酸性降下物の影響に関する実験的研究を総説し、酸性土壌で生育したスギなどの個体乾物生長は、土壌溶液中のAlと $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$ などの塩基との存在バランスによって決まることを示した。

国内で報告されたスギ苗による実験結果によると、土壌溶液のBC/Alモル比1.0における相対乾重量は水耕栽培<sup>14-16)</sup>の60～90%に対して、土による栽培<sup>12, 13)</sup>では40～60%であり、土による栽培の方がより大きいモル比でスギ苗に酸性沈着の影響が発現する傾向がある。土による栽培では、BC/Alモル比が2.0、5.0でも、スギ苗の相対乾重量は各々、50～70%、80%に低下する<sup>12, 13)</sup>のに対して、水耕栽培では同じBC/Alモル比で相対乾重量は80～110%と大きな値を示す。

六甲山のスギ林における土壌溶液のBC/Alモル比(年平均値)はSt. 5～7の幹から30cmで1.9～5.7 (Table 1), St. 7では幹から50～100cmでも4.2～4.5であった (Table 2)。上記したスギ苗による実験結果が野外のスギにも適用できるとすると、六甲山の高標高林分で観測された土壌溶液のBC/Alモル比は野外のスギの生長や生理機能に何らかの影響を及ぼすレベルに達していると考えられる。今のところ、六甲山のスギには顕著な可視的被害は観察されていないが、霧水による酸性沈着がさらに続いた場合には、スギに対する可視的な被害が顕在化するおそれもあり、六甲山における土壌及び土壌溶液に対する継続的なモニタリングが必要である。

## IV 結 論

六甲山の標高240～845mにある7箇所のスギ林で2年間にわたり林内雨と土壌溶液を測定した。土壌溶液のBC/Alモル比(年平均値)は標高430m以下の56～272に対して、標高670m以上では1.9～5.9と小さく、標高845mで最小値を示した。これはスギ林でこれまでに報告されている最小値に匹敵するか、それを下回る値である。土壌溶液のBC/Alモル比は幹から離れると大きくなる傾向があるが、立ち木密度が高いスギ林では幹から1m離れても小さな値を示した。高標高のスギ林のBC/Alモル比は夏期に大きく、冬期に小さくなる傾向がみられた。相関分析の結果、土壌溶液のBC/Alモル比を低下させるのは、スギ林へもたらされる霧水による酸性沈着であることが示唆された。酸性沈着の影響が発現する閾値をもとめたスギ苗による実験データ(土による栽培)が野外のスギにも適用できるとすると、六甲山の高標高にあるスギ林で観測された土壌溶液のBC/Alモル比はスギの生長や生理機能に何らかの影響を及ぼすレベルに達していると考えられる。

## 文 献

- 1) 伊豆田猛, 松村秀幸, 河野吉久, 清水英幸: 樹木に

- 対する酸性沈着の影響に関する実験的研究. 大気環境学会誌, 36, 137~155 (2001)
- 2) 河野吉久: 植物からみたクリティカルロード (臨界負荷量) とクリティカルポイント (臨界値). 大気環境学会誌, 32, A65~71 (1997)
- 3) 吉田稔: 酸性雨とわが国の土壌. 現代化学, 1990年9月, 48-52 (1990)
- 4) 小林禧樹, 中川吉弘, 玉置元則, 平木隆年, 藍川昌秀, 正賀充: 霧水により森林樹冠にもたらされる酸性沈着の評価—六甲山のスギ樹冠における測定—. 環境科学会誌, 12, 399~411 (1999)
- 5) 小林禧樹, 中川吉弘, 駒井幸雄: 森林への霧水沈着が土壌溶液の化学組成及び土壌の酸性化に及ぼす影響. 環境科学会誌, (印刷中)
- 6) 佐藤一男, 若松孝志, 高橋章: スギ樹幹の近傍と遠方における土壌溶液の化学組成とアルミニウムの形態. 日本土壌肥科学雑誌, 71, 615~624 (2000)
- 7) 宗芳光, 小平哲夫, 岡崎正規: 上総丘陵におけるスギ, ヒノキ, コナラ林に及ぼす酸性沈着の影響に関する事例研究. 第13回環境情報科学論文集, 263~267 (1999)
- 8) 高橋大輔, 岡崎正規: 多摩丘陵における酸性沈着の土壌への影響—土壌溶液中のイオンバランス—. 第14回環境情報科学論文集, 279~284 (2000)
- 9) Baba, M. and M. Okazaki: Spatial variability of soil solution chemistry under Hinoki Cypress (Chamaecyparis obtusa) in Tama Hills. Soil Sci. Plant Nutr., 45, 321~336 (1999)
- 10) Sato, K. and T. Wakamatsu: Soil solution chemistry in forests with granite bedrock in Japan. Water, Air, and Soil Pollution, 130, 1001~1006 (2001)
- 11) 佐藤一男, 若松孝志, 高橋章: スギ林の土壌溶液におけるアルミニウムの存在形態. 電力中央研究所報告 T97043, 1~13 (1998)
- 12) 三輪誠, 伊豆田猛, 戸塚績: 人為的に酸性化させた褐色森林土で生育したスギ苗の乾物生長, 大気環境学会誌, 33, 81~92 (1998)
- 13) Izuta, T., T. Ohtani and T. Totsuka: Growth and nutrients status of Cryptomeria japonica seedlings grown in brown forest soil acidified with H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution. Environmental Sciences, 5, 177~189 (1997)
- 14) 三宅博, 亀井信一, 伊豆田猛, 戸塚績: 水耕栽培におけるスギ苗の生長に対するアルミニウムの影響. Man & Environ., 17, 10-16 (1991)
- 15) 河野吉久, 松村秀幸, 小林卓也: スギおよびヒノキの生育と養分吸収に及ぼすアルミニウムの影響. 大気環境学会誌, 30, 316-326 (1995)
- 16) Izuta, T., A. Yamada, M. Miwa, M. Aoki and T. Totsuka: Effects of low pH and excess Al on growth, water content and nutrient status of Japanese cedar seedlings. Environmental Sciences, 4, 113-125 (1996)

(受理 2003年11月25日)