

Eco-nutritional study on diverse terrestrial plants

（陸生植物に関する栄養生態学的研究）

学位論文内容の要旨

植物葉の無機元素含有率は、植物の生態学的な適応機構を知る上で極めて重要である。また、今後地球温暖化に伴う環境変動による環境攪乱が頻発すると考えられ、環境修復を適切に行うためにも植物葉の無機元素についての栄養生態学的知見は不可欠である。しかし、これまで植物葉の無機元素集積特性については莫大な研究がなされているものの、個別種か個別地域の研究にほぼ限定されているため、無機元素集積特性を総括的に議論することは不可能であった。特に、無機元素集積の進化的傾向、地域（土壌）特異性、無機元素集積の相互作用については、ほとんど不明のままである。そこで、植物種全般について、葉での無機元素集積特性を、生理学的、進化学的、生態学的に解明するために、熱帯および温帯の各種生態系に生育する様々な植物の葉の元素含有率を測定し、さらに、文献検索により得られた莫大な元素含有率データも加え、1,625 種を含む 4,831 サンプルのデータベースを構築し、これを解析することにより以下の結果を得た。

1. 40 元素集積の相互関係

40 元素相互の各種の相関関係表に基づき、集積傾向が同一のものをグループ化すると、グループ 1 : Na（アルカリ金属）、Mg、Ca（アルカリ土類金属）、Cl、Br（ハロゲン族）とグループ 2 : Lu、La、Ce、Sm、Tb、Dy、Yb（ランタニドグループ）に明確に区分された。なお、Lu はランタニドではないが、周期律表では近接した位置にあり、ランタニド系の元素と類似していると考えられる。これら元素はグループ内では、相互元素間のバランスがとられながら集積しており、集積もしくは排除の機構が極めて類似した元素であった。

2. 元素集積の進化的傾向

日本で生育する植物の元素集積の進化的傾向を調べたところ、1) Caryophyllales（ナデシコ目）でアルカリ金属およびアルカリ土類金属の Na、K、Rb、Cs、Mg、VB および VIB 族の As、Se、Sb、

重金属の Fe、Cu、Cr、Ag、Hg およびハロゲン族の Cl、Br を多く集積する傾向が認められ、2) 原始的植物である Pteridophytes (シダ類) はランタニド (La、Ce、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Yb) の集積が顕著であるが、周期律表でランタニド類に隣接する Ba、Cs や Lu、Sc の集積も多く、さらに他の金属元素の Al、Cr、Fe、Ni、Cu、Au、Hg も集積した。シダ類ではランタニドの集積が明確で、進化と共にこれら元素の集積は低下した。一方、ナデシコ目は、前後の目の進化的傾向と関係なく、アルカリ金属、アルカリ土類金属およびハロゲン族を多量に集積する傾向が顕著であり、なぜこのような集積機構を獲得したのかという問題の解明は、今後養分吸収機構を解明する上で極めて重要である。

3. 地域・土壌特異性

温帯・熱帯の各種気候、各種土壌条件に生育する植物葉の 12 元素について解析した。すべての元素分析データより、主成分分析を行った結果、第一主成分は Si、第二主成分は Al となり、各地域ごとに同様の分析を行ったところ、第三主成分として Na が抽出される場合もあった。これら 3 元素は必須元素ではないが、植物種によっては生育に有効な元素である場合もあり、またこれらを特異的に集積する集積植物が存在する。Al 含有率は Ericales (ツツジ目) の Symplocaceae と Diapensiaceae で高かった。Ericales は Gentianales (リンドウ目) と Myrtales (フトモモ目) に次いで、三番目に Al 集積植物の多い目として知られている。Caryophyllales では Al だけではなく Si も多く集積する植物が存在し、特に Chenopodiaceae と Plumbaginaceae で顕著であった。このことは、これらの Al 集積植物種が体内で Al と Si の複合体を形成することにより Al 毒性を軽減している可能性を示唆する。

熱帯と温帯の植物を目ごとに分類し、各種の多量元素含有率について熱帯と温帯の同一目同士で相関を求めたところ、N、P、K は温帯で集積が多く、土壌肥沃度との関係が強いと推定された。Ca、Mg は温帯、熱帯にかかわらず一定であり、地域の影響が小さく、目ごとに生理的集積能が強く作用していると考えられ、したがって適量の Ca、Mg が供給されない土壌では生育が困難な植物目が存在する。

本研究の結果から様々な陸生植物種の栄養生態学的に重要な情報が得られた。本研究により自然生態系における植物の元素集積は、種特異的な性質が第一因子であることが明らかにされた。元素集積特性として、1) 地域の影響を受けにくく植物特性に応じて集積する Ca、Mg、2) 元素集積相互関係から判断して、類似の集積をするグループ 1 : Na、Mg、Ca、Cl、Br とグループ 2 : Lu、La、Ce、

Sm、Tb、Dy、Yb、3) 土壤条件に応じて著しい集積変動があり、集積植物が認められる Si、Al、Na が明らかにされた。また、各種の元素を多量に集積する傾向のある目として、Caryophyllales (ナデシコ目) (主にアルカリ金属・アルカリ土類金属とハロゲン族)、Pteridophytes (シダ類) (ランタニドとランタニド近接元素) が際立っていた。以上の研究により、これまで不明であった各種元素の進化的および生態的集積能が初めて明らかとなった。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 大 崎 満
副 査 教 授 波多野 隆 介
副 査 教 授 小 池 孝 良
副 査 教 授 山 口 淳 一
副 査 助 教 授 信 濃 卓 郎

学 位 論 文 題 名

Eco-nutritional study on diverse terrestrial plants

(陸生植物に関する栄養生態学的研究)

本研究は、図 45、表 12 を含む 241 ページの英文論文で、引用文献 155 を含み、6 章から構成されている。他に、参考論文が 4 編添えられている。

近年、個々の植物種における無機元素の重要な役割が明らかにされつつあり、特に葉の元素含有率から、葉の光合成あるいは生長力や養分利用効率のような生理生態学的情報を得ることができる。それゆえ、植物葉の無機元素含有率は、植物の生態学的な適応機構を知る上で極めて重要である。また、今後地球温暖化に伴う環境変動による環境攪乱が頻発すると考えられ、環境修復を適切に行うためにも植物葉の無機元素についての栄養生態学的知見は不可欠である。しかし、これまで植物葉の無機元素集積特性については莫大な研究がなされているものの、個別種か個別地域の研究にはほぼ限定されているため、無機元素集積特性を総括的に議論することは不可能であった。特に、無機元素集積の進化的傾向、地域（土壌）特異性、無機元素集積の相互作用については、ほとんど不明のままである。そこで、植物種全般について、葉での無機元素集積特性を、生理学的、進化学的、生態学的に解明するために、熱帯および温帯の各種生態系に生育する様々な植物の葉の元素含有率を測定し、さらに、文献検索により得られた莫大な元素含有率データも加え、1,625 種を含む 4,831 サンプルのデータベースを構築し、これを解析することにより以下の結果を得た。

1. 40 元素集積の相互関係

40 元素相互の各種の相関関係表に基づき、集積傾向が同一のものをグループ化すると、グループ 1: Na (アルカリ金属)、Mg、Ca (アルカリ土類金属)、Cl、Br (ハロゲン族) とグループ 2: Lu、La、Ce、Sm、Tb、Dy、Yb (ランタニドグループ) に明確に区分された。なお、Lu はランタニドではないが、周期律表では近接した位置にあり、ランタニド系の元素と類似していると考えられる。これら元素はグループ内では、元素が相互にバランスがとりながら集積しており、植物種における集積もしくは排除の機構が極めて類似していると考えられた。

2. 元素集積の進化的傾向

日本で生育する植物の 40 元素集積の進化的傾向を調べたところ、1) **Caryophyllales** (ナデシコ目) でアルカリ金属およびアルカリ土類金属の **Na**、**K**、**Rb**、**Cs**、**Mg**、非金属および半金属の **As**、**Se**、**Sb**、重金属の **Fe**、**Cu**、**Cr**、**Ag**、**Hg** およびハロゲン族の **Cl**、**Br** を多く集積する傾向が認められ、2) 原始的植物である **Pteridophytes** (シダ類) はランタニド (**La**、**Ce**、**Nd**、**Sm**、**Eu**、**Gd**、**Tb**、**Dy**、**Yb**) の集積が顕著であるが、周期律表でランタニド類に隣接する **Ba**、**Cs** や **Lu**、**Sc** の集積も多く、さらに他の金属元素の **Al**、**Cr**、**Fe**、**Ni**、**Cu**、**Au**、**Hg** も集積した。シダ類ではランタニドの集積が明確で、進化と共にこれら元素の集積は低下した。一方、ナデシコ目は、前後の目の進化的傾向と関係なく、アルカリ金属、アルカリ土類金属およびハロゲン族を多量に集積する傾向が顕著であり、なぜこのような集積機構を獲得したのかという問題の解明は、今後、養分吸収機構を解明する上で極めて重要である。

3. 地域・土壌特異性

温帯・熱帯の各種気候、各種土壌条件に生育する植物葉の主要 12 元素について解析した。すべての元素分析データより主成分分析を行った結果、**Al** や **Si**、および **Na** (熱帯泥炭湿地林やヒース林の場合) といった変数が抽出された成分に寄与していた。この結果から **Al**、**Si**、および **Na** は他の元素と特異的な相互関係を持つことが示された。これらの元素は植物にとって必須ではないが、植物種によっては生育が促進される場合があり、これらの元素を多く集積する植物も存在する。**Al** 含有率は **Ericales** (ツツジ目) の **Symplocaceae** と **Diapensiaceae** で特に高かった。**Ericales** は **Gentianales** (リンドウ目) と **Myrtales** (フトモモ目) に次いで、三番目に **Al** 集積植物の多い目として知られている。**Caryophyllales** では **Al** だけではなく **Si** も多く集積する植物が存在し、特に **Chenopodiaceae** と **Plumbaginaceae** で顕著であった。このことは、これらの **Al** 集積植物種が体内で **Al** と **Si** の複合体を形成することにより **Al** 毒性を軽減している可能性を示唆する。

熱帯と温帯の植物を目ごとに分類し、各種の多量元素含有率について熱帯と温帯の同一目同士で相関を求めたところ、**N**、**P**、**K** は温帯で集積が多く、土壌肥沃度との関係が強いと推定された。**Ca**、**Mg** は温帯、熱帯にかかわらず一定であり、地域の影響が小さく、目ごとに生理的集積能が強くと作用していると考えられ、したがって適量の **Ca**、**Mg** が供給されない土壌では生育が困難な植物目が存在する。**Al** は熱帯で集積が多く、土壌の酸性化と関係が深いと考えられた。

本研究の結果から様々な陸生植物種の栄養生態学的に重要な情報が得られた。本研究により自然生態系における植物の元素集積は、種特異的な性質が第一因子であることが明らかにされた。元素集積特性として、1) 地域の影響を受けにくく植物特性に応じて集積する **Ca**、**Mg**、2) 元素集積相互関係から判断して、類似の集積をする元素 (グループ 1 : **Na**、**Mg**、**Ca**、**Cl**、**Br** とグループ 2 : **Lu**、**La**、**Ce**、**Sm**、**Tb**、**Dy**、**Yb**)、3) 土壌条件に応じて著しい集積変動があり、集積植物が認められる **Si**、**Al**、**Na** が明らかにされた。また、各種の元素を多量に集積する傾向のある目として、**Caryophyllales** (ナデシコ目) (主にアルカリ金属・アルカリ土類金属とハロゲン族)、**Pteridophytes** (シダ類) (ランタニドとランタニド近接元素) が際立っていた。以上の研究により、これまで不明であった各種元素の集積能に関して、進化的および生態的特性が初めて明らかとなった。

以上の研究により、これまで不明であった各種元素の進化的および生態的集積能が初めて明らかとなった。これらの知見は学術的に高く評価されるとともに、破壊された生態系の修復のために極めて有益な情報を提供するものである。よって審査員一同は、セハット・ジャヤ・トゥアーが博士（農学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認めた。