学位論文題名

Environmental monitoring of metal pollution in aquatic and terrestrial environment in the Republic of Zambia

(ザンビア共和国の水圏・陸圏における金属汚染の環境モニタリング)

学位論文内容の要旨

アフリカ諸国では、近年の急速な資源開発などによる経済成長が著しいが、一方でそれに伴う環境汚染問題が顕在化しつつある。残留性有機汚染物質 (POPs) や多環芳香族炭化水素 (PAHs) とともに、金属は重要な環境汚染物質の一つであり、特に鉱床活動に由来する大気、水、土壌汚染を介してのヒトや家畜、野生動物に対する金属汚染の影響が懸念されている。アフリカ諸国の中でも、ザンビア共和国は銅、コバルト、亜鉛、鉛などの地下資源が豊富であり、鉱床活動はザンビアの中でも特に重要な主幹産業である。環境中に放出された金属は水圏や土壌中に蓄積し、長期的な汚染源となるため、ザンビアにおいても鉱床活動に由来した金属汚染が懸念されるが、具体的な科学的データは非常に少ないのが現状である。

そこで、本研究ではザンビアにおける水圏・陸圏の両方に注目し、汚染源、汚染の拡大様式、および汚染による生物への生体影響を明らかにすることを目的とした。

第1章では、ザンビア広域の土壌および河川と湖の底質 (底泥) に注目し、ザンビアにおける金属汚染の特徴を明らかにした。ザンビアの経済活動から予想されたように、主な汚染源は鉱床活動であり、広大な鉱床があるカブエおよびコッパーベルト地域の土壌からは高濃度の金属が検出された。一方、都市部においては工業や有鉛ガソリンなどの人間活動による汚染の可能性も考えられた。さらに、鉱床の下流にあるイテジテジ湖では、基準値を超える銅濃度が底質から検出され、コッパーベルト地域の銅鉱床由来の汚染が、河川を通じて450 kmも下流にあるカフエ国立公園内のイテジテジ湖にまで及んでいることが示唆された。

そこで第2章では、水圏における金属汚染を詳細に明らかにするため、ザンビアにおいても広く分布している魚類 (オレオクロミス) をはじめとする広範囲の水棲生物種における重金属の蓄積について、コッパーベルト地域の下流域にあるカフエ国立公園内のイテジテジ湖とザンベジ川の下流にあるカリバ湖において比較することで、汚染源から派生する他地域への影響について初めて明らかにした。イテジテジ湖における底質およびオレオクロミスの肝臓には、カリバ湖に比較して有意に高濃度の銅が蓄積しており、コッパーベルト地域での鉱床活動による汚染が、下流の湖に生息する魚類にまで及んでいることが考えられた。一方、カリバ湖においてはクロムやニッケル、鉛の蓄積濃度がイテジテジ湖の魚類およびザリガニよりも高く、漁業で使用される有鉛ガソリンや腐食防止剤に含まれる重金属が汚染の原因であると考えられた。

さらに第3章では、イテジテジ湖における銅汚染がコッパーベルト地域由来であることを明らかにすること、またオレオクロミスにおける高濃度の銅蓄積と食性の関係を明らかにすることを目的とした。地理情報システム（GIS）解析を用いた底質における銅濃度の水平分布の結果から、湖の北部において基準値を超える高濃度の銅が蓄積していることが明らかになり、汚染がコッパーベルト地域の鉱床活動由来であることが示唆された。食性の異なる7種の魚類における肝臓中の銅濃度を測定したところ、第2章の結果を支持するようにオレオクロミスの肝臓において有意に高濃度の銅が蓄積していた。一方、魚類の胃内容物の銅濃度に種差は無く、オレオクロミスの高濃度の銅蓄積には食性以外の原因が考えられた。そこで、オレオクロミスとメダカを用いた実験室内での銅暴露試験を行ったところ、オレオクロミスは暴露の有無に関係なく、常にメダカよりも高濃度に銅を蓄積しており、オレオクロミスは生理的条件下において高濃度の銅を蓄積していることが考えられた。

第4章では、カブエ鉱床地域において、陸圏の環境および生物サンプルとして土壌および野生ラットに注目して金属汚染の状況を調べた。カブエの土壌中からは鉛、亜鉛に加えて、高濃度の銅、カドミウムおよびヒ素が検出された。GIS解析の結果、これらの金属は鉱床を中心に拡散しており、鉱床活動による汚染であることが分かった。また、カブエの野生ラットの肝臓、腎臓中の鉛濃度は、ルサカ（対照地域）のラットよりも高濃度であり、土壌の金属汚染が陸圏の野生ラットにも及んでいることが明らかになった。

さらに第5章では、カブエに加えてコッパーベルト地域のチンゴラにおける土壌、野生ラットの金属蓄積濃度を測定した。土壌中において高濃度の金属が検出されたのに加えて、鉱床地域に生息する野生ラットの肝臓および腎臓には、対照地域であるルサカのラットに比べて有意に高濃度の銅、コバルト、鉛、カドミウムの蓄積が見られた。これらの金属蓄積濃度は毒性学的な影響を及ぼすレベルではなかったものの、肝臓、腎臓において金属解毒酵素であるメタロチオネインの有意な上昇が見られ、野生ラットに対して生化学的反応を引き起こすほどの金属が蓄積していることが明らかになった。また、これまで殆ど情報が無いクロム暴露の生物学的指標としてヘムオキシゲナーゼ1（HO-1）が有用であることが示唆された。

最後に第6章では、水圏と陸圏の両方を生息域とする野生のカバにおける金属蓄積の特徴を明らかにした。第1章において非汚染地域と考えられたサウスルアングワ国立公園に生息するカバの肝臓に加えて、国立公園内の土壌、河川底質およびカバの食料源である陸上植物の金属蓄積濃度を測定した。カバの肝臓におけるカドミウムおよび水銀濃度は、環境サンプルや植物よりも有意に高濃度であった。従って、水圏・陸圏のいずれか一方でも、カバの生息環境が水銀やカドミウムなどの毒性金属によって汚染されると、生物濃縮によりカバに金属汚染の影響を及ぼす可能性が示された。

以上のように、本研究ではザンビアにおける水圏・陸圏の金属汚染の現状を明らかにした。本研究結果から、ザンビアでは主に鉱床活動に由来する金属汚染が環境サンプルに加えて、生息する野生動物に対しても起こっていることが示唆された。本研究成果は、ザンビアにおける金属汚染の対策を講じる上で非常に有用な科学的データを提供すると考えられる。

学位論文審査の要旨

主査	教授	石塚	真由美
副査	教授	梅村	孝司
副査	教授	坪田	敏男
副査	講師	池中	良徳

学位論文題名

Environmental monitoring of metal pollution in aquatic and terrestrial environment in the Republic of Zambia

(ザンビア共和国の水圏・陸圏における金属汚染の環境モニタリング)

アフリカ諸国では、近年の急速な資源開発などによる経済成長が著しいが、一方でそれに伴う環境汚染問題が顕在化しつつある。残留性有機汚染物質 (POPs) や多環芳香族炭化水素類 (PAHs) とともに、金属は重要な環境汚染物質の一つであり、特に鉱床活動に由来する大気、水、土壌汚染を介してのヒトや家畜、野生動物に対する金属汚染の影響が懸念されている。アフリカ諸国の中でも、ザンビア共和国は銅、コバルト、亜鉛、鉛などの地下資源が豊富であり、鉱床活動はザンビアの中でも特に重要な主幹産業である。環境中に放出された金属は水圏や土壌中に蓄積し、長期的な汚染源となるため、ザンビアにおいても鉱床活動に由来した金属汚染が懸念されるが、具体的な科学的データは非常に少ない。そこで、中山翔太氏は、ザンビアにおける水圏・陸圏の両方に注目し、金属を中心に、その汚染源、汚染の拡大様式、および汚染による生物への生体影響を明らかにすることを目的として本研究を行った。

第1章では、ザンビア広域の土壌および河川と湖の底質 (底泥) に注目し、ザンビアにおける金属汚染の特徴を明らかにした。ザンビアの経済活動から予想されたように、主な汚染源は鉱床活動であり、広大な鉱床があるカブエおよびコッパーベルト地域の土壌からは高濃度の金属が検出された。さらに、鉱床の下流にあるイテジテジ湖では、基準値を超える銅濃度が底質から検出され、コッパーベルト地域の銅鉱床由来の汚染が、河川を通じて450 kmも下流にあるカフエ国立公園内のイテジテジ湖にまで及んでいることが示唆された。

そこで第2章では、水圏における金属汚染を詳細に明らかにするため、ザンビアにおいても広く分布している魚類 (オレオクロミス) をはじめとする広範囲の水棲生物種における金属の蓄積について、コッパーベルト地域の下流域にあるカフエ国立公園内のイテジテジ湖とザンベジ川の下流にあるカリバ湖において比較することで、汚染源から派生する他地域への影響について初めて明らかにした。イテジテジ湖における底質およびオレオクロミスの肝臓には、カリバ湖に比較して有意に高濃度の銅が蓄積しており、コッパーベルト地域での鉱床活動による汚染が、下流の湖に生息する魚類にまで及んでいることが考えられた。

さらに第3章では、イテジテジ湖における銅汚染がコッパーベルト地域由来であることを明らかにする

こと、またオレオクロミスにおける高濃度の銅蓄積と食性の関係を明らかにすることを目的とした。地理情報システム(GIS)解析を用いた底質における銅濃度の水平分布の結果から、湖の北部において基準値を超える高濃度の銅が蓄積していることが明らかになり、汚染がコッパーベルト地域の鉱床活動由来であることが示唆された。食性の異なる7種の魚類における肝臓中の銅濃度を測定したところ、第2章の結果を支持するようにオレオクロミスの肝臓において有意に高濃度の銅が蓄積していた。一方、魚類の胃内容物の銅濃度に種差は無く、オレオクロミスの高濃度の銅蓄積には食性以外の原因が考えられた。そこで、オレオクロミスとメダカを用いた実験室内での銅暴露試験を行ったところ、オレオクロミスは暴露の有無に関係なく、常にメダカよりも高濃度に銅を蓄積しており、オレオクロミスは生理的条件下において高濃度の銅を蓄積していることが考えられた。

第4章では、カブエ鉱床地域において、陸圏の環境および生物サンプルとして土壌および野生ラット(*Rattus*属)に注目して金属汚染の状況を調べた。カブエの土壌中からは鉛、亜鉛に加えて、高濃度の銅、カドミウムおよびヒ素が検出された。GIS解析の結果、これらの金属は鉱床を中心に拡散しており、鉱床活動による汚染であることが分かった。また、カブエの野生ラットの肝臓、腎臓中の鉛濃度は、ルサカ(対照地域)のラットよりも高濃度であり、土壌の金属汚染が陸圏の野生ラットにも及んでいることが明らかになった。

さらに第5章では、カブエに加えてコッパーベルト地域のチンゴラにおける土壌、野生ラットの金属蓄積濃度を測定した。土壌中において高濃度の金属が検出されたのに加えて、鉱床地域に生息する野生ラットの肝臓および腎臓には、対照地域であるルサカのラットに比べて有意に高濃度の銅、コバルト、鉛、カドミウムの蓄積が見られた。これらの金属蓄積濃度は毒性学的な影響を及ぼすレベルではなかったものの、肝臓、腎臓において金属結合タンパク質であるメタロチオネインの有意な上昇が見られ、野生ラットに対して生化学的反応を引き起こすほどの金属が蓄積していることが明らかになった。また、これまで殆ど情報がないクロム暴露の生物学的指標としてヘムオキシゲナーゼ1(HO-1)が有用であることが示唆された。

最後に第6章では、水圏と陸圏の両方を生息域とする野生のカバにおける金属蓄積の特徴を明らかにした。第1章において非汚染地域と考えられたサウスルアングワ国立公園に生息するカバの肝臓に加えて、国立公園内の土壌、河川底質およびカバの食料源である陸上植物の金属蓄積濃度を測定した。カバの肝臓におけるカドミウムおよび水銀濃度は、環境サンプルや植物よりも有意に高濃度であった。従って、水圏・陸圏のいずれか一方でも、カバの生息環境が水銀やカドミウムなどの毒性金属によって汚染されると、生物濃縮によりカバに金属汚染の影響を及ぼす可能性が示された。

以上の結果から、中山翔太氏は、ザンビアにおける水圏・陸圏の金属汚染の現状を明らかにし、主に鉱床活動に由来する金属汚染が生息する野生動物に対して影響を及ぼしていることを示した。本研究成果は、ザンビアにおける金属汚染の対策を講じる上で非常に有用な科学的データを提供し、また、アフリカ諸国で現在進行している環境汚染の解析モデルとして基礎データとなると考えられる。よって、審査員一同は、上記学位論文提出者中山翔太氏の博士論文は、北海道大学大学院獣医学研究科規程第6条による本研究科の行う博士論文の審査等に合格と認めた。