

京都大学	博士 (工学)	氏名	AZHAM UMAR ABIDIN
論文題目	ENVIRONMENTAL AND OCCUPATIONAL HEALTH RISK ASSESSMENT OF HEAVY METALS IN AMBIENT AIR FOR INFORMAL WORKERS AT INDONESIAN LANDFILL SITES (インドネシアの埋立地における非正規労働者に対する大気中重金属の健康リスク評価)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>大気汚染は、地域や地方の環境、職場、埋立地など、世界中のさまざまな場所で発生しており、ヒトの健康に影響を与える重大な問題である。埋立地は、廃棄物が堆積処分される場所として指定されており、廃棄物の発生源からの輸送距離や最終処分などのすべての過程を考慮し、選定されている。本研究では、発展途上国、特にインドネシア特有の埋立地を対象とした。中でも、インドネシアの埋立地で働く非正規労働者の健康リスクについての研究は少なく、大気中の粒子状物質に含まれる重金属の曝露評価や、ヒトの毛髪に含まれる重金属の定量評価に基づく研究は皆無と言っても過言ではない。インドネシアのジョグジャカルタ特別州にあるピユンガン埋立地を調査対象とし、個人用ダストサンプラーを用いた吸入時の粒子状物質 (Particulate Matter; PM2.5) に含まれる重金属 (Heavy Metals; HMs) 濃度を定量し、また非正規労働者の重金属曝露量の生物学的指標である、ヒトの毛髪中の重金属濃度を調査することで、そこで働くヒトに対する健康リスク評価を実施した。なお、本論文は、これらの内容の7章で構成されている。</p> <p>第1章では、埋立地におけるPM2.5による大気汚染や重金属の曝露による、非正規労働者の健康リスクの現状と問題を紹介する。これらはインドネシア特有の問題である一方で、廃棄物を埋め立て処理する国も多いことから、世界的な視点から、問題を俯瞰した。次に、本研究の範囲と目的、論文の概要、研究の枠組みを説明する。</p> <p>第2章では、埋立地における大気中の粒子状物質の発生源や、含有される重金属の種類及び濃度に関する文献調査を行った。また、粒子状物質に含有される重金属のヒト健康影響に関する調査、健康リスク評価並びに、ピユンガン埋立地の説明と現状に関する先行研究を、過去の文献から調査した。</p> <p>第3章では、埋立地における非正規労働者のPM2.5への曝露量を評価し、それに伴う健康リスクについて調査した。非正規労働者は、継続的に粉じんさらされた環境で労働している。労働者の大気環境を評価するために、対象とした埋立地での労働時間 (1日あたり8時間の作業) において、8地点で、ハイボリュームサンプラー (High-Volume Air Sampler; HVAS) と個人用ダストサンプラーを用いることで、粉じんをフィルター捕集した。また、PM2.5の曝露によるヒトへの健康影響を調べるため、現地の労働者に対してヒアリング調査を実施した。その結果、大気環境中のPM2.5濃度は87.5~1,080 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ であり、インドネシアにおけるPM2.5の基準値を超えていた。リアルタイム及び生涯のリスク比 (Risk Hazard Quotients; RQ) は、1.61及び3.02であり、いずれの値も1を超えていることから、労働者の健康に対して重大なリスクをもたらしていることが認められた。アンケート調査による健康上の訴えは非正規労働者において、頭痛 (84.6%) と咳 (74.3%) の症状が高い項目であった。また、胸のつかえ (28.2%)、目の炎症 (12.8%)、息切れ (12.8%) の症状が続く項目であった。したがって本章では、PM2.5の曝露が埋立地非正規労働者の健康リスクを増大させると結論付けた。</p> <p>第4章では、ピユンガン埋立地にて、個人用サンプラーを用いた非正規労働者の</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	AZHAM UMAR ABIDIN
<p>吸入による PM2.5 中の重金属濃度を定量評価した。HVAS と個人用サンプラーを用いて大気を捕集し、誘導結合プラズマ質量分析計 (ICP-MS) を用いてサンプル中の HMs を同定、定量した。環境大気中の PM2.5 における元素の平均濃度は、HVAS では Fe 54.2、Cu 5.91、Mn 3.02、Zn 1.33、As 0.108、Pb 0.102、Co 0.027、Cd 0.004、Se 0.0037 mg/m³ であった。個人サンプラーでは、Fe 480.90、Cu 8.42、Mn 12.26、Zn 12.76、As 0.24、Pb 1.45、Co 0.12、Cd 0.06、Se 0.02 mg/m³ であった。両サンプリングから高濃度の HMs が検出され、作業環境許容濃度 (Threshold Limited Value; TLV) で設定された値を超えていた。埋立地周辺大気中の重金属濃度からも、非正規労働者に健康影響をもたらしている可能性が示唆された。</p> <p>第 5 章では、埋立地周辺において、HVAS 及び個人サンプラーを用いることで、非正規労働者の吸入時の重金属 (HMs) 濃度の特徴、発生源、健康リスク評価を実施した。その結果、非発がん性リスクを示す重金属のハザード指数 (Hazard Index; HI) が、HVAS では 6.2、個人サンプラーでは 25 であり、リスクが高いことを認めた。また、As、Cd、Pb に対する発がん性リスク (Carcinogenic Risk by Inhalation; CR) 分析では、PM2.5 と個人サンプラーのいずれも $10^{-3} \leq CR < 10^{-1}$ の範囲であり、発がん性 HMs のリスクレベルが高いことを示した。また埋立地における HMs の主な発生源は、電子廃棄物、建設廃棄物、市場製品廃棄物、家庭用品廃棄物であった。一方で、埋立地に出入りするトラック、自動車、掘削機などに由来した、排気ガスも存在した。埋立地における非正規労働者の HMs への曝露により、非発がん性及び発がん性の健康影響リスクが高くなることから、労働環境の改善が必要であると言えた。</p> <p>第 6 章では、埋立地における非正規労働者に対する生物学的曝露指標を用いることで、長期間にわたる重金属の蓄積、有害金属曝露によるヒトへの健康影響、並びに健康リスクについて調査、考察した。第 3 章にてインタビューを実施した 51 人を対象とし、インフォームドコンセントを経て毛髪サンプルを得た。ICP-MS にて測定した結果、Pb 4.70、As 0.30、Cd 1.07、Mn 14.58、Co 0.14、Cu 19.31、Fe 73.05、Zn 646.2、Se 0.65 µg/g であった。Pb、As、Mn の濃度は、都市住民の約 11 倍以上であり、埋立地が環境汚染の一因となっていることを示していた。疫学調査と統計分析によると、回答者の症状と健康上の訴え (咳、息苦しさ、頭痛、鼻の炎症)、マスク、マスク使用期間、回答者の特徴が、すべての金属濃度と有意な相関 ($p < 0.05$) を示した。これらの調査結果は、HMs が環境を汚染し、非正規労働者の体内に入り込むことで、健康リスクをもたらしていることを確認した。</p> <p>第 7 章では、これまでの結果を統合し、埋立地で働く非正規労働者の HMs からの曝露量を評価し、また健康影響についてもリスク評価した。どのような種類の HMs がどのような発生源から生じ、どのような経路で、どれほど人体に曝露されたかを明らかにした。最終的には、これらの結果を通じ、労働者の健康リスクをどのように下げるかを考察し、インドネシアのみならず、世界中の類似した環境に対する提案をした。今後の調査及び研究を通じ、詳細な曝露環境や健康リスクが明らかとなり、埋立地における労働環境の改善に貢献されることが期待される。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、インドネシアのピユンガン埋立地を調査対象とし、個人用ダストサンプラーを用いた吸入時の粒子状物質 (PM2.5) に含まれる重金属 (HMs) 濃度を定量し、ヒトの毛髪中の重金属濃度を調査することで、そこで働くヒトに対する健康リスク評価を実施したものである。得られた主な成果は以下のとおりである。

- 1) 1日あたり8時間の作業時に、8地点で、ハイボリュームサンプラー (HVAS) と個人用ダストサンプラーによる粉じんのフィルター捕集した結果、PM2.5濃度は $87.5 \sim 1,080 \mu\text{g}/\text{m}^3$ であり、インドネシアのPM2.5の基準値を超えた。リアルタイム及び生涯のリスク比 (RQ) は、1.61及び3.02と1を超過しており、労働者の健康に対して重大なリスクをもたらしていることが認められた。
- 2) HVAS と個人用サンプラーを用いて大気を捕集し、誘導結合プラズマ質量分析計を用いてHMsを同定、定量した。HVASではFe 54.2、Cu 5.91、Mn 3.02、Zn 1.33、As 0.108、Pb 0.102、Co 0.027、Cd 0.004、Se 0.0037 mg/m^3 であった。個人サンプラーでは、Fe 480.90、Cu 8.42、Mn 12.26、Zn 12.76、As 0.24、Pb 1.45、Co 0.12、Cd 0.06、Se 0.02 mg/m^3 であった。いずれも高濃度のHMsが検出され、作業環境許容濃度を超えていた。
- 3) 非正規労働者の吸入時の重金属 (HMs) 濃度の特徴、発生源、健康リスク評価を実施した結果、非発がん性リスクを示す重金属のハザード指数 (HI) が、HVASでは6.2、個人サンプラーでは25であり、リスクが高いことを認めた。As、Cd、Pbに対する発がん性リスク (CR) 分析では、いずれも $10^{-3} \leq \text{CR} < 10^{-1}$ の範囲であり、発がん性HMsのリスクレベルが高いことを示した。
- 4) ヒト毛髪中の重金属 (HM) 濃度をICP-MSにて測定した結果、Pb 4.70、As 0.30、Cd 1.07、Mn 14.58、Co 0.14、Cu 19.31、Fe 73.05、Zn 646.2、Se 0.65 $\mu\text{g}/\text{g}$ であり、Pb、As、Mnの濃度は、都市住民の約11倍以上の値となった。疫学調査と統計分析を実施し、回答者の症状、マスク使用期間、回答者の特徴が、すべての金属濃度と有意な相関 ($p < 0.05$) を示した。

本論文は、埋立地で働く非正規労働者のHMsからの曝露量を評価し、また健康影響についてもリスク評価したものであり、インドネシアのみならず、世界中の類似した環境に対するに大きく貢献するものと判断されることから、学術上、實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8月8日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、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。