

C-052 酸性物質の負荷が東アジア集水域の生態系に与える影響の総合的評価に関する研究
 (2) 東アジアの異なる森林生態系における生態系構成要素の測定に基づく酸性物質循環の解析

東京農工大学

楊 宗興

〈研究協力者〉 東京農工大学 磯貝ゆりか
 中国科学院東北地理与農業生態研究所 Dexuan Wang
 中国科学院華南植物研究所 Jiangming Mo、Yunting Fang

平成17～19年度合計予算額 11,902千円
 (うち、平成19年度予算額 3,904千円)

※上記の合計予算額には、間接経費 2,747千円を含む

[要旨] 東アジアでは人間活動由来の大気沈着物負荷が急速に増加しており、森林生態系へのインパクトを正確に理解することは重要である。酸性原因物質に対する生態系の感受性は、気候に影響を受けて形成される土壌タイプの違いによって大きく異なると予想される。しかし、このような土壌生成学的要因を結びつけて詳細に研究した例はこれまでほとんどなかった。そこで、中国の亜熱帯域と亜寒帯域、わが国の温帯域を含む計6地域を対象に、最深部までの土壌の化学性、集水域溪流河川の水質、また集水域における塩基収支等について研究を行った。その結果、土壌の塩基成分含量および酸性度には、亜寒帯、温帯、亜熱帯の系列に沿って大きく系統的な変化が認められた。亜熱帯域の塩基成分含量は温帯、亜熱帯の1-6%でしかなく、亜熱帯域生態系の酸性化に対する基本的な感受性の高さが実証された。亜熱帯の一つの森林集水域における溪流河川のpHは3.9と異例の酸性を示し、土壌最深部のpHも3.9-4.1であり、いずれも高濃度の溶存Alが含まれていた。このような状況が大気沈着物によってもたらされたものである確証を得るため、同じ気候帯、土壌タイプであるが広州市からの距離の異なる生態系系列(広域トランゼクト)を設定して比較調査した。その結果、産業の中心地である広州市に接近するほど河川のpHの低下、硝酸イオン濃度と溶存Al濃度の上昇が生じており、それと符合する系統的な化学性変化が土壌にも見出された。酸性の顕著な集水域で塩基収支を検討した結果、河川による塩基の流亡が大気沈着および風化からの補給を大きく上回っていること、数十年程の時間で土壌から塩基が完全に枯渇しうることが示された。中国亜熱帯域は、多量の酸性原因物質の負荷と本来の生態系の脆弱性のために、欧米とは異なる極限に近い酸性化が生じ始めていることが明らかになった。

[キーワード] 酸性化、中国、大気沈着、異なる気候帯、森林集水域

1. はじめに

生態系への酸性物質の負荷の影響を理解する上で、気候条件は重要な要因と考えられる。酸性物質が外部から負荷されても、よく知られるように土壌で行われるイオン交換等による酸の中和

緩衝作用によって直ちに生態系酸性化は生じない。このような生態系の緩衝能が、気候条件によって大きく異なることが予想されるためである。例えば比較的乾燥した気候に分布するチェルノーゼムでは主要な塩基成分であるカルシウムが土壌に集積しているのに対し、熱帯湿潤気候では激しい風化と塩基の流亡のために酸性の土壌が分布することが知られる。このため、酸性物質の負荷に対する生態系の応答は、大きく違ったものとなりうると推測される。このような土壌生成・分類論的要因の重要性にもかかわらず、これまでの研究は欧米等の地域の範囲内で行われ、生態系の感受性の違いを明確に実証した研究は世界的にもきわめて乏しい。

近年中国では経済発展が著しく、その一方で発生源対策が遅れているために、多量の大气沈着物が生態系に負荷されている (Chen and Mulder 2007¹⁾; MacDonald et al., 2002²⁾; Larssen et al., 2006³⁾)。わが国での最大値を大きく上回る (場合によっては倍以上) 窒素沈着物が中国各地で測定されている現状にある。また、森林の窒素飽和現象の例も報告され始めている (Fang et al., 2005a⁴⁾, 2005b⁵⁾)。窒素飽和は森林集水域において正味の硝酸 HNO_3 生成が生じていることを意味するため、生態系酸性化の点でも注目すべき現象である。中国における酸性沈着物の生態系影響についてはIMPACTSという大規模な国際プロジェクトが先行研究としてあるものの (Tang et al., 2001⁶⁾; Larssen et al., 2006³⁾)、流出する河川水までを含めた森林集水域というスケールでの酸性化についてはほとんど解明されていない。

このような背景から、本研究では中国およびわが国を対象に、東アジアの異なる気候帯の間での比較調査を実施した。さらに亜熱帯中国地域については、気候、土壌タイプは同じであるが沈着物量の異なる広域トランゼクトを設定し、土壌酸性化が大气沈着物によるものかを判定した。さらに、酸性化影響の著しい森林集水域において、長期の観測と実験的アプローチにより生態系の塩基収支の見積もりを試み、生態系の緩衝能の将来についても検討した。

2. 研究目的

本研究の目的は、以下の仮説を実証することである。

- 1) 気候要因 (土壌生成論的要因) は、酸性物質負荷に対する生態系感受性の点で決定的に重要である。
- 2) このため湿潤亜熱帯は、集水域レベルでの酸緩衝容量に乏しく、酸性化に対して脆弱な生態系である。
- 3) 多量の大气沈着物負荷が生じている亜熱帯中国では、近い将来に極限的な酸性化に至る。

3. 研究方法

本研究では、気候の異なる計6地域の調査地において、交換性塩基含有量等の土壌化学性を明らかにする比較調査を行った。また各集水域から流出する溪流河川水についても調査した。調査地は、中国の東南部三地域、東北部二地域、および国内の一地域である。亜熱帯域の3つの調査地は、同一の気候帯、土壌タイプであるが、大气沈着量が異なるよう産業の中心地である広州市からの距離の別に設定した (図1)。それぞれの森林および調査の概要は以下の通りである (表1)。中国の各地域では、土壌採取ができなくなる最深部までの土壌を採取した。

(1) 調査地の概要

- 1) 亜熱帯林A: Dinghushan (鼎湖山) (112° 35' E, 23° 08' N)

人口1000万人を越える中国広州市の西方110kmに位置するDinghushan生態保護区内の常緑広葉樹林を対象地とした。この森林は、近隣の寺院により管理されており400年以上人為の介入がなく、極相林とみなされている。年間降水量は1927mm、年平均気温は21.0℃であり、湿潤亜熱帯気候に

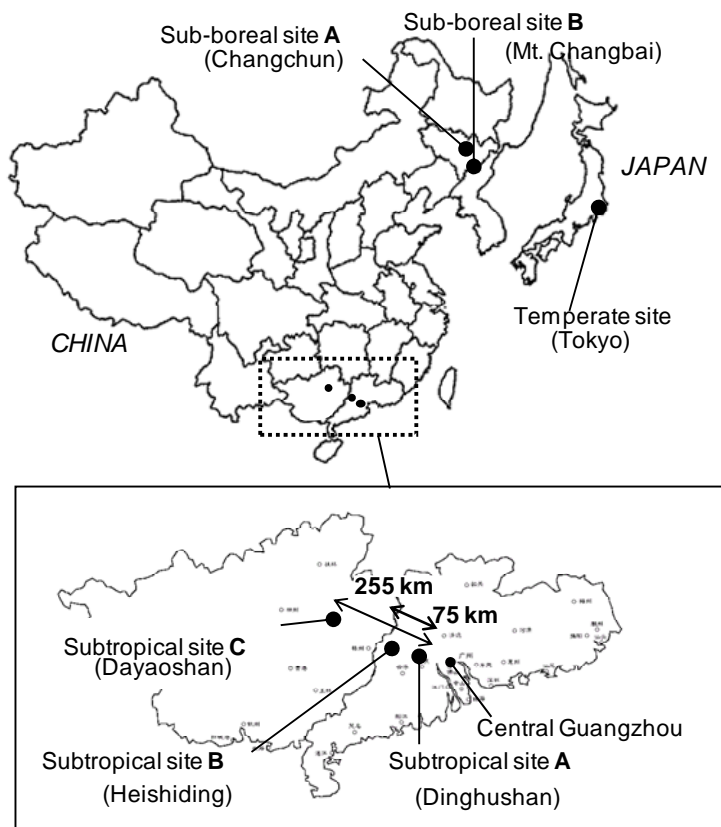


図1 中国および日本における6つの調査地の位置

分類される。同一植生の3地点で土壌を、またその集水域から流出する渓流水を採取した。

2) 亜熱帯林B: Heishiding (黒石頂) (111° 53' E、23° 27' N)

中国広州市の北西180kmに位置するHeishiding林業保護区内の常緑広葉樹林を対象地とした。同一植生の3地点で土壌を、またこの集水域から流出する渓流水を採取した。

3) 亜熱帯林C: Dayaoshan (大瑤山)

中国広州市の北西330kmに位置するDayaoshan自然保護区内の常緑広葉樹林を対象地とした。異なる集水域においてそれぞれ3地点ずつ、計6地点で土壌を、またそれぞれの集水域から流出する渓流水を採取した。

4) 亜寒帯林A: 長春

中国吉林省長春市郊外の「浄月潭」公園内の森林を対象地とし、植生の異なる3地点で土壌を採取した。気候は、亜寒帯冬季少雨気候に分類される。調査に適する溪流を見つけることができなかったため、渓流水の採取は行わなかった。

5) 亜寒帯林B: 長白山

表 1 調査地の概要

地点名	地点の位置	略称	試料採取日	年平均気温 /°C	年降水量 /mm	植生	土壌タイプ (FAO - UNESCO)
亜熱帯林 A	広東省肇慶市鼎湖山 112° 35' E, 23° 08' N	Dinghushan	2005/7/16 2006/7/25 2007/8/8	21.9	1863	広葉樹	Ferric Acrisols
亜熱帯林 B	広東省黒石頂 111° 53' E, 23° 27' N	Heishiding	2006/7/27	19.6	1740	広葉樹	Ferric Acrisols
亜熱帯林 C	広西省大瑤山 110° 12' E, 24° 06' N	Dayaoshan	2007/1/11	17	1824	広葉樹	Acrisols
温帯林	東京都八王子市 139° 23' E, 35° 38' N	多摩丘陵	2005/5/25	14.7	1701	コナラ・クヌギ	Cambisols
亜寒帯林 A	吉林省長春市浄月潭 125° 29' E, 43° 47' N	長春 A 長春 B 長春 C	2005/8/9	5.2	584	アカマツ 広葉樹 (ナラ類) カラマツ	Haplic Phaeozems
亜寒帯林 B	吉林省長白山 128° 06' E, 42° 23' N	長白山No. 1 長白山No. 2	2005/8/12	3.5	600	混交林 (カバノキ) 針葉樹 (原生松)	Lithosols

中国吉林省東端の長白山山麓を調査地とした。標高、植生の異なる2地点 (No. 1サイトは標高730m付近の混交林、No. 2サイトは1200m付近の針葉樹林) で土壌を採取し、また周辺地の渓流水を採取した。気候は亜寒帯冬季少雨気候に分類される。

6) 温帯林: 八王子

日本国東京都八王子市内の落葉広葉樹林 (東京農工大学附属FM多摩丘陵) における尾根部の土壌を一カ所採取し、またこの集水域から流出する渓流水を採取した。気候は温帯湿潤気候である。なお、土壌採取を行った地点では、採取を行った深度のみならずそれ以深も火山灰起源の関東ローム層が堆積している。

(2) 試料の採取および前処理の方法

1) 土壌

中国の3ヶ所の調査地では、土壌を掘り下げて形成した断面から移植ごてを用いて10cmごとに土壌を採取した。80°Cの通風乾燥機または乾燥機で乾燥させ、2mmのふるいをかけ、ポリエチレン袋に密閉し、持ちかえった。FM多摩丘陵では、表層土壌は移植ごてを用いて、深層土壌は継柄を接続した採土器にて180cmまで30cmごとに採取した。採取した土壌はポリエチレン袋に密閉し、冷蔵しながら実験室に持ちかえり分析時まで冷蔵保存した。採取土壌の上端の深度を土壌深度として表記した。

2) 渓流水

渓流水は、現地で孔径0.45 μ mのディスポーザブルフィルター (ADVANTEC DISMIC-25cs) を用いてろ過し、持ち帰った。また、pH、EC、水温を現場で測定した。

(3) 分析方法

1) 土壌

①pH(H₂O)、EC

生土に重量比1:5の純水を加え1時間振とうした後の上澄みについて、pH(H₂O)とECを測定した。

②水溶性カチオン・水溶性アニオン

EC測定後の水抽出液を遠心分離後、孔径0.45 μmのディスポーザブルフィルター (ADVANTEC DISMIC-25cs) でろ過して得られたろ液について、イオンクロマトグラフ (DIONEX DX-120) により陽イオン (Na⁺, NH₄⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺) および陰イオン (F⁻, Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻) 濃度を測定した。

③交換性カチオン

風乾細土5gをポリ容器にとり、1 M CH₃COONH₄を100ml加え1時間振とうし、ろ紙 (ADVANTEC 5A) でろ過した。ろ液の陽イオン (Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺) 濃度を原子吸光光度計 (HITACHI Z-8000) により測定した。

④溶存マンガン

水溶性カチオン・水溶性アニオン測定の場合と同様に調整した水抽出液をろ紙 (ADVANTEC 6) でろ過したのち、原子吸光光度計により測定した。

⑤溶存アルミニウム

水溶性カチオン・水溶性アニオン測定の場合と同様に調整した水抽出液を孔径0.45 μmのディスポーザブルフィルター (ADVANTEC DISMIC-25cs) でろ過し、得られたろ液に0.1N HNO₃となるように硝酸を加え、原子吸光光度計 (HITACHI Z-5310) で測定した。

2) 渓流水

①アニオン・カチオン濃度

イオンクロマトグラフにより陽イオン (Na⁺, NH₄⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺)、陰イオン (F⁻, Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻) 濃度を測定した。

②ケイ酸

分光光度計 (HITACHI U-1500) を使用し、モリブデンイエロー法により分析した。

(4) 森林集水域における塩基成分の収支の推定

1) 概要

集水域にもたらされた酸性物質のH⁺は、土壤塩基成分とイオン交換することにより中和緩衝される。酸性化の著しいDinghushanの常緑広葉樹林(上記3、(1)、1))の小集水域を対象に、土壤塩基成分の収支を測定し、この役割を担う土壤塩基成分の中和緩衝容量の大きさ、また完全な枯渇に至るまでの寿命について検討した。

土壤の塩基成分における物質収支は、図2のように表すことができる。中和を担う土壤の交換性塩基(α)は、流出(β)により失われる一方、大気からの供給(δ)および母材の風化(γ)による補給を受ける。通常、このような収

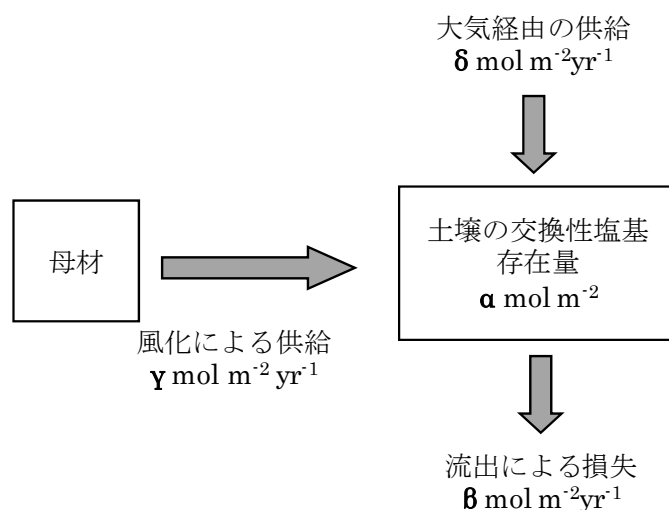


図2 集水域における交換性塩基の収支

支関係を考える上では樹木による取り込みを考慮しなければならないが、この森林は400年もの間伐採等の人為的攪乱を免れてきた成熟林であるため、植物による正味のアップテークは0と見なすことができる。そこで、土壌の交換性塩基存在量の変化速度($d\alpha/dt$)は、

$$d\alpha/dt = (\gamma + \delta) - \beta \quad (\text{式1})$$

により算定される。ここで α は交換性塩基量(mol m^{-2})、 β は流出速度($\text{mol m}^{-2}\text{yr}^{-1}$)、 δ は大気からの供給速度($\text{mol m}^{-2}\text{yr}^{-1}$)、 γ は風化による供給速度($\text{mol m}^{-2}\text{yr}^{-1}$)を表す。この収支関係が負の値を示せば、土壌の塩基は正味の減少が生じていることになる。また、この場合土壌塩基が枯渇するまでの時間 T (年)は、

$$T = \alpha / (d\alpha/dt) \quad (\text{式2})$$

により簡易に与えられる。

2) 各フラックスおよび土壌塩基存在量の推定

土壌塩基存在量(α)は、掘削採取できる最深部までの土壌に存在する塩基含有量から見積もった。河川流出によって土壌塩基が集水域から失われる速度(β)および塩基が大気経由で補給される速度(δ)は、2006年8月から2007年7月の一年間、月一回以上の頻度で採取した溪流河川水および林外雨中の濃度およびそれぞれの水量(流出量ないし降水量)から算定した。なお、調査した流域は基岩上に水位観測施設が設置されており、信頼性の高い水文観測が可能な態勢にある。それをを用いて行われた本プロジェクトの鈴木(未発表)の測定によると、この期間中の降水量および流出量はそれぞれ1529mmおよび950mmであった。

風化によって岩石から塩基成分や SiO_2 の可溶化が生ずるが、電荷を持たない SiO_2 は土壌と相互作用することなくそのまま溪流水中の成分として含まれる。そこで、風化による塩基成分の供給速度(γ)を、 SiO_2 流亡量に基づき次式により見積もった。

$$\begin{aligned} \gamma = & [\text{溪流河川中の}\text{SiO}_2\text{濃度 } \text{mol m}^{-3}] \times [\text{河川流出量 } \text{m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ yr}^{-1}] \\ & \times [\text{風化により可溶化する塩基}/\text{SiO}_2\text{の比}] \quad (\text{式3}) \end{aligned}$$

風化により可溶化する塩基/ SiO_2 の比は、次項に示す実験的手法により推定した。

3) 風化実験

現地より採取した土壌を用い、実験的に風化作用を測定した。調査地の全層から採取し等分に混和した土壌試料40gを脱イオン水400mLとともにテフロン製フラスコに入れ、風化を促進させるため CO_2 ガスを一週間に2回注入しながら2ヶ月間室内に置いた。その間、毎週30mLの土壌懸濁液を採取し、濾過してから、上述の方法により土壌塩基成分濃度と SiO_2 濃度を測定した。

この結果、実験時間の経過に伴う土壌塩基成分濃度と SiO_2 濃度の増加が観察され、それらの増加速度から、風化により可溶化した塩基/ SiO_2 比は Na^+/Si 、 K^+/Si 、 Mg^{2+}/Si 、 Ca^{2+}/Si についてそれぞれ0.10、0.89、0.17、0.86と求められ、これらの比率を式3の計算に使用した。

(5) 統計解析

調査地間のpHおよび塩基の可溶性存在比率の差異の検定を、一元配置分散分析(ANOVA)により行った。すべての統計解析はJava Script-STARを用いた。統計的有意性は $P < 0.05$ により判定した。

4. 結果・考察

(1) 気候帯による土壌化学性の違い

調査した6地域全ての土壌pH(H_2O)の鉛直分布を図3に示す。日本の東京近郊の温帯林を除く全ての結果はそれぞれの土壌の最深部まで採取した結果である。土壌pHは3つの気候帯の間で顕著な差異を示した。亜寒帯林はpH5.3~6.4と比較的高く、温帯林は深度と共に増加する傾向を示しながらpH4.4~5.6の範囲にあった。これに対し、3地域で測定した亜熱帯林のpHは3.9~4.8と低く、また深部でもあまり増加を示さなかった。広州市に最も近いDinghushanでは最深部までpH3.9~4.1という特に低いpH値を示し、また特徴的なことに3反復の間での変動もわずかであった。

同様に、土壌の交換性塩基含量にも気候帯間で大きく顕著な違いが認められた(図4)。亜寒帯林(Sub-boreal A, B)は全層で他の気候帯より含量が高く、平均で158ないし90 $mmol_c \cdot kg^{-1} dw$ であり、温帯林(Temperate)は中間的で42 $mmol_c \cdot kg^{-1} dw$ であった。これに対し、3つの亜熱帯林はそれぞれ2.8、3.1、1.4 $mmol_c \cdot kg^{-1} dw$ であり、最深部に至るまできわめて低かった。仮比重を $1g \cdot cm^{-3}$ として計算すると、土壌の塩基の全存在量は、亜寒帯林では1315および717 $kmol_c \cdot ha^{-1}$ であるのに対し、亜熱帯林では15~42 $kmol_c \cdot ha^{-1}$ であり、1~数%にすぎない。

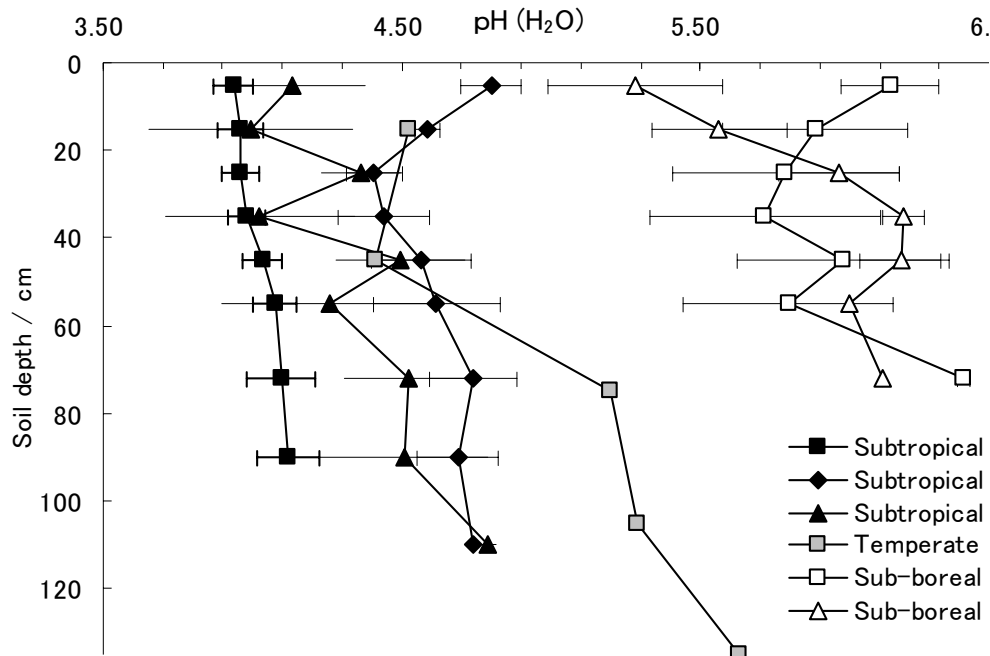


図3 東アジアの6つの調査地域における土壌pH (H_2O) の鉛直分布

エラーバーは同一調査地の複数試料における標準偏差。温帯(日本東京)を除く全てにおいて、試料は土壌最深部まで採取している。

交換性塩基間の相対組成にも気候帯間で明らかな違いが存在した(図5)。亜寒帯林と温帯林では Ca^{2+} と Mg^{2+} で全組成の90%、主要成分である Ca^{2+} が70%を占めた。しかし亜熱帯林では Ca^{2+} と Mg^{2+} が占める比率は著しく低下し、かわりに K^{+} が、大部分の土壌層において主要塩基成分となっていた。交換性の Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^{+} が全体に占める割合はそれぞれ31%、23%、42%であった。

気候帯の間での顕著な違いは、塩基成分が水溶性として存在する比率においても見られた(図6)。亜寒帯林および温帯林はこの比率が低く、塩基陽イオンはほとんどが交換態として存在していたのに対し、亜熱帯林ではこの比率が0.13~0.21と有意に上昇し、かなりの割合のイオンが水溶性として存在していた。これは、イオンの溶脱の程度が高いことを表していると考えられる。もっとも酸性化の徴候が著しい亜熱帯林Aは、さらに高い比率となっていた。

(2) 渓流水の化学性から見出される特徴

それぞれの集水域から流出する渓流水に含まれる陽イオン成分、陰イオン成分濃度を図7に示す。

高温での激しい風化が想定されるにもかかわらず、亜熱帯林の渓流水に含まれる Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 濃度は低く、温帯林や亜寒帯林の場合の半分かそれ以下でしかなかった。一方、亜熱帯林の NO_3^- 濃度や SO_4^{2-} 濃度、およびそれらの相対的比率は亜寒帯林と比べて高い傾向にあった。都市に近く、窒素飽和の状況にあることが示されている温帯林(東京八王子; Yoh et al., 2001⁷⁾)でも比較的高い NO_3^- ならびに SO_4^{2-} 濃度が観察されている。

亜熱帯林Aは、きわめて低いpH(3.9 ± 0.1)を示し、 NO_3^- も $282 \pm 52 \mu\text{molc L}^{-1}$ と特筆すべき高濃度であった。また、 $141 \mu\text{molc L}^{-1}$ というきわめて高濃度の溶存Alも検出された。周辺地域の森林集水域でも同様の低pH(4.1 ± 0.2 (n=25))ならびに高 NO_3^- 濃度($65 \pm 16 \mu\text{molc L}^{-1}$)が測定された。このことから、このような水質の特徴はこの地域に広く見られる一般性をもっていることが判断できる。

亜熱帯の中でも、広州市に近い亜熱帯林Aは酸性化関係因子の強度が最も著しい。亜熱帯3地域の水質の特徴について、広州市からの距離を横軸にとって図8に比較している。経済活動の活発な広州市に近いほど、 NO_3^- 濃度や H^+ 濃度、溶存Al濃度の増加する傾向が明らかであった。産業や農業に起源をもつ大気沈着物が多く森林集水域に負荷されたことによって、その近郊ほど著しい酸性化が生じていることを表していることが理解される。したがって、亜熱帯Aで最も著しい酸性化が大気

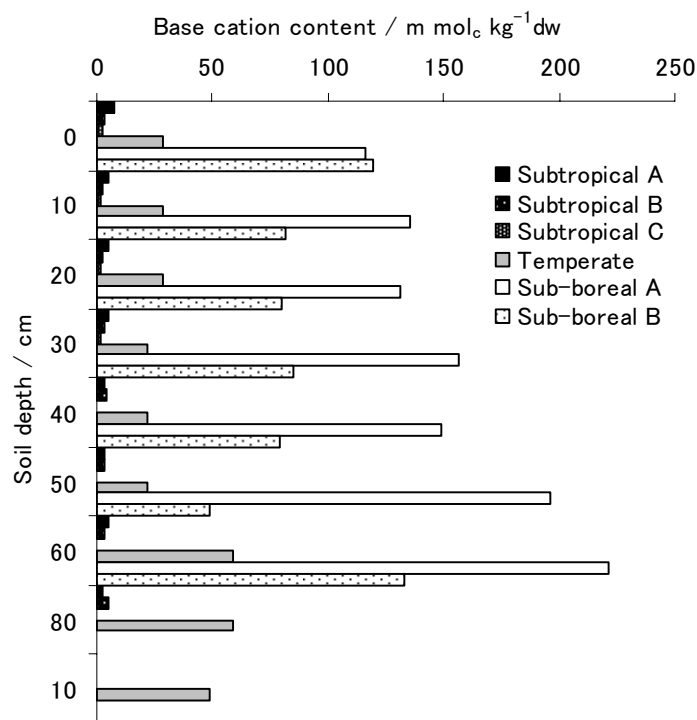


図4 異なる気候帯の間での土壌の交換性塩基含量の相違
Subtropical site A (100cm)、sub-boreal sites A と B (80, 100cm)はデータがない

沈着物の負荷により生じた現象であることは確実である。またこの結果は、酸性化を生じさせる上で、窒素成分の挙動、すなわち森林の窒素飽和現象が重要な役割を演じていることを表している。

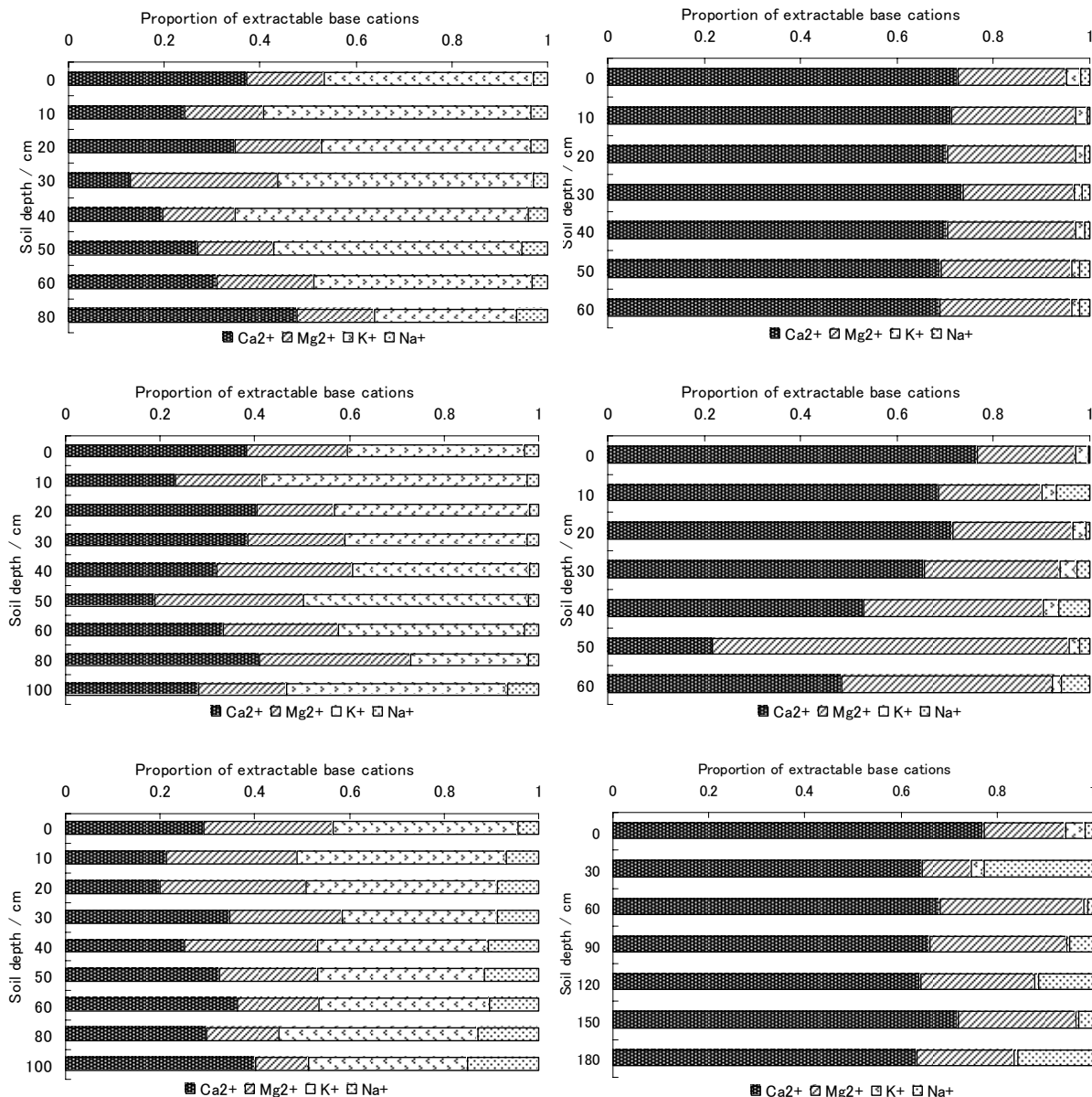


図5 土壤の交換性塩基の相対組成
 亜熱帯林 A (a)、B(b)、C(c)、亜寒帯林 A(d)、B(e)、および温帯林 (f)

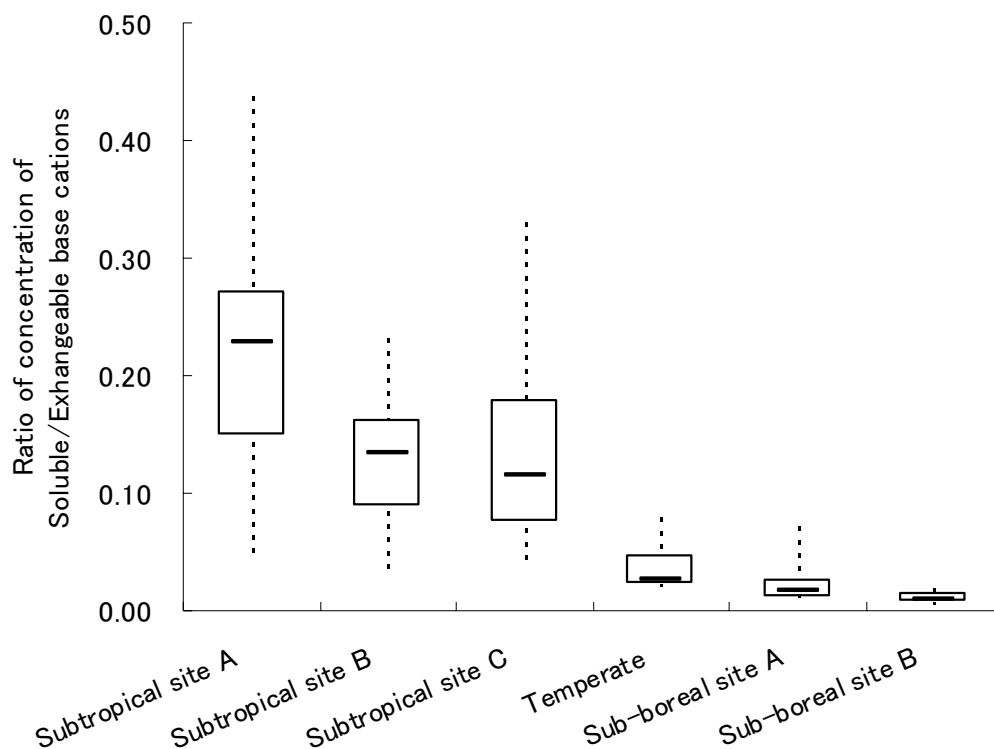


図6 6カ所の調査地における塩基成分の水溶性比率の違い

交換性陽イオンに対する水溶性陽イオンの割合をもってここに定義している水溶性比率は、塩基溶脱の程度に対応する。破線は最小、最大値の範囲。箱の端と内部の黒線はそれぞれ四分位数と中央値を表す。添付のアルファベットの違いは、 $P < 0.05$ の水準で有意な差があることを意味する。

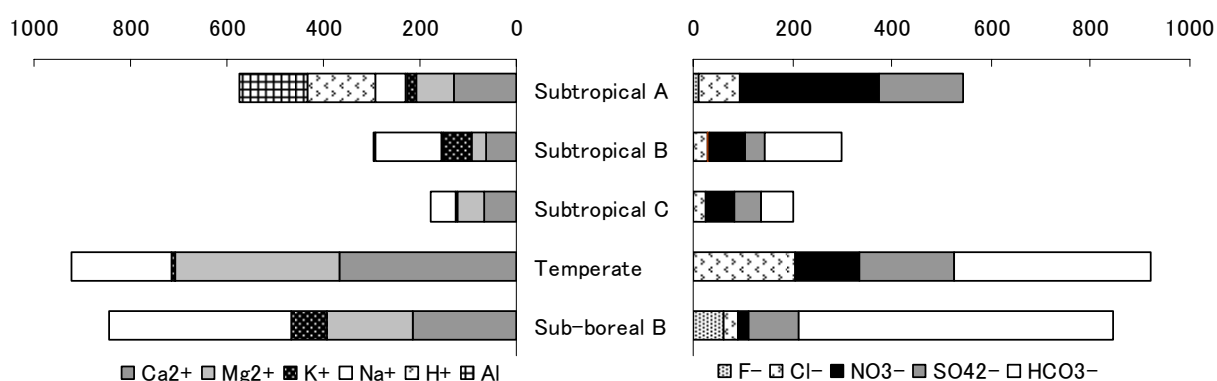


図7 それぞれの集水域の渓流水に見られる水質の違い

HCO_3^- 濃度は陽イオンと陰イオンとの電荷の差より算出。亜熱帯林Aでは、そのpH値より溶存無機炭素は HCO_3^- ではなくほとんどが H_2CO_3 として存在していると推定される。pHとAl化学種の関係 (Stumm and Morgan, 1995) より、亜熱帯林AおよびBのAlはそれぞれ+3、+1の価数をもつと推定される。亜寒帯Aでは適切な試料を得られず、データはない。

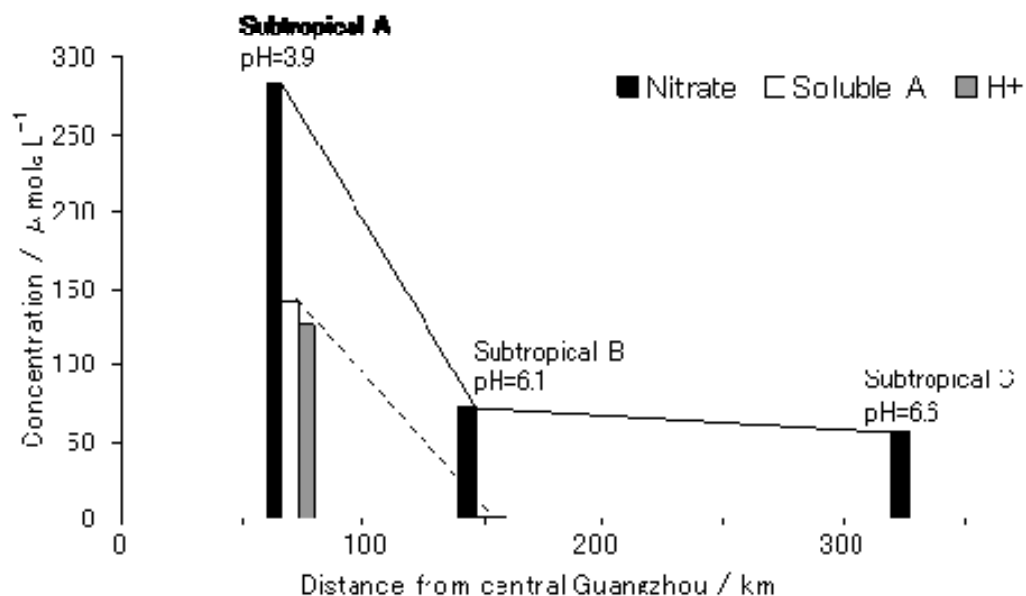


図8 亜熱帯の3地域における渓流水中の溶存A1、NO₃⁻およびH⁺濃度の広州市からの距離に伴う変化

(3) 亜熱帯林A集水域における土壌塩基成分の収支

激しい酸性化が生じている亜熱帯林A集水域を対象にして、流出によるアウトプット、大気沈着および風化によるインプットからなる塩基成分の物質収支を推定した。その結果を表2に示す。

この集水域から渓流水によって年間に失われるCa²⁺およびMg²⁺はそれぞれ39および78 mmol m⁻²と見積もられた。一方、大気沈着ならびに風化により供給されるCa²⁺およびMg²⁺は59および9 mmol m⁻²と推定され、アウトプットがインプットを上回っていることが判明した。これらの差し引きにより、正味として19ならびに30 mmol m⁻²の損耗が生じていると計算される。このような塩基損失の供給に対する割合は、Ca²⁺では32%であり、Mg²⁺では330%に達した。土壌塩基成分全体についても、沈着と風化により行われる135 mmol m⁻²の補給に対し流亡は209 mmol m⁻²と55%も上回る。酸性物質の負荷の結果、これら塩基性イオンがH⁺とイオン交換し、このような激しい生態系からの溶脱が生じていると考えられる。

Ca²⁺およびMg²⁺の流亡がこの速度で毎年進行すると仮定すると、この流域の土壌に貯蔵されている塩基は、それぞれ46年(870/19)、20年(600/30)で完全に枯渇すると予想される。気候条件によ

表2 亜熱帯林Aにおける土壌塩基成分の物質収支の推定

	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Total BC
Pool /mmol m ⁻² (0-100cm depth) *	210	2950	600	870	4630
Atmospheric input /mmol m ⁻² yr ⁻¹	16	16	3	28	63
Weathering supply /mmol m ⁻² yr ⁻¹	4	32	6	31	72
Stream runoff/mmol m ⁻² yr ⁻¹	68	23	39	78	209
Δpool /mmol m ⁻² yr ⁻¹	-49	25	-30	-19	-74
Predicted lifetime /yr	4		20	46	63

*土壌中に存在する塩基イオンの総量は、3年間の全土壌層についての平均により見積もっている(図4参照)。**風化による塩基イオン供給フラックスの推定法は、3(4)項を参照。

り本来乏しい土壌塩基が、酸性物質の負荷という要因によってきわめて急速に損耗しつつある状況にあることが判明した。

(4) 推定下限pHから示される人為的酸性化

すでに述べたように、湿潤亜熱帯に広く分布し、本研究の調査地の土壌でもある Acrisols は本来酸性という化学的特性をもつ土壌であり、自然本来のプロセスによっても土壌の酸性化は生ずる。したがって、今回観察された顕著な生態系酸性化が自然に起因したものであるのか、それとも人為由来の酸性原因物質によって引き起こされたものであるかを判定することは重要である。自然条件で土壌の酸性化が生ずる最も重要な根拠的理由は土壌のCO₂に由来する炭酸である（土壌表層では有機酸が重要な役割を果たす場合もあるが）。炭酸から生成したH⁺が、一次鉱物の風化を促進する一方、イオン交換を通じて土壌のイオンの挙動を支配し、ひいては土壌の酸性度を左右する。イオン交換によって吸着されただけ土壌溶液中のH⁺濃度は低下（pHは上昇）するから、CO₂濃度は土壌pH(H₂O)の下限を決めていると理解することができる（ここでは硫化物の酸化による硫酸生成のような特例的な機構は考えない）。

そこで、炭酸に起因して到達しうる最大H⁺濃度（下限pH）を推定した。これは、土壌CO₂との溶解平衡のみによって決定されるpHである。各気候帯の蒸発散量に基づいて推定された土壌CO₂濃度（Brook et al., 1983）と、それによって決まる下限pHの推定結果を表3に示した。下限pHは、気候帯によって多少異なるものの、4.8～5.1と推定された。

図9は、根圏下部（50cm以深）における塩基成分の水溶性比率を土壌pH(H₂O)測定値に対してプロットしたものである。この土壌深度は、植物や微生物の活動によるH⁺サイクルの直接的影響を免れているとみなせる。表3で推定した各気候帯の“下限pH”も合わせて表示している。亜寒帯林と温帯林のpH(H₂O)はそれぞれの“下限pH”を大きく、あるいは多少上回っており、土壌中で十分な緩衝作用が行われていることを示している。これに対し、亜熱帯林のpH(H₂O)は“下限pH”と同じか、それを大きく下回っていることが明らかである。特に亜熱帯林Aでその差が大きい。また、この下限pHを越えたところを起点に水溶性比率（縦軸）が急激に上昇するという関係が認められる。亜熱帯林の溪流で観察されたpH3.9（図8）もこの閾値より低い。したがってこの解析結果から、中国の亜熱帯林土壌について示されてきた低pHは大気経由の酸性原因物質に起因したものであると判定され、それによって土壌最深部まで含めた土壌塩基の激しい溶脱が生じている現状にあると理解することができる。

表3 蒸発散量から見積もられる土壌CO₂濃度とそれから推定される各気候帯の“下限” pH

Site	Evapotranspiration / mm	Soil log (P _{CO2})*	“Expected lower limit” soil pH**
Subtropical	800	-1.9	4.8
Temperate	600	-2.1	4.9
Sub-boreal	400	-2.4	5.1

*次式から見積もられる土壌CO₂濃度から計算:

$$\log (P_{CO_2}) = -3.47 + 2.09(1 - e^{(-0.00172ET)}) \quad (\text{Brook et al., 1983}).$$

** 次の炭酸平衡から計算: $[H^+] = \sqrt{10^{-7.8} [P_{CO_2}]}$

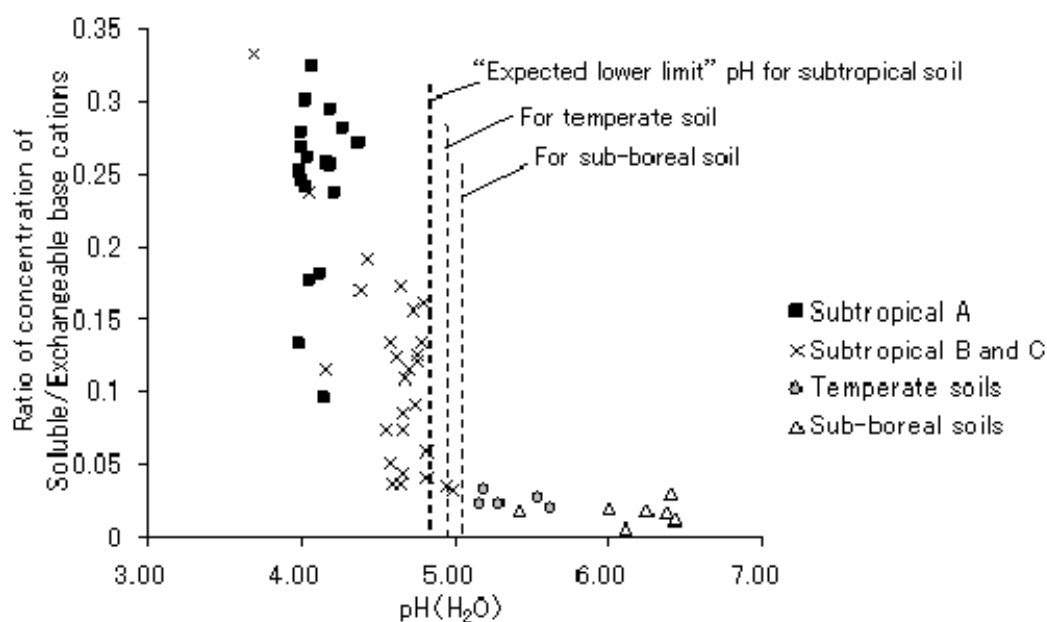


図9 各気候帯の根圏下部(50cm以深)における塩基成分の水溶性比率と土壌pH(H₂O)の関係
各気候帯の“下限pH”(本文参照)を図中に示している。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

気候の違いにより、生態系の緩衝能が数十倍も異なることが実証された。連続的でシステマティックな変化として明確に示されたこのような気候要因の大きな影響は、これまでになかった研究成果である。酸性原因物質の負荷の影響を考える上で生態系の感受性がこれほど大きく異なるという事実は、今後の研究にとって重要な観点を提示するものである。

大気沈着物の負荷が実際に集水域レベルでの激しい酸性化を生じさせている現状にあることが確実な事実として示された。通常、酸の中和緩衝が行われるはずの土壌でその最深部に至るまで交換性塩基がほとんど枯渇し、さらには、森林から流れ出す渓流水のpHは4以下を示し、高濃度のAlが含まれており、集水域のレベルで究極的な酸性化に至っている状況にあることがわかった。森林から流出する河川水が酸性化することはヨーロッパ等での報告がすでにあるが、それらは氷河による浸食のために薄い土壌層しかもたないことや、冷涼な針葉樹林下でポドソル化(有機酸のための強い酸性条件による)が本来生じているような地域性が深く関与している。本研究で見出されたのはそれとは異なる湿潤亜熱帯という気候条件の重要性であり、モンスーンアジアでも激しい酸性化が生じること、すなわちアジア型酸性化の事実をその現象の必然性を含めて解明した。この成果は世界で初めてのものであり、大きな意義がある。

(2) 地球環境政策への貢献

アジアで激しい酸性化が生じている事実について科学的データを示した。このことが判明した亜熱帯域はわが国の国土よりかなり感受性の高い生態系であるとは言え、同じモンスーンアジアでのこのような重篤な事態は、国内でも同様の現象が十分生じうることを示したという点で新た

な注意を喚起するものである。東アジアでの拡大する経済発展のもと、今後の酸性原因物質の負荷により、生態系酸性化が窒素飽和とともに今後ますます拡大・深化し、顕在化していくことは間違いなさそうである。このような本研究の成果は、政策立案、求められる研究動向、EANETの展開や方法論における今後の問題の所在について、一定の俯瞰を与えるものである。

6. 引用文献

- 1) Chen XY, Mulder J. 2007. Atmospheric deposition of nitrogen at five subtropical forested sites in South China. *Science of the Total Environment* 378: 317-330.
- 2) MacDonald JA, Dise NB, Matzner E, Armbruster M, Gundersen P, Forsius M. 2002. Nitrogen input together with ecosystem nitrogen enrichment predict nitrate leaching from European forests. *Global Change Biology* 8: 1028-1033.
- 3) Larssen T, Solberg S, Lydersen E, Aas W, Tang D, He Y, Gao J, Liu H, Eilertsen O, Angell V, Duan L, Liu Q, Seip HM, Vogt RD, Zhao D, Mulder J, Xiang R, Shao M, Xiao J, Wang Y, Shang H, Zhang X, Luo J. 2006. Acid rain in China. Rapid industrialization has put citizens and ecosystems at risk. *Environmental Science and Technology* 40: 418-425.
- 4) Fang Yun-ting, Mo Jiang-ming, Jiang Yuan-qing, Li De-jun, Per Gundersen (2005 a): Acidity and inorganic nitrogen concentrations in soil solution in short-term response to N addition in subtropical forests. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 13(2):123-129.
- 5) Fang Yun-ting, Mo Jiang-ming, Zhou Guo-yi. (2005 b): Response of soil NO₃-N dynamics to N additions in Dinghushan forests, assessed by ion-exchange resin bag method. *Ecological Environment*, 14(4): 483-487.
- 6) Tang G, Lydersen E, Seip HM, Angell V, Eilertsen O, Larssen T, Liu X, Kong G, Mulder J, Semb A, Solberg S, Torseth K, Vogt RD, Xiao J, Zhao D 2001. Integrated monitoring program on acidification of Chinese terrestrial systems (IMPACTS) - A Chinese-Norwegian cooperation project. *Water, Air, and Soil Pollution*. 130: 1073-1078.
- 7) Yoh M, Konohira E, Yagi K. 2001. Regional distribution of natural stream nitrate in central Japan. *Water, Air, and Soil Pollution*. 130: 655-660.
- 8) Brook GA, Folkoff ME, Box EO. 1983. A world model of soil carbon dioxide. *Earth Surface Processes and Landforms* 8: 79-88.

7. 国際共同研究等の状況

国際共同研究計画名： アムール・オホーツクプロジェクト （総合地球環境学研究所 研究プロジェクトP2-3）

(1) 協力案件名：The Amur Terrestrial Research Project (ATRP)

カウンターパート氏名：Dr. Vlad Shamov

所属・国名：Institute of Water and Ecological Problems, RAS・ロシア

参加・連携状況、国際的な位置づけ：当該課題の日本側代表者を務めている。共同の現地調査を平均して年2回程度、国際会議を年一回程度の頻度で、過去数年間継続中。課題は国際

的に先進的なものである。

(2) 協力案件名：The Joint Research on Biogeochemical Role of Sanjiang Plain

カウンターパート氏名： 閻百興・王徳宣・張柏

所属・国名：Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, CAS・中国

参加・連携状況、国際的な位置づけ：当該課題の日本側代表者を務めている。共同の現地調査を平均して年3回程度、国際会議を年一回程度の頻度で、過去数年間継続中。委託調査も立案、指示している。カウンターパートの一人は当大学に3ヶ月滞在した。課題は国際的に先進的なものである。

(3) 協力案件名：Research on the Distribution of Soil Chemistry in Sanjian Plain

カウンターパート氏名： 陳欣

所属・国名：Institute of Applied Ecology, CAS・中国

参加・連携状況、国際的な位置づけ：当該課題の日本側代表者を務めている。共同の現地調査および委託調査を過去数年間、年一回程度行っている。また、国際会議・打ち合わせ会議を平均年一回程度行っている。課題は国際的に先進的なものである。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表。

〈論文（査読あり）〉

- 1) M. K. Koshikawa, T. Takamatsu, S. Nohara, H. Shibata, X. Xu, M. Yoh, M. Watanabe and K. Satake: Applied Geochemistry 22, 1209-1216 (2007)
“Speciation of aluminum in circumneutral Japanese stream waters”

〈査読付論文に準ずる成果発表〉（社会科学系の課題のみ記載可）

なし

〈その他誌上発表（査読なし）〉

- 1) 吉岡崇仁、館野隆之輔・楊宗興、日本陸水学雑誌. 67, 231-234 (2006)
「集水域の生物地球化学シミュレーションモデルの有用性と課題ー集水域研究におけるシミュレーションモデルへの期待ー」

(2) 口頭発表（学会）

- 1) 磯貝ゆりか・王徳宣・方運霆・楊宗興：日本陸水学会(2006)
「日本および中国の異なる気候区分の森林土壌における塩基性カチオンの鉛直分布」
- 2) 磯貝ゆりか・Fang Yunting・Mo Jiangming・王徳宣・楊宗興：日本地球惑星科学連合大会(2007)
「東アジアにおける異なる気候帯の森林集水域の酸性化の違い」
- 3) 渡邊浩史・楊宗興：日本陸水学会(2007)
「多摩川上流とその周辺域における森林渓流水質の特性および酸性化に関する考察」

(3) 出願特許

なし

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

なし

(5) マスコミ等への公表・報道等

なし

(6) その他

なし