

京都大学	博士 (工学)	氏名	Diah Dwiana Lestiani
論文題目	Air Quality and Environmental Impact Assessment of Industrial Activities in East Java, Indonesia (インドネシアジャワ島東部における工業活動による大気汚染と環境影響の評価)		
<p>インドネシアにおいては、産業活動が環境に及ぼす影響に関する包括的な研究はまだ不十分である。本論文は、イオンビーム分析などを用いて、インドネシア、特にジャワ島東部における大気中の粒子状物質 (APM) に含まれる有害元素を同定し、これらの元素の発生源を特定し、産業活動が健康と生態系に及ぼす影響を評価し、有効性のある対策を論じた結果をまとめたものであって、7章からなっている。</p> <p>第1章は序論であり、インドネシアの産業活動、APMの一般的な性質と発生源、大気汚染が健康に及ぼす影響、大気汚染の状況の把握と発生源の特定の必要性など、研究背景について述べている。また、インドネシア国家研究イノベーション庁 (BRIN) が国際原子力機関 (IAEA) の支援により継続的に大気モニタリングを行ってきた経緯や現在の協力状況などを説明し、本研究の位置付けを述べている。</p> <p>第2章では、2010年から2017年にかけて、ジャワ島、スマトラ島、カリマンタン島、スラウェシ島、マルク島、パプア島の16都市17箇所の地点で大気をモニタリングした結果を示している。微小粒子状物質 (PM<sub>2.5</sub>: 空気力学的直径が2.5 μm未満の粒子) と粗大粒子状物質 (PM<sub>2.5-10</sub>: 空気力学的直径が2.5-10 μmの粒子) に分けて、週1回の24時間サンプリングを延べ6000回以上行い、質量濃度、ブラックカーボン (BC) 含有量、元素組成を分析した。その結果、インドネシアの主要な都市における APM の性質をはじめ定量的に把握することができ、東ジャワのスラバヤとジャワ島バンテンのタンゲランでは、他の都市に較べて鉛の濃度が10倍から100倍も高く、米国の大気環境基準を超えていることがわかった。</p> <p>第3章では、第2章での結果を受けて、東ジャワ州スラバヤにおける高濃度の鉛汚染の原因を調査した。サンプリングした PM<sub>2.5</sub> 試料を分析した結果、ラモンガンの鉛製錬所が主な汚染源であることを特定した。さらに、鉛のハザード指数 (HQ) と発がんリスク (CR) を用いて健康リスクを評価した結果、許容レベルを上回る値であることが分かった。このことから、政府が PM<sub>2.5</sub> 中の重金属への暴露を最小限に抑える対策を講じる必要があることを指摘した。</p> <p>第4章では、土壌に沈着した APM が環境に及ぼす影響を評価する目的で、米の大生産地の一つである東ジャワ州のラモンガンから採取した土壌中の有害元素を分析した。その結果、ヒ素、鉛、亜鉛の濃度は、世界平均の土壌基準値を大幅に超え、ヨーロッパとアジアの数カ国の基準値も超えていた。主成分分析 (PCA) の結果、これらの元素は鉛製錬活動に起因することが強く示唆された。次に汚染係数 (Cf) に基づく生態学的リスク評価を行ったところ、鉛製錬所から半径 1.5km 以内の区域における鉛とヒ素の Cf 値はそれぞれ、22 と 6.5</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	Diah Dwiana Lestiani
<p>であり、汚染が深刻であること、半径 1.5km 以遠での濃度は許容レベル以下であったものの、大気を経由する汚染であるために広範囲に拡がっていることが明瞭に示された。また、土壌の潜在的毒性元素による発がんリスクは子供も大人も許容レベルを超えていることが分かった。</p> <p>第 5 章では、定量分析する有害元素の対象を広げ、汚染源を特定するために、東ジャワ州スラバヤで 2 年間採取した PM2.5 と PM2.5-10 試料について、京都大学の加速器施設で粒子誘起 X 線分析 (PIXE) 法を用いて元素分析を行った。通常の PIXE では陽子ビームを用いて分析するが、試料や他の部材で散乱した陽子線を遮蔽するための阻止膜が X 線を大幅に減衰させ、軽元素の感度が低くなるという問題がある。そこで、軽元素はヘリウムビームを、中重元素は陽子ビームを用い、阻止膜の厚みなどの測定条件を最適化することによって、この問題を解決した。この結果、汚染元素として重要な 21 種類の元素を高感度で検出することができた。</p> <p>第 6 章では、第 5 章の PIXE 分析によって得られたデータを解析した。その結果、PM2.5 中には高濃度の順に S、Si、K、Zn、Fe、Pb が含まれていること、年間平均 PM2.5 濃度は世界保健機関 (WHO) のガイドラインを上回っていることが分かった。また、正行列因子分解 (PMF) 法を用いて PM2.5 の発生源を推定した結果、スラバヤにおいては亜鉛メッキ工業、塩化アンモニウム、二次硫酸塩、バイオマス燃焼排出、土壌、鉄鋼業、交通排出、鉛製錬業の 8 つが重要な要因であることが明らかになった。これらのうち亜鉛メッキ、鉄鋼業、鉛製錬などの金属産業の PM2.5 への寄与率が高く、その割合は 37%であった。この結果は、工業と輸送に関連した発生源を管理することが極めて重要であることを示している。</p> <p>第 7 章は結論である。長期にわたる本研究により、産業活動、特に鉛製錬や金属産業の活動が、インドネシアの大気の状態に大きな影響を与え、大気や土壌の潜在的な毒性レベルを上昇させていることが分かった。そこで、モニタリングの強化、発生源の特定、地域社会の意識向上、生態学的な影響評価、国際協力、政策立案を提言した。これらはすべて、インドネシアが持続可能な開発を促進しながら、産業汚染がもたらす課題に対処することを目的としている。</p>			

本論文は、産業活動が著しいインドネシアの大気汚染の状況を長年にわたって測定し、汚染源を特定するとともに汚染が人体に及ぼす影響を定量的に評価した結果をまとめたものであり、得られた成果は次のとおりである。

1. インドネシアの16都市17か所で、8年にわたって延べ6000回以上大気のサンプリングを行い、PM2.5（微小粒子状物質）やPM2.5-10（粗大粒子状物質）の濃度、炭素含有量、元素組成を蛍光X線分析法（XRF）などの機器分析によって測定した。このような長期にわたる全国規模のモニタリングは他に例がない。その結果、特にジャワ島東部で鉛汚染が深刻であることが明確に示された。また、測定したデータを解析して鉛汚染源を特定し、周辺住民に対するリスク評価を行った。

2. 大気から土壌に汚染物質が移行することから、ジャワ島東部の土壌に含まれる有害元素についてもXRFによって測定した。その結果、ヒ素と鉛の濃度が高く、これらの元素が土壌の深部まで浸透していることを初めて示した。また、食品による摂取を考慮しない場合であっても、ヒ素と鉛によるリスクは基準値よりも高く、ヒ素による子供の発がんリスクが著しく高いことが分かった。

3. 粒子誘起X線（PIXE）分析において分析ビームを2種類使用し、散乱ビーム阻止膜の厚みなどの測定条件を最適化することによって、広い元素範囲にわたって高感度で検出できるシステムを構築した。ジャワ島東部スラバヤで大気サンプリングした試料をこのPIXE分析法で測定し、得られたデータを解析した結果、有害元素の発生源として、亜鉛メッキ、バイオマス燃焼、土壌、自動車の走行、鉛製錬など8つの主要因を特定した。これは、大気汚染を防止するための政策に必要な情報である。

以上のように本論文は、大気汚染が顕在化するインドネシア、特にジャワ島東部において、環境影響を評価した研究である。長期かつ広範囲にわたる大気モニタリングのデータを解析して有害元素と汚染源を特定したこと、データに基づいて住民の健康影響を定量的に評価したこと、2種類のイオンビームを用いた高感度PIXE分析システムを構築したことは優れた業績であり、学術上、実際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和6年1月22日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。