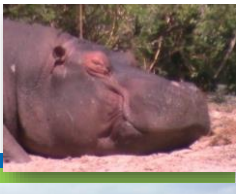
地球規模課題対応
国際科学技術協力プログラム

ザンビアにおける鉛汚染のメカニズムの解明と健康・経済リスク評価手法および予防・修復技術の開発

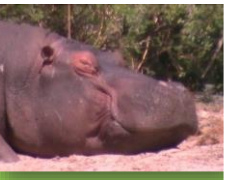
北海道大学・大学院獣医学研究科　石塚真由美

アフリカ諸国の環境汚染の現状①



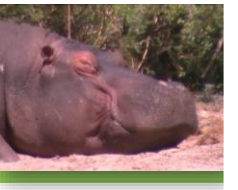
アフリカでは現在急激な開発が進められている。その一方で、有害金属の汚染、オイル、農薬など、環境化学物質の中毒による家畜や野生動物の集団死が頻発している。

アフリカ諸国の
環境汚染の現状②



各国政府は、開発と環境保全の共存を国策として掲げているが、しかしながら実質ペーパーワークにとどまっている国も多い。

特に鉛汚染は…



Massive Childhood Lead Poisoning
The Price of Nigerian Gold

Childhood lead poisoning on a scale unheard of for decades has been detected in rural northwestern Nigeria [*EHP* 120(4):601–607: Dooyema et al.]. The culprit: lead in gold ore processed using artisanal techniques. Chelation therapy for hundreds of children, soil replacement, and an education campaign to discourage processing ore inside homes may now have radically reduced child mortality in the hardest-hit villages, but the long-term effect of lead poisoning on the surviving children remains to be seen.

The outbreak surfaced in the spring of 2010 when health professionals noticed abnormally high rates of child illness and death among young children in 4 villages of Zamfara State. Blood tests on 8 children returned blood lead levels (BLLs) of 168–370 mg/dL, at least 16 times the level of concern set by the U.S. Centers for Disease Control and Prevention (CDC). The Nigerian authorities quickly assembled an international team to identify the source of the exposure and to respond, focusing on the 2 worst-affected villages.

Blood samples were collected from 59% of children under age 5. Of these, 97% had BLLs of at least 45 mg/dL, the threshold at which the CDC recommends chelation therapy. The BLLs of 85% surpassed the portable sampling devices' maximum detection limit of 65 mg/dL.

A survey of the villagers revealed that 25% of all children under age 5 had died in the previous year, most of them in the half-year before the study. This translates to a mortality rate of 255/1,000 live births, compared with a national average of 157/1,000. The problem was the lead-contaminated gold ore being processed in many of the family compounds. Two-thirds of these families had started the activity within the last year.

Soil samples were collected from nearly all the family compounds where processing occurred, with 89% showing heavy lead contamination. The worst reached 250 times the U.S. Environmental Protection Agency safety limit of 400 ppm for play areas. Similarly, water lead concentrations far exceeded U.S. recommendations.

Not every child's blood could be tested, and a lack of medical data for the deceased meant their deaths could not be definitively linked to lead poisoning. Further, the locally recruited survey staff had limited training in administering questionnaires and collecting environmental samples, which may have affected the results. Nonetheless, the evidence clearly suggests these villages were hit by lead poisoning due to artisanal processing of contaminated gold ore.

A child awaits treatment for lead poisoning in 2010. Nearly all children tested in the worst-affected villages had blood lead levels high enough to warrant chelation therapy.

Adrian Burton is a biologist living in Spain who also writes regularly for *The Lancet Oncology*, *The Lancet Neurology*, and *Frontiers in Ecology and the Environment*.

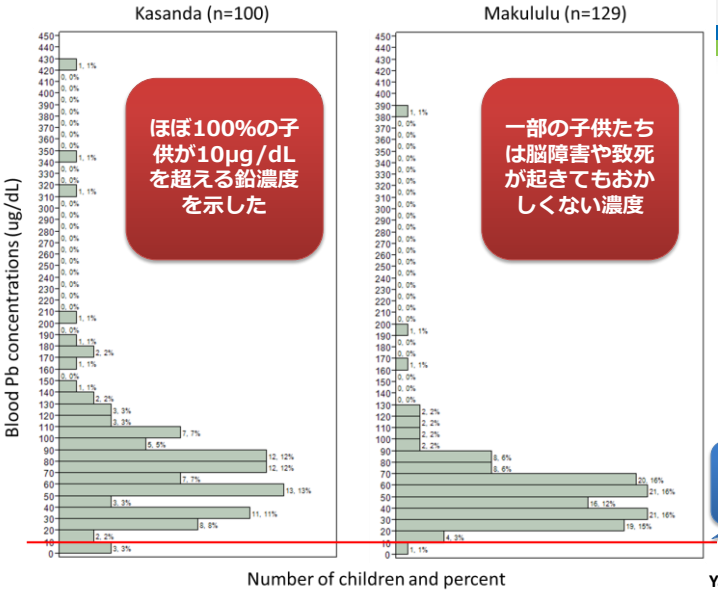
- アフリカでは金属汚染は最も懸念すべき環境汚染の一つ。
- 2010年、ナイジェリアでは鉛中毒で400人以上の子供が死亡、1万人以上が治療を受けている。
- ケニアのダンピングサイトで高濃度の鉛汚染を報告。

- ザンビアのカブウェ地域はBlacksmithにより世界で最も汚染された10の地域の一つにあげられている。

- WHO
  - 「鉛の子供に対する安全レベルは分かっていない」
- これまでの常識
  - ヒトでは、血中濃度50～300μg/dLで運動・認知機能障害
  - 300μg/dL では、臨床上明瞭な脳症の症状
- 一般に血中10μg/dLを基準としている。

→　ザンビアの状況は…？

ザンビアKabwe地域の子供の血中鉛濃度



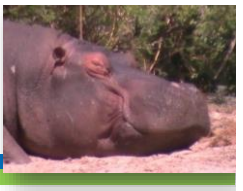
ザンビアの子供たちの血中濃度は毒性発現レベルをはるかに超えている

Yabe et al .2015 Chemosphere

プロジェクトの内容

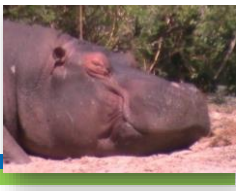
1. 土壌から生態系・人・動物への汚染メカニズムの解明
2. 鉱床地域の子供における有害金属汚染へのフォロアップスタディ
3. オンデマンドの環境修復技術の開発と評価

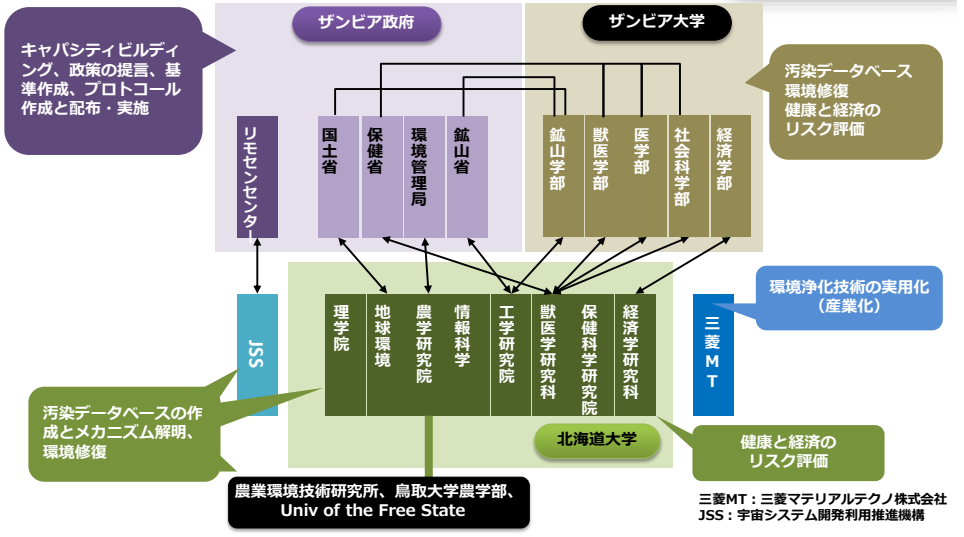
プロジェクトの概要



研究グループ	研究内容	アウトプット （新規開発と社会実装）
土壌から生態系・人・動物への汚染メカニズムの解明 1	土壌環境の総合的評価 広域調査（リモートセンシング、地上） 土壌中鉛の移動性検証と鉛の動物および人への移行	モニタリングラボの設置 移行メカニズムの解明 汚染対策提言書の作成 人材育成 新たな植生指標 汚染拡散のシミュレーション 環境局 国土省 鉱山省 リモセンセンター
鉱床地域の子供における有害金属汚染へのフォロアップスタディ 2	鉛によるハザードのリスクアセスメント 鉛によるハザードの経済アセスメント	鉛の毒性メカニズムの解明 新たなクライテリア 専門家養成 慢性中毒のセラピープロトコール 保健省
オンデマンドの環境修復技術の開発と評価 3	フィジカルレメディエーション ケミカルレメディエーション バイオレメディエーションおよび ファイトレメディエーション	土壌の新たな環境修復技術 三菱マテリアルテクノ 実用化（製品化）

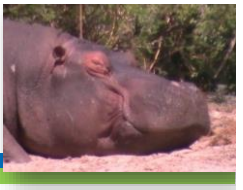
プロジェクト組織全体像





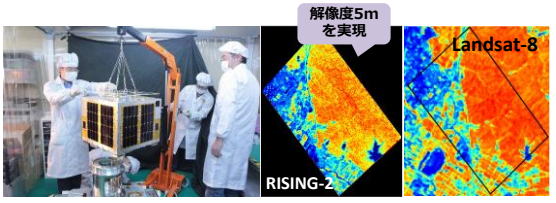
①土壌から生態系・人・動物への汚染メカニズムの解明

1-1 土壌環境の総合的評価



- 北海道大学が開発した世界最高精度のハイパースペクトルイメージャーなど先端的リモートセンシング装置を地上踏査で使用
- 無人飛行機などの飛翔体に搭載し、露頭鉱物や露出した汚染物質の検出、植生を高精度で計測
  - 汚染地域の植生の健全性や成長速度、土壌水分量、pHを広域で解析する。
  - 観測データと、既存の衛星スペクトル画像や、同種のリモートセンシング計測器を搭載した超小型衛星（北海道大学がセンサー開発）のデータを統合的に解析し、汚染実態とその時間変動を解明する。

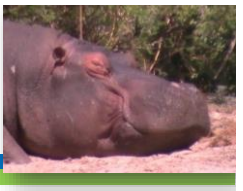
廉価リモートセンシングの実現と応用
植生指標データの改訂
重金属汚染の新たな指標と他地域への応用方法の確立



UNZA鉱山 | リモセンセンター | 国土省・鉱山省 | 環境管理局
北大理学部 | JSS | 北大農学 | 北大工学

①土壌から生態系・人・動物への汚染メカニズムの解明

1-2 土壌中鉛の移動性検証と鉛の動物および人への移行
1-3 汚染拡散のシミュレーション



ミクロ

- 土壌有機物の主要成分の鉛イオンに対する吸着能を求め、移動性を検証する。
  鉱山周辺に生息する植物を用いた土壌から植物への移行モデル実験を行う。

水、土壌、植物、家畜類など、各要素における鉛濃度（全濃度および溶出濃度）や鉛の移行率などを個々に定量化し、人や動物への移行経路や各々の寄与率を産出する。

UNZA鉱山 | 国土省・鉱山省 | 環境管理局
北大農学 | 鳥取大学農学部 | 農業環境技術研究所 | Univ of the Free State

マクロ

- 雨季における地上部・地下部の水の動き、加えて風や地形などのデータと鉛汚染データを融合させ、気象変化により汚染物質の動態変化をシミュレーションする。

気象データを取り入れた汚染拡散のシミュレーション法の確立により、他地域へも応用を図る。

UNZA鉱山 | 国土省・鉱山省 | 環境管理局 | リモセンセンター
北大農学 | 北大情報 | 北大工学 | Univ of the Free State | JSS

②鉱床地域の子供における有害金属汚染へのフォロアップスタディ

2-1 鉛によるハザードのリスクアセスメント

- 子供を中心に人の血液・尿・糞便・毛髪中の鉛濃度を測定する。5年後のフォロアップ率から500名以上を考慮。
- クエッショナリとともに主要アウトカムとしてIQ値などの計測を行い、鉛が知能指数に及ぼす影響の程度を明らかにする。
- ゲノムのメチル化・アセチル化など鉛の新たな毒性影響も分析する。
- セラピーおよびモニタリングの新たなプロトコールを作成する。ザンビア大学獣医学部・社会科学部・医学部、保健省、環境管理局と連携する。
- FS：セラピー確立後に介入試験も実施。

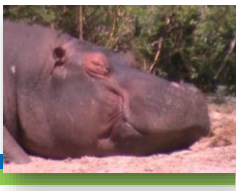
UNZA医学 / UNZA社会科学 / 保健省
北大獣医 / 北大保健 / UNZA獣医

2-2 鉛によるハザードの経済アセスメント

- 人および環境における健全性の損失による経済的なネガティブインパクトを推算する。
- カブウェ地域の子どもや家計調査（500を目標）のミクロ・データを利用して、医療費用や家畜被害、将来的な所得損失額を算出し、地域経済への影響を解明する。
- 環境修復の諸案に関する費用便益分析を行う。

UNZA経済 / UNZA社会科学 / 保健省
北大経済 / 三菱MT

②鉱床地域の子供における有害金属汚染へのフォロアップスタディ



鉛の慢性毒性は実はわかっていない。

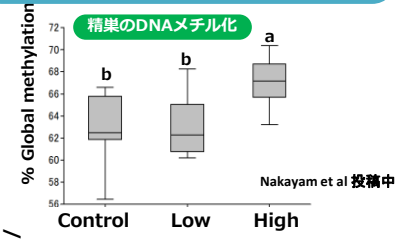
JECFA「健康影響をもたらすことのないPTWIを設定できない」

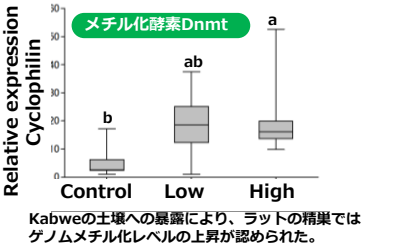
CDC「子どもの血中鉛濃度の削減目標10μg/dLをさらに下げることはしない」

何故？

- 毒性メカニズムが不明
- 特に高濃度曝露時のデータ不足
- 慢性曝露時のクライテリアとセラピー法ない
- 慢性曝露時の子供への影響濃度が不明

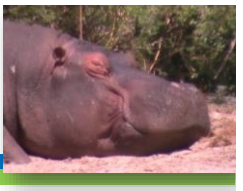
鉛の新たな毒性メカニズムも。





Kabweの土壌への暴露により、ラットの精巣ではゲノムメチル化レベルの上昇が認められた。

③オンデマンドの環境修復技術の開発と評価



3-1　フィジカルレメディエーション

従来の問題点

一般的にフィジカルレメディエーションは高価

- 汚染レベルの高い地域においては、汚染源からの鉛の拡散・漏洩を防止するための覆土・植栽などを行うとともに、汚染源そのものの崩壊や流出を防止する対策を行う。
- 試行的に実施した対策後の有害金属の環境中での挙動をモニタリング。
  - フィジカルレメディエーションのためのデータ収集
  - パイロットスタディにより経済アセスメント実施
  - 科学的自然減衰（MNA：Monitored Natural Attenuation）の検討

UNZA鉱山　国土省・鉱山省

北大工学　三菱MT

③オンデマンドの環境修復技術の開発と評価

3-2　ケミカルレメディエーション

従来の問題点

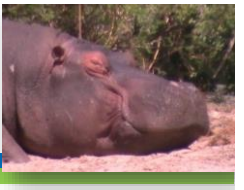
土壌のレメディエーションはほとんどが土壌の入れ替え、修復が成功している例は少ない。

- 化学物質を土壌に散布・混和し、土壌中の鉛動態を変化させる方法について研究。
- キレート剤を用いて土壌中の重金属イオンを除去するための土壌洗浄法やフラッシング法
- 汚染箇所を挟むようにして挿入した電極間に電位を印加し、重金属イオンを電気泳動により除去する動電界面的手法
- 汚染の程度や規模、周囲環境にも配慮しつつ、経済アセスメントによるコストも含めて最適な修復法を考案する。

UNZA鉱山　国土省・鉱山省　環境管理局

北大環境　三菱MT

③オンデマンドの環境修復技術の開発と評価



3-3　バイオレメディエーションおよびファイトレメディエーション

従来の問題点

フィールドで金属汚染土壌の修復が成功している例は少ない。

バイオ

- DNA/RNA直接抽出法を用いて、汚染地域で特異的な微生物を特定し、鉛汚染浄化への効果を検討する。
- 現地調達が可能な有機物・活性炭などを土壌に混和し、微生物の住処を提供し、活性化した微生物の鉛汚染緩和への有用性を調査する。

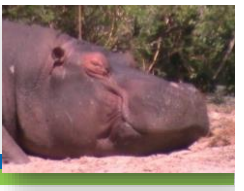
ファイト

- 植物の根の汚染物質吸収能を利用し、効果的な重金属除去法を解明する。降雨量の少ない気候などを踏まえ、ファイトレメディエーションに適した植物を特定する。
- 現地においてフィールドスタディを実施。

UNZA鉱山　国土省・鉱山省　環境管理局

北大農学　鳥取大学農学部　農業環境技術研究所　Univ of the Free State　三菱MT

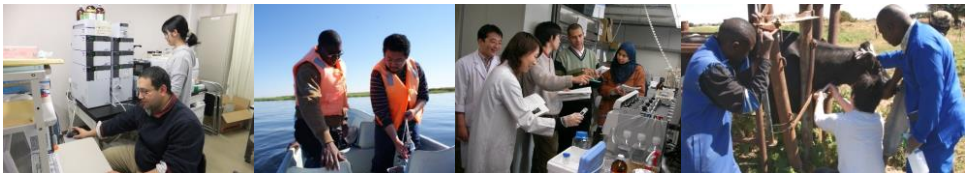
社会実装に向けた活動計画



ザンビアにおけるモニタリングラボの設置

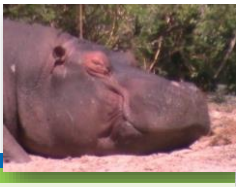
- 環境汚染のモニタリングラボをザンビア大学に設置し、人材育成を行う。
- ザンビアにおける環境汚染の典型的な原因物質である金属類を中心にモニタリング可能なラボを確立し、アフリカにおいて殆ど分析が行われていない生体試料の分析に特化したラボを設立する。
- このラボを効率よく運営するために、若手研究者らを集めたワークショップを開催し、ザンビアの研究者が独自に研究を行うことが出来るような教育活動を継続して行う。

ザンビア大学、鉱山省、国土省、環境管理局から要請



社会実装に向けた活動計画

環境汚染対策とプロトコールの作成・実施



鉱山省
国土省
リモセンセンター

環境汚染メカニズムのビジュアル化（汚染経路メカニズムの解明と定量化）を行うことで、どの汚染経路の遮断・防止がリスクの低減に最も効果があるか検証を行い、3年以内に提言書を作成する。

カブウエ地域のメカニズムをモデルとして、他地域にも応用し、ザンビアの操業鉱山のケミカルハザード防御のための調査対策プロトコールを作成する。

環境管理局

土壌基準値の見直しを行い、政府に提言する。

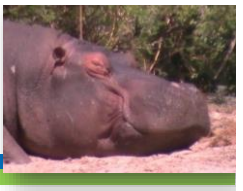
新たに作成したクライテリアやプロトコールのザンビア国内への配布を計画している。本プロトコールは、今後のアフリカの汚染対策に重要な位置づけとなる。

保健省

鉛汚染の毒性メカニズムを解明し、鉛の慢性暴露に関する新たな判断基準のクライテリア、およびセラピープロトコールを開発する。

社会実装に向けた活動計画

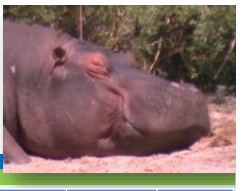
キャパシティビルディング/人材育成



要望内容	省庁
Department Headなどのマネージャースタッフの環境マネージメント・ガバナンス	鉱山省、国土省
テクニカルスタッフのモニタリング技術・環境修復技術	鉱山省、国土省、環境管理局
ケミカルハザードに関するリスクアセスメント	保健省
各省庁スタッフの衛星画像/GIS活用技術（2015年2月に開始）	鉱山省、国土省、環境管理局、保険省

- 特にデータ取得後、政策に結びつけるためのデータの解釈・分析について強い要望が出されており、ザンビアにおける研修はもちろん、北海道大学への招聘も行い、3か月-1年の短期研修により、ケミカルハザード対策に必要な人材を育成する。
- 幼児被暴を防ぐために女性・母親を主な教育対象としたコミュニティセミナーや、農業従事者を対象とした、ワークショップを行う。

スケジュール



研究題目	1年目	2年目	3年目	4年目	5年目
①土壌から生態系・人・動物への汚染メカニズムの解明					
1-1土壌環境の総合的評価 広域調査（リモートセンシング、地上） モニタリングラボの設置	ザンビアにおける広域汚染データベースの作成		モニタリングラボ設置・人材育成		
1-2土壌中鉛の移動性検証と鉛の動物および人への移行 毒性メカニズムの解明 汚染対策提言書の作成	鉛汚染メカニズム解明		汚染対策提言書作成		
1-3汚染拡散のシミュレーション シミュレーション結果提示			汚染拡散のシミュレーションの実施と結果の提示		
②鉱床地域の子供における有害金属汚染へのフォロアップスタディ					
2-1鉛によるハザードのリスクアセスメント 研究2-1と合わせた専門家養成	プロトコールの新規作成と国内への配布（保健省）		ケミカルハザード対策専門家の養成（保健省）		
2-2鉛によるハザードの経済アセスメント			経済アセスメントの実施	ケミカルハザードインパクトの経済アセスメント	
③オンデマンドの環境修復技術の開発と評価 研究1）と2）のデータ解析によるオンデマンド修復方針の決定 人財育成	データ収集およびリスクと経済アセスメントによる環境修復技術の選択			レメディエーションに関する人材育成の実施	
3-1フィジカルレメディエーション	フィジカルレメディエーションの実施と評価				
3-2ケミカルレメディエーション	ケミカルレメディエーションの実施と評価				
3-3バイオレメディエーションおよび ファイトレメディエーション			バイオ・ファイトレメディエーションの実施と評価		

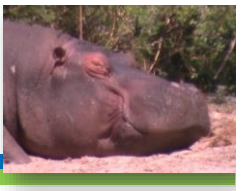
成果目標

汚染レベル、汚染源別に、汚染除去法を最適化し、健康リスク評価に基づく経済的効果を定量化する

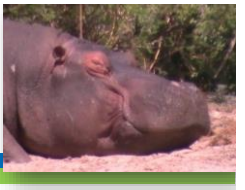
汚染メカニズム解明	健康・経済リスク評価	環境修復技術の開発
・汚染拡散シミュレーションの実施 ・汚染経路のカットオフによる提言書の作成と実施、検証 ・研修セミナーの実施	・プロトコールの配信と提言書の作成 ・毒性学専門家養成	・環境修復の試験的実施と有効性の評価（下記①～③で効果の高い方法を使用） ・研修の実施による人材育成
・土壌中の鉛動態・植物移行性調査 ・汚染メカニズムの解明 ・モニタリングラボの設置	環境汚染が社会にもたらすネガティブインパクトの経済アセスメント（健康リスク評価に基づく新規プロトコル）	汚染ランキングに基づいたオンデマンドの環境修復技術の開発 （①フィジカルレメディエーション、②ケミカルレメディエーション、③バイオ・ファイトレメディエーションの順に効果の評価を行う）
・汚染経路を特定し、汚染評価法を確立 （土・水・大気など汚染源を重要度別に分類，スペクトルによる低価格解析手法の開発と実施）	・子供を中心とした鉛暴露の健康リスク評価 ・慢性高濃度暴露のリスク評価方法の確立 ・新たなセラピープロトコルの作成	

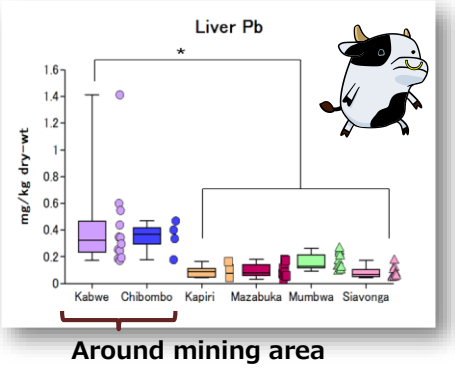
100%
80%
60%
40%
20%
0%

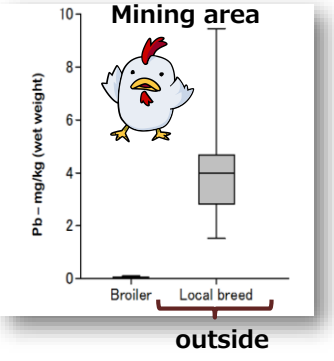
本提案までの準備状況



鉛の家畜への影響

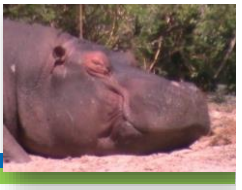






- 免疫異常を呈しているウシの個体群。
- ヒトの生活圏に比較的近いラット属で高濃度の鉛を蓄積する個体群で成長遅延を観察。
- ニワトリ等となる食源動物で高濃度の鉛を検出。

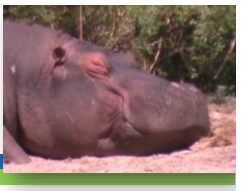
ザンビア大学や関係省庁との これまでの共同研究



- Yabe J et al. Lead poisoning in children from townships in the vicinity of a lead-zinc mine in Kabwe, Zambia. Chemosphere119:941-7 (2015)
- M'kandawire E et al. Molecular characterization and mRNA expression of cytochrome P450 1A1 and cytochrome P450 3A in liver of Kafue Lechwe (Kobus leche kafuensis) as potential biomarkers of pollution of the Kafue River basin, Zambia. Engineering 6:51-58 (2014)
- Nakayama SMM,et al. Accumulation and biological effects of metals in wild rats in mining areas of Zambia. Environmental Monitoring and Assessment 185:4907-4918 (2013)
- Yabe J et al. Metal distribution in tissues of free-range chickens near a lead-zinc mine in Kabwe, Zambia. Environ Toxicol Chem. 2013 Jan;32(1):189-192.
- Nakayama SMM, et al. GIS-based source estimation of Cu pollution in Lake Itezhi-tezhi and metal accumulation profiles in Oreochromis spp. from both field and laboratory studies. Arch Environ Contam Toxicol. 2013 Jan;64(1):119-129.
- Nakayama S.M.M, et al. Metal contaminated soil from mining area caused metal accumulation and biological responses in rats. JJVR, 61:S77-S79 (2013)
- Yabe J et al. Accumulation of metals in the liver and kidneys of cattle from agricultural areas in Lusaka, Zambia. J Vet Med Sci. 2012 Oct;74(10):1345-7.
- M'kandawire E, et al. The nucleotide sequence of metallothioneins (MT) in liver of the Kafue lechwe (Kobus leche kafuensis) and their potential as biomarkers of heavy metal pollution of the Kafue River. Gene. 2012 Sep 15;506(2):310-6.
- Ikenaka Y et al. Effects of environmental lead contamination on cattle in a lead/zinc mining area: changes in cattle immune systems on exposure to lead in vivo and in vitro. Environ Toxicol Chem. 2012 Oct;31(10):2300-5.
- Nakayama SMM, et al. Metal and metalloid levels and bio-accumulation characteristics in soil, sediment, land plants and hippopotami (Hippopotamus amphibius L) from the South Luangwa National Park, Zambia. Ecotoxicol Environ Saf. 2012 Jun;80:333-8.
- Yabe J et al. Uptake of lead, cadmium, and other metals in the liver and kidneys of cattle near a lead-zinc mine in Kabwe, Zambia. Environ Toxicol Chem. 2011 Aug;30(8):1892-7.
- Nakayama SMM et al. Metal and metalloid contamination in roadside soil and wild rats around a Pb-Zn mine in Kabwe, Zambia.Environmental Pollution 159 (2011) 175-18.
- Ikenaka Y, et al. Heavy metal contamination of soil and sediment in Zambia. African Journal of Environmental Science and Technology 4 2010（11）: 729-739.
- Yabe J, et al. Current levels of heavy metal pollution in Africa. J Vet Med Sci. 2010 Oct;72(10):1257-63.
- Nakayama MMS, et al. Heavy metal accumulation in lake sediments, fish (Oreochromis niloticus and Serranochromis thumbergi) and crayfish (Cherax quadricarinatus) in Lake Itezhi-tezhi and Lake Kariba, Zambia. Arch Environ Contam Toxicol. 2010 Aug;59(2):291-300.

ザンビア大学や保健省との共同研究により、5年間で15報を学術雑誌に掲載。うち6報はザンビア大学教員が筆頭著者。現在、3報を投稿中。ザンビアの鉛汚染に関して申請者らが最も実績を持つ。

本プロジェクトのサポート体制



- **北海道大学ルサカオフィス**
  - 現地での北海道大学によるサポート体制
  - 本日のルサカでのシンポジウムでSATREPSメンバー（工学、地球環境、理学、獣医）による講演
- **北海道大学とザンビア大学との強固な信頼関係**
  - 1982年、獣医学部からstart
  - 学部間協定を発端に大学間協定へ発展
- **北海道大学アフリカ研究会の運営**
  - アフリカの研究に携わる異分野の研究者ネットワーク
  - 北大工学・獣医が事務局
- **アフリカにおける環境毒性ネットワーク**
  - 2009年から国際シンポジウムを毎年アフリカで主催
  - 4年間をザンビアにて主催、その後、ガーナ、南アフリカへと展開
  - 毎年50～60名を15か国で派遣・受入
  - 8か国でコンソーシアムを形成、アフリカ諸国への研究成果の波及を強力にサポート

大使館訪問

アフリカ研究会WEBサイト

南アフリカでのシンポジウム