

マレーシア，サバ州キナバタンガン川下流域における 水質の現状と課題

中谷 暢 丈^{1)2)3)*}・森 島 優¹⁾・小 菅 千 絵⁴⁾
Rosli Jukrana⁵⁾・Pak Yan Moh³⁾・金子 正 美⁴⁾

Current status and future perspectives of water quality
in the Lower Kinabatangan river basin, Sabah, Malaysia

Nobutake NAKATANI^{1)2)3)*}, Yu MORISHIMA¹⁾, Chie KOSUGA⁴⁾,
Rosli JUKRANA⁵⁾, Pak Yan MOH³⁾ and Masami KANEKO⁴⁾

(Accepted 4 December 2017)

1. はじめに

マレーシアにおける 2016 年度国民一人当たりの GDP は、東南アジア諸国連合 (ASEAN) の中でもシンガポール、ブルネイに続いて第 3 位に位置しており¹⁾、比較的順調な経済発展を続けていることを背景に、2020 年の先進国入りを目指した取り組みを展開している。また、地球の陸地総面積の 0.2% 程度にもかかわらず、マレーシアは世界に 17 ある生物多様性の豊かな国の一つとして認められている²⁾。中でもボルネオ島サバ州には、東南アジア最高峰のキナバル山からなる山岳地帯から、低地混交フタバガキ林が優占する熱帯雨林、海岸沿いのマングローブ林といった多様な植生が広がっており、そこには哺乳類や鳥類など数多くの固有種や希少種がみられる。さらに、2008 年 8 月キナバタンガン川・セガマ川下流域湿地は、水鳥や希少な生物の重要な生息地として、マレーシア国内で最大、そしてサバ州初のラムサール条約指定湿地に登録された³⁾。現地では、これら豊富な自然環境を活用したエコツーリズムが盛んで、特にキナバタンガン川下流域は「ナショナルエコツーリズムプラン 1996」の中で、マレーシア国内におけるエコツーリズムの重要な場所

の一つとして挙げられている⁴⁾。

一方、不法な森林伐採やプランテーション開発によって野生動物の生息域である熱帯雨林の面積は急激に減少している。世界自然保護基金 (WWF) の報告によると、ボルネオ島では過去 20 年以上にわたってアブラヤシのプランテーション開発に伴う深刻な森林伐採が行われており、近年面積拡大率は鈍化したものの、サバ州では 2005 年に 109 万 ha であったアブラヤシプランテーションの面積は、2015 年には 141 万 ha まで増加した⁵⁾。こうした森林の伐採は野生動物の生息域を減少させるほか、土壌の水分保持能力を低下させるとともに、土壌が風雨にさらされることでの土壌流出や浸食が進行し、下流域へのシルトや粘土の過剰な堆積等の被害を及ぼす可能性がある。また、アブラヤシのミル工場稼働や住民数の増加は関連する汚濁物質排出量を増加させ、十分な処理が行われなまま排出されると河川の水質汚濁を引き起こす可能性もある。

これまでに、酪農学園大学の生命環境学科および環境共生学類では、海外自然環境実習の一環で、サバ州キナバタンガン川下流域バトゥプティ (Batu Puteh) 村周辺域での植林活動や野生動物観察を行ってきた。また、現地協同組合コペル (KOPEL

¹⁾ 酪農学園大学農食環境学群環境共生学類水質化学研究室

Laboratory of Water Chemistry, Department of Environmental and Symbiotic Science, College of Agriculture, Food and Environment Sciences, Rakuno Gakuen University, 582 Bunkyo-dai-Midorimachi, Ebetsu, Hokkaido 069-8501, Japan

²⁾ 酪農学園大学大学院酪農学研究所

Graduate School of Dairy Science, Rakuno Gakuen University, 582 Bunkyo-dai-Midorimachi, Ebetsu, Hokkaido 069-8501, Japan

³⁾ マレーシア・サバ大学科学・自然資源学部

Water Research Unit, Faculty of Science and Natural Resources, Universiti Malaysia Sabah, 88400 Kota Kinabalu, Sabah, Malaysia

⁴⁾ 酪農学園大学農食環境学群環境共生学類環境 GIS 研究室

Laboratory of Conservation GIS, Department of Environmental and Symbiotic Science, College of Agriculture, Food and Environment Sciences, Rakuno Gakuen University, 582 Bunkyo-dai-Midorimachi, Ebetsu, Hokkaido 069-8501, Japan

⁵⁾ バトゥプティ村エコツーリズム協会 KOPEL

Community Eco-Tourism Co-operative KOPEL, PPM 538 Elopura, 90000 Sandakan, Sabah, Malaysia

*Corresponding author

Bhd.) の協力の下、周辺地域における水質モニタリングを実施報告した⁶⁾。さらに住民参加型の環境モニタリングやデータベータ作りを行い、エコツーリズムや環境教育に活用することで、地域住民による生物多様性に配慮した生計活動の確立を行ってきた⁷⁾。将来的に現地の自然環境や生物多様性の保全を進めていくためには、これまでの知見を整理し、今後の課題に向けての取り組みや活動を進めていく必要がある。

以上を踏まえ本研究では、サバ州キナバタンガン川流域での河川水質モニタリングにおける今後の方向性を探ることを目的に、河川水質の現状について取りまとめを行った。具体的には、①マレーシアの河川水質に関する法規制、②政府による水質モニタリングの実施内容、③現地調査結果を含めた水質の現状を整理した。これらを踏まえ、水質モニタリングにおける今後の課題と展望を示した。

2. 方法

2.1. 河川水質に関する資料および情報の整理

マレーシア天然資源・環境省 (Ministry of Natural Resources and the Environment) の環境局 (Department of Environment, 以下 DOE) ホームページに掲載されている各種資料、学術雑誌や書籍等を用い、マレーシアにおける排水基準や環境基準を含めた河川水質に関わる各種法規制、水質モニタリングの実施体制やその内容、河川水質の現状を整理した。

2.2. 現地水質調査

2.2.1. 調査地点、採水と現地観測

2014年8月15日～17日キナバタンガン川下流域のバトゥプティ村周辺において、本流の船着き場

(Jetty)、支流の Pin 川 (Sg. Pin) と Takala 川 (Sg. Takala)、三日月湖の Tungog 湖に加え、下流のスカウ (Sukau) 周辺において本流の Tandu Batu、支流の Tengengan Besar、三日月湖の Kelinanap 湖の計7地点において採水と現地観測を行った (Fig. 1)。いずれの支流の調査地点よりも上流には、アブラヤシのプランテーションやミル工場が存在する。さらに、ミル工場の排水1試料として曝気処理を行っている貯水池 (Pond) より採水を行った。試料水は、あらかじめ洗浄しておいたポリプロピレン製ボトルに直接採水した。

現地では、簡易型 pH メーター (B-212, 堀場製作所) を用いて水素イオン指数 (pH)、DO メーター (F-102, 飯島電子株式会社) を用いて溶存酸素 (DO) と水温、携帯型 EC 計 (ES-51, 堀場製作所) を用いて電気伝導度 (EC) を測定した。さらに、透視度計 (サンプラテック社) を用い、透視度も測定した。

2.2.2. 化学測定

現地で採水した試料は、可能な限り保冷しながらサバ大学の科学技術学部 (School of Science and Technology) に持ち込み、工業排水試験方法 JIS K 0102⁸⁾ に従い、過マンガン酸カリウムによる化学的酸素要求量 (COD_{Mn}) を測定した。さらに、ミル工場排水についてのみ、米国の水質及び排水標準検査方法⁹⁾ による二クロム酸カリウム化学的酸素要求量 (COD_{Cr}) も測定した。さらに、硝酸を用いた湿式分解後にろ紙 (No. 5B, アドバンテック東洋株式会社) でろ過した溶液について、誘導結合プラズマ発光分光分析計 (ELAN 5000, パーキンエルマー株式会社) により重金属類 (Cu, Zn, Pb, Mn, Fe, Ni, Co, Cd) の濃度を測定した。また、各未処理の水試料の一部を孔径 0.45 μm のシリンジフィルター (アドバ



Fig. 1 Location of sampling stations in the Lower Kinabatangan river basin.

1, Jetty; 2, Sg. Pin; 3, Sg. Takala; 4, Tungog oxbow lake; 5, Tandu Batu; 6, Tengengan Besar; 7, Kelinanap oxbow lake.

ンテック東洋株式会社)でろ過し、イオンクロマトグラフィー(IC-20, ダイオネクス株式会社)を用いて、主要陽イオン類(Na^+ , K^+ , NH_4^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+})と陰イオン類(Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-})の濃度を測定した。

3. 結果と考察

3.1. マレーシアの河川水質に関連する法規制

ここでは、歴史的背景を交えつつマレーシアにおける河川水質に関連した法規制(Table 1)について、以下に述べる。

顕著な河川水質汚濁は、マレーシアとしての国が成立する以前、マレー半島イギリス領マラヤにおいて行われていた伝統的産業であるスズの採掘に伴う鉱山からの汚水や汚泥によるものがはじまりといわれている¹⁰⁾。20世紀初頭において主要産業となったスズの採掘によって、尾鉱や不純物として含まれるヒ素などの有害金属の水圏環境への流出¹¹⁾のほか、採掘時のシルトや粘土による河川水の濁水化と水路の深刻な汚泥堆積がしばしば起きたといわれている^{12,13)}。そのため、1895年ペラ州とヌグリ・スンピラン州のそれぞれにおいてスズ鉱山開発に関連するThe Mining Codes of Perak (1895) and Negeri Sembilan (1895)が施行された¹³⁾。この中で、採掘活動により生じた泥や砂は古い採掘穴に廃棄するか、細かい泥のみ河川へ排出することが認められていた。さらに、1920年にはマレー半島のいくつかの州を対象にWater Act (1920)が施行された。この中には、水質汚染を含める河川に影響を及ぼす行為の禁止事項や罰則などが盛り込まれており、マレーシア独立後も引き継がれたが、ボルネオ島のサバ州や

サラワク州は対象にならなかった。これ以降、天然ゴムおよびアブラヤシ産業の活発化に伴い、これらの工場排水に起因する水質汚濁が進行することになった。特に、1960年代後半からの外資導入による積極的な工業化政策による経済発展の過程において、これらの産業公害が深刻化したといわれている¹⁴⁾。これに対し、環境に関連した約20の法規制が同時期に施行されたものの、実際には開発を優先する政策実施に重点がおかれ、良好な管理の実施を促すために立案されたため、環境問題を扱うものではなかったと指摘されている¹⁵⁾。

1972年スウェーデンのストックホルムで開催された国際連合人間環境会議を受け、マレーシアでは1974年に環境政策に資する初の基本法として環境質法 Environmental Quality Act が制定された。この中では、水質汚濁、大気汚染、有害物質に関する規制の実施と関連のモニタリング、開発プロジェクトに対する環境影響評価や工場立地適正評価など、総合的な環境行政を担当するDOEが創設されるとともに、一定の事業活動を実施するための環境影響評価の規定が設けられた。1977年にアブラヤシのミル工場、1978年に天然ゴムの各工場排水、さらに1979年に下水・産業排水に関して、各種排水基準等が定められた。前者2つに関してはマレーシア国内の重要な産業であることから、最初から厳しい排水基準値を設けるのではなく、徐々に基準値を厳しくする手順を踏んだ。例えば、アブラヤシのミル工場処理排水における生物化学的酸素要求量(Biochemical oxygen demand, BOD)の水域への排水基準値は、1978年に5,000 mg/L以下であったものが段階的に下げられ、1984年以降では100 mg/L

Table 1 Selected Malaysian law and regulations related to river water quality.

Year	Law and regulations
1895	The Mining Codes of Perak and Negeri Sembilan
1920	Waters Act (Act 418)
1962	Mining Enachment (F.M.S. Cap 147)
1974	Environmental Quality Act (Act 127)
1977	Environmental Quality (Prescribed Premises) (Crude palm-Oil) Regulations
1978	Environmental Quality (Prescribed Premises) (Raw Natural Rubber) Regulations
1979	Environmental Quality (Sewage and Industrial Effluents) Regulations
1985	Environemtal Quality Act (Amendment)
1987	A Handbook of Environemtal Impact Assessment Guidelines
1989	Environmental Quality (Scheduled Wastes) Regulations Waters Act (Revised)
1993	Sewage Service Act (Act 508)
2009	Environmental Quality (Industrial Effluents) Regulations
2012	Environemtal Quality Act (Amendment)

以下とされている¹⁶⁾。ただし、日本での測定方法とは異なり、条件として30℃、3日間での酸素消費量となっている。さらに、下水・産業排水に関する規制の廃止後、2009年に新たに産業排水に関する環境規制が設けられるなど、時代に合わせた改訂等が進められている。環境質法も随時改定され、2012年には環境管理が強化された。

3.2. 河川水質モニタリングの実施概要

先述したように、現在マレーシアの環境保全に関する公的機関であるDOEにより、河川水質の現状やその経年変化を継続的に把握するために、モニタリングが毎年実施されている。その結果は、大気、騒音、地下水、海水の結果も含め、毎年Environmental Quality Reportとして報告されている。1979年の報告書¹⁷⁾には、水質モニタリングの具体的な目的として、以下4つが掲げられている。

- ・ 飲料水や漁業、灌漑など有益な利用の観点から、河川の監視を通じた有害物質に対する保障措置
- ・ 可能な限り早く是正措置を講じることができるように河川水質の変化を検出
- ・ 関連する規則に示される基準値の妥当性と有効性を評価
- ・ 河川流域内において実施される開発の影響を予測する上でのデータベースを提供

この目的に基づき1978年3月よりモニタリングが開始された。当初、マレー半島の河川のみが対象であったが、1984年末までにサラワク州とサバ州の河川も対象となった。調査年度によって、調査場所、地点数および試料数は多少異なるが、最新の環境報告書¹⁸⁾では、2015年度時点で477河川891地点の5,469試料について調べられている。

水質に関する重要な項目として、硝酸態窒素($\text{NO}_3\text{-N}$)、アンモニア態窒素($\text{NH}_3\text{-N}$)、水素イオン指数(pH)、BOD、 COD_{Cr} 、浮遊物質(SS)の6つが当初挙げられていたが、 $\text{NO}_3\text{-N}$ はのちに溶存酸素(DO)に置き換わった。これらの項目は、日本での生活環境の保全に関する環境基準の項目に相当する。このほか、人の健康に影響を与える有害物質に

該当する重金属類、シアン及び農薬については、いくつかの水試料を対象に調べられている。

水質の評価方法には、個々の項目で得られた値と基準値等を比較する方法があるが、1980年より重要な項目とされるDO(ただし、飽和度%として)、BOD、 COD_{Cr} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ (AN)、SSおよびpHの値を用い、河川水質汚濁の程度を総合的に判断するためのWater Quality Index(以下、WQI)を用いた評価が行われている。この方法では、各項目の測定値に応じたサブインデックス(SI)をAppendix 1に基づいて算出し、係数による重み付けを行なった数値を合計する(式1)。

$$\text{WQI} = 0.22 \times \text{SIDO} + 0.19 \times \text{SIBOD} + 0.16 \times \text{SICOD} + 0.15 \times \text{SIAN} + 0.16 \times \text{SISS} + 0.12 \times \text{SIpH} \quad (\text{式1})$$

WQI値は0から100までの数値で示され、値が81~100であれば清浄、60~80であればやや汚染、0~59であれば汚染の状態であると評価される。また、BODや $\text{NH}_3\text{-N}$ 、SSのサブインデックス値からも河川水質の汚染状況が評価されている(Table 2)。さらに、日本と同様に水域の利用目的に応じた類型(Table 3)に応じて、生活環境に関する17項目(Appendix 2)や重金属や農薬を含めた55項目について環境基準(National Water Quality Standards, NWQS)が定められている。

河川水質モニタリングでは、日本の環境省が実施しているものと同様に、決められた間隔で環境基準点において採水が行われ、水の物理化学性および生物学的特徴について調べられている。水質の化学測定方法は、米国公衆衛生協会(APHA)、米国水道工事協会(AWWA)および米国水質汚染防止連盟(WEF)が共同刊行した「水質及び排水標準検査方法」(Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater)⁹⁾に従っている。

3.3. マレーシアにおける河川水質の現状

2015年度のEnvironmental Quality Report¹⁸⁾では、水質調査を行った477河川のうち276河川(58%)において清浄、168河川(35%)においてや

Table 2 DOE water quality classification based on water quality index.

Sub index & water quality index	Index range		
	Clean	Slightly polluted	polluted
BOD	91-100	80-90	0-79
$\text{NH}_3\text{-N}$	92-100	71-91	0-70
SS	76-100	70-75	0-69
WQI	81-100	60-80	0-59

Table 3 Water classes and uses.

Class	Uses
Class I	Conservation of natural environment. Water Supply I - Practically no treatment necessary. Fishery I - Very sensitive aquatic species.
Class IIA	Water Supply II - Conventional treatment required. Fishery II - Sensitive aquatic species.
Class IIB	Recreational use with body contact.
Class III	Water Supply III - Extensive treatment required. Fishery III - Common, of economic value and tolerant species; livestock drinking.
Class IV	Irrigation
Class V	None of the above.

や汚染, 33 河川 (7%) において汚染の状態にあることが示されていた。過去 10 年 (2005~2015 年度) の経年変化を Fig. 2 に示す。清浄な河川の割合は 50~60% の間で推移しておりあまり変化はみられないが, 汚染の状態にある河川の割合は減少傾向にあり, やや汚染が見られる状態にある河川の割合は増えている。すなわち, 少しずつではあるが, 河川水質の汚染状況は改善傾向にあるといえる。

汚染の状態にあると評価された河川をみると, シンガポールと接しているマレー半島最南部ジョホール州の河川に集中して BOD や NH₃-N の汚染がみられた。また, 重金属類では, すべての試料においてカドミウム, 鉛, 亜鉛は Class II (水を供給する際に, 通常の浄水操作を必要とされるもの) の基準値以内であり, 水銀, クロム, ヒ素においても Class II の基準値と比較して 98.5% 以上の達成率であった。

過去には, BOD, NH₃-N および SS が汚染の指標として重要であった。BOD は十分に処理がなされ

ていない下水排水や農産物製造業からの排水に原因があるといわれている。NH₃-N は畜産や下水排水, SS は不適切な土木工事や土地開発に由来する。マレーシア全体におけるこれらの排出源別の割合をみると, BOD および NH₃-N 負荷量は浄化槽からの排水を含めた下水排水由来, SS 負荷量は養豚由来がそれぞれ全体の約半分か, それ以上を占めており, いずれの項目も下水排水と養豚を含めた負荷量で全体の 90% 以上を占めていた (Fig. 3)。

3.4. キナバタンガン川流域における水質の現状

3.4.1. 水質に関するこれまでの報告

2015 年度の Environmental Quality Report¹⁸⁾ によると, サバ州内には汚染の状態と判断された河川はなく, 44 河川 73 地点において清浄の状態であったが, 18 河川 35 地点においてやや汚染の状態であった。キナバタンガン川流域に相当する河川をみると, 支流の Karamuak 川, Koyah 川, Menanggul

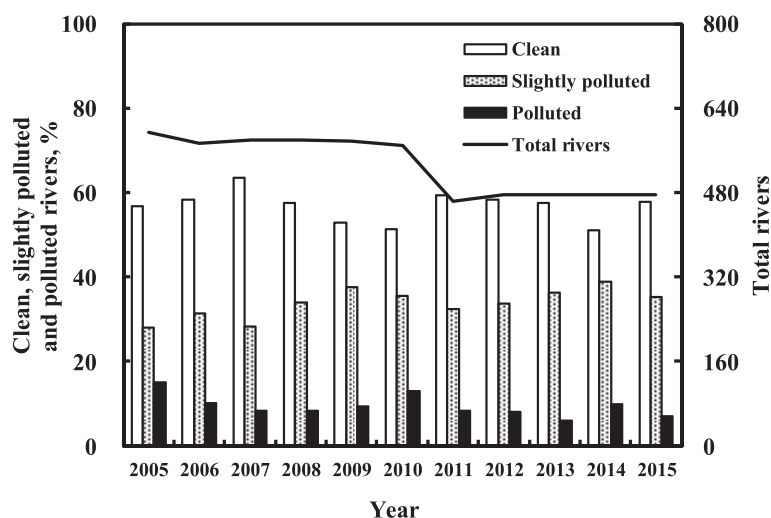


Fig. 2 Trend of river water quality in Malaysia (2005-2015)¹⁸⁾.

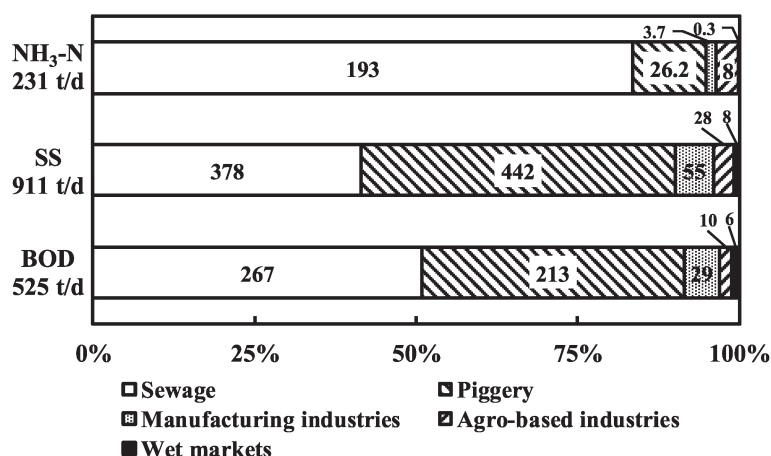


Fig. 3 Pollutant loads against water pollution sources in Malaysia (2015)¹⁸⁾.

川（各1地点）においてWQI値81～88であり、いずれも清浄と判断されたが、Kinabatangan川（3地点）でWQI値78とやや汚染の状態にあった。2014年度の結果¹⁹⁾と比較すると、いずれの河川においてもWQI値は低下しており、河川水質は悪化する傾向が示されたが、どの項目において水質が悪化しているのかは不明であった。また、サバ州での排出源別の汚濁負荷量を見ると、BODとSS負荷量は製造業と養豚由来、NH₃-N負荷量は下水由来が全体の大半を占めており、事業所および家庭由来の下水排水処理が水質の改善に向けて重要であるといえる。

一方、キナバタンガン川流域の河川水質に関するこれまでの学術論文は、あまり多くなかった。2004～2005年にかけて行われた下流域の調査結果では、平均WQI値は82であり清浄であったが、雨季・乾季の季節的な影響が見られた^{20,21)}。特に、COD_{Cr}およびSSは雨季に高く、降水による土壌流出の影響が示唆された。また、アブラヤシのプランテーション内の水路においてCOD_{Cr}は高く、ミル工場からの排水による影響が考えられた。また我々が2011～2012年に行った調査においても、流域にアブラヤシのプランテーションおよびミル工場を有する支流において、DOは一般的に魚介類が生息するうえで必要とされる3mg/Lを下回り、有機物の流入による酸素消費の影響が見られた⁶⁾。また、EC値や各種イオン濃度も高かった。同じ地域の水の同位体分析の結果より、パームプランテーション周辺の水路で採取された水は植生が十分繁茂している支流や河川の水よりも蒸発効果が大きいことが示されている²²⁾。そのため、蒸発による溶存イオン成分の濃縮効果も起きていることが推察されるが、プランテーションを有する支流とキナバタンガン川本流と比較すると無機イオン組成が異なることから、ミル

工場や住宅の排水などの影響と考えられた。

3.4.2. 現地調査の結果

重金属類を除いた現地水質調査の結果をTable 4に示す。水温およびpHは、ミル工場の処理排水を除いて、いずれの地点においても各々30℃および7.0前後であり、大きな違いはなかった。河川水のDOは、本流および支流を含めて1.9～4.4mg/Lの範囲にあった。各水温から推定される飽和溶存酸素の25～58%であり、いずれも低酸素状態であることを示した。先行研究でも、特に支流においてDOは低く、流域からの有機物供給と高水温による好気性微生物の活発な酸素消費が起きていると指摘されている⁶⁾。DOの低下は水生生物の呼吸を阻害し、嫌気条件下では窒息死させることになる²³⁾。また、酸素飽和度25～35%の水環境下では、水生昆虫などの大型無脊椎動物の出現数が減少する²⁴⁾。これらのことから、低酸素化によって、水生生物相が変化している可能性がある。支流のEC値を見ると、本流の値に比べて約2倍程度高かった。無機イオン成分濃度をみると、ECの高かった支流の河川水ではNO₃⁻濃度を除いて、いずれの濃度も高く、特にK⁺やCl⁻濃度は5～10倍程度高かった。今回行った調査の間にはスコールが起こったが、その時間も短く、雨量も少なかったことから、降水による希釈効果はあまりないと考えられる。そのため、過去の調査結果と同様に、支流の流域にみられるプランテーションやミル工場、住宅からの排水に由来する高濃度のイオン成分の流入が起きていると考えられる。一方、溶存有機物量を相対的に表すCOD_{Mn}は、本流よりも支流においてわずかに高くなる傾向が見られたが、いずれも20mg/L以下の低値であった。NH₄⁺濃度はいずれも検出限界値以下であり、NH₃-

Table 4 Summary of the surface water quality in the Lower Kinabatangan river basin in 2014.

Site	pH	DO mg/L	W.T. °C	EC µS/cm	Transpa rency	COD _{Mn}	COD _{Cr}	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
Main stream															
Jetty	7.4	4.4	30	119	4.4	10	N.M.	2.9	N.D.	2.6	5.2	4.9	2.8	2.2	7.5
Tandu Batu	7.0	2.7	30	99	8.2	12	N.M.	1.8	N.D.	1.9	3.2	2.2	2.8	1.8	5.8
Blanched river															
Pin	7.3	3.5	28	218	1.8	14	N.M.	5.2	N.D.	19.5	9.2	16.9	18.8	2.9	14.3
Takala	7.5	3.3	28	211	2.0	14	N.M.	10.5	N.D.	10.3	6.7	7.6	21.5	2.8	22.5
Tengengan Besar	7.2	1.9	29	185	4.2	11	N.M.	5.0	N.D.	17.4	4.5	2.4	36.7	3.3	15.5
Oxbow lake															
Tungog Lake	6.6	2.6	30	31	>30	15	N.M.	1.0	N.D.	0.8	1.3	1.2	2.7	2.1	7.3
Kelinanap lake	7.2	3.3	31	103	7.3	14	N.M.	1.3	N.D.	1.7	2.9	1.7	1.6	0.7	1.4
Treating palm oil mill effluent															
Pond	8.3	0.1	30	11240	N.M.	1165	1265	16.7	121	2848	474	75.6	1352	N.D.	92.0

N.M.: Not determined, ND: Not detected.

NのWQI値としても清浄の状態と判断された。マレーシア環境基準 (Appendix 2) と比較すると、NH₃-Nは自然環境保全の利用に相当するClass Iであったが、DOは飲用に高度な処理が必要とされるClass IIIまたは灌漑水利用としてのClass IVであった。

三日月湖の水質をみると、Tungog湖では透視度が30度以上でほぼ透明であったのに対し、Kelinanap湖では7度と低く、見た目にも茶色く濁っていた。これは、それぞれの湖の成立条件が影響している。Tungog湖は雨季の増水時にキナバタンガン川本流とつながるが、乾季の水位が低い時には河川から分離する。一方、Kelinanap湖は常に本流と接続している。そのため、Tungog湖は雨季に流入したSS成分は水が停滞する乾季に沈降することで透明となったが、Kelinanap湖では濁水した本流からの水塊の流れ込みにより常に濁っているといえる。Tungog湖においてECや各無機イオン濃度に加え、DOも低値であったが、湖内に繁茂している水草の一種オオサンショウモ (*Salvinia molesta*) による影響が考えられた。南アメリカ原産のオオサンショウモは栄養塩類を吸収除去する水草としてファイトレメディエーションにも用いられているが²⁵⁾、これにより水中の栄養塩類が吸収除去されることでEC値とともに低値となった。また、オオサンショウモを含めた浮葉植物から水中への酸素供給は少なく、さらに水面を覆うことで大気中酸素の溶解を抑制するため²⁶⁾、Tungog湖のDOを低下させていると考えられる。

パームミル工場排水で酸化池の曝気処理水の水質をみると、pHはややアルカリ性、DOは0.1 mg/Lであり、ECは河川水に比べて50倍以上高かった。NH₄⁺濃度は排水基準値内であったが、COD_{Cr}は排水基準である100 mg/Lよりも高く、再曝気による有機物の分解が必要とされる。無機イオン成分をみると、K⁺やCl⁻はどちらも1,000 mg/Lを超えた高濃度であった。アブラヤシのプランテーションを有する支流において、これらのイオン成分濃度が高かったことから、ミル工場からの排水が支流の無機イオン濃度に影響していることを示唆するものと考えられるが、今後の詳細な調査が必要とされる。

全ての調査地点において検出限界値以下であったCdを除き、その他の重金属が検出された (Table 5)。マレーシア環境基準 Class IV と比較すると、Tungog湖を除いたすべての地点においてFeの基準値 (5 mg/L) を超えていた。また、支流のNiとMn濃度は、他の地点よりも高かった。本研究では、

Table 5 Heavy metal concentrations in surface water from the Lower Kinabatangan river basin in 2014.

Site	Cu	Zn	Pb	Mn	Fe	Ni	Co	Cd
mg/L								
Main stream								
Jetty	0.005	0.03	0.004	0.11	5.5	0.011	0.002	N.D.
Tandu Batu	0.004	0.03	0.004	0.06	3.8	0.007	0.001	N.D.
Blanched river								
Pin	0.021	0.06	0.009	0.52	16.8	0.032	0.008	N.D.
Takala	0.016	0.05	0.012	0.45	11.9	0.020	0.006	N.D.
Tengengan Besar	0.009	0.05	0.008	0.38	7.8	0.028	0.004	N.D.
Oxbow lake								
Tungog Lake	0.001	0.05	0.002	0.03	0.4	0.001	N.D.	N.D.
Kelinanap lake	0.004	0.14	0.011	0.05	3.6	0.006	0.001	N.D.
Treated Palm Oil Mill Wastewater								
Pond	0.011	0.23	0.021	1.21	1.2	0.086	0.016	0.005

N.D.: Not detected.

重金属類の測定において、懸濁物を含めた前処理を行っている。そのため、懸濁物質に含有される重金属類を反映している可能性がある。そこで、懸濁物質質量を相対的に反映する透視度と重金属濃度との相関関係を調べた。このとき、透視度として極端な外れ値となる Tungog 湖の値は解析からは除外した。その結果、Fe 濃度との間には有意な負の相関関係 ($r = -0.889$, $p < 0.05$) がみられた。さらに、Fe 濃度と Mn, Ni, Cu, Co 濃度との間には、いずれも有意な正の相関関係 ($p < 0.05$) を示した。試料数が少ないため参考となるが、Fe は土壌鉱物を構成する主成分であることから、これら重金属類は懸濁物質を構成する土壌由来と考えられた。

3.5. 水質モニタリングにおける今後の課題

これまで、マレーシアの河川水質の現状について、サバ州キナバタンガン川下流域を中心に整理してきた。産業発展が進む中、マレーシアは河川水質を含め自然環境保全に向けた取り組みを展開してきた。スズ鉱山、天然ゴムやアブラヤシのプランテーション開発に伴う産業排水の水質は法規制により厳しく制限されており、マレーシア全体でみると河川水質が改善傾向にあることを示した。しかしながら、未だに下水排水や畜産排水による有機物やアンモニア態窒素による水質汚濁が見られる場所もあった。また、現地水質調査の結果、アブラヤシプランテーションを有する河川支流での汚濁や外来植物による三日月湖の水質不良が示された。

これらの結果から、キナバタンガン下流域ではいわゆる大規模な産業公害のような流域全体の水質汚染よりも、支流や三日月湖といった小水域における

水質汚染が課題となっており、これに対応した水質モニタリングの実施が必要と考えられる。特に、漁業やレクリエーションなどの地元の生計や公益に関連する場所では、定期的な監視が必要と考えられる。これは、専門家の協力の下に地元住民や NGO 等による住民参加による活動として展開されることが望まれる。特に日常的にキナバタンガン川と関わる地元住民にとって川や湖などの水環境は重要な生活の一部であり、行政の行っているモニタリングだけでは把握できない水環境やその変化を詳細にとらえることができる。これらを定期的実施・記録するとともに、成果を公開・発表することで、行政にとっても詳細な地域の水質状況に応じた施策に反映させることができると考えられる。これまで我々は、JICA 草の根技術協力事業の支援を受け、地元協同組合 KOPEL 内のユニットの一つとして、水質モニタリングを定期的実施してきている⁷⁾。今後もこうした活動の支援が行なわれるとともに、流域内でエコツーリズムを行っている他のグループとの環境モニタリングに関連した知識や技術の相互協力ネットワークが構築されることも求められる。さらに、現地住民のインタビューなどによる過去の状況を記録に残すことで、水質を含めた過去から現在までの水環境変遷の概要を知ることができる。関連して、長期的な水質変動の影響を反映する水生生物を用いた生物学的指標による評価を合わせて行うことも必要である。後者に関しては、日本では Biological Monitoring Working Party (BMWP) 平均スコア法²⁷⁾ が採用されているが、生物多様性が豊かで希少種や固有種が多く生息していると考えられるマレーシアでは独自の BMWP 版平均スコアが採用される

べきであり、そのための水質や生物種のデータベース作成から始める必要があると考えている。

4. おわりに

サバ州はマレーシアで唯一環境教育に関する政策、The Sabah Environmental Education Policy が 2009 年 4 月に制定されている。その目的は、サバ州の人々の環境保全意識を高め、持続可能な生活を実現すること、とされている。水質を含めた地元住民の主導による環境モニタリングは、水質を含めた自然環境の状態を科学的見地から理解することで、自然環境に対する態度や構造の変化をもたらし、生物多様性保全に配慮した生計活動が持続的に行われることが期待される。さらに、エコツーリズムに参加する観光客へ向けた質の高い環境教育にも活用されることで波及的な効果を得られると考えられる。

謝 辞

本研究は、2015 年度酪農学園大学共同研究の助成を受けたものである（採択番号 15-9）。本研究の実施にあたり、現地での河川水試料の採取に協力いただいたバトゥプティ村エコツーリズム協会 KOPEL 及び現地 NGO の Hutan の皆様、サバ大学での水質分析にご協力いただいた技術員の方にはお世話になった。ここに記して感謝の意を申し上げる。

引用文献

- 1) アジア大洋州局地域政策課, 2017. 目で見える ASEAN — ASEAN 経済統計基礎資料 —. URL : <http://www.mofa.go.jp/mofaj/files/000127169.pdf> (2017 年 10 月時点).
- 2) Secretariat of the Convention on Biological Diversity, 2001. Global Diversity Outlook. URL : <https://www.cbd.int/gbo/> (2017 年 10 月時点).
- 3) BBEC II Secretariat, 2012. Completion Report on the Bornean Biodiversity and Ecosystems Conservation (BBEC) Programme in Sabah, Malaysia. BBEC Publication, Kota Kinabalu, Malaysia.
- 4) World Wide Fund for Nature Malaysia (WWFNM), 1996. National Ecotourism Plan, Part 2 — Ecotourism Potential: Site listings. WWF Malaysia, Petaling Jay, Malaysia.
- 5) WWF, 2017. The Environmental Status of Borneo. WWF Malaysia, Petaling Jaya, Malaysia.
- 6) 真木知穂, 芦野友理奈, 峯藤裕司, 吉田剛司, 金子正美, 中谷暢丈, 2013. マレーシア, サバ州におけるパームプランテーションがキナバタンガン川の水質に与える影響. 酪農学園大学紀要 37(2), 139-146.
- 7) 金子正美, 小菅千絵, 中谷暢丈, 吉田剛司, 蒔田浩平, 赤松里香, 伊藤美和子, 峯藤裕司, Rosil Jukrana, 2013. 「キナバタンガン川下流域の生物多様性のための住民参加型村おこしプロジェクト」の概要と成果. 酪農学園大学紀要 38(1), 37-45.
- 8) 工業排水試験方法, 2013. JIS K 0102 : 2013.
- 9) Eaton, A. D., Clesceri, L. S., Rice, E. W., Greenberg, A.E., 2005. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21st ed. APHA-AWWA-WFE, Washington, D. C., USA.
- 10) 財団法人地球・人間環境フォーラム, 2000. 日系企業の海外活動にあたっての環境政策 (マレーシア編) ~「平成 11 年度日系企業の海外活動に係る環境配慮動向調査」報告書~. URL : <https://www.env.go.jp/earth/coop/oemjc/malay/j/contents.html> (2017 年 10 月時点).
- 11) Lim, W.Y., Aris, A.Z., Hanidza, T., Ismail, T., 2013. Spatial geochemical distribution and sources of heavy metals in the sediment of Langat river, western Peninsular Malaysia. Environmental Forensics 14, 133-145.
- 12) Chuan, G.K., 1982. Environmental impact of economic development in peninsular Malaysia: A review. Applied Geography 2, 3-16.
- 13) Balamurugan, G. Tin mining and sediment supply in peninsular Malaysia with special reference to the Kelang river basin. The Environmentalist 11(4), 281-291.
- 14) 柳憲一郎, 2013. アジア環境法の体系化に関する研究: 環境配慮制度を中心として. 明治大学社会科学研究所紀要 52(1), 227-260.
- 15) 李継堯, 2007. マレーシアの環境保全に対する意識調査. 地域政策研究 (高崎経済大学地域政策学会) 10(1), 71-88.
- 16) Er, A.C., Nor, A.R.M., Rostam, K., 2011. Palm oil milling wastes and sustainable development. American Journal of Applied Sciences 8(5), 436-440.
- 17) Bahagian Alam Dekitar, 1979. Laporan Tahunan Kualiti Alam Sekeliling 1979.

- Bahagian, Kuala Lumpur, Malaysia.
- 18) Department of Environment, 2015. Environmental Quality Report 2015. Omr Press Sdn. Bhd., Subang Jaya, Malaysia.
- 19) Department of Environment, 2014. Environmental Quality Report 2014. Omr Press Sdn. Bhd., Subang Jaya, Malaysia.
- 20) Harun, S., Dambul, R., Abdullah, M. H., Mohamed, M., 2014. Spatial and seasonal variations in surface water quality of the Lower Kinabatangan river catchment, Sabah, Malaysia. *Journal of Tropical Biology and Conservation* 11, 117-131.
- 21) Harun, S., Al-Shami, S.A., Dambul, R., Mohamed, M., Abdullah, M. H., 2015. Water quality and aquatic insects study at the Lower Kinabatangan river catchment, Sabah: In response to weak La Niña event. *Sains Malaysiana* 44 (4), 545-558.
- 22) Harun, S., Baker, A., Bradley, C., Pinay, G., Boomer, I., Liz Hamilton, R., 2015. Characterisation of dissolved organic matter in the Lower Kinabatangan River, Sabah, Malaysia. *Hydrology Research* 46(3), 411-428.
- 23) Dean, T.L., Richardson, J., 1999. Responses of seven species of native freshwater fish and a shrimp to low levels of dissolved oxygen. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research* 33, 99-106.
- 24) Connolly, N.M, Crossland, M.R., Pearson, R.G., 2004. Effect of low dissolved oxygen on survival, emergence, and drift of tropical stream macroinvertebrates. *Journal of the North American Benthological Society* 23(2), 251-270.
- 25) Reddy, K.R., De Busk, W.F., 1985. Nutrient removal potential of selected aquatic macrophytes. *Journal of Environmental Quality* 14(4), 459-462.
- 26) Caraco, N., Cole, J., Findlay, S., Wigand, C., 2006. Vascular plants as engineers of oxygen in aquatic systems. *BioScience* 56(3), 219-225.
- 27) 環境省, 2017. 「水生生物による水質評価法マニュアル — 日本版平均スコア法 —」及び「河川生物の絵解き検索」の公表について. URL : <http://www.env.go.jp/press/104101.html> (2017年10月時点).

Appendix 1 Best fit equations for the estimation of various subindex values.

Subindex for DO (in % saturation): SIDO

$$\begin{aligned} \text{SIDO} &= 0 && \text{for } x \leq 8 \\ &= 100 && \text{for } x \geq 92 \\ &= -0.395 + 0.030x^2 - 0.00020x^3 && \text{for } 8 < x < 92 \end{aligned}$$

Subindex for BOD: SIBOD

$$\begin{aligned} \text{SIBOD} &= 100.4 - 4.23x && \text{for } x \leq 5 \\ &= 108\exp^{-0.055x} - 0.1x && \text{for } x > 5 \end{aligned}$$

Subindex for COD: SICOD

$$\begin{aligned} \text{SICOD} &= -1.33x + 99.1 && \text{for } x \leq 20 \\ &= 103\exp^{-0.0157x} - 0.04x && \text{for } x > 20 \end{aligned}$$

Subindex for NH₃-N: SIAN

$$\begin{aligned} \text{SIAN} &= 100.5 - 105x && \text{for } x \leq 0.3 \\ &= 94\exp^{-0.573x} - 5 * |x - 2| && \text{for } 0.3 < x < 4 \\ &= 0 && \text{for } x \geq 4 \end{aligned}$$

Subindex for SS: SISS

$$\begin{aligned} \text{SISS} &= 97.5\exp^{-0.00676x} + 0.05x && \text{for } x \leq 100 \\ &= 71\exp^{-0.0061x} - 0.015x && \text{for } 100 < x < 1000 \\ &= 0 && \text{for } x \geq 1000 \end{aligned}$$

Subindex for pH: SIpH

$$\begin{aligned} \text{SIpH} &= 17.2 - 17.2x + 5.02x^2 && \text{for } x < 5.5 \\ &= -242 + 95.5x - 6.67x^2 && \text{for } 5.5 \leq x < 7 \\ &= -181 + 82.4x - 6.05x^2 && \text{for } 7 \leq x < 8.75 \\ &= 536 - 77.0x + 2.76x^2 && \text{for } x \geq 8.75 \end{aligned}$$

Appendix 2 National water quality standards for Malaysia.

Parameter	Unit	Class					
		I	IIA	IIB	III	IV	V
Ammonical Nitrogen	mg/L	0.1	0.3	0.3	0.9	2.7	>2.7
Biochemical Oxygen Demand	mg/L	1	3	3	6	12	>12
Chemical Oxygen Demand	mg/L	10	25	25	50	100	>100
Dissolve Oxygen	mg/L	7	5-7	5-7	3-5	<3	<1
pH	-	6.5-8.5	6-9	6-9	5-9	5-9	-
Colour	TCU	15	150	150	-	-	-
Electrical Conductivity*	$\mu S/cm$	1000	1000	-	-	6000	-
Floatables	-	N	N	N	-	-	-
Odour	-	N	N	N	-	-	-
Salinity	%	0.5	1	-	-	2	-
Taste	-	N	N	N	-	-	-
Total Dissolved Solid	mg/L	500	1000	-	-	4000	-
Total Suspended Solid	mg/L	25	50	50	150	300	300
Temperature	°C	-	Normal $\pm 2^\circ C$	-	Normal $\pm 2^\circ C$	-	-
Turbidity	NTU	5	50	50	-	-	-
Faecal Coliform**	count /100 mL	10	100	400	5000 (20000) ^a	5000 (20000) ^a	-
Total Coliform	count /100 mL	100	5000	5000	50000	50000	>50000

N: No visible floatable materials or debris, no objectional odour or no objectional taste

*: Related parameters, only one recommended for use

** : Geometric mean

^a: Maximum not to be exceeded

Abstract

The environment issues associated with development and industrialization occur, while nowadays Malaysia is developing rapidly. In this study, the current status of water quality in Malaysian rivers, especially in Lower Kinabatangan river basin, Sabah, was introduced, and the future perspectives of water quality monitoring were provided. River water quality in Malaysia tended to be gradually improved under the laws and regulations related to water quality management, but some rivers still remained polluted due to the effluents of sewage and piggery. Our field survey results indicated that river waters collected in those tributaries flowing through palm plantation areas from the Lower Kinabatangan river basin contained less dissolved oxygen and showed higher electrical conductivity with specific ionic composition. It was suggested that the effluent of palm oil mill plants may affect the water quality of tributaries. The lower dissolved oxygen level was observed in an oxbow lake, which might be caused by an invasive aquatic plant, *Salvinia molesta*. Therefore, it is required that detailed water quality monitoring should be conducted and necessary to take quick and appropriate actions. Furthermore, it is also required that the monitoring should be conducted by those local residents and non-governmental organizations (NGOs) with expertise of water quality and that a mutual information network of knowledge and technology among them within the basin should be constructed.

