

課題名	B-0801 東アジアにおける生態系の酸性化・窒素流出の集水域モデルによる予測に関する研究
課題代表者名	新藤純子（独立行政法人農業環境技術研究所物質循環研究領域）
研究実施期間	平成20～22年度
累計予算額	45,834千円（うち22年度 13,670千円） 予算額は、間接経費を含む。
研究体制 （１）東アジア集水域を構成する生態系における酸性物質の循環のモデル化に関する研究（独立行政法人農業環境技術研究所） 研究協力機関（名古屋大学） （２）集水域システムにおける酸性物質の蓄積・流出過程のモデル化に関する研究（東京大学大学院農学生命科学研究科） （３）東アジアにおける集水域モデル開発のための渓流水化学性および物質循環の解析（（財）日本環境衛生センターアジア大気汚染研究センター） 研究協力機関（マレーシア気象庁、タイ国王室林野局、タイ国環境研究研修センター、英国ランカスター大学）	
１．はじめに 経済発展の続く東アジアでは発生源対策が導入された場合でも2020年には硫黄酸化物（SO₂）と窒素酸化物（NO_x）の排出量は2000年と比べて22%および44%増加すると予測されている。また現在、東アジアにおいて農業起源のアンモニアは窒素換算でNO_xの1.5倍程度発生していると見積もられるが、人口の増加と食生活の変化による食料需要の増大に伴って、さらに1.5倍程度に増大すると予想される。従って、中国、東南アジアを含む東アジアの生態系は、今後10-20年間、増大する酸性物質の負荷を受け続ける可能性が高い。 陸域生態系への大気沈着の影響を定量的に評価するために、集水域内の物質の生物地球化学的循環を基礎とした物質収支解析が総合的モニタリング手法として期待され、さらに集水域内での物質の挙動をモデルを用いて解析することが、機構の解明と将来の沈着量変化による影響の推定に有用と考えられる。東アジア酸性雨モニタリングネットワーク（EANET）でも、集水域を対象としたキャッチメントモニタリングとその評価のためのモデリングの推進が求められている。 酸性物質の負荷による影響解明のため、欧州ではICP forestやNITREXなどのネットワークが組織され、また米国ではハーバードブルックやアディロンダック森林流域などにおいて、広域的かつ長期的なモニタリングや大規模な実験が行われ、酸性物質の影響に関する実態やメカニズムの解明進められた。これらの観測に基づいて欧米において多数のモデルが開発された。 一方、東アジアは、熱帯から亜寒帯の様々な気候帯を有し、独特の地質条件や気候条件下に生成された土壌、植生の組み合わせにより、欧米と異なる生態系が成立している。しかし、特に熱帯地域における上記の様な影響解明のための生物地球化学的循環に関する調査は本研究の先行研究（地球環境研究総合推進費課題C-052）以外はほとんどなく、循環の特徴やメカニズムは未解明である。また既存のモデルの多くは温帯から亜寒帯の生態系を対象としており、熱帯・亜熱帯地域への適用性はほとんど検討されていない。またその多くは非常に詳細な入力データが要求され、測定データの少ないアジアへの適用は困難な状況である。 生態系への負荷となる酸性物質は、化石燃料の燃焼や農業・畜産など人間活動により排出される。これらは大気を経由して森林生態系へもたらされる一方、発生源近傍において直接的な環境汚染の原因となる。酸性物質の排出の現状を解析し直接影響と大気経由の影響とを相対的に評価すること、また将来の排出量の変化を予測することは、酸性沈着を含む今後の環境問題への対応を考える上で重要と考えられる。 ２．研究目的 本課題では、これまで酸性沈着による森林や流域における物質循環への影響に関する調査や解析が余り行われていない熱帯域を対象に、集水域内の物質収支解析のためのモニタリング手法の確立とモデルの作成、更に、これらを用いて酸性物質の生態系への流入・循環・流出の特徴とそのメカ	

ニズムを解明することを目的とする。また、森林流域を含むより広域な領域を対象とした窒素収支の将来予測も含む経年的な変化を評価し、その中で大気沈着の寄与を明らかにする。図1に研究の全体構成を示す。

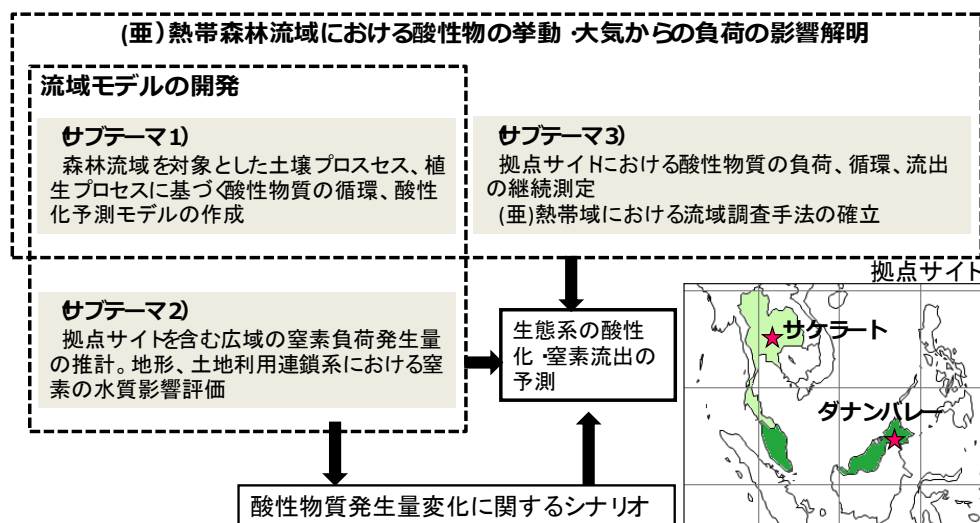


図1 研究の全体構成と対象領域

3. 研究の方法

熱帯の特徴的な植生型である熱帯季節林（乾燥常緑林：タイのナコンラチャシマ県のサケラート造林研究ステーション）と熱帯多雨林（マレーシアのサバ州タウウ省（ボルネオ島）のダナンバレー自然保護地域周辺）を選定し、これらの拠点サイトとその周辺地域（ナコンラチャシマ県とサバ州）を研究の対象地とした。（図2）。

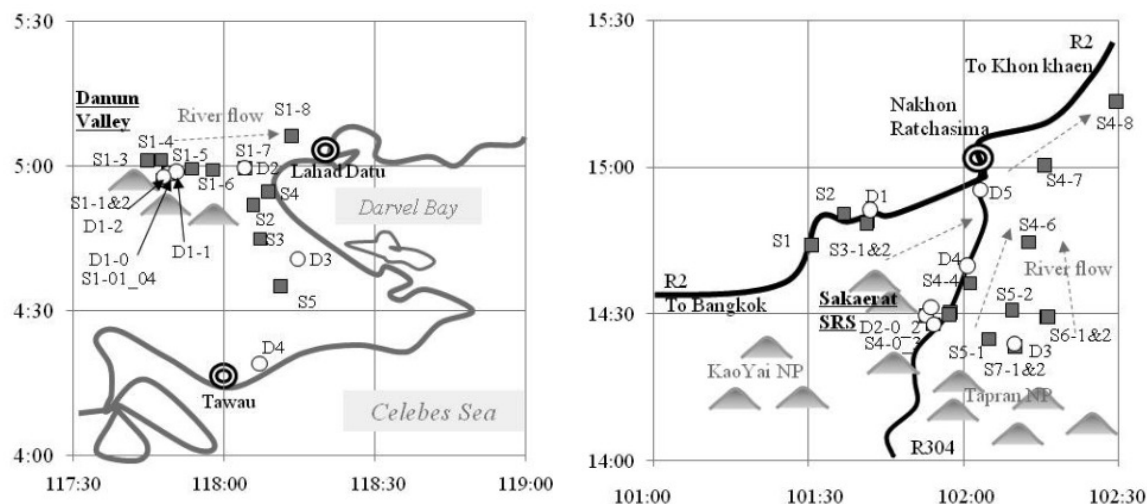


図2 研究対象領域とサブテーマ3による調査地点

左：マレーシア・タウウ省、右：タイ・ナコン・ラチャシマ県

地図上の縦軸、横軸は、それぞれ北緯、東経を示す。Sは溪流・河川水測定点、Dはレジンサンプラーによる大気沈着量測定点を示す。拠点サイトは、ダナンバレー：S1-01_04付近、サケラート：S4-0付近。

（1）東アジア集水域を構成する生態系における酸性物質の循環のモデル化に関する研究

東アジアの森林生態系における大気からの酸性沈着による土壌化学性の変化や窒素流出を推定する土壌プロセス・物質循環モデルを作成し、参照サイトの新潟県加治川流域で検証を行うとともに、拠点サイトのサケラートとダナンバレーに適用し、各地点の表層土壌化学性変化と物質循環の特徴を比較した。モデルは陽イオン交換反応、硫酸吸着反応、アルミニウム酸化物の溶解反応および溶液内の化学平衡反応と植物による吸収、リター分解、窒素固定などの生物的過程を含む。植物

による栄養塩の吸収は衛星データやタワー観測データに基づいて推定した純生産量（NPP）から求め、リター分解はロザムステッドカーボンモデル（RothC）の定式化方法を導入した。また、雨季と乾季の顕著なサケラートでは乾性沈着の影響が重要と考えられるので、アジアフラックスサイト等の観測値に基づいてインファレンシャル法によりS（ SO_2 ）とN（ HNO_3 、 NH_3 ）の乾性沈着量を求めた。さらに、各拠点地点を含む広域領域を対象に土地利用・土地被覆、人口、標高などのデータを収集しGISデータを作成し、森林流域と広域の窒素循環モデルを連結して、森林からの流出窒素の広域窒素循環における寄与を算定した。

（２）集水域システムにおける酸性物質の蓄積・流出過程のモデル化に関する研究

サケラートを含むナコンラチャシマ県およびダナンバレーを含むサバ州を対象に、人為活動による窒素循環と環境負荷の1980年～2005年の変遷を推計した。人口統計、農業統計などのデータや衛星データから推定した土地利用分布などに基づいて、家庭部門、農業部門および大気からの窒素負荷を1km×1kmグリッドごとに推定した。家庭部門からの負荷は人口と一人当たりの食料消費量に基づき、農業部門からの負荷は化学肥料、家畜ふん尿などのインプットと作物による吸収との差に基づいて推定した。大気からの窒素負荷に関しては、化学肥料や畜産からのアンモニア発生量の変化、および自動車の台数変化と排ガス規制の導入過程に関するデータに基づいて NO_x 発生量の変化を推定した。これら発生した窒素が土壌から水系へ流出する過程について完全混合槽モデルを作成して水系の窒素濃度分布を推定した。また上記の各要因の2030年までの変化を予測し、単位面積当たりの肥料使用量についての2種類のシナリオの基に水質の変化を予測した。

（３）東アジアにおける集水域モデル開発のための渓流水化学性および物質循環の解析

マレーシアのダナンバレー、タイのサケラートに拠点サイトを設定し、両国の研究協力機関と共同観測体制を構築して、大気濃度、林外雨、林内雨による沈着量と渓流水化学性（2回/月採取）の継続的な観測を行った。大気沈着量はバルク捕集法による2回/月の捕集に加えてイオン交換樹脂サンプラー（年2回交換）による長期積算沈着量を測定した。さらに、ダナンバレーの土壌層中の複数深度にイオン交換樹脂を埋設し土壌中の物質フラックスの観測を行い、先行研究(C-052)によるサケラートにおける同様の測定に基づいて両地点のフラックスの特徴を比較した。また、土壌鉱物の風化の指標となる渓流水の SiO_2 の分析や硫酸吸着特性の測定などを行い、これらのデータに基づいて両地点の物質循環の特性と、大気沈着による渓流水水質の変化のメカニズムの解明を行った。

また、拠点サイトを含むタワウ省およびナコンラチャシマ県内の複数地点においてイオン交換樹脂法によるSとNの沈着量の測定、河川水化学性の測定を実施し、これらの広域分布を明らかにした。これらの研究で得られた知見や確立した方法は集水域モニタリングガイドラインを作成のための基礎情報としてEANETに提供した。

４．結果および考察

（１）東アジア集水域を構成する生態系における酸性物質の循環のモデル化に関する研究

作成した土壌プロセス・物質循環モデルを参照サイトである加治川に適用し、妥当性を検証した。土壌pHの推定値は、例外はあるものの実測値の変化と比較的良く一致している。土壌水中のイオン濃度は、実測値の変化を正確に捉えることは困難であるが、濃度レベルとその季節変化をおよそ再現している（図3）。 NO_3^- 、 Ca^{2+} などの濃度変化は植物による吸収、リター分解、生物的窒素固定のプロセスを考慮することにより実測値とある程度対応する変動を表すことが可能となった。一方 Na^+ や Cl^- 変化の推定にはこれらの過程は考慮していない。モデルをサケラートへ適用した結果、検証データは十分に存在しないが、特に土壌pHの変化は、雨季後期に高く、乾季（12月～2月）後半から雨季初期にかけて最も低い値を示すなど、サブテーマ3における観測結果と良く整合した（図4）。入力データやパラメータを変えて適用した結果、土壌pHの季節変化は、乾季と雨季の土壌水分の変化に強く影響を受けていることが示された。また、雨季初期に沈着量の増大や

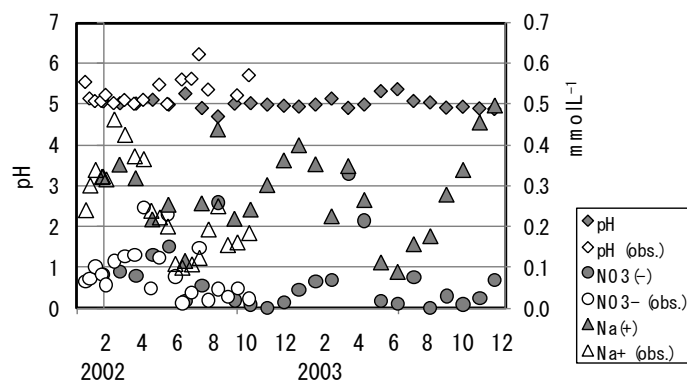


図3 土壌プロセス・物質循環モデルの加治川への適用・検証

リター分解の促進に伴う栄養塩の溶脱による土壌水濃度の上昇も推定された。酸性物質の沈着量の増大したシナリオによる推定では土壌pHの低下が予測され、仮に日本の平均的～高負荷地域程度（約3.5倍）に増大した場合には表層土壌のpHが0.3程度低下する可能性がある。生物的な過程の推定は更に改良が必要であるが、衛星データやタワー観測データと気象データに基づいて求めたNPPから推定した養分の吸収とリターの分解による内部循環は、サケラートとダナンバレーでは加治川と比較するとかなり大きく、大気からの沈着量の寄与は小さい（図5）。

アジアフラックスサイトの観測値等から推定した乾性沈着量は、約 $3.0 \text{ kgS ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ 、 $6.2 \text{ kgN ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ と湿性沈着量の1/2～同程度であると推定された。また、ナコンラチャシマ県に関してサブテーマ2で推定している広域窒素循環と、森林の窒素循環モデルを結合して推定した、森林域からの窒素流出の寄与は約2.4%（森林面積は8.2%）と推計された。

本サブテーマで作成したモデルは、既存の多くのモデルと比較すると入力パラメータなどの少ない簡易なモデルであるが、それでもサケラートやダナンバレーで入手可能なデータでは十分ではなく、文献値に基づいた典型的な値を用いた部分が多い。加治川への適用ではある程度実測値と整合する結果が確認できたが、サケラートとダナンバレーでは土壌に関するデータがわずかしかないたため、サケラートの土壌pH変化以外は検証が困難であった。従って示された結果は暫定的なものである。しかし、サブテーマ3などで観測された変動がどのような要因により起こっているのか、プロセスを解明するための手段として利用可能と考えられる。また、今後、物質循環の中で特に寄与の大きい、植物による吸収とリターの還元・分解に関して、より信頼性の高い推定のための改良が必要である。

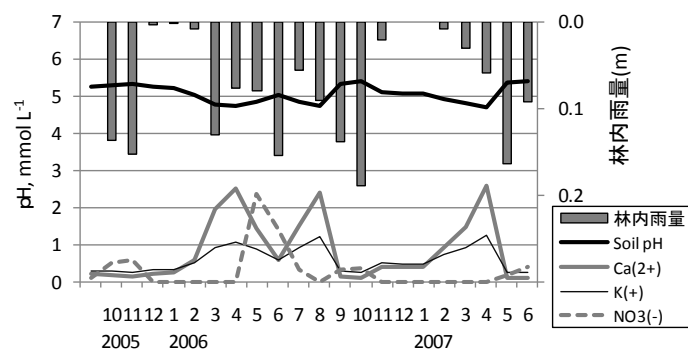


図4 土壌プロセス・物質循環モデルのサケラートへの適用

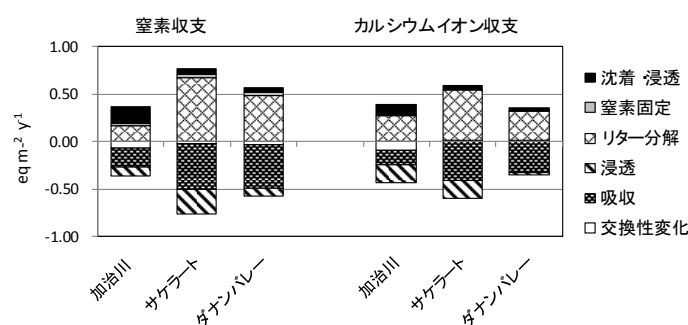


図5 各サイトの窒素とカルシウムの年間收支

(2) 集水域システムにおける酸性物質の蓄積・流出過程のモデル化に関する研究

ナコンラチャシマ県、サバ州とも過去25年間の間に人口が増加し（特にサバ州の増加率が高い）、一人当たりのタンパク質消費量も増加したため、家庭部門からの窒素負荷は増大してきたが、近年出生率が低下し一人当たりの食料消費量もほぼ頭打ちである。農業部門への窒素インプットである窒素肥料使用量は、ナコンラチャシマでは1995年まで急激に増大しその後3.5万tN程度で安定している。サバ州では現在も急激な増大を続けており、2005年現在で17万tNを超える。この増加は近年のパームオイル需要の増大により、オイルパームの生産を農地面積の拡大により増加させてきたことによる。畜産からの負荷の増大は小さく、サバ州では肥料と比較してその寄与はきわめて小さかった。窒素肥料と畜産ふん尿からのアンモニアの大気への揮散量も増加傾向にある（図6）。自動車からのNO_xは、自動車台数は増大してきたが、新車には厳しい排出規制が課せられているため、発生量は頭打ちか減少傾向にあることが明らかとなった。両地域とも農業由来のアンモニアが大気への窒素発生量の大部分を占める（図6）。農業部門、家庭部門、大気を合わせた窒素負荷に占める大気の割合は、ナコンラチャシマ県で約19%、サバ州では約11%（2005年）であった。図7に両地域の全窒素負荷の分布の変化を示した。南部を除いて農地が全面に分布するナコンラチャシマ県では森林部以外で1990年～2000年までに負荷が増加したが、マレーシアでは散在する農地での近年の増大が顕著である。河川水などの窒素濃度も上昇してきたが、濃度レベルは低いと推定された。

各部門のこれまでの推移を考えると、今後ナコンラチャシマ県の窒素負荷は大きく変化しないと考えられる。一方サバ州ではパームオイルの需要の急増により、肥料使用量の増加、それによるアンモニア揮散と水質汚染進行の可能性がある。

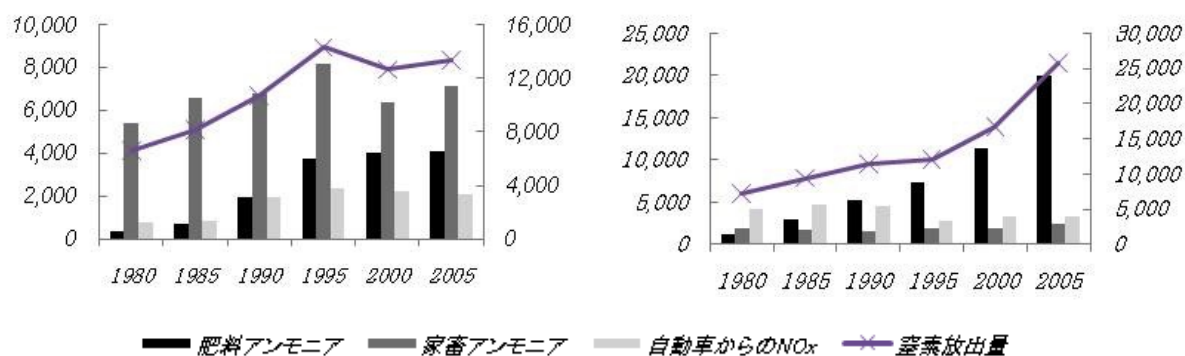


図6 ナコンラチャシマ県（左）とサバ州（右）の大气への窒素発生量（tN）
（左軸：各発生源の窒素負荷量 右軸：全窒素負荷量）

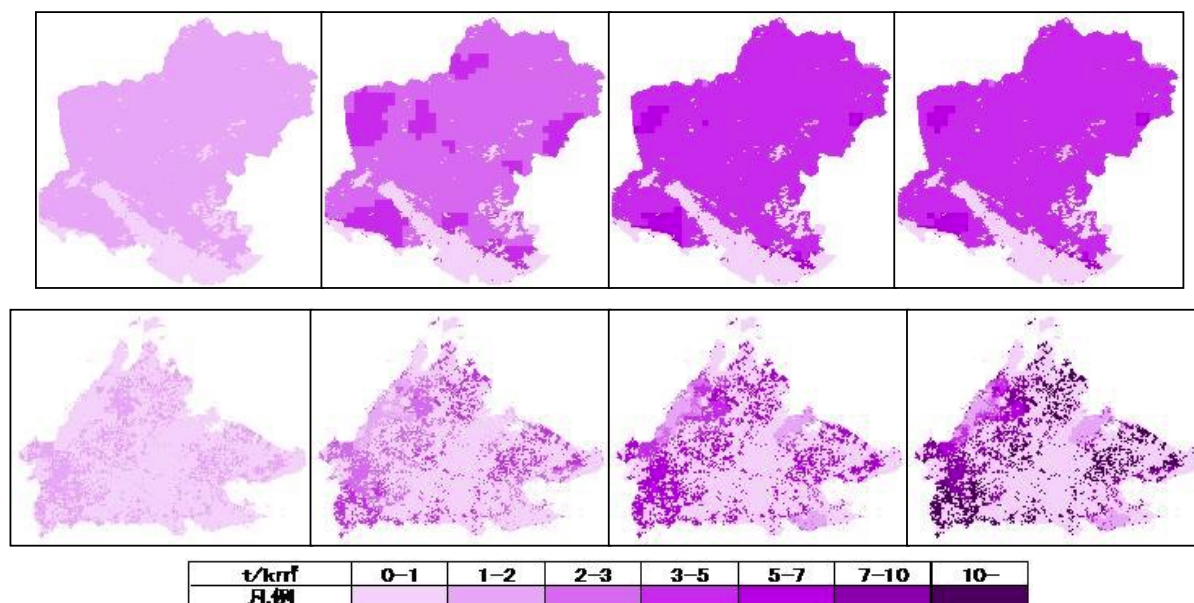


図7 ナコンラチャシマ県（上）とサバ州（下）の窒素負荷の地理的分布（tN km⁻²）
（左から1980年、1990年、2000年、2005年）

（3）東アジアにおける集水域モデル開発のための溪流水化学性および物質循環の解析

サケラートとダナンバレーにおける継続的な観測の結果、両地域での物質循環や酸感受性の違いが明確となった。表1は両サイトの溪流水化学性を示す。ほとんどのイオン種でサケラートの方が大気からの沈着量が多いが、溪流水濃度は反対にダナンバレーが高い。アルカリ度や鉱物風化の大きさを表すSiO₂濃度も大きく異なる。ダナンバレーでは、土壌・植物系における内部循環や鉱物風化速度が大きいことを反映して、集水域全体としての酸緩衝能が高いことが示唆された。一方、サケラートの溪流水は、pH、EC、アルカリ度等が低く、酸中和能が小さい、いわゆる酸感受性河川であることが明らかとなった。沈着量の季節変化の観測や、イオン交換樹脂を用いた土壌内イオンフラックスの測定などに基づいて、溪流水化学性の季節変化（図8）を検討した結果、雨季初期には有機物の無機化促進によってアルカリ化するものの、雨季中期以降には、大気沈着由来のSO₄²⁻が流出し一時的に酸性化するなど、溪流水は大気沈着に敏感に応答した。さらに乾季に集積したCl⁻が、雨季にH⁺とともに流出するなど特有な機構も明らかとなった。

表1 各拠点サイトの溪流水化学性

Catchment	pH	EC mS m ⁻¹	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	alkalinity	SiO ₂
			μmol L ⁻¹						mg L ⁻¹
Sakaerat (n=96)	5.68	2.1	7.8	4.4	99.1	35.8	58.7	41.3	2.57
Danum Valley (n=55)	7.05	4.7	38.0	9.8	36.4	168	148.0	373	5.81

拠点サイトを含む広域な観測によると、河川化学性は、タワウ省でもナコンラチャシマ県でも、ダナンバレーやサケラートの拠点サイトの溪流が最もpH、EC、アルカリ度等が低く、酸に対する感受性が高い地点であった。図9にタワウ省の測定データによる主成分分析結果を示したが、拠点サイトの森林地域から下流に行くに従ってアルカリ度、pH、EC等が上昇し、他のイオン成分濃度も上昇する傾向を確認することができる（ナコンラチャシマ県についての主成分分析でも第1因子の因子負荷量はタワウ省と類似しており、上流から下流への地点は、主成分得点散布図上で同様に右から左へと分布した）。また、どちらの地域においても、農業等の影響を受けると思われる地点であっても NO_3^- 濃度が比較的低く、熱帯の高温条件下で脱窒が促進され、その脱窒過程で生成される HCO_3^- がアルカリ度上昇にも寄与した可能性が考えられた。

上記の知見は、溪流化学性の決定機構や酸中和能の議論に重要なだけでなく、熱帯多雨林、熱帯季節林という気候帯が異なる森林集水域に適用可能な影響評価モデルや広域流域モデルにおける各プロセスを開発・精査する上で重要である。また、EANETをはじめとする国際的な枠組みにおける生態影響評価の定量的議論へも貢献した。

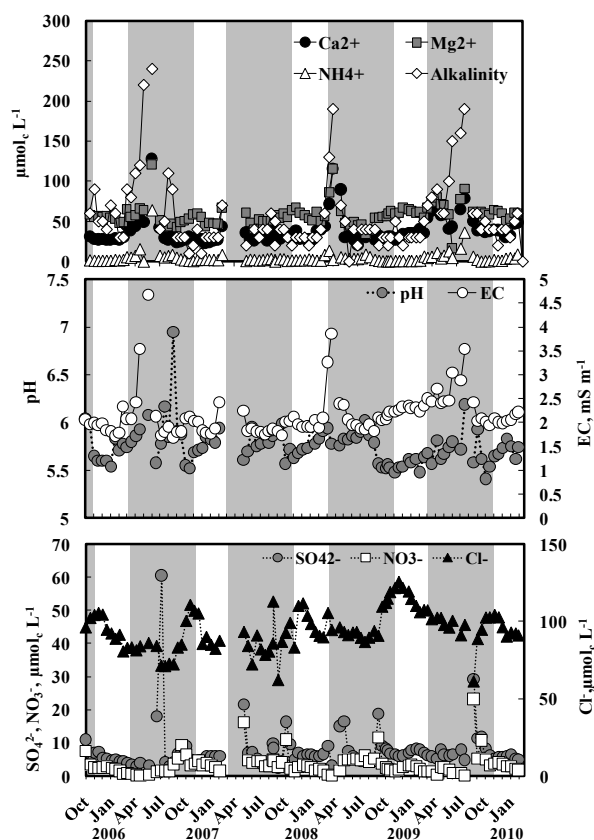


図8 サケラートにおける溪流化学性の季節変化

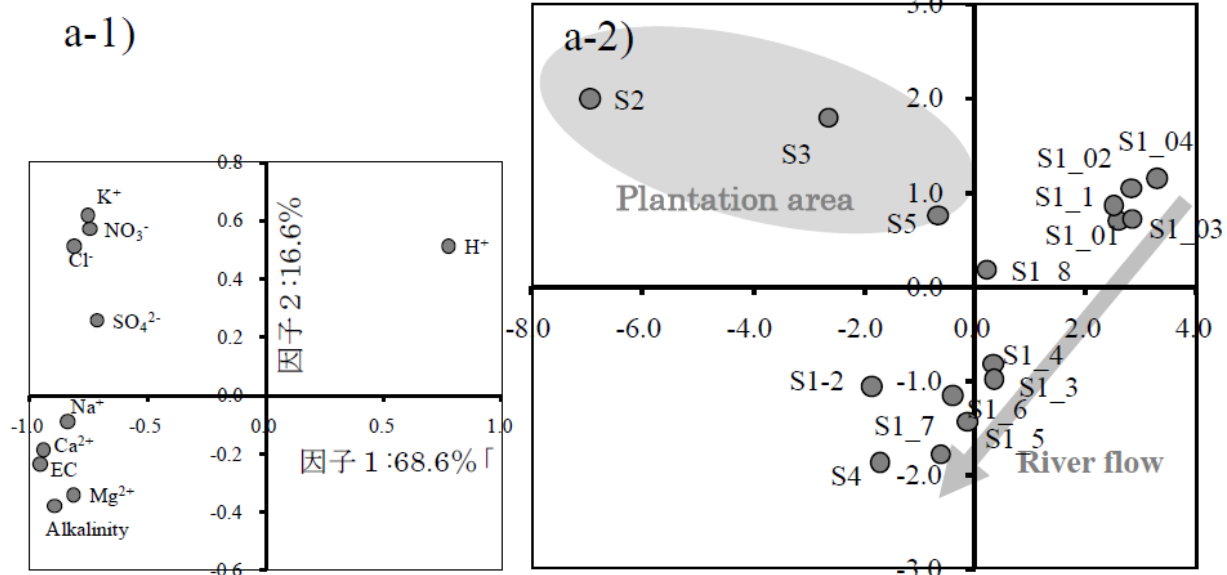


図9 タワウ省における広域河川調査地点の主成分分析結果(1)と各地点の主成分得点(2)
地点記号は、図1に示した地図に対応する。タワウ省ではS1_01からS1_04ダナンバレーの集水域プロット内。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

東南アジアの典型的な生態系である熱帯季節林（タイ・サケラート）と熱帯多雨林（マレーシア・ダナンバレー）の拠点サイトにおける継続的な観測の結果、降水パターンやそれに関連する植生等に起因して、生態系内での物質フラックスや溪流化学性が大きく異なることを明らかにした。ダナ

ンバレーは土壌・植物系における内部循環や鉱物風化速度が大きく、渓流水の酸中和能が高いのに対して、サケラートの渓流水は、pH、EC、アルカリ度等が低く、酸中和能が小さい、いわゆる酸感受性河川である。風化速度の違いや、サケラートにおける大気沈着由来の SO_4^{2-} による一時的な酸性化などが SiO_2 濃度や土壌の硫酸イオン吸着能の測定により説明できた。

この様な熱帯～亜熱帯の生態系ではモデルの適用例は少ない。本課題では詳細な観測データの乏しい東南アジアへの適用を考慮して、拠点サイトで得られた観測結果や文献データに基づいて、既存の多くのモデルと比較して簡易なモデル（土壌プロセスと生物過程による物質循環の結合モデル）を作成した。サケラートで観測された表層土壌pHの特異的な季節変化がモデルにより再現され、明瞭な雨季と乾季の存在により生じていることを示した。また、東南アジアの対象地域では内部循環が日本と比べて大きく大気沈着の寄与は小さいが、サケラートの酸性物質の沈着量が仮に日本の平均的～高負荷地域程度（約3.5倍）に増大した場合には表層土壌のpHが0.3程度低下する可能性があることを示した。

広域観測によると、河川化学性はダナンバレーやサケラートの拠点サイトの溪流が最もpH、EC、アルカリ度等が低く、酸に対する感受性が高い地点であり、これらの森林地域から下流に行くに従ってアルカリ度、pH、EC等が上昇することが確認された。また、農業等の影響を受けられる地点であっても NO_3^- 濃度が比較的low、熱帯の高温条件下で脱窒が促進されていることが考えられた。

ナコンラチャシマ県とサバ州における窒素収支モデルによる農業などからの窒素流出による河川水窒素濃度の推定においても、窒素の環境への流出量に比して河川水濃度が低いことから高い脱窒能を有していることが推察された。また、これらの地域の窒素負荷の要因解析により、東南アジアの農村地帯では食料消費に伴う家庭からの窒素や自動車排気ガス起源の NO_x の発生量は現状維持或いは低下傾向となることが推定された。しかしパームオイルの需要の急増によりサバ州では肥料使用量の増加、それによるアンモニア揮散と水質汚染の進行の可能性を指摘した。

（２）環境政策への貢献

集水域を基礎とした物質収支解析およびそのモデリングは、EANETにおいて、総合的モニタリング手法並びに、酸性沈着による生態系影響評価のための定量的手法として期待されている。本課題で確立した集水域モニタリング手法とその観測・解析結果やモデルの開発状況はEANETや国内の会合などで随時紹介、情報交換を行っている。特に、本課題の参画期間である酸性雨研究センターは、EANETネットワークセンターに指定されており、集水域調査に関する研究の進捗状況は、定期的にEANET関連の国際会合やEANET参加国向けに発行されている紀要などで紹介・報告された。第3サブテーマで集約された基礎情報を基に、EANET土壌・植生モニタリングタスクフォースにより、集水域モニタリングのガイドラインが作成され、その最終案は2010年10月パタヤ（タイ）で開催された第10回EANET科学諮問委員会において承認された。これにより、各国におけるEANET集水域モニタリングが本格的にスタートすることが期待される。すでに、フィリピン等では、本ガイドラインを活用した集水域モニタリングを数年以内に開始することを表明しており、また、タイ、マレーシアにおける現地観測も、段階的に現地機関主導に移行することを議論している。このように集水域における総合的モニタリング手法と物質収支解析はEANET各国に普及しつつあり、東アジアにおける酸性沈着による陸域生態系への影響の定量的評価の推進に、大きく貢献したといえる。

他のサブテーマに関しても、EANET会合での東アジアにおける窒素負荷による影響推定方法や森林の土壌プロセス・物質循環モデルについての紹介や、インファレンシャル法の適用を前提とした乾性沈着測定に関する専門家会合の委員としてマニュアル作成のために情報提供などを行った。

6. 研究者略歴

課題代表者：新藤純子

東京教育大学理学研究科修士課程修了、工学博士、現在独立行政法人農業環境技術研究所物質循環研究領域長

研究参画者

（１）：新藤純子（同上）

（２）：川島博之

1953年生まれ、東京大学大学院工学系研究科博士課程単位取得の上退学、工学博士、現在、東京大学農学生命科学研究科准教授

（３）：佐瀬裕之

1965年生まれ、千葉大学大学院自然科学研究科博士課程修了、博士（学術）、現在、（財）

日本環境衛生センターアジア大気汚染研究センター生態影響研究部長

7. 成果発表状況（本研究課題に係る論文発表状況。）

(1) 査読付き論文

- 1) H. Sase, S. Nakayama, C.P. Leong, M. Kamisako, J. Luangjame, H. Garivait, T. Visaratana, B. Kietvuttinon and H. Ueda: iForest 2, 26-29 (2009)
“QA/QC activities and ecological monitoring in the Acid Deposition Monitoring Network in East Asia (EANET)”
- 2) J. Shindo, K. Okamoto, H. Kawashima and E. Konohira: Soil Science and Plant Nutrition, 55:532-545 (2009)
“Nitrogen flow associated with food production and consumption and its effect on water quality in Japan from 1961 to 2005”
- 3) K. Okamoto: Annals of Arid Zone, 47, 251-286 (2009)
“Impact of climate change on agricultural productivity in Asia”
- 4) N. Yamashita, S. Ohta, H. Sase, J. Luangjame, T. Visaratana, B. Kietvuttinon, H. Garivait, M. Kanzaki: Forest Ecology and Management 259: 1502-1512.
doi:10.1016/j.foreco.2010.01.026 (2010)
“Seasonal and spatial variation of nitrogen dynamics in the litter and surface soil layers on a tropical dry evergreen forest slope”

(2) 査読付論文に準ずる成果発表（「持続可能な社会・政策研究分野」の課題のみ記載可）

なし