

京都大学	博士 (工学)	氏名	DHANDHUN WACANO
論文題目	DEVELOPMENT OF GROUNDWATER FLUORIDE RISK ANALYSIS TECHNIQUES AND ITS APPLICATION TO GROUNDWATER QUALITY MANAGEMENT IN INDONESIA (インドネシアにおける地下水フッ化物リスク分析技術の開発と地下水水質管理への応用)		

(論文内容の要旨)

本論文は、インドネシアにおける地下水を含む飲料水源管理手法を向上させるために、地下水中フッ化物問題に対するリスク分析手法を開発し、その応用を試みた結果をまとめたものであって、6章からなっている。

第1章は序論であり、世界およびインドネシアにおける視点から、地下水中フッ化物の存在による地下水質および水の安全保障の問題を紹介し、次に研究の範囲と目的、論文の概要、研究の枠組みを説明している。

第2章では、世界のフッ化物問題に関する82件の文献をレビューし、インドネシアにおける1,629件の地下水中フッ化物濃度データを検討した。その結果、インドネシアにおいてフッ素の欠乏と過剰が人間の健康に深刻な悪影響を及ぼすことが示された。インドネシアのフッ化物基準値(1.5 mg/L)も、フッ素症につながるフッ化物の過剰摂取を防ぐことを意図していると考えられるが、虫歯の問題を防ぐには至っていない。地下水中フッ化物の存在と濃度には、地質学的要因と人為的要因が重要な役割を果たしているが、インドネシアにおける地下水中フッ化物の発生メカニズムについては、単一の説明はない。さらに、インドネシアではデータの入手が大きな問題である。収集されたデータは、全34州のうち13州(38.24%)しかカバーしておらず、そのほとんどがジャワ島(88.7%)で、しかも約52%は座標位置を欠いている。地下水中フッ化物濃度の不足が顕著で、平均値が0.46 mg/Lと、WHOの最低推奨値(0.5 mg/L)より64.3%低い。この状況は、インドネシアにおける虫歯の有病率の高さ(2018年93%)と関連していると考えられる。一方、地下水中フッ化物濃度が平均2.69 mg/Lと高いことから、東ジャワ州アセンバガスの風土病的フッ素症の事例が報告されている。本章では、地下水中フッ化物問題の包括的研究は必須であり、特にインドネシアでは、データの制約を克服するための特定のアプローチが必要であると結論づけた。さらに、インドネシアの規制に従って、虫歯を予防するための飲料水中の最適なフッ化物濃度を評価し、それを明確に説明する必要があるとした。

第3章では、首都ジャカルタの複雑な都市化・工業化活動の下で、地下水中フッ化物発生に対する人為的影響の可能性を調査した。2016年から2019年までの乾季と雨季の両方で合計1,418点の地下水質データ、192点の水文地球化学データを用いて、ジャカルタにおけるフッ化物発生を評価した。時空間分析、水理化学分析、地球化学モデリングを適用して、地下水中フッ化物の発生源、濃度上昇のメカニズム、予想される傾向を検討した。その結果、フッ化物の発生源は、岩石-水相互作用>海水侵入>人為的な投入廃棄物>河川水の浸透の順であることがわかった。また、ジャカルタ北部では海水侵入と、関連する蒸発過程も寄与していた。蛍石飽和指数(SI-CaF<sub>2</sub>, n=80, CBE±5%)の熱力学的モデリングでは、すべての試料が不飽和状態にあり、フッ素含有鉱物の溶解過程が現在も、そして将来も続くことを確認した。さらに、フッ素とそれぞれ硝酸塩、亜硝酸塩、塩化物、硫酸塩との二変量プロットから、ジャカルタの地下水中フッ化物濃度には、人為的活動の影響や、河川水の浸透プロセスの影響も関与していることが示された。しかし、人為的なものと河川浸透の2つのプロセスの寄与についてはまだ調査中であり、さらに詳細かつ明確な説明が必要である。本章では、ジャカルタの地

京都大学	博士 (工学)	氏名	DHANDHUN WACANO
<p>下水中フッ化物濃度は、自然および人為的要因の両方により、将来的に増加する可能性がある」と結論づけた。</p> <p>第 4 章では、ジャカルタにおける定量的リスク解析のための濃度予測モデルとフッ化物濃度制御因子検討の統合を行った。本章では、第 3 章で得られた 1,418 件の地下水データのすべてを予測モデル作成に使用した。また、192 個の水質化学パラメータ値を変数予測因子および説明的駆動因子パラメータとして使用した。フッ化物濃度予測において、現在濃度の予測には Random Forest アルゴリズムモデルに基づく機械学習を用い、将来濃度の予測には Time Series Forecasting Toolset を使用した。現在の予測では、0.1~1.6 mg/L の濃度値を精度±82%で予測できた。現在の高フッ化物濃度のほとんどはジャカルタ北部に位置しており、海水侵入プロセスがフッ化物濃度の制御因子の一つであることがさらに確認された。将来予測では、0.5~4.0 mg/L の濃度が予測され、精度も 59%以下となった。将来予測での精度が必要レベルを満たさないため、将来リスク人口の算出はまだ達成できない。本章では、地下水中フッ化物濃度予測のための機械学習アプローチは、地下水質データ制約下での最適化手法として有用であると結論づけた。また、濃度制御因子の検討に基づく濃度の外挿手法は、データが限られている他の地点の他の地下水汚染物質に適用可能である。さらに、モニタリングデータの期間が短いため、濃度の時系列と傾向確率に基づく将来予測は、最も困難なモデル化であった。最後に、本章では発生メカニズム解析に基づき、政府や水資源管理者が地下水中のフッ化物汚染を特定・軽減するための重要な意思決定ツールとして利用できる、定量的リスクゾーニングとリスク対象人口計算手法の作成を試みた。</p> <p>第 5 章では、フッ素症流行地域であるアセンバガスにおいて、火山性火口湖からの浸透によるフッ化物含有河川水および灌漑水が、地下水中フッ化物濃度に与える影響について調査した。アセンバガスの汚染メカニズムを評価するために、合計 45 個の地下水中フッ化物データと 30 個の水質化学データを使用した。また、先行研究から得られた 49 地点の地下水中フッ化物データも、評価プロセスのサポートに使用した。時空間解析、水理化学的評価、地球化学的モデリング、フッ化物輸送モデリングにより、発生源、輸送メカニズム、定量的リスクの分析を行った。パイパーダイアグラムにおける水質の特徴、F/Cl モル比計算、ギブスダイアグラム解析に基づき、岩石-水相互作用プロセスなどの地質学的プロセスは、アセンバガスの地下水中フッ化物濃度の発生プロセスを大きくは支配していないことが示された。この地域の地下水中フッ化物は、河床、酸性の灌漑網、フッ化物汚染された農業用土壌の灌漑返送流から直接浸透している可能性があり、岩石-水相互作用の代わりに蒸発プロセスの影響が大きいことが確認された。蛍石飽和指数 (SI-CaF<sub>2</sub>, n=30, CBE±5%) の熱力学的検討の結果、高フッ化物濃度 (F&gt;1 mg/L) はすべて、調査地域中部地帯の河川灌漑網に従って平衡状態にあることが示された。この結果から、地下水中フッ化物の発生源は地表水の流入であることがさらに確認された。最後に、本章では、アセンバガスの地下水中のフッ化物濃度は火山起源であり、約 50 年前から定常状態にあると結論づけた。加えて、20 年間の経時的なデータ評価により、定常状態を確認した。さらに、定常状態に関する情報を用いて、ハザードゾーンネーションモデルに基づくリスク人口の再評価を行った。</p> <p>第 6 章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。</p>			

氏名	DHANDHUN WACANO
----	-----------------

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、インドネシアの地下水中フッ化物濃度の調査データから、インドネシアにおける地下水中フッ素元素の起源を明らかにし、その飲用リスク評価についても検討したものである。得られた主な成果は以下のとおりである。

- 1) インドネシアにおける地下水質データは限られており、体系的に統合されていない。データは34州中13州しかカバーしておらず、52%のデータは座標位置を欠いている。地下水中フッ化物濃度の範囲は64.3%が0.5 mg/L未満、0.92%が1.5 mg/Lを超えていた。地下水中フッ化物濃度の不足(平均0.46 mg/L)は主な懸念事項であり、インドネシアにおける虫歯リスクの問題を引き起こす可能性がある。
- 2) ジャカルタとアセンバガスのフッ素症常在地域を事例とした時空間解析と地球化学モデリングにより、人間活動が地下水中フッ素濃度上昇を加速させることが明らかになった。ジャカルタでは、人間活動の寄与が大きく、過剰な地下水汲み上げによって海水が浸入し、ジャカルタ北部のフッ素濃度が高くなったと考えられた。一方、アセンバガスでは、火山を水源とするフッ化物含有水の灌漑網の発達、アセンバガス中流域のフッ化物汚染に明らかに影響を与えていた。さらに、蛍石の飽和指数(SI-CaF<sub>2</sub>)分析では、ジャカルタのすべてのサンプルが不飽和状態(-0.71~-4.69)であり、今後さらに濃度が増加する可能性があることが確認されたが、アセンバガスではほぼ定常状態に達しており、SI-CaF<sub>2</sub> = 0.07~-0.54なので近い将来は変化しないと考えられた。
- 3) 未監視地域の地下水中フッ化物濃度予測のための機械学習とフッ化物発生メカニズム情報の統合は、インドネシアにおける実測データ不足を克服するために有効なツールと考えられた。Random Forest アルゴリズムによるジャカルタにおける現時点の予測モデリングでは高い精度(80%以上)が得られたが、時系列データによる未来の予測モデリングでは、時系列データが十分でないため、50%未満の予測精度に留まった。また、ハザードゾーンネーションモデルは、リスク人口の推定に有効であると考えられた。

本論文は、インドネシアにおける地下水中フッ素汚染の現状とそのメカニズムを明らかにするものであり、今後のインドネシアにおける地下水源飲料水のリスク管理手法の発展に大きく貢献すると考えられ、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5年7月27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。