

(第 6 号様式)

## 学位論文審査の結果の要旨

氏 名	ヌルフィットリ アブドゥル ガフル Nurfitri Abdul Gafur
審査委員	主査 榊原 正幸 副査 井上 雅裕 副査 佐藤 康 副査 鏝本 武久

論 文 名 Study of Medical Geoscience of Heavy Metal Pollution in Bone River Area, Eastern Gorontalo Province, Indonesia

### 審査結果の要旨

Gafur 氏は、本学位論文において、インドネシア共和国東部のスラウェシ島北部・ゴロンタロ州のボネボランゴ県中央部・ボネ川流域における零細小規模金採掘 (ASGM) 起源および自然由来の重金属汚染による医療地球科学的研究を行った。

近年、開発途上国における深刻な環境汚染問題として、国際的に ASGM による Hg 汚染が注目されている。これらの国々では、金抽出で使用する Hg 使用量は年々増加し、生態系の Hg 汚染さらには人間の健康問題をも深刻化させていると言われている。一方で、活動的島弧における金鉱床は浅熱水性タイプであり、As、Cu、Pb や Zn 等の有害重金属を伴うことが知られている。すなわち、活動的島弧における金鉱床は、金抽出で使用される Hg および自然由来の As、Cu、Pb や Zn 等による人為的および自然由来の複合的環境汚染であると予想されるが、このような視点で研究された事例はほとんど無く、その実態は明らかではない。さらに、同氏は、本研究において、人為的および地球科学的要因の両方を含む重金属汚染とそれらが人間や動物の健康に及ぼす影響との関係を研究する学際的科学である「医療地球科学」という新しい分野の確立を目指している。

本研究では、ボネ川上流域の ASGM サイトの現地調査、温泉及び井戸の分布調査、流域住民の生業・経済調査、および As 超集積植物であるモエジマシダの分布調査を実施した。また、調査地域において、岩石、水 (鉱山廃水、温泉水、河川水、鉱山サイトで使用されている飲料用地下水)、堆積物、自生植物 (As 超集積植物であるモエジマシダ)、土壌および住民の毛髪試料を採取した。水・堆積物・植物・土壌試料は PIXE で、毛髪試料は ICP-MS で、岩石試料は SEM-EDS で分析された (総計 164 試料)。

本論文の研究成果は、以下の 4 点に纏められる。

#### (1) ボネ川上流域における ASGM サイトの実態

ボネ川上流域における東トラボロ地区の熱帯雨林内には、数千人規模の鉱山労働者が働く ASGM 地域が存在し、その鉱山廃水および残留廃棄物は大量に環境中に放出されていることが明らかにされた。また、鉱石からの金抽出では、Hg およびシアン化合物が使用されていることが解明された。後述するように、鉱山労働者が利用している地下水も As 汚染されていた。

#### (2) ボネ川流域におけるモエジマシダの分布

As の超集積植物であるモエジマシダの分布は、土壌や水などの As 汚染の指標として利用できることが明らかにされた。特に、ボネ川上流域では、モエジマシダが山地斜面に群生しており、浅熱水性金鉱床に伴って、広範囲に岩盤や地下水が As 汚染されていることが予想され、後述するモエジマシダおよび土壌の As 濃度によっても証明された。

### (3) 調査地域における水、堆積物、植物、土壌および毛髪の Hg、As および Pb 濃度

飲用もしくは生活水として利用されているか、もしくはそれらに混入している水試料中の As・Hg・Pb の濃度は、それぞれ 4.0~383,000 µg/L、0.3~2,080 µg/L、および 0.1~1670 µg/L であった。これらの多くは、WHO のガイドラインで、人間の健康に有害であるレベルである。

ボネ川の堆積物の As・Hg・Pb の濃度は、それぞれ 16.0~120,000 µg/g、0~790 µg/g、および 24.0~10,700 µg/g で、多くの試料で非常に高い値を示した。

ボネ川沿いの山地に自生するモエジマシダの As 濃度は 2.1~17,700 µg/g であり、土壌は、それぞれ 0~400 µg/g、0~36 µg/g、および 8~160 µg/g の範囲である。土壌中の As 濃度と正の相関を示す。この結果は、この地域の土壌が As に汚染されており、モエジマシダの密度分布が As 汚染の環境指標となる。また、この地域は、金鉱床の生成に伴って、岩盤に As や Pb が濃集し、その風化によって土壌中の岩盤由来の As・Pb 濃度が高くなっている。

毛髪の Hg 濃度は最大 1,570 µg/g で、それらの多くは、ドイツで使用されている危険レベル (5 µg/g) を超えている。また、毛髪の As および Pb 濃度も、それぞれ最大 13.5 µg/g および 32.0 µg/g と高い値を示した。

以上の結果は、調査地域が ASGM 起源の Hg および自然由来の As・Pb によって汚染されていることを示している。

### (4) 新たな学際領域「医療地球科学」の重要性

本研究では、地球科学的要因に関連する人間と動物の健康への影響を予測するため、新しい学際的科学分野として、「医療地球科学」の重要性を議論している。特に、本研究の事例であるボネ川流域の重金属汚染の起源は、温泉や岩盤などの地球科学的要因および ASGM という人為的活動の両方に由来しており、同地域が住民の毛髪の重金属濃度に基づくと人間や動物の健康に影響を及ぼすリスクが極めて高い状況であることを示した。

提出された学位論文の研究成果に関連する成果は、国際学術雑誌に 2 編公表し、査読付きの国際学会紀要に 2 編受理されている。本学位論文の公聴会は令和元年 7 月 31 日に開催し、約 30 分の英語による論文発表と 20 分の質疑応答が行われた。引き続き、学位論文審査委員会を開き、本論文の内容を厳正に審議した結果、審査委員が全員一致で、博士 (理学) の学位を授与するのに値するものと判定した。