

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 28 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26650163

研究課題名(和文) 熱帯林樹種によるケイ素利用の生態学的研究の開拓

研究課題名(英文) Development of ecological research on silicon utilisation by tropical tree species

研究代表者

北島 薫 (KITAJIMA, KAORU)

京都大学・(連合)農学研究科(研究院)・教授

研究者番号：40721379

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：熱帯自然林が持続的な生態系を維持するメカニズムを理解する努力の一環として、本研究では、土壌風化の要となるケイ素と植物の相互関係をマレーシアの熱帯低地林と山地林において調査した。具体的には優占樹種の葉におけるケイ素蓄積、トラップで定期的に回収されたリターサンプルのケイ素濃度、および、土壌A層上部のケイ素可給性を定量化した。得られた結果は、生葉とリターの両者において山地林よりも低地林の方が植物を介してのケイ素循環は大きいこと、さらに、熱帯低地林の樹種の多くがケイ素蓄積という形質をなんらかの理由で進化させ、ケイ素循環と土壌の化学物性に大きな影響を与えている可能性を世界で初めて明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In order to understand the mechanism at which natural forests in the tropics sustainably maintain ecosystem processes, we studied the interaction between dominant tree species and silicon, a critically important element in the process of soil weathering, in lowland and mountain forests in Malaysia. We quantified silicon concentrations in live leaves of dominant tree species and leaf litters periodically sampled from litter traps, and also assessed silicon availability in the upper A-horizon soil. The results showed for the first time that silicon cycling via plants is much more active in lowland compared to mountain forests, suggesting that many lowland tree species have evolved silicon uptake and accumulation as their functional traits, which in turn strongly influence soil weathering and mineralogy.

研究分野：植物生態学

キーワード：熱帯林樹種 ケイ素循環 植物機能形質 森林生態系 土壌風化 生態系元素循環 マレーシア 熱帯低地林

## 1. 研究開始当初の背景

ケイ素 (silicon, Si) ケイ素 (Si) は土壌や地殻に最も多い元素の一つだが、植物に利用できる形での存在量は限られている。Si は生長に不可欠な必須元素ではないが、イネ等の作物種の研究では植物の重金属や病気などによるストレスを軽減する有益元素として知られる。しかし、野生植物による Si 利用の生態学的な重要性が世界的に認識され始めたのはごく最近であり、これに関する先行研究のほとんどは温帯域で行われてきた。Si は中性のオルト珪酸 ( $H_4SiO_4$ ) として 0.1-0.6 mM ほどの低い濃度で土壤水に溶解する。土壤風化、つまり粘土鉱物から Si が土壤水に溶出して失われ陽イオン交換容量 (CEC) が低下する過程は、高温多湿の低地湿潤熱帯林域では早く進み、自然林を耕作地に転換すると酸性化やアルミニウム毒性などの悪影響がやすい。しかし、自然林の樹種はそのような土壤でも持続的生態系を維持する。そこ病害虫や過剰風化土壤によるストレスの大きい熱帯では Si が植物の生存生長に特に有利である可能性があり、植物を介した Si 循環の研究は熱帯林域生態系の持続的利用に有益な知見をもたらすと考えた。

## 2. 研究の目的

植物種の多様性が非常に高い半島マレーシアとボルネオ島において土壤風化度が異なる複数のサイトを選び、土壤の Si 供給度と葉やリターの  $SiO_2$  濃度を定量比較して、熱帯林生態系での植物を介した Si 循環研究を開拓することを目的とした。

## 3. 研究の方法

(1) 調査地：ボルネオ島のキナバル山では堆積岩と超塩基岩の2つの母岩から由来した土壤のそれぞれにおいて4つの高度(海拔700, 1700, 2700, 3100 m)に設置された各1haの調査区、合計8つを調査地とした。さらに低地林の調査地として、海拔100 mの半島マレーシアのパソ研究林にある6haの調査区も加えた。

(2) 研究試料：これらの研究地では、すでに別の目的(森林の生産の時間変動の長期調査)のためにリタートラップが設定されており、ここで採集された葉のリターを調査区レベルでまとめた。生葉サンプルは、それぞれの調査区において、合計で胸高断面積合計の70%をしめる優占樹種を選んで採取した。土壤はA層上部10 cmから採取し、風乾燥した。

(3) ケイ素含量の測定：生葉とリターのサンプルは乾燥粉末化したのちに、アルカリ溶液(1%炭酸ナトリウム溶液、85°C)で

ケイ素を抽出し、モリブデンブルー法で定量化した。土壤を風乾後、2 mm の篩にかけ均一化した後、5 g あたり脱イオン水 20 ml を加えて 18 時間振とうして、溶出してくるケイ素の濃度を測定した。これらの結果を種間やプロット間で比較した。

## 4. 研究成果

### (1) 生葉のケイ素濃度の比較

本研究では、半島マレーシアの低地湿潤熱帯林の樹種 86 種、および、ボルネオ島マレーシア・サバ州のキナバル山の下部から上部山地林までの標高4地点 x 2つの母岩タイプの8つの調査区からの合計100種の生葉をできるだけ樹冠上部から採取した。先行研究によると、葉のケイ素濃度が1%以上の場合は根における能動的なケイ素の吸収が行われていることが示唆される。今回調査した計186の樹種には、ケイ素を1%以上の濃度で葉に含有する種が新たにいくつも発見された(図1-3)。

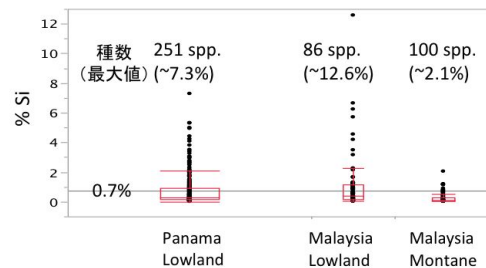


図1. 熱帯樹種437種の生葉のSi濃度(Si as % of dry mass, grand mean = 0.7%)のサイト間比較。新熱帯パナマ低地林と旧熱帯低地林にはイネなどの研究から能動輸送の指標とされる% Si が1%より高い樹種が多数出現する。一方、マレーシア山地林(700-2700 m)の葉のケイ素濃度は低地林よりも有意に低い( $P < 0.005$ , Wilcoxon Rank Test)。 (北島, Westbrook, Wright, 北山, 鈴木, 石澤, 中村ら, 未発表データ)

これまで、野生植物においては、植物オパール(非結晶含水ケイ酸体)の様々な形態を用いた過去の植生の推定や温帯植物の系統間でのSi蓄積量の違いなどが報告されている。これまでSi蓄積はイネ科の草本や竹などで高く、他の被子植物や裸子植物では低いと考えられてきた。しかし、図1-3に示される結果は、熱帯の真正双子葉類の樹種にはSiを高濃度で蓄積する種が存在する、というこれまでの常識を覆す発見である。興味深いことに温帯林と共通の科や属も優占する熱帯山地林ではSiを蓄積する樹種は少ない(図1、2)。このデータは、**熱帯低地林樹種は暖かい環境への適応戦略にSiを利用している可能性も示す。**

ケイ素高蓄積種は、低地林にもっとも多く存在し、標高700 mの下部山地林にもある程度は存在するが、標高がさらに高い山地林では、葉のケイ素濃度が高い種はほとんど存在しなかった(図2)。

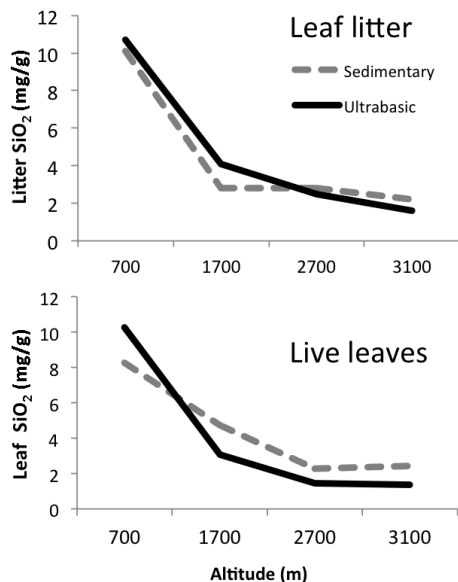


図2. ボルネオ島キナバル山の標高と母岩タイプの異なる森林調査区で集められた、リターと生葉のケイ素濃度 (mg SiO<sub>2</sub> per g dry mass) の群集レベルの平均値は、堆積岩 (Sedimentary) と超塩基岩 (Ultrabasic) のどちらにおいても標高とともに低下する。(北島, 北山, 鈴木, 石澤, 中村, 未発表データ).

Si を高濃度で集積するイネにおいては Si の能動輸送を行うトランスポーターが確認されており、水の蒸散による道管流と共に植物体地上部(シュート)に Si が運ばれるかどうかは、根の内皮の部分で主に制御されている。葉に運ばれた Si は葉肉細胞壁から水が蒸散し Si 濃度が過飽和するにつれオパール化し、この量は葉齢や蒸散量と比例して増加し続けるはずである。そこで、Si の蓄積量から、Si を「能動的に蓄積」、「受動的に蓄積」、または「能動的に排他している」と解釈できる3つのグループに植物種を便宜的に分けることもある。真正双子葉植物では Moraceae, Urticaceae, Burseraceae などの科は Si を高～中濃度で蓄積する種が多く、これらの種においては根においてケイ素を能動的に吸収していると考えられる。また、東南アジアの低地熱帯林を優占する Dipterocarpaceae においては種間変異も大きいという新たな知見が得られている (図3)。

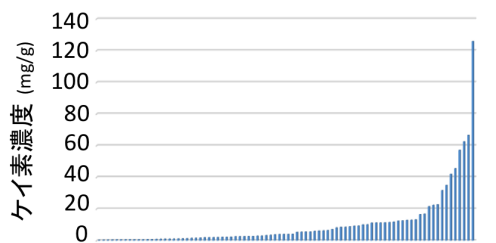


図3: 半島マレーシア、パソ研究林の主要樹種86の生葉サンプルのケイ素濃度

(2) 葉リターサンプルのケイ素濃度  
キナバル山の長期リターモニタリングにおいて、異なる3つの時期(1997.4, 1998, 1998.8)に採集・保存されたサンプルの

ケイ素濃度を解析した結果(図2)は、調査区において優先する樹種の生葉サンプルのケイ素濃度を反映して、標高が上がるとともに、葉リターのケイ素濃度が低下することを示した。一方、半島マレーシアの低地林(標高100m)ではリターのケイ素濃度(24 mg SiO<sub>2</sub>/g leaf dry mass)はキナバル山(標高700m)においても10 mg/g程度)と比べてはるかに高かった。

図2の結果は、リターのケイ素濃度の違いは植物生葉のケイ素濃度の種間差を反映することをよく示す。さらに、この結果は、土壌への植物を介してのケイ素循環は、標高とともに植物の群集組成が変わるにつれ、小さくなることを示唆する。興味深いことに、ケイ素含量がもともと少ない超塩基岩由来の土壌と、ケイ素を多く含む堆積岩由来の土壌の間には、植物の生葉とリターのどちらにおいても、有意な違いがなかった(図2)。すなわち、植物体のケイ素含量は、植物の根における生理学的制御の仕組みを反映し、母岩や土壌風化の影響は無視できるほど小さい、という興味深い結果が得られた。

以上の結果は植物オパールとして葉に蓄積された SiO<sub>2</sub> が、落葉と共に土壌にもどり、これから土壌水に溶出する Si は土壌水と粘土鉱物の間の溶解平衡に影響を与えると考えられる。

### (3) 土壌のケイ素可給性

A層上部から採取された土壌のケイ素可給性については、標高や母岩の影響ははっきりせず、土壌の化学風化が進行してケイ素が極度に溶脱しているはずの低地林と気候が涼しく風化が遅い山地林の間にも、また、ケイ素含量が異なる対照的な母岩から成立した土壌の間にも一貫した違いは見られなかった。このことは、土壌上部のケイ素濃度は、単純な土壌学の理論からは説明できないことを示し、植物リターから溶け出すケイ素が風化に拮抗している可能性を示唆する。

### (4) 総合的考察

Si をあまり蓄積しないブナ科広葉樹や針葉樹が優占する温帯林では、集水域レベルでの Si 循環研究が近年報告され始めた。本研究の結果は、Si の中・高蓄積種が多い低地熱帯林では、植物を介しての Si 循環は温帯林よりも格段に大きいことを示唆する。実際、アマゾン低地林の土壌コラム内の土壌の2次鉱物の垂直分布は、植物由来の Si を考慮しないと理解できないとも議論されている。しかし、これまでの研究では、ケイ素の吸収と蓄積の違いを熱帯林樹種の生理生態学的な違いとして調査することがなかった。本研究は、熱帯林低地林の優先樹種間にケイ素集積におい

て大きな違いがあり、また、このような植物の機能形質の違いが生態系レベルでのケイ素循環の違いをもたらす、という重要な知見を世界で初めて示したといえる。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計6件)

北島薫 「熱帯の双子葉植物によるケイ素利用について」第24回日本熱帯生態学会、栃木県・宇都宮市 (2014.6)

石沢秀弘、新山馨、飯田佳子、Abdul Rahman, Azizi Ripin、北島薫 「熱帯低地フタバガキ林において樹種分布がケイ素循環に及ぼす影響の空間的解析」第62回日本生態学会、鹿児島県・鹿児島市 (2015.3)

Kitajima K. and Ewel J. J. "Silicon cycling via leaf litterfall in experimental tropical forest stands" Association for Tropical Biology and Conservation, Honolulu, Hawaii, USA. (2015.7)

Nakamura R, Ishizawa H, Kajino H, Suzuki S, Kitayama K, Kitajima K, Wagai R. "Variation in ecosystem silicon cycling via plants with elevation and bedrock on Mount Kinabalu, Sabah, Malaysia." 第63回日本生態学会、宮城県・仙台市 (2016.3)

Kitajima K. "Latitudinal and altitudinal of silicon accumulation by forest trees: the potential importance of plants in silicon cycling in lowland tropical forests." 第63回日本生態学会、宮城県・仙台市 (2016.3)

梶野浩史、北島薫 「温帯広葉樹の葉内における部位ごとのケイ素分布とその種間差」第63回日本生態学会、宮城県・仙台市 (2016.3)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計0件)

取得状況 (計0件)

〔その他〕

ホームページ等 (計1件)

<http://tropfor.net>

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

北島 薫 (KITAJIMA KAORU)

京都大学・農学研究科・教授

研究者番号：40721379

##### (2) 研究分担者

北山 兼弘 (KITAYAMA KANEHIRO)

京都大学・農学研究科・教授

研究者番号：20324684