

京都大学	博士（工学）	氏名	Any Juliani
論文題目	THE EFFECT OF BATIK INDUSTRY ON THE QUALITY OF WATER ENVIRONMENT AND ITS RISK ANALYSIS IN YOGYAKARTA, INDONESIA （インドネシア、ジョグジャカルタにおけるバティック産業の水環境の質への影響とそのリスク評価）		
<p>（論文内容の要旨）</p> <p>インドネシアのバティック産業における合成染料やその他の化学物質の使用は、環境、ひいては人間の健康に悪影響を与える可能性があることが懸念されている。ほとんどのバティック工場は、労働衛生や環境管理の面で十分な能力を持たない家庭用産業であるため、その影響の大きさはより大きくなると考えられる。本研究では、インドネシアのバティック産業の中心地の一つであるジョグジャカルタで、バティック産業が水環境の質に与える影響について検討した。本研究は、以下の7つの章に分かれている。</p> <p>第1章では、本研究の背景となる研究地域のバティック産業の概要について簡単に説明し、問題提起、研究目的、研究範囲、論文の概要について述べた。</p> <p>第2章では、バティック産業と研究対象地域に関する情報を示した。まず、インドネシアにおけるバティック産業の文化的、経済的重要性について述べた。次に、バティック産業の一般的な生産工程と、その操業に伴って生じる環境問題について紹介し、研究全体の焦点となる2つの汚染物質群を示した。その2つのグループとは、重金属と芳香族アリルアミンである。これらの汚染物質群の毒性効果に関する先行研究のレビューを紹介し、最後に、ジョグジャカルタ特別州の人口統計学のおよび物理的条件について説明し、本研究の対象地域がジョグジャカルタ市とバントゥール県であることを示した。</p> <p>第3章では、調査地域のバティック産業の生産方法と廃水処理に関するプロフィールを示し、調査地域のバティック産業で使用されているアゾ染料が芳香族アミンを生成するものであるかどうかを調査した。ジョグジャカルタ市の24のバティック工場とバントゥール県の53の工場を調査した結果、両地域のバティック工場のそれぞれ92%と89%が合成染料を使用していることが判明した。合成染料のうち、アゾ染料、特にナフトールは、ジョグジャカルタ市では88%以上、バントゥール県では70%以上の工場で使用されていた。水の消費量については、1枚のバティック製品の生産に必要な水の量は平均7.49Lであった。この量は、他の研究結果と比べても比較的少ない。廃水処理に関しては、ジョグジャカルタ市の50%、バントゥール県の34%の工場が廃水処理設備を持っていなかった。そのため、廃水は処理されることなく、そのまま環境中に放出されていた。懸念されるのは、広く使用されているアゾ染料の影響である。実験室での分析の結果、還元型ナフトール色素のサンプルからはさまざまな濃度で11種類の有害な芳香族アミンが、還元型廃水サンプルからは5種類の化合物が検出された。このことから、調査地域のバティック工場で広く使用されているアゾ染料は、還元環境下で発がん性のある芳香族アミンを放出する可能性のある染料であることが確認された。</p> <p>第4章では、調査地域のバティック工場からの排水サンプルの金属およびメタロイドの特性を示した。その結果、Al, Si, Fe, Zn, Cr, Co, Ni, Cu, As, Se, Cd, Pbのそれぞれの濃度は0.1~300 mg/L, 25~280 mg/L, 0.6~12 mg/L, 0.1~180 mg/L, 11.7~100 µg/L, 0.6~17.7 µg/L, 7.2~82.8 µg/L, 20.9~1.9x10³ µg/L, 1.5~21.2 µg/L, 7.6~2.6x10³ µg/L, and <0.05~220 µg/L, 0.03~42.7 µg/Lの範囲であった。重金属の規制対象はCrのみであり、インドネシアの排水基準を超える試料はなかった。しかし、Cd, Se, Fe, Znの濃度は、日本およびマレーシアの排水基準を超えていた。本研究では、Cr, Pb, Siの濃度は、他の研究と比較して比較的低かった。しかし、Cu, Cd, Fe特にAlとZnの濃度は、他の研究よりはるかに高かった。階層的クラスター分析（HCA）により、Ni, Cr, Coのクラスターを示す dendrogram が得られ、これらの金属の供給源が染料であることが示された。その他のクラスターは、地下水や他の補助化学物質など、さまざまな発生源を示していた。また、HCAは、染料の種類や生産段階以外</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	Any Juliani
------	-----------	----	-------------

の要因がバティック排水中の重金属含有量に影響する可能性を示しており、これはバティック工場間の生産プロセスの高いばらつきを表している。

第 5 章では、Winongo 流域のバティック工場とその周辺の掘削井戸から採取した地下水サンプル中の様々な金属の分析に焦点を当てている。地下水サンプル中の各種金属濃度は、Mn が 0.1~284 µg/L、Fe が 1.6~71 µg/L、Cu が 0.9~9.9 µg/L、Zn が 2.7~235 µg/L、As が 0.8~3.3 µg/L、Se は 0.9~7.6 µg/L、Ba は 9.1~36.8 µg/L、Pb は 0.2~3.2 µg/L、Cr は<0.18~1.4p µg/L、Co は<0.05~0.2 µg/L、Ni は<0.31~4.6 µg/L、Cd は<0.05 µg/L であった。濃度の平均値では、Zn>Ba>Fe>Mn>Cu>Se>As>Ni>Pb>Co>Cr>Cd の順となった。これらの実験室分析データと調査地域の土壌粒子の特性、土壌粒子への吸着挙動に関連する各金属元素の特性、そして地下水の流動特性を考慮して、バティック排水の浸透が調査地域の地下水質に及ぼす影響について検討した。サンプル地点間の分布に特徴があった Cu と Zn を分析対象とした数値計算による評価の結果、工場排水が地下へ浸透して地下水を汚染している可能性は低いことが明らかとなった。

第 6 章では、Winongo 流域のバティック産業を含む排水の受け入れ水域である Winongo 川の水と堆積物試料中の重金属の分析を行った。河川水中の重金属の分布は、Fe>Pb>Cd>Cu>Cr の順であり、濃度の範囲は、Fe が 42.8~121.4 µg/L、Pb が 7.6~54.9 µg/L、Cd が 8.9~14.4 µg/L、Cu が 3.0~6.8 µg/L、Cr が<5.5 µg/L であった。堆積物中の濃度は、Fe>Pb>Cu>Cr>Cd の順であり、濃度の範囲は、Fe が 1470~3240 mg/kg、Pb が 16.3~49.0 mg/kg、Cu が 15.4~46.3 mg/kg、Cr が 0.5~12.6 mg/kg、Cd が 1.7~3.3 mg/kg であった。地中貯留指数 (I_{geo}) および濃縮係数 (EF) を用いた評価では、河川堆積物中の Cd および Pb の汚染が深刻であることが示唆された。コンセンサスベースの底質基準 (Q_{m-PCA}) によると、すべての底質サンプルは有毒であると考えられた。水試料については、重金属汚染指数 (HPI) および Nemerow 汚染指数 (PN) を用いた評価により、多くのバティック工場が立地する地域からの試料が最も汚染されていることが確認された。統計的な発生源の特定により、重金属の発生源は農業活動やバティック工場を含む家庭内産業である可能性が示された。バティック工場からの排水が Winongo 川の水質に与える影響を推定するために、河川希釈倍率のモンテカルロシミュレーションを行った結果、Pb、Cd、Fe、Cu については、バティック排水が河川水の濃度を基準値以上にする可能性は低いが、Zn については高い可能性が示された。

第 7 章では、バティック排水の影響を受けている Winongo 川の重金属汚染された食用魚の消費に関するリスク分析を行った。Winongo 川から 10 匹の魚のサンプルを採取し、魚肉部分の Cr、Cr、Cu、Fe、Cd の濃度を分析した。重金属濃度の分布は、Fe>Cu>Cr>Cd>Pb の順で、Pb は 0.02~0.34 mg/kg、Cr は 0.03~0.51 mg/kg、Cu は 0.04~0.33 mg/kg、Cd は 0.05~0.17 mg/kg、Fe は 0.62~6.68 mg/kg の範囲にあった。Cd と Pb の濃度は、いくつかのサンプリング地点で、それぞれの基準値を超えていた。最も高い濃度は、ジョグジャカルタ市中心部方向からの本川と支流が合流する地点で発生した。この汚染魚の消費に関するリスク分析では、リスク指数が 1 未満で非発がん性の影響については安全なレベルであったが、Cd と Cr の過剰発癌リスク (ECR) 値が 10^{-4} 以上であるため、発がん性の影響については安全なレベルにはないことが明らかになった。この結果は、Winongo 川とその関係者にリスク管理プログラムを実施する緊急性を示している。

第 8 章では、これまでの各章の結論とその意味するところ、および今後の研究への提言をまとめた。

氏名	Any Juliani
----	-------------

(論文審査の結果の要旨)

本論文はインドネシアにおけるバティック産業からの排水が水系汚染に及ぼす影響と、その水系で採れた食用魚を介しての重金属曝露リスクを評価したものである。得られた主な成果は以下のとおりである。

1) ジョグジャカルタ市の24のバティック工場とバントゥール県の53のバティック工場を調査した結果、これら2つの地域のバティック工場のそれぞれ92%と89%が合成染料を使用しており、合成染料のうち、アゾ染料、特に難水溶性アゾ染料としてのナフトール染料は、ジョグジャカルタ市では88%以上、バントゥール県では70%以上の工場で使用されていた。廃水処理に関しては、ジョグジャカルタ市の50%、バントゥール県の34%の工場が廃水処理施設を備えておらず、廃水はそのまま環境中に放出されていることが明らかになった。

2) 還元的環境で保持したナフトール染料のサンプルから11種類の有害な芳香族アミンがさまざまな濃度で検出され、また、還元的状態にあるバティック工場の排水サンプルからは5種類の有害な芳香族アミンが検出された。このことから、調査地域のバティック工場で広く使用されているナフトール染料は、還元的になりやすい環境下で発がん性のある芳香族アミンを放出する可能性のある染料であることを確認した。

3) 調査地域のバティック工場からの排水サンプル中の金属およびメタロイドは、 $Si > Al > Zn > Fe > Se > Ba > Mn > Cu > Cr > Ni > Cd > Pb > As > Co$ の順で濃度が高く、それぞれの最大濃度はSiの280 mg/LからCoの18 $\mu\text{g/L}$ まで大きな差があった。また、クラスター分析の結果、Cr、Ni、Cu、Seが主として一つの起源に由来することを、また、Co、As、Cd、Pbも異なる一つの起源に由来する可能性を示した。これらはそれぞれ金属錯体アゾ染料、あるいは金属錯体染料によく含まれることから、バティック工場から排水される水系の水質に影響することが予想され、河川水や河川堆積物中濃度にもその影響が観測された。

4) バティック排水の影響を受けているWinongo川の重金属汚染された魚の消費に関するリスク分析を行った結果、Cdによる過剰発がんリスクは 10^{-4} 以上となり、付近住民らの食用魚の消費による発がんリスクが無視できないことを明らかにした。

以上の結果は、インドネシアのバティック産業に起因する水系汚染の現状を示し、また食用魚の消費による健康リスクが無視できないことを示すものであり、今後のインドネシアのバティック産業の排水管理政策の発展に大きく貢献するものであって、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4年3月23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。