

京都大学	博士（工学）	氏名	SEPTIAN HADI SUSETYO
論文題目	Study on Environmental and Occupational Health of SO ₂ Exposure to Traditional Sulfur Mining at Ijen Crater Volcano, Indonesia（イジェン火山性クレーターにおける伝来の硫黄採掘に伴う二酸化硫黄曝露の環境および労働衛生に関する研究）		
大気汚染は、現在世界中で直面している最も重要な環境問題の一つであり、人間の健康と生態系の持続可能性に深刻な影響を与えている。大気中の主な汚染物質の一つである二酸化硫黄(SO₂)は、自然由来および人間活動により発生する。自然由来の発生源としては火山活動があり、健康に悪影響を及ぼす SO₂排出の主な要因の一つである。活火山であるイジェン火山性クレーター(ICV)は、硫黄の主要な供給源となっている。観光地として知られている一方で、ICV では適切な保護具を備えることなく、古くから硫黄採掘が行われてきた。しかしながらこれまでに、SO₂曝露が硫黄採掘者の健康、特に臨床的健康状態に与える影響を評価した科学研究は、ほとんど存在しないと言っても過言ではない。本研究の目的は、ICV 周辺環境における SO₂の濃度分布を調査し、SO₂曝露による健康リスクを分析するとともに、硫黄採掘者の尿中クレアチニン濃度を用いた腎障害のリスクを調べることである。本研究論文は、以下の 6 章から構成されている。 第 1 章では、人間の健康や生態系に悪影響を及ぼす主な火山由来の汚染物質として SO₂に着目し、地球規模の環境問題としての大気汚染について論じる。本章ではまた、SO₂の主な自然発生源であるインドネシア東ジャワ州の ICV の概要について述べ、研究全体の目的、概要、枠組みについても整理した。 第 2 章では、世界の火山からの SO₂排出が、健康および大気汚染に与える影響について、文献調査を行った。2012 年から 2022 年の間における、106 の活火山を対象とした米国航空宇宙局(NASA)のオゾン観測装置搭載衛星データを用い、SO₂の排出傾向およびその特性、さらにそれらが世界の総 SO₂排出量に与える寄与度を分析した。その結果、火山活動は世界の SO₂排出量の 22～28 %を占めていることが示された。また、SO₂曝露による健康影響について、火山周辺に居住する地域コミュニティにおける身体的および精神的症状を示す過去の文献を調査した。その結果、ヒトの健康を守り、地球規模の大気環境を維持する取り組みの一環として、火山由来の SO₂排出の監視と管理の重要性が明確に示された。 第 3 章では、ICV における SO₂の環境特性と濃度分布を調査することを目的とした。火口から 100～500 m の範囲にある 30 地点で SO₂を捕集した。サンプリングは 1 か所あたり、流量 1 L/min で 1 時間、インピンジャーにて実施した。健康影響は、国内外の SO₂の基準値を基に評価した。一方、環境特性の評価は、自己観察、観測地点での観測、聞き取り調査および文献データに基づいて行った。その結果、得られた SO₂濃度は 480～6,960 ppb であり、米国環境保護庁(EPA、75 ppb)、米国産業衛生専門家会議(ACGIH、250 ppb)、インドネシア政府基準(150 ppb)、米国労働省(OSHA、2,000 ppb)といった他の規制値を、全ての地点で超過していた。これは、SO₂に対する急性影響の可能性が高いことを示唆していた。さらに、環境特性として、イジェン火口湖の pH が 1 未満を示し、湖水が強酸性であることも明らかになった。 第 4 章では、硫黄採掘者における SO₂吸入曝露による環境リスクとその急性影響を評価した。6 か所の採			

京都大学	博士（工学）	氏名	SEPTIAN HADI SUSETYO
掘作業現場において、インピンジャ－を用いて SO₂濃度を測定した。SO₂曝露によるハザード指数(HQ)は、健康リスク評価法に基づいて算出した。18～55 歳で 1 年以上の労働経験があり、研究参加に同意した採掘者 30 名を対象に聞き取り調査を行い、身体測定データ、作業パターン、健康上の不調について直接情報を収集した。その結果、リアルタイム曝露に対する HQ 値は 1.02、長期曝露で 2.15 であった。急性影響として、作業者の 100 %が目の刺激と咳を、67 %が頭痛と呼吸困難を、60 %が皮膚刺激を訴えていた。これは、SO₂曝露による急性影響を明確に示した結果と言える。 第 5 章では、環境汚染による曝露と腎機能障害との関係を、尿中クレアチニン濃度および糸球体濾過量(GFR)を指標として評価することを目的とした。本章では、30 名の硫黄採掘者(曝露群)と、30 名の採掘に従事していない地域住民(対照群)を含む計 60 名を対象とした。被験者から尿サンプルを採取し、クレアチニン濃度を分析後、GFR を算出して腎機能の評価した。その結果、曝露群では 30 人中 20 人(66 %)がクレアチニン濃度の正常値(上限 1.3 mg/dL)を超過し、対照群では 30 人中 9 人(30 %)のみが基準値を超えていた。GFR 分析では、曝露群のうち正常腎機能(GFR ≥ 90 mL/min)を示した者は 2 人(6.7 %)にとどまり、16 人(53.3 %)が中等度(GFR 30～59 mL/min)、4 人(13.3 %)が重度(GFR 15～29 mL/min)の腎機能低下を示していた。一方、対照群では 8 人(26.7 %)が正常であり、7 人(23.3 %)が中等度、1 人(3.3 %)が重度の腎機能低下を示した。これは、ICV における SO₂曝露が、尿中クレアチニン濃度の上昇および GFR の低下と有意に関連し、腎機能低下リスクを増加させることを示唆していた。 第 6 章ではここまでの結果を統合し、ICV は SO₂の主な発生源であり、特に硫黄採掘者の作業領域では濃度が高く、安全基準を大きく超過していることを認めた。SO₂の慢性的な曝露は、目の刺激や呼吸器症状といった急性影響を引き起こすだけでなく、尿中クレアチニン値の上昇や GFR の低下に示されるような、腎機能への深刻な慢性影響も及ぼすことが明らかとなった。このリスクに対応するための提言として、大気の定期的モニタリングの実施、曝露管理システムの導入、個人用保護具(PPE)の使用義務化、定期的な健康診断の実施、火山環境リスクに基づく労働環境管理方針の策定、並びに硫黄採掘のようなリスクの高い職業への依存を減らすための、地域コミュニティにおける持続可能な経済代替策の開発を提言した。			