

課題名 D-1001 野草類の土壤環境に対する生育適性の評価と再生技術の開発

課題代表者名 平舘 俊太郎（独立行政法人農業環境技術研究所 生物多様性研究領域
上席研究員）

研究実施期間 平成22～24年度

累計予算額 50,499千円（うち24年度14,162千円）
予算額は、間接経費を含む。

本研究のキーワード 外来植物、植物栄養学的特性、生物多様性、草原生植物、置換酸度、土壤中有効態リン酸、土壌pH、半自然草原、分布特性、蔓延リスク、下程度）

研究体制

- (1) 野草類の分布と土壌の化学的特性の関係解明（（独）農業環境技術研究所）
- (2) 野草類に含まれる無機栄養元素組成の解明（（独）農業環境技術研究所）
- (3) アーカイブ植物試料に含まれる無機栄養元素組成の解明と過去の土壌環境推定（（独）農業環境技術研究所）
- (4) 野草類の土壌環境適性の解明と再生技術の開発（（独）農業環境技術研究所）

研究協力機関

なし

研究概要

1. はじめに（研究背景等）

かつて日本の国土面積の約20%を占めていた半自然草原（刈り取りや野焼き等の伝統的な人為活動の関与によって維持されてきた草原）は、高度経済成長期以降急速に減少し、現在では国土面積の約2%程度にまで減少している。これは、化石燃料の利用が進んだため動力源としての家畜の需要が減少したこと、畜産の形態が大きく変化し外国から輸入する家畜飼料の利用が進んだことにより従来の野草利用型の畜産が衰退したこと、プラスチック製品等の普及に伴い生活必需品としての草木の需要が減少したこと、化学肥料の普及に伴い肥料成分の持ち出しを目的とした草原の刈り取りが行われなくなったことなど、日本での草原の利用が激減したことによるところが大きい。その結果、多くの草原依存性の生物群が絶滅の危機に瀕しており、とくに植物は多くの種がレッドリストに掲載されている。

現在、これら希少な野草類を保全・再生するために、多くの自然再生事業が試みられているが、必ずしも成功するケースばかりではない。たとえば、単に木本植物や灌木類を伐採しただけでは目的の野草類は再生されず荒地となったケースや外来植物が蔓延したケースなどが報告されている。このことは、植物の生育や定着を左右する要因として、気候・気象要因や種子散布要因以外にも他の要因が深く関与していることを示唆している。

このような状況のもと、課題代表者らは、植物の生育や分布におよぼす土壌環境の影響についてはまだ十分な調査が行われていないことに注目し、北関東において植物の分布と土壌の化学的特性の関係について調査を行った。その結果、野草類を含む多くの植物は、それぞれの生育に適した土壌の化学的特性を持つことが明らかになった。とくに、土壌pHと土壌中有効態リン酸は、多くの植物の分布に大きな影響を及ぼす非常に重要な要因であることが明らかとなった。このことは、ある植物を保全しようとした場合、その植物の保全に適した土壌環境を明らかにし、このような環境を整える必要があることを意味している。しかし、植物の生育と土壌環境との関係に関しては、栽培植物については多くの知見があるものの、野草類についてはほとんど調べられていない。また、野草類の植物栄養学的特性に関しても、これまでに研究された事例は非常に限られている。このため、日本において野草類の保全に適した土壌環境を整備する場合には、まず植物の分布と土壌の化学的特性の関係を明らかにするとともに、その基礎となる植物栄養学的知見も明らかにする必要がある。このような知見が収集されれば、土壌環境を制御することによって在来野草類を保全する技術の開発に道が開かれるものと期待される。

2. 研究開発目的

植物は、それぞれ種ごとに独特の無機元素要求性、無機元素耐性、および無機元素吸収特性を持っており、それに伴って土壌に対する適性も異なっている。本研究課題では、わが国における分布の縮小傾向が著しい在来野草類を主な対象として、これらの植物の種ごとに異なる特性を利用し、これら野草類の保全に適した草原を再生する技術を開発することを目的としている。本研究課題は、サブテーマ(1)～(4)で構成されており、サブテーマ(1)～(3)が野草類の植物栄養学的あるいは土壌肥料的な基本的特性を明らかにするための研究であり、サブテーマ(4)がこれら基本的特性を応用した野草類の保全技術の開発のための研究である。各サブテーマの具体的な目的は下記の通り。

サブテーマ(1): 野草類の分布と土壌の化学的特性の関係解明

野草類が現在の日本においてどのような土壌環境に分布しているのかを種ごとに明らかにする。

サブテーマ(2): 野草類に含まれる無機栄養元素組成の解明

植物体内における窒素、リン、カリウム、カルシウム、マグネシウムといった無機栄養元素の濃度を明らかにし、植物が種ごとに持つ植物栄養学的特性を明らかにする。これによって、その植物種が適応している土壌環境が推定可能になるとともに、サブテーマ(1)で得られた情報を科学的データに基づいて補強する。

サブテーマ(3): アーカイブ植物試料に含まれる無機栄養元素組成の解明と過去の土壌環境推定

野草類の植物体内における無機栄養元素濃度から、その植物が生育していた当時の土壌環境を推定する手法を開発する。これによって、かつての草原で採取され博物館等で保管されているアーカイブ試料を分析することにより、かつて在来野草類が無理なく保全されていた当時における土壌の化学的特性を明らかにする手段を提供する。

サブテーマ(4): 野草類の土壌環境適性の解明と再生技術の開発

サブテーマ(1)～(3)で得られた知見をもとに、土壌環境を制御することにより植生を制御する手法を開発し、在来野草類の保全に資する。また、本研究課題全体を通して得られた知見を広く一般に公開する。

以上、サブテーマ(1)～(4)を通して、野草類の保全のために必要な基礎的知見を蓄積するとともに、野草類を保全するための技術を開発する。これらの研究成果を通じて、生物多様性の保全や生態系サービスの確保に資する。

3. 研究開発の方法

(1) 野草類の分布と土壌の化学的特性の関係解明

日本各地において草原植生が成立している場所として、半自然草原、牧草地(改良草地)、耕作放棄地、畦畔などをとりあげ、野外植生調査を実施するとともに、その植生調査地から土壌を採取してその化学的特性を明らかにした。得られたデータを解析することにより、個々の植物種の分布と土壌の化学的特性との関係を明らかにした。本サブテーマでは、できるだけ多くの事例を調査する必要があるが、ここでは全国の10地区以上において合計500地点以上の調査を実施することを目標に掲げた。

植生調査は、調査地点に1m×1mのコドラート枠を設置し、その中に出現した全ての種を同定するとともに、それぞれの被度を目視により判定した。

土壌は、表層から深さ5cmまでの層位を正確に採取し、風乾後、土壌pH(H₂O)、土壌pH(KCl)、土壌pH(NaF)、電気伝導度、置換酸度、有効態リン酸、全炭素含量および全窒素含量を測定した。

(2) 野草類に含まれる無機栄養元素組成の解明

サブテーマ(1)の調査地点にて植物を採取し、これに含まれる無機栄養元素の濃度を明らかにした。このデータを植物種ごとに解析し、無機植物栄養元素に対する各植物種の要求性としてとりまとめた。本サブテーマでは、できるだけ多くの事例を調査する必要があるが、ここでは全国から5000点以上の植物試料を採取し、これを分析して情報を得ることを目標に掲げた。

採取した植物試料は、60℃の通風乾燥機内で乾燥させた後、葉部を約1g採取し、微粉碎した。微粉碎試料に含まれる炭素(C)およびN濃度は、燃焼式のNCアナライザーにより分析した。微粉碎試料中のK、Ca、Mg、P、B、Fe、Mn、Zn、Cu、Ni、Mo、Al、Cd、Co、Cr、Na、Pb、Snの濃度は、試料を硝酸一過酸化水素により湿式分解後、誘導結合プラズマ発光分光より分析した。

(3) アーカイブ植物試料に含まれる無機栄養元素組成の解明と過去の土壌環境推定

サブテーマ(1)で得られた土壌の化学的特性に関するデータとサブテーマ(2)で得られた植物に含まれる無機栄養元素濃度のデータを、植物種ごとに解析し、現代において生育している植物について体内無機元素濃度と土壌の化学的特性の関係を解析した。この中で両者の関係性が強い組み合わせを選抜し、この関係性をもとに、過去において採取された植物標本試料の化学分析による過去の土壌の化学的特性の推定手法を開発した。ま

た、実際に博物館に保管されていたアーカイブ試料を入手し、これらの植物が生育していた土壌の化学的特性を推定するとともに、その妥当性を検証した。

(4) 野草類の土壌環境適性の解明と再生技術の開発

土壌の化学的特性を制御することによって在来野草類を保全するための手法として、資材処理による手法と伝統的管理による手法の2つを検討した。資材処理による手法の検討では、塩化アルミニウム六水和物を野外試験地の土壌表面に処理し、これによって在来野草類の保全に適した土壌の化学的特性に誘導する手法を検討した。野外試験地は、山口県山口市の果樹園放棄地、茨城県牛久市の畑作放棄地、兵庫県神戸市の法面緑化地の3か所であり、試験開始前はいずれも外来植物であるセイタカアワダチソウが蔓延していた。塩化アルミニウム六水和物の処理量は、土壌表面～深さ5cmあるいは土壌表面～深さ10cmの範囲の土層が置換酸度で10～12 meq kg⁻¹となる量とし、処理後は定期的に植生調査を実施した。また、伝統的管理による手法の検討では、熊本県阿蘇市の草原を対象に、同一牧野内で管理手法が異なる地点を複数選び、その場所における土壌の化学的特性を調査することによって、刈り取り&持ち出し、野焼き、放牧が土壌の化学特性におよぼす効果を調査した。

また、サブテーマ(1)～(4)で得られた知見を広く一般に公開するため、学会活動、公開シンポジウム、プレスリリース、インターネットなどを活用した。

4. 結果及び考察

(1) 野草類の分布と土壌の化学的特性の関係解明

当初の目標は全国の10地区以上において合計500地点以上の調査を実施することであったのに対し、本研究ではこれを大幅に超える全国の14地区において1500地点の調査を実施することができた。出現した主な草原植生タイプは、ススキ型(半自然草原タイプ)、シバ型(半自然草原タイプ)、チガヤ型(半自然草原タイプ)、畦畔型(半自然草原タイプ、人工改変タイプ)、改良草地型(人工改変タイプ)、放棄草地型(人工改変タイプ)、風衝草地型(自然草原タイプ)であり、日本に見られる主な草原植生タイプをほぼ網羅した。

調査の結果、ススキ、ヨモギ、ゲンノショウコ、ヤブマメといった日本の草原に広く分布する在来植物は、土壌酸性や土壌中有効態リン酸に対する適応幅が広いことが明らかになった。また、日本の典型的な半自然草原に出現する在来野草類であるオミナエシ、ミツバツチグリ、シラヤマギク、キジムシロといった植物は、強い土壌酸性に対しても適応しており、かつ土壌中の植物有効態リン酸に対する要求性は非常に低い傾向があることが明らかとなった。このことから、オミナエシ、ミツバツチグリ、シラヤマギク、キジムシロといった在来野草類を保全するためには、これらの植物種の生育に適した土壌の化学的特性(土壌酸性が高く土壌中有効態リン酸が低い状態)を保持することが重要であると考えられた。一方、日本の草原植生に出現する外来植物であるセイタカアワダチソウ、シロツメクサ、オオアワガエリといった植物は、土壌中有効態リン酸に対する要求性は高いレベルにあり、かつ土壌酸性に対する耐性をほとんど持たないと考えられ、弱酸性～中性領域の土壌に出現する傾向が強かった。ただし、外来植物の中には、ハルガヤのように、土壌中有効態リン酸に対する要求性は高いレベルにあるものの、強い土壌酸性に対して耐性を持っているものもあることが明らかになった。このように、日本に分布している主な草原生植物について、その生育・分布環境を土壌の化学的特性の面から明らかにし、その特徴の違いを植物種ごとに明確に示したのは、本研究が初めてである。

(2) 野草類に含まれる無機栄養元素組成の解明

当初の目標は全国から5000点以上の植物試料を採取することであったのに対し、本研究ではこれを大幅に超える13101点の植物試料を採取できた。これらに含まれる無機栄養元素組成を調査し植物種ごとに解析した結果、多くの野草類について植物体内における無機栄養元素に対する要求性が明らかとなった。

たとえば、日本の草原植生に広く分布する在来植物の中では、富栄養的環境あるいは攪乱環境により適応している順に、ゲンノショウコ>ヨモギ>ヤブマメ>ススキ、であることが明らかになった。この順序は、耕作放棄地や攪乱環境から半自然草原への推移の中で出現する植物種とほぼ一致していると思われる。このことは、土壌特性が植物の分布に対して大きな影響をおよぼしていることを強く示唆するものであると同時に、土壌環境制御によって出現する植物種を制御できる可能性を示唆していると考えられた。

また、日本の典型的な半自然草原に出現する在来野草類であるオミナエシ、ミツバツチグリ、シラヤマギク、キジムシロなどについては、いずれも植物体中P濃度が低いことが明らかとなった。これは、これらの植物はPを植物体内において効率的に利用できるメカニズムを持っているためと考えられ、これによって土壌中有効態リン酸が低い環境でも生育可能となっていると考えられた。また、これらの植物は、土壌酸性が強い環境でも通常の生育ができるよう、土壌中においてCa, K, Mgといった塩基類が比較的限られた環境中においても、これらの塩基類を植物体内に吸収できるメカニズムを持っていると考えられた。

また、日本の草原植生に出現する外来植物であるセイタカアワダチソウとシロツメクサは、いずれも植物体中におけるN, P, Ca, K, Mg濃度は高く、これらの無機栄養元素に対する要求性は高いことが明らかになった。また、オオアワガエリやハルガヤも、植物体中P濃度は高い傾向にあることが明らかとなった。これらは、いずれも富栄養的な環境に選択的に分布すると考えられた。

本研究により、植物が種ごとに土壤環境に対する分布特性が異なるのは、植物種ごとに体内の無機元素要求性が異なることが一因であることが示された。このように、植物の分布状況や植物の栄養特性および生理特性が密接に関係していることを具体的に示したのは、本研究が初めてである。このことは、植物の栄養特性あるいは生理特性は、土壤の化学的特性を介して、その植物の分布に影響を及ぼしていることを示している。

(3)アーカイブ植物試料に含まれる無機栄養元素組成の解明と過去の土壤環境推定

オミナエシは、その植物体が生育した土壤の化学的特性が植物体内無機元素組成としてよく保存されており、植物体中Ca濃度-土壤pH(H₂O)、植物体中Ca濃度-土壤pH(KCl)、植物体中K濃度-土壤pH(H₂O)、植物体中K濃度-土壤pH(KCl)、植物体中K/Ca比-土壤pH(H₂O)、植物体中K/Ca比-土壤pH(KCl)、植物体中Ca濃度-置換酸度、植物体中K濃度-置換酸度、植物体中K/Ca-置換酸度、植物体中P濃度-土壤中有効態リン酸の関係において決定係数R²が高かった。すなわち、オミナエシ植物標本は過去の土壤の化学的特性を知る貴重な資料となりうるということが明らかになった。また、オミナエシ以外にも、ヤブマメ、ゲンノショウコ、ミツバツチグリ、ヤマハギ、トダシバ、ススキといった植物で、体内無機元素組成と土壤の化学的特性の間に高い相関関係が認められた。これらの植物種も、過去の土壤の化学的特性を知る資料になりうると考えられた。

また、本研究では、実際に博物館に保管されていたアーカイブ試料として、オミナエシ、ヤブマメ、ススキを入手し、これらに含まれる無機元素濃度を化学分析によって調べることににより、これらの植物が生育していた当時の土壤の化学的特性を推定するとともに、その推定結果の妥当性を検証した。その結果、いずれの植物体についても、本研究手法による推定結果は妥当であることが示され、この手法の有用性が示された。

(4)野草類の土壤環境適性の解明と再生技術の開発

資材処理によって土壤の化学的特性を制御し、これによって在来野草類を保全するための手法を野外試験にて検討した。その結果、山口県山口市の果樹園放棄地における野外試験では、塩化アルミニウム処理によってセイタカアワダチソウが3年間以上の長期間にわたって低い被度の状態に抑えられると同時に、在来植物を中心とした植生が維持されることが明らかになった。除草剤によってもセイタカアワダチソウの抑制や防除は可能であるが、除草剤による防除では在来植物を安定的に定着させることは困難であると考えられる。これに対して、本研究によって開発された塩化アルミニウムを処理する手法では、3年間以上の長期間にわたってセイタカアワダチソウを抑えつつ、在来植物が優占する群落に誘導できるため、大きなメリットがあり、優れた点であると考えられた。茨城県牛久市の畑作放棄地および兵庫県神戸市の法面緑化地における野外試験では、セイタカアワダチソウを抑える効果は確認できたが、その効果は2～3年は山口県山口市の果樹園放棄地における野外試験よりも低いと考えられた。これは、その場所に分布する土壤の特性や、周辺環境から供給される野草類の種子の種類や量などの影響と考えられた。このため、塩化アルミニウム処理によって植生を制御しようとする場合には、その場所の土壤特性や周囲の植生を十分に把握することは非常に重要であると考えられた。なお、土壤に対する塩化アルミニウム処理は、リン酸肥料や石灰の施用によって富栄養化・弱酸性化した土壤をもとの状態に戻すための資材として提案されたものである。塩化アルミニウム処理が植生制御に有効であることが明らかになったが、このことは草原やその周辺の環境が富栄養化・弱酸性化していることも意味している。このため、塩化アルミニウム処理に期待するのも1つの方法ではあるが、土壤環境が不必要に富栄養化・弱酸性化されていないか、あるいは土壤環境が富栄養化・弱酸性化される原因をつきとめ、そこを改善することも重要であると考えられた。

伝統的管理手法によって土壤の化学的特性を制御する効果を調査した結果、伝統的な管理手法はいずれも草原土壤を貧栄養的な環境に誘導する性質が強いと考えられ、その効果は、刈り取り&持ち出し>放牧>野焼き、の順であると考えられた。また、刈り取り&持ち出しおよび放牧は土壤を酸性化させ、その効果は、刈り取り&持ち出し>放牧、の順であると考えられた。野焼きは土壤pHを上昇させる効果があるものの、CaやKといったアルカリ分を供給するものではないため、長期的に見れば、CaやKといったアルカリ分の土壤からの溶脱や刈り取りによる持ち出しを助長することにより、貧栄養化を促していると考えられた。本研究により、伝統的な草原の管理手法は、草原における植物栄養元素の動態から見れば、激しく収奪的であることがわかった。そして、このような環境に適応しながら生き延びてきたのが多くの在来野草類であると考えられた。

また、刈り取り&持ち出しによって変化する土壤の化学的特性を予測する手法を提示した。これによると、改良草地として利用された履歴をもつ草原を従来型の半自然草原の土壤環境に戻そうとした場合、刈り取り&持ち出しだけによって実施しようとした場合、多くのケースで数十年以上かかると推定された。このため、土壤環境を迅速にもとの状態に戻すためには、塩化アルミニウム処理による手法も検討する価値があると考えられた。本

研究では、土壌の化学的特性を制御する手法として、塩化アルミニウム処理による手法と伝統的管理による手法について、長所と短所をまとめ、利用しやすいように整理した。

また、サブテーマ(1)～(4)で得られた知見を広く一般に公開するため、各種学会活動により成果を公表するとともに、公開シンポジウム、プレスリリース、インターネットなどを積極的に活用した。

5. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

本研究では、日本の草原において生育している多くの野草類について、それぞれの種ごとに分布しやすい土壌の化学的特性が明らかにされた。これまでは、植物の分布におよぼす土壌の化学的特性の影響は十分に理解されておらず、植物の分布は、気候や水分環境といった環境因子に加えて、種子や栄養繁殖器官の分布拡大過程に強く依存していると考えられてきた。しかし、これだけでは説明できない現象が多数存在している。たとえば、一つの狭い地域内において気候や水分環境といった環境因子はほとんど同一であるにもかかわらず、複数の植生群落タイプが成立しており、しかもその植生群落タイプは毎年ほとんど変化がみられない場合などが挙げられる。このようなケースには、土壌の化学的特性がそこに成立している植生の群落タイプに大きな影響を及ぼしている可能性が考えられる。本研究による調査でも、通常、一つの狭い地域内において複数の植物群落タイプが出現していたが、それぞれの植物群落タイプが出現する場所の土壌は、その化学的特性において特徴があることが明らかになっている。このように、本研究によって明らかにされた知見は、今後、植物の生育や分布を理解し予測するうえで、非常に役立つ有意義なものであると考えられる。

また、本研究では、多くの野草類について、種ごとに植物栄養学的特性(無機栄養元素要求性)が明らかにされた。また、野草類の分布特性が種ごとに土壌環境に依存して異なるのは、植物種ごとに異なる植物栄養学的特性を持っていることが一因であることが示された。このように、植物の栄養学的特性は、土壌の化学的特性を介して、その植物の分布に影響を及ぼしていることが、本研究によって初めて明らかにされた。たとえば、多くの外来植物は無機栄養元素に対する体内要求性が高いため富栄養的な土壌環境で蔓延しやすいこと、一方の多くの半自然草原に典型的な在来植物はとくにPに関して体内要求性が低く、そのためPに関して貧栄養的な土壌環境でも分布できることが示された。実際、多くの半自然草原の土壌はP栄養に関して貧栄養的であり、そういった環境においてオミナエシ、ミツバツチグリ、シラヤマギク、キジムシロといった植物が保全されていることも示された。このことから、これらの植物を保全するためには、土壌を貧栄養的な状態に保つことが重要であると考えられた。このように、本研究は、植物の分布メカニズムの一端を解明しており、学問的にも実用的にも大きく進歩に貢献すると考えられた。また、今後これらの知見をもとに、植物の低栄養元素濃度耐性や強土壌酸性耐性などのメカニズム解明が進むものと期待される。これらの知見は、栽培植物に対する低栄養元素耐性や強土壌酸性耐性の付与といった応用が期待される。また、本研究で得られた知見は、それぞれの植物の進化プロセス研究にも寄与することが期待される。

また、本研究では、オミナエシ、ヤブマメ、ゲンノショウコ、ミツバツチグリ、ヤマハギ、トダシバ、ススキといった植物における体内無機元素組成を明らかにすれば、それらの植物が生育した過去の土壌の化学的特性を知る資料になりうるということが明らかにされた。このことを利用すれば、過去において在来野草類が無理なく保全されていた時代における土壌の化学的特性を推定することができると考えられる。このように、植物体内に含まれる元素濃度からその植物が生育していた土壌環境を推定する手法は、これまでほとんど例がない。これは、植物体中無機元素組成と土壌特性の関係を広範に調査する必要があること、生態学、土壌学、分析科学など多方面にわたる広い知識と経験が必要であること、また膨大な時間と労力と研究資金が必要であるためと考えられる。本研究では、植物種ごとに分布しやすい土壌特性、植物栄養学的特性、植物体内の元素組成など膨大なデータが入手できたことによって本研究成果につながった。本研究成果は、本研究のみならず、多くの分野で利用されることが期待される。このように、本研究はこの分野の研究の可能性を切りひらき、科学的な進歩に大きく貢献すると期待される。

また、本研究では、サブテーマ(1)～(3)で得られた基礎的知見をもとに、土壌の化学的特性を制御することによって植生を制御する技術を開発した。塩化アルミニウム資材を土壌表面に処理する手法では、土壌の化学的特性を制御することによって植生を制御可能であることが実証された。これまでは、植物の分布や遷移は、植物のサイズや成長速度といった生態的特性に大きく依存していると理解されていたが、本研究により土壌の化学的特性も非常に大きな要因であることが実証された。とくに、セイタカアワダチソウは個体サイズも大きく成長速度も速いため、チガヤのような個体サイズも小さく成長速度の遅い植物によって押し退けられることはないと考えるのが一般的であった。しかし、本研究によって、土壌酸性を強めた場所だけでセイタカアワダチソウが衰退しチガヤの群落となった事例が明確に示され、これを発表した関連学会では大きな話題となった。本研究が端緒となり、植物の分布や遷移におよぼす土壌の化学的特性の影響に関する研究がより進展することが期待される。このように、本研究は科学的な進歩に大きく貢献したと考えられる。

また、土壌の化学的特性を制御するための手法として、伝統的な草原の管理手法の効果を明らかにした。また、土壌環境を貧栄養的かつ土壌酸性が強い状態に保つために最も効果的である刈り取り&持ち出しについて、この手法が草原再生の場面で適用された際、その土壌の化学的特性におよぼす影響を定量的に見積もる方法が示された。これまで、草原の管理方法が土壌の化学的特性におよぼす影響に関しては、実測値に基づいた報告は非常に少なかった。本研究では、実在する草原にて調査を実施するとともに、土壌の化学分析に基づいて伝統的な草原の管理手法の効果を見積もった。これらの実測データや研究成果は、今後、多くの研究や実用場面で利用されることが期待される。

以上、本研究を通じて初めて明らかになった新知見が多数あり、これらは野草類の保全のための基礎的知見として重要であるとともに、斬新な視点から科学的な進歩に大きく貢献したと考えられる。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

本研究により得られた研究成果は、プレスリリースや学会発表等によって積極的に周知したこともあり、全国各地の外来植物が蔓延する現場から「セイトカアワダチソウの蔓延防止に協力してほしい」といった問い合わせが多数あった。これには行政からの問い合わせも含まれており、その中で下記の3つのケースについては、セイトカアワダチソウなどの外来植物が蔓延する現地を視察するとともに、現場の土壌を採取し、化学分析を行って、今後の管理手法に関して提案を行った。

- ① 国土交通省所轄の河川周囲の河岸および河川堤防
- ② 鹿児島県が所轄する道路法面
- ③ 福井県が所轄する河川周囲の河岸緑地公園内および河川堤防

この中で、①のケースは河川敷内の緑地公園などが対象であり、セイトカアワダチソウやヒメジョオンなどの外来植物が蔓延していた。また、調査対象地付近の水辺では、特定外来生物であるオオカワヂシャの生育も確認された。調査対象地の土壌は、粘土をほとんど含んでいない砂質土壌であり、養分を保持する能力に乏しいと考えられた。にもかかわらず、土壌中有効態リン酸は $20 \text{ mg P}_2\text{O}_5 / 100\text{g}^{-1}$ 前後であり、多くの外来植物が生育可能な範囲にあると考えられた。また、土壌pH(H_2O)も6.8～7.6と弱酸性～弱アルカリ性の範囲にあり、やはり多くの外来植物が生育可能な範囲内にあった。これは、河川水中に含まれる植物栄養分がこれらの土壌表面に到達するとともに、水分の蒸発に伴ってこれら植物栄養分が濃縮するためと考えられた。この河川の周辺や上流には農地が広がっており、これらの地域から植物栄養分が供給されている可能性が示唆された。このため、このような環境は外来植物が蔓延しやすい状態であることを行政側に説明するとともに、これらの植物を除去することも重要ではあるが、これらの植物が蔓延する原因となっている周辺環境からの植物栄養分の流入にも注意する必要があることを指摘した。以上の指摘を受けて、今後、これらの地域における外来植物の蔓延防止策を継続して検討することとなった。

上記の②のケースは、造成中あるいは造成後間もない道路法面(斜面)であり、セイトカアワダチソウが法面の大部分を覆い蔓延していた。この場所では、セイトカアワダチソウ以外にも、セイバンモロコシやハルジオンといった外来植物が生育している一方で、チガヤやススキなどの在来植物も生育が確認された。調査対象地の土壌は、新しい火山灰の影響を受けたものであり、ある程度粘土も含まれていた。土壌pH(H_2O)は6.3～7.1と弱酸性～弱アルカリ性の範囲にあり、また土壌中有効態リン酸は $5 \sim 36 \text{ mg P}_2\text{O}_5 / 100\text{g}^{-1}$ の範囲内にあった。このことから、今後、定期的な刈取りなどを実施するなど、貧栄養的な管理を継続的に続けることによって、セイトカアワダチソウを衰退させることができる可能性があることを、行政側に報告した。また、同時に、セイトカアワダチソウの抑制および在来植物による植生管理を早期に実施したい場合には、サブテーマ(4)で得られた研究成果である塩化アルミニウム処理の可能性を報告した。また、現地から土壌サンプルを採取し、化学分析を実施するとともに、その分析結果をもとに、塩化アルミニウム処理設計試案をたて、1つのオプションとして示した。この報告を受けて、行政側では、道路法面において塩化アルミニウム処理による小規模植生制御試験を実施することを決め、2013年4月、本研究で提案した試験設計に従って実際に塩化アルミニウム処理試験が開始された。行政側では、今後、この小規模試験の推移をみながら、道路法面における植生管理手法を検討していくこととなった。また、本調査の過程においては、道路法面の造成および緑化の過程において、肥料成分や石灰資材が比較的多量に混入されていることも分かった。このことから、今後は法面緑化においてもできるだけ肥料成分や石灰資材の投入を減らすよう、行政側に対して提案を行った。

上記の③のケースは、河川敷内の緑地公園であり、セイトカアワダチソウ、オオマツヨイグサ、アカツメクサといった外来植物が蔓延していた。また、在来植物では、オギ、カスマグサ、スイセンなどが生育していた。これらの調査対象地の土壌は、やや砂を含む粘土質のものが大部分であり、土壌pH(H_2O)が6.2～7.1、土壌中有効態リン酸が $29 \sim 44 \text{ mg P}_2\text{O}_5 / 100\text{g}^{-1}$ と、いずれも高い範囲内にあった。これらの土壌特性から、現状の状態では外来植物が蔓延しやすい状態であることを行政側に報告した。また、同時に、今後定期的な刈取りを実施するなど貧栄

養的な管理を継続的に続けることによってセイタカアワダチソウを衰退させることができる可能性があること、およびセイタカアワダチソウの抑制および在来植物による植生管理を早期に実現したい場合には、サブテーマ(4)で得られている研究成果である塩化アルミニウム処理の可能性を報告した。この報告を受けて、行政側では、なぜ土壌中有効態リン酸が高い値となっているかを調査・検討するとともに、今後に向けてセイタカアワダチソウ対策をさらに継続検討することとなった。

以上、本研究は、着手後3年ほどであるにもかかわらず、多くの行政ニーズに対応し、その研究成果は多くの場面で活用されていると考えられる。

＜行政が活用することが見込まれる成果＞

本研究により得られた成果は、草原再生に向けてどのような土壌環境を目標に管理したらよいかを決定するうえで重要な情報を提供する。たとえば、オミナエシ、ミツバツチグリ、シラヤマギク、キジムシロといった日本の半自然草原に典型的に出現する在来野草類を保全しようとした場合には、土壌酸性が強く、かつ土壌中有効態リン酸が低い状態を維持することが有効であると考えられる。とくに、阿蘇くじゅう国立公園や大山隠岐国立公園のように、半自然草原が長期間維持されてきた場所では、土壌は酸性が強くかつ貧栄養的な状態で維持されてきたと考えられ、結果としてこのような状態の土壌に適応している植物が維持されてきたものと考えられる。そのため、これらの国立公園の中でも草原景観を従来からの状態で維持しようとした場合には、土壌酸性が強く、かつ貧栄養的な状態を維持することが重要であると考えられる。そのためには、これらの地域内に肥料成分や石灰資材をできるだけ持ち込まないように注意が必要であると考えられる。たとえば、道路造成の際の法面緑化工事においても、肥料成分や石灰資材の投入量は、十分検討の上、最小限にとどめる必要があると考えられる。

また、本研究により得られた知見は、草原の再生がどのような土壌環境において実現されやすいのかを予測したり、回復効果が高い場所を効率的に選定したりするうえでも重要な情報となる。すなわち、一度改良草地として利用した履歴がある草原は、土壌酸性が弱められており、また土壌中有効態リン酸も高まっている場所が多く、こういった場所では刈取り等によって草原植生を復元しようとしても、外来植物が蔓延しやすいため、草原再生が効果的に実現されにくいと考えられる。これに対して、改良草地として利用した履歴がなく、肥料成分や石灰資材の投入が行われていない場所では、土壌酸性や土壌中有効態リン酸は従来の半自然草原における値を保っている場合が多く、そのためこのような場所では刈取り&持ち出し等によって草原植生を試みれば、従来の半自然草原に典型的な在来植物が早期に戻ってくる可能性が高いと考えられる。このように、草原再生にあたっては、あらかじめ対象となる地域の土壌特性を調べておけば、草原再生が効果的に行われる場所を推定することが可能であると考えられる。

また、草原再生において障害となっている外来植物の蔓延についても、その防止策を講ずる上で重要なヒントを与えると考えられる。たとえば、要注意外来生物であるセイタカアワダチソウは、成長速度が早いこと、植物体が大型であること、刈取りに対する抵抗性が強いこと、除草剤などに対する抵抗性が強いこと、繁殖力が強いことなど、その頑強な生態的特性から防除困難であると理解されることが多かった。しかし、本研究により、そのセイタカアワダチソウも特定の環境を選んで蔓延している様子が明らかになった。とくに、セイタカアワダチソウは土壌酸性が強い環境では旺盛に生育することができず、蔓延しないものと考えられる。このため、セイタカアワダチソウは、道路法面やその周辺あるいは建物の周囲といった人為的に改変された環境に限って蔓延していることが多く、逆に従来からの土壌特性が維持されている場所では蔓延できない可能性があると考えられる。このように、外来植物が分布しやすい土壌環境とともに分布しにくい土壌環境についても情報を整理し、同時に国立公園等外来植物の蔓延を防止したい場所の土壌特性を調査することによって、蔓延防止策を講じる必要性が高い場合／低い場合が、植物種ごとに整理できる。たとえば、蒜山地域のようにもともと土壌酸性が強くかつ土壌中有効態リン酸が低い場所では、セイタカアワダチソウは大きな人為的なインパクトが加えられている場所以外ではほとんど蔓延できないと考えられる。これに対して、肥料成分や石灰資材が多量に投入されてきた履歴を持つ道路法面や耕作放棄地では、セイタカアワダチソウの格好の生育地となる危険性が高いと考えられる。また、これらの情報を整理することにより、これらの植物の蔓延を引き起こす人為的インパクトについても整理することが可能であると考えられる。たとえば、蒜山地域のようにもともと土壌酸性が強くかつ土壌中有効態リン酸が低い場所では、セイタカアワダチソウが蔓延するためにはリン酸資材および石灰資材の両方の投入が必要であると考えられる。一方、秋吉台地域のような石灰岩台地では、土壌は基岩である石灰岩の影響を受けて広く弱酸性化しているため、リン酸資材が加えられるだけでセイタカアワダチソウが蔓延できる条件が整うと考えられる。このように、本研究により得られた知見は、外来植物の蔓延防止策を講ずる上で、有用な知見を提供するものと考えられる。また、本研究により得られた知見は、外来植物の蔓延リスク評価を行ううえでも重要な情報を提供するものと考えられる。

上記以外にも、本研究により得られた成果は、富栄養化がもたらす悪影響の一端を明らかにしており、適正な物質循環と栄養塩管理の重要性を指摘していると考えられる。また、本研究から得られたデータをより詳細に解

析することにより、環境指標植物を選定することができると考えられる。

これらの研究成果は、公開シンポジウム、公開講演会、インターネット、学会活動、各種研究集会、保全活動にかかわる団体が主催するセミナーなどを通じて、今後さらに広く広報・普及に努める予定である。このように、本研究は今後も広く環境行政に貢献すると考えられる。

6. 研究成果の主な発表状況

(1) 主な誌上発表

<査読付き論文>

- 1) T. KOYANAGI, Y. KUSUMOTO, S. HIRADATE, S. MORITA, M. YOKOGAWA, Y. TAKAHASHI and C. SATO: *Applied Vegetation Science*, **16**, 95-109 (2013)
“New method for extracting plant indicators based on their adaptive responses to management practices: application to semi-natural and artificial grassland data”

<出願特許>

- 1) 平舘俊太郎、楠本良延、藤間 充、荒木陽子：独立行政法人農業環境技術研究所；「植生の制御方法」、特許出願（特願2011-044614），出願日：平成23年3月2日。

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 平舘俊太郎、楠本良延、吉武 啓、馬場友希：身近な自然の保全生態学、生物の多様性を知る（根本正之編著）、131-148，培風館（2010）
「土壌が支える生物多様性」
- 2) 和田信一郎、金田吉弘、鳥山和伸、安西徹郎、日笠裕治、小祝政明、後藤逸男、平舘俊太郎：日本土壌肥料学雑誌，82(2)，173-178（2011）
「土壌診断の現状と今後への挑戦：流派そろい踏み」
- 3) 平舘俊太郎、松永俊朗、和田信一郎、渡邊 彰：日本土壌肥料学雑誌，第82巻，部門別進歩総説特集号82，466-478（2011）
「第2部門 土壌化学・土壌鉱物」
- 4) 平舘俊太郎、楠本良延、森田沙綾香、小柳知代：植調、46，3，89-95（2012）
「環境制御による植生制御：外来植物であるセイタカアワダチソウの草原から在来植物であるチガヤの草原へ」
- 5) 平舘俊太郎、森田沙綾香、楠本良延：農環研ニュース、96，5-7（2012）
「セイタカアワダチソウの蔓延を防ぐ：土壌環境を考慮した新しい考え方」
- 6) 平舘俊太郎：農環研ニュース、96，10（2012）
「公開シンポジウム「阿蘇の草原に生きる植物と土壌」」

(2) 主な口頭発表

<学会等>

- 1) 平舘俊太郎：日本土壌肥料学会講演要旨集第56集、208，（2010）
「生物多様性と土壌診断」
- 2) 平舘俊太郎、白川勝信、森田沙綾香、小柳知代、中西亮介、楠本良延、太田陽子、大竹邦暁、佐久間智子、堤 道生、高橋佳孝：日本生態学会第58回全国大会、P1-023（2011）
「半自然草地における植物の分布と土壌特性の関係：広島県雲月山における放牧地と非放牧地の比較」
- 3) 森田沙綾香、平舘俊太郎、藤井義晴：日本雑草学会第50回講演会講演要旨、56(I)，103（2011）
「ネズミムギとオオアワガエリの土壌の化学的特性に対する生育反応」
- 4) 森田沙綾香、小柳知代、藤間 充、太田陽子、楠本良延、平舘俊太郎：日本雑草学会第50回講演会講演要旨、56(I)，158（2011）
「土壌環境制御による植生管理法の開発 第3報：山口県と茨城県で実施した土壌酸性化処理とそれにとまなう植生変化」
- 5) 平舘俊太郎、白川勝信、高橋佳孝、堤道生、太田陽子、井上雅仁、佐久間智子、千布拓生、森田沙綾香、小柳知代、楠本良延：日本土壌肥料学会講演要旨集第57集、149（2011）
「広島県北広島町千町原の半自然草地における植物の分布と土壌特性の関係」
- 6) 森田沙綾香、小柳知代、横川昌史、高橋佳孝、楠本良延、平舘俊太郎：日本土壌肥料学会講演要旨集第57集、106（2011）。

- 「阿蘇の草原における表層土壌の化学特性と管理手法の関係」
- 7) T. KOYANAGI, Y. KUSUMOTO, S. MORITA, S. HIRADATE, S. YAMAMOTO, S. OKUBO, K. TAKEUCHI:
The 8th World Congress of the International Association for Landscape Ecology, Beijing, China, 2011
“History of Satoyama landscapes: Empirical examples of the impacts of past landscape changes on the present grassland species distribution”
 - 8) Y. KUSUMOTO, T. KOYANAGI, S. MORITA, S. HIRADATE, K. SHIRAKAWA, M. INOUE, M. YOKOGAWA, T. CHIBU, Y. OHTA, M. TSUTSUMI, Y. TAKAHASHI, S. ISHIKAWA: 日本生態学会第59回全国大会、JP3-174J (2012).
“The relation between species diversity of semi-natural grassland and chemical property of soil in Shiozuka plateau, Japan.”
 - 9) 楠本良延: 日本生態学会第59回全国大会、T03-5 (2012)
「わが国における半自然草地の減少とその要因」
 - 10) 平舘俊太郎、森田沙綾香、小柳知代、楠本良延: 日本生態学会第59回全国大会、T03-5 (2012)
「土壌環境から考える二次草原の再生: わかってきた野草類の土壌環境適性」
 - 11) 森田沙綾香、小柳知代、楠本良延、平舘俊太郎: 日本生態学会第59回全国大会、D1-11 (2012)
「土壌の養分吸収特性がススキ、ヨモギ、セイタカアワダチソウの分布に及ぼす影響」
 - 12) T. KOYANAGI, S. HIRADATE, Y. KUSUMOTO, S. MORITA, M. YOKOGAWA, Y. TAKAHASHI: 日本生態学会第59回全国大会、I1-09 (2012).
“Effects of grassland management can be modified by soil pH differences: a case study of burned and mowed semi-natural grasslands in Aso, Japan”
 - 13) 森田沙綾香、楠本良延、小柳知代、横川昌史、高橋佳孝、伊藤豊彰、平舘俊太郎: 日本土壌肥料学会講演要旨集第58集、125 (2012).
「外来植物の分布に影響を及ぼす土壌特性の影響: アロフェン黒ぼく土と非アロフェン黒ぼく土の比較」
 - 14) 藤間 充、三浦雅史、泉 玄氣、平舘俊太郎、楠本良延、太田陽子、森田沙綾香、小柳知代: 日本土壌肥料学会講演要旨集第58集、146 (2012)
「土壌環境制御による植生管理法の開発: 第4報 土壌酸性化処理による土壌の理化学性の変化」
 - 15) 平舘俊太郎: 日本生態学会第60回全国大会 自由集会 (2013)
「土壌と植生の深いつながり」
 - 16) 小柳知代: 日本生態学会第60回全国大会 自由集会 (2013)
「草原生植物の分布と土壌の化学的特性の関係」
 - 17) 森田沙綾香: 日本生態学会第60回全国大会 自由集会 (2013)
「草原生植物に含まれる無機栄養元素組成の特徴」
 - 18) 平舘俊太郎: 日本生態学会第60回全国大会 自由集会 (2013)
「草原の管理法と土壌特性と植物の分布の関係」
 - 19) 楠本良延: 日本生態学会第60回全国大会 自由集会 (2013)
「土壌環境制御により植生をコントロールする: 草原再生手法の開発に向けて」
 - 20) 森田沙綾香、石田麻里、太田陽子、小柳知代、楠本良延、平舘俊太郎: 日本生態学会第60回全国大会、266 (P2-096) (2013)
「植物標本を用いた過去の土壌環境の推定: ヤブマメとオミナエシを用いて」

<シンポジウム、セミナー等の開催(主催のもの)>

- 1) 平舘俊太郎、楠本良延、森田沙綾香、小柳知代: 公開シンポジウム開催、平成24年6月2日、国立阿蘇青少年交流の家、観客約80名)
シンポジウムタイトル「阿蘇の草原に生きる植物と土壌: わかってきた植物ごとに好きな土壌」
講演: 「阿蘇の草原が持つ価値とその危機」(横川昌史)
講演: 「植物と土壌の間の切っても切れない関係」(平舘俊太郎)
講演: 「阿蘇の植物の分布と土壌特性の関係: とくに盆花やセイタカアワダチソウについて」(小柳知代)
講演: 「阿蘇の植物が必要とする栄養分について: とくに盆花やセイタカアワダチソウについて」(森田沙綾香)
講演: 「これからの草原の管理に向けて: 刈取りや野焼きなどの伝統的管理が阿蘇の野草を守る」(楠本良延)
総合討論(司会&総合コーディネーター: 高橋佳孝、平舘俊太郎)
- 2) 平舘俊太郎: 講演、農業環境技術研究所研究成果発表会2012、平成24年11月30日、新宿明治安田生命ホール(東京都新宿区、観客185名)

「セイトカアワダチソウを抑えて在来植生に戻す」

＜マスコミ等への公表・報道等＞

- 1) プレスリリース(2011年12月19日、於：農林水産技術会議事務局筑波事務所、「外来植物のセイトカアワダチソウを衰退させ在来植物を中心とする植生に誘導する：土壤環境をコントロールしてセイトカアワダチソウの蔓延を防ぐ」)
- 2) 常陽新聞(2012年1月3日、地域版、7面、「粉状アルミ散布で酸性土壌に：外来植物衰退の技術開発、つくば農環研、在来植物の回復に期待、農耕地周辺の緑化にも活用」)
- 3) 毎日新聞(2012年1月9日、全国版、2面、「「迷惑」外来種セイトカアワダチソウ：土壌酸性化でまん延を防止」)
- 4) TBS(平成24年11月20日、Nスタ(16:53-17:55、ニュース番組)の中で、福島県原発事故現場付近にて蔓延しているセイトカアワダチソウの特集の中で、その原因についてコメントをしているインタビューが数分間放送された)

7. 研究者略歴

課題代表者：平舘 俊太郎

東京農工大学農学部卒業、岩手大学大学院連合農学研究科修了、農学博士、
現在、(独)農業環境技術研究所・生物多様性研究領域・上席研究員

研究参画

(1)：平舘 俊太郎 (同上)

(2)：楠本 良延

横浜国立大学大学院工学研究科修了、学術博士、
現在、(独)農業環境技術研究所・生物多様性研究領域・主任研究員

D-1001 野草類の土壌環境に対する生育適性の評価と再生技術の開発**(1) 野草類の分布と土壌の化学的特性の関係解明**

(独) 農業環境技術研究所 生物多様性研究領域

平舘俊太郎 (上席研究員)

楠本良延 (主任研究員)

< 研究協力者 >

(独) 農業環境技術研究所 生物多様性研究領域

森田沙綾香 (P D)

小柳知代 (P D) (平成22～23年度のみ)

平成22～24年度累計予算額：23,252千円

(うち、平成24年度予算額：3,004千円)

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

野草類の分布と土壌の化学的特性の関係を明らかにするため、日本各地の14草原を対象に合計1500地点を調査した。その結果、野草類はそれぞれ特徴的な分布しやすい土壌の化学的特性を持っていることが明らかになった。具体例を挙げると、日本の草原に広く分布する在来植物であるススキ、ヨモギ、ゲンノショウコ、ヤブマメは土壌酸性や土壌中有効態リン酸に対する適応幅が広いこと、典型的な半自然草原に出現する在来植物であるオミナエシ、ミツバツチグリ、シラヤマギク、キジムシロといった植物は土壌酸性が強い環境に適応しておりかつ土壌中有効態リン酸に対する要求性が非常に低いこと、外来植物であるセイタカアワダチソウ、シロツメクサ、オオアワガエリは土壌酸性に対する耐性をほとんど持たないこと、外来植物でもハルガヤは土壌酸性に対して耐性を持っていること、などが明らかとなった。上記のように、日本に分布している主な野草類について、その分布特性を土壌の化学的特性との関係から明らかにし、その特徴の違いを植物種ごとに明確に示したのは、本研究が初めてである。本研究により、ある植物を保全するためにはその植物にとって適する土壌環境を整備することが非常に重要であることが支持された。また、本研究では、実際に行政からの要望に応じて、長野県、鹿児島県、福井県において、外来植物の蔓延要因としての土壌環境を調査し、本研究で得られた成果をもとに、外来植物の蔓延防止および在来植物の回復に向けた今後の管理法などに関してアドバイスを行った。本研究における成果は、今後さらに、草原再生のための土壌管理法の策定、草原再生の効果の予測と効率的な再生候補地の選定、外来植物の蔓延防止策の策定やリスク評価などに利用することが期待される。

[キーワード]

草原生植物、土壌中有効態リン酸、土壌pH、半自然草原、分布特性

1. はじめに

かつて日本の国土面積の約20%を占めていた半自然草原（刈り取りや野焼き等の伝統的な人為活動の関与によって維持されてきた草原）は、高度経済成長期以降急速に減少し、現在では国土面積の約2%程度にまで減少している¹⁾。これは、化石燃料の利用が進んだため動力源としての家畜の需要が減少したこと、畜産の形態が大きく変化し外国から輸入する家畜飼料の利用が進んだことにより従来の野草利用型の畜産が衰退したこと、プラスチック製品等の普及に伴い生活必需品としての草木の需要が減少したこと、化学肥料の普及に伴い肥料成分の持ち出しを目的とした草原の草刈りが行われなくなったことなど、日本での草原の利用が激減したことによるところが大きい。その結果、多くの草原依存性の生物群が絶滅の危機に瀕しており、とくに植物は多くの種がレッドリストに掲載されている。

現在、これら希少な野草類を保全・再生するために、多くの自然再生事業が試みられているが、必ずしも成功するケースばかりではない。たとえば、単に木本植物や灌木類を伐採しただけでは目的の野草類は再生されず荒地となったケースや外来植物が蔓延したケースなどが報告されている。このことは、植物の生育や定着を左右する要因として、気候・気象要因や種子散布要因以外にも他の要因が深く関与していることを示唆している。

このような状況のもと、課題代表者らは、植物の生育や分布におよぼす土壤環境の影響についてはまだ十分な調査が行われていないことに注目し、北関東において植物の分布と土壤の化学的特性の関係について調査を行った。その結果、野草類を含む多くの植物は、それぞれの生育に適した土壤の化学的特性を持つことが明らかになった^{2,3,4)}。とくに、土壤pHと土壤中有効態リン酸は、多くの植物の分布に大きな影響を及ぼす非常に重要な要因であることが明らかとなった。このことは、ある植物を保全しようとした場合、その植物の保全に適した土壤環境を明らかにし、このような環境を整える必要があることを意味している。しかし、植物の生育と土壤環境との関係に関しては、栽培植物については多くの知見があるものの、野草類についてはほとんど調べられていない。また、野草類の植物栄養学的特性に関しても、これまでに研究された事例は非常に限られている。このため、日本において野草類の保全に適した土壤環境を整備する場合には、まず植物の分布と土壤の化学的特性の関係を明らかにするとともに、その基礎となる植物栄養学的知見も明らかにする必要がある。このような知見が収集されれば、土壤環境を制御することによって在来野草類を保全する技術の開発に道が開かれるものと期待される。

2. 研究開発目的

本研究課題では、野草類が現在の日本においてどのような土壤環境に分布しているのかを種ごとに明らかにする。具体的には、日本各地において草原植生が成立している場所として、半自然草原、牧草地（改良草地）、耕作放棄地、畦畔などをとりあげ、野外植生調査を実施し、同時にその植生調査地から表層土壤（0～5cm）を採取する。この土壤は、実験室内に持ち帰り、化学分析によってその化学的特性を明らかにする。得られたデータを解析することにより、個々の植物種の分布と土壤の化学的特性との関係を明らかにする。本研究課題の実施期間（3年間）を通じて、10地区以上の地域において草原植生を調査し、それぞれの地域において50地点以上を調査することを目標とした。すなわち、500地点以上の調査地点について、植生調査データと土壤分析データを収集し、これを解析することによって、それぞれの植物種が分布しやすい土壤の化学的特性を

明らかにする。

3. 研究開発方法

(1) 調査地

本研究課題の実施期間（3年間）を通じて調査を実施した地点について表(1)-1にまとめた。研究開始当初に目標としたのは、10地区以上において合計調査地点数500以上であったが、これを大幅に超える14地区1500地点について調査を実施することができた。出現した主な草原植生タイプは、ススキ型（半自然草原タイプ）、シバ型（半自然草原タイプ）、チガヤ型（半自然草原タイプ）、畦畔型（半自然草原タイプ、人工改変タイプ）、改良草地型（人工改変タイプ）、放棄草地型（人工改変タイプ）、風衝草地型（自然草原タイプ）であり、日本に見られる主な草原植生タイプをほぼ網羅することができた。

表(1)-1. 本研究の調査地における主な草原タイプと調査地点数

地方名	県名	調査地	主な草原植生タイプ	調査地点数
東北	青森県	十和田・三戸	改良草地型、畦畔型、放棄草地型	76
	岩手県	早坂高原	風衝草地型、シバ型、改良草地型、放棄草地型	100
関東	茨城県	稲敷台地	ススキ型、畦畔型、改良草地型、放棄草地型	72
	神奈川県	茅ヶ崎	放棄草地型	9
	東京都	小笠原	シバ型、風衝草地型、放棄草地型	180
	静岡県	富士根原	ススキ型、改良草地型	75
中部	兵庫県	宝塚	放棄草地型、畦畔型	77
関西	岡山県	蒜山	ススキ型、改良草地型、放棄草地型	56
	島根県	三瓶	ススキ型、改良草地型	96
	広島県	芸北	シバ型、ススキ型、改良草地型、放棄草地型	151
	山口県	山口	ススキ型、改良草地型	151
	愛媛県・徳島県	塩塚	ススキ型、改良草地型、放棄草地型	80
九州	熊本県	阿蘇	ススキ型、シバ型、改良草地型、放棄草地型	299
沖縄	沖縄県	石垣	ススキ型、チガヤ型、改良草地型、放棄草地型	78
合計				1500

(2) 植生調査

植生調査は、調査地点に1 m×1 mのコドラート枠を設置し、その中に出現した全ての種を同定するとともに、それぞれの被度を目視により判定した。なお、その場で種の同定ができなかった植物については、植物標本を作製し、図鑑や地域植物誌等を用いて同定した。また、必要に応じて、外部の植物専門家に対して植物同定の依頼を行った。

(3) 土壌サンプリング

土壌は、直径5.1 cm×高さ5.0 cmの円筒型ステンレス製コアサンプラー（100 mL容）を用いて、表層から深さ5cmまでの層位を正確に採取した。1調査地点につき、1 m×1 mのコドラート枠内あるいはその周縁部から4～6点の土壌コア試料を採取し、これらの土壌試料を均質に混合し、1調査地点につき約500 gの土壌試料1点を得た。採取した土壌試料は、風乾後、2 mmのふるいを通過させることによって、風乾細土とした。

(4) 土壌分析

1) 土壌pH (H₂O)

2.0 gの風乾細土に5.0 mLの脱塩水を加え（土壌：水＝1：2.5）、時々振とうしながら室温で24時間平衡させ、上澄み液についてpHメーター(F-23II; Horiba, Ltd., Kyoto, Japan)のガラス電極を懸濁液中に挿入することにより測定した。

2) 土壌pH(KCl)

2.0 gの風乾細土に5.0 mLの1.0 M KClを加え（土壌：水＝1：2.5）、時々振とうしながら室温で24時間平衡させ、上澄み液についてpHメーター(F-23II; Horiba, Ltd., Kyoto, Japan)のガラス電極を懸濁液中に挿入することにより測定した。

3) 土壌pH (NaF)

1.0 gの風乾細土に50 mLの飽和NaF水溶液（1.0 M、pH=7.0）を加え、1分間攪拌後1分間放置し、上澄み液についてpHメーター(F-23II; Horiba, Ltd.)のガラス電極を懸濁液中に挿入することにより測定した。

4) 電気伝導度

8.0 gの風乾細土に20 mLの脱塩水を加え（土壌：水＝1：2.5）、25℃、100 rpmで24時間連続振とう後、遠心分離を行い、上澄み液をメンブレンフィルター(disposable syringe filter unit, DISMIC-25CS, 25CS020AN, 0.2 μm, cellulose acetate, Toyo Roshi Kaisha, Ltd., Tokyo, Japan)を用いてろ過し、ろ液の電気伝導度を電気伝導度計(CM-30ET; DKK-TOA Co., Ltd., Tokyo, Japan)を用いて測定することにより求めた。

5) 置換酸度（塩類によって交換溶出が可能な土壌中の酸の量）

8.0 gの風乾細土に20 mLの1.0 M KCl水溶液を加え（土壌：水＝1：2.5）、25℃、100rpmで24時間連続振とう後、遠心分離を行い、上澄み液をメンブレンフィルター(disposable syringe filter unit, DISMIC-25CS, 25CS020AN, 0.2 μm, cellulose acetate)を用いてろ過し、ろ液を自動滴定装置(COM-550; Hiranuma Sangyo Co., Ltd., Hitachi, Japan)を用いて0.01 M NaOHで滴定（滴定終点pH 7.0）することにより求めた（Saigusa et al., 1980⁵⁾ および Soil Nutrients Analysis Committee, 1980⁶⁾を改変した方法）。

6) 全炭素濃度および全窒素濃度

風乾細土から目視で確認できる植物体残差を可能な限りピンセットを用いて除去後、乳鉢と乳房を用いて磨砕し、NCアナライザー (Sumigraph NC-22F, Sumika Chemical Analysis Service, Osaka, Japan) を用いて求めた。

7) 有効態リン酸

Bray II法に準じて測定した。すなわち、1.0 gの風乾細土に20 mLの0.03 M NH₄F（0.1 M HCl中）を加え、1分間振とう後、ろ過し（Advantec Toyo, No. 5B）、ろ液に含まれるオルトリン酸をモリブデンブルー法⁷⁾（吸光波長：880 nm、U-2010、日立ハイテクノロジー）を用いて定量することにより求めた。

4. 結果及び考察

得られたデータを統合し、調査地点の植物種組成と土壌の化学的特性の間の関係をCCA分析により解析した結果、調査地点の植物種組成は土壌pH(H₂O)および土壌中有効態リン酸と強い関係があ

ることが示された。そこで、それぞれの植物種の分布は、土壌pH(H₂O)および土壌中有効態リン酸量との関係でとりまとめた。これらの結果の一部を、図(1)-1～図(1)-3に示した。

(1) 日本の草原植生に広く分布する在来植物 (図(1)-1参照)

日本の草原植生に広く分布する在来植物であるススキは、比較的広い土壌pH(H₂O)に分布するが、土壌中の植物有効態リン酸は比較的低い値の場所に出現しやすい傾向があった(図(1)-1参照)。具体的な数値を挙げると、本研究ではススキが出現していた地点は全部で306地点であったが、そのうちの50%はpH(H₂O)が5.1～5.7の範囲内に出現しており、また80%はpH(H₂O)が4.8～6.1の範囲内に出現していた。土壌pH(H₂O)は、土壌中の交換性Alと密接な関係があり、土壌pH(H₂O)<5.5程度になると、Al毒性に対する耐性を持たない多くの植物がダメージを受けるようになると考えられている⁵⁾。ススキは、出現した調査地点の約半分がpH(H₂O)<5.5の土壌であったことから、ススキはある程度Alに対する耐性を持っているものと考えられた。土壌中の植物有効態リン酸は、一般的に20 mg P₂O₅ 100 g⁻¹よりも大きい値であれば、多くの植物がリン酸欠乏を回避できると考えられており、逆に20 mg P₂O₅ 100 g⁻¹よりも小さい値であれば、特別なリン酸吸収メカニズムあるいは植物体内で特別なリン利用メカニズムを持った植物でなければ生育は難しいと考えられる。ススキが分布する土壌の50%は土壌中の植物有効態リン量が4.1～11.1 mg P₂O₅ 100 g⁻¹の範囲内にあり、ススキが分布する土壌の80%は土壌中の植物有効態リン量が2.9～26.6 mg P₂O₅ 100 g⁻¹の範囲内にあった。このことから、ススキは土壌中有効態リン酸が少なくても、何らかのメカニズムでリンを獲得・利用するメカニズムを持っているものと考えられた。

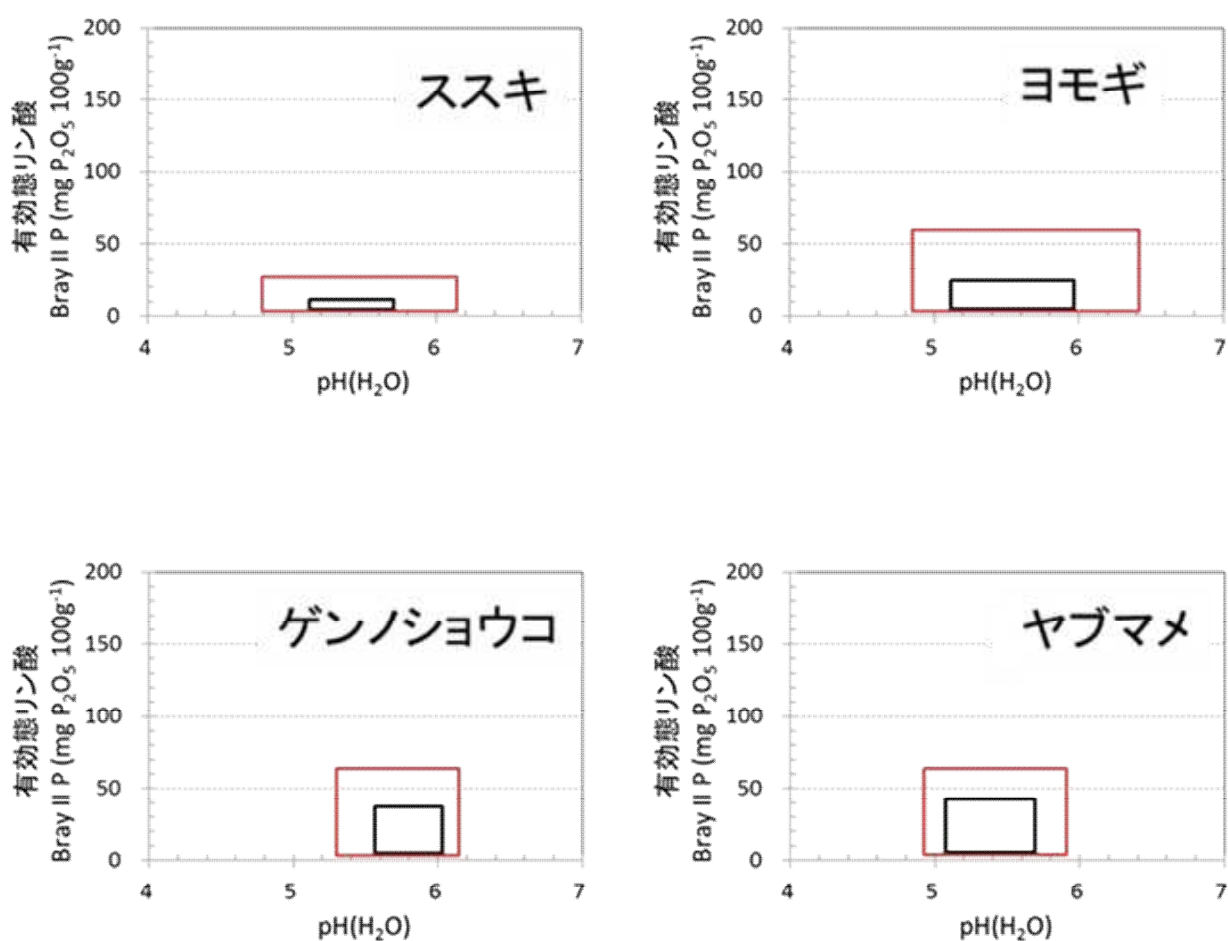
日本の草原植生に広く分布する在来植物であるヨモギは、本研究では全部で196地点にて観察され、そのうちの50%はpH(H₂O)が5.1～6.0の範囲内に出現しており、また80%はpH(H₂O)が4.9～6.4の範囲内に出現していた(図(1)-1参照)。また、ヨモギが分布する土壌の50%は土壌中の植物有効態リン量が5.1～24.4 mg P₂O₅ 100 g⁻¹の範囲内にあり、ヨモギが分布する土壌の80%は土壌中の植物有効態リン量が3.1～59.5 mg P₂O₅ 100 g⁻¹の範囲内にあった。このことから、ヨモギは、ススキと似た土壌環境適性をもっているものの、ススキよりはやや土壌酸性に対して弱く、またススキよりも多くの土壌中植物有効態リン酸量を要求するものと考えられた。

日本の草原植生に広く分布する在来植物であるゲンノショウコは、本研究では全部で91地点にて観察され、そのうちの50%はpH(H₂O)が5.6～6.0の範囲内に出現しており、また80%はpH(H₂O)が5.3～6.1の範囲内に出現していた(図(1)-1参照)。また、ゲンノショウコが分布する土壌の50%は土壌中の植物有効態リン量が4.9～37.5 mg P₂O₅ 100 g⁻¹の範囲内にあり、ゲンノショウコが分布する土壌の80%は土壌中の植物有効態リン量が3.3～63.6 mg P₂O₅ 100 g⁻¹の範囲内にあった。このことから、ゲンノショウコは、ヨモギと似た土壌環境適性をもっているものの、ヨモギよりもさらに土壌酸性に対して弱く、またヨモギと同程度の土壌中植物有効態リン酸量を要求するものと考えられた。

日本の草原植生に広く分布する在来植物であるヤブマメは、本研究では全部で64地点にて観察され、そのうちの50%はpH(H₂O)が5.1～5.7の範囲内に出現しており、また80%はpH(H₂O)が4.9～5.9の範囲内に出現していた(図(1)-1参照)。また、ヤブマメが分布する土壌の50%は土壌中の植物有効態リン量が5.2～42.6 mg P₂O₅ 100 g⁻¹の範囲内にあり、ヤブマメが分布する土壌の80%は土壌中の植物有効態リン量が3.7～63.7 mg P₂O₅ 100 g⁻¹の範囲内にあった。このことから、ヤブマメは、土壌酸性に対する適応幅はススキと同程度であり、土壌中植物有効態リン酸量の要求量はヨモギ

やゲンノショウコと同程度であると考えられた。

上記以外にも、日本の草原植生に広く出現する在来植物の多くは、土壤酸性に対する適応幅が広く、かつ土壤中の植物有効態リン酸に対する要求性も広い傾向が認められた。



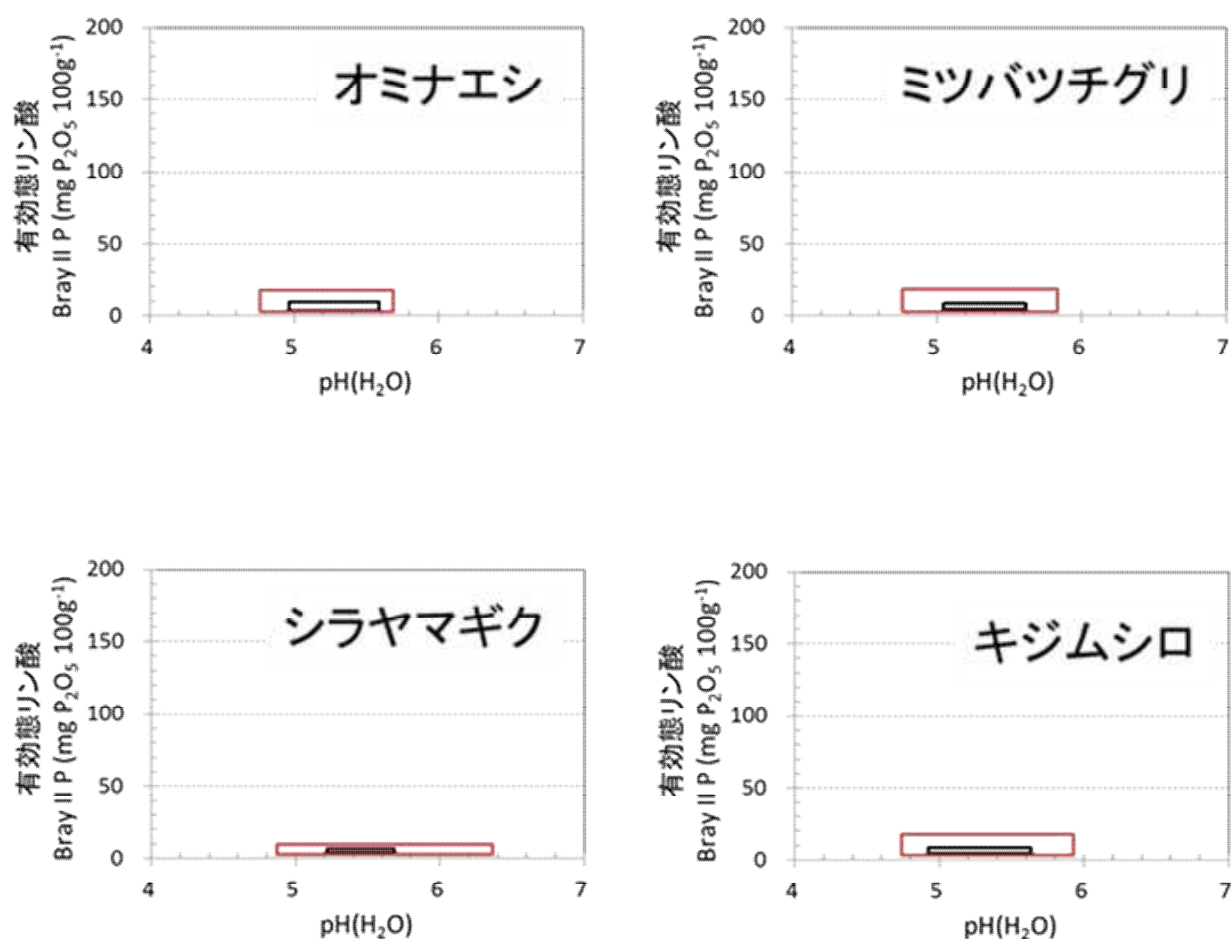
図(1)-1. 日本の草原植生に広く分布する在来植物であるススキ、ヨモギ、ゲンノショウコ、ヤブマメが分布しやすい土壌特性。

黒枠（図中の内側の四角内）：対象植物種が出現した地点の全体の50%が分布する土壌特性の範囲。

赤枠（図中の外側の四角内）：対象植物種が出現した地点の全体の80%が分布する土壌特性の範囲。

(2) 日本の典型的な半自然草原に出現する在来植物（図(1)-2参照）

日本の典型的な半自然草原に出現する在来植物であるオミナエシは、本研究では全部で60地点にて観察され、そのうちの50%はpH(H₂O)が5.0～5.6の範囲内に出現しており、また80%はpH(H₂O)が4.8～5.7の範囲内に出現していた（図(1)-2参照）。また、オミナエシが分布する土壤の50%は土壤中の植物有効態リン量が3.1～9.4 mg P₂O₅ 100 g⁻¹の範囲内にあり、オミナエシが分布する土壤の80%は土壤中の植物有効態リン量が2.3～17.5 mg P₂O₅ 100 g⁻¹の範囲内にあった。このことから、オミナエシは、ススキよりも土壤酸性が強い環境に適応しているとみられ、また土壤中植物有効態リン酸量の要求量もススキと同程度かそれ以下であると考えられた。



図(1)-2. 日本の典型的な半自然草原に出現する在来植物であるオミナエシ、ミツバツチグリ、シラヤマギク、キジムシロが分布しやすい土壤特性。

黒枠（図中の内側の四角内）：対象植物種が出現した地点の全体の50%が分布する土壤特性の範囲。

赤枠（図中の外側の四角内）：対象植物種が出現した地点の全体の80%が分布する土壤特性の範囲。

日本の典型的な半自然草原に出現する在来植物であるミツバツチグリは、本研究では全部にて140地点で観察され、そのうちの50%はpH(H₂O)が5.0～5.6の範囲内に出現しており、また80%はpH(H₂O)が4.8～5.8の範囲内に出現していた（図(1)-2参照）。また、ミツバツチグリが分布する土壌の50%は土壌中の植物有効態リン量が4.1～4.8 mg P₂O₅ 100 g⁻¹の範囲内にあり、ミツバツチグリが分布する土壌の80%は土壌中の植物有効態リン量が2.5～17.9 mg P₂O₅ 100 g⁻¹の範囲内にあった。このことから、ミツバツチグリは、オミナエシとほとんど同様の土壌酸性適性を持っており、また土壌中有効態リン酸の要求量もオミナエシとほぼ同程度であると考えられた。

日本の典型的な半自然草原に出現する在来植物であるシラヤマギクは、本研究では全部で104地点にて観察され、そのうちの50%はpH(H₂O)が5.2～5.7の範囲内に出現しており、また80%はpH(H₂O)が4.9～6.4の範囲内に出現していた（図(1)-2参照）。また、シラヤマギクが分布する土壌の50%は土壌中の植物有効態リン量が3.5～6.5 mg P₂O₅ 100 g⁻¹の範囲内にあり、シラヤマギクが分布する土壌の80%は土壌中の植物有効態リン量が2.8～9.5 mg P₂O₅ 100 g⁻¹の範囲内にあった。このことから、シラヤマギクは、オミナエシやミツバツチグリとほとんど同様の土壌酸性適性を持っており、また土壌中有効態リン酸の要求量もオミナエシやミツバツチグリとほぼ同程度であると考えられた。

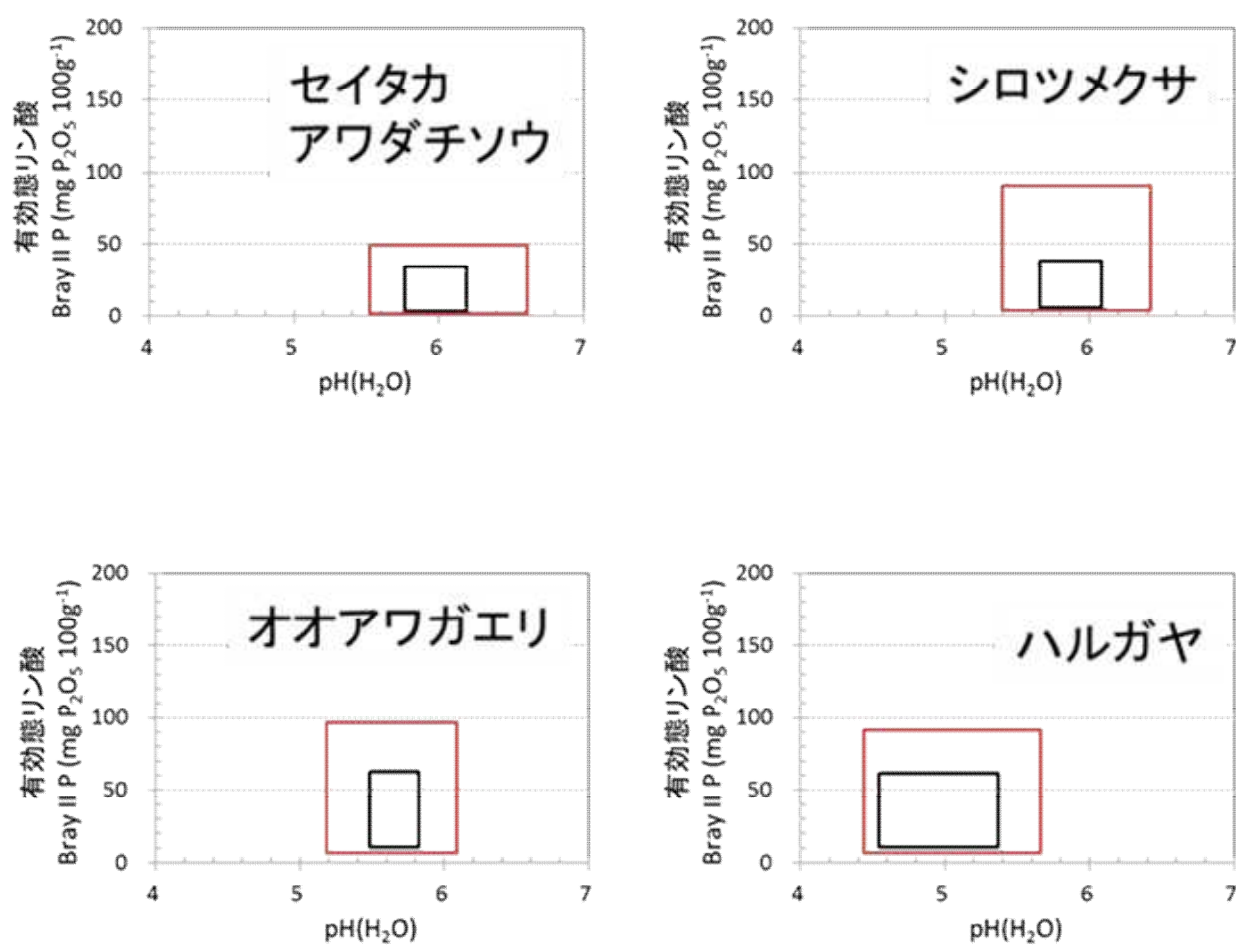
日本の典型的な半自然草原に出現する在来植物であるキジムシロは、本研究では全部で70地点にて観察され、そのうちの50%はpH(H₂O)が4.9～5.6の範囲内に出現しており、また80%はpH(H₂O)が4.7～5.9の範囲内に出現していた（図(1)-2参照）。また、キジムシロが分布する土壌の50%は土壌中の植物有効態リン量が4.2～8.5 mg P₂O₅ 100 g⁻¹の範囲内にあり、キジムシロが分布する土壌の80%は土壌中の植物有効態リン量が3.2～17.6 mg P₂O₅ 100 g⁻¹の範囲内にあった。このことから、キジムシロは、オミナエシ、ミツバツチグリ、シラヤマギクよりもやや強い土壌酸性に適応しており、また土壌中植物有効態リン酸量の要求量は、オミナエシ、ミツバツチグリ、シラヤマギクよりもやや高いと考えられた。

上記以外にも、日本の典型的な半自然草原に出現する在来植物の多くは、強い土壌酸性に対しても適応しており、かつ土壌中の植物有効態リン酸に対する要求性は非常に低い傾向が認められた。

（3）日本の草原植生に出現する外来植物（図(1)-3参照）

日本の草原植生に出現する外来植物であるセイタカアワダチソウは、本研究では全部で76地点にて観察され、そのうちの50%はpH(H₂O)が5.8～6.2の範囲内に出現しており、また80%はpH(H₂O)が5.5～6.6の範囲内に出現していた（図(1)-3参照）。また、セイタカアワダチソウが分布する土壌の50%は土壌中の植物有効態リン量が3.2～34.1 mg P₂O₅ 100 g⁻¹の範囲内にあり、セイタカアワダチソウが分布する土壌の80%は土壌中の植物有効態リン量が1.5～49.5 mg P₂O₅ 100 g⁻¹の範囲内にあった。このことから、セイタカアワダチソウは、交換性Alに対する耐性をほとんど持たず、土壌酸性が強い環境には分布できないものと考えられた。この点は、日本の草原植生に広く分布する在来植物であるススキ、ヨモギ、ゲンノショウコ、ヤブマメ、あるいは日本の典型的な半自然草原に出現する在来植物であるオミナエシ、ミツバツチグリ、シラヤマギク、キジムシロなどと大きく異なる点であると考えられた。また、セイタカアワダチソウは、土壌中有効態リン酸に対する要求量も多い傾向があることも明らかとなった。

日本の草原植生に出現する外来植物であるシロツメクサは、本研究では全部で121地点にて観察され、そのうちの50%はpH(H₂O)が5.7~6.1の範囲内に出現しており、また80%はpH(H₂O)が5.4~6.4の範囲内に出現していた（図(1)-3参照）。また、シロツメクサが分布する土壌の50%は土壌中の植物有効態リン量が5.6~38.3 mg P₂O₅ 100 g⁻¹の範囲内にあり、シロツメクサが分布する土壌の80%は土壌中の植物有効態リン量が3.9~90.5 mg P₂O₅ 100 g⁻¹の範囲内にあった。このことから、シロツメクサは、セイタカアワダチソウと同様、交換性Alに対する耐性をほとんど持たず、土壌酸性が強い環境には分布できないものと考えられた。また、シロツメクサは、セイタカアワダチソウと同様、土壌中有効態リン酸の要求量も多い傾向があることも明らかとなった。



図(1)-3. 日本の草原植生に出現する外来植物であるセイタカアワダチソウ、シロツメクサ、オオアワガエリ、ハルガヤが分布しやすい土壌特性。

黒枠（図中の内側の四角内）：対象植物種が出現した地点の全体の50%が分布する土壌特性の範囲。

赤枠（図中の外側の四角内）：対象植物種が出現した地点の全体の80%が分布する土壌特性の範囲。

日本の草原植生に出現する外来植物であるオオアワガエリは、本研究では全部で71地点にて観察され、そのうちの50%はpH(H₂O)が5.5～5.8の範囲内に出現しており、また80%はpH(H₂O)が5.2～6.1の範囲内に出現していた（図(1)-3参照）。また、オオアワガエリが分布する土壌の50%は土壌中の植物有効態リン量が10.7～62.9 mg P₂O₅ 100 g⁻¹の範囲内にあり、オオアワガエリが分布する土壌の80%は土壌中の植物有効態リン量が6.6～96.5 mg P₂O₅ 100 g⁻¹の範囲内にあった。このことから、オオアワガエリは、セイタカアワダチソウやシロツメクサと同様、交換性Alに対する耐性をほとんど持たず、土壌酸性が強い環境には分布できないものと考えられた。また、オオアワガエリは、セイタカアワダチソウやシロツメクサと同様、土壌中有効態リン酸の要求量も多い傾向があることも明らかとなった。

日本の草原植生に出現する外来植物であるハルガヤは、本研究では全部で111地点にて観察され、そのうちの50%はpH(H₂O)が4.5～5.4の範囲内に出現しており、また80%はpH(H₂O)が4.4～5.7の範囲内に出現していた（図(1)-3参照）。また、ハルガヤが分布する土壌の50%は土壌中の植物有効態リン量が10.9～61.4 mg P₂O₅ 100 g⁻¹の範囲内にあり、ハルガヤが分布する土壌の80%は土壌中の植物有効態リン量が6.5～91.5 mg P₂O₅ 100 g⁻¹の範囲内にあった。このことから、ハルガヤは、外来植物ではあるものの、セイタカアワダチソウ、シロツメクサ、オオアワガエリとは異なり、交換性Alに対する耐性を持っているため、土壌酸性が強い環境にも分布できることが明らかとなった。また、ハルガヤは、セイタカアワダチソウ、シロツメクサ、オオアワガエリと同様、土壌中有効態リン酸の要求量も多い傾向があることも明らかとなった。

上記以外にも、日本の草原植生に出現する外来植物が分布しやすい土壌特性を調査した結果、多くの外来植物は土壌酸性に対する耐性をほとんど持たないと考えられ、弱酸性～中性領域の土壌に出現する傾向があったが、ハルガヤのように酸性土壌にも適応している外来植物もいくつか見られた。一方、土壌中の植物有効態リン酸に対する要求性は、ほとんどの外来植物で高いレベルにあることがわかった。

（４）土壌特性を制御することによる植生制御の可能性について

本研究により得られた上記の結果は、日本の草原植生に広く分布する在来植物、日本の典型的な半自然草原に出現する在来植物、日本の草原植生に出現する外来植物について、それぞれのグループが出現しやすい土壌の特性はそれぞれで異なっていることを明確に示しているものと考えられる。具体的には、日本の草原植生に広く出現する在来植物の多くは土壌酸性に対する適応幅が広くかつ土壌中の植物有効態リン酸に対する要求性も広い傾向が認められ、日本の典型的な半自然草原に出現する在来植物の多くは強い土壌酸性に対しても適応しておりかつ土壌中の植物有効態リン酸に対する要求性は非常に低い傾向が認められ、日本の草原植生に出現する外来植物の多くは土壌酸性に対する耐性をほとんど持たないため弱酸性～中性領域の土壌に出現する傾向がありかつ土壌中の植物有効態リン酸に対する要求性は高いレベルにある傾向が認められた。

このことを利用すれば、土壌特性を制御することによって植生を制御することが可能になると考えられる。たとえば、セイタカアワダチソウやシロツメクサが蔓延している草原では、土壌pHが高く土壌中の植物有効態リン酸も高い状態にあると考えられる。この土壌特性を変化させて、土壌pHが低くかつ土壌中の植物有効態リン酸も低い状態に誘導できれば、セイタカアワダチソウやシロツメクサは自然に衰退することが期待される。セイタカアワダチソウやシロツメクサが衰

退したあとに生育させる植物としては、ススキやオミナエシなどが候補に挙げられるが、どの植物種が生育するかは、周囲からの種子や繁殖器官の移入に依存すると考えられる。ただし、必ずしも在来種が主体となる植生になるとは限らないことにも注意が必要である。今回の調査結果にも示されているように、ハルガヤは外来植物であるにもかかわらず、土壤酸性が強い環境にも適応している。このため、ハルガヤが優占している場所の土壤を酸性化しても、ハルガヤが自然に衰退しない可能性が高いと考えられる。その際には、土壤中有効態リン酸を低減させるのが有効である可能性がある。

以上のように、本研究により、非常に多くの草本植物について、それぞれの種が分布しやすい土壤環境が明らかになった。また、これらの知見を応用すれば、土壤特性を制御することによって植生を制御できる可能性が示唆された。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

本研究の推進により、ススキ、ヨモギ、ゲンノショウコ、ヤブマメ、オミナエシ、ミツバツチグリ、シラヤマギク、キジムシロ、セイタカアワダチソウ、シロツメクサ、オオアワガエリ、ハルガヤなど多くの草原生植物の分布は、土壤pHおよび土壤中有効態リン酸の影響を強く受けていることが明らかとなった。この中で、ススキ、ヨモギ、ゲンノショウコ、ヤブマメといった日本の草原に広く分布する在来植物は、土壤酸性や土壤中有効態リン酸に対する適応幅が広いことが明らかになった。また、日本の典型的な半自然草原に出現する在来植物であるオミナエシ、ミツバツチグリ、シラヤマギク、キジムシロといった植物は、強い土壤酸性に対しても適応しており、かつ土壤中の植物有効態リン酸に対する要求性は非常に低い傾向があることが明らかとなった。このことから、オミナエシ、ミツバツチグリ、シラヤマギク、キジムシロといった植物を保全するためには、これらの植物種の生育に適した土壤の化学的特性（土壤酸性が高く土壤中有効態リン酸が低い状態）を保持することが重要であると考えられた。一方、日本の草原植生に出現する外来植物であるセイタカアワダチソウ、シロツメクサ、オオアワガエリといった植物は、土壤中有効態リン酸に対する要求性は高いレベルにあり、かつ土壤酸性に対する耐性をほとんど持たないと考えられ、弱酸性～中性領域の土壤に出現する傾向が強かった。ただし、外来植物の中には、ハルガヤのように、土壤中有効態リン酸に対する要求性は高いレベルにあるものの、強い土壤酸性に対して耐性を持っているものもあることが明らかになった。このように、日本に分布している主な野草類について、その生育・分布環境を土壤の化学的特性の面から明らかにし、その特徴の違いを植物種ごとに明確に示したのは、本研究が初めてである。

このような研究成果は、自然の理解や科学の進歩に対して、大きく貢献することが期待される。まず、これまでは植物の分布における土壤の化学的特性のかかわりは十分に理解されておらず、植物の分布は、気候や水分環境といった環境因子に加えて、種子や栄養繁殖器官の分布に強く依存していると考えられてきた。しかし、これだけでは説明できない現象が多数観察される。たとえば、一つの小さな地域内において気候や水分環境といった環境因子はほとんど同一であるにもかかわらず、複数の植生群落タイプが成立しており、しかもその植生群落タイプは毎年ほとんど変化がみられない場合などが挙げられる。このようなケースには、土壤の化学的特性が大きな影

響を及ぼしている可能性が考えられる。本研究による調査でも、通常、一つの狭い地域内において複数の植物群落タイプが出現していたが、それぞれの植物群落タイプが出現する場所の土壌は、その化学的特性において特徴があることがわかっている。このように、本研究によって、植物の分布におよぼす要因として土壌の化学的特性は大きな影響を及ぼしていることが明らかとなった。

また、本研究により得られたこれらの知見により、植物の分布にかかわるより複雑で動的な現象に対しても、土壌の化学的特性が関与している可能性を考えることができるようになった。たとえば、道路法面の緑化地では土壌に肥料成分や石灰資材等を施用することにより土壌を富栄養的に変えるとともに土壌酸性を弱めているが、このような場所では、管理が手薄になると、セイタカアワダチソウなどの外来植物によって優占されることが多く、逆にオミナエシなど日本の半自然草原に出現しやすい植物が現れることはほとんどない。また、農耕地でも、肥料成分や石灰資材等を施用することにより土壌を富栄養的で土壌酸性が弱い状態で管理し、農作物の生産性を高めている場合がほとんどであるが、これらの農耕地が放棄されると、その跡地にはやはりセイタカアワダチソウなどの外来植物が侵入しやすく、その蔓延が問題となっている。これまでは、これらの外来植物の蔓延は、その外来植物の成長速度が早いこと、大型の植物体に成長すること、刈取りや被陰などに対する抵抗性が強いこと、除草剤などに対する抵抗性が強いこと、繁殖力が強いことなど、その植物種が持つ生態的な特性から理解されることが多かった。しかし、それだけでは、特定の環境においてとくに蔓延する現象や、特定の管理を行った場所でとくに蔓延する現象に対しては、説明は難しかった。本研究により、特定の人為的な管理によって土壌の化学的特性が変化し、それに伴って外来植物が蔓延しやすくなった可能性を考えることができるようになった。これは、植物の分布を考える上でも、外来植物の蔓延を防止するうえでも、科学的に重要な進歩につながると期待される。

（２）環境政策への貢献

＜行政が既に活用した成果＞

本研究により得られた研究成果は、プレスリリースや学会発表等によって積極的に周知したこともあり、全国各地の外来植物が蔓延する現場から「セイタカアワダチソウの蔓延防止に協力してほしい」といった問い合わせが多数あった。これには行政からの問い合わせも含まれており、その中で下記の３つのケースについては、セイタカアワダチソウなどの外来植物が蔓延する現地を視察するとともに、現場の土壌を採取し、化学分析を行って、今後の管理手法に関して提案を行った。

- ① 国土交通省所轄の河川周囲の河岸および河川堤防
- ② 鹿児島県が所轄する道路法面
- ③ 福井県が所轄する河川周囲の河岸緑地公園内および河川堤防

この中で、①のケースは河川敷内の緑地公園などが対象であり、セイタカアワダチソウやヒメジョオンなどの外来植物が蔓延していた。また、調査対象地付近の水辺では、特定外来生物であるオオカワヂシャの生育も確認された。調査対象地の土壌は、粘土をほとんど含んでいない砂質土壌であり、養分を保持する能力に乏しいと考えられた。にもかかわらず、土壌中有効態リン酸は $20 \text{ mg P}_2\text{O}_5$ 100 g^{-1} 前後であり、多くの外来植物が生育可能な範囲にあると考えられた。また、土壌pH(H₂O)も6.8～7.6と弱酸性～弱アルカリ性の範囲にあり、やはり多くの外来植物が生育可能な

範囲内にあった。これは、河川水中に含まれる植物栄養分がこれらの土壌表面に到達するとともに、水分の蒸発に伴ってこれら植物栄養分が濃縮するためと考えられた。この河川の周辺や上流には農地が広がっており、これらの地域から植物栄養分が供給されている可能性が示唆された。このため、このような環境は外来植物が蔓延しやすい状態であることを行政側に説明するとともに、これらの植物を除去することも重要ではあるが、これらの植物が蔓延する原因となっている周辺環境からの植物栄養分の流入にも注意する必要があることを指摘した。以上の指摘を受けて、今後、これらの地域における外来植物の蔓延防止策を継続して検討することとなった。

上記の②のケースは、造成中あるいは造成後間もない道路法面（斜面）であり、セイタカアワダチソウが法面の大部分を覆い蔓延していた。この場所では、セイタカアワダチソウ以外にも、セイバンモロコシやハルジオンといった外来植物が生育している一方で、チガヤやススキなどの在来植物も生育が確認された。調査対象地の土壌は、新しい火山灰の影響を受けたものであり、ある程度粘土も含まれていた。土壌pH (H_2O) は6.3~7.1と弱酸性~弱アルカリ性の範囲にあり、また土壌中有効態リン酸は5~36 mg P_2O_5 $100g^{-1}$ の範囲内にあった。このことから、今後、定期的な刈取りなどを実施するなど、貧栄養的な管理を継続的に続けることによって、セイタカアワダチソウを衰退させることができる可能性があることを、行政側に報告した。また、同時に、セイタカアワダチソウの抑制および在来植物による植生管理を早期に実施したい場合には、サブテーマ(4)で得られた研究成果である塩化アルミニウム処理の可能性を報告した。この報告を受けて、行政側では塩化アルミニウム処理試験を小規模で実施することとなり、2013年4月、この小規模試験が開始された。鹿児島県では、今後、この小規模試験の推移をみながら、道路法面における植生管理手法を検討していくこととなった。また、本調査の過程において、道路法面の造成および緑化の行程において、肥料成分や石灰資材が比較的多量に混入されていることも分かった。このことから、今後は法面緑化においてもできるだけ肥料成分や石灰資材の投入を減らすよう提案を行った。

上記の③のケースは、河川敷内の緑地公園であり、セイタカアワダチソウ、オオマツヨイグサ、アカツメクサといった外来植物が蔓延していた。また、在来植物では、オギ、カスマグサ、スイセンなどが生育していた。これらの調査対象地の土壌は、やや砂を含む粘土質のものが大部分であり、土壌pH (H_2O) が6.2~7.1、土壌中有効態リン酸が29~44 mg P_2O_5 $100g^{-1}$ と、いずれも高い範囲内にあった。これらの土壌特性から、現状の状態では外来植物が蔓延しやすい状態であることを行政側に報告した。また、同時に、今後定期的な刈取りを実施するなど貧栄養的な管理を継続的に続けることによってセイタカアワダチソウを衰退させることができる可能性があること、およびセイタカアワダチソウの抑制および在来植物による植生管理を早期に実現したい場合には、サブテーマ(4)で得られている研究成果である塩化アルミニウム処理の可能性を報告した。この報告を受けて、行政側では、なぜ土壌中有効態リン酸が高い値となっているかを調査・検討するとともに、今後に向けてセイタカアワダチソウ対策をさらに継続検討することとなった。

以上、本研究は、着手後3年ほどであるにもかかわらず、多くの行政ニーズに対応し、その研究成果は多くの場面で活用されていると考えられる。

＜行政が活用することが見込まれる成果＞

本研究により得られた成果は、草原再生に向けてどのような土壌環境を目標に管理したらよい

かを決定するうえで重要な情報を提供する。たとえば、オミナエシ、ミツバツチグリ、シラヤマギク、キジムシロといった日本の半自然草原に典型的に出現する在来野草類を保全しようとした場合には、土壌酸性が強く、かつ土壌中有効態リン酸が低い状態を維持することが有効であると考えられる。とくに、阿蘇くじゅう国立公園や大山隠岐国立公園のように、半自然草原が長期間維持されてきた場所では、土壌は酸性が強くかつ貧栄養的な状態で維持されてきたと考えられ、結果としてこのような状態の土壌に適応している植物が維持されてきたものと考えられる。そのため、これらの国立公園の中でも草原景観を従来からの状態で維持しようとした場合には、土壌酸性が強く、かつ貧栄養的な状態を維持することが重要であると考えられる。そのためには、これらの地域内に肥料成分や石灰資材をできるだけ持ち込まないように注意が必要であると考えられる。たとえば、道路造成の際の法面緑化工事においても、肥料成分や石灰資材の投入量は、十分検討の上、最小限にとどめる必要があると考えられる。

また、本研究により得られた知見は、草原の再生がどのような土壌環境において実現されやすいのかを予測したり、回復効果が高い場所を効率的に選定したりするうえでも重要な情報となる。すなわち、一度改良草地として利用した履歴がある草原は、土壌酸性が弱められており、また土壌中有効態リン酸も高まっている場所が多く、こういった場所では刈取り等によって草原植生を復元しようとしても、外来植物が蔓延しやすいため、草原再生が効果的に実現されにくいと考えられる。これに対して、改良草地として利用した履歴がなく、肥料成分や石灰資材の投入が行われていない場所では、土壌酸性や土壌中有効態リン酸は従来の半自然草原における値を保っている場合が多く、そのためこのような場所では刈取り&持ち出し等によって草原植生を試みれば、従来の半自然草原に典型的な在来植物が早期に戻ってくる可能性が高いと考えられる。このように、草原再生にあたっては、あらかじめ対象となる地域の土壌特性を調べておけば、草原再生が効果的に行われる場所を推定することが可能であると考えられる。

また、草原再生において障害となっている外来植物の蔓延についても、その防止策を講ずる上で重要なヒントを与えると考えられる。たとえば、要注意外来生物であるセイタカアワダチソウは、成長速度が早いこと、植物体が大型であること、刈取りに対する抵抗性が強いこと、除草剤などに対する抵抗性が強いこと、繁殖力が強いことなど、その頑強な生態的特性から防除困難であると理解されることが多かった。しかし、本研究により、そのセイタカアワダチソウも特定の環境を選んで蔓延している様子が明らかになった。とくに、セイタカアワダチソウは土壌酸性が強い環境では旺盛に生育することができず、蔓延しないものと考えられる。このため、セイタカアワダチソウは、道路法面やその周辺あるいは建物の周囲といった人為的に改変された環境に限って蔓延していることが多く、逆に従来からの土壌特性が維持されている場所では蔓延できない可能性があると考えられる。このように、外来植物が分布しやすい土壌環境とともに分布しにくい土壌環境についても情報を整理し、同時に国立公園等外来植物の蔓延を防止したい場所の土壌特性を調査することによって、蔓延防止策を講じる必要性が高い場合／低い場合が、植物種ごとに整理できる。たとえば、蒜山地域のようにもともと土壌酸性が強くかつ土壌中有効態リン酸が低い場所では、セイタカアワダチソウは大きな人為的なインパクトが加えられている場所以外ではほとんど蔓延できないと考えられる。これに対して、肥料成分や石灰資材が多量に投入されてきた履歴を持つ道路法面や耕作放棄地では、セイタカアワダチソウの格好の生育地となる危険性が高いと考えられる。また、これらの情報を整理することにより、これらの植物の蔓延を引き起

こす人為的インパクトについても整理することが可能であると考えられる。たとえば、蒜山地域のようにもともと土壤酸性が強くかつ土壤中有効態リン酸が低い場所では、セイタカアワダチソウが蔓延するためにはリン酸資材および石灰資材の両方の投入が必要であると考えられる。一方、秋吉台地域のような石灰岩台地では、土壤は基岩である石灰岩の影響を受けて広く弱酸性化しているため、リン酸資材が加えられるだけでセイタカアワダチソウが蔓延できる条件が整うと考えられる。このように、本研究により得られた知見は、外来植物の蔓延防止策を講ずる上で、有用な知見を提供するものと考えられる。また、本研究により得られた知見は、外来植物の蔓延リスク評価を行う上でも重要な情報を提供するものと考えられる。

上記以外にも、本研究により得られた成果は、富栄養化がもたらす悪影響の一端を明らかにしており、適正な物質循環と栄養塩管理の重要性を指摘していると考えられる。また、本研究から得られたデータをより詳細に解析することにより、環境指標植物を選定することができると考えられる。

これらの研究成果は、公開シンポジウム、公開講演会、インターネット、学会活動、各種研究集会、保全活動にかかわる団体が主催するセミナーなどを通じて、今後さらに広く広報・普及に努める予定である。このように、本研究は今後も広く環境行政に貢献すると考えられる。

6. 国際共同研究等の状況

本研究は、日本国内における野草類の分布と土壤の化学的特性との関係を調べたものであり、日本国内における独特の植物特性や土壤環境条件を研究対象としている。このため、国際共同研究は当初は考慮に入れていなかった。しかし、研究が予想以上に進捗し、また得られた結論も国際的に注目されるものであると考えられることから、本研究プロジェクト後半においてとくに多くの海外の研究者と本研究成果に関する意見交換を行った。たとえば、アメリカ合衆国メイン州立大学のSusan M. Erich教授（専門：土壤化学）は、JSPS欧米短期外国人招へい研究者として、平成25年2～4月、（独）農業環境技術研究所に滞在した。その間、日本における在来野草類の保全に関する問題や、外来植物の蔓延に関する問題、および土壤環境の保全手法について頻繁に意見交換を行った。Erich教授は、アメリカ合衆国においても外来植物の蔓延に関わる問題は大きく、本研究成果は明快なデータを示しており、非常に重要であると評した。また、Erich教授と帯同して来日した同大学のTsutomu Ohno教授（専門：土壤学）とも意見交換を行い、土壤中においてリン酸がどのような化学形態で存在しているのか、今後さらに明らかにする必要があるとの認識で一致した。これを受けて、今後、土壤中のリンの化学形態について、核磁気共鳴など最新の分析機器を用いて研究を共同で進めることとなった。また、JSPS二国間交流事業においては、埼玉大学の川本 健教授（プロジェクトリーダー）、Brent Clothier博士（The New Zealand Institute for Plant & Food Research Limited）、およびKarin Mueller博士（同研究所）とともに、土壤中における物質の移動に関する共同研究を実施しているが、その中で土壤の化学的特性によって植物の分布が大きな影響を受けている現象について説明を行ったところ、非常に強い関心が示された。この共同研究では、日本と同様に新しい火山灰土壤が分布する湿潤温暖な地域としてニュージーランドを共同研究の相手先として選定し、それぞれの地域の土壤中における物質循環およびそのプロセスのモデル化を行う。土壤中における物質循環の違いによって植物の分布が異なるのであれば、この共同研究のアウトプットもさらに大きな意義が生まれるため、今後、生態系に

対する影響も考慮に入れながら共同研究を進めることとなった。

今後は、本研究で得られた知見を国際誌に発表する予定であるため、さらに国際共同研究は進展するものと期待される。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) T. KOYANAGI, Y. KUSUMOTO, S. HIRADATE, S. MORITA, M. YOKOGAWA, Y. TAKAHASHI and C. SATO: *Applied Vegetation Science*, **16**, 95-109 (2013)
“New method for extracting plant indicators based on their adaptive responses to management practices: application to semi-natural and artificial grassland data”

<その他誌上発表(査読なし)>

- 1) 平舘俊太郎、楠本良延、吉武 啓、馬場友希：身近な自然の保全生態学、生物の多様性を知る（根本正之編著）、131-148, 培風館（2010）
「土壌が支える生物多様性」
- 2) 和田信一郎、金田吉弘、鳥山和伸、安西徹郎、日笠裕治、小祝政明、後藤逸男、平舘俊太郎：日本土壌肥料学雑誌, 82(2), 173-178 (2011)
「土壌診断の現状と今後への挑戦：流派そろい踏み」
- 3) 平舘俊太郎、松永俊朗、和田信一郎、渡邊 彰：日本土壌肥料学雑誌, 第82巻, 部門別進歩総説特集号 82, 466-478 (2011)
「第2部門 土壌化学・土壌鉱物」
- 4) 平舘俊太郎：農環研ニュース、**96**, 10 (2012)
「公開シンポジウム「阿蘇の草原に生きる植物と土壌」」

(2) 口頭発表(学会等)

- 1) 平舘俊太郎：日本土壌肥料学会講演要旨集第56集、208, (2010)
「生物多様性と土壌診断」
- 2) 平舘俊太郎、白川勝信、森田沙綾香、小柳知代、中西亮介、楠本良延、太田陽子、大竹邦暁、佐久間智子、堤 道生、高橋佳孝：日本生態学会第58回全国大会、P1-023 (2011)
「半自然草地における植物の分布と土壌特性の関係：広島県雲月山における放牧地と非放牧地の比較」
- 3) 森田沙綾香、平舘俊太郎、藤井義晴：日本雑草学会第50回講演会講演要旨、56(I), 103 (2011)
「ネズミムギとオオアワガエリの土壌の化学的特性に対する生育反応」
- 4) 平舘俊太郎、白川勝信、高橋佳孝、堤道生、太田陽子、井上雅仁、佐久間智子、千布拓生、森田沙綾香、小柳知代、楠本良延：日本土壌肥料学会講演要旨集第57集、149 (2011).
「広島県北広島町千町原の半自然草地における植物の分布と土壌特性の関係」
- 5) T. KOYANAGI, Y. KUSUMOTO, S. MORITA, S. HIRADATE, S. YAMAMOTO, S. OKUBO, K. TAKEUCHI : The 8th World Congress of the International Association for Landscape Ecology, Beijing,

China, 2011

“History of Satoyama landscapes: Empirical examples of the impacts of past landscape changes on the present grassland species distribution”

- 6) Y. KUSUMOTO, T. KOYANAGI, S. MORITA, S. HIRADATE, K. SHIRAKAWA, M. INOUE, M. YOKOGAWA, T. CHIBU, Y. OHTA, M. TSUTSUMI, Y. TAKAHASHI, S. ISHIKAWA : 日本生態学会第59回全国大会、JP3-174J (2012) .

“The relation between species diversity of semi-natural grassland and chemical property of soil in Shiozuka plateau, Japan. ”

- 7) 楠本良延 : 日本生態学会第59回全国大会、T03-5 (2012)
「わが国における半自然草地の減少とその要因」
- 8) 平舘俊太郎、森田紗綾香、小柳知代、楠本良延 : 日本生態学会第59回全国大会、T03-5 (2012)
「土壌環境から考える二次草原の再生 : わかってきた野草類の土壌環境適性」
- 9) T. KOYANAGI, S. HIRADATE, Y. KUSUMOTO, S. MORITA, M. YOKOGAWA, Y. TAKAHASHI : 日本生態学会第59回全国大会、I1-09 (2012) .
“Effects of grassland management can be modified by soil pH differences: a case study of burned and mowed semi-natural grasslands in Aso, Japan”
- 10) 森田紗綾香、楠本良延、小柳知代、横川昌史、高橋佳孝、伊藤豊彰、平舘俊太郎 : 日本土壌肥料学会講演要旨集第58集、125 (2012).
「外来植物の分布に影響を及ぼす土壌特性の影響 : アロフェン黒ぼく土と非アロフェン黒ぼく土の比較」
- 11) 平舘俊太郎 : 日本生態学会第60回全国大会 自由集会 (2013)
「土壌と植生の深いつながり」
- 12) 小柳知代 : 日本生態学会第60回全国大会 自由集会 (2013)
「草原植物の分布と土壌の化学的特性の関係」

(3) 出願特許

- 1) 平舘俊太郎、楠本良延、藤間 充、荒木陽子 : 独立行政法人農業環境技術研究所 ; 「植生の制御方法」、特許出願 (特願2011-044614) , 出願日 : 平成23年3月2日 .

(4) シンポジウム、セミナー等の開催 (主催のもの)

- 1) 平舘俊太郎 : セミナー講演、平成22年6月1日、北里大学 (観客約60名) .
「外来植物の侵入・定着と土壌の化学的特性の関係」
- 2) 平舘俊太郎 : セミナー講演、現地学習会「秋吉台草原の保全と再生を考える」、平成22年9月26日、秋吉台科学博物館 (観客約30名) .
「野草類の土壌環境に対する生育特性と草原の再生技術」
- 3) 楠本良延 : 講義、平成22年11月25日、財団法人 農民教育協会 鯉淵学園農業栄養専門学校 (観客約40名) .
「農村環境に生育する植物群落の特徴と紹介」
- 4) 平舘俊太郎 : 講義、平成23年1月12日、財団法人 農民教育協会 鯉淵学園農業栄養専門学校

（観客約40名）。

「多様な土壤環境に生育する多様な植物たち：その生育戦略」

- 5) 平舘俊太郎：講義、平成23年1月13日、東京農業大学（観客約160名）。

「植物の生育と土壤環境」

- 6) 「半自然草地の現状と再生」（平成24年3月18日、日本生態学会第59回全国大会：於龍谷大学、観客約100名）

- 7) 平舘俊太郎、楠本良延、森田沙綾香、小柳知代：公開シンポジウム開催、平成24年6月2日、国立阿蘇青少年交流の家、観客約80名）

シンポジウムタイトル「阿蘇の草原に生きる植物と土壤：わかってきた植物ごとに好きな土壤」

講演：「阿蘇の草原が持つ価値とその危機」（横川昌史）

講演：「植物と土壤の間の切っても切れない関係」（平舘俊太郎）

講演：「阿蘇の植物の分布と土壤特性の関係：とくに盆花やセイタカアワダチソウについて」（小柳知代）

講演：「阿蘇の植物が必要とする栄養分について：とくに盆花やセイタカアワダチソウについて」（森田沙綾香）

講演：「これからの草原の管理に向けて：刈取りや野焼きなどの伝統的管理が阿蘇の野草を守る」（楠本良延）

総合討論（司会&総合コーディネーター：高橋佳孝、平舘俊太郎）

- 8) 平舘俊太郎、森田沙綾香：ポスター発表、第9回 全国草原サミット・シンポジウムinみなかみ、平成24年10月28～29日、みなかみ町立藤原小中学校（観客約100名）

「外来植物の侵入は土壤pHと土壤有効態リン酸に関連している」

- 9) 平舘俊太郎、森田沙綾香：ポスター発表、第9回 全国草原サミット・シンポジウムinみなかみ、平成24年10月28～29日、みなかみ町立藤原小中学校（観客約100名）

「ススキ、ヨモギ、セイタカアワダチソウが分布する土壤環境」

- 10) 平舘俊太郎：講演、農業環境技術研究所研究成果発表会2012、平成24年11月30日、新宿明治安田生命ホール（東京都新宿区、観客185名）

「セイタカアワダチソウを抑えて在来植生に戻す」

- 11) 日本の草原に生きる植物と土壤（平成25年3月5日、日本生態学会第60回全国大会：於静岡県コンベンションアーツセンター（グランシップ静岡）、観客約80名）

（５）マスコミ等への公表・報道等

- 1) プレスリリース（2011年12月19日、於：農林水産技術会議事務局筑波事務所、「外来植物のセイタカアワダチソウを衰退させ在来植物を中心とする植生に誘導する：土壤環境をコントロールしてセイタカアワダチソウの蔓延を防ぐ」）
- 2) 茨城新聞（2011年12月20日、地域版、21面、「セイタカアワダチソウ対策：塩化アルミで駆逐、農環研が開発」）
- 3) 常陽新聞（2012年1月3日、地域版、7面、「粉状アルミ散布で酸性土壤に：外来植物衰退の技術開発、つくば農環研、在来植物の回復に期待、農耕地周辺の緑化にも活用」）

- 4) 朝日新聞（2012年1月4日、全国版夕刊、3面、「環境：さらばセイタカアワダチソウ、農環研、除草剤使わず駆除成功」）
- 5) 朝日小学生新聞（2012年1月6日、全国版、1面、「外来種セイタカアワダチソウ、除草剤使わずに駆除」）
- 6) 毎日新聞（2012年1月9日、全国版、2面、「「迷惑」外来種セイタカアワダチソウ：土壌酸性化でまん延を防止」）
- 7) FM山口（2012年1月9日）
- 8) 日本農業新聞（2012年1月10日、全国版、14面、「セイタカアワダチソウ“退治”：粉状アルミニウム有効、農環研、効果は「半永久的」」）
- 9) 産経新聞（2012年1月26日、茨城版、13面、「外来植物セイタカアワダチソウ、新技術で駆除」）
- 10) 山陰中央新報（2012年1月29日）
- 11) 山口新聞（2012年1月29日、「半年で外来植物駆除：農環研、土壌の酸性度高め」）
- 12) 新幹線車両内テロップ（2012年1月29日）
- 13) 毎日新聞（2012年1月29日、17面、「外来種駆除の新方法に期待」）
- 14) しんぶん赤旗（2012年1月30日、全国版、「科学：セイタカアワダチソウ、外来種アルミで駆除；在来種守る土壌改変技術を開発」）
- 15) 日本経済新聞（平成24年11月11日、全国版、17面、ナゾ謎かがく「外来植物、被災地の農地で増殖」肥料の大量投入に警鐘）
- 16) TBS（平成24年11月20日、Nスタ（16:53-17:55、ニュース番組）の中で、福島県原発事故現場付近にて蔓延しているセイタカアワダチソウの特集の中で、その原因についてコメントをしているインタビューが数分間放送された）

（6）その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) 小椋純一：森と草原の歴史ー日本の植生景観はどのように移り変わってきたのか。古今書院（2012）.
- 2) 平舘俊太郎：外来植物が好きな土、在来植物が好きな土。圃場と土壌、39(5), p. 30-38 (2007).
- 3) 平舘俊太郎・森田沙綾香・楠本良延：土壌の化学的特性が外来植物と在来植物の住み分けに与える影響。農業技術、63(10), p. 469-474 (2008).
- 4) 平舘俊太郎・森田沙綾香・楠本良延：外来植物と在来植物の住み分け：これからの植生制御に向けて。関東雑草研究会報、19, p. 23-33 (2008).
- 5) M. SAIGUSA, S. SHOJI, T. TAKAHASHI: Plant root growth in acid Andosols from northeastern Japan: 2. exchange acidity Y1 as a realistic measure of aluminum toxicity potential. *Soil Science*, **130**, 242-250 (1980).
- 6) SOIL NUTRIENTS ANALYSIS COMMITTEE. Exchange acidity. Soil Nutrients Analysis, Yokendo Co., Ltd., Tokyo. pp. 29-32 (1980).

- 7) J. MURPHY, J.P. RILEY: A modified single solution method for determination of phosphate in natural waters. *Analitica Chimica Acta*, **27**, 31-36 (1962).

(2) 野草類に含まれる無機栄養元素組成の解明

(独) 農業環境技術研究所 生物多様性研究領域

平舘俊太郎 (上席研究員)

楠本良延 (主任研究員)

< 研究協力者 >

(独) 農業環境技術研究所 生物多様性研究領域

森田沙綾香 (P D)

小柳知代 (P D) (平成22～23年度のみ)

平成22～24年度累計予算額：24,024千円

(うち、平成24年度予算額：10,026千円)

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

野草類に含まれる無機栄養元素の組成を明らかにするため、日本各地の14草原の1500地点にて13101点の植物試料を採取し、化学分析を実施した。その結果、野草類はそれぞれ特徴的な植物栄養学的特性を持っていることが明らかになった。具体例を挙げると、典型的な半自然草原に出現する在来植物であるオミナエシ、ミツバツチグリ、シラヤマギク、キジムシロは、いずれも植物体内がPに関して貧栄養的であり、このことが土壌中有効態リン酸の低い環境でも生育可能である要因になっていると考えられた。一方、外来植物であるセイタカアワダチソウ、シロツメクサ、オオアワガエリ、ハルガヤは、植物体中P濃度が高いため、植物体のPに対する要求性は高いと考えられた。これ以外の多くの植物についても、またN, Ca, K, Mg等の無機元素についても、多くの有用な情報を得ることができた。本研究のように、日本に分布している主な野草類について、その植物栄養学的特性を系統的に明らかにし、その特徴の違いを植物種ごとに明確に示したのは、本研究が初めてである。これらの研究成果は、サブテーマ(1)にて得られた野草類の分布と土壌の化学的特性の関係を、植物栄養学的側面からサポートするものでもある。本研究成果により、ある植物を保全するためにはその植物にとって適する土壌環境を整備することが非常に重要であることが支持された。本研究では、実際に、行政からの要望に応じて、長野県、鹿児島県、福井県において、外来植物の蔓延要因としての土壌環境を調査し、本研究で得られた成果をもとに、外来植物の蔓延防止および在来植物の回復に向けた今後の管理法などに関してアドバイスを行った。本研究における成果は、今後さらに、草原再生のための土壌管理法の策定、草原再生の効果の予測と効率的な再生候補地の選定、外来植物の蔓延防止策の策定やリスク評価などに利用することが期待される。

[キーワード]

草原生植物、植物必須元素、植物必須多量元素、植物必須微量元素、植物無機栄養元素組成

1. はじめに

植物の生育にとって必要不可欠なものとして、光、水、空気、温度に加えて、植物無機栄養元素が挙げられる。この中で、光、水、空気、温度は、地理的および気象的要因によってほぼ決まるものであるが、植物無機栄養元素は地理的および気象的要因以外の局所的要因によっても大きく左右される。たとえば、これら植物無機栄養元素の中でも最も植物による吸収量が多い窒素は土壌表層に蓄積されているため、崖崩れや風食・水食等によって土壌表層が失われると、植物に対する窒素の供給量は激減することになる。また、施肥や土壌改良資材の投入といった人為的な要因によっても土壌中の植物無機栄養元素濃度は簡単に激変する。

植物にとって必須な無機栄養元素には、必要量が概ね1000ppm (0.1%) を越える必須多量元素と、それ以下の必須微量元素がある¹⁾。必須多量元素には、酸素 (O)、炭素 (C)、水素 (H)、窒素 (N)、カリウム (K)、カルシウム (Ca)、マグネシウム (Mg)、リン (P)、イオウ (S) があり¹⁾、このうちN、K、Ca、Mg、P、Sについては、植物はその大部分を土壌を介して根から吸収する必要がある。植物必須微量元素には、塩素 (Cl)、ホウ素 (B)、鉄 (Fe)、マンガン (Mn)、亜鉛 (Zn)、銅 (Cu)、ニッケル (Ni)、モリブデン (Mo) があり¹⁾、これらの元素についても、植物は大部分を土壌から吸収する必要がある。これらの必須無機栄養元素は、いずれの植物にとっても必要不可欠であり、その体内濃度は低すぎてもまた高すぎても正常な生育をすることはできない。

土壌中の無機元素は、植物にとって有益なものばかりではなく、有害なものもある。たとえば、アルミニウム (Al) は、土壌を構成する主要な元素であるにもかかわらず、ほとんどの植物の生育にとって有害である。ただし、Alが植物生育障害をひき起こすためにはAlイオン (Al^{3+}) の形で水中に溶存する必要がある、このような状況は土壌pHが5~5.5あるいはそれ以下の酸性土壌に限られる²⁾。Al以外にも、強酸性土壌や鉱山周辺の土壌には、クロム (Cr)、スズ (Sn)、鉛 (Pb)、といった重金属元素の濃度が高くなっている場合があり、これらも多くの植物の生育に対して障害を起こす。また、植物栄養元素であっても土壌中における濃度が高すぎる場合には、植物の生育を妨げる場合がある。NiやCuの過剰症は、その有名な例である。

植物が必要とする無機栄養元素の体内濃度あるいは植物生育に障害をもたらす元素の体内濃度は、植物の種ごとにさまざまである。例えば、一般に植物体中のCa濃度は、イネ科植物よりも双子葉植物の方が高い。これは、イネ科植物ではCaの機能の一部をケイ素 (Si) で代替しているためと考えられている。これ以外にも、マメ科植物は、根に共生している微生物からNが供給されるため、植物体内におけるN濃度は高いにもかかわらず、土壌からのNの吸収量は必ずしも高くない。また、ルーピンなどは根から有機酸を分泌することにより土壌中の難溶性Pを可溶化させて獲得するため体内P濃度が高い²⁾。一方、植物有害元素に対する植物の反応も様々である。たとえば、強酸性土壌で生育可能な植物は、Al毒性に対する何らかの耐性を持っていると考えられ、たとえばアジサイは体内でAlをクエン酸と結合させて無毒化していること、またある種のコムギは根からリンゴ酸を放出することにより体内に Al^{3+} を取り込まないようにしていることなどが知られている²⁾。また、ある種の植物は、Cd、Cr、Cu、Ni、Znといった重金属元素を植物体内に多量に蓄積することができる³⁾と報告されている。

このように、植物体内における無機元素組成は植物種ごとに特徴があると考えられる。そして、植物体内における無機元素組成は、その植物種が持つ独特の植物養分要求性あるいは植物栄養学

的特性を反映していると考えられる。植物養分要求性あるいは植物栄養学的特性は、その植物がどのような土壌環境に分布しやすいかを説明しうる基礎的情報であると考えられる。たとえば、NやPの体内濃度が高い植物は、NやPに対する要求性が高く、そのためNやPに関して富栄養的な土壌環境に分布しやすいと考えられる。逆に、こういった植物は、NやPに関して貧栄養的な土壌環境では、植物栄養元素が不足するため、分布しにくいと考えられる。このような情報は、植物が土壌の化学的特性に応じて分布を変える現象を理論的に説明しうるものであり、本研究課題全体の科学的基礎を支える重要なものである。しかし、植物無機元素組成が明らかにされているのは主として栽培植物であり、野草類についてはほとんど調べられていないのが現状である。

2. 研究開発目的

本研究では、野草類を対象に、植物体内における無機元素組成を明らかにし、これをもとにそれぞれの植物の無機栄養元素に対する要求性を明らかにするとともに、その植物の土壌環境に対する生育適性を解明することを目的としている。調査対象とする無機元素は、多量必須元素であるC、N、K、Ca、Mg、P、微量必須元素であるB、Fe、Mn、Zn、Cu、Ni、Moであるが、有害元素として、Al、Cd、Co、Cr、Na、Pb、Snも加える。ただし、分析感度には限界があるため、主要元素については定量分析を行うが、それ以外の低濃度元素については異常蓄積が起こっているか否かのチェックを行うことを目的とする。

植物体内における無機元素組成に関する研究では、これまではとくにC/N比およびC/P比に注目した研究が多い。これは、必須多量元素であるNおよびPは、植物の生育に対してとくに大きな影響を及ぼしていると考えられるためである。NおよびPは、植物体内における機能も明らかになっており、C/N比およびC/P比を調べれば、NおよびPに関する植物の栄養状態の判断ができるとの報告もある。また、植物体内におけるAl濃度を調べれば、植物の酸性土壌耐性のうち、Alを体内で解毒するメカニズムの有無について判断できると考えられる。また、植物体内Ca濃度も、植物の土壌酸性耐性に関するパラメータとなりうると考えられる。

そこで本研究では、日本に生育する主な野草類についてその無機元素組成を明らかにするために、課題実施期間（平成22～24年度）を通じて、500地点以上の調査地点から合計5000点以上の植物試料を採取し、化学分析に供試することを目標とした。得られた無機元素組成データは、植物種ごとに解析を実施し、それぞれの植物種の植物栄養学的特性を明らかにする。

3. 研究開発方法

（1）植物体試料

本研究課題の実施期間（3年間）を通じて採取した植物試料数について表(2)-1にまとめた。研究開始当初に目標としたのは、10地区以上において合計で植物試料数5000点以上を収集することであったが、これを大幅に超える14地区13101点の植物試料を採取できた。出現した主な草原植生タイプは、ススキ型（半自然草原タイプ）、シバ型（半自然草原タイプ）、チガヤ型（半自然草原タイプ）、畦畔型（半自然草原タイプ、人工改変タイプ）、改良草地型（人工改変タイプ）、放棄草地型（人工改変タイプ）、風衝草地型（自然草原タイプ）であり、日本に見られる主な草原植生タイプをほぼ網羅することができた。

表(2)-1. 本研究において採取した植物試料の数と採取地における主な草原タイプ

地方名	県名	調査地	主な草原植生タイプ	植物試料数
東北	青森県	十和田・三戸	改良草地型、畦畔型、放棄草地型	794
	岩手県	早坂高原	風衝草地型、シバ型、改良草地型、放棄草地型	1209
関東	茨城県	稲敷台地	ススキ型、畦畔型、改良草地型、放棄草地型	622
	神奈川県	茅ヶ崎	放棄草地型	53
中部	東京都	小笠原	シバ型、風衝草地型、放棄草地型	596
	静岡県	富士根原	ススキ型、改良草地型	885
関西	兵庫県	宝塚	放棄草地型、畦畔型	319
中国	岡山県	蒜山	ススキ型、改良草地型、放棄草地型	636
	島根県	三瓶	ススキ型、改良草地型	854
	広島県	芸北	シバ型、ススキ型、改良草地型、放棄草地型	1226
	山口県	山口	ススキ型、改良草地型	1248
四国	愛媛県・徳島県	塩塚	ススキ型、改良草地型、放棄草地型	791
九州	熊本県	阿蘇	ススキ型、シバ型、改良草地型、放棄草地型	3316
沖縄	沖縄県	石垣	ススキ型、チガヤ型、改良草地型、放棄草地型	552
合計				13101

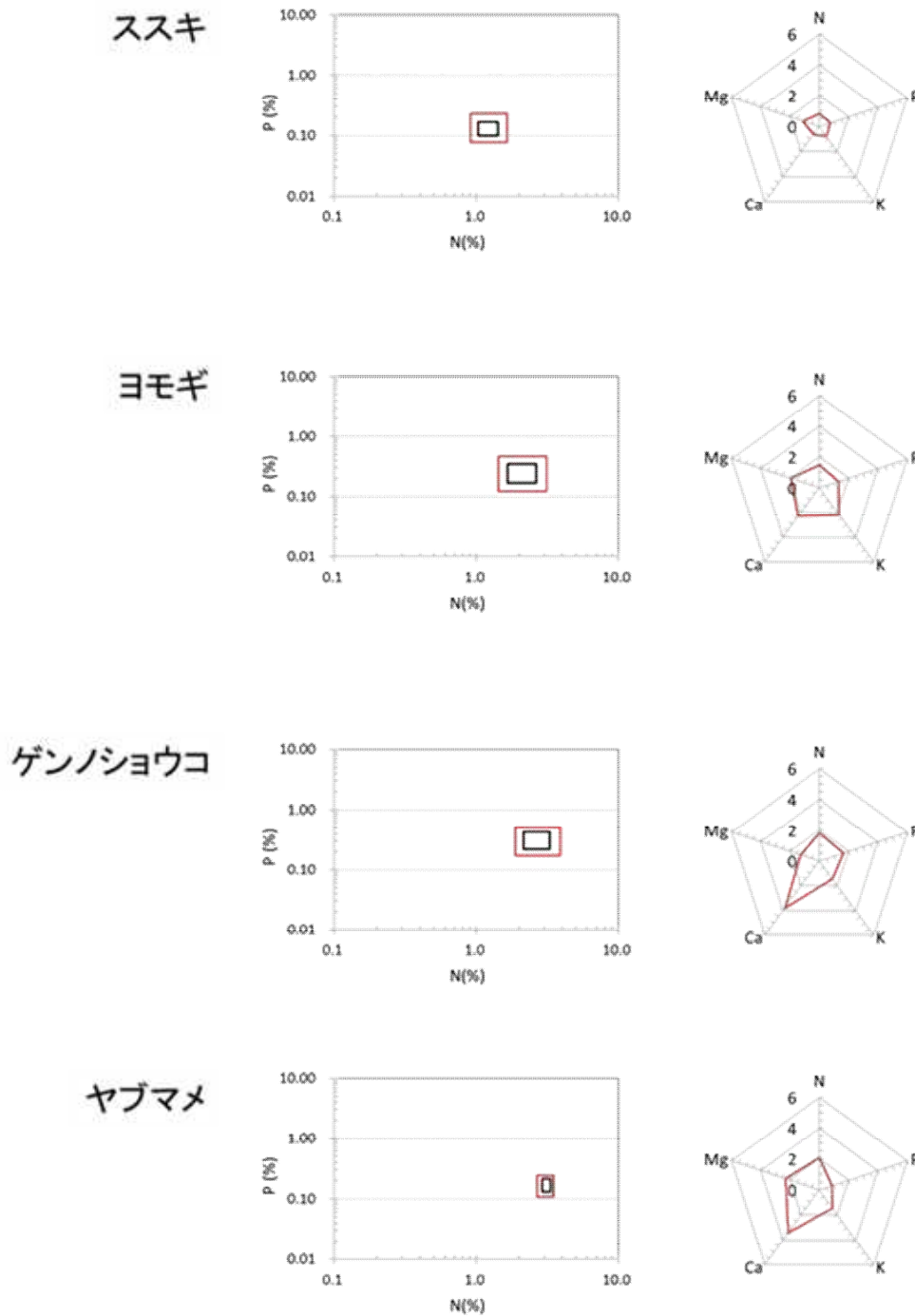
植物採取時には、植物体に土壌など植物体以外の夾雑物が混入しないように注意しながら地上部をハサミで切り取った。必要に応じて、植物体の表面を水洗した。採取した植物試料は新聞紙に挟み、野冊でプレスし、実験室に持ち帰った。野外調査地から実験室までは、必要に応じて冷蔵状態を保持した。実験室に持ち帰った植物試料は、60℃の通風乾燥機内で乾燥させた後、葉部を約1g採取し、振動式ミニカップミル（MC-4A、粉碎容器およびボール：ジルコニア製、伊藤製作所製）にて直径数ミクロンまで微粉碎し、化学分析用の植物粉末試料とした。

（２）植物体中無機元素濃度の分析

植物粉末試料中のCとNの濃度は、植物粉末試料を直接NCアナライザー（Sumigraph NC-22F, Sumika Chemical Analysis Service）に導入することにより分析した。また、植物粉末試料中のK、Ca、Mg、P、B、Fe、Mn、Zn、Cu、Ni、Mo、Al、Cd、Co、Cr、Na、Pb、Snの濃度は、植物粉末試料を硝酸－過酸化水素により湿式分解後、誘導結合プラズマ発光分光（ICPAES: Induced Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy, VISTA, Agilent Technologies）により分析した。なお、湿式分解の前に内部標準物質としてInを加え、ICPAESによる分析の際にはInが約1ppmとなるように調製した。得られたデータは、植物種ごとに、植物体内無機元素濃度としてとりまとめた。

４．結果及び考察

植物の生育は、とくにNおよびPによって大きく左右されることが知られている。このため、本研究でもNとPの体内濃度の測定結果を中心にとりまとめるとともに解析した。また、NとP以外の必須多量元素であるCa、K、およびMgについては、NとPとともに、平均的な植物が適切な生育のために必要とする地上部無機栄養元素濃度（Epstein, 1965）⁴⁾に対して対象の植物体内における元素濃度が何倍であったかを算出した。これらの結果の一部を、図(2)-1～図(2)-3に示した。

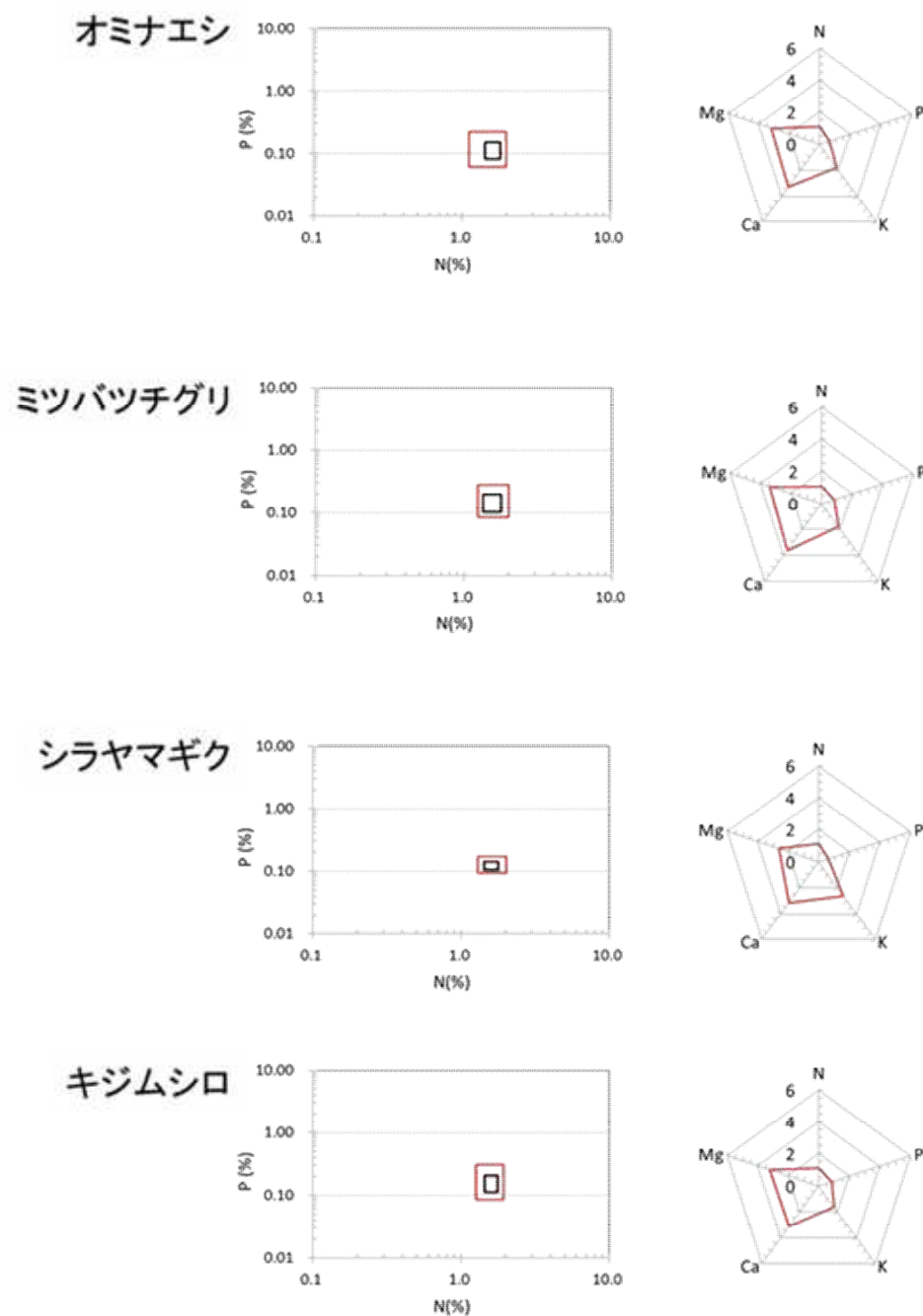


図(2)-1. 日本の草原植生に広く分布する在来植物であるススキ、ヨモギ、ゲンノショウコ、ヤブマメの植物体内における元素濃度。

左図の黒枠（左図中の内側の四角内）：本研究において調査対象植物種の50%が分布する元素濃度の範囲。

左図の赤枠（左図中の外側の四角内）：本研究において調査対象植物種の80%が分布する元素濃度の範囲

右図：植物が適切な生育のために必要な無機栄養元素の地上部における平均濃度（Epstein, 1965）⁴⁾に対して、対象の植物体内における元素濃度が何倍であったかを示す。



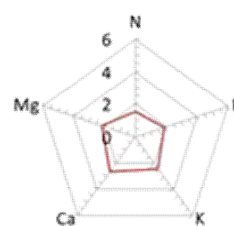
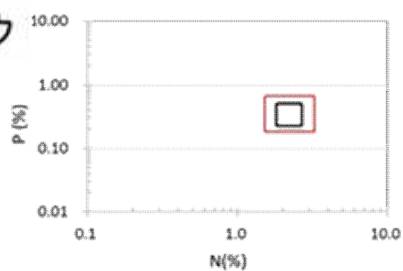
図(2)-2. 日本の典型的な半自然草原に出現する在来植物であるオミナエシ、ミツバツチグリ、シラヤマギク、キジムシロの植物体内における元素濃度。

左図の黒枠（左図中の内側の四角内）：本研究において調査対象植物種の50%が分布する元素濃度の範囲。

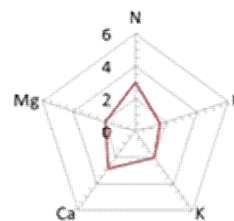
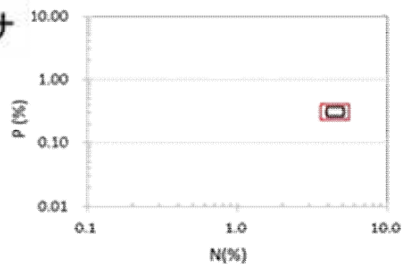
左図の赤枠（左図中の外側の四角内）：本研究において調査対象植物種の80%が分布する元素濃度の範囲

右図：植物が適切な生育のために必要な無機栄養元素の地上部における平均濃度（Epstein, 1965）⁴⁾に対して、対象の植物体内における元素濃度が何倍であったかを示す。

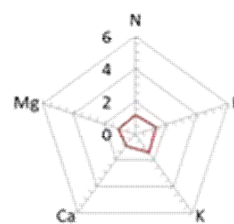
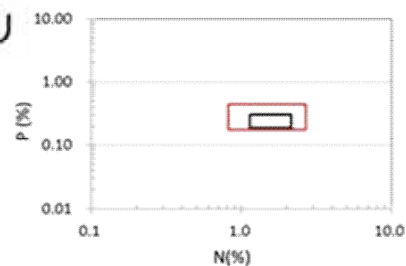
セイトカアワダチソウ



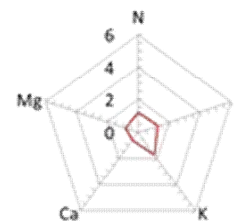
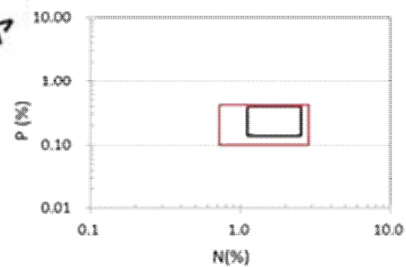
シロツメクサ



オオアワガエリ



ハルガヤ



図(2)-3. 日本の草原植生に出現する外来植物であるセイトカアワダチソウ、シロツメクサ、オオアワガエリ、ハルガヤの植物体内における元素濃度。

左図の黒枠（左図中の内側の四角内）：本研究において調査対象植物種の50%が分布する元素濃度の範囲。

左図の赤枠（左図中の外側の四角内）：本研究において調査対象植物種の80%が分布する元素濃度の範囲

右図：植物が適切な生育のために必要な無機栄養元素の地上部における平均濃度（Epstein, 1965）⁴⁾に対して、対象の植物体内における元素濃度が何倍であったかを示す。

（１）日本の草原植生に広く分布する在来植物（図(2)-1参照）

日本の草原植生に広く分布する在来植物であるススキについては、本研究においては全部で305～306地点から採取した試料を分析し、その結果をとりまとめた。その結果、植物体中N濃度は全体の50%が1.031～1.413%の範囲内に出現しており、また全体の80%が0.911～1.651%の範囲内に出現していた（図(2)-1参照）。Epstein (1965)⁴⁾は、植物が適切な生育のために必要とする地上部N濃度の平均値を1.5%と報告している。このことから、ススキは植物体中のN要求量は低いと考えられた。また、植物体中P濃度は全体の50%が0.099～0.166%の範囲内に出現しており、また全体の80%が0.077～0.227%の範囲内に出現していた。Epstein (1965)⁴⁾は、植物が適切な生育のために必要とする地上部P濃度の平均値を0.2%と報告している。このことから、ススキは植物体中のP要求量は低いと考えられた。また、植物体中Ca濃度の平均値は0.327%であり、Epstein (1965)⁴⁾が報告している平均的な植物地上部Ca濃度である0.5%よりも低かったことから、ススキは植物体中のCa要求量はやや低いと考えられた。また、植物体中K濃度の平均値は0.802%であり、Epstein (1965)⁴⁾が報告している平均的な植物地上部K濃度である1%よりも低かったことから、ススキは植物体中のK要求量はやや低いと考えられた。また、植物体中Mg濃度の平均値は0.220%であり、Epstein (1965)⁴⁾が報告している平均的な植物地上部Mg濃度である0.2%とほぼ同程度であった。このことから、ススキは植物体中のMg要求量は平均的なレベルにあると考えられた。以上の結果から、ススキはN, P, Ca, Kに関して植物体内の要求量が小さく、そのため土壤中においてこれらの元素の供給量が低い環境でも比較的有利に生育できるものと考えられた。このことから、ススキは比較的貧栄養的な土壤環境に適応していると考えられた。

日本の草原植生に広く分布する在来植物であるヨモギについては、本研究においては全部で196地点から採取した試料を分析した。その結果、植物体中N濃度は全体の50%が1.668～2.623%の範囲内に出現しており、また全体の80%が1.432～3.117%の範囲内に出現していた（図(2)-1参照）。Epstein (1965)⁴⁾は、植物が適切な生育のために必要とする地上部N濃度の平均値を1.5%と報告している。このことから、ヨモギは植物体中のN要求量は比較的高いと考えられた。また、植物体中P濃度は全体の50%が0.167～0.344%の範囲内に出現しており、また全体の80%が0.121～0.465%の範囲内に出現していた。Epstein (1965)⁴⁾は、植物が適切な生育のために必要とする地上部P濃度の平均値を0.2%と報告している。このことから、ヨモギは植物体中のP要求量は平均的かやや高いと考えられた。また、植物体中Ca濃度の平均値は1.165%であり、Epstein (1965)⁴⁾が報告している平均的な植物地上部Ca濃度である0.5%よりも2倍以上高かったことから、ヨモギは植物体中のCa要求量は高いと考えられた。また、植物体中K濃度の平均値は2.213%であり、Epstein (1965)⁴⁾が報告している平均的な植物地上部K濃度である1%よりも2倍以上高かったことから、ヨモギは植物体中のK要求量は高いと考えられた。また、植物体中Mg濃度の平均値は0.388%であり、Epstein (1965)⁴⁾が報告している平均的な植物地上部Mg濃度である0.2%の約2倍であった。このことから、ヨモギは植物体中のMg要求量は高いと考えられた。以上の結果から、ヨモギはN, Ca, K, Mgに関して植物体内の要求量が大きく、そのため土壤中においてこれらの元素の供給量が多い環境で比較的有利に生育できるものと考えられた。

日本の草原植生に広く分布する在来植物であるゲンノショウコについては、本研究においては全部で91地点から採取した試料を分析した。その結果、植物体中N濃度は全体の50%が2.153～3.286%の範囲内に出現しており、また全体の80%が1.876～3.875%の範囲内に出現していた（図

(2)-1参照)。Epstein (1965)⁴⁾は、植物が適切な生育のために必要とする地上部N濃度の平均値を1.5%と報告している。このことから、ゲンノショウコは植物体中のN要求量が高いと考えられた。また、植物体中P濃度は全体の50%が0.220~0.426%の範囲内に出現しており、また全体の80%が0.170~0.507%の範囲内に出現していた。Epstein (1965)⁴⁾は、植物が適切な生育のために必要とする地上部P濃度の平均値を0.2%と報告している。このことから、ゲンノショウコは植物体中のP要求量が高いと考えられた。また、植物体中Ca濃度の平均値は1.906%であり、Epstein (1965)⁴⁾が報告している平均的な植物地上部Ca濃度である0.5%よりも3倍以上高かったことから、ゲンノショウコは植物体中のCa要求量が高いと考えられた。また、植物体中K濃度の平均値は1.449%であり、Epstein (1965)⁴⁾が報告している平均的な植物地上部K濃度である1%よりも高かったことから、ゲンノショウコは植物体中のK要求量はやや高いと考えられた。また、植物体中Mg濃度の平均値は0.253%であり、Epstein (1965)⁴⁾が報告している平均的な植物地上部Mg濃度である0.2%よりも高かった。このことから、ゲンノショウコは植物体中のMg要求量はやや高いと考えられた。以上の結果から、ゲンノショウコはN, P, Caに関して植物体内の要求量が大きく、そのため土壤中においてこれらの元素の供給量が多い環境で比較的有利に生育できるものと考えられた。

日本の草原植生に広く分布する在来植物であるヤブマメについては、本研究においては全部で64地点から採取した試料を分析した。その結果、植物体中N濃度は全体の50%が2.897~3.304%の範囲内に出現しており、また全体の80%が2.687~3.495%の範囲内に出現していた（図(2)-1参照）。Epstein (1965)⁴⁾は、植物が適切な生育のために必要とする地上部N濃度の平均値を1.5%と報告している。このことから、ヤブマメは植物体中のN要求量が高いと考えられた。ヤブマメは、マメ科植物であることから、根に共生した根粒菌が空中窒素を固定し、ヤブマメ地上部にNを供給したためと考えられた。また、植物体中P濃度は全体の50%が0.129~0.213%の範囲内に出現しており、また全体の80%が0.108~0.244%の範囲内に出現していた。Epstein (1965)⁴⁾は、植物が適切な生育のために必要とする地上部P濃度の平均値を0.2%と報告している。このことから、ヤブマメは植物体中のP要求量は平均的であるかやや低いと考えられた。また、植物体中Ca濃度の平均値は1.704%であり、Epstein (1965)⁴⁾が報告している平均的な植物地上部Ca濃度である0.5%よりも3倍以上高かったことから、ヤブマメは植物体中のCa要求量が高いと考えられた。また、植物体中K濃度の平均値は1.454%であり、Epstein (1965)⁴⁾が報告している平均的な植物地上部K濃度である1%よりも高かったことから、ヤブマメは植物体中のK要求量はやや高いと考えられた。また、植物体中Mg濃度の平均値は0.460%であり、Epstein (1965)⁴⁾が報告している平均的な植物地上部Mg濃度である0.2%よりも2倍以上高かった。このことから、ヤブマメは植物体中のMg要求量が高いと考えられた。以上の結果から、ヤブマメはCaとMgに関して植物体内の要求量が大きく、そのため土壤中においてこれらの元素の供給量が多い環境で比較的有利に生育できるものと考えられた。

(2) 日本の典型的な半自然草原に出現する在来植物（図(2)-2参照）

日本の典型的な半自然草原に出現する在来植物であるオミナエシについては、本研究においては全部で60地点から採取した試料を分析した。その結果、植物体中N濃度は全体の50%が1.428~1.815%の範囲内に出現しており、また全体の80%が1.116~1.983%の範囲内に出現していた（図(2)-2参照）。Epstein (1965)⁴⁾は、植物が適切な生育のために必要とする地上部N濃度の平均値を1.5%と報告している。このことから、オミナエシは植物体中のN要求量は平均的であると考えられ

た。また、植物体中P濃度は全体の50%が0.082~0.149%の範囲内に出現しており、また全体の80%が0.061~0.216%の範囲内に出現していた。Epstein (1965)⁴⁾は、植物が適切な生育のために必要とする地上部P濃度の平均値を0.2%と報告している。このことから、オミナエシは植物体中のP要求量は低いと考えられた。また、植物体中Ca濃度の平均値は1.646%であり、Epstein (1965)⁴⁾が報告している平均的な植物地上部Ca濃度である0.5%よりも3倍以上高かったことから、オミナエシは植物体中のCa要求量は高いと考えられた。また、植物体中K濃度の平均値は1.796%であり、Epstein (1965)⁴⁾が報告している平均的な植物地上部K濃度である1%よりも高かったことから、オミナエシは植物体中のK要求量はやや高いと考えられた。また、植物体中Mg濃度の平均値は0.633%であり、Epstein (1965)⁴⁾が報告している平均的な植物地上部Mg濃度である0.2%よりも3倍以上高かった。このことから、オミナエシは植物体中のMg要求量は高いと考えられた。以上の結果から、オミナエシはCaとMgに関して植物体内の要求量が大きく、そのため土壌中においてこれらの元素の供給量が多い環境で比較的有利に生育できるものと考えられた。逆に、オミナエシは、Pに対する要求性は低く、このことが土壌中有効態リン酸が低くても分布可能な理由になっていると考えられた。

日本の典型的な半自然草原に出現する在来植物であるミツバツチグリについては、本研究においては全部で140地点から採取した試料を分析した。その結果、植物体中N濃度は全体の50%が1.347~1.789%の範囲内に出現しており、また全体の80%が1.244~2.002%の範囲内に出現していた（図(2)-2参照）。Epstein (1965)⁴⁾は、植物が適切な生育のために必要とする地上部N濃度の平均値を1.5%と報告している。このことから、ミツバツチグリは植物体中のN要求量は平均的であると考えられた。また、植物体中P濃度は全体の50%が0.100~0.196%の範囲内に出現しており、また全体の80%が0.083~0.283%の範囲内に出現していた。Epstein (1965)⁴⁾は、植物が適切な生育のために必要とする地上部P濃度の平均値を0.2%と報告している。このことから、ミツバツチグリは植物体中のP要求量はやや低いと考えられた。また、植物体中Ca濃度の平均値は1.811%であり、Epstein (1965)⁴⁾が報告している平均的な植物地上部Ca濃度である0.5%よりも3倍以上高かったことから、ミツバツチグリは植物体中のCa要求量は高いと考えられた。また、植物体中K濃度の平均値は1.802%であり、Epstein (1965)⁴⁾が報告している平均的な植物地上部K濃度である1%よりも高かったことから、ミツバツチグリは植物体中のK要求量はやや高いと考えられた。また、植物体中Mg濃度の平均値は0.677%であり、Epstein (1965)⁴⁾が報告している平均的な植物地上部Mg濃度である0.2%よりも3倍以上高かった。このことから、ミツバツチグリは植物体中のMg要求量は高いと考えられた。以上の結果から、ミツバツチグリの植物体内におけるN, P, Ca, K, Mg濃度はオミナエシとほとんど同様であり、ミツバツチグリはCaとMgに関して植物体内の要求量が大きく、そのため土壌中においてこれらの元素の供給量が多い環境で比較的有利に生育できるものと考えられた。逆に、ミツバツチグリは、Pに対する要求性は低く、このことが土壌中有効態リン酸が低くても分布可能な理由になっていると考えられた。

日本の典型的な半自然草原に出現する在来植物であるシラヤマギクについては、本研究においては全部で104地点から採取した試料を分析した。その結果、植物体中N濃度は全体の50%が1.426~1.786%の範囲内に出現しており、また全体の80%が1.291~2.023%の範囲内に出現していた（図(2)-2参照）。Epstein (1965)⁴⁾は、植物が適切な生育のために必要とする地上部N濃度の平均値を1.5%と報告している。このことから、シラヤマギクは植物体中のN要求量は平均的であると考えられた。また、植物体中P濃度は全体の50%が0.106~0.139%の範囲内に出現しており、また全体の80%

が0.092～0.170%の範囲内に出現していた。Epstein (1965)⁴⁾は、植物が適切な生育のために必要とする地上部P濃度の平均値を0.2%と報告している。このことから、シラヤマギクは植物体中のP要求量は低いと考えられた。また、植物体中Ca濃度の平均値は1.579%であり、Epstein (1965)⁴⁾が報告している平均的な植物地上部Ca濃度である0.5%よりも3倍以上高かったことから、シラヤマギクは植物体中のCa要求量は高いと考えられた。また、植物体中K濃度の平均値は2.609%であり、Epstein (1965)⁴⁾が報告している平均的な植物地上部K濃度である1%よりも2倍以上高かったことから、シラヤマギクは植物体中のK要求量は高いと考えられた。また、植物体中Mg濃度の平均値は0.523%であり、Epstein (1965)⁴⁾が報告している平均的な植物地上部Mg濃度である0.2%よりも2倍以上高かった。このことから、シラヤマギクは植物体中のMg要求量は高いと考えられた。以上の結果から、シラヤマギクの植物体内におけるN, P, Ca, K, Mg濃度はオミナエシやミツバツチグリと類似しており、シラヤマギクはCa, K, Mgに関して植物体内の要求量が大きく、そのため土壌中においてこれらの元素の供給量が多い環境で比較的有利に生育できるものと考えられた。逆に、シラヤマギクは、Pに対する要求性は低く、このことが土壌中有効態リン酸が低くても分布可能な理由になっていると考えられた。

日本の典型的な半自然草原に出現する在来植物であるキジムシロについては、本研究においては全部で70地点から採取した試料を分析した。その結果、植物体中N濃度は全体の50%が1.441～1.768%の範囲内に出現しており、また全体の80%が1.261～1.933%の範囲内に出現していた（図(2)-2参照）。Epstein (1965)⁴⁾は、植物が適切な生育のために必要とする地上部N濃度の平均値を1.5%と報告している。このことから、キジムシロは植物体中のN要求量は平均的であると考えられた。また、植物体中P濃度は全体の50%が0.122～0.206%の範囲内に出現しており、また全体の80%が0.085～0.303%の範囲内に出現していた。Epstein (1965)⁴⁾は、植物が適切な生育のために必要とする地上部P濃度の平均値を0.2%と報告している。このことから、キジムシロは植物体中のP要求量は低いと考えられた。また、植物体中Ca濃度の平均値は1.555%であり、Epstein (1965)⁴⁾が報告している平均的な植物地上部Ca濃度である0.5%よりも3倍以上高かったことから、キジムシロは植物体中のCa要求量は高いと考えられた。また、植物体中K濃度の平均値は1.614%であり、Epstein (1965)⁴⁾が報告している平均的な植物地上部K濃度である1%よりも高かったことから、キジムシロは植物体中のK要求量はやや高いと考えられた。また、植物体中Mg濃度の平均値は0.642%であり、Epstein (1965)⁴⁾が報告している平均的な植物地上部Mg濃度である0.2%よりも3倍以上高かった。このことから、キジムシロは植物体中のMg要求量は高いと考えられた。以上の結果から、キジムシロの植物体内におけるN, P, Ca, K, Mg濃度はオミナエシ、ミツバツチグリ、シラヤマギクなどと類似している傾向が認められ、キジムシロはCaとMgに関して植物体内の要求量が大きく、そのため土壌中においてこれらの元素の供給量が多い環境で比較的有利に生育できるものと考えられた。逆に、キジムシロは、Pに対する要求性は低く、このことが土壌中の植物有効態リン酸が低くても分布可能な理由になっていると考えられた。

（3）日本の草原植生に出現する外来植物（図(2)-3参照）

日本の草原植生に出現する外来植物であるセイタカアワダチソウについては、本研究においては全部で35地点から採取した試料を分析した。その結果、植物体中N濃度は全体の50%が1.811～2.676%の範囲内に出現しており、また全体の80%が1.523～3.270%の範囲内に出現していた（図

(2)-3参照)。Epstein (1965)⁴⁾は、植物が適切な生育のために必要とする地上部N濃度の平均値を1.5%と報告している。このことから、セイタカアワダチソウは植物体中のN要求量が高いと考えられた。また、植物体中P濃度は全体の50%が0.222~0.496%の範囲内に出現しており、また全体の80%が0.182~0.642%の範囲内に出現していた。Epstein (1965)⁴⁾は、植物が適切な生育のために必要とする地上部P濃度の平均値を0.2%と報告している。このことから、セイタカアワダチソウは植物体中のP要求量が高いと考えられた。また、植物体中Ca濃度の平均値は1.324%であり、Epstein (1965)⁴⁾が報告している平均的な植物地上部Ca濃度である0.5%よりも2倍以上高かったことから、セイタカアワダチソウは植物体中のCa要求量が高いと考えられた。また、植物体中K濃度の平均値は2.391%であり、Epstein (1965)⁴⁾が報告している平均的な植物地上部K濃度である1%よりも2倍以上高かったことから、セイタカアワダチソウは植物体中のK要求量が高いと考えられた。また、植物体中Mg濃度の平均値は0.430%であり、Epstein (1965)⁴⁾が報告している平均的な植物地上部Mg濃度である0.2%よりも2倍以上高かった。このことから、セイタカアワダチソウは植物体中のMg要求量が高いと考えられた。以上の結果から、セイタカアワダチソウの植物体内におけるN, P, Ca, K, Mg濃度はいずれも高く、そのためセイタカアワダチソウは富栄養的な土壤環境で有利に生育できるものと考えられた。逆に、セイタカアワダチソウは貧栄養的な土壤環境には適応していない可能性が示唆された。

日本の草原植生に出現する外来植物であるシロツメクサについては、本研究においては全部で38地点から採取した試料を分析した。その結果、植物体中N濃度は全体の50%が3.935~5.138%の範囲内に出現しており、また全体の80%が3.584~5.564%の範囲内に出現していた（図(2)-3参照）。Epstein (1965)⁴⁾は、植物が適切な生育のために必要とする地上部N濃度の平均値を1.5%と報告している。このことから、シロツメクサは植物体中のN要求量が高いと考えられた。また、植物体中P濃度は全体の50%が0.263~0.367%の範囲内に出現しており、また全体の80%が0.233~0.409%の範囲内に出現していた。Epstein (1965)⁴⁾は、植物が適切な生育のために必要とする地上部P濃度の平均値を0.2%と報告している。このことから、シロツメクサは植物体中のP要求量が高いと考えられた。また、植物体中Ca濃度の平均値は1.428%であり、Epstein (1965)⁴⁾が報告している平均的な植物地上部Ca濃度である0.5%よりも2倍以上高かったことから、シロツメクサは植物体中のCa要求量が高いと考えられた。また、植物体中K濃度の平均値は1.997%であり、Epstein (1965)⁴⁾が報告している平均的な植物地上部K濃度である1%よりも約2倍高かったことから、シロツメクサは植物体中のK要求量が高いと考えられた。また、植物体中Mg濃度の平均値は0.386%であり、Epstein (1965)⁴⁾が報告している平均的な植物地上部Mg濃度である0.2%よりも高かった。このことから、シロツメクサは植物体中のMg要求量はやや高いと考えられた。以上の結果から、シロツメクサの植物体内におけるN, P, Ca, K濃度は高く、そのためシロツメクサは富栄養的な土壤環境で有利に生育できるものと考えられた。逆に、シロツメクサは貧栄養的な土壤環境には適応していない可能性が考えられた。

日本の草原植生に出現する外来植物であるオオアワガエリについては、本研究においては全部で71地点から採取した試料を分析した。その結果、植物体中N濃度は全体の50%が1.137~2.156%の範囲内に出現しており、また全体の80%が0.820~2.677%の範囲内に出現していた（図(2)-3参照）。Epstein (1965)⁴⁾は、植物が適切な生育のために必要とする地上部N濃度の平均値を1.5%と報告している。このことから、オオアワガエリは植物体中のN要求量は平均的であると考えられた。また、

植物体中P濃度は全体の50%が0.190～0.304%の範囲内に出現しており、また全体の80%が0.178～0.448%の範囲内に出現していた。Epstein (1965)⁴⁾は、植物が適切な生育のために必要とする地上部P濃度の平均値を0.2%と報告している。このことから、オオアワガエリは植物体中のP要求量はやや高いあるいは高いと考えられた。また、植物体中Ca濃度の平均値は0.474%であり、Epstein (1965)⁴⁾が報告している平均的な植物地上部Ca濃度である0.5%とほぼ同程度であったことから、オオアワガエリは植物体中のCa要求量は平均的であると考えられた。また、植物体中K濃度の平均値は1.462%であり、Epstein (1965)⁴⁾が報告している平均的な植物地上部K濃度である1%よりもやや高かったことから、オオアワガエリは植物体中のK要求量はやや高いと考えられた。また、植物体中Mg濃度の平均値は0.218%であり、Epstein (1965)⁴⁾が報告している平均的な植物地上部Mg濃度である0.2%と同程度であった。このことから、オオアワガエリは植物体中のMg要求量は平均的であると考えられた。以上の結果から、オオアワガエリの植物体内におけるP濃度は高い傾向にあり、このためオオアワガエリは土壌中有効態リン酸が高い環境で有利に生育できるものと考えられた。このことは、オオアワガエリが主として土壌中有効態リン酸が高い土壌に分布していることをよく説明していると考えられる。

日本の草原植生に出現する外来植物であるハルガヤについては、本研究においては全部で17地点から採取した試料を分析した。その結果、植物体中N濃度は全体の50%が1.118～2.542%の範囲内に出現しており、また全体の80%が0.723～2.863%の範囲内に出現していた(図(2)-3参照)。Epstein (1965)⁴⁾は、植物が適切な生育のために必要とする地上部N濃度の平均値を1.5%と報告している。このことから、ハルガヤは植物体中のN要求量は平均的あるいはやや高いと考えられた。また、植物体中P濃度は全体の50%が0.139～0.389%の範囲内に出現しており、また全体の80%が0.099～0.417%の範囲内に出現していた。Epstein (1965)⁴⁾は、植物が適切な生育のために必要とする地上部P濃度の平均値を0.2%と報告している。このことから、ハルガヤは植物体中のP要求量は平均的あるいはやや高いと考えられた。また、植物体中Ca濃度の平均値は0.299%であり、Epstein (1965)⁴⁾が報告している平均的な植物地上部Ca濃度である0.5%よりやや低いことから、ハルガヤは植物体中のCa要求量はやや低いと考えられた。また、植物体中K濃度の平均値は1.719%であり、Epstein (1965)⁴⁾が報告している平均的な植物地上部K濃度である1%よりもやや高かったことから、ハルガヤは植物体中のK要求量はやや高いと考えられた。また、植物体中Mg濃度の平均値は0.162%であり、Epstein (1965)⁴⁾が報告している平均的な植物地上部Mg濃度である0.2%と同程度かあるいはやや低かった。このことから、ハルガヤは植物体中のMg要求量は平均的かあるいはやや低いと考えられた。以上の結果から、ハルガヤはNやPに関してやや富栄養的な植物体内環境を持っており、NやPが比較的容易に供給される環境に分布しやすいと考えられた。しかしながら、セイタカアワダチソウ、シロツメクサ、オオアワガエリに比較すると、ハルガヤのPの要求性は低く、また他の無機栄養元素の濃度も低い。このことから、ハルガヤは、セイタカアワダチソウ、シロツメクサ、オオアワガエリよりも貧栄養的な環境に適応しており、このため日本のもともとの自然環境でも蔓延するリスクが高いと考えられた。

（４）植物の土壌環境適性と植物体内栄養元素濃度の関係について

表(2)-2に、土壌が持つ生育阻害作用に対する植物の耐性と植物体内における無機栄養元素濃度の関係をまとめた。以下、日本の草原植生に広く分布する在来植物、日本の典型的な半自然草原に出現する在来植物、日本の草原植生に出現する外来植物の３つのグループに分けて、土壌が持つ生育阻害作用に対する植物の耐性と植物体内における無機栄養元素濃度の関係について考察する。

１）日本の草原植生に広く分布する在来植物について

日本の草原植生に広く分布する在来植物であるススキは、土壌中有効態リン酸が低い環境にも広く分布している（図(1)-1参照）ことから、低い土壌中有効態リン酸の土壌環境に対してある程度の耐性を持っている（適応している）と考えられる（表(2)-2参照）。一方、植物体内におけるP濃度は平均的な植物に比較すると低いことから（表(2)-2参照）、ススキは、植物体内におけるPに対する要求性は低く、このため土壌からのP吸収量が低くても十分に生育可能な植物であると考えられた。これは、ススキは植物体内においてPを効率的に利用できるメカニズムを持っていることを示唆していると考えられた。

また、ススキは、低土壌pHの環境においても広く分布している（図(1)-1参照）ことから、土壌酸性に対する耐性も持っていると考えられた（表(2)-2参照）。日本の従来からの土壌環境は、多雨による強い溶脱作用を受け続けてきた影響により、強い土壌酸性および低い土壌中有効態リン酸という特性を持っており、いずれも植物の生育に対して強い阻害作用を示す。これに対してススキは、このような土壌が持つ植物生育阻害作用に対して耐性を持っていることから、日本の土壌環境に対して適応している種であると考えられた。また、強い溶脱環境のもとでは土壌中のCa、K、Mgといった植物栄養無機元素は土壌表層にとどまることができず、これらの元素に関しても貧栄養的となる。ススキは、CaとKに関しても体内における要求性は低いため、これらの元素に関しても日本の土壌環境によく適応した種であると考えられた。これは、ススキは植物体内においてCaおよびKを効率的に利用できるメカニズムを持っていることを示唆していると考えられた。

ヨモギは、ススキと同様、日本の草原植生に広く分布する在来植物のグループであり、低い土壌中有効態リン酸の環境においても分布することができる（図(1)-1）ことから、やはりある程度は低い土壌中有効態リン酸の土壌環境に対して耐性を持っている（適応している）と考えられた（表(2)-2参照）。ただし、ススキと異なり、ヨモギは、植物体中におけるP濃度は平均的な植物に比較するとやや高い傾向がある（表(2)-2参照）ことから、ヨモギの植物体のP要求量は低くなく、そのため土壌からのP吸収量が低くなれば十分な生育は困難になる植物であると考えられた。この点から、ヨモギはススキよりもPに関してやや富栄養的であると考えられた。

また、土壌酸性に対する反応を見ると、ススキに比較してヨモギは、やや土壌酸性が弱い環境に分布しやすい傾向があった（図(1)-1参照）。このことから、ススキに比較してヨモギは、土壌酸性に対する耐性はやや弱いものと考えられた（表(2)-2参照）。また、ヨモギの植物体内におけるCa、K、Mg濃度は、平均的な植物に比較して明らかに高い傾向を示したことから、ヨモギの植物体はこれらの無機栄養元素に関して富栄養的であると考えられた。

表(2)-2 土壌が持つ生育阻害作用に対する植物の耐性と植物体内における無機栄養元素濃度の関係

土壌が持つ生育阻害作用 に対する耐性			植物体内における無機栄養元素濃度				
酸性耐性	低土壌P耐性		N	P	Ca	K	Mg
日本の草原植生に広く分布する在来植物							
ススキ	あり	あり	低い	低い	やや低い	やや低い	普通
ヨモギ	やや弱い	あり	やや高い	普通～ やや高い	高い	高い	高い
ゲンノショウコ	弱い	あり	高い	高い	高い	やや高い	やや高い
ヤブマメ	あり	あり	高い (マメ科)	やや低い～ 普通	高い	やや高い	高い
日本の典型的な半自然草原に出現する在来植物							
オミナエシ	強い	強い	普通	低い	高い	やや高い	高い
ミツバツチグリ	強い	強い	普通	低い	高い	やや高い	高い
シラヤマギク	強い	強い	普通	低い	高い	高い	高い
キジムシロ	非常に強い	あり	普通	低い～ やや低い	高い	やや高い	高い
日本の草原植生に出現する外来植物							
セイトカアワダチソウ	弱い	弱い	高い	高い	高い	高い	高い
シロツメクサ	弱い	弱い	高い (マメ科)	高い	高い	高い	やや高い
オオアワガエリ	弱い	弱い	普通	やや高い～ 高い	普通	やや高い	普通
ハルガヤ	非常に強い	弱い	普通～ やや高い	普通～ やや高い	やや低い	やや高い	やや低い～ 普通

以上の結果から、ヨモギはススキよりも富栄養的な環境に対してより適応している植物種であると考えられ、より人里に近い環境あるいは施肥や土壌改良資材の投入の影響を受けた環境に出現しやすいと考えられた。

ゲンノショウコは、低い土壌中有効態リン酸の環境においても分布することができる(図(1)-1)ことから、やはりある程度は低い土壌中有効態リン酸の土壌環境に対して耐性を持っている(適応している)と考えられた(表(2)-2参照)。しかし、ゲンノショウコは平均的な植物に比較すると植物体中におけるP濃度は高い(表(2)-2参照)ことから、ゲンノショウコの植物体のP要求量は高く、そのため土壌からP吸収量が低くなれば、十分な生育は困難になる植物であると考えられた。

また、土壌酸性に対する反応を見ると、ゲンノショウコは土壌酸性が強い環境にはほとんど分布していない傾向があった(図(1)-1参照)。このことから、ゲンノショウコは土壌酸性に対する耐性は弱いものと考えられた(表(2)-2参照)。また、ゲンノショウコの植物体内におけるCa, K,

Mg濃度は、平均的な植物に比較していずれも高い傾向を示したことから、ゲンノショウコの植物体はこれらの無機栄養元素に関して富栄養的であると考えられた。

ヤブマメは、低い土壌中有効態リン酸の環境においても分布することができる（図(1)-1）ことから、やはりある程度は低い土壌中有効態リン酸の土壌環境に対して耐性を持っている（適応している）と考えられた（表(2)-2参照）。一方、ヤブマメ植物体内におけるP濃度は、平均的な植物に比較するとやや低い傾向を示したことから（表(2)-2参照）、ヤブマメ植物体のP要求量は比較的低く、このため土壌からのP吸収量が低くてもある程度は生育可能な植物であると考えられた。これは、ヤブマメは植物体内においてPを効率的に利用できるメカニズムを持っていることを示唆していると考えられた。

以上の情報から、Pに関する植物栄養学的特性をまとめると、Pに関して富栄養的な順に、ゲンノショウコ>ヨモギ>ヤブマメ>ススキ
であると考えられ、同じ日本の草原植生に広く分布する在来植物の中でも、異なる傾向を持つ植物種が混在することが明らかになった。

また、ヤブマメは、低土壌pHの環境においても広く分布している（図(1)-1参照）ことから、土壌酸性に対する耐性も持っていると考えられた（表(2)-2参照）。このことから、ヤブマメは土壌酸性に対する耐性を持っていると考えられた（表(2)-2参照）。

以上の情報から、土壌酸性に対する耐性をまとめると、耐性が弱い順に、ゲンノショウコ>ヨモギ>ヤブマメ>ススキ
であると考えられ、Pに関する植物栄養学的特性と一致した。

また、ヤブマメの植物体内におけるCa, K, Mg濃度は、平均的な植物に比較していずれも高い傾向を示したことから、ヤブマメの植物体はこれらの無機栄養元素に関して富栄養的であると考えられた。

以上の情報から、Ca, K, Mgに関する植物栄養学的特性をまとめると、ススキはこれらの元素に関して貧栄養的、ヨモギ、ゲンノショウコ、ヤブマメはこれらの元素に関して富栄養的であると考えられた。

上記のデータから総合的に判断して、富栄養的環境あるいは攪乱環境により適応している順に、ゲンノショウコ>ヨモギ>ヤブマメ>ススキ
であると考えられた。この順序は、耕作放棄地や攪乱環境から半自然草原への推移の中で出現する植物種とほぼ一致していると思われる。このことは、土壌特性が植物の分布に対して大きな影響をおよぼしていることを強く示唆するものであると同時に、土壌環境制御によって出現する植物種を制御できる可能性を示唆するものであり、非常に重要な知見であると考えられる。

2) 日本の典型的な半自然草原に出現する在来植物

日本の典型的な半自然草原に出現する在来植物であるオミナエシ、ミツバツチグリ、シラヤマギク、キジムシロは、いずれも土壌中有効態リン酸が非常に低い環境だけに分布している（図(1)-2参照）ことから、低い土壌中有効態リン酸の土壌環境に対して非常に良く適応している（強い耐性を持っている）と考えられる（表(2)-2参照）。一方、植物体内におけるP濃度は、オミナエシ、ミツバツチグリ、シラヤマギク、キジムシロのいずれもが、平均的な植物に比較すると低いことから（表(2)-2参照）、これらの植物は植物体内におけるPに対する要求性は低く、このため土壌

からのP吸収量が低くても十分に生育可能な植物であると考えられた。これは、これらの植物は植物体内においてPを効率的に利用できるメカニズムを持っていることを示唆していると考えられた。

また、オミナエシ、ミツバツチグリ、シラヤマギク、キジムシロは、いずれも低土壌 pH の環境においても広く分布している（図(1)-2参照）ことから、土壌酸性に対する強い耐性を持っていると考えられた（表(2)-2参照）。このことから、これらの植物種は、いずれも日本の土壌環境に対してよく適応していると考えられた。

これに対して、植物体内におけるCa, K, Mg濃度は、平均的な植物と比較した場合、オミナエシ、ミツバツチグリ、シラヤマギク、キジムシロのいずれにおいても高かった（表(2)-2参照）。これらの植物は溶脱が進んだ酸性土壌によく分布しているが、これらの環境ではCa, K, Mgといった塩基類の植物に対する有効性は非常に低いと考えられる。にもかかわらず、これらの植物体内におけるこれら塩基類の濃度が高いということは、これら塩基類を土壌から強く吸収する特殊なメカニズムを持っている可能性を示唆していると考えられる。これらのメカニズムについては、今後解明に向けた研究の展開が期待される。

以上、日本の典型的な半自然草原に出現する在来植物であるオミナエシ、ミツバツチグリ、シラヤマギク、キジムシロなどについては、いずれも、土壌が持つ生育阻害作用に対する耐性あるいは植物体内における無機栄養元素濃度において、非常に類似した性質を持っていることが明らかになった。すなわち、これらの植物は、他の平均的な植物に比較して植物体内P濃度が低いため、Pを植物体内において効率的に利用できるメカニズムを持っていると考えられ、これにより低い土壌中有効態リン酸の土壌環境に対する耐性を備えていると考えられた。また、土壌酸性が強い環境でも通常の生育ができるよう、耐性を備えていることも明らかになった。また、これらの植物は、土壌中においてCa, K, Mgといった塩基類が比較的限られた環境中においても、これらの塩基類を植物体内に吸収できると考えられた。

3) 日本の草原植生に出現する外来植物について

日本の草原植生に出現する外来植物であるセイタカアワダチソウは、一部は土壌中有効態リン酸が低い土壌環境にも分布しているものの（図(1)-3参照）、植物体内におけるP濃度は平均的な植物よりも高いレベルにあった（表(2)-2参照）。このことから、セイタカアワダチソウの植物体内におけるP要求量は高く、それを満たすだけの土壌からのPの吸収能力を備えているものと考えられた。

また、土壌酸性に対する反応を見ると、セイタカアワダチソウは土壌酸性が強い環境にはほとんど分布していない傾向があった（図(1)-3参照）。このことから、セイタカアワダチソウは土壌酸性に対する耐性は弱いものと考えられた（表(2)-2参照）。また、セイタカアワダチソウの植物体内におけるCa, K, Mg濃度は、平均的な植物に比較していずれも高かったことから（表(2)-2参照）、セイタカアワダチソウの植物体はこれらの無機栄養元素に関して富栄養的であると考えられた。土壌酸性が弱い環境では、通常、土壌中のCa, K, Mgの有効性は高いことが多い。このため、セイタカアワダチソウの土壌酸性に対して弱いという特性と、植物体内におけるCa, K, Mgに対する要求性が高いという特性は、両方が重要なのか、あるいはこれらのうちいずれか一方が重要なのか、あるいは後者であるならばそのどちらが重要であるのかは、現在のところ不明である。い

ずれにしても、土壤酸性に対する耐性あるいはCa, K, Mgといった塩基類の土壤からの吸収において、セイタカアワダチソウは弱点を持っていると考えられる。

日本の草原植生に出現する外来植物であるシロツメクサは、土壤環境適性と植物体内におけるP, Ca, K, Mg濃度との関係は、セイタカアワダチソウの場合とほとんど同様であった。ただし、シロツメクサはマメ科であるため、根に寄生しているバクテリア経由で空中窒素を植物体内に取り込むことが可能であり、そのためN栄養に関しては土壤に対する依存度は低いと考えられた。

日本の草原植生に出現する外来植物であるオオアワガエリは、多くが土壤中有効態リン酸の高い土壤環境に分布していた（図(1)-3参照）。一方、植物体内におけるP濃度は平均的な植物よりも高いレベルにあった（表(2)-2参照）。このことから、セイタカアワダチソウの植物体内におけるP要求量は高く、それを満たすことのできるような高い土壤中有効態リン酸の環境に分布しているものと考えられた。また、オオアワガエリの土壤酸性に対する耐性は、セイタカアワダチソウやシロツメクサと類似しており、弱いものと考えられた。一方、植物体内におけるCa, K, Mg濃度は、セイタカアワダチソウやシロツメクサと比較すると高くなく、従って、オオアワガエリ植物体のこれらの元素に対する要求性も高くないと考えられた。

日本の草原植生に出現する外来植物であるハルガヤは、オオアワガエリ同様、多くが土壤中有効態リン酸の高い土壤環境に分布していた（図(1)-3参照）。一方、植物体内におけるP濃度は平均的な植物よりも高いレベルにあった（表(2)-2参照）。このことから、ハルガヤの植物体内におけるP要求性は高く、それを満たすことのできるような高い土壤中有効態リン酸の環境に分布しているものと考えられた。ハルガヤは、既に記したように、土壤酸性に対して強い耐性を持っており、この点で日本の土壤環境に適していることから、蔓延するリスクの高い植物であると考えられる。このハルガヤの土壤酸性に対する強い耐性は、ハルガヤ植物体中のCaおよびMg濃度が低いという特性（表(2)-2参照）と関連している可能性があるが、詳細は不明である。

以上の情報から、日本の草原植生に出現する外来植物は、植物種によって土壤が持つ生育阻害作用に対する耐性および植物体内における無機栄養元素濃度は大きく異なることが明らかとなった。すなわち、セイタカアワダチソウとシロツメクサは、土壤中有効態リン酸が低い環境であってもある程度の耐性を持って生育可能であるものの、土壤酸性に対してはほとんど耐性を持っていないことが明らかになった。ただし、シロツメクサは、セイタカアワダチソウに比較して、土壤のN供給に対する要求性は高くないものと考えられた。オオアワガエリは、セイタカアワダチソウやシロツメクサと比較して、土壤酸性に対する耐性が弱い点は同様であるものの、土壤中有効態リン酸が低い環境が不得意であると考えられた。ハルガヤは、土壤中有効態リン酸が低い環境が不得意である点はオオアワガエリと同様であるものの、土壤酸性に対する耐性は強く、この点で、セイタカアワダチソウ、シロツメクサ、オオアワガエリと大きく異なった。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

本研究により、植物が種ごとに土壤環境に対する分布特性が異なるのは、植物種ごとに土壤が持つ生育阻害作用に対する耐性や体内の無機栄養元素組成（無機元素要求性）が異なることが一因であることが示された。このように、植物の分布状況や植物の栄養特性および生理特性が密接に関係していることを具体的に示したのは、本研究が初めてである。このことは、植物の栄養特

性あるいは生理特性は、土壌の化学的特性を介して、その植物の分布に影響を及ぼしていることを示している。このような植物分布のメカニズムについては、想定されることはあっても、これまで実際にデータとして示されてこなかった。本研究は、この植物分布のメカニズムの一端を実証的に解明しており、学問的な進歩に対して大きく寄与すると考えられる。

また、本研究から、多くの外来植物は無機栄養元素に対する体内要求性が高いため富栄養的な土壌環境で蔓延しやすいこと、一方の多くの半自然草原に典型的な在来植物はとくにPに関して体内要求性が低く、そのためPに関して貧栄養的な土壌環境でも分布できることが明らかとなった。実際に、現在の日本の多くの半自然草原の土壌はP栄養に関して貧栄養的であり、そういった環境においてオミナエシ、ミツバツチグリ、シラヤマギク、キジムシロといった植物が保全されていることも示された。このことから、これらの植物を保全するためには、土壌を貧栄養的な状態に保つことが重要であると考えられた。このことも、本研究により初めて明らかにされた点であり、植物の保全においても、学術的な面においても、大きな進歩がもたらされたと考えられる。また、今後これらの知見をもとに、植物の低栄養元素濃度耐性や強土壌酸性耐性などのメカニズム解明が進むものと期待される。これらの知見は、栽培植物に対する低栄養元素耐性や強土壌酸性耐性の付与といった応用が期待される。また、本研究で得られた知見は、それぞれの植物の進化プロセス研究にも寄与することが期待される。

（２）環境政策への貢献

＜行政が既に活用した成果＞

本研究により得られた研究成果は、サブテーマ(1)「野草類の分布と土壌の化学的特性の関係解明」で得られた研究成果を、科学的データによって補強する役割を果たすものでもある。このため、ここに報告する＜行政が活用することが見込まれる成果＞は、サブテーマ(1)で報告した内容と多くが重複する。すなわち、その概要は下記の通りである。

すなわち、下記の３つのケースについて、セイタカアワダチソウなどの外来植物が蔓延する現地を視察するとともに土壌を採取し、化学分析を行って、今後の管理手法に関して提案を行った。

① 国土交通省所轄の河川周囲の河岸および河川堤防

② 鹿児島県が所轄する道路法面

③ 福井県が所轄する河川周囲の河岸緑地公園内および河川堤防

具体的には、①のケースについては、現状の環境では外来植物が蔓延しやすい状態であることを説明するとともに、これらの植物を除去することも重要ではあるが、これらの植物が蔓延する原因となっている周辺環境からの植物栄養分の流入にも注意する必要があることを指摘した。この指摘を受けて、2013年度以降、これらの地域における外来植物の蔓延防止策を検討することとなった。

②のケースについては、今後定期的な刈取りを実施するなど貧栄養的な管理を継続的に続けることによってセイタカアワダチソウを衰退させることができる可能性があることを報告するとともに、セイタカアワダチソウの抑制および在来植物による植生管理を早期に実施したい場合には、サブテーマ(4)で得られている研究成果である塩化アルミニウム六水和物処理の可能性を報告した。この報告を受けて、塩化アルミニウム六水和物処理の小規模植生制御試験が実施されることとなり、2013年4月、小規模試験が開始された。鹿児島県では、今後、この小規模試験の推移をみ

ながら、道路法面における植生管理手法を検討してくこととなった。また、本調査の過程において、道路法面の造成および緑化の行程において、肥料成分や石灰資材が比較的多量に混入されていることも分かった。このことから、今後は法面緑化においてもできるだけ肥料成分や石灰資材の投入を減らすよう提案を行った。今後、肥料成分や石灰資材の投入低減のための検討をさらに行う予定。

上記の③のケースは、現状の状態では外来植物が蔓延しやすい状態であることを報告するとともに、今後定期的な刈取りを実施するなど貧栄養的な管理を継続的に続けることによってセイタカアワダチソウを衰退させることができる可能性、およびセイタカアワダチソウの抑制および在来植物による植生管理を早期に実施したい場合にはサブテーマ(4)で得られた研究成果である塩化アルミニウム六水和物処理の可能性を報告した。この報告を受けて、土壌中有効態リン酸が高い値となっている原因を調査・検討するとともに、今後に向けたセイタカアワダチソウ対策をさらに継続検討することとなった。

上記の①～③の内容の詳細については、サブテーマ(1)「野草類の分布と土壌の化学的特性の関係解明」の項目中、5. 本研究により得られた成果、(2) 環境政策への貢献、＜行政が既に活用した成果＞の項目を参照されたい。

以上、本研究は、着手後3年ほどであるにもかかわらず、多くの行政ニーズに対応し、その研究成果は多くの場面で活用されていると考えられる。

＜行政が活用することが見込まれる成果＞

本研究により得られた研究成果は、サブテーマ(1)「野草類の分布と土壌の化学的特性の関係解明」で得られた研究成果を、科学的データによって補強する役割を果たすものでもある。このため、ここに報告する＜行政が活用することが見込まれる成果＞は、サブテーマ(1)で報告した内容と多くが重複する。すなわち、その概要は下記の通りである。

- ・ 草原再生のために目標とすべき土壌の化学的特性について指針を与える

例：オミナエシ、ミツバツチグリ、シラヤマギク、キジムシロといった日本の半自然草原に典型的に出現する在来植物を保全しようとした場合には、土壌酸性が強く、かつ土壌中有効態リン酸が低い状態を維持することが有効であると考えられる。また、肥料成分や石灰資材をできるだけ持ち込まないように注意が必要である。

- ・ 草原再生が効果的に実施できる可能性が高い場所を選定するうえで指針を与える

例：対象地の土壌酸性や土壌中有効態リン酸を化学分析によって明らかにすれば、草原再生事業の適否がよりの確に判断可能であると考えられる。

- ・ 外来植物の蔓延防止策を講ずる上で重要な情報を提供する

例：セイタカアワダチソウは、土壌酸性が弱められた場所に限って蔓延しており、逆に土壌酸性が強い環境では蔓延しにくい。このため、土壌酸性が強かつ土壌中有効態リン酸が低い環境では蔓延する可能性は低いと考えられる。

- ・ 外来植物の蔓延リスクの評価に重要な情報を提供する

例：セイタカアワダチソウ、シロツメクサ、オオアワガエリは、土壌酸性が弱い環境で蔓延しやすく、土壌酸性が強い環境では蔓延しにくい。ハルガヤは、土壌酸性が強い環境でも蔓延する可能性が高く、高リスクである。

これらの研究成果は、今後、学会活動や草原の保全活動にかかわる団体が主催するセミナーなどを通じて、広く広報・普及に努める予定である。

上記の内容の詳細については、サブテーマ(1)「野草類の分布と土壌の化学的特性の関係解明」の項目中、5. 本研究により得られた成果、(2) 環境政策への貢献、＜行政が活用することが見込まれる成果＞の項目を参照されたい。

6. 国際共同研究等の状況

本研究により得られた研究成果は、サブテーマ(1)「野草類の分布と土壌の化学的特性の関係解明」で得られた研究成果を、科学的データによって補強する役割を果たすものでもある。このため、ここに報告する＜国際共同研究等の状況＞は、サブテーマ(1)で報告した内容と同一である。すなわち、その概要は下記の通りである。

本研究は、日本国内における野草類の分布と土壌の化学的特性との関係を調べたものであり、日本国内における独特の植物特性や土壌環境条件を研究対象としている。このため、国際共同研究は当初は考慮に入れていなかった。しかし、研究が予想以上に進捗し、また得られた結論も国際的に注目されるものであると考えられることから、本研究プロジェクト後半においてとくに多くの海外の研究者と本研究成果に関する意見交換を行った。具体的には、アメリカ合衆国メイン州立大学のSusan M. Erich教授（専門：土壌化学）、Tsutomu Ohno教授（専門：土壌学）、The New Zealand Institute for Plant & Food Research LimitedのBrent Clothier博士およびKarin Mueller博士らである。これら海外の研究者とは別の研究テーマで共同研究を実施中であるが、本研究により得られたデータを考慮に入れながら、さらに共同研究を発展させていくことで同意を得ている。また、今後、本研究で得られた知見を国際誌に発表する予定であるため、さらに国際共同研究は進展するものと期待される。

上記の内容の詳細については、サブテーマ(1)「野草類の分布と土壌の化学的特性の関係解明」の項目中、6. 国際共同研究等の状況の項目を参照されたい。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

＜論文（査読あり）＞

- 1) T. KOYANAGI, Y. KUSUMOTO, S. HIRADATE, S. MORITA, M. YOKOGAWA, Y. TAKAHASHI and C. SATO: *Applied Vegetation Science*, **16**, 95-109 (2013)
“New method for extracting plant indicators based on their adaptive responses to management practices: application to semi-natural and artificial grassland data”

＜その他誌上発表（査読なし）＞

- 1) 平舘俊太郎、楠本良延、吉武 啓、馬場友希：身近な自然の保全生態学、生物の多様性を知る（根本正之編著）、131-148, 培風館（2010）
「土壌が支える生物多様性」
- 2) 和田信一郎、金田吉弘、鳥山和伸、安西徹郎、日笠裕治、小祝政明、後藤逸男、平舘俊太郎：日本土壌肥料学雑誌, 82(2), 173-178 (2011)

「土壌診断の現状と今後への挑戦：流派そろい踏み」

- 3) 平舘俊太郎、松永俊朗、和田信一郎、渡邊 彰：日本土壌肥料学雑誌，第82巻，部門別進歩総説特集号 82，466-478（2011）
「第2部門 土壌化学・土壌鉱物」
- 4) 平舘俊太郎：農環研ニュース、**96**，10（2012）
「公開シンポジウム「阿蘇の草原に生きる植物と土壌」」

（2）口頭発表（学会等）

- 1) 平舘俊太郎：日本土壌肥料学会講演要旨集第56集、208，（2010）
「生物多様性と土壌診断」
- 2) T. KOYANAGI, Y. KUSUMOTO, S. MORITA, S. HIRADATE, S. YAMAMOTO, S. OKUBO, K. TAKEUCHI :
The 8th World Congress of the International Association for Landscape Ecology, Beijing, China, 2011
“History of Satoyama landscapes: Empirical examples of the impacts of past landscape changes on the present grassland species distribution”
- 3) Y. KUSUMOTO, T. KOYANAGI, S. MORITA, S. HIRADATE, K. SHIRAKAWA, M. INOUE, M. YOKOGAWA, T. CHIBU, Y. OHTA, M. TSUTSUMI, Y. TAKAHASHI, S. ISHIKAWA : 日本生態学会第59回全国大会、JP3-174J （2012） .
“The relation between species diversity of semi-natural grassland and chemical property of soil in Shiozuka plateau, Japan. ”
- 4) 楠本良延：日本生態学会第59回全国大会、T03-5 （2012）
「わが国における半自然草地の減少とその要因」
- 5) 平舘俊太郎、森田紗綾香、小柳知代、楠本良延：日本生態学会第59回全国大会、T03-5（2012）
「土壌環境から考える二次草原の再生：わかってきた野草類の土壌環境適性」
- 6) 森田沙綾香、小柳知代、楠本良延、平舘俊太郎：日本生態学会第59回全国大会、D1-11（2012）
「土壌の養分吸収特性がススキ、ヨモギ、セイタカアワダチソウの分布に及ぼす影響」
- 7) 森田沙綾香：日本生態学会第60回全国大会 自由集会（2013）
「草原生植物に含まれる無機栄養元素組成の特徴」

（3）出願特許

- 1) 平舘俊太郎、楠本良延、藤間 充、荒木陽子： 独立行政法人農業環境技術研究所；「植生の制御方法」、特許出願（特願2011-044614），出願日：平成23年3月2日．

（4）シンポジウム、セミナー等の開催（主催のもの）

- 1) 平舘俊太郎：セミナー講演、現地学習会「秋吉台草原の保全と再生を考える」、平成22年9月26日、秋吉台科学博物館（観客約30名） .
「野草類の土壌環境に対する生育特性と草原の再生技術」
- 2) 楠本良延：講義、平成22年11月25日、財団法人 農民教育協会 鯉淵学園農業栄養専門学校（観客約40名） .

「農村環境に生育する植物群落の特徴と紹介」

- 3) 平舘俊太郎：講義、平成23年1月12日、財団法人 農民教育協会 鯉淵学園農業栄養専門学校（観客約40名）.
「多様な土壌環境に生育する多様な植物たち：その生育戦略」
- 4) 平舘俊太郎：講義、平成23年1月13日、東京農業大学（観客約160名）.
「植物の生育と土壌環境」
- 5) 「半自然草地の現状と再生」（平成24年3月18日、日本生態学会第59回全国大会：於龍谷大学、観客約100名）
- 6) 平舘俊太郎、楠本良延、森田沙綾香、小柳知代：公開シンポジウム開催、平成24年6月2日、国立阿蘇青少年交流の家、観客約80名）
シンポジウムタイトル「阿蘇の草原に生きる植物と土壌：わかってきた植物ごとに好きな土壌」
講演：「阿蘇の草原が持つ価値とその危機」（横川昌史）
講演：「植物と土壌の間の切っても切れない関係」（平舘俊太郎）
講演：「阿蘇の植物の分布と土壌特性の関係：とくに盆花やセイタカアワダチソウについて」（小柳知代）
講演：「阿蘇の植物が必要とする栄養分について：とくに盆花やセイタカアワダチソウについて」（森田沙綾香）
講演：「これからの草原の管理に向けて：刈取りや野焼きなどの伝統的管理が阿蘇の野草を守る」（楠本良延）
総合討論（司会&総合コーディネーター：高橋佳孝、平舘俊太郎）
- 7) 平舘俊太郎、森田沙綾香：ポスター発表、第9回 全国草原サミット・シンポジウムinみなかみ、平成24年10月28～29日、みなかみ町立藤原小中学校（観客約100名）
「ススキ、ヨモギ、セイタカアワダチソウが分布する土壌環境」
- 8) 平舘俊太郎：講演、農業環境技術研究所研究成果発表会2012、平成24年11月30日、新宿明治安田生命ホール（東京都新宿区、観客185名）
「セイタカアワダチソウを抑えて在来植生に戻す」
- 9) 日本の草原に生きる植物と土壌（平成25年3月5日、日本生態学会第60回全国大会：於静岡県コンベンションアーツセンター（グランシップ静岡）、観客約80名）

（５）マスコミ等への公表・報道等

- 1) プレスリリース（2011年12月19日、於：農林水産技術会議事務局筑波事務所、「外来植物のセイタカアワダチソウを衰退させ在来植物を中心とする植生に誘導する：土壌環境をコントロールしてセイタカアワダチソウの蔓延を防ぐ」）
- 2) 茨城新聞（2011年12月20日、地域版、21面、「セイタカアワダチソウ対策：塩化アルミで駆逐、農環研が開発」）
- 3) 常陽新聞（2012年1月3日、地域版、7面、「粉状アルミ散布で酸性土壌に：外来植物衰退の技術開発、つくば農環研、在来植物の回復に期待、農耕地周辺の緑化にも活用」）
- 4) 朝日新聞（2012年1月4日、全国版夕刊、3面、「環境：さらばセイタカアワダチソウ、農環

研、除草剤使わず駆除成功」)

- 5) 朝日小学生新聞 (2012年1月6日、全国版、1面、「外来種セイタカアワダチソウ、除草剤使わずに駆除」)
- 6) 毎日新聞 (2012年1月9日、全国版、2面、「「迷惑」外来種セイタカアワダチソウ：土壌酸性化でまん延を防止」)
- 7) FM山口 (2012年1月9日)
- 8) 日本農業新聞 (2012年1月10日、全国版、14面、「セイタカアワダチソウ“退治”：粉状アルミニウム有効、農環研、効果は「半永久的」」)
- 9) 産経新聞 (2012年1月26日、茨城版、13面、「外来植物セイタカアワダチソウ、新技術で駆除」)
- 10) 山陰中央新報 (2012年1月29日)
- 11) 山口新聞 (2012年1月29日、「半年で外来植物駆除：農環研、土壌の酸性度高め」)
- 12) 新幹線車両内テロップ (2012年1月29日)
- 13) 毎日新聞 (2012年1月29日、17面、「外来種駆除の新方法に期待」)
- 14) しんぶん赤旗 (2012年1月30日、全国版、「科学：セイタカアワダチソウ、外来種アルミで駆除；在来種守る土壌改変技術を開発」)
- 15) 日本経済新聞 (平成24年11月11日、全国版、17面、ナゾ謎かがく「外来植物、被災地の農地で増殖」肥料の大量投入に警鐘)
- 16) TBS (平成24年11月20日、Nスタ (16:53-17:55、ニュース番組) の中で、福島県原発事故現場付近にて蔓延しているセイタカアワダチソウの特集の中で、その原因についてコメントをしているインタビューが数分間放送された)

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) H. MARSCHNER: Academic Press, London (1986).
“Mineral Nutrition of Higher Plants (2nd Ed.)”
- 2) S. HIRADATE, J.F. MA, H. MATSUMOTO: *Advances in Agronomy*, **96**, 65-132 (2007).
“Strategies of plants to adapt to mineral stresses in problem soils”
- 3) R.R. BROOKS (ed.): CAB International, Oxon (1998).
“Plants that Hyperaccumulate Heavy Metals: Their Role in Phytoremediation, Microbiology, Archaeology, Mineral Exploration and Phytomining”
- 4) E. EPSTEIN: Plant Biochemistry, J. BONNER AND J.E. VARNER (eds), pp. 438-466. Academic Press, London (1965).
“Mineral Metabolism”

(3) アーカイブ植物試料に含まれる無機栄養元素組成の解明と過去の土壤環境推定

(独) 農業環境技術研究所 生物多様性研究領域

平舘俊太郎 (上席研究員)

楠本良延 (主任研究員)

< 研究協力者 >

(独) 農業環境技術研究所 生物多様性研究領域

森田沙綾香 (P D)

小柳知代 (P D) (平成22～23年度のみ)

平成23～24年度累計予算額：440千円

(うち、平成24年度予算額：266千円)

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

日本の草原植生に出現する植物の体内無機元素濃度とその植物が生育していた土壤の化学的特性の関係を調査した結果、オミナエシ植物体中Ca濃度、K濃度、K/Ca濃度比は土壤pH(H₂O)、土壤pH(KCl)、置換酸度と高い相関が認められた。また、オミナエシ植物体中P濃度は土壤中有効態リン酸と高い相関が認められた。このことから、各地の博物館や研究所に保管されているオミナエシ植物標本試料について化学分析を実施し植物体中無機元素濃度を明らかにすれば、それら植物標本となったオミナエシが生育していた過去の土壤の化学的特性を推定できると考えられた。同様に、ヤブマメとミツバツチグリでは、植物体中Ca濃度-土壤pH(H₂O)、植物体中Ca濃度-土壤pH(KCl)、植物体中Ca濃度-置換酸度、植物体中P濃度-土壤中有効態リン酸において、高い相関関係が認められた。また、キジムシロ、ヤマハギ、トダシバ、ヨモギ、ゲンノショウコ、ススキでも、植物体中無機元素濃度と土壤の化学的特性の間に、何らかの高い相関関係が存在することが明らかとなった。これらの植物も、過去の土壤環境を推定する上で重要な情報を提供しうると考えられた。また、これらの情報をもとに、実際に博物館から恵与していただいた植物標本試料について化学分析を行い、これらの植物が生育していた当時の土壤環境を推定した。また、これら植物標本が採取された当時の状況を知る方からのヒアリングを行った結果、本研究による推定は概ね妥当であると判断された。本研究のように、植物の体内元素組成を調べることによって、その植物が生育していた土壤環境を明らかにしようとする研究は大変ユニークなものであり、本研究により初めて試みられたものである。本研究により、指標性の高い植物種がいくつか見つかったことは大きな進歩である。これらの研究成果は、今後、各研究分野で応用されることが期待される。

[キーワード]

環境指標植物、植物無機栄養元素組成、植物標本試料、土壤酸性、土壤中有効態リン酸

1. はじめに

サブテーマ(1)および(2)の研究結果からも示されるように、土壌の化学的特性は野草類の分布に大きな影響をおよぼしている。すなわち、半自然草原において望ましい生物多様性が保持されるためには、それに適した土壌の化学的特性があると考えられる。かつて日本の国土を広く覆っていた半自然草原では、望ましい生物多様性が保たれていたと考えられるが、現在ではそのかつての半自然草原における土壌の化学的特性に関する情報は非常に限られている。これは、かつては土壌の化学的特性を調べるための分析手法や分析装置が限定されていたため分析データ自体が残っていないこと（土壌の化学分析が頻繁に行われるようになったのは1970年代以降）、かつての半自然草原の土壌試料は現在ではほとんど入手できないこと、現在でも半自然草原は存在するが土壌の化学的特性がかつての状態を維持しているかどうか確証がないこと、などの理由による。しかし、かつての半自然草原における土壌特性を明らかにすることができれば、半自然草原の再生を目標とした保全活動等において、目標とする土壌の化学的特性値の設定が容易になる。

一方、植物の中には、土壌の化学的特性に応じて、その体内における無機元素濃度を変化させるものがあることが知られている。例えば、バナナの葉に含まれるケイ素(Si)の濃度は、土壌中の有効態Siと良い関係があることが報告されている¹⁾。また、いくつかの栽培植物では、植物体内のN濃度が土壌中の有効態N濃度と正の相関関係があることが知られている。これらの情報は、栽培植物についてはある程度の情報が得られているが、野草類についてはまだ十分に整理されていない。もし、野草類について、その体内成分の濃度と土壌の化学的特性との間に密接な関係が見つかれば、博物館等に保管されている過去の野草類の植物標本試料（アーカイブ試料）について化学分析を行うことにより、過去の半自然草原における土壌の化学的特性を推定することができると考えられる。

2. 研究開発目的

本研究では、野草類についてその体内における無機栄養元素の濃度と土壌の化学的特性の関係を調査し、かつての土壌環境を知る上で有用な植物種を選抜する。また、選抜された植物種について、過去のアーカイブ試料を入手するとともに化学分析を実施し、過去にその植物が育った草原における土壌の化学的特性を推定する。

本研究は、サブテーマ(1)および(2)の研究成果を待って開始するため、平成22年度は研究を実施しなかった。また、平成23年度は、野草類の体内における無機元素濃度と土壌の化学的特性との関係を調査するとともに、かつての土壌環境を知る上で有用な植物種を選抜することを目的とした。平成24年度は、選抜された植物種について、過去のアーカイブ試料を入手するとともに化学分析を実施し、過去にその植物が育った草原における土壌の化学的特性を推定することを目的とした。

3. 研究方法

（1）現代において生育している植物の体内無機元素濃度と土壌の化学的特性の関係解明

本研究では、土壌試料や植物体試料の採取およびその化学分析は実施せず、サブテーマ(1)および(2)で得られたデータを用いて解析を行うことにより、現代において生育している植物の体内無機元素濃度と土壌の化学的特性の関係を調査する。

(2) 過去において採取された植物標本試料の解析による過去の土壌の化学的特性の推定

過去において採取された植物標本試料は、秋吉台科学博物館から恵与していただいた。植物標本試料は、葉部を振動式ミニカップミル（MC-4A、粉碎容器およびボール：ジルコニア製、伊藤製作所製）にて直径数ミクロン程度まで微粉碎し、化学分析用の植物粉末試料とした。植物粉末試料中のCとNの濃度は、植物粉末試料を直接NCアナライザー（Sumigraph NC-22F, Sumika Chemical Analysis Service）に導入することにより分析した。また、植物粉末試料中のK、Ca、Mg、P、B、Fe、Mn、Zn、Cu、Ni、Mo、Al、Cd、Co、Cr、Na、Pb、Snの濃度は、植物粉末試料を硝酸一過酸化水素により湿式分解後、誘導結合プラズマ発光分析（ICPAES: Induced Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy, VISTA, Agilent Technologies）により分析した。なお、湿式分解の前に内部標準物質としてInを加え、ICPAESによる分析の際にはInが約1ppmとなるように調製した。得られたデータは、植物種ごとに、植物体内無機元素濃度としてとりまとめた。また、上記「3（1）現代において生育している植物の体内無機元素濃度と土壌の化学的特性の関係解明」にて得られた関係式を用いて、秋吉台科学博物館から恵与していただいた植物が生育していた過去の土壌環境を推定した。

4. 結果及び考察

サブテーマ(1)および(2)より得られた結果から、半自然草原の保全を考えた場合、土壌の化学的特性の中でも植物の分布や植生に対して強い影響を及ぼしているのは、土壌酸性と土壌中有効態リン酸であると考えられる。そこで、ここでは、土壌酸性と土壌中有効態リン酸が植物体内における無機元素濃度とどのような関係があるかを調査した。

(1) 現代において生育している植物の体内無機元素濃度と土壌の化学的特性の関係解明

サブテーマ(1)で得られた土壌の化学的特性データとサブテーマ(2)で得られた植物体中における無機元素濃度の関係を、多数の植物種を対象に解析を行った。その解析例のいくつかを以下に示す。

1) 現代において生育しているススキの体内無機元素濃度と土壌酸性の関係

ススキは、日本の草原植生に広く分布する在来植物であり、また日本人により利用されてきた歴史も長いことから、ススキの植物体内の無機元素組成を調べることによってその植物体が生育していた土壌環境が明らかになれば非常に理想的である。ススキ植物体内におけるN, P, K, Ca, Mg濃度とその植物体が生育していた土壌のpH（土壌pH（H₂O）および土壌pH（KCl））との関係を図(3)-1に示した。ススキの場合、植物体中における無機元素濃度と土壌pHとの間の関係は、土壌pH（H₂O）であるか土壌pH（KCl）であるかに関わらず、非常に弱いものであった。最も強い関係が認められた組み合わせは、ススキ植物体中におけるCa濃度と土壌pH（H₂O）の関係であり、下記の式により記述された。

$$y = 0.1235x - 0.3465, R^2 = 0.227$$

次に強い関係が認められたのは、ススキ植物体中におけるCa濃度と土壌pH（KCl）の関係であり、下記の式により記述された。

$$y = 0.1169x - 0.1921, R^2 = 0.1916$$

上記以外の組み合わせでは、決定係数R²は0.1以下の関係であり、植物体中の無機元素濃度から土壌pHを推定するうえでは不適切であると考えられた。

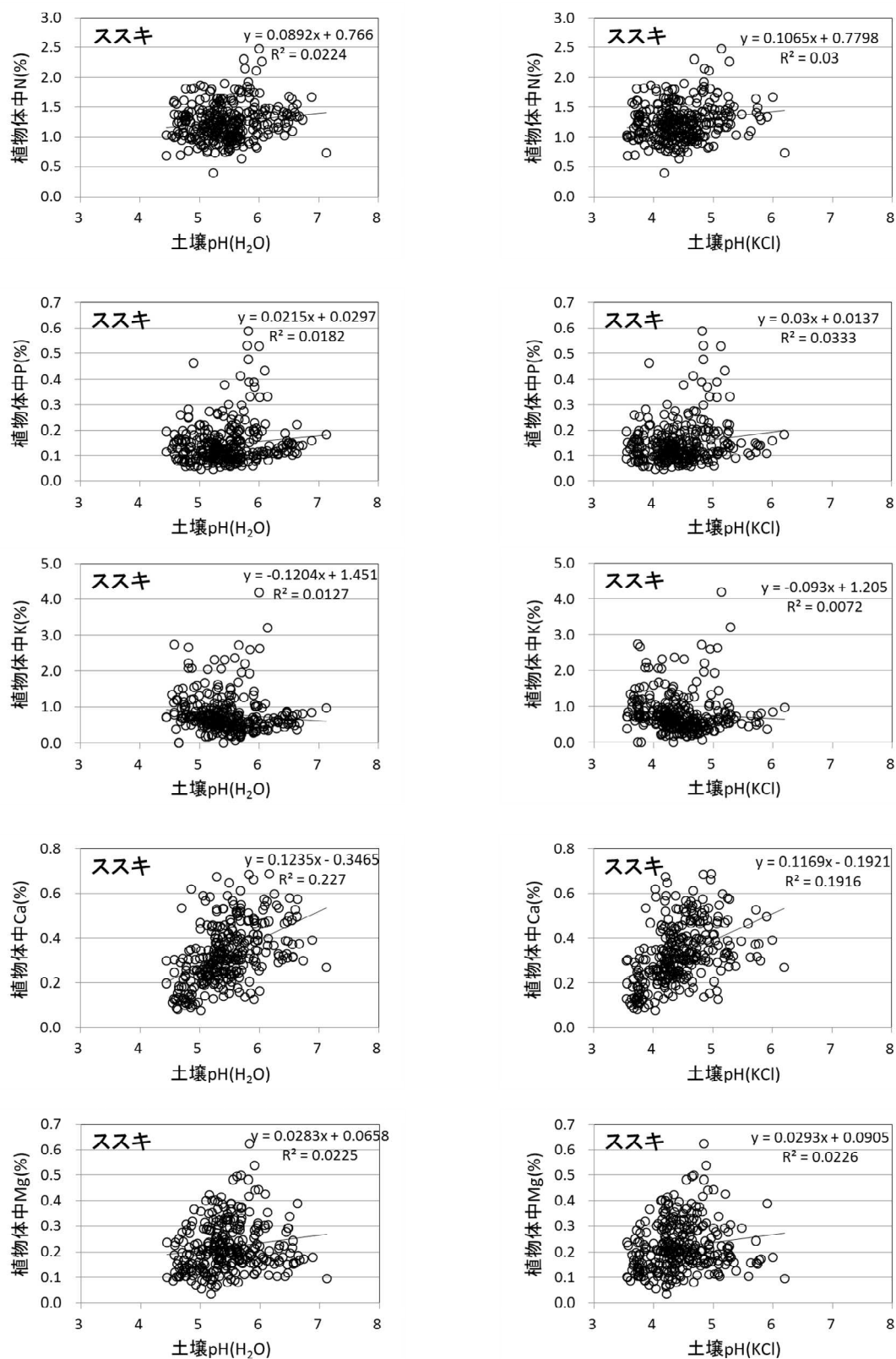
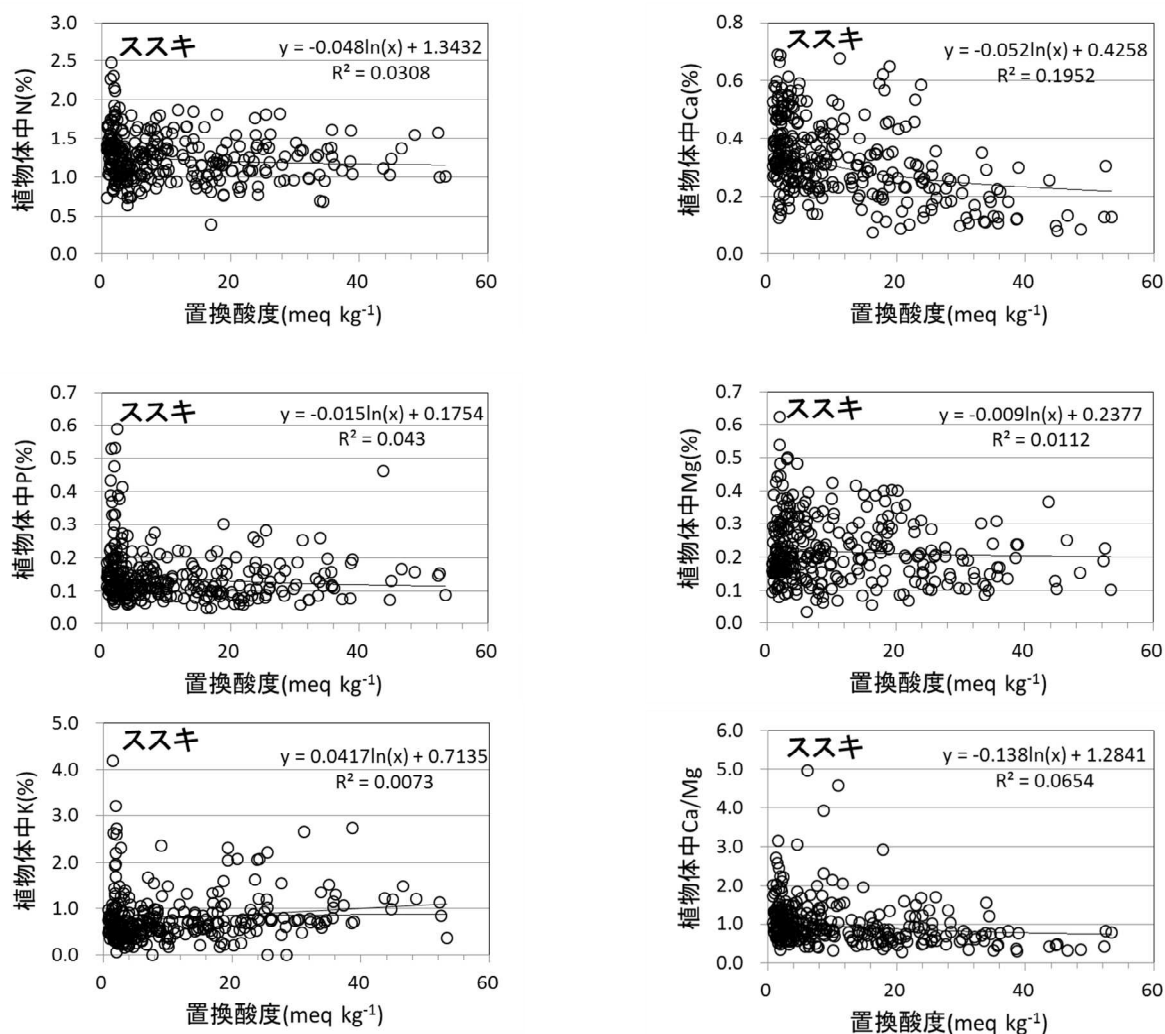


図 (3)-1 ススキ植物体内におけるN, P, K, Ca, Mg濃度とその植物体が生育していた土壌のpH (土壌pH (H₂O) : 左図および土壌pH(KCl) : 右図) との関係。

土壌pHは、土壌中における植物栄養元素の有効性を左右すると考えられており、本研究で調査した土壌pHの範囲内では、土壌pHが低いほど植物体中N, P, K, Ca, Mg濃度は低くなることが期待されたが、実際には植物体中Ca濃度と土壌pH(H₂O)あるいは土壌pH(KCl)との関係以外は、非常に弱い関係であった。これは、ススキがN, P, K, Ca, Mgといった植物栄養元素を土壌から吸収する能力が高いためであると考えられた。ススキ植物体中Ca濃度と土壌pH(H₂O)あるいは土壌pH(KCl)との関係については、強い関係であるとは言えないものの、そのススキ植物体が育った環境に関して参考程度の情報は得られると考えられた。

土壌酸性を示す指標として、わが国ではこれまで置換酸度(y1)を広く利用してきた。この値は、主として農耕地で用いられてきたものであり、4 meq kg⁻¹を越えると酸性耐性を持たない植物は生育阻害作用を受けるようになり、12 meq kg⁻¹を越えると多くの栽培植物で生育障害を受けるようになる」とされている。図(3)-2に、ススキ植物体中N, P, K, Ca, Mg濃度およびCa/Mg比とその植物体が生育していた土壌の置換酸度との関係を示した。

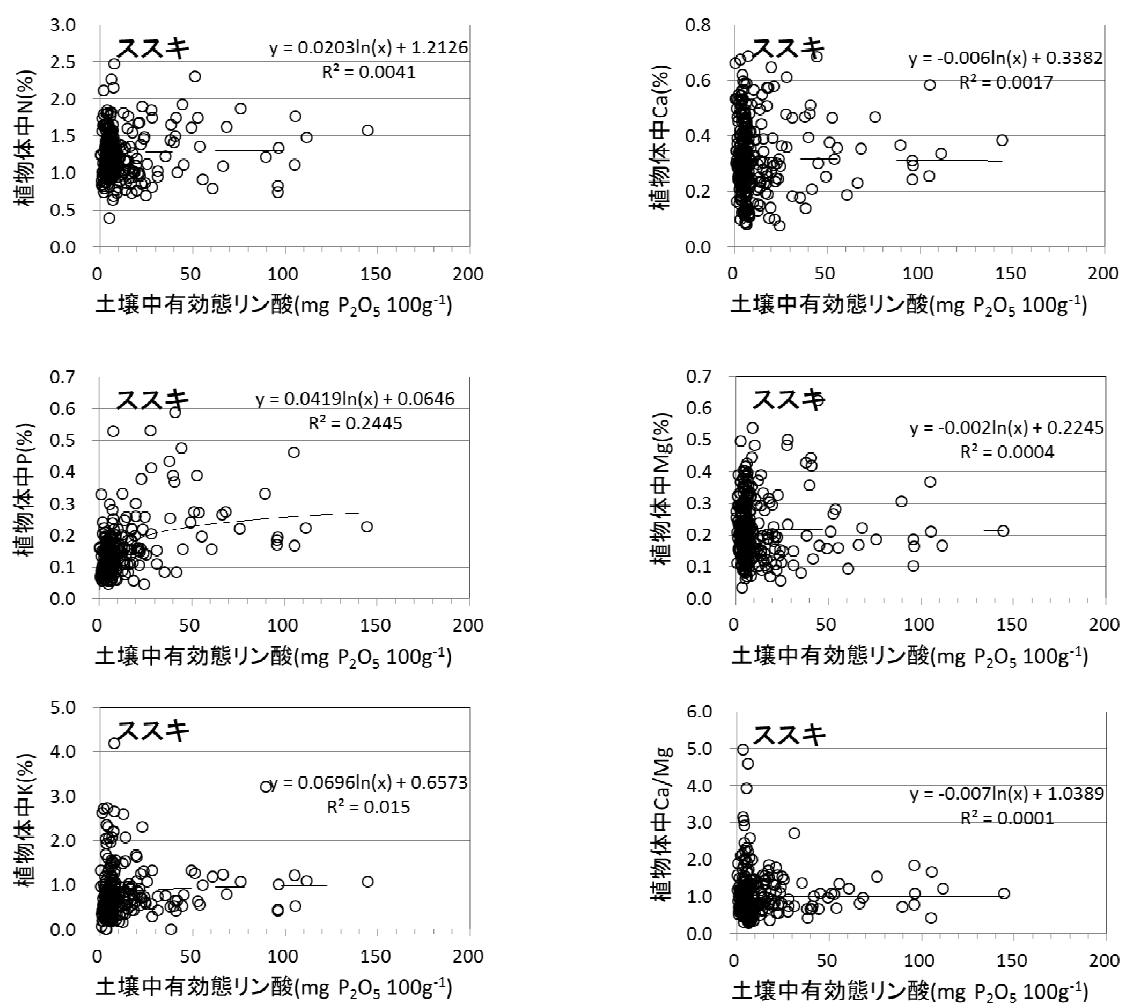


図(3)-2 ススキ植物体中N, P, K, Ca, Mg濃度およびCa/Mg比とその植物体が生育していた土壌の置換酸度との関係。

ススキ植物体中Ca濃度とその植物体が生育していた土壌の置換酸度との間には、下記の関係があった。

$$y = -0.0521\ln(x) + 0.4258, R^2 = 0.1952$$

すなわち、ススキ植物体中Ca濃度が低ければそのススキが育った土壌では置換酸度が高いという関係があると考えられた。ただし、この関係は非常に強いものではないため、上記の関係式による土壌の置換酸度の推定には、不確定性が含まれていることを考慮に入れておく必要があると考えられた。その他のケースについては、植物体中無機元素濃度と土壌の置換酸度との間で、線形近似や対数近似では良い関係式が得られず、いずれも決定係数 R^2 は0.1以下の関係となった。しかし、置換酸度が高い土壌で生育したススキは、植物体中N濃度は2%以下であること、植物体中P濃度はほとんどが0.3%以下であること、植物体中K濃度は3%以下であること、植物体中Mg濃度は0.45%以下であること、といった特徴が見られた。このことから、数理モデルによって植物体中無機元素濃度から土壌の置換酸度を推定するのは現在のところ困難であるが、ススキ植物体中N濃度が2%以上、P濃度が0.3%以上、K濃度が3%以上、Mg濃度が0.45%以上であれば、そのススキは置換酸度が低い状態の土壌で育ったと推定できると考えられた。



図(3)-3 ススキ植物体中N, P, K, Ca, Mg濃度およびCa/Mg比とその植物体が生育していた土壌の有効態リン酸との関係。

2) 現代において生育しているススキの体内無機元素濃度と土壌中有効態リン酸の関係

ススキ植物体中N, P, K, Ca, Mg濃度およびCa/Mg比とその植物体が生育していた土壌の有効態リン酸との関係を図(3)-3に示した。この中で、ススキ植物体中N, K, Ca, Mg濃度と土壌中有効態リン酸の関係は、いずれも決定係数 R^2 が0.1以下の弱い関係であったが、ススキ植物体中P濃度と土壌中有効態リン酸の関係だけは決定係数 R^2 が0.2を越える下記の関係にあった。

$$y = 0.0419 \ln(x) + 0.0646, R^2 = 0.2445$$

すなわち、ススキ植物体中P濃度が高ければそのススキが育った土壌では有効態リン酸レベルが高いと推定できると考えられた。ただし、その関係は非常に強いものではないため、上記の関係式による土壌中有効態リン酸の推定には、不確定性も含まれていることを考慮に入れておく必要があると考えられた。

3) 現代において生育しているヤブマメの体内無機元素濃度と土壌酸性の関係

ヤブマメ植物体中N, P, K, Ca, Mg濃度とその植物体が生育していた土壌のpH（土壌pH（H₂O）および土壌pH（KCl））との関係を図(3)-4に示した。ヤブマメ植物体中における無機栄養元素濃度と土壌pHとの間の関係は、土壌pH（H₂O）であるか土壌pH（KCl）であるかに関わらず、非常に弱いものであった。最も強い関係が認められた組み合わせは、ヤブマメ植物体中におけるCa濃度と土壌pH（KCl）の関係であり、下記の式により記述された。

$$y = 0.3622x + 0.088, R^2 = 0.1813$$

次に強い関係が認められたのは、ヤブマメ植物体中におけるCa濃度と土壌pH（H₂O）の関係であり、下記の式により記述された。

$$y = 0.3783x - 0.3665, R^2 = 0.1671$$

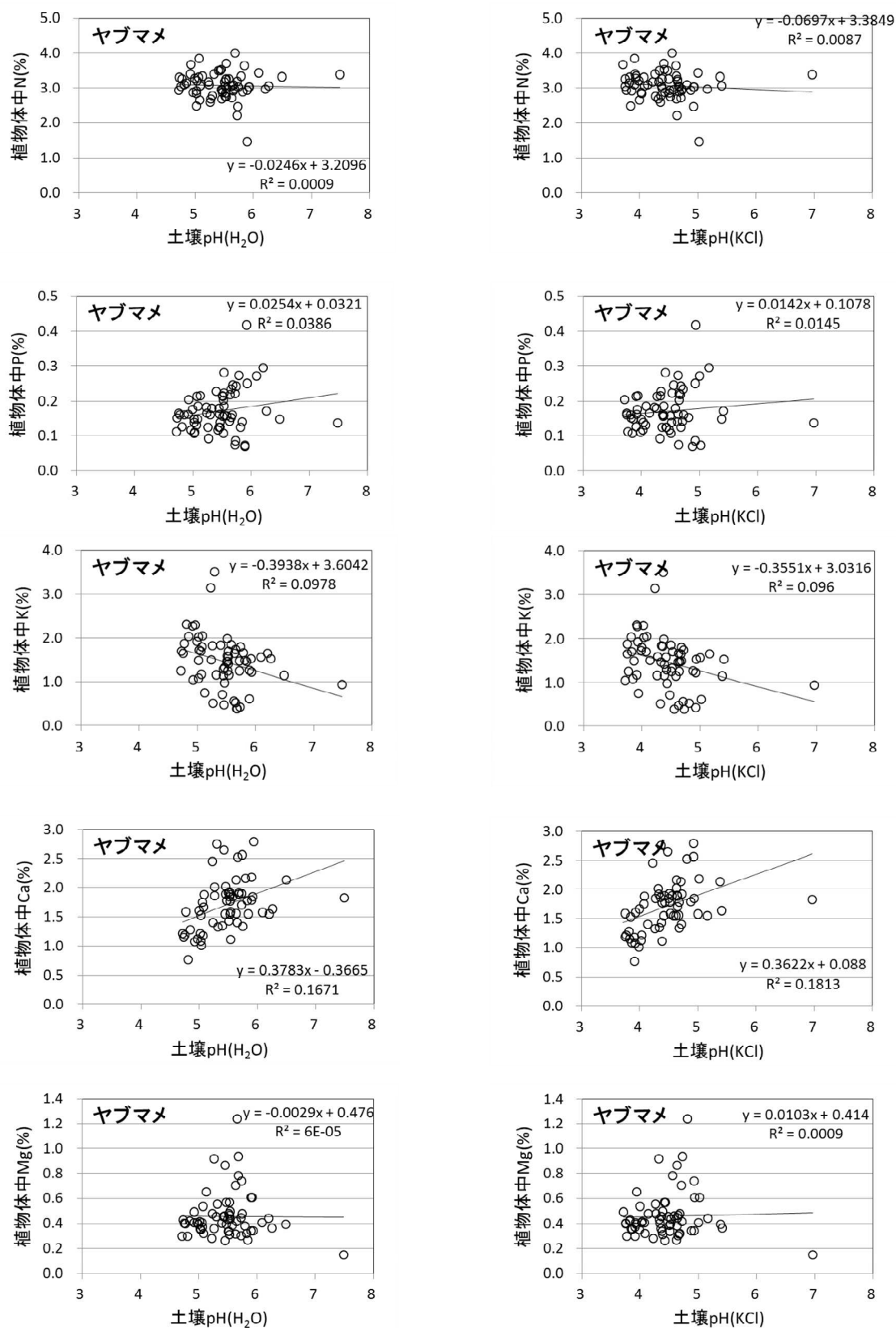
上記以外の組み合わせでは、決定係数 R^2 は0.1以下の関係であり、植物体中の無機元素濃度から土壌pHを推定するうえでは不適切であると考えられた。これは、ヤブマメはN, P, K, Mgを土壌から吸収する能力が高いためと考えられた。ヤブマメ植物体中Ca濃度と土壌pH（H₂O）あるいは土壌pH（KCl）との関係については、強い関係であるとは言えないものの、そのヤブマメ植物体が育った環境に関して参考程度の情報は得られると考えられた。

図(3)-4に、ヤブマメ植物体中N, P, K, Ca, Mg濃度およびCa/Mg比とその植物体が生育していた土壌の置換酸度との関係を示した。ヤブマメ植物体中Ca濃度とその植物体が生育していた土壌の置換酸度との間には、下記の関係があった。

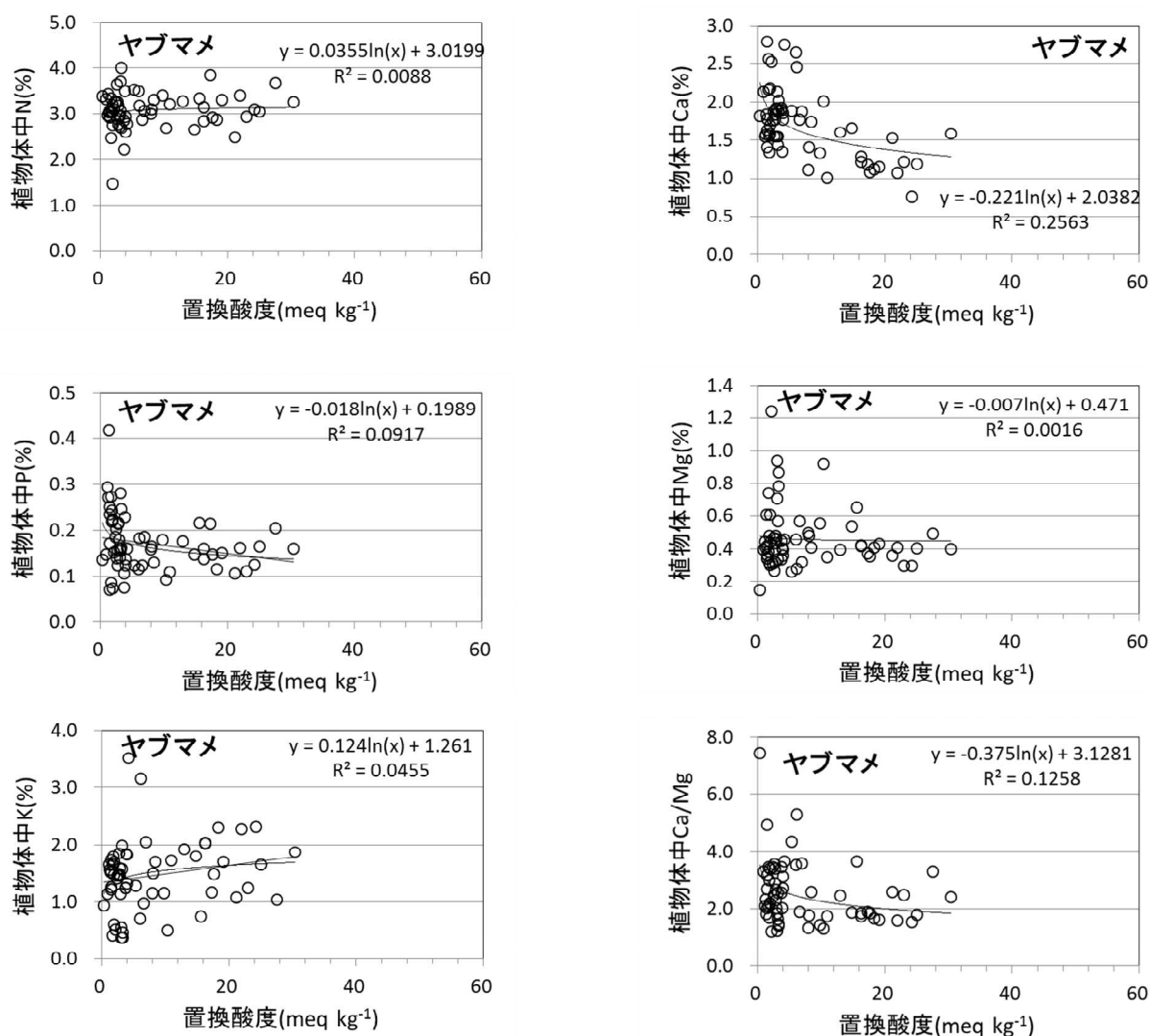
$$y = -0.221 \ln(x) + 2.0382, R^2 = 0.2563$$

すなわち、ヤブマメ植物体中Ca濃度が低ければそのヤブマメが育った土壌では置換酸度が高いという関係があると考えられた。ただし、この関係は非常に強いものではないため、上記の関係式による土壌の置換酸度の推定には、不確定性が含まれていることを考慮に入れておく必要があると考えられた。また、ヤブマメ植物体中におけるCa/Mg比は、置換酸度が高いと小さくなる傾向が認められ、その関係は下式によって記述された。

$$y = -0.375 \ln(x) + 3.1281, R^2 = 0.1258$$



図(3)-4 ヤブマメ植物体内におけるN, P, K, Ca, Mg濃度とその植物体が生育していた土壌のpH(土壌pH(H₂O) : 左図および土壌pH(KCl) : 右図)との関係。



図(3)-5 ヤブマメ植物体中N, P, K, Ca, Mg濃度およびCa/Mg比とその植物体が生育していた土壌の置換酸度との関係。

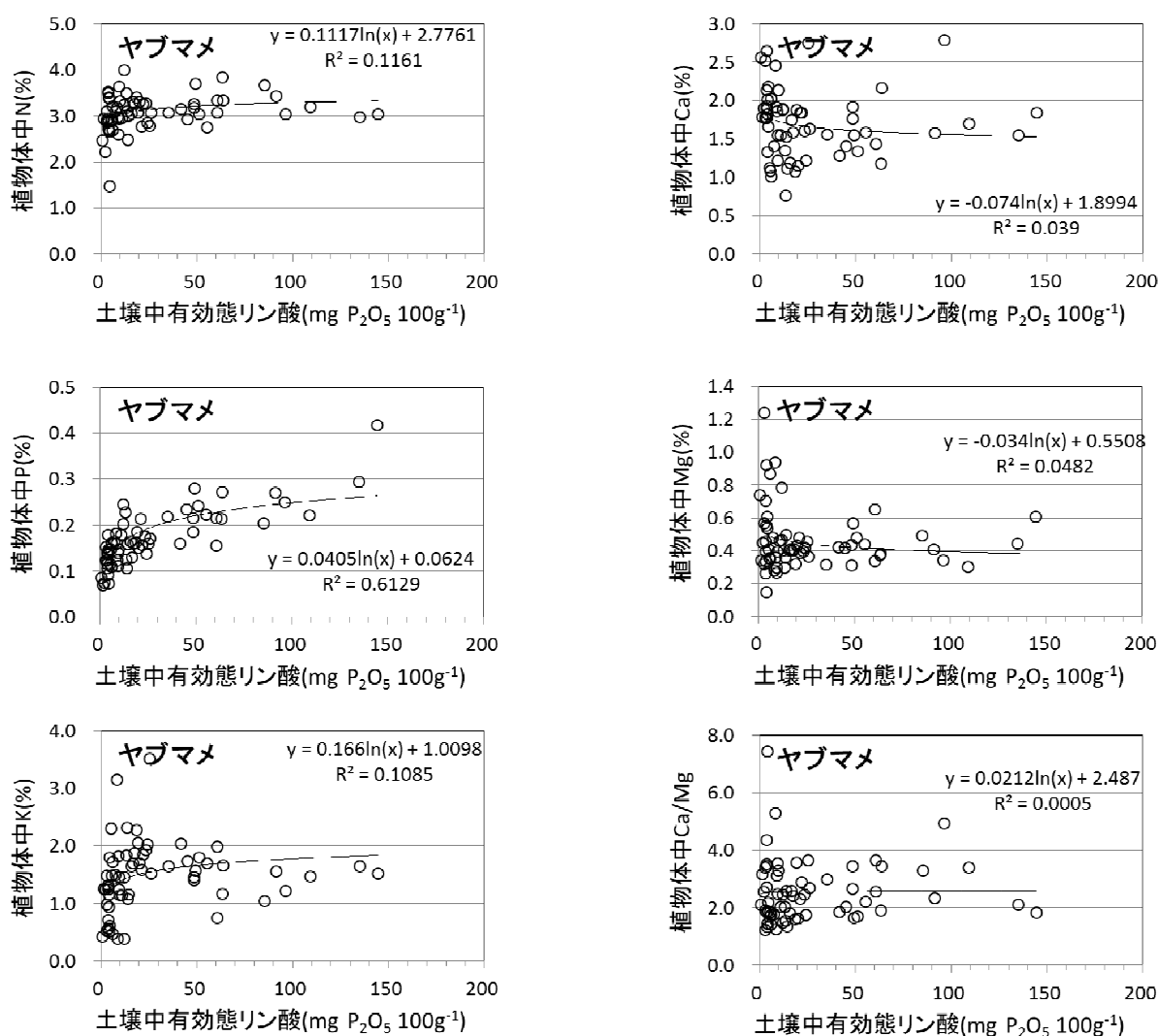
その他のケースについては、線形近似や対数近似では良い関係式が得られず、いずれも決定係数 R^2 は0.1以下の関係となった。しかし、置換酸度が高い土壌で生育したヤブマメは、植物体中P濃度が0.25%を越えないこと、植物体中Ca濃度が2.0%を越えないこと、植物体中Mg濃度は0.6%を越えないこと、植物体中Ca/Mg比は4.0を越えないこと、といった特徴があることがわかった。このことから、数理モデルによってヤブマメ植物体中無機元素濃度から土壌の置換酸度を推定するのは、植物体中Ca濃度を利用する関係式以外では現在のところ困難であるが、ヤブマメ植物体中P濃度が0.25%以上、Ca濃度が2.0%以上、Mg濃度が0.6%以上、Ca/Mg比が4.0以上であれば、そのヤブマメは置換酸度が低い状態の土壌で育ったと推定できると考えられた。

4) 現代において生育しているヤブマメの体内無機元素濃度と土壌中有効態リン酸の関係

ヤブマメ植物体中N, P, K, Ca, Mg濃度およびCa/Mg比とその植物体が生育していた土壌の有効態リン酸との関係を図(3)-6に示した。この中で、ヤブマメ植物体中N, K, Ca, Mg濃度と土壌中有効態リン酸の関係は、いずれも決定係数 R^2 が低く弱い関係であったが、ヤブマメ植物体中P濃度と土壌中有効態リン酸の関係は決定係数 R^2 が0.6を越える下記の強い相関関係があった。

$$y = 0.0405\ln(x) + 0.0624, R^2 = 0.6129$$

すなわち、ヤブマメ植物体中P濃度が高ければそのヤブマメが育った土壌では有効態リン酸が高いと推定できると考えられた。この関係式を用いれば、アーカイブ試料として保存されているヤブマメ植物体入手し、これに含まれるP濃度を測定すれば、この植物体が生育していた土壌中の有効態リン酸を、比較的高い確度で推定することが可能であると考えられた。



図(3)-6 ヤブマメ植物体中N, P, K, Ca, Mg濃度およびCa/Mg比とその植物体が生育していた土壌の有効態リン酸との関係。

5) 現代において生育しているオミナエシの体内無機元素濃度と土壤酸性の関係

オミナエシ植物体中N, P, K, Ca, Mg濃度とその植物体が生育していた土壤のpH（土壤pH（H₂O）および土壤pH（KCl））との関係を図(3)-7に示した。これらの関係の中で最も強い相関関係が認められた組み合わせは、オミナエシ植物体中におけるCa濃度と土壤pH（H₂O）の関係であり、下記の式により記述された。

$$y = 0.7483x - 2.2967, R^2 = 0.3658$$

次に強い関係が認められたのは、オミナエシ植物体中におけるCa濃度と土壤pH（KCl）の関係であり、下記の式により記述された。

$$y = 0.7049x - 1.3641, R^2 = 0.3451$$

また、オミナエシ植物体中におけるK濃度と土壤pH（H₂O）の間にも下記の関係が認められた。

$$y = -1.1368x + 7.7977, R^2 = 0.2987$$

同様に、オミナエシ植物体中におけるK濃度と土壤pH（KCl）の間にも下記の関係が認められた。

$$y = -1.1229x + 6.5995, R^2 = 0.3172$$

このように、土壤pHはオミナエシ植物体中Ca濃度とは正の相関関係が、オミナエシ植物体中K濃度とは負の相関関係が認められた。そこで、オミナエシ植物体中のK/Ca比を算出し、土壤pHとの関係を確認したところ、より強い相関関係が認められた（図(3)-8参照）。すなわち、オミナエシ植物体中におけるK/Ca比と土壤pH（H₂O）の間には下記の関係が認められた。

$$y = -7.4111\ln(x) + 13.542, R^2 = 0.476$$

また、オミナエシ植物体中におけるK/Ca比と土壤pH（KCl）の間には下記の関係が認められた。

$$y = -5.8041\ln(x) + 9.6415, R^2 = 0.4839$$

このことは、オミナエシは、土壤pHが低下すると、土壤中からCaに代えてKをより多量に吸収するようにことを示していると考えられた。これは、本研究により初めて明らかにされた新知見である。このように、オミナエシ植物体中におけるK/Ca比は、その植物体が生育していた土壤のpHを推定する上で指標になり得ると考えられた。

上記以外にも、オミナエシ植物体中N濃度は土壤pH（H₂O）と決定係数R²が約0.2の相関関係を、オミナエシ植物体中N濃度は土壤pH（KCl）と決定係数R²が約0.14の関係を、オミナエシ植物体中P濃度は土壤pH（KCl）と決定係数R²が約0.13の関係を示していた。このことから、オミナエシは比較的よく土壤pHに反応して植物体内の無機元素組成を変化させる植物であることが示された。

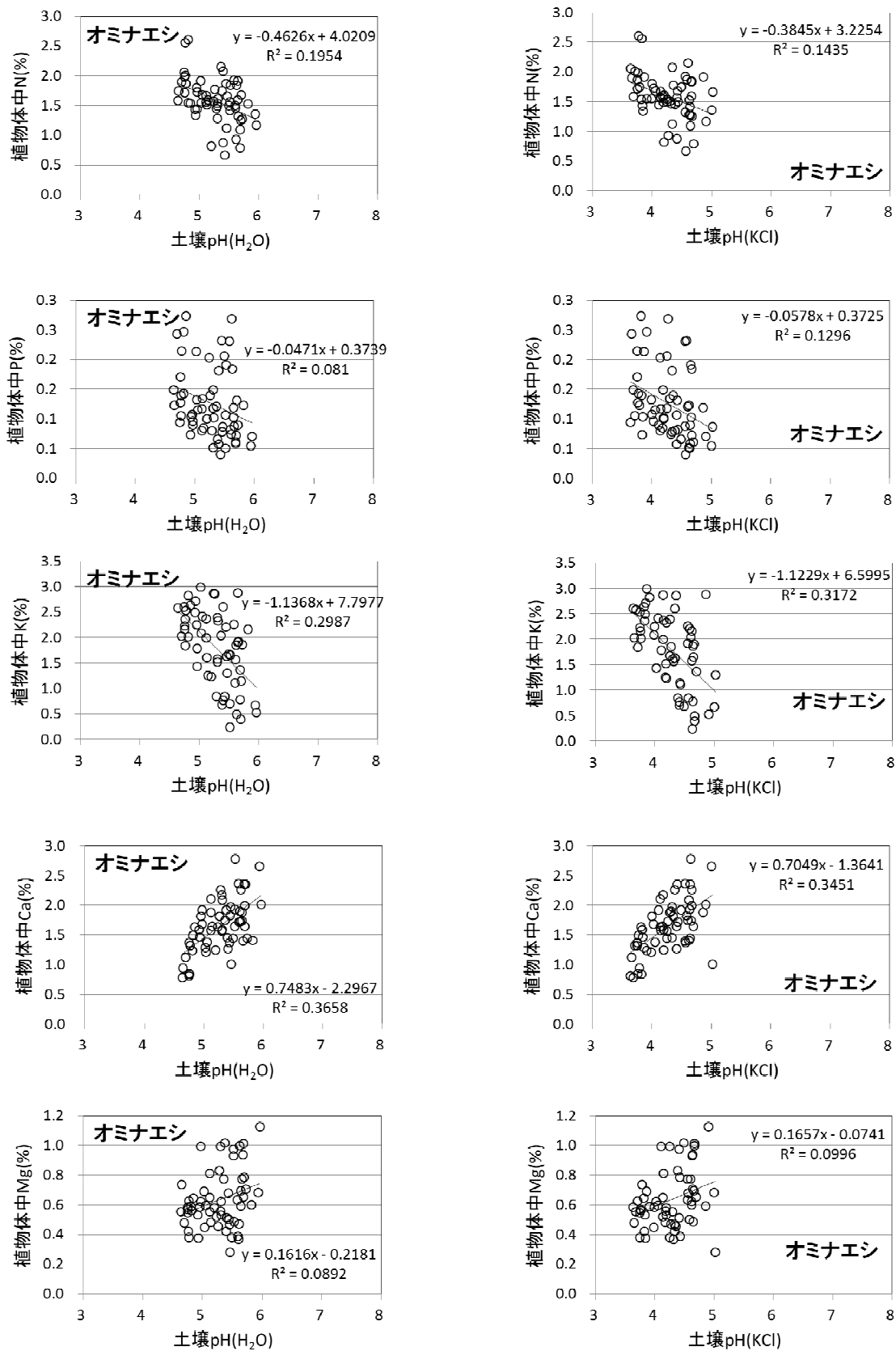
図(3)-9に、オミナエシ植物体中N, P, K, Ca, Mg濃度およびCa/Mg比とその植物体が生育していた土壤の置換酸度との関係を示した。この中で、最も置換酸度と関係が深かったのは植物体中Ca濃度であり、下記の関係があった。

$$y = -0.2451\ln(x) + 2.1945, R^2 = 0.2834$$

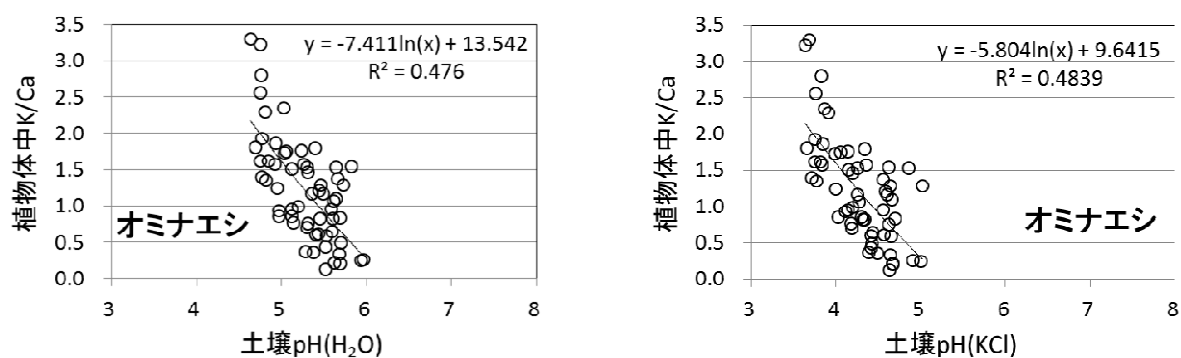
すなわち、オミナエシ植物体中Ca濃度が低ければそのススキが育った土壤では置換酸度が高いという関係があると考えられた。また、植物体中Ca濃度の次に置換酸度との関係が深かったのはオミナエシ植物体中K濃度であり、下記の関係があった。

$$y = 0.3376\ln(x) + 1.0457, R^2 = 0.1969$$

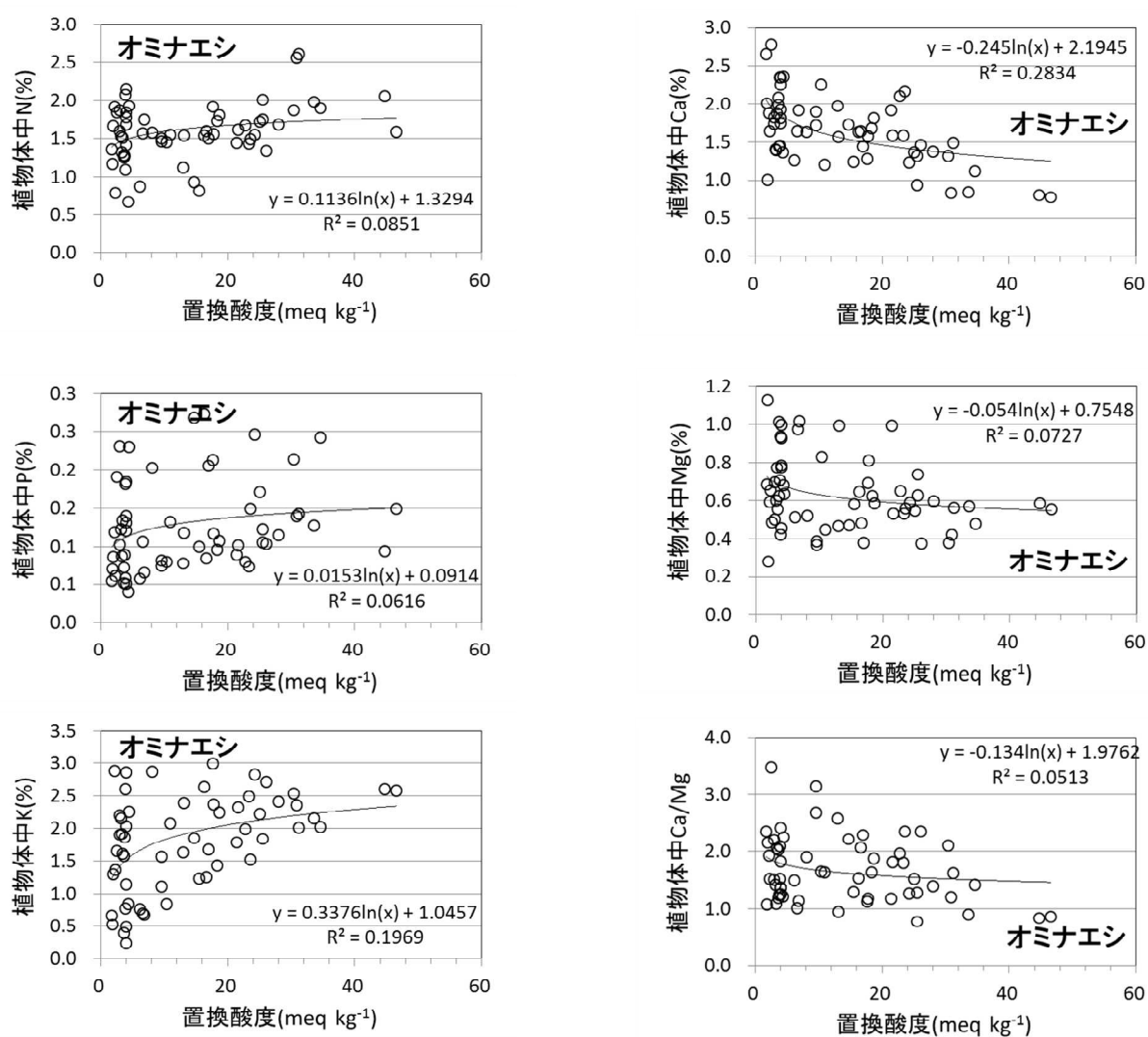
すなわち、オミナエシ植物体中K濃度が低ければそのススキが育った土壤では置換酸度が低いという関係があると考えられた。



図(3)-7 オミナエシ植物体内におけるN, P, K, Ca, Mg濃度とその植物体が生育していた土壌のpH(土壌pH(H₂O):左図および土壌pH(KCl):右図)との関係。



図(3)-8 オミナエシ植物体内におけるK/Ca比とその植物体が生育していた土壌のpH（土壌pH（H₂O）：左図および土壌pH(KCl)：右図）との関係。



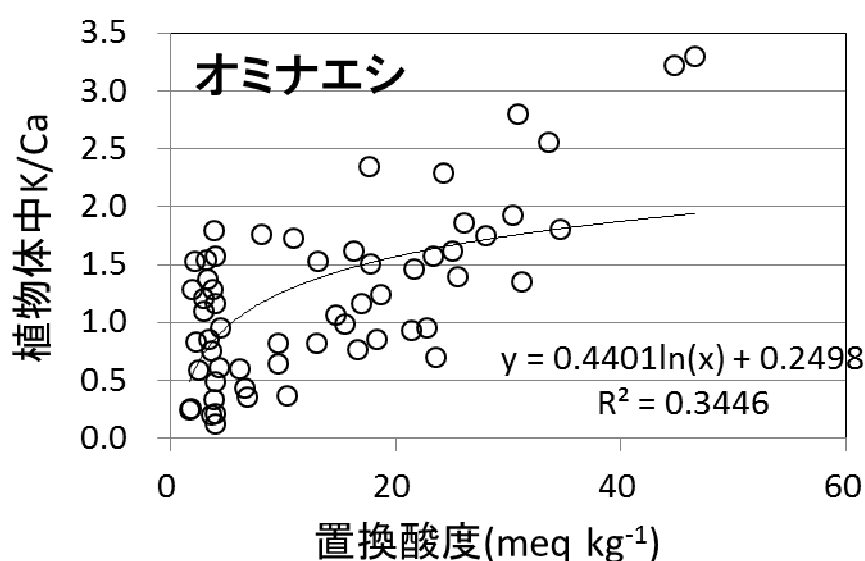
図(3)-9 オミナエシ植物体中N, P, K, Ca, Mg濃度およびCa/Mg比とその植物体が生育していた土壌の置換酸度との関係。

次に、オミナエシについては、植物体中におけるK/Ca比と置換酸度の関係も検討した。その結果、両者の間には、図(3)-9に示したいずれの関係よりも強い相関関係が認められ(図(3)-10参照)、下記の関係式により記述された。

$$y = 0.4401\ln(x) + 0.2498, R^2 = 0.3446$$

ただし、これらの関係は非常に強いものではないため、上記の関係式による土壌の置換酸度の推定には、不確定性が含まれていることを考慮に入れておく必要があると考えられた。

その他のケースについては、植物体中無機元素濃度と土壌の置換酸度との間で、線形近似や対数近似では良い関係式が得られず、いずれも決定係数 R^2 は0.1以下の弱い関係であった。



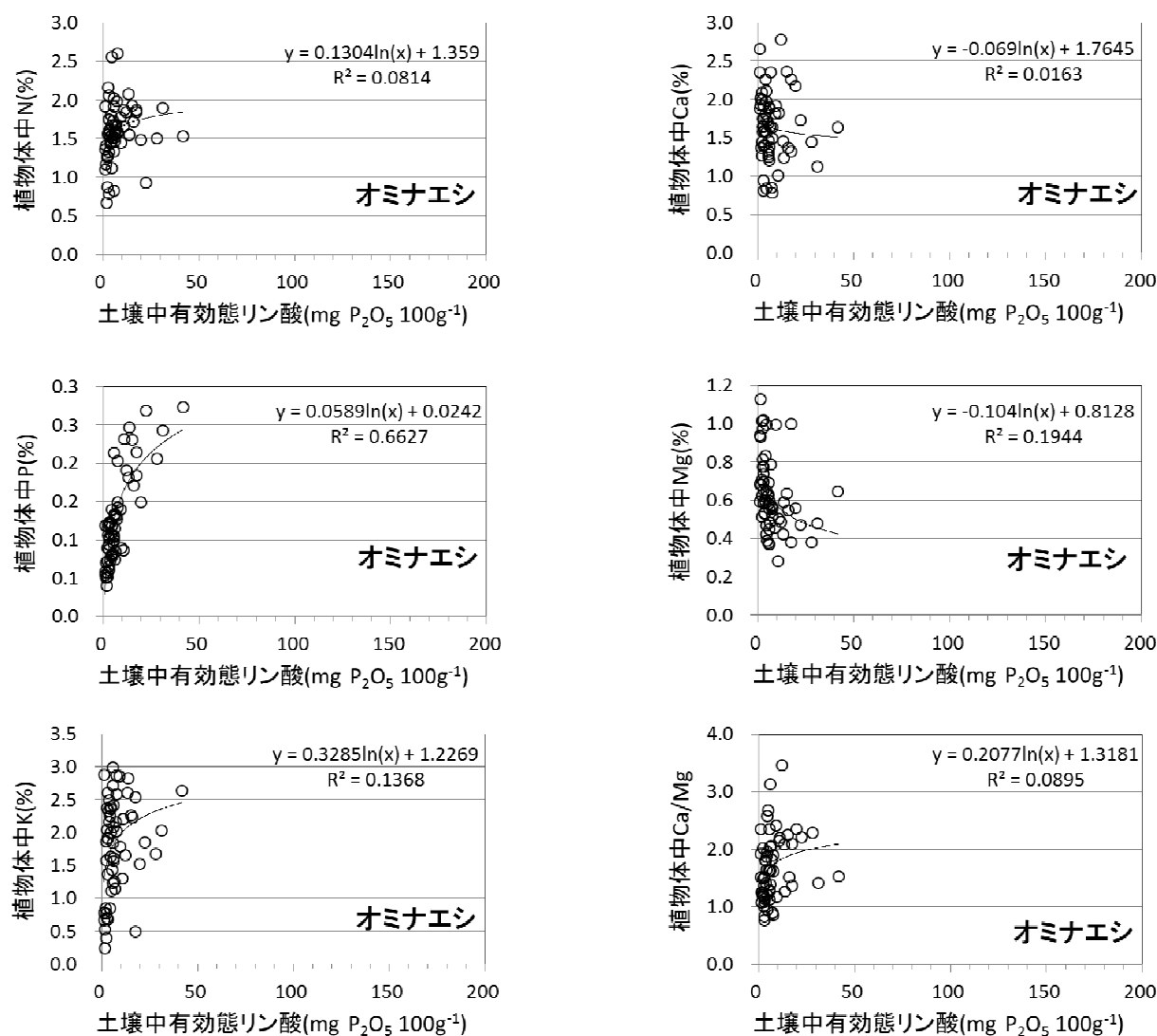
図(3)-10 オミナエシ植物体中におけるK/Ca比とその植物体が生育していた土壌の置換酸度との関係。

6) 現代において生育しているオミナエシの体内無機元素濃度と土壌中有効態リン酸の関係

オミナエシ植物体中N, P, K, Ca, Mg濃度およびCa/Mg比とその植物体が生育していた土壌の有効態リン酸との関係を図(3)-11に示した。この中で、オミナエシ植物体中P濃度と土壌中有効態リン酸の関係は、決定係数 R^2 が0.6を越える下記の強い相関関係があった。

$$y = 0.0589\ln(x) + 0.0242, R^2 = 0.6627$$

すなわち、オミナエシ植物体中P濃度が高ければそのオミナエシが育った土壌では有効態リン酸が高いと推定できると考えられた。この関係式を用いれば、アーカイブ試料として保存されているオミナエシ植物体入手し、これに含まれるP濃度を測定すれば、この植物体が生育していた土壌中の有効態リン酸を、比較的高い確度で推定することが可能であると考えられた。



図(3)-11 オミナエシ植物体中N, P, K, Ca, Mg濃度およびCa/Mg比とその植物体が生育していた土壌の有効態リン酸との関係。

さらに、図(3)-11からは、相関関係は高くないものの、土壌中有効態リン酸が増加すればオミナエシ植物体中K濃度は上昇する傾向があること、逆にオミナエシ植物体中Mg濃度は下降する傾向があることが認められた。このことは、オミナエシは土壌中におけるリンの栄養状態に反応して、植物体内の無機元素組成を変化させることで適応している可能性があることを示唆していると考えられた。なお、オミナエシ植物体中におけるK/Ca比と置換酸度の関係は下記で記述され、強い関係ではなかった。

$$y = 0.2479\ln(x) + 0.7982, R^2 = 0.0803$$

7) 現代において生育しているその他の植物についての体内無機元素濃度と土壌の化学的特性の関係

本研究では、非常に多くの草原生植物について、体内無機元素濃度と土壌の化学的特性の関係を調査した。その中では、4 (1) - 1 ~ 4 (1) 6 に報告した事例以外にも、本研究の目的（過去に採取されたアーカイブ試料の分析により過去の土壌環境を推定する）に利用できそうな関係がいくつか認められている。その一部を下記に抜粋した。

- ・ミツバツチグリ植物体中Ca濃度と土壌pH(H₂O)の関係：

$$y = 0.5229x - 0.9826, R^2 = 0.3663$$

- ・ミツバツチグリ植物体中Ca濃度と土壌pH(KCl)の関係：

$$y = 0.5633x - 0.6203, R^2 = 0.4528$$

- ・ミツバツチグリ植物体中Ca濃度と置換酸度の関係：

$$y = -0.2361\ln(x) + 2.3254, R^2 = 0.4606$$

- ・ミツバツチグリ植物体中P濃度と土壌中有効態リン酸の関係：

$$y = 0.0743\ln(x) + 0.0288, R^2 = 0.3595$$

- ・キジムシロ植物体中Ca濃度と土壌pH(KCl)の関係：

$$y = 0.6676x - 1.2752, R^2 = 0.4209$$

- ・キジムシロ植物体中P濃度と土壌中有効態リン酸の関係：

$$y = 0.1092\ln(x) - 0.0343, R^2 = 0.6003$$

- ・ヤマハギ植物体中Ca濃度と土壌pH(H₂O)の関係：

$$y = 0.6258x - 2.3191, R^2 = 0.3768$$

- ・ヤマハギ植物体中Ca濃度と土壌pH(KCl)の関係：

$$y = 0.6894x - 1.956, R^2 = 0.5089$$

- ・トダシバ植物体中Ca濃度と土壌pH(H₂O)の関係：

$$y = 0.3635x - 1.5321, R^2 = 0.5209$$

- ・トダシバ植物体中Ca濃度と土壌pH(KCl)の関係：

$$y = 0.2932x - 0.8939, R^2 = 0.4267$$

- ・ヨモギ植物体中P濃度と土壌中有効態リン酸の関係：

$$y = 0.0717\ln(x) + 0.0895, R^2 = 0.3351$$

- ・ゲンノショウコ植物体中N濃度が3%を越える場合には、その植物体が生育していた土壌は置換酸度が6 meq kg⁻¹以下である。

- ・ゲンノショウコ植物体中P濃度と土壌中有効態リン酸の関係：

$$y = 0.0707\ln(x) + 0.149, R^2 = 0.3801$$

上記に示したような、植物体中無機元素濃度と土壌の化学的特性との間の相関関係が決定係数R²で0.3以上となるような関係が認められるのは少数であり、大部分の関係は決定係数R²が0.1以下の非常に弱い相関関係であり、これらは本研究の目的のためには利用が難しいと考えられた。

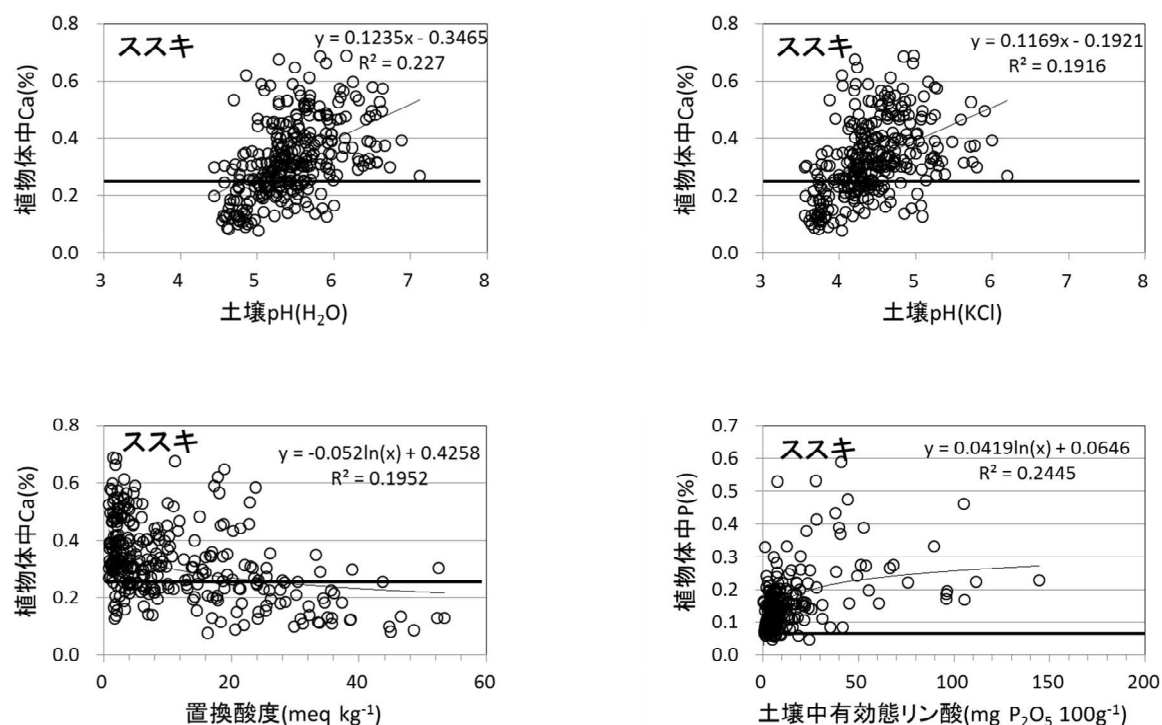
(2) 過去において採取された植物標本試料の解析による過去の土壌の化学的特性の推定

本研究では、過去において採取された植物標本資料（アーカイブ試料）を山口県秋吉台科学博物館から恵与していただき、これらの植物体中におけるC, N, K, Ca, Mg, P, B, Fe, Mn, Zn, Cu等の濃度を測定し、現代において生育している植物について得られている植物体中無機元素濃度と土壌の化学的特性の関係と照らし合わせることによって、これらの標本となった植物が生育していた過去の土壌環境を推定する。ここでは、恵与していただいた植物標本のうち、ススキ(1点)、ヤブマメ(2点)、およびオミナエシ(1点)について、結果を下記に報告する。

1) 過去において採取されたススキ植物標本試料の解析による過去の土壌の化学的特性の推定

ススキの場合、過去の土壌環境を推定するうえで参考になる可能性のある植物体中無機元素濃度と土壌の化学的特性の関係は、植物体中Ca濃度-土壌pH(H₂O)、植物体中Ca濃度-土壌pH(KCl)、植物体中Ca濃度-置換酸度、植物体中P濃度-土壌中有効態リン酸であった。

一方、入手したススキ植物標本試料を分析した結果、植物体中Ca濃度は0.24%、植物体中P濃度は0.065%であった。この値を、本研究で得られた植物体中無機元素濃度-土壌の化学的特性の関係にあてはめた結果を、図(3)-12に示した。



図(3)-12 秋吉台科学博物館から恵与されたススキ標本中に含まれるCa濃度から推定したこの植物が生育した土壌環境（土壌pH(H₂O)、土壌pH(KCl)、置換酸度）およびP濃度から推定したこの植物が生育した土壌の有効態リン酸。

*植物標本試料中におけるCa濃度およびP濃度は、図中の横線で示した。

また、本研究で得られたススキ植物体中Ca濃度と土壌pH(H₂O)の関係に関する回帰式から、この標本試料となったススキ植物体が生育した土壌のpH(H₂O)は4.7と推定された。また、ススキ植物体中Ca濃度と土壌pH(KCl)の関係に関する回帰式から、この標本試料となったススキ植物体が生育した土壌のpH(KCl)は3.7と推定された。また、ススキ植物体中Ca濃度と置換酸度に関する回帰式から、この標本試料となったススキ植物体が生育した土壌の置換酸度は37 meq kg⁻¹と推定された。以上の結果は、いずれも標本試料となったこのススキ植物体は土壌酸性が強い環境で生育していたことを示すものである。

また、本研究で得られたススキ植物体中P濃度と土壌中有効態リン酸に関する回帰式から、この標本試料となったススキ植物体が生育した土壌中の有効態リン酸は1.0 mg P₂O₅ 100 g⁻¹と推定された。この結果は、標本試料となったこのススキ植物体は土壌中有効態リン酸が非常に少ない環境で生育していたことを示すものである。

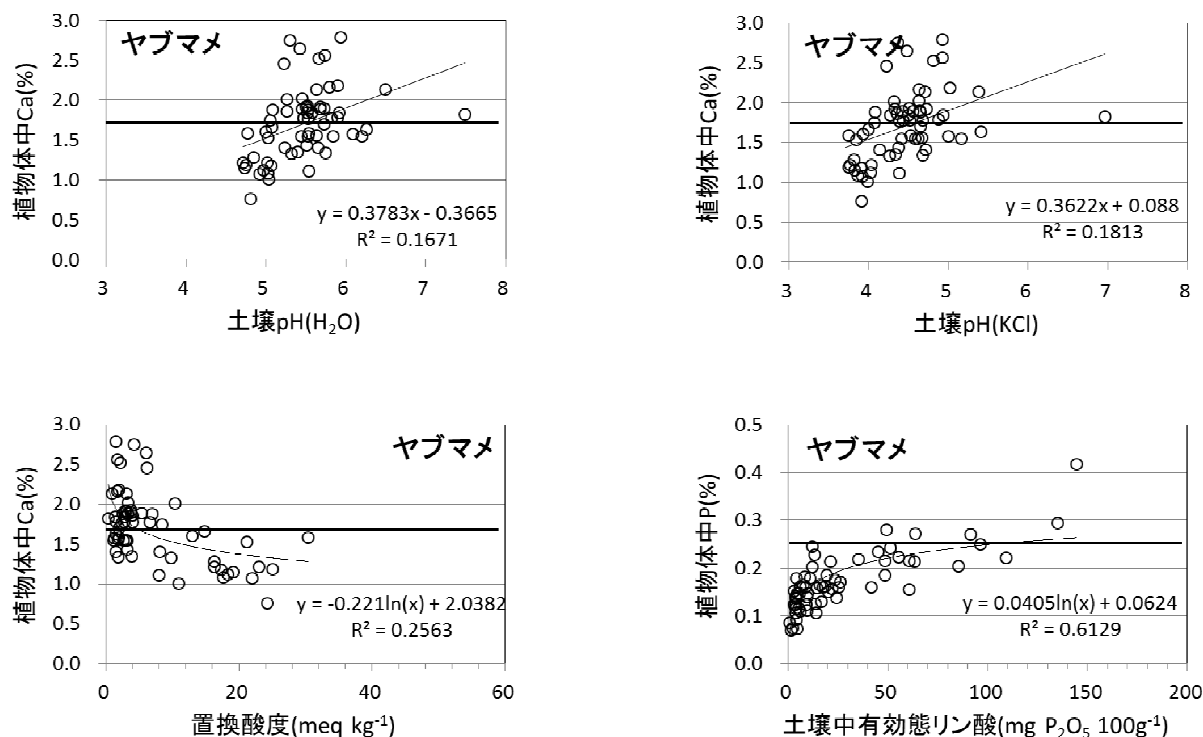
また、このススキ標本試料が採取された当時を知る方からヒアリングを行った結果、本研究によるこれらの推定は、概ね妥当であると判断された。

以上のように、過去において生育していたススキ植物標本試料が入手できれば、そのススキ植物標本中のCaやPの濃度を測定することにより、そのススキが生育していた当時の土壌環境を推定することが可能であった。ススキの場合、植物体中元素濃度と土壌の化学的特性の間の相関関係はそれほど高くはないものの、いくつかの相関関係を同時に検討することにより、推定の信頼性を上げることができると考えられた。

2) 過去において採取されたヤブマメ植物標本試料の解析による過去の土壌の化学的特性の推定

ヤブマメの場合、過去の土壌環境を推定するうえで参考になる可能性のある植物体中無機元素濃度と土壌の化学的特性の関係は、植物体中Ca濃度-土壌pH(H₂O)、植物体中Ca濃度-土壌pH(KCl)、植物体中Ca濃度-置換酸度、植物体中P濃度-土壌中有効態リン酸であった。また、ヤブマメは、植物体中P濃度が0.25%以上、Ca濃度が2.0%以上、Mg濃度が0.6%以上、Ca/Mg比が4.0以上であれば、そのヤブマメは置換酸度が低い状態の土壌で育ったものであると推定できると考えられた。

一方、入手したヤブマメ植物標本試料を分析した結果、ヤブマメ標本（その1）では、植物体中Ca濃度は1.7%、植物体中P濃度は2.6%、植物体中Mg濃度は0.26%、植物体中Ca/Mg比（モル比）は3.9あった。この値を、本研究で得られた植物体中無機元素濃度-土壌の化学的特性の関係にあてはめた結果を図(3)-13に示した。また、本研究で得られたヤブマメ植物体中Ca濃度と土壌pH(H₂O)の関係に関する回帰式から、この標本試料となったヤブマメ植物体が生育した土壌のpH(H₂O)は5.4と推定された。また、ヤブマメ植物体中Ca濃度と土壌pH(KCl)の関係に関する回帰式から、この標本試料となったヤブマメ植物体が生育した土壌のpH(KCl)は4.4と推定された。また、ヤブマメ植物体中Ca濃度と置換酸度に関する回帰式から、この標本試料となったヤブマメ植物体が生育した土壌の置換酸度は4.9 meq kg⁻¹と推定された。以上の結果は、いずれも、標本試料となったこのヤブマメ植物体は土壌酸性が弱い環境で生育していたことを示すものである。また、このヤブマメ標本（その1）植物体中P濃度は0.25%を超えていること、植物体中Ca/Mg比が4.0に非常に近いことから、やはりこのヤブマメ植物体は土壌酸性が弱い環境で育ったことが支持された。



図(3)-13 秋吉台科学博物館から恵与されたヤブマメ標本(その1)に含まれるCa濃度から推定したこの植物が生育した土壌環境(土壌pH(H₂O)、土壌pH(KCl)、置換酸度)およびP濃度から推定したこの植物が生育した土壌の有効態リン酸。

*ヤブマメ標本(その1)試料中におけるCa濃度およびP濃度は、図中の横線で示した。

また、本研究で得られたヤブマメ植物体中P濃度と土壌中有効態リン酸の関係に関する回帰式から、この標本試料となったヤブマメ標本(その1)植物体が生育した土壌中の有効態リン酸は120 mg P₂O₅ 100 g⁻¹と推定された。この結果は、標本試料となったこのヤブマメ植物体は、土壌中有効態リン酸が非常に多い環境で生育していたことを示すものである。

また、このヤブマメ標本試料が採取された当時を知る方からヒアリングを行った結果、本研究によるこの推定は、概ね妥当であると判断された。

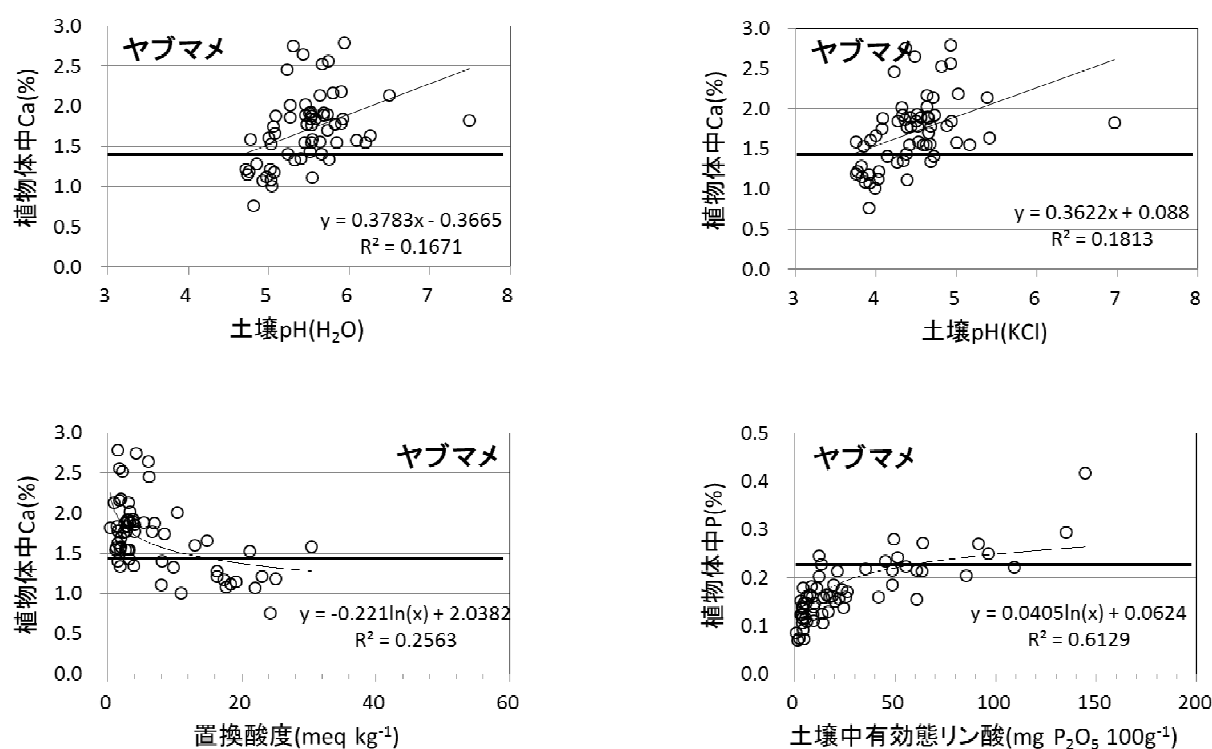
一方、ヤブマメ標本(その2)では、植物体中Ca濃度は1.5%、植物体中P濃度は2.2%、植物体中Mg濃度は0.33%、植物体中Ca/Mg比(モル比)は2.8あった。この値を、本研究で得られた植物体中無機元素濃度-土壌の化学的特性の関係にあてはめた結果を図(3)-14に示した。また、本研究で得られたヤブマメ植物体中Ca濃度と土壌pH(H₂O)の関係に関する回帰式から、この標本試料となったヤブマメ植物体が生育した土壌のpH(H₂O)は4.9と推定された。また、ヤブマメ植物体中Ca濃度と土壌pH(KCl)の関係に関する回帰式から、この標本試料となったヤブマメ植物体が生育した土壌のpH(KCl)は3.7と推定された。また、ヤブマメ植物体中Ca濃度と置換酸度の関係に関する回帰式から、この標本試料となったヤブマメ植物体が生育した土壌の置換酸度は12 meq kg⁻¹と推定された。以上の結果は、標本試料となったこのヤブマメ植物体は土壌酸性がやや強い環境で生育していた

ことを示すものである。その土壤酸性の程度は、ヤブマメ標本（その１）が生育した環境よりは強いものの、上記のススキ標本が育った環境よりは弱いものと考えられた。

また、本研究で得られたヤブマメ植物体中P濃度と土壌中有効態リン酸の関係に関する回帰式から、この標本試料となったヤブマメ標本（その２）植物体が生育した土壌中の有効態リン酸は55 mg P_2O_5 100 g^{-1} と推定された。この結果は、標本試料となったこのヤブマメ植物体は、土壌中有効態リン酸が多い環境で生育していたことを示すものである。

また、このヤブマメ標本試料が採取された当時を知る方からヒアリングを行った結果、本研究によるこの推定は、概ね妥当であると判断された。

以上のように、過去のヤブマメ植物標本があれば、そのヤブマメ植物標本中のCa、P、Mgの濃度を測定することにより、そのヤブマメが生育していた当時の土壤環境を推定することができた。ヤブマメの場合、ススキの場合と同様、植物体中無機元素濃度と土壌の化学的特性の間の相関関係はそれほど高くなくても、いくつかの相関関係を同時に検討することにより、推定の信頼性を上げることができると考えられた。



図(3)-14 秋吉台科学博物館から恵与されたヤブマメ標本（その２）中に含まれるCa濃度から推定したこの植物が生育した土壤環境（土壌pH(H_2O)、土壌pH(KCl)、置換酸度）およびP濃度から推定したこの植物が生育した土壌の有効態リン酸。

*ヤブマメ標本（その２）試料中におけるCa濃度およびP濃度は、図中の横線で示した。

3) 過去において採取されたオミナエシ植物標本試料の解析による過去の土壌の化学的特性の推定

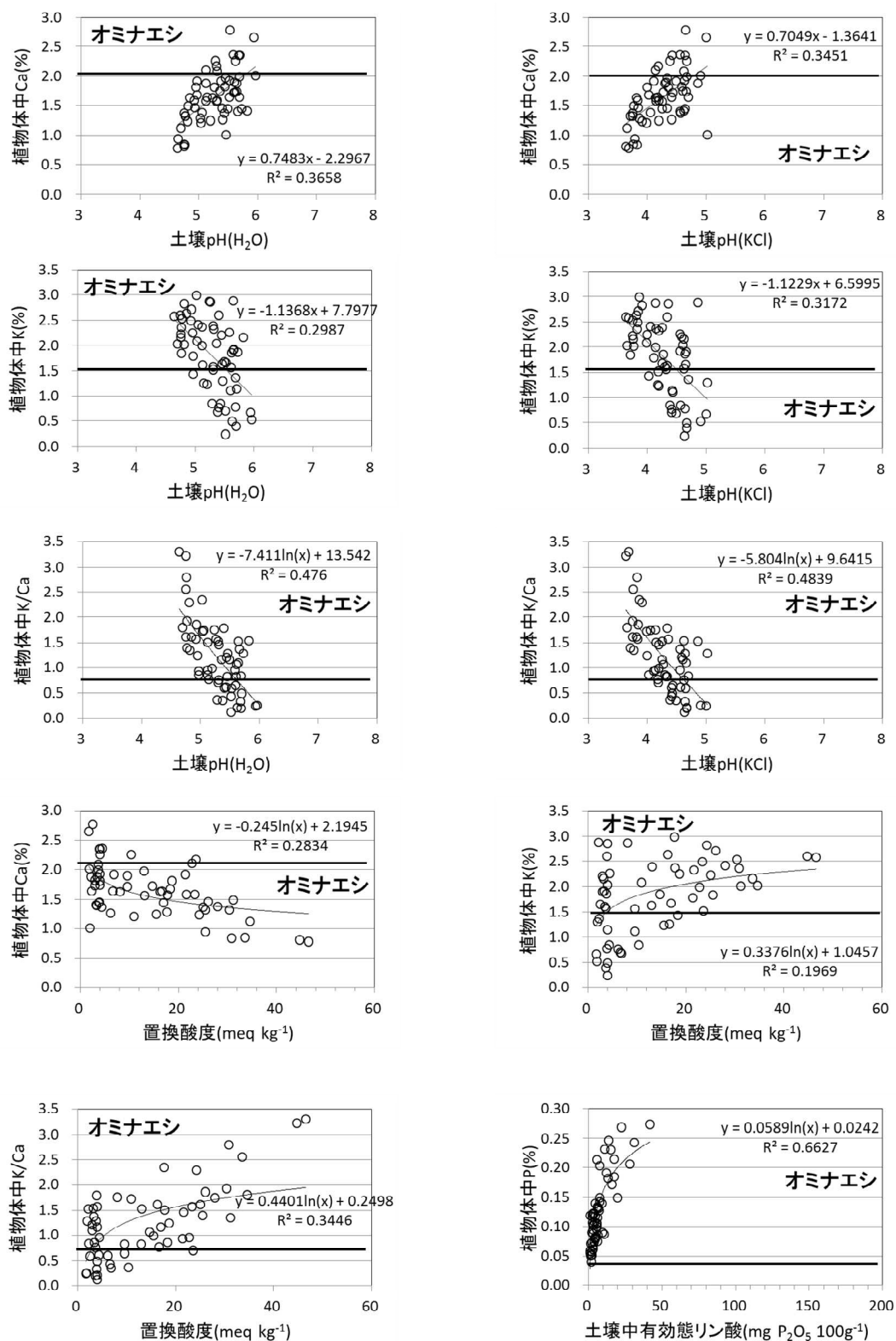
オミナエシの場合、過去の土壌環境を推定するうえで参考になる可能性のある植物体中無機元素濃度と土壌の化学的特性の関係は、植物体中Ca濃度-土壌pH(H₂O)、植物体中Ca濃度-土壌pH(KCl)、植物体中K濃度-土壌pH(H₂O)、植物体中K濃度-土壌pH(KCl)、植物体中K/Ca比-土壌pH(H₂O)、植物体中K/Ca比-土壌pH(KCl)、植物体中Ca濃度-置換酸度、植物体中K濃度-置換酸度、植物体中K/Ca-置換酸度、植物体中P濃度-土壌中有効態リン酸であった。

一方、入手したオミナエシ植物標本試料を分析した結果、植物体中Ca濃度は2.0%、植物体中K濃度は1.5%、植物体中P濃度は0.043%、植物体中K/Ca比（重量比）は0.73であった。この値を、本研究で得られた植物体中無機元素濃度-土壌の化学的特性の関係にあてはめた結果を図(3)-15に示した。また、本研究で得られたオミナエシ植物体中Ca濃度と土壌pH(H₂O)の関係に関する回帰式から、この標本試料となったオミナエシ植物体が生育した土壌のpH(H₂O)は5.8と推定された。また、オミナエシ植物体中Ca濃度と土壌pH(KCl)の関係に関する回帰式から、この標本試料となったオミナエシ植物体が生育した土壌のpH(KCl)は4.8と推定された。また、オミナエシ植物体中K濃度と土壌pH(H₂O)の関係に関する回帰式から、この標本試料となったオミナエシ植物体が生育した土壌のpH(H₂O)は5.6と推定された。また、オミナエシ植物体中K濃度と土壌pH(KCl)の関係に関する回帰式から、この標本試料となったオミナエシ植物体が生育した土壌のpH(KCl)は4.6と推定された。また、オミナエシ植物体中K/Ca濃度比と土壌pH(H₂O)の関係に関する回帰式から、この標本試料となったオミナエシ植物体が生育した土壌のpH(H₂O)は5.6と推定された。また、オミナエシ植物体中K/Ca濃度比と土壌pH(KCl)の関係に関する回帰式から、この標本試料となったオミナエシ植物体が生育した土壌のpH(KCl)は4.6と推定された。また、オミナエシ植物体中Ca濃度と置換酸度の関係に関する回帰式から、この標本試料となったオミナエシ植物体が生育した土壌の置換酸度は2.0 meq kg⁻¹と推定された。また、オミナエシ植物体中K濃度と置換酸度の関係に関する回帰式から、この標本試料となったオミナエシ植物体が生育した土壌の置換酸度は3.7 meq kg⁻¹と推定された。また、オミナエシ植物体中K/Ca濃度比と置換酸度の関係に関する回帰式から、この標本試料となったオミナエシ植物体が生育した土壌の置換酸度は3.0 meq kg⁻¹と推定された。以上の結果から、標本試料となったこのオミナエシは土壌酸性が弱い環境で生育していたと推定された。

また、本研究で得られたオミナエシ植物体中P濃度と土壌中有効態リン酸の関係に関する回帰式から、この標本試料となったオミナエシ標本植物体が生育した土壌中の有効態リン酸は1.4 mg P₂O₅ 100 g⁻¹と推定された。この結果は、標本試料となったこのヤブマメ植物体は、土壌中有効態リン酸が非常に少ない環境で生育していたことを示すものである。

以上のデータから、この植物標本となったオミナエシは、土壌酸性が弱くかつ土壌中有効態リン酸が非常に低い場所に生育していたと考えられる。秋吉台では半自然草原が維持されているが、石灰岩の近くでは、土壌酸性が弱くかつ土壌中有効態リン酸が非常に低い場所がよく見られる。このため、このオミナエシも、石灰岩の影響を受けた場所で生育していた可能性があると考えられた。また、このオミナエシ標本試料が採取された当時を知る方からヒアリングを行った結果、本研究によるこれらの推定は、概ね妥当であると判断された。

このように、オミナエシ標本試料には、当時の生育環境を知る手がかりが豊富に記録されているものと考えられた。



図(3)-15 秋吉台科学博物館から恵与されたオミナエシ標本中に含まれるCaおよびK濃度から推定したこの植物が生育した土壤環境(土壤pH(H₂O)、土壤pH(KCl)、置換酸度)およびP濃度から推定したこの植物が生育した土壤の有効態リン酸。

*植物標本試料中におけるCa濃度、K濃度、P濃度、あるいはK/Ca比は、図中の横線で示した。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

本研究により、各地の博物館や研究所に保管されている植物標本試料などについて化学分析を実施し植物体中無機元素濃度を明らかにすれば、それぞれ植物標本となった植物体が生育していた土壌の化学的特性が推定できる基礎が確立されたと考えられる。とくにオミナエシは、その植物体が生育した土壌の化学的特性が、植物体内無機元素組成としてよく保存されており、植物体中無機元素濃度と土壌の化学的特性の間の関係は、決定係数 R^2 が高い組み合わせが多数存在した。このため、オミナエシ植物標本は過去を知る貴重な資料となりうるということが明らかになった。

また、日本の草原に広域に出現する在来植物の中でも、ススキやヤブマメといった植物では、オミナエシほど明確ではないものの、植物体内無機元素組成はその植物が生育した土壌の化学的特性を反映しており、やはり過去の土壌環境を知る上で貴重な資料になりうると思われた。とくにススキは、かつてから生活必需品や資材としてよく利用されてきたものであることから、今後、過去において採取された植物体試料が提供され、過去の土壌環境を解明する手がかりになることが期待される。

本研究では、オミナエシ、ススキ、ヤブマメ以外にも、ゲンノショウコ、ミツバツチグリ、ヤマハギ、トダシバといった植物で、体内無機元素組成と土壌の化学的特性の間に高い相関関係が認められた。また、本研究では採取した植物サンプル数が十分ではなかったため植物体中無機元素組成と土壌の化学的特性の関係を詳細に調査できなかったものもあるため、今後、本研究による成果が広がれば、本研究と同様のアイデアで、より多くの種類の植物について研究が進むことが期待される。

このように、本研究により、植物体中無機元素濃度とその植物が生育した土壌の化学的特性の間には密接な関係があるものがあり、この関係を利用すれば、アーカイブ試料から過去の土壌環境を知る手がかりが得られることが明らかになった。このように、植物体内に含まれる元素からその植物が生育していた土壌環境を推定する手法は、これまでは同位体組成を利用した手法は広く試みられているが、それ以外の手法はほとんど例がない。これは、植物体中無機元素組成と土壌特性の関係を広範に調査する必要があること、生態学、土壌学、分析科学など多方面にわたる広い知識と経験が必要であること、また膨大な時間と労力と研究資金が必要であるためと考えられる。本研究では、植物種ごとに分布しやすい土壌特性、植物栄養学的特性、植物体内の元素組成など膨大なデータが入手できたことによって本研究成果につながった。同位体組成を利用した植物の生育環境の推定は、その植物が生育していた年代の推定、窒素の由来推定、生育温度の推定などの目的で利用されているが、植物栄養学的な情報はほとんど得られない。このため、本研究により開発された植物体中無機元素濃度からその植物が生育した土壌環境を推定する手法は、本研究のみならず、多くの分野で利用されることが期待される。また、本研究により、指標性の高い植物種がいくつか見つかったことは大きな進歩である。このように、本研究はこの分野の研究の可能性を切り開き、科学的な進歩に大きく貢献すると思えられる。

（２）環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

本研究成果は、現状では科学的貢献が大きく、これが環境行政へ波及するまでには時間を要すると考えられる。このため、本研究成果を既に行政が活用したという実績はまだない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

今後、次のような環境政策への貢献が考えられる。

- ・ 絶滅危惧植物の保全を目指した環境整備のための参考資料となる：

現在では絶滅危惧植物となってしまったが、過去においては普通種として扱われていた植物も多数ある。これらの植物は、過去においてはその生育に適した環境であった可能性が高い。この、過去において旺盛に生育していた時代の土壌環境を明らかにできれば、その植物を保全するうえで有利な土壌環境に関する情報が得られる。本研究で得られた手法を特定の絶滅危惧植物に適用することにより、その植物が旺盛に生育していた時代における土壌環境に関する情報が得られると期待される。

- ・ 植物標本の利用価値に新たな一面を加えた：

博物館や研究所などは、多くが行政の傘下に置かれているが、植物部門を持っている機関では多くが植物標本を多数所有している。しかし、これらは特定の目的のために収集していないことがほとんどであり、その利用についてはまだ十分な知見が蓄えられていない。本研究により得られた成果は、これら植物標本の無機元素組成が過去の土壌環境を知る手がかりとして有用である可能性を示しており、現在保管されている植物標本の利用価値の一端を明らかにしたと考えられる。

これらの研究成果は、今後、学会活動や草原の保全活動にかかわる団体が主催するセミナーなどを通じて、広く広報・普及に努める予定である。

6. 国際共同研究等の状況

本研究成果は、サブテーマ(1)「野草類の分布と土壌の化学的特性の関係解明」およびサブテーマ(2)「野草類に含まれる無機栄養元素組成の解明」で明らかにされたデータを解析することによって得られたものである。このため、ここに報告する<国際共同研究等の状況>は、サブテーマ(1)および(2)で報告した内容と同一である。すなわち、その概要は下記の通りである。

本研究は、日本国内における野草類の分布と土壌の化学的特性との関係を調べたものであり、日本国内における独特の植物特性や土壌環境条件を研究対象としている。このため、国際共同研究は当初は考慮に入れていなかった。しかし、研究が予想以上に進捗し、また得られた結論も国際的に注目されるものであると考えられることから、本研究プロジェクト後半においてとくに多くの海外の研究者と本研究成果に関する意見交換を行った。具体的には、アメリカ合衆国メーン州立大学のSusan M. Erich教授（専門：土壌化学）、Tsutomu Ohno教授（専門：土壌学）、The New Zealand Institute for Plant & Food Research LimitedのBrent Clothier博士およびKarin Mueller博士らである。これら海外の研究者とは別の研究テーマで共同研究を実施中であるが、本研究により得られたデータを考慮に入れながら、さらに共同研究を発展させていくことで同意を得ている。また、今後、本研究で得られた知見を国際誌に発表する予定であるため、さらに国際共同研究は進展するものと期待される。

上記の内容の詳細については、サブテーマ(1)「野草類の分布と土壌の化学的特性の関係解明」

の項目中、6. 国際共同研究等の状況の項目を参照されたい。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

特に記載すべき事項はない

<その他誌上発表(査読なし)>

- 1) 平舘俊太郎、楠本良延、吉武 啓、馬場友希：身近な自然の保全生態学、生物の多様性を知る（根本正之編著）、131-148, 培風館（2010）
「土壌が支える生物多様性」
- 2) 和田信一郎、金田吉弘、鳥山和伸、安西徹郎、日笠裕治、小祝政明、後藤逸男、平舘俊太郎：日本土壌肥科学雑誌, 82(2), 173-178（2011）
「土壌診断の現状と今後への挑戦：流派そろい踏み」
- 3) 平舘俊太郎、松永俊朗、和田信一郎、渡邊 彰：日本土壌肥科学雑誌, 第82巻, 部門別進歩総説特集号 72, 466-478（2011）
「第2部門 土壌化学・土壌鉱物」
- 4) 平舘俊太郎：農環研ニュース、**96**, 10（2012）
「公開シンポジウム「阿蘇の草原に生きる植物と土壌」」

(2) 口頭発表(学会等)

- 1) 平舘俊太郎：日本土壌肥科学会講演要旨集第56集、208,（2010）
「生物多様性と土壌診断」
- 2) 平舘俊太郎、白川勝信、森田沙綾香、小柳知代、中西亮介、楠本良延、太田陽子、大竹邦暁、佐久間智子、堤 道生、高橋佳孝：日本生態学会第58回全国大会、P1-023（2011）
「半自然草地における植物の分布と土壌特性の関係：広島県雲月山における放牧地と非放牧地の比較」
- 3) 平舘俊太郎、森田沙綾香、小柳知代、楠本良延：日本生態学会第59回全国大会、T03-5（2012）
「土壌環境から考える二次草原の再生：わかってきた野草類の土壌環境適性」
- 4) 森田沙綾香、小柳知代、楠本良延、平舘俊太郎：日本生態学会第59回全国大会、D1-11（2012）
「土壌の養分吸収特性がススキ、ヨモギ、セイタカアワダチソウの分布に及ぼす影響」
- 5) 平舘俊太郎：日本生態学会第60回全国大会 自由集会（2013）
「土壌と植生の深いつながり」
- 6) 小柳知代：日本生態学会第60回全国大会 自由集会（2013）
「草原生植物の分布と土壌の化学的特性の関係」
- 7) 森田沙綾香：日本生態学会第60回全国大会 自由集会（2013）
「草原生植物に含まれる無機栄養元素組成の特徴」
- 8) 森田沙綾香、石田麻里、太田陽子、小柳知代、楠本良延、平舘俊太郎：日本生態学会第60回全国大会、266（P2-096）（2013）
「植物標本を用いた過去の土壌環境の推定：ヤブマメとオミナエシを用いて」

(3) 出願特許

- 1) 平舘俊太郎、楠本良延、藤間 充、荒木陽子： 独立行政法人農業環境技術研究所；「植生の制御方法」、特許出願（特願2011-044614），出願日：平成23年3月2日。

(4) シンポジウム、セミナー等の開催（主催のもの）

- 1) 平舘俊太郎：セミナー講演、平成22年6月1日、北里大学（観客約60名）。
「外来植物の侵入・定着と土壌の化学的特性の関係」
- 2) 平舘俊太郎：セミナー講演、現地学習会「秋吉台草原の保全と再生を考える」、平成22年9月26日、秋吉台科学博物館（観客約30名）。
「野草類の土壌環境に対する生育特性と草原の再生技術」
- 3) 楠本良延：講義、平成22年11月25日、財団法人 農民教育協会 鯉淵学園農業栄養専門学校（観客約40名）。
「農村環境に生育する植物群落の特徴と紹介」
- 4) 平舘俊太郎：講義、平成23年1月13日、東京農業大学（観客約160名）。
「植物の生育と土壌環境」
- 5) 「半自然草地の現状と再生」（平成24年3月18日、日本生態学会第59回全国大会：於龍谷大学、観客約100名）
- 6) 平舘俊太郎、楠本良延、森田沙綾香、小柳知代：公開シンポジウム開催、平成24年6月2日、国立阿蘇青少年交流の家、観客約80名）
シンポジウムタイトル「阿蘇の草原に生きる植物と土壌：わかってきた植物ごとに好きな土壌」
講演：「阿蘇の草原が持つ価値とその危機」（横川昌史）
講演：「植物と土壌の間の切っても切れない関係」（平舘俊太郎）
講演：「阿蘇の植物の分布と土壌特性の関係：とくに盆花やセイタカアワダチソウについて」（小柳知代）
講演：「阿蘇の植物が必要とする栄養分について：とくに盆花やセイタカアワダチソウについて」（森田沙綾香）
講演：「これからの草原の管理に向けて：刈取りや野焼きなどの伝統的管理が阿蘇の野草を守る」（楠本良延）
総合討論（司会&総合コーディネーター：高橋佳孝、平舘俊太郎）
- 7) 平舘俊太郎、森田沙綾香：ポスター発表、第9回 全国草原サミット・シンポジウムinみなかみ、平成24年10月28～29日、みなかみ町立藤原小中学校（観客約100名）
「在来植物に有利な土壌をとりもどす」
- 8) 平舘俊太郎、森田沙綾香：ポスター発表、第9回 全国草原サミット・シンポジウムinみなかみ、平成24年10月28～29日、みなかみ町立藤原小中学校（観客約100名）
「ススキ、ヨモギ、セイタカアワダチソウが分布する土壌環境」
- 9) 日本の草原に生きる植物と土壌（平成25年3月5日、日本生態学会第60回全国大会：於静岡県コンベンションアーツセンター（グランシップ静岡）、観客約80名）

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) C. HENRIET, L. BODARWE, M. DOREL, X. DRAYE, B. DELVAUX: *Plant and Soil*, **313**, 71-82 (2008).
“Leaf silicon content in banana (*Musa* spp.) reveals the weathering stage of volcanic ash soils in Guadeloupe”

(4) 野草類の土壌環境適性の解明と再生技術の開発

(独) 農業環境技術研究所 生物多様性研究領域

平舘俊太郎 (上席研究員)

楠本良延 (主任研究員)

< 研究協力者 >

(独) 農業環境技術研究所 生物多様性研究領域

森田沙綾香 (P D)

小柳知代 (P D) (平成22～23年度のみ)

平成22～24年度累計予算額：2,783千円

(うち、平成24年度予算額：866千円)

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

土壌の化学的特性を制御することによって植生を制御する手法として、(a)塩化アルミニウムを土壌表面に処理する方法、および(b)伝統的な草原の管理手法を検討した。(a)の方法では、土壌の化学的特性が適切に制御され、これによってセイタカアワダチソウなど外来植物が長期間にわたって衰退し、代わりにチガヤなどの在来植物で構成される多様性の高い草原が導かれた。本手法は、環境条件によって効果の持続期間が異なるなど不安定な面もあるが、肥料成分や石灰資材が投入された土壌をもとの化学的特性に戻す手法であり、草原再生や生物多様性の保全にとって有効な場面も多いと考えられることから、特許出願を行った。本技術は、民間企業との間で知的所有権実施許諾契約が締結され、また共同研究にも進展しており、今後の更なる発展が期待される。(b)伝統的な草原の管理手法は、いずれも草原の土壌を貧栄養かつ土壌酸性の強い状態に誘導する性質があり、その効果は、刈取り&持ち出し>放牧>野焼き、の順であることが明らかになった。また、刈取り&持ち出しが土壌特性におよぼす影響を定量的に見積もる手法を提示した。その結果、改良草地として利用された履歴を持つ草原を従来の半自然草原に再生するためには、刈取り&持ち出しによる手法では、多くの場合、数十年単位の時間が必要であることが示された。本研究では、実際に行政からの要望に応じて、長野県、鹿児島県、福井県において、外来植物の蔓延要因としての土壌環境を調査し、本研究で得られた成果をもとに、外来植物の蔓延防止および在来植物の回復に向けた今後の管理法などに関してアドバイスを行った。本研究における成果は、今後さらに、草原再生のための土壌管理法の策定、草原再生の効果の予測と効率的な再生候補地の選定、外来植物の蔓延防止策の策定やリスク評価などに利用されることが期待される。

[キーワード]

塩化アルミニウム、外来植物、土壌中有効態リン酸、土壌pH、半自然草原

1. はじめに

植物の分布や遷移に対しては、土壌の化学的特性が大きな影響を及ぼしている可能性が指摘されている^{1,2,3)}。また、本プロジェクトのサブテーマ(1)では、土壌の化学的特性が植物の分布に対して大きな影響を与えている様子が明らかになっている。とくに、大陸内陸部の乾燥地で進化してきた歴史を持つ外来牧草類と、日本の酸性土壌環境下で進化してきた在来植物では、土壌に対する適応性は大きく異なると考えられ、このことが土壌の化学的特性によって植物の分布が異なるメカニズムになっていると考えられる。たとえば、外来牧草類の多くはより高土壌pH領域かつ富栄養環境条件に適応していると予想され、また在来植物の多くはより低土壌pH領域かつ貧栄養環境条件に適応していると考えられる。このことは、土壌の化学的特性を適切に制御できれば、意図した植生に誘導することができる可能性を示唆している。たとえば、外来牧草類が蔓延している草原を、在来植物が優占する生物多様性の高い半自然草原に誘導しようとした場合には、土壌の酸性を強めるとともに、土壌をより貧栄養的な状態に誘導する管理が有効である可能性がある。このような土壌の化学的特性を制御することによって植生を制御する技術が開発されれば、各地で実施されている草原再生のための自然再生事業に対して有用な情報・技術を提供できるばかりではなく、国立公園における植生の管理や外来植物の蔓延防止、あるいは道路周辺の法面において蔓延する外来牧草類の駆除にも応用できるもの期待される。

2. 研究開発目的

本研究では、土壌の化学的特性を適切に制御することによって植生を制御する手法を開発し、野草類の保全あるいは半自然草原の再生に役立てる。土壌の化学的特性を制御する手法としては、下記の二つの方法を検討する。

(1) 資材投入による土壌特性の制御とそれによる植生制御効果

土壌を酸性化させるとともに貧栄養化させる資材を検討し、その適切な投入量および植生に対する効果を検証する。

(2) 伝統的な半自然草原の管理手法が土壌の化学的特性に及ぼす影響の評価

半自然草原の維持には人為的な管理が不可欠であるが、伝統的な手法によって維持されてきた半自然草原では、このような管理手法が土壌の化学的特性を草原の植物の維持にとって好適な状態に導いたものと考えられる。そこで、伝統的な半自然草原の管理手法が土壌の化学的特性に及ぼす影響を評価し、これらの手法が植生に及ぼす影響について考察するとともに、これからの草原の維持・管理・保全に役立てる。

上記の二つの手法のうち、前者は即効的な効果を期待するものであるのに対して、後者はより環境に配慮した手法であると考えられる。これら2つのオプションを示すことにより、利用者はより目的に合った手法を適宜選択できると考えられる。

3. 研究開発方法

(1) 資材投入による土壌特性の制御とそれによる植生制御効果

土壌を酸性化させる資材として、塩化アルミニウムの効果を検討した。塩化アルミニウムは弱酸であることから、土壌への投入による生物相に対するインパクトは、塩酸や硫酸といった強酸よりも小さいと考えられる。また、アルミニウムは土壌を構成する主成分であることから、土壌

への投入後は土壌成分の一部と変化しながら、徐々に酸を放出することによって、土壌を緩やかに酸性化させる効果が期待できる。さらに、塩化アルミニウムは、土壌に投入後、水に溶解してアルミニウムイオン (Al^{3+}) を生成するが、これは酸性土壌に対して耐性が低い植物に対してとくに強い生育抑制効果を発揮すると期待される。酸性土壌に対して耐性が低い植物としては多くの外来植物が該当すると考えられることから、塩化アルミニウム投入によって多くの外来植物の生育にとって不利な環境が誘導されることが期待される。また、 Al^{3+} は、土壌中の有効態リン酸を難溶性の形態に変化させる効果および交換性のカルシウムイオンを排除する効果が期待できることから、土壌を貧栄養化させる効果が高いと期待される。このように、塩化アルミニウムには、とくに酸性土壌に対する耐性が低く貧栄養的な環境では蔓延しにくい外来植物に対して、その生育を抑制し、代わりに在来植物を呼び戻す効果が期待される。

塩化アルミニウム処理による植生制御効果は、下記の3か所にて実施した。

調査地A：山口大学圃場（果樹園放棄地）

山口県山口市にある山口大学構内の果樹園跡地。試験開始前はセイタカアワダチソウが優占していた。塩化アルミニウムの処理量は、土壌表面から深さ10 cmまでが置換酸度で10 mmol kg^{-1} となる量を滴定実験により求め、これを処理区内に処理した。試験は、処理区と無処理区の2区とし、1区5連で行った。塩化アルミニウムの処理に先だって、試験区の地表を覆っていた植生は刈り取りによって除去した。塩化アルミニウムは、粉末の塩化アルミニウム六水和物（特級試薬、和光純薬製）を用い、1区（2 m×2 m）の土壌表面に均一に散布した。散布した塩化アルミニウム六水和物の量は、処理区で1.2 kg m^{-2} であった。なお、土壌は「赤黄色土」に分類された。

調査地B：茨城県牛久市（畑作放棄地）

茨城県牛久市の耕作放棄地（畑地）。試験開始前はセイタカアワダチソウが優占していた。塩化アルミニウムの処理量は、土壌表面から深さ5 cmまでが置換酸度で12 mmol kg^{-1} となる量を滴定実験により求め、これを処理区内に処理した。試験は、処理区と無処理区の2区とし、1区5連で行った。塩化アルミニウムの処理に先だって、試験区の地表を覆っていた植生は刈り取りによって除去した。塩化アルミニウムは、粉末の塩化アルミニウム六水和物（特級試薬、和光純薬製）を用い、1区（2 m×2 m）の土壌表面に均一に散布した。散布した塩化アルミニウム六水和物の量は、処理区で0.85 kg m^{-2} であった。なお、土壌は「黒ぼく土」に分類された。

調査地C：国立明石海峡公園（法面緑化地）

兵庫県神戸市の法面緑化地（造成地）。試験開始前はセイタカアワダチソウが優占していた。塩化アルミニウムの処理量は、土壌表面から深さ5 cmまでが置換酸度で12 mmol kg^{-1} となる量を滴定実験により求め、これを処理区内に処理した。試験は、処理区と無処理区の2区とし、1区5連で行った。塩化アルミニウムの処理に先だって、試験区の地表を覆っていた植生は刈り取りによって除去した。塩化アルミニウムは、粉末の塩化アルミニウム六水和物（特級試薬、和光純薬製）を用い、1区（2 m×2 m）の土壌表面に均一に散布した。散布した塩化アルミニウム六水和物の量は、処理区で4.4 kg m^{-2} であった。なお、土壌は「褐色森林土」に分類された。

試験では、塩化アルミニウム六水和物処理後、定期的に植生調査を行った。植生調査では、試験区内に1 m×1 mのコドラート枠を設置し、その中に出現した全ての種を目視で同定するとともに、その被度を目視により判定した。

(2) 伝統的な半自然草原の管理手法が土壌の化学的特性に及ぼす影響の評価

日本は温帯域にあたり、また比較的降水量が多いため、人為的なインパクトが加えられなければ、国土の大部分は森林植生となることが知られている。従って、かつて日本の国土を広く覆っていた草原植生（半自然草原）は、人為的なインパクトの影響下で維持されていたと考えられる。伝統的な半自然草原は、主として下記の3つの手法により維持されてきたと考えられている。

- (1) 刈り取りを行うとともに、発生した刈草を持ち出す管理手法（刈り取り&持ち出し）
- (2) 野焼き（木本植物群落への遷移を止める）
- (3) 放牧

本研究では、これら草原の管理手法が土壌の化学的特性に及ぼす影響を明らかにし、これらの手法が植生に及ぼす影響について考察するとともに、これからの草原の維持・管理・保全に役立てる。具体的には、日本国内で最も大規模な草原が広がる熊本県の阿蘇地域の草原を対象に、管理手法が既知の牧野から土壌を採取し、その土壌の化学的特性を分析した。

1) 土壌採取

土壌は、直径5.1 cm×高さ5.0 cmの円筒型ステンレス製コアサンプラー（100 mL容）を用いて、表層5 cmを正確に採取した。1 調査地点につき、1 m×1 mのコドラート枠内あるいはその周縁部から4～6点の土壌コア試料を採取し、これらの土壌試料を均質に混合し、1 調査地点につき約500 gの土壌試料1点を得た。採取した土壌試料は、風乾後、2 mmのふるいを通させることによって、風乾細土とした。

2) 土壌pH (H₂O)

2.0 gの風乾細土に5.0 mLの脱塩水を加え（土壌：水＝1：2.5）、時々振とうしながら室温で24時間平衡させ、上澄み液についてpHメーター(F-23II; Horiba, Ltd., Kyoto, Japan)のガラス電極を懸濁液中に挿入することにより測定した。

3) 土壌pH(KCl)

2.0 gの風乾細土に5.0 mLの1.0 M KClを加え（土壌：水＝1：2.5）、時々振とうしながら室温で24時間平衡させ、上澄み液についてpHメーター(F-23II; Horiba, Ltd., Kyoto, Japan)のガラス電極を懸濁液中に挿入することにより測定した。

4) 土壌pH (NaF)

1.0 gの風乾細土に50 mLの飽和NaF水溶液（1.0 M、pH=7.0）を加え、1分間攪拌後1分間放置し、上澄み液についてpHメーター(F-23II; Horiba, Ltd.)のガラス電極を懸濁液中に挿入することにより測定した。

5) 電気伝導度

8.0 gの風乾細土に20 mLの脱塩水を加え（土壌：水＝1：2.5）、25℃、100 rpmで24時間連続振とう後、遠心分離を行い、上澄み液をメンブレンフィルター(disposable syringe filter unit, DISMIC-25CS, 25CS020AN, 0.2 μm, cellulose acetate, Toyo Roshi Kaisha, Ltd., Tokyo, Japan)を用いてろ過し、ろ液の電気伝導度を電気伝導度計(CM-30ET; DKK-TOA Co., Ltd., Tokyo, Japan)を用いて測定することにより求めた。

6) 置換酸度（塩類によって交換溶出が可能な土壌中の酸の量）

8.0 gの風乾細土に20 mLの1.0 M KCl水溶液を加え（土壌：水＝1：2.5）、25℃、100rpmで24時間連続振とう後、遠心分離を行い、上澄み液をメンブレンフィルター(disposable syringe filter

unit, DISMIC-25CS, 25CS020AN, 0.2 μ m, cellulose acetate)を用いてろ過し、ろ液を自動滴定装置 (COM-550; Hiranuma Sangyo Co., Ltd., Hitachi, Japan)を用いて0.01 M NaOHで滴定 (滴定終点pH 7.0) することにより求めた (Saigusa et al., 1980⁴⁾ および Soil Nutrients Analysis Committee, 1980⁵⁾を改変した方法)。

7) 全炭素濃度および全窒素濃度

風乾細土から目視で確認できる植物体残差を可能な限りピンセットを用いて除去後、乳鉢と乳房を用いて磨砕し、NCアナライザー (Sumigraph NC-22F, Sumika Chemical Analysis Service, Osaka, Japan) を用いて求めた。

8) 有効態リン酸

Bray II法に準じて測定した。すなわち、1.0 gの風乾細土に20 mLの0.03 M NH_4F (0.1 M HCl中)を加え、1分間振とう後、ろ過し (Advantec Toyo, No. 5B)、ろ液に含まれるオルトリン酸をモリブデンブルー法⁶⁾ (吸光波長: 880 nm、U-2010、日立ハイテクノロジー) を用いて定量することにより求めた。

4. 結果及び考察

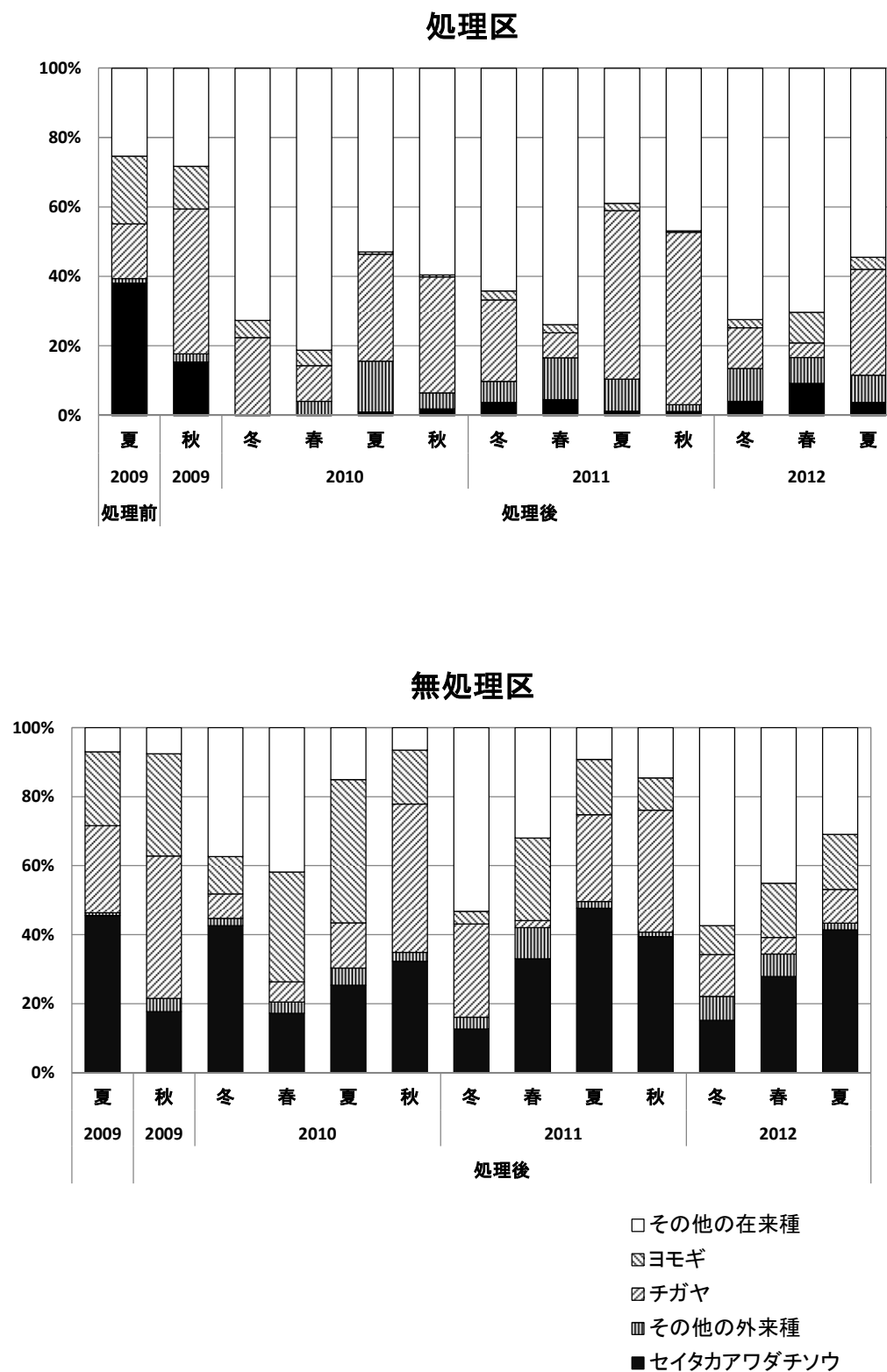
(1) 資材投入による土壌特性の制御とそれによる植生制御効果

1) 調査地A: 山口大学圃場 (果樹園跡放棄地) における塩化アルミニウム処理試験

山口大学圃場での塩化アルミニウム処理試験における出現種ごとの相対被度の経時変化を図(4)-1に示した。山口大学圃場では、塩化アルミニウムの処理によってセイタカアワダチソウの相対被度が低く抑えられている状態が試験開始後3年目も続いていることが確認された。また、処理区では、セイタカアワダチソウに代わって在来植物がより多くの被度を占めている状態が試験開始後3年目も続いていることが明らかになった。また、本試験における植被率の経時変化を図(4)-2に示した。本試験においては、塩化アルミニウムの処理によって1年目は植被率が低い状態となるが、2年目以降は無処理区とほとんど変わらない植被率の推移となることが確かめられた。また、本試験における単位面積当たりの平均出現種数 (在来種) の経時変化を図(4)-3に示した。本試験においては、塩化アルミニウムの処理によって1年目は単位面積当たりの在来種の平均出現種数は低くなるが、2年目以降は無処理区とほとんど変わらない在来種の出現種数の推移となることが確かめられた。

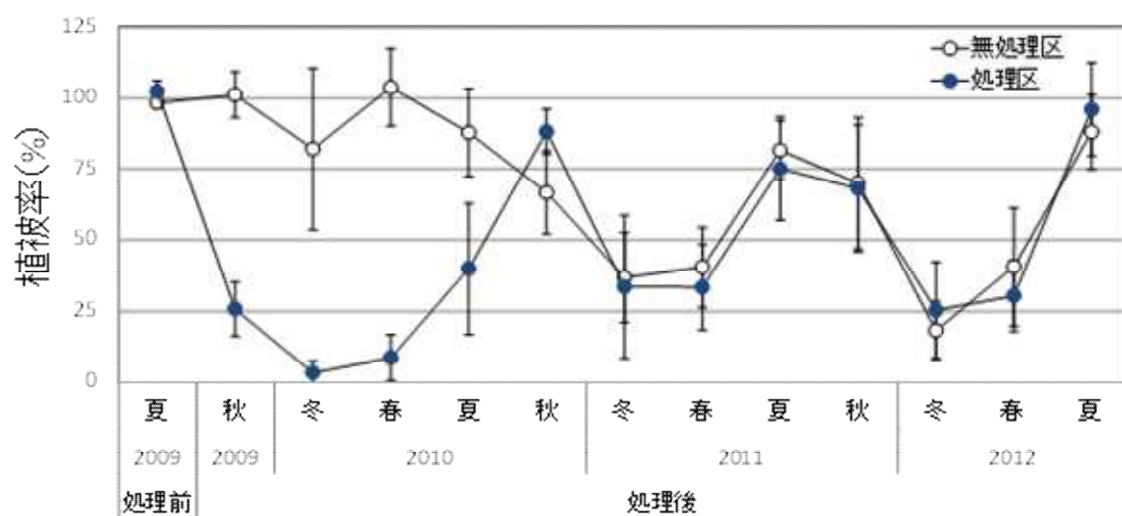
以上の結果から、山口大学圃場では、塩化アルミニウム処理によってセイタカアワダチソウが3年間以上の長期間にわたって低い被度の状態に抑えられると同時に在来植物を中心とした植生が維持されること、処理1年目は植被率や単位面積当たりの在来種の平均出現種数は小さくなるが、2年目以降は無処理区とほぼ同様に推移することが明らかになった。

除草剤の散布によってもセイタカアワダチソウの抑制や防除は可能であることが報告されているが、除草剤による防除では、早い場合では数か月程度でセイタカアワダチソウ群落に戻ってしまうことがしばしば問題となっている。これに対して、本研究によって開発された塩化アルミニウムを処理する手法では、3年間以上の長期間にわたってセイタカアワダチソウを抑えつつ、在来植物が優占する群落に誘導できることは、大きなメリットであり、優れた点であると考えられた。

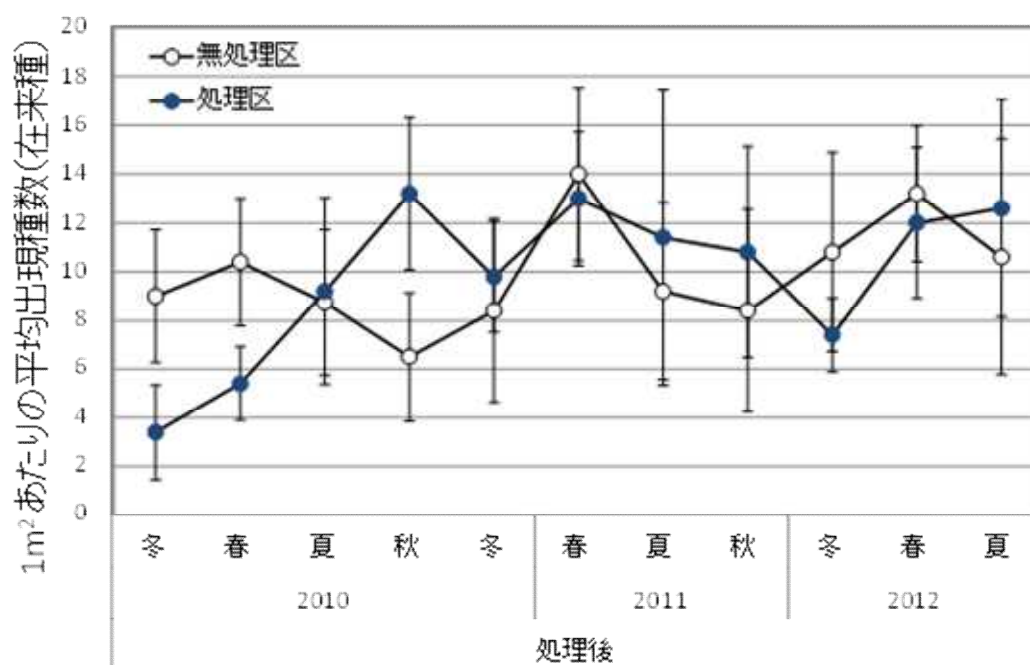


図(4)-1. 山口大学圃場での塩化アルミニウム処理試験における出現種ごとの相対被度の経時変化。

上段：処理区、下段：無処理区



図(4)-2. 山口大学圃場での塩化アルミニウム処理試験における植被率の経時変化



図(4)-3. 山口大学圃場での塩化アルミニウム処理試験における平均出現種数（在来種）の経時変化

このように、塩化アルミニウムが長期間にわたって植生を制御することができるのは、塩化アルミニウム処理によって土壌が貧栄養化され、それにとまってセイタカアワダチソウなどの外来植物が生育しにくくなると同時に、チガヤなどの在来植物の生育にとってより有利な土壌環境になるためと考えられた。本試験では、塩化アルミニウム処理によるセイタカアワダチソウの抑制効果は経時的に弱くなる傾向が見られたが、これは塩化アルミニウムの処理が2 m×2 mの比較的小さな枠内であったため、周辺からのエッジ効果に起因する部分が大きいと考えられた。今後、塩化アルミニウムによる植生制御の効果の持続期間を明らかにするためには、より大きな面積で試験を実施する必要があると考えられた。

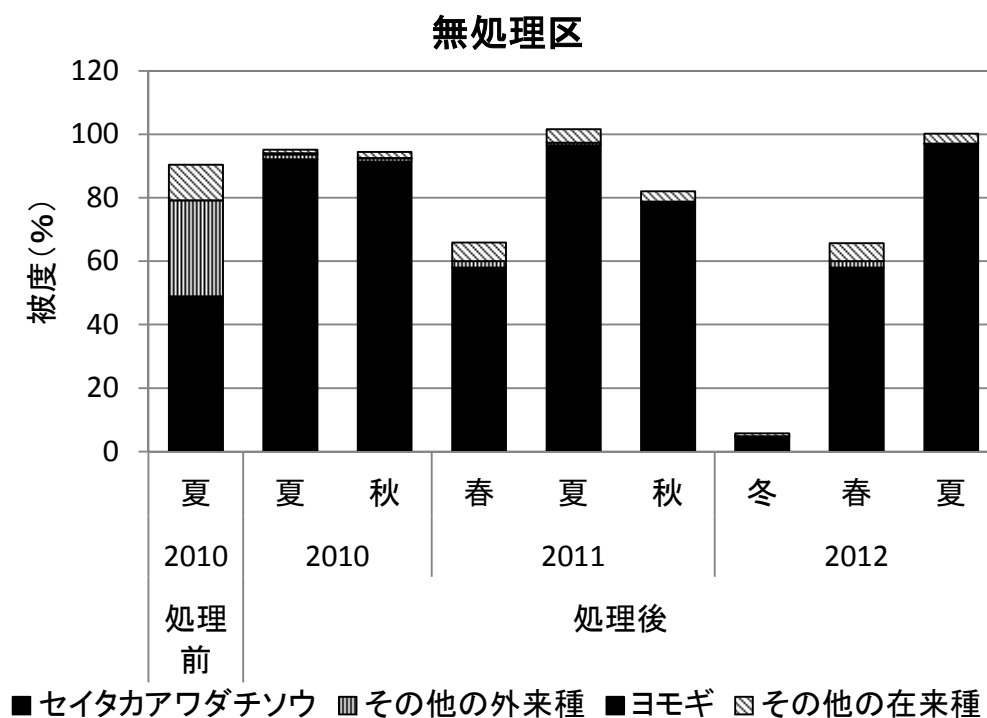
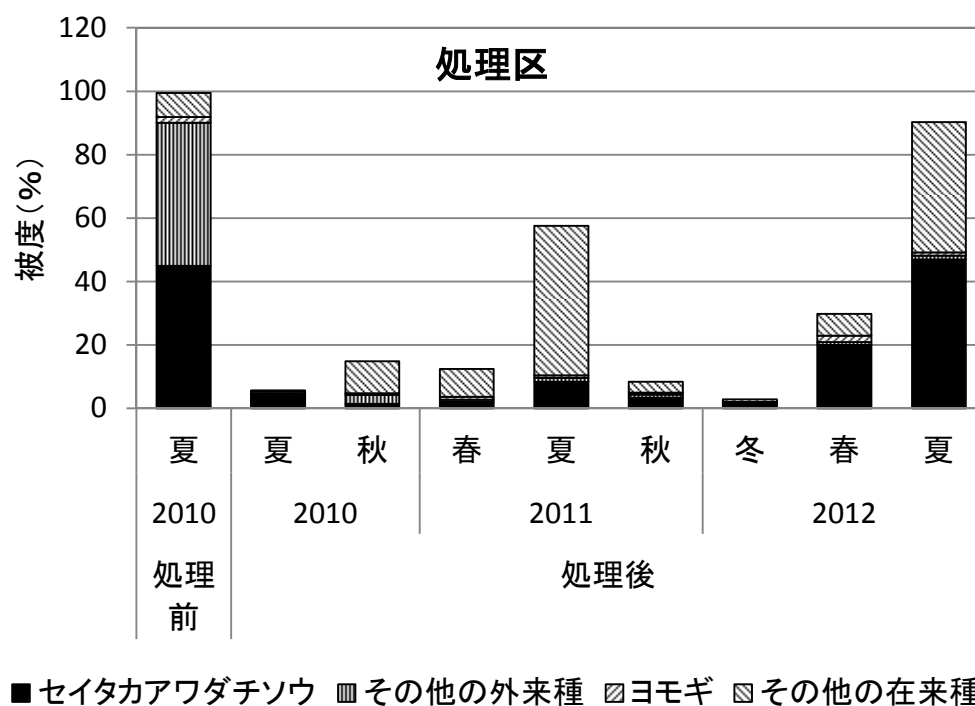
2) 調査地B：茨城県牛久市における塩化アルミニウム処理試験

茨城県牛久市での塩化アルミニウム処理試験における出現種ごとの植被率の経時変化を図(4)-4に示した。茨城県牛久市の試験地では、塩化アルミニウム処理後約2年間はセイタカアワダチソウの植被率を低く抑えることができたが、その効果は試験開始後3年目の後半には弱まり、セイタカアワダチソウが目立つようになった。このことから、牛久市では、セイタカアワダチソウを抑える効果は認められるが、その持続期間は3年間程度であり、山口大学圃場での効果と比較すると、弱いものと考えられた。この主な原因は、茨城県牛久市の試験における塩化アルミニウム処理量（土壌表面から深さ5 cmまでが置換酸度で12 mmol kg⁻¹となる量）は、山口大学圃場の試験における塩化アルミニウム処理量（土壌表面から深さ10 cmまでが置換酸度で10 mmol kg⁻¹となる量）の約半量相当と、少なかったためと考えられた。山口大学圃場においては、土壌表面から深さ5 cmまでが置換酸度で10 mmol kg⁻¹となる処理量の試験も行ったが、セイタカアワダチソウを抑える効果は非常に小さくなった（データ省略）。このことから、セイタカアワダチソウなどの外来植物の生育を抑えつつ、在来植物が安定的に優占するような植生を維持するためには、土壌表面から深さ10 cmまでが置換酸度で10～12 mmol kg⁻¹となる量の塩化アルミニウム六水和物を処理するのが適当であると考えられた。

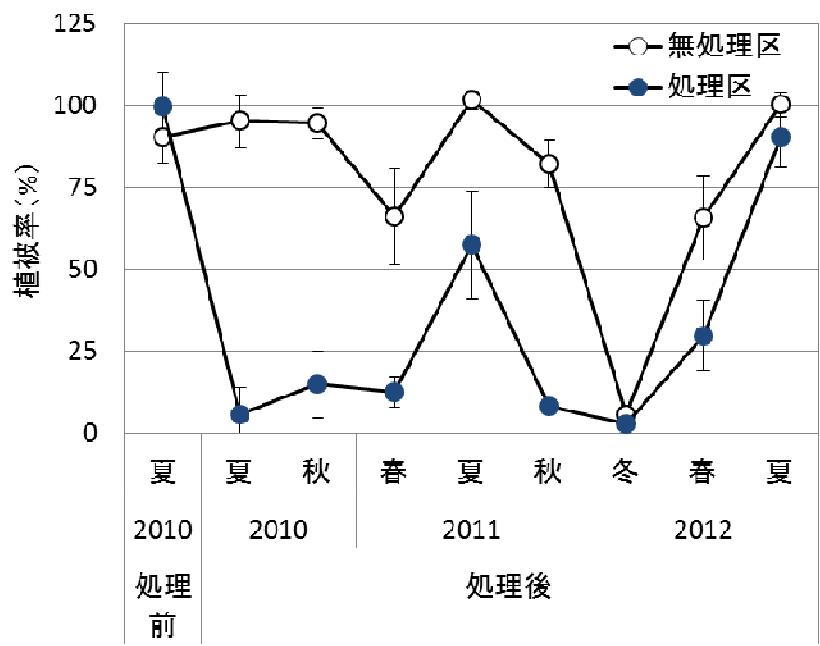
また、本試験における植被率の経時変化を図(4)-5に示した。植被率は、山口大学圃場の試験と異なり、処理区では3年目も低い傾向が続いた。これは、茨城県牛久市の土壌は、黒ボク土の中でも土壌酸性が比較的弱いアロフェン質黒ぼく土に相当するため、試験地周辺において土壌酸性に対して耐性を持つ植物がほとんど分布しておらず、そのため、セイタカアワダチソウの生育が抑えられても、代わりに生育できる植物が処理区内に入り込むことができなかったためと考えられた。

また、本試験における単位面積当たりの平均出現種数（在来種）の経時変化を図(4)-6に示した。本試験においては、塩化アルミニウムの処理直後は単位面積当たりの在来種の平均出現種数は低い傾向が認められるが、その後は在来種の出現種数が無処理区とほとんど変わらない推移となることが明らかとなった。

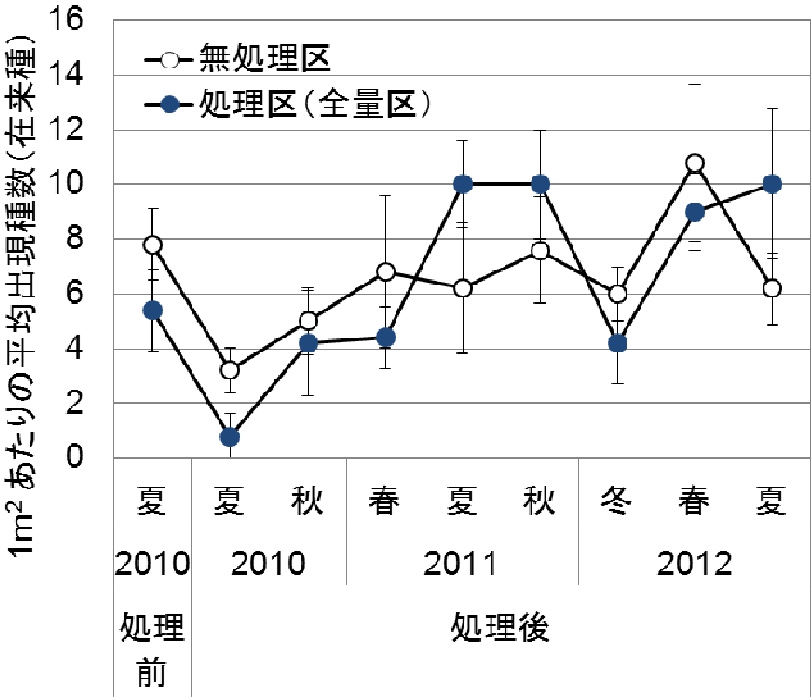
以上の結果から、茨城県牛久市の試験地では、塩化アルミニウム処理によるセイタカアワダチソウなどの外来植物を抑える効果は、山口大学圃場での試験よりも劣るものと考えられた。日本には、茨城県牛久市の試験地と似た周辺環境および土壌環境も比較的広く分布していると考えられる。このような環境において、塩化アルミニウム処理によって植生を制御するためには、強い土壌酸性に対する耐性を持った周辺の植物を導入するなど、工夫が必要であると考えられた。



図(4)-4. 茨城県牛久市での塩化アルミニウム処理試験における出現種ごとの植被率の経時変化
上段：処理区、下段：無処理区



図(4)-5. 茨城県牛久市での塩化アルミニウム処理試験における植被率の経時変化



図(4)-6. 茨城県牛久市での塩化アルミニウム処理試験における平均出現種数（在来種）の経時変化

3) 調査地C：国立明石海峡公園における塩化アルミニウム処理試験

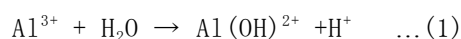
国立明石海峡公園での塩化アルミニウム処理試験における出現種ごとの相対被度の経時変化を図(4)-7に示した。国立明石海峡公園の試験地では、塩化アルミニウム処理後約1年間はセイタカアワダチソウの植被率を低く抑えることができたが、試験開始後2年目には、その効果は継続しているものの、弱くなるものと考えられた。このことから、国立明石海峡公園における試験地では、セイタカアワダチソウを抑える効果は認められるが、その持続期間は2年間程度であり、山口大学圃場での効果と比較すると、弱いものと考えられた。この主な原因は、国立明石海峡公園の試験における塩化アルミニウム処理量（土壌表面から深さ5 cmまでが置換酸度で12 mmol kg⁻¹となる量）は、山口大学圃場の試験における塩化アルミニウム処理量（土壌表面から深さ10 cmまでが置換酸度で10 mmol kg⁻¹となる量）の約半量相当と、少なかったためと考えられた。前述のように、山口大学圃場においては、土壌表面から深さ5 cmまでが置換酸度で10 mmol kg⁻¹となる処理量の実験も行ったが、セイタカアワダチソウを抑える効果は非常に小さくなった（データ省略）。このことから、セイタカアワダチソウなどの外来植物の生育を抑えつつ、在来植物が安定的に優占するような植生を維持するためには、やはり土壌表面から深さ10 cmまでが置換酸度で10～12 mmol kg⁻¹となる量の塩化アルミニウム六水和物を処理するのが適当であると考えられた。

また、本試験における植被率の経時変化を図(4)-8に示した。本試験においては、塩化アルミニウム処理によって1年目は植被率が低い状態となるが、2年目以降は無処理区とほとんど変わらない植被率の推移となることが確かめられた。また、本試験における単位面積当たりの平均出現種数（在来種）の経時変化を図(4)-9に示した。本試験においては、塩化アルミニウムの処理によって単位面積当たりの在来種の平均出現種数は約1年目以後高めの状態で推移する傾向が認められた。

以上の結果から、国立明石海峡公園の試験地では、塩化アルミニウム処理によって、1～2年間程度はセイタカアワダチソウなどの外来植物を抑えることはできるが、その後は塩化アルミニウム処理の効果は経時的に弱まっていくものと考えられた。これは、国立明石海峡公園の試験地の土壌は砂質であるために、塩化アルミニウム処理によって添加された酸を保持する能力に乏しいためであると考えられた。加えて、本試験値は傾斜がきつく、そのため斜面上部から富栄養化した土壌が経時的に混入してきた可能性も考えられる。植生回復の現場では、このような立地環境も多いと考えられるため、このような場所において塩化アルミニウム処理を行う場合には注意が必要であると考えられた。

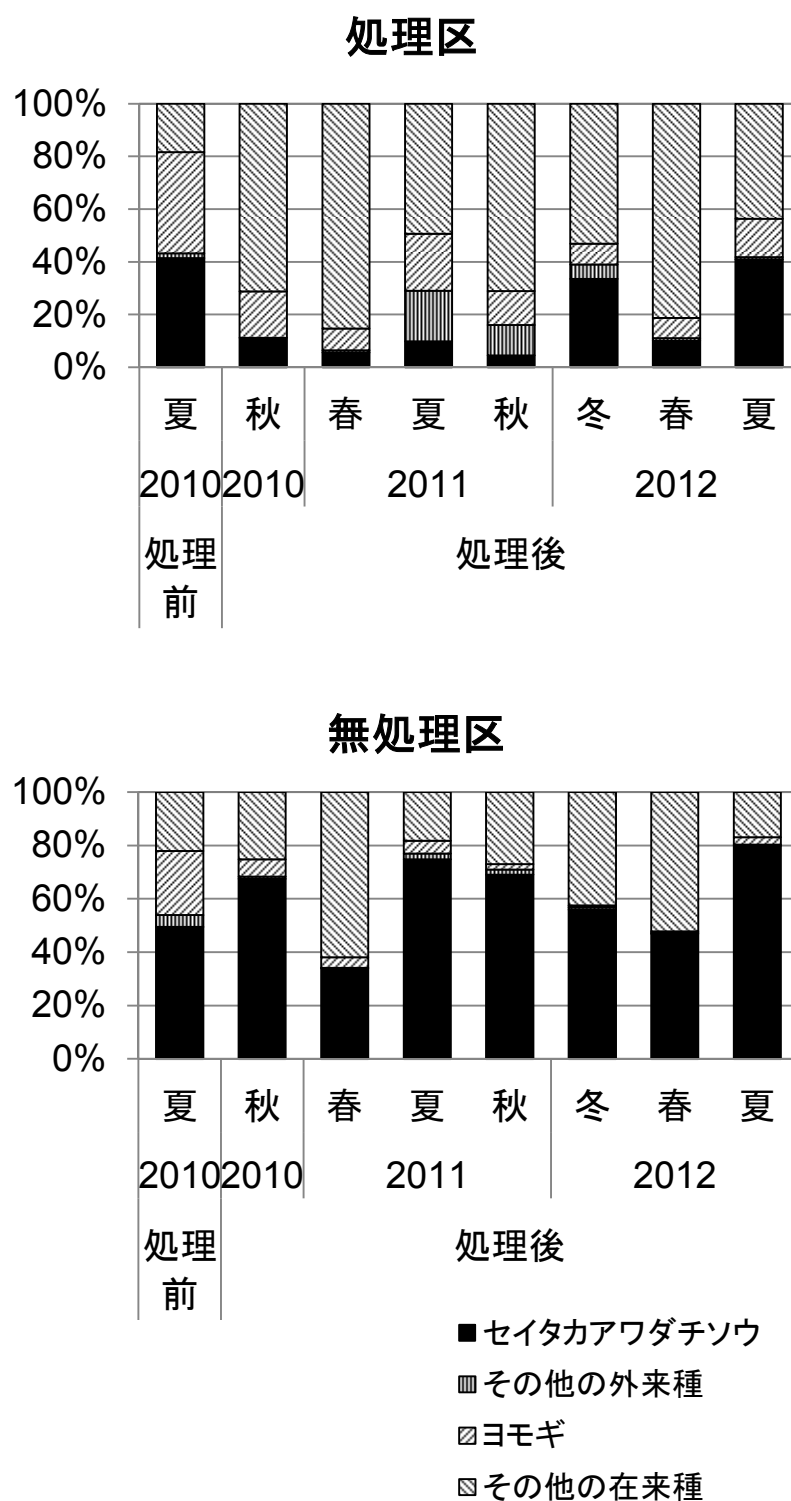
4) 土壌に塩化アルミニウムを処理することによる植生制御法について

塩化アルミニウムは、土壌を酸性化させる効果と土壌中の植物有効態リン酸を低減させる効果の2つがあると考えられる。土壌を酸性化させる効果は、下記の反応によると考えられる。



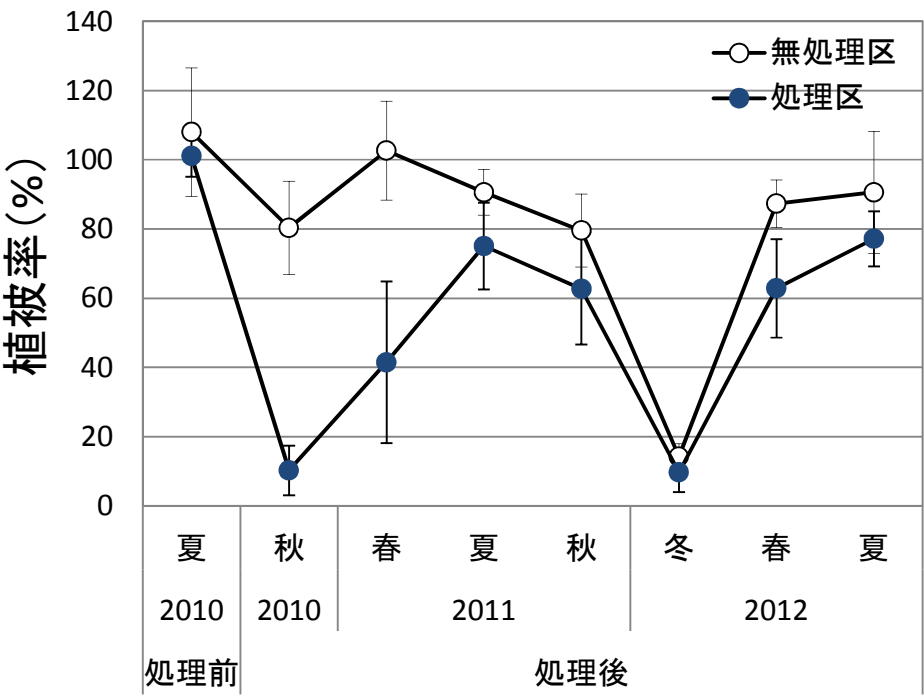
また、土壌中の植物有効態リン酸を低減させる効果は、下記の反応によると考えられる。



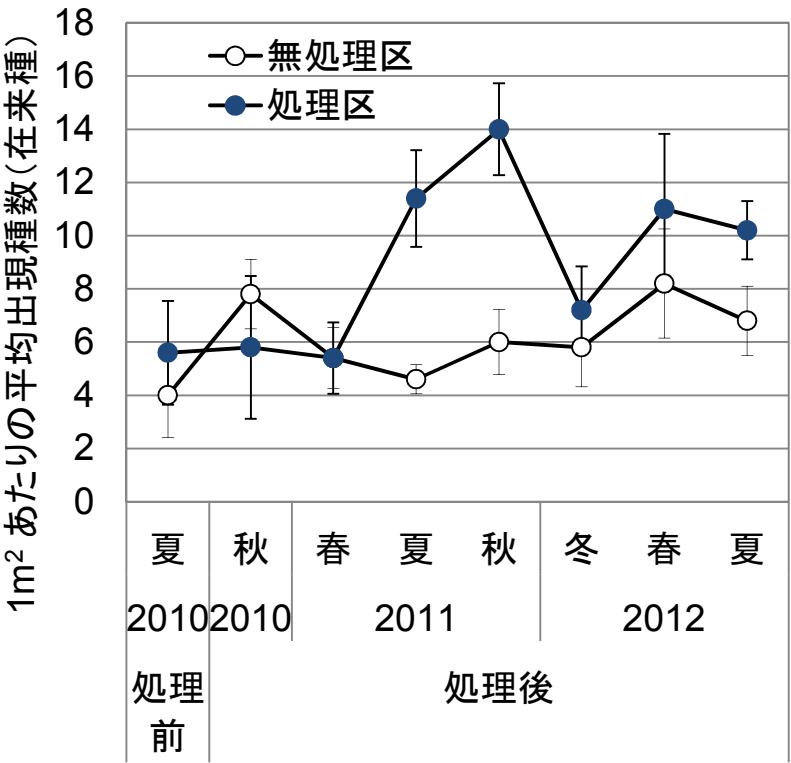


図(4)-7. 国立明石海峡公園での塩化アルミニウム処理試験における出現種ごとの相対被度の経時変化

上段：処理区、下段：無処理区



図(4)-8. 国立明石海峡公園での塩化アルミニウム処理試験における植被率の経時変化



図(4)-9. 国立明石海峡公園での塩化アルミニウム処理試験における平均出現種数（在来種）の経時変化

これら(1)～(4)の反応が土壌中で進行することによって、多くの外来植物の生育にとって不利な土壌環境が誘導されると考えられる。これに対して、多くの在来植物は、(1)～(4)の反応により土壌特性が変化しても、これに対する耐性メカニズムを持っている種が多数存在していると考えられる。これは、多くの在来植物は、長い進化の歴史の中で、日本の強い土壌酸性および低い土壌中の植物有効態リン酸という厳しい土壌環境でも生育できるよう、耐性メカニズムを獲得してきたためと考えられた。一方の外来植物は、大陸の内陸部など、土壌酸性が弱く、栄養塩類が土壌表層に蓄積しやすい土壌環境で進化してきたものが多いと考えられ、このため日本のもともとの土壌環境には適応していないものと考えられた。本研究により、塩化アルミニウムを処理することによって日本のもともとの土壌環境に戻してやれば、外来植物の生育を抑えつつ、在来植物が優占しやすい土壌環境となることが実証された。

ただし、塩化アルミニウムの処理によって、必ずしも在来植物を呼び戻せるとは限らないことも明らかとなった。たとえば、茨城県牛久市のように、もともとの土壌酸性が弱く、またリン酸肥料が施用された履歴を持っている場所では、塩化アルミニウムの効果は1～2年程度しか持続しない可能性もある。また、国立明石海峡公園のように、砂質土壌では塩化アルミニウムを保持する機能に乏しいため、やはり1～2年程度でその効果は低減していく可能性が考えられた。このように、塩化アルミニウム処理によって効果が期待される場所とそうでない場所があることが明らかになった。このため、塩化アルミニウム処理によって植生を制御しようとする場合には、その場所の土壌特性を十分に把握することは非常に重要であると考えられた。また、周囲にどのような植物が分布しており、塩化アルミニウム処理によってどのような植物が優占するかを予め予測しておくことも重要であると考えられた。この予測のためには、本研究のサブテーマ(1)で得られた情報が、非常に役立つものと考えられる。

なお、土壌に対する塩化アルミニウム処理は、リン酸肥料の施肥や石灰施用によって富栄養化・弱酸性化した土壌をもとの状態に戻すための資材として提案されたものである。塩化アルミニウム処理が植生制御に有効であることが明らかになったが、このことは草原やその周辺の環境が富栄養化していることも意味している。このため、塩化アルミニウム処理に期待するのも1つの方法ではあるが、土壌環境が不必要に富栄養化されていないか、あるいは土壌環境が富栄養化される原因をつきとめ、そこを改善することも重要であると考えられた。

(2) 伝統的な半自然草原の管理手法が土壌の化学的特性に及ぼす影響の評価

1) 阿蘇地域を対象とした野外調査および土壌分析による、管理と土壌の化学的特性の関係解明

阿蘇地域は火山灰に由来する黒ぼく土が広く分布する地域であるが、新鮮火山灰が供給されやすい外輪山東部地区は、新鮮火山灰に含まれるアルカリ成分の影響により、土壌pHは高いことが報告されている。このように、同じ阿蘇地域の中でも土壌の化学的特性は地域性を反映するため、本研究における管理形態ごとの土壌特性の違いは、同じ牧野組合が管理する同一牧野内で比較した。

阿蘇地域における草原の管理形態の違いが、土壌の化学的特性に及ぼす影響の調査結果を、表(4)-1に示した。本調査でも、外輪山北部(草原地区CおよびD)に比較して新鮮火山灰の影響が大きい外輪山東部(草原地区AおよびB)では、土壌pHが高い傾向が認められた。以下、管理形態ご

とに、土壌の化学的特性の特徴を報告する。

改良草地（草地造成および施肥管理あり）では、いずれも土壌pHは6.0前後、かつ有効態リン酸は概ね10～80 mg P₂O₅ 100 g⁻¹の範囲で管理されていた。これは、石灰資材や肥料の投入などが行われた影響と考えられた。サブテーマ(1)の実験結果から、このような土壌環境では外来牧草類は旺盛に生育できるが、多くの在来植物の生育にとっては外来牧草に比較して相対的に不利な環境であると考えられた。

表(4)-1. 阿蘇における管理形態ごとの土壌の化学的特性の違い

調査地区	草地造成および 施肥管理 (改良草地としての履歴)	管理形態	サンプル数	pH(H ₂ O)	置換酸度	有効態リン酸
					mmol kg ⁻¹	mg P ₂ O ₅ 100 g ⁻¹
草原地区A	なし	野焼き +放牧	26	5.9 ± 0.2	2.4 ± 0.6	4.3 ± 1.9
(外輪山東部)	あり	野焼き +放牧	24	5.8 ± 0.3	2.5 ± 0.8	16.1 ± 8.7
草原地区B	なし	野焼き	12	6.4 ± 0.2	1.4 ± 0.5	9.9 ± 5.4
(外輪山東部)	なし	野焼き +刈取り&持ち出し	14	6.1 ± 0.2	2.4 ± 1.0	4.4 ± 1.1
	なし	野焼き +放牧	12	5.5 ± 0.3	4.9 ± 1.5	8.4 ± 3.9
	あり	野焼き +放牧	12	6.0 ± 0.2	2.3 ± 0.5	60.5 ± 18.7
草原地区C	なし	野焼き	18	5.5 ± 0.2	4.4 ± 2.0	2.9 ± 0.7
(外輪山北部)	なし	放棄	12	5.2 ± 0.1	9.3 ± 4.0	4.3 ± 0.8
	あり	野焼き +刈取り&持ち出し	19	5.9 ± 0.2	1.9 ± 0.6	41.3 ± 18.9
草原地区D	なし	野焼き	12	5.4 ± 0.1	10.0 ± 3.6	5.7 ± 1.1
(外輪山北部)	なし	野焼き +刈取り&持ち出し	12	5.2 ± 0.2	17.5 ± 2.4	5.7 ± 0.7
	なし	野焼き +放牧	12	5.6 ± 0.3	5.9 ± 3.4	6.9 ± 1.6
	あり	野焼き +刈取り&持ち出し	12	6.1 ± 0.3	2.1 ± 0.8	58.9 ± 15.3

伝統的な管理手法である野焼きは、土壌pHを上昇させる効果が知られている。これは、植物体の燃焼によって、CaやKといったカチオンが炭酸塩あるいは重炭酸塩として土壌表面に生成されるため、その酸を消費する機能によって土壌pHは上昇するものと考えられる。表(4)-1では、草原地区Bにおいては、改良草地としての履歴を持つ場所を除けば、野焼きのみで管理した場所で最もpH(H₂O)が高く、かつ置換酸度も最も低かった。また、草原地区Cにおいても、改良草地としての履歴を持つ場所を除けば、野焼きのみで管理した場所で最もpH(H₂O)が高く、かつ置換酸度も最も低かった。また、草原地区Dにおいては、改良草地としての履歴を持つ場所および野焼き+放牧で管理された場所を除けば、野焼きのみで管理した場所で最もpH(H₂O)が高く、かつ置換酸度も最も低かった。以上の結果は、野焼きによってCaやKの炭酸塩あるいは重炭酸塩が生成され、それに伴って酸が消費された結果、比較的高い土壌pHが維持されたと考えられた。

また本研究では、野焼きとは逆に、刈取り&持ち出しは土壌pHを下降させること、同時に置換酸度を増やすことが明らかとなった。表(4)-1の草原地区Bでは、野焼き管理の土壌における土壌pH(H₂O)が6.4であるのに対し、野焼き+刈取り&持ち出し管理における土壌pH(H₂O)は6.1と低くなっていた。また、草原地区Dでも、野焼き管理の土壌における土壌pH(H₂O)が5.4であるのに対し、野焼き+刈取り&持ち出し管理における土壌pH(H₂O)は5.2と低くなっていた。伝統的な管理手法である刈取り&持ち出しは、この作業によってCaやKといったカチオンが草原土壌から持ち出されることになるため、代わりに土壌中では酸(H⁺)が蓄積されやすくなったと考えられる。また、刈取り&持ち出しによってPも持ち出されることになるため、草原地区Bでは有効態リン酸の下降も認められた。しかし、有効態リン酸は植物分解物からも継続的に供給されることから、有効態リン酸がもともと低い草原地区Dでは、刈取りによる土壌中有効態リン酸の下降は起こらなかったと考えられた。

放牧は、土壌pHに対する効果は不安定であり、土壌酸性を弱める場合も強める場合もあると考えられた。表(4)-1の草原地区Bにおいては、野焼き管理の土壌における土壌pH(H₂O)が6.4であるのに対し、野焼き+放牧管理における土壌pH(H₂O)は5.5と著しく低下していた。これに対して草原地区Dでは、野焼き管理の土壌における土壌pH(H₂O)が5.4であるのに対し、野焼き+放牧管理における土壌pH(H₂O)は5.6と上昇しており、放牧が土壌pHにおよぼす効果は一定ではなかった。放牧では、植物体により吸収されたCaやKなどのカチオンは、家畜によって吸収されたのち、基本的には草原内に戻されるため、栄養塩は草原内で循環すると考えられる。このため、放牧が土壌のpHおよび栄養状態に与える影響は大きくないと考えられるが、過放牧気味になった場合には、植物残渣などから放出されたカチオンは植物に吸収されずに雨水の下方浸透とともに地下に流亡しやすくなり、そのため土壌は酸性化されるものと考えられる。逆に、家畜を一定期間畜舎に戻し、そこで濃厚資材などを与えて肥育するような現代的管理を行えば、草原内にCa、K、Pといった栄養塩が持ち込まれることになるため、土壌pH(H₂O)も上昇するとともに土壌中有効態リン酸も上昇すると考えられる。このように、放牧自体が土壌の化学的特性に与える影響は、その家畜の管理法や管理条件に依存しており、一定ではないと考えられた。

以上、伝統的な草原の管理手法は、草原土壌を貧栄養的な環境に誘導する性質が強いと考えられ、その効果は、刈取り&持ち出し>放牧>野焼き、の順であると考えられた。また、刈取り&持ち出しおよび放牧は土壌を酸性化させ、その効果は、刈取り&持ち出し>放牧、の順であると考えられた。野焼きは土壌pHを上昇させる効果があるものの、CaやKといったアルカリ分を供

給するものではないため、長期的に見れば、CaやKといったアルカリ分の土壌からの溶脱や刈取りによる持ち出しを助長することにより、貧栄養化を促していると考えられた。

本研究により、伝統的な草原の管理手法は、草原における植物栄養元素の動態から見れば、激しく収奪的であることがわかった。そして、このような環境に適応しながら生き延びてきたのが多くの在来野草類であると考えられた。

2) 植物体に土壌養分を吸収させ持ち出すことにより土壌環境を制御する効果に関する定量的評価

本研究のサブテーマ(1)およびサブテーマ(4)では、土壌の化学的特性を制御することによって植生が制御できることが示された。サブテーマ(1)で得られた知見からは、セイタカアワダチソウなど多くの外来植物は土壌 pH が高く（例：土壌 pH(H₂O)が 5.5 以上）、かつ土壌中有効態リン酸が高い環境（例：20 mg P₂O₅ 100 g⁻¹ 以上）で蔓延しやすい傾向があることが明らかとなった。これに対して、オミナエシなど多くの半自然草原に典型的な在来植物は、土壌 pH(H₂O)が低く（例：土壌 pH(H₂O)が 5.5 以下）、かつ土壌中植物有効態リン酸が低い環境（例：15 mg P₂O₅ 100 g⁻¹ 以下）で保全されやすい傾向があることが明らかとなった。すなわち、在来の野草類を保全するためには貧栄養的な土壌環境に誘導することの重要性が明らかになった。植物は種ごとに生育に適した土壌環境があることは、サブテーマ(2)で得られた植物栄養学的知見あるいは植物栄養生理学的知見からも支持された。すなわち、植物の分布特性は、植物の栄養学的特性および土壌の化学的特性と非常に密接に関連していると考えられる。また、今後、サブテーマ(3)で得られた知見を活用し、かつての半自然草原にて野草類が無理なく保全されていた頃の土壌の化学的特性が明らかになれば、さらに「植物の分布特性－植物の栄養学的特性－土壌の化学的特性」の深いつながりが明確になることが期待される。

土壌を貧栄養的な状態に変化させる手法としては、サブテーマ(4)で開発した塩化アルミニウム六水和物を処理する手法も有力であるが、植物体に土壌養分を吸収させこれを持ち出す手法（刈り取り&持ち出し）も有力であることがサブテーマ(4)の研究から明らかになっている。そこで、ここでは、この刈り取り&持ち出しが土壌の化学的特性に及ぼす影響について定量的な見積もりを行った。

本研究では、1つの事例として、島根県の火山灰土壌上に成立している実際の草原をとりあげた。ここには、下記の3タイプの植生が成立していた。

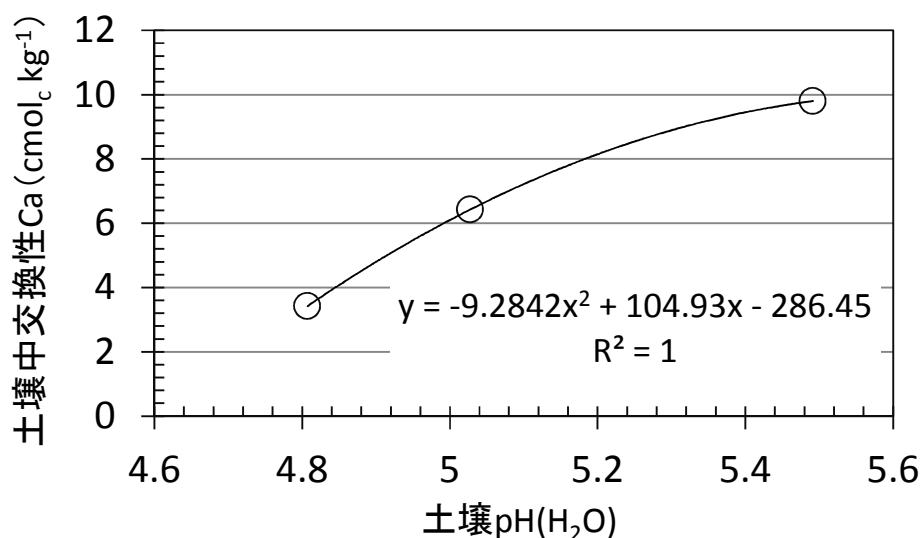
- ・地点 A：刈り取り&持ち出しによる管理が継続されている状態の良い半自然草原。ミツバツチグリやシラヤマギクが生育している。
- ・地点 B：半自然草原が数年間放棄されたため荒れ地になりかけた状態の草原。木本植物が入り始めている。
- ・地点 C：かつては半自然草原であったが、その後改良草地として利用され（恐らく石灰資材や肥料が投入された）、さらにその後、放棄された状態の草原。セイタカアワダチソウなどの外来植物が蔓延している。

地点 A、B、C の土壌 pH(H₂O) は、それぞれ 4.8、5.0、5.5 であった。地点 A は刈り取り&持ち出しによる管理により土壌が貧栄養的な状態に維持されていることが、地点 B は放棄によって木本植物などが侵入し始めていることからリター層（落葉層）に植物栄養分が蓄積し始めていること

が、地点 C はかつての改良草地として管理した影響が現在でも残っておりそのため土壌 pH(H₂O) が高い値を示していることが推察される。

日本における土壌 pH(H₂O) の違いは、土壌中の交換性塩基の量の違いにほぼ対応している。また、雨の多い日本の土壌の場合、土壌中の交換性塩基は、通常は Ca²⁺ が占める割合が高い（通常、交換性塩基に占める交換性 Ca²⁺ の割合は 50% 以上）。これは、Ca²⁺ は土壌中の負電荷に対する親和性が比較的高いために、Ca²⁺ が選択的に土壌中に残りやすいためであると考えられる。実際に、地点 A、B、C の土壌中における交換性 Ca²⁺ をショーレンベルガー法によって測定したところ、それぞれ 3.4、6.4、9.8 cmol_c kg⁻¹ であった。また、地点 A、B、C の土壌中における塩基飽和度はそれぞれ 12.5、20.7、30.0%、また Ca 飽和度はそれぞれ 7.6、13.3、13.7% であった。以上のことから、本研究で扱っている土壌でも、土壌 pH(H₂O) の違いを生んでいる主要因は土壌中交換性 Ca²⁺ であること、土壌 pH(H₂O) と土壌中交換性 Ca²⁺ は密接に関連していること（図(4)-10）、そしてこの土壌中交換性 Ca²⁺ を低減させれば土壌 pH(H₂O) も低下させることができることが推察された。

土壌特性を制御することによって植生を制御しようとした場合、これまでの研究から、土壌表層から深さ 10cm までの領域の土壌特性を制御する必要があることが示されている。地点 A、B、C の土壌について、土壌表層から深さ 10cm までの領域に保持されている交換性 Ca²⁺ 量は、土壌の仮比重を考慮に入れば算出可能である。地点 A、B、C の土壌の仮比重はそれぞれ 0.55、0.60、0.68 であったことから、これらを考慮に入れて土壌中交換性 Ca²⁺ を計算すると、厚さ 10cm の土壌あたりで、それぞれ 0.94、1.92、3.33 Ca²⁺ mol m⁻² と算出される。すなわち、土壌特性を地点 B から地点 A の状態へと変化させるためには 0.98 Ca²⁺ mol m⁻² を、土壌特性を地点 C から地点 A の状態へと変化させるためには 2.39 Ca²⁺ mol m⁻² を除去する必要があると考えられる。



図(4)-10. 島根県の火山灰土壌上に成立している草原3地点における土壌pH(H₂O)と土壌中交換性Ca²⁺の関係

上記の Ca^{2+} を植物体に吸収させ刈り取り&持ち出しによって除去とした場合、平均的な植物体内 Ca 含量を 0.5%、草原における平均的な植物バイオマス生産量を 400 g DW m^{-2} 、刈り取り頻度を生育盛期に 1 回/1 年と想定すれば、Ca の持ち出し量は毎年 2 g m^{-2} (0.05 mol m^{-2}) と算出される。この値から、刈り取り&持ち出しによって土壌特性を変化させるとすれば、地点 B から地点 A の状態へと変化させるためには 19~20 年、地点 C から地点 A の状態へと変化させるためには 47~48 年の継続した作業が必要であると計算された。

地点 B は、半自然草原であった場所の管理が疎かになり、その結果、土壌特性も変化したものと考えられるが、その変化は他の改良草地の場合に比べれば小さいものである。にもかかわらず、本研究においては、草原再生のためには刈り取り&持ち出し作業が約 20 年にもわたって継続的に必要であると試算された。この数字は、今後さらに精査する余地はあるものの、一旦放棄された草原において再び半自然草原に戻そうとして管理を再開してもなかなか状態の良い半自然草原が再生されない現実とよく合致していると考えられる。

地点 C は、かつて改良草地に改変した影響が現在まで残っており、土壌特性がもとの半自然草原とは異なった状態になっていると考えられる。しかし、その変化は他の改良草地に比べれば小さいものであると考えられた。にもかかわらず、本研究においては、草原再生のためには刈り取り&持ち出し作業が約 50 年にもわたって継続的に必要であると試算された。この数字は、今後さらに精査する余地はあるものの、一旦改良草地として利用された草原において再び半自然草原に戻そうとしても非常に困難である実態とよく合致していると考えられる。このことは、改良草地として草原を利用する際に土壌に投入された肥料や石灰資材のインパクトがいかに大きいかを示すものでもあったと考えられた。

以上、1 つの事例として島根県に実在する草原を例にとり、そこで植物体に土壌養分を吸収させ持ち出すことにより土壌環境を制御する効果を定量的に見積もった。この手法による評価は、今後さらに精査する余地はあるものの、刈り取り&持ち出しによる草原再生効果がある程度妥当に評価しているものと考えられる。

(3) それぞれの草原再生の場面に適した土壌特性制御法を採用する必要性について

土壌特性を制御することによって植生を制御する手法は、除草剤を使う方法などに比較して、環境に対する負荷も小さく、またもとの環境に戻すための手法であることから、本来の意味での自然再生に近いものと考えられる。このため、新しいアイデアではあるものの、今後とも多くの場面で適用が望まれるものと考えられる。

本研究で提案した土壌特性制御法は、(1)塩化アルミニウム処理による手法と、(2)刈り取り&持ち出しによる手法の 2 つである。(1)の手法は、即効的であり目に見える効果が期待できるが、反面、まだ塩化アルミニウム資材のコストが高い、塩化アルミニウム資材は潮解しやすくかつ固まりやすいなど扱いにくい、塩化アルミニウムは市販品としてはまだ入手しにくいなど、現状では製品としての塩化アルミニウムの未完成さに起因するデメリットがあるうえに、塩化アルミニウムの効果が必ずしも現れるケースばかりではないこと、塩化アルミニウム処理の際には周辺環境に配慮しながら必要処理量をケースバイケースで求めていく必要があることなど、現時点では使用時に専門的な知識が必要である点にも注意が必要である。

これに対して、(2)刈り取り&持ち出しによる手法は、伝統的な草原の管理手法でもあるため、

この手法を長期的継続して実施することが可能であれば、それが最も望ましいと考えられる。とくに、多くの野草類は、刈り取り&持ち出しという草原の管理によって生活環を完結するタイプの種もいることから、この手法による半自然草原の維持・保全が最も理想的であると考えられる。しかし、草刈り&持ち出しには相応の時間と労力がかかること、この作業の担い手が不足していること、この作業の見返りがほとんど期待できないことなど、作業に携わる方々の生活を考えれば、必ずしも採用できる場面ばかりではないと考えられる。とくに、刈り取り&持ち出しによって草原再生を行おうとした場合、その効果が現れるまでには数十年以上かかると考えられる。このため、土壌特性が半自然草原に近づいている場合にはこの刈り取り&持ち出しによる手法でも良い場合があると考えられるが、かつて改良草地として利用した履歴を持つ場所や富栄養化が進んだ場所では、適応が難しい場面も多いと考えられる。

以上のように、それぞれの草原再生の場面に適した土壌特性制御法を採用することは非常に重要であり、誤った選択をしないよう、十分な考慮と工夫が必要であると考えられる。たとえば、国立公園内などにおいてかつて改良草地として利用された履歴を持つ場所で、草原再生が急務となっている場所の場合には、塩化アルミニウム処理によって早急な対策を検討する方が良いと考えられる。この場合、刈り取り&持ち出しによって効果を待つと、その間に貴重な植物群落が消滅するといったリスクを伴う危険性が考えられる。ただし、塩化アルミニウム処理を行う場合は一度に全ての保全対象地区で実施するのではなく、まずは一部から始め効果を確かめながら徐々に広げていくこと、効果の期待できない場所もあるのでそういった場所には処理しないこと、処理量を十分を守るなど、十分な配慮が必要であろう。なお、本研究によって提案された2つの手法だけではまだ十分に対応しきれない場面も多いと考えられ、これらの点については、今後、さらなる研究が必要であると考えられた。

（４）本研究により開発された技術の普及および得られた知見の周知について

本研究により得られた知見や技術は、広く一般の方々に理解されることによって、富栄養化された土壌環境に対する警戒など、より大きな波及効果が期待できると考えられた。このため、学会発表だけではなく、プレスリリースや公開シンポジウムなど、より一般の方々の目にとまる手段によって、本研究で得られた知見や技術の積極的な周知につとめた（7. 研究成果の発表状況の項目を参照）。

とくに、塩化アルミニウムを土壌表面に処理することによりセイタカアワダチソウなどの外来植物を衰退させ在来植物が生育しやすい土壌環境を誘導する手法は、プレスリリースおよびその後の新聞発表などにより広く周知されたことから、全国各地の外来植物が蔓延する現場から「塩化アルミニウム処理による即効的な手法を適用したい」といった多数の問い合わせを直接受けた（100件程度）。これらは、個人ベースの問い合わせから行政ベースの問い合わせまでさまざまであったが、本研究では、公共性が高く、かつ今後モニタリング調査を継続することにより塩化アルミニウム処理の効果を追跡できる可能性が高いサイトとして、行政が所轄する3地点を選定し、外来植物が蔓延する現地を視察するとともに、土壌を採取し、化学分析を行って、本研究により得られた手法を適用するプランを問い合わせ側に対して提案した（（2）環境政策への貢献：＜行政が既に活用した成果＞の項目を参照）。

また、塩化アルミニウム処理によって土壌の化学的特性を制御し、それによって植生を制御す

る手法は、今後は民間企業などに技術移転しながら普及を図るのが望ましいと考えられる。これは、本研究を受託したのは研究を業務とする本研究独立行政法人でありこの技術を事業として展開することは困難であること、現状の体制では多くのニーズに対応しながら本技術を推進することは物理的に困難であること、などの理由による。そこで、本技術に興味を示した日本軽金属株式会社と本技術に関わる共同研究契約を結び、さらなる技術開発を進めるとともに、塩化アルミニウムの供給および販売およびこれらの技術の普及を共同で進めることとなった（共同研究契約は締結済み）。また、本研究により得られた知見は特許として出願中であるが、日本軽金属株式会社とは知的所有権の許諾契約も締結した。このように、本研究により得られた知見や技術は、民間企業へも迅速に活用される見込みとなった。

本研究で得られた知見のうち、とくに阿蘇の草原で得られた研究成果に関しては、平成 24 年 6 月 2 日（土曜日）、国立阿蘇青少年交流の家（熊本県阿蘇市）において、公開シンポジウム「阿蘇の草原に生きる植物と土壌 ―わかってきた植物ごとに好きな土壌―」を開催し、阿蘇周辺住民を主な対象として周知した（主催：独立行政法人農業環境技術研究所、共催：阿蘇草原再生協議会、公益財団法人阿蘇グリーンストック）。地元の牧野関係者や植物愛好家を中心に、約 80 名の参加者があり、大変盛況であった。本集会のプログラム、ポスター（図(4)-11 参照）、開催報告は、インターネットから閲覧できる。WEB アドレスは下記の通り（平成 25 年 5 月現在）。

- ・本集会のプログラム

<http://www.niaes.affrc.go.jp/sinfo/sympo/h24/20120602.html>

- ・本集会のポスター

<http://www.niaes.affrc.go.jp/sinfo/sympo/h24/20120602.pdf>

- ・本集会の開催報告

<http://www.niaes.affrc.go.jp/magazine/148/mgzn14801.html>

また、本研究で得られた知見のうち、土壌特性を制御することにより外来植物が蔓延する場所から在来植物が優占する植生に変える手法については、平成 24 年 11 月 30 日（金曜日）、新宿明治安田生命ホール（東京都新宿区）にて、「いのちと暮らしを守る農業環境」と題した（独）農業環境技術研究所主催の研究成果発表会にて、「セイタカアワダチソウを抑えて在来植生に戻す」と題した講演を行うことによって周知した。質疑応答なども活発に行われた。本講演の資料（要旨）および講演に使用した図表は、インターネット上から閲覧できる。WEB アドレスは下記の通り（平成 25 年 5 月現在）。

- ・本集会のプログラム

<http://www.niaes.affrc.go.jp/sinfo/sympo/h24/20121130.html>

- ・本集会のポスター

<http://www.niaes.affrc.go.jp/sinfo/sympo/h24/20121130.pdf>

- ・本集会の開催報告

<http://www.niaes.affrc.go.jp/magazine/148/mgzn14801.html>

- ・本研究集会における関連講演「セイタカアワダチソウを抑えて在来植生に戻す」の資料

<http://www.niaes.affrc.go.jp/sinfo/sympo/h24/20121130.pdf>

- ・本研究集会における関連講演「セイタカアワダチソウを抑えて在来植生に戻す」のパワーポイント資料（図表）

http://www.niaes.affrc.go.jp/sinfo/sympo/h24/niaes2012_17.pdf

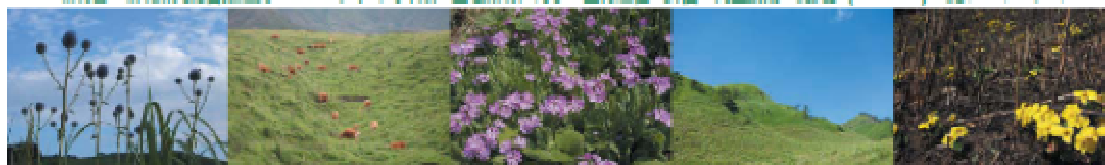
また、得られた知見のうち草原の保全活動を推進するうえで重要な情報は、平成 24 年 10 月 27 日（土曜日）～29 日（月曜日）、多くの草原の保全に関わる方々が参加した第 9 回 全国草原サミット・シンポジウム in みなかみにて、「外来植物の侵入は土壌 pH と土壌有効態リン酸に関連している」、「在来植物に有利な土壌をとりもどす」、「ススキ、ヨモギ、セイタカアワダチソウが分布する土壌環境」と題した 3 題のポスター発表を行うことにより周知した。ポスターの前には、多くの参加者が集まり、大変盛況であった。約 200 人の参加者があった。

また、本研究で得られた知見は、総合的にとりまとめたうえで、平成 25 年 3 月 5 日（火曜日）、日本生態学会第 60 回全国大会（静岡市）にて、「日本の草原に生きる植物と土壌」と題した集会を開催し、公表した。約 80 名の参加者があり、質疑応答を含めて、大変盛況であった。本集会のプログラムおよび要旨はインターネット上から閲覧できる。

また、得られた知見のうち学術的な価値の高い部分については、主に研究者を対象として、日本土壌肥料学会 2012 年度大会（鳥取市）および日本生態学会第 60 回全国大会（静岡市）にて発表を行った。

また、本研究で得られた知見のうち、植物種ごとの情報をとりまとめ、「植物の化学生態プロフィール」と題した WEB ページ上から公開した（図(4)-12 参照）。

環境省・環境研究総合推進費プロジェクト『野草原の土壌環境に対する生育適性の評価と再生技術の開発』(D-1001) 公開シンポジウム



阿蘇の草原に生きる 植物と土壌

—わかってきた植物ごとに好きな土壌—

植物の生育や分布は、気温や降水量ばかりではなく、土壌特性からも強い影響を受けていることがわかってきました。日本にはさまざまな特性を持った土壌が分布していますが、阿蘇にはどんな土壌が分布していて、阿蘇の植物はどんな土壌とともに生きているのか、これまでの研究成果をわかりやすくご紹介いたします。

日時：平成24年6月2日（土曜日）、13:00～17:00

場所：熊本県阿蘇市国立阿蘇青少年交流の家（120席を予定） ※駐車場が狭いため自宅用車ご利用の際は、乗り合わせをお願いします

〒989-2692 熊本県阿蘇市一の宮町宮地 6029-1、<http://aso.niye.go.jp/about/index.html>, Tel: 0967-22-0811

対象

どなたでもご来聴大歓迎（入場無料）。
一般の方、植物愛好家の方、農家のみなさん、
小中高生や大学生のみなさん、
その他、どなたでもお気軽にご参加下さい。
席に限りがありますので、
下記の電子メール、ファックス、またはお電話にて、
事前受付をお願いいたします。
■電子メール：howan@affrc.go.jp
■Fax：029-838-8199
■電話：029-838-8246
■受付：森田沙綾香

プログラム

- ご挨拶（独立行政法人農業環境技術研究所）
1. 阿蘇の草原が持つ価値とその危機
横川昌史（京都大学大学院農学研究科）
2. 植物と土壌の関わりも切れない関係
平部俊太郎（独立行政法人農業環境技術研究所）
3. 阿蘇の植物の分布と土壌特性の関係
～とくに藍花やセイタカアワダチソクについて～
小嶋知代（早稲田大学）
4. 阿蘇の植物が必要とする栄養分について
～とくに藍花やセイタカアワダチソクについて～
森田沙綾香（独立行政法人農業環境技術研究所）
5. これからの草原の管理に向けて
～刈取りや野焼きなどの伝統的管理が阿蘇の野原を守る～
橋本良延（独立行政法人農業環境技術研究所）
6. 総合討論

司会&総合コーディネーター

高橋 佳孝
（独立行政法人農業食品産業技術総合研究機構 近畿中国四国農業研究センター）
平部俊太郎
（独立行政法人農業環境技術研究所）

写真提供：横川昌史氏

■主催：独立行政法人農業環境技術研究所 ■共催：阿蘇草原再生協議会、公益財団法人阿蘇グリーンストック

お問い合わせ先

独立行政法人農業環境技術研究所 生物多様性研究領域 平部俊太郎
〒305-8604 茨城県つくば市観音台 3-1-3 Tel:029-838-8246, Fax:029-838-8199, e-mail:hiradate@affrc.go.jp

図(4)-11. 平成 24 年 6 月 2 日（土曜日）に開催した公開シンポジウム「阿蘇の草原に生きる植物と土壌：わかってきた植物ごとに好きな土壌」（於：国立阿蘇青少年交流の家（熊本県阿蘇市））のポスター



図(4)-12. 公開した WEB ページ「植物の化学生態プロフィール」トップページ

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

本研究では、植生制御のための土壌特性制御法として、(a)塩化アルミニウムを土壌表面に処理する方法と、(b)伝統的な草原の管理手法による手法が検討された。前者の(a)塩化アルミニウムを土壌表面に処理する方法の検討では、土壌の化学的特性を制御することによって植生を制御することができることが実証された。これまでは、植物の分布や遷移は、植物のサイズや成長速度といった生態的特性に大きく依存していると理解されていたが、本研究により土壌の化学的特性にも非常に大きな影響を受けていることが実証された。とくに、セイタカアワダチソウは個体サイズも大きく成長速度も速いため、チガヤのような個体サイズも小さく成長速度の遅い植物によって押し退けられることはないと考えるのが一般的であった。しかし、本研究によって、土壌酸性を強めた場所だけでセイタカアワダチソウが衰退しチガヤの群落となった事例が明確に示され、これを発表した関連学会では大きな話題となった。本研究が端緒となり、植物の分布や遷移におよぼす土壌の化学的特性の影響に関する研究がより進展することが期待される。このように、本研究により土壌の化学的特性が植物の分布や遷移に対して非常に大きな影響を持っていることが実証的に示され、科学的な進歩に大きく貢献したと考えられる。

また、後者の(b)伝統的な草原の管理手法の検討では、この野焼き、刈り取り&持ち出し、放牧の3つの手法について定性的な評価が行われ、土壌環境を貧栄養的かつ土壌酸性が強い状態として維持・管理するためには、刈り取り&持ち出し>放牧>野焼き、の順に効果的であることが明らかになった。また、この最も効果的である刈り取り&持ち出しが草原再生の場面で適用された際、その土壌の化学的特性におよぼす影響を定量的に見積もる方法が示された。これまで、草原の管理方法が土壌の化学的特性におよぼす影響に関しては、実測値に基づいた報告は非常に少なかった。本研究では、実際の野外における草原にて調査を実施するとともに、土壌の化学分析に基づいて、伝統的な草原の管理手法の効果を見積もった。これらの実測データや研究成果は、今後、多くの研究や実用場面で利用されることが期待される。

以上、本研究は野外操作実験や実験室内化学分析を通じて初めて明らかになった新知見が多数あり、これらは野草類の保全のための基礎的知見として重要であるとともに、斬新な視点から科学的な進歩に大きく貢献したと考えられる。

(2) 環境政策への貢献

本研究により得られた研究成果は、サブテーマ(1)「野草類の分布と土壌の化学的特性の関係解明」およびサブテーマ(2)「野草類に含まれる無機栄養元素組成の解明」で得られた研究成果をもとに達成されたものである。このため、ここに報告する<行政が既に活用した成果>は、サブテーマ(1)および(2)で報告した内容と多くが重複するが、本研究内容に基づく内容もある。これらを含めて、下記に報告する。

<行政が既に活用した成果>

本研究により得られた研究成果は、他のサブテーマにより得られた研究成果とともに、これまでプレスリリースや学会発表等によって積極的に周知してきたこともあり、全国各地の外来植物が蔓延する現場から「セイタカアワダチソウの蔓延防止に協力してほしい」との問い合わせが多数あった。これには行政からの問い合わせも含まれており、下記の3つのケースについては、セ

イタカアワダチソウなどの外来植物が蔓延する現地を視察するとともに土壌を採取し、化学分析を行って、今後の管理手法に関して提案を行った。

- ① 国土交通省所轄の河川周囲の河岸および河川堤防
- ② 鹿児島県が所轄する道路法面
- ③ 福井県が所轄する河川周囲の河岸緑地公園内および河川堤防

この中で、①のケースは河川敷内の緑地公園等であり、セイタカアワダチソウ、ヒメジョオン、ムシトリナデシコ、コメツブツメクサなどの外来植物が蔓延していた。また、調査対象地付近の水辺では、特定外来生物であるオオカワヂシャの生育も確認された。調査対象地の土壌は、粘土をほとんど含んでいない砂質土壌であり、養分を保持する能力に乏しいと考えられた。にもかかわらず、土壌中有効態リン酸は $20 \text{ mg P}_2\text{O}_5 \text{ } 100\text{g}^{-1}$ 前後であり、多くの外来植物が生育可能な範囲にあると考えられた。また、土壌pH(H_2O)も6.8~7.6と弱酸性~弱アルカリ性の範囲にあり、やはり多くの外来植物が生育可能な範囲内にあった。これは、河川水中に含まれる植物栄養分がこれらの土壌表面に到達するとともに、水分の蒸発に伴ってこれら植物栄養分が濃縮するためと考えられた。この河川の周辺や上流には農地が広がっており、これらの地域から植物栄養分が供給されている可能性が示唆された。このため、2012年度、このような環境は外来植物が蔓延しやすい状態であることを行政側の方々に説明するとともに、これらの植物を除去することも重要ではあるが、これらの植物が蔓延する原因となっている周辺環境からの植物栄養分の流入にも注意する必要があることを指摘した。また、現地から採取した土壌サンプルの化学分析を実施するとともに、その分析結果をもとに、塩化アルミニウム処理設計試案をたて、1つのオプションとして示した。行政側では、以上の指摘を受けて、2013年度以降、これらの地域における外来植物の蔓延防止策を検討することとなった。

上記の②のケースは、造成中あるいは造成後間もない道路法面（斜面）であり、要注意外来生物であるセイタカアワダチソウが法面の大部分を覆い蔓延していた。この場所では、セイタカアワダチソウ以外にも、セイバンモロコシやハルジオンといった外来植物が生育している一方で、チガヤやススキなどの在来植物も生育が確認された。調査対象地の土壌は、新しい火山灰の影響を受けたものであり、ある程度粘土も含まれていた。土壌pH(H_2O)は6.3~7.1と弱酸性~弱アルカリ性の範囲にあり、また土壌中有効態リン酸は $5\sim 36 \text{ mg P}_2\text{O}_5 \text{ } 100\text{g}^{-1}$ の範囲内にあった。このことから、今後、定期的な刈取りなどを実施するなど、貧栄養的な管理を継続的に続けることによって、セイタカアワダチソウを衰退させることができる可能性があることを、2013年1月に行政側に報告した。また、現地から土壌サンプルを採取し、化学分析を実施するとともに、その分析結果をもとに、塩化アルミニウム処理設計試案をたて、1つのオプションとして示した。この報告を受けて、行政側では、道路法面において塩化アルミニウム六水和物処理による小規模植生制御試験を実施することを決め、2013年4月、本研究で提案した試験設計に従って実際に塩化アルミニウム処理試験が開始された。行政側では、今後、この小規模試験の推移をみながら、道路法面における植生管理手法を検討していくこととなった。また、本調査の過程においては、道路法面の造成および緑化の過程において、肥料成分や石灰資材が比較的多量に混入されていることも分かった。このことから、今後は法面緑化においてもできるだけ肥料成分や石灰資材の投入を減らすよう、行政側に対して提案を行った。また、今後、肥料成分や石灰資材の投入低減のための検討を行う予定。

上記の③のケースは、河川敷内の緑地公園であり、要注意外来生物であるセイタカアワダチソウが蔓延していた。このほか、外来植物では、オオマツヨイグサ、アカツメクサ、ハルジオン、ブタクサなどが生育しており、在来植物では、オギ、カスマグサ、スイセン、エノコログサ、ヤブヘビイチゴなどが生育していた。これらの調査対象地の土壌は、やや砂を含む粘土質のものが大部分であり、土壌pH(H₂O)が6.2～7.1、土壌中有効態リン酸が29～44 mg P₂O₅ 100g⁻¹と、いずれも高い範囲内にあった。これらの土壌特性から、現状の状態では外来植物が蔓延しやすい状態であることを、2013年3月に行政側に報告した。また、同時に、今後定期的な刈取りなどを実施するなど貧栄養的な管理を継続的に続けることによってセイタカアワダチソウを衰退させることができる可能性があること、およびセイタカアワダチソウの抑制および在来植物による植生管理を早期に実施したい場合にはサブテーマ(4)で得られている研究成果である塩化アルミニウム六水和物処理の可能性を報告した。また、現地から土壌サンプルを採取し、化学分析を実施するとともに、その分析結果をもとに、塩化アルミニウム処理設計試案をたて、1つのオプションとして示した。この報告を受けて、行政側では、なぜ土壌中有効態リン酸が高い値となっているかを調査・検討するとともに、今後に向けたセイタカアワダチソウ対策をさらに継続検討することとなった。

以上、本研究は、着手後3年ほどであるにもかかわらず、多くの行政ニーズに対応し、その研究成果は既に多くの場面で活用されていると考えられる。

＜行政が活用することが見込まれる成果＞

本研究により得られた成果は、草原再生に向けてどのような土壌環境を目標に管理したらよいかを決定するうえで重要な情報を提供する。たとえば、オミナエシ、ミツバツチグリ、シラヤマギク、キジムシロといった日本の半自然草原に典型的に出現する在来野草類を保全しようとした場合には、土壌酸性が強く、かつ土壌中有効態リン酸が低い状態を維持することが有効であると考えられる。とくに、阿蘇くじゅう国立公園や大山隠岐国立公園のように、半自然草原が長期間維持されてきた場所では、土壌は酸性が強くかつ貧栄養的な状態で維持されてきたと考えられ、結果としてこのような状態の土壌に適応している植物が維持されてきたものと考えられる。そのため、これらの国立公園の中でも草原景観を従来からの状態で維持しようとした場合には、土壌酸性が強く、かつ貧栄養的な状態を維持することが重要であると考えられる。そのためには、これらの地域内に肥料成分や石灰資材をできるだけ持ち込まないように注意が必要であると考えられる。たとえば、道路造成の際の法面緑化工事においても、肥料成分や石灰資材の投入量は、十分検討の上、最小限にとどめる必要があると考えられる。

また、本研究により得られた知見は、草原の再生がどのような土壌環境において実現されやすいのかを予測したり、回復効果が高い場所を効率的に選定したりするうえでも重要な情報となる。すなわち、一度改良草地として利用した履歴がある草原は、土壌酸性が弱められており、また土壌中有効態リン酸も高まっている場所が多く、こういった場所では刈取り等によって草原植生を復元しようとしても、外来植物が蔓延しやすいため、草原再生が効果的に実現されにくいと考えられる。これに対して、改良草地として利用した履歴がなく、肥料成分や石灰資材の投入が行われていない場所では、土壌酸性や土壌中有効態リン酸は従来の中半自然草原における値を保っている場合が多く、そのためこのような場所では刈取り&持ち出し等によって草原植生を試みれば、従来の半自然草原に典型的な在来植物が早期に戻ってくる可能性が高いと考えられる。このよう

に、草原再生にあたっては、あらかじめ対象となる地域の土壌特性を調べておけば、草原再生が効果的に行われる場所を推定することが可能であると考えられる。

また、草原再生において障害となっている外来植物の蔓延についても、その防止策を講ずる上で重要なヒントを与えると考えられる。たとえば、要注意外来生物であるセイタカアワダチソウは、成長速度が早いこと、植物体が大型であること、刈取りに対する抵抗性が強いこと、除草剤などに対する抵抗性が強いこと、繁殖力が強いことなど、その頑強な生態的特性から防除困難であると理解されることが多かった。しかし、本研究により、そのセイタカアワダチソウも特定の環境を選んで蔓延している様子が明らかになった。とくに、セイタカアワダチソウは土壌酸性が強い環境では旺盛に生育することができず、蔓延しないものと考えられる。このため、セイタカアワダチソウは、道路法面やその周辺あるいは建物の周囲といった人為的に改変された環境に限って蔓延していることが多く、逆に従来からの土壌特性が維持されている場所では蔓延できない可能性があると考えられる。このように、外来植物が分布しやすい土壌環境とともに分布しにくい土壌環境についても情報を整理し、同時に国立公園等外来植物の蔓延を防止したい場所の土壌特性を調査することによって、蔓延防止策を講じる必要性が高い場合／低い場合が、植物種ごとに整理できる。たとえば、蒜山地域のようにもともと土壌酸性が強かつ土壌中有効態リン酸が低い場所では、セイタカアワダチソウは大きな人為的なインパクトが加えられている場所以外ではほとんど蔓延できないと考えられる。これに対して、肥料成分や石灰資材が多量に投入されてきた履歴を持つ道路法面や耕作放棄地では、セイタカアワダチソウの格好の生育地となる危険性が高いと考えられる。また、これらの情報を整理することにより、これらの植物の蔓延を引き起こす人為的インパクトについても整理することが可能であると考えられる。たとえば、蒜山地域のようにもともと土壌酸性が強かつ土壌中有効態リン酸が低い場所では、セイタカアワダチソウが蔓延するためにはリン酸資材および石灰資材の両方の投入が必要であると考えられる。一方、秋吉台地域のような石灰岩台地では、土壌は基岩である石灰岩の影響を受けて広く弱酸性化しているため、リン酸資材が加えられるだけでセイタカアワダチソウが蔓延できる条件が整うと考えられる。このように、本研究により得られた知見は、外来植物の蔓延防止策を講ずる上で、有用な知見を提供するものと考えられる。また、本研究により得られた知見は、外来植物の蔓延リスク評価を行う上でも重要な情報を提供するものと考えられる。

上記以外にも、本研究により得られた成果は、富栄養化がもたらす悪影響の一端を明らかにしており、適正な物質循環と栄養塩管理の重要性を指摘していると考えられる。また、本研究から得られたデータをより詳細に解析することにより、環境指標植物を選定することができると考えられる。

これらの研究成果は、公開シンポジウム、公開講演会、インターネット、学会活動、各種研究集会、保全活動にかかわる団体が主催するセミナーなどを通じて、今後さらに広く広報・普及に努める予定である。このように、本研究は今後も広く環境行政に貢献すると考えられる。

6. 国際共同研究等の状況

本研究は、日本国内における野草類の保全を目的としたものであり、日本国内における独特の植物の種特性や土壌環境条件を研究対象としている。このため、国際共同研究は当初は考慮に入れていなかった。しかし、研究が予想以上に進捗し、また得られた結論も国際的に注目されるも

のであると考えられることから、本研究プロジェクト後半においてとくに多くの海外の研究者と本研究成果に関する意見交換を行った。たとえば、アメリカ合衆国メイン州立大学のSusan M. Erich教授（専門：土壤化学）は、JSPS欧米短期外国人招へい研究者として、平成25年2～4月、（独）農業環境技術研究所に滞在したが、その間、日本における在来野草類の保全に関する問題や、外来植物の蔓延に関する問題、および土壤環境の保全手法について頻繁に意見交換を行った。Erich教授は、アメリカ合衆国においても外来植物の蔓延に関わる問題は大きく、本研究成果は明快なデータを示しており、非常に重要であると評した。また、Erich教授と帯同して来日した同大学のTsutomu Ohno教授（専門：土壤学）とも意見交換を行い、土壤中においてリン酸がどのような化学形態で存在しているのか、今後さらに明らかにする必要があるとの認識で一致した。これを受けて、今後、土壤中のリンの化学形態について、核磁気共鳴など最新の分析機器を用いて研究を共同で進めることとなった。また、JSPS二国間交流事業においては、埼玉大学の川本 健教授（プロジェクトリーダー）、Brent Clothier博士（The New Zealand Institute for Plant & Food Research Limited）、およびKarin Mueller博士（同研究所）とともに、土壤中における物質の移動に関する共同研究を実施しているが、その中で土壤の化学的特性によって植物の分布が大きな影響を受けている現象について説明を行ったところ、非常に強い関心が示された。この共同研究では、日本と同様に新しい火山灰土壤が分布する湿潤温暖な地域としてニュージーランドを共同研究の相手先として選定し、それぞれの地域の土壤中における物質循環およびそのプロセスのモデル化を行う。土壤中における物質循環の違いによって植物の分布が異なるのであれば、この共同研究のアウトプットもさらに大きな意義が生まれるため、今後、生態系に対する影響も考慮に入れながら共同研究を進めることとなった。

今後は、本研究で得られた知見を国際誌に発表する予定であるため、さらに国際共同研究は進展するものと期待される。

7. 研究成果の発表状況

（1）誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) T. KOYANAGI, Y. KUSUMOTO, S. HIRADATE, S. MORITA, M. YOKOGAWA, Y. TAKAHASHI and C. SATO: *Applied Vegetation Science*, **16**, 95-109 (2013)
“New method for extracting plant indicators based on their adaptive responses to management practices: application to semi-natural and artificial grassland data”

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 平舘俊太郎、楠本良延、吉武 啓、馬場友希：身近な自然の保全生態学、生物の多様性を知る（根本正之編著）、131-148, 培風館（2010）
「土壤が支える生物多様性」
- 2) 和田信一郎、金田吉弘、鳥山和伸、安西徹郎、日笠裕治、小祝政明、後藤逸男、平舘俊太郎：日本土壤肥料学雑誌, 82(2), 173-178 (2011)
「土壤診断の現状と今後への挑戦：流派そろい踏み」
- 3) 平舘俊太郎、松永俊朗、和田信一郎、渡邊 彰：日本土壤肥料学雑誌, 第82巻, 部門別進歩

総説特集号 82, 466-478 (2011)

「第2部門 土壌化学・土壌鉱物」

- 4) 平舘俊太郎、楠本良延、森田沙綾香、小柳知代：植調、**46**, 3, 89-95 (2012)
「環境制御による植生制御：外来植物であるセイタカアワダチソウの草原から在来植物であるチガヤの草原へ」
- 5) 平舘俊太郎、森田沙綾香、楠本良延：農環研ニュース、**96**, 5-7 (2012)
「セイタカアワダチソウの蔓延を防ぐ：土壌環境を考慮した新しい考え方」
- 6) 平舘俊太郎：農環研ニュース、**96**, 10 (2012)
「公開シンポジウム「阿蘇の草原に生きる植物と土壌」」

(2) 口頭発表 (学会等)

- 1) 平舘俊太郎：日本土壌肥料学会講演要旨集第56集、208, (2010)
「生物多様性と土壌診断」
- 2) 平舘俊太郎、白川勝信、森田沙綾香、小柳知代、中西亮介、楠本良延、太田陽子、大竹邦暁、佐久間智子、堤 道生、高橋佳孝：日本生態学会第58回全国大会、P1-023 (2011)
「半自然草地における植物の分布と土壌特性の関係：広島県雲月山における放牧地と非放牧地の比較」
- 3) 森田沙綾香、平舘俊太郎、藤井義晴：日本雑草学会第50回講演会講演要旨、56(I), 103 (2011)
「ネズミムギとオオアワガエリの土壌の化学的特性に対する生育反応」
- 4) 森田沙綾香、小柳知代、藤間 充、太田陽子、楠本良延、平舘俊太郎：日本雑草学会第50回講演会講演要旨、56(I), 158 (2011) .
「土壌環境制御による植生管理法の開発 第3報：山口県と茨城県で実施した土壌酸性化処理とそれにとりもなう植生変化」
- 5) 森田沙綾香、小柳知代、横川昌史、高橋佳孝、楠本良延、平舘俊太郎：日本土壌肥料学会講演要旨集第57集、106 (2011) .
「阿蘇の草原における表層土壌の化学特性と管理手法の関係」
- 6) T. KOYANAGI, Y. KUSUMOTO, S. MORITA, S. HIRADATE, S. YAMAMOTO, S. OKUBO, K. TAKEUCHI :
The 8th World Congress of the International Association for Landscape Ecology, Beijing, China, 2011
“History of Satoyama landscapes: Empirical examples of the impacts of past landscape changes on the present grassland species distribution”
- 7) Y. KUSUMOTO, T. KOYANAGI, S. MORITA, S. HIRADATE, K. SHIRAKAWA, M. INOUE, M. YOKOGAWA, T. CHIBU, Y. OHTA, M. TSUTSUMI, Y. TAKAHASHI, S. ISHIKAWA : 日本生態学会第59回全国大会、JP3-174J (2012) .
“The relation between species diversity of semi-natural grassland and chemical property of soil in Shiozuka plateau, Japan. ”
- 8) 楠本良延：日本生態学会第59回全国大会、T03-5 (2012)
「わが国における半自然草地の減少とその要因」
- 9) 平舘俊太郎、森田沙綾香、小柳知代、楠本良延：日本生態学会第59回全国大会、T03-5 (2012)

「土壌環境から考える二次草原の再生：わかってきた野草類の土壌環境適性」

- 10) T. KOYANAGI, S. HIRADATE, Y. KUSUMOTO, S. MORITA, M. YOKOGAWA, Y. TAKAHASHI : 日本生態学会第59回全国大会、I1-09 (2012) .

“Effects of grassland management can be modified by soil pH differences: a case study of burned and mowed semi-natural grasslands in Aso, Japan”

- 11) 森田沙綾香、楠本良延、小柳知代、横川昌史、高橋佳孝、伊藤豊彰、平舘俊太郎：日本土壌肥料学会講演要旨集第58集、125 (2012) .

「外来植物の分布に影響を及ぼす土壌特性の影響：アロフェン黒ぼく土と非アロフェン黒ぼく土の比較」

- 12) 藤間 充、三浦雅史、泉 玄氣、平舘俊太郎、楠本良延、太田陽子、森田沙綾香、小柳知代：日本土壌肥料学会講演要旨集第58集、146 (2012)

「土壌環境制御による植生管理法の開発：第4報 土壌酸性化処理による土壌の理化学性の変化」

- 13) 平舘俊太郎：日本生態学会第60回全国大会 自由集会 (2013)

「土壌と植生の深いつながり」

- 14) 小柳知代：日本生態学会第60回全国大会 自由集会 (2013)

「草原植物の分布と土壌の化学的特性の関係」

- 15) 森田沙綾香：日本生態学会第60回全国大会 自由集会 (2013)

「草原植物に含まれる無機栄養元素組成の特徴」

- 16) 平舘俊太郎：日本生態学会第60回全国大会 自由集会 (2013)

「草原の管理法と土壌特性と植物の分布の関係」

- 17) 楠本良延：日本生態学会第60回全国大会 自由集会 (2013)

「土壌環境制御により植生をコントロールする：草原再生手法の開発に向けて」

(3) 出願特許

- 1) 平舘俊太郎、楠本良延、藤間 充、荒木陽子： 独立行政法人農業環境技術研究所；「植生の制御方法」、特許出願（特願2011-044614），出願日：平成23年3月2日。

(4) シンポジウム、セミナー等の開催（主催のもの）

- 1) 平舘俊太郎：セミナー講演、平成22年6月1日、北里大学（観客約60名）。

「外来植物の侵入・定着と土壌の化学的特性の関係」

- 2) 平舘俊太郎：セミナー講演、現地学習会「秋吉台草原の保全と再生を考える」、平成22年9月26日、秋吉台科学博物館（観客約30名）。

「野草類の土壌環境に対する生育特性と草原の再生技術」

- 3) 楠本良延：講義、平成22年11月25日、財団法人 農民教育協会 鯉淵学園農業栄養専門学校（観客約40名）。

「農村環境に生育する植物群落の特徴と紹介」

- 4) 平舘俊太郎：講義、平成23年1月12日、財団法人 農民教育協会 鯉淵学園農業栄養専門学校（観客約40名）。

「多様な土壌環境に生育する多様な植物たち：その生育戦略」

- 5) 平舘俊太郎：講義、平成23年1月13日、東京農業大学（観客約160名）.

「植物の生育と土壌環境」

- 6) 「半自然草地の現状と再生」（平成24年3月18日、日本生態学会第59回全国大会：於龍谷大学、観客約100名）

- 7) 平舘俊太郎、楠本良延、森田沙綾香、小柳知代：公開シンポジウム開催、平成24年6月2日、国立阿蘇青少年交流の家、観客約80名）

シンポジウムタイトル「阿蘇の草原に生きる植物と土壌：わかってきた植物ごとに好きな土壌」

講演：「阿蘇の草原が持つ価値とその危機」（横川昌史）

講演：「植物と土壌の間の切っても切れない関係」（平舘俊太郎）

講演：「阿蘇の植物の分布と土壌特性の関係：とくに盆花やセイタカアワダチソウについて」（小柳知代）

講演：「阿蘇の植物が必要とする栄養分について：とくに盆花やセイタカアワダチソウについて」（森田沙綾香）

講演：「これからの草原の管理に向けて：刈取りや野焼きなどの伝統的管理が阿蘇の野草を守る」（楠本良延）

総合討論（司会&総合コーディネーター：高橋佳孝、平舘俊太郎）

- 8) 平舘俊太郎、森田沙綾香：ポスター発表、第9回 全国草原サミット・シンポジウムinみなかみ、平成24年10月28～29日、みなかみ町立藤原小中学校（観客約100名）

「外来植物の侵入は土壌pHと土壌有効態リン酸に関連している」

- 9) 平舘俊太郎、森田沙綾香：ポスター発表、第9回 全国草原サミット・シンポジウムinみなかみ、平成24年10月28～29日、みなかみ町立藤原小中学校（観客約100名）

「在来植物に有利な土壌をとりもどす」

- 10) 平舘俊太郎、森田沙綾香：ポスター発表、第9回 全国草原サミット・シンポジウムinみなかみ、平成24年10月28～29日、みなかみ町立藤原小中学校（観客約100名）

「ススキ、ヨモギ、セイタカアワダチソウが分布する土壌環境」

- 11) 平舘俊太郎：講演、農業環境技術研究所研究成果発表会2012、平成24年11月30日、新宿明治安田生命ホール（東京都新宿区、観客185名）

「セイタカアワダチソウを抑えて在来植生に戻す」

- 12) 日本の草原に生きる植物と土壌（平成25年3月5日、日本生態学会第60回全国大会：於静岡県コンベンションアーツセンター（グランシップ静岡）、観客約80名）

（5）マスコミ等への公表・報道等

- 1) プレスリリース（2011年12月19日、於：農林水産技術会議事務局筑波事務所、「外来植物のセイタカアワダチソウを衰退させ在来植物を中心とする植生に誘導する：土壌環境をコントロールしてセイタカアワダチソウの蔓延を防ぐ」）

- 2) 茨城新聞（2011年12月20日、地域版、21面、「セイタカアワダチソウ対策：塩化アルミで駆逐、農環研が開発」）

- 3) 常陽新聞（2012年1月3日、地域版、7面、「粉状アルミ散布で酸性土壌に：外来植物衰退の技術開発、つくば農環研、在来植物の回復に期待、農耕地周辺の緑化にも活用」）
- 4) 朝日新聞（2012年1月4日、全国版夕刊、3面、「環境：さらばセイタカアワダチソウ、農環研、除草剤使わず駆除成功」）
- 5) 朝日小学生新聞（2012年1月6日、全国版、1面、「外来種セイタカアワダチソウ、除草剤使わずに駆除」）
- 6) 毎日新聞（2012年1月9日、全国版、2面、「「迷惑」外来種セイタカアワダチソウ：土壌酸性化でまん延を防止」）
- 7) FM山口（2012年1月9日）
- 8) 日本農業新聞（2012年1月10日、全国版、14面、「セイタカアワダチソウ“退治”：粉状アルミニウム有効、農環研、効果は「半永久的」」）
- 9) 産経新聞（2012年1月26日、茨城版、13面、「外来植物セイタカアワダチソウ、新技術で駆除」）
- 10) 山陰中央新報（2012年1月29日）
- 11) 山口新聞（2012年1月29日、「半年で外来植物駆除：農環研、土壌の酸性度高め」）
- 12) 新幹線車両内テロップ（2012年1月29日）
- 13) 毎日新聞（2012年1月29日、17面、「外来種駆除の新方法に期待」）
- 14) しんぶん赤旗（2012年1月30日、全国版、「科学：セイタカアワダチソウ、外来種アルミで駆除；在来種守る土壌改変技術を開発」）
- 15) 日本経済新聞（平成24年11月11日、全国版、17面、ナゾ謎かがく「外来植物、被災地の農地で増殖」肥料の大量投入に警鐘）
- 16) TBS（平成24年11月20日、Nスタ（16:53-17:55、ニュース番組）の中で、福島県原発事故現場付近にて蔓延しているセイタカアワダチソウの特集の中で、その原因についてコメントをしているインタビューが数分間放送された）

（6）その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) 平舘俊太郎：外来植物が好きな土、在来植物が好きな土．圃場と土壌 39(5), 30-38 (2007)．
- 2) 平舘俊太郎・森田沙綾香・楠本良延：土壌の化学的特性が外来植物と在来植物の住み分けに与える影響．農業技術 63(10), 469-474 (2008)．
- 3) 平舘俊太郎・森田沙綾香・楠本良延：外来植物と在来植物の住み分け：これからの植生制御に向けて．関東雑草研究会報、19, 23-33 (2008)．
- 4) M. SAIGUSA, S. SHOJI, T. TAKAHASHI: Plant root growth in acid Andosols from northeastern Japan: 2. exchange acidity Y1 as a realistic measure of aluminum toxicity potential. *Soil Science*, **130**, 242-250 (1980)．
- 5) SOIL NUTRIENTS ANALYSIS COMMITTEE. Exchange acidity. Soil Nutrients Analysis, Yokendo Co., Ltd., Tokyo. pp. 29-32 (1980)．

- 6) J. MURPHY, J.P. RILEY: A modified single solution method for determination of phosphate in natural waters. *Analitica Chimica Acta*, **27**, 31-36 (1962).

Evaluation of Adaptive Properties of Grassland Plants on Soil Environments and Development of Conservation Methods of Semi-natural Grassland Plants in Japan.

Principal Investigator: Syuntaro HIRADATE

Institution: National Institute for Agro-Environmental Sciences (NIAES)
 3-1-3 Kan-nondai, Tsukuba, Ibaraki 305-8604, JAPAN
 Tel: +81-29-838-8246 / Fax: +81-29-838-8199
 E-mail: hiradate@affrc.go.jp.

[Abstract]

Key Words: Plant nutritional properties, Semi-natural grassland, Soil acidity, Soil chemical properties, Soil phosphorous.

To conserve endemic herbaceous plants, relationships between plant distributions and soil chemical properties were studied on the basis of comprehensive field survey and laboratory chemical analyses investigating 1500 field plots in 14 region including more than 10,000 plants in Japan. It was clarified that each plant species has its favorable soil chemical properties for its distribution, e.g., many endemic plants common in semi-natural grasslands tend to distribute on oligotrophic soils having low phosphorous bioavailability and high soil acidity, and many invasive alien species distribute on eutrophic soils with high phosphorous bioavailability and low soil acidity. By investigating inorganic elemental compositions in the plants, plant nutrient characteristics were also clarified for many herbaceous species, and they seemed to closely relate with their distribution characteristics depending on soil chemical properties. These findings indicate that controlling vegetation would be attained by controlling soil chemical properties. Based on this idea, $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ was applied on surface of soils to reduce phosphorous bioavailability and strengthen soil acidity, and the effect on the vegetation was monitored. It was clarified that the application of $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ was effective in reducing invasive alien plants such as goldenrod (*Solidago altissima*) and increasing endemic plants such as cogon grass (*Imperata cylindrica*). Because this technique seemed effective in many places where invasive alien plants prevail in Japan, we applied this technique for the patent of Japan. A private company has been licensed to use this technique, and a collaborative research agreement has been concluded between us and the company for developing this technique. In this study, the effects of traditional managing activities on soil chemical properties were also evaluated to estimate the effectiveness of these activities in controlling vegetation through controlling soil chemical properties. It

was clarified that mowing and removing the plant materials from grasslands was effective in removing soil nutrients and acidifying soils than burning or grazing, although it would take several decades to recover semi-natural grasslands by this activity in the case of many fertilized grasslands. In this study, merit and demerit of the two methods, application of $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ and mowing and removing, were summarized so that people can choose the proper way for controlling soil chemical properties and vegetation. In this study, we also contribute many administrations by showing proper ways to control invasive alien plants and to recover endemic plants based on the results obtained in the present study.

課題番号：D-1001

課題名：野草類の土壌環境に対する生育適性の評価と 再生技術の開発

研究代表機関名：独立行政法人農業環境技術研究所



ミツバツチグリ



ススキ



オミナエシ

貧栄養的な
環境が得意

- 刈り取りや野焼きだけで管理されてきた環境
- 土壌環境が従来の性質のまま保たれた環境

在来野草類

- 土壌にリン栄養が少なくてもOK！
- 植物体内にリン栄養が少なくてもOK！
- 土壌の酸性が強くても大丈夫！

本研究課題により

1. 植物が分布する土壌環境が解明され
2. 土壌環境制御による植生制御技術が開発されました

塩化アルミニウム資材の投入(即効的)や
刈取りによる管理(緩効的)が有効です

外来植物

富栄養的な
環境が得意

- 肥料成分が混入した環境
- 石灰資材が混入した環境
- 土壌表面がかく乱された環境



セイタカアワダチソウ

- 土壌にリン栄養がたっぷり必要
- 植物体内にリン栄養がたっぷり必要
- 土壌の酸性が弱い場所で蔓延