

氏 名	<b>Muhammad Reza Cordova</b>
学位（専攻分野の名称）	博 士（農学）
学 位 記 番 号	乙 第 955 号
学位授与の日付	令和 3 年 3 月 17 日
学 位 論 文 題 目	<b>Study on macro and microplastics debris in Indonesian water: Current condition and problem</b>
論 文 審 査 委 員	主査 教 授・水産学博士 塩 本 明 弘 教 授・博士（水産科学） 千 葉 晋 教 授・博士（学術）、博士（生物資源学） 西 野 康 人

## 論文内容の要旨

### 1. BACKGROUND AND OBJECTIVE

#### Chapter 1. Introduction and Overview of the Study

Since the early 1950s, plastic production has risen exponentially and reached 368 million metric tons in 2019, and this does not include synthetic fibers, which accounted for 61 million tons in 2015. Plastics demand is projected to continue to grow in the near future, with production levels likely to double by 2025. Inadequate plastic waste disposal has contributed to increased freshwater, estuarine, and marine pollution. Around 19 million to 23 million tons of plastic waste reached the oceans in 2016, and marine plastic debris is forecasted could reach 53 million tons by 2030. Indonesia's vast coastline, huge population, and a high percentage of unmanaged waste are recipes that add substantial quantities of land-derived debris to oceans. Indonesia is considered the world's second-largest contributor to oceans after China. In response, Indonesia developed a national action plan to tackle marine plastic debris between 2017-2025 through several measures. The Indonesian government has pledged to allocate up to \$1 billion annually to reduce 70% of plastic waste in the Indonesian seas by 2025, to preserve the environment. The middle and long-term fate of macro and microplastics in the environment is unknown, as is its abundance and distribution in coastal ecosystems, particularly in Indonesia. Science is the key to getting the right alternative for managing plastic debris. Thus, monitoring data is key in formulating effective strategies to reduce land-derived debris. The aim of this research is to provide baseline data of plastics debris in Indonesian Sea, particularly to macro and microplastics. This data will be useful for the management of marine litter as has been stated in Indonesia's Presidential Decree No. 83 on Marine Debris Management. The study will address the following objectives (1) to provide in situ monitoring data on sources and inflow of debris from major Indonesian cities with high population

density and river discharge as a baseline to better formulate environmental policies in reducing marine debris; and (2) to investigate the abundance and distribution of microplastic from Indonesian marine ecosystem (in the water, sediment, and the marine organism).

To achieve the study's objectives, two studies were conducted to answer the first research lines and four studies to the second research lines. The first two studies are spatially, and temporally comprehensive marine debris monitoring in major Indonesian rivers carried out at river outlets leading to Jakarta Bay. Furthermore, four studies related to microplastics were carried out on the coast of Surabaya, mangrove areas in Muara Angke Wildlife Reserve, Sekotong coral reef area, and microplastic ingestion in blue panchax fish (*Aplocheilus* sp.).

## **2. RIVERINE PLASTIC DEBRIS TRANSPORT**

### **Chapter 2. Marine Debris Inflow from the Greater Jakarta Area, Indonesia**

The first land-derived debris monitoring was performed between June 2015 and June 2016, characterizing major sources and monthly variation of marine debris at nine river outlets in Jakarta Bay, Indonesia. The nine river outlets are from west to east: Dadap River in Tangerang, Angke, Pluit, Ciliwung, Kali Item, Koja, Cilincing, and Marunda Rivers in the capital city of Jakarta, and Bekasi River in Bekasi. Land-derived debris was collected using a 75 m-long and 1.5 m-deep net with a 5 cm mesh scale. River outlets have widths between 18-64.9 m or below our sampling net range. The net was installed 15 minutes along the river width and repeated 3-6 times depending on the river discharge. The debris then quantified by abundance, using a modified list of the NOAA Marine Debris Program datasheet, was classified into six types of debris (plastics, metal, glass, wood/paper, cloth/fiber, and others) and 19 categories of plastics.

From first monitoring land-derived debris, it is found that plastics are the most common debris entering Jakarta Bay, comprising 59% (abundance) or 37% (weight) of total debris. Styrofoam dominated plastic debris, demonstrating the importance of plastic and styrofoam elimination. Higher debris releases during the rainy season (December-February) reinforce the need to intensify clean-up activities. An average daily release of  $97,098 \pm 28,932$  products or  $23 \pm 7.10$  tons in Jakarta Bay was measured with slightly lower capital inputs than neighboring municipalities. Field monitoring data in the plastics group yields a daily plastic debris release of  $8.32 \pm 2.44$  tons from the Greater Jakarta area, 8-16 times less than global model estimates. A simple explanation is that rivers in the study area (in Jakarta) have floating net booms in place that reduce debris releases, one of the factors that are not captured in the global-scale models. However, there is a possibility of higher debris release in the field relative to global projections in other cities, given varying levels of local commitment to minimize land-derived debris. Plastics are the most common debris entering

Jakarta Bay combined with global marine debris models, field sampling at river sources serves as ground-truth evidence to refine global forecasts by taking local strategies in place to minimize marine debris.

### **Chapter 3. Marine Debris Inflow from Two Rivers Outlet into Jakarta Bay during COVID-19 Pandemic**

In March–April 2020, the measurements from the first monitoring were repeated in two out of nine river outlets (Cilincing and Marunda Rivers) in Jakarta Bay to determine the amount of debris entering the river's marine environment outlet in Jakarta as a result of the COVID-19 pandemic. Due to the lockdown situation, the analysis could not be repeated in all nine river outlets. During the COVID-19 pandemic, the abundance of daily debris releases at two sampling sites increased by 5%. At both locations, daily debris releases decreased by 23% in March from 2.30 to 1.78 tons per day and by 28% in April from 2.19 to 1.58 tons per day. Plastics, accounted for 43-47% by abundance or 50-62% by weight, remained the dominant debris entering the Bay of Jakarta in March-April 2020. The study data demonstrated the unprecedented presence and prevalence of personal protection equipments (PPEs) during the pandemic. The PPEs accounted for 16% of the river debris collected, were not present before the pandemic. Increased lightweight plastic-made PPEs that could move distances in environments with health and environmental issues underline the need for domestic PPE waste management, which varies from regulated and controlled medical facilities sources. Overall, monitoring data on major sources and monthly variations in land-derived debris release to Jakarta Bay advise stakeholders and policymakers to prioritize various forms of debris, plastics groups, and months of the year to eliminate land-derived debris from the Greater Jakarta area more effectively. Furthermore, data could help to evaluate efforts over recent years to minimize land-derived debris across riverine channels.

### **3. QUANTIFICATION AND IDENTIFICATION OF MICROPLASTICS IN MARINE ECOSYSTEM**

Microplastic (small plastic particle < 5mm) is recognized as an emerging problem in oceans and must be tackled through an intergovernmental process. It is important to develop comprehensive microplastic pollution data at different locations and environmental matrices, particularly in Indonesia's marine ecosystem. Various effects in marine environments and coastal fisheries, aquaculture, and human health will occur through microplastic contaminated seafood consumption. However, data on plastic pollution, particularly microplastic, is still inadequate, and research remains challenging due to limited equipment and a wide marine environment in the Indonesian Seas.

The sediment, water, and fish sample microplastic extraction procedures were adapted from the Guidelines for Harmonizing Ocean Surface Microplastic Monitoring Methods by implementing a modified flotation method and wet peroxide oxidation procedures. Possible particles had the following characteristics: particle size less than 5mm, homogeneous color, no cellular network, and unsegmented and unbranched. The shape composition, the counted microplastic, was divided into four categories: fragments, fibers, granules, and foam. The samples were categorized into different size classes. The recovered microplastic polymer forms were then described using an ATR FT-IR (Attenuated Total Reflection Fourier Transform Infrared) spectrometer.

#### **Chapter 4. Abundance and Characteristics of Floating Microplastics in the Northern Coastal Waters of Surabaya, Indonesia**

Floating microplastic in northern coastal waters of Surabaya was taken using a sterile HDPE bottle. Microplastic concentration in Surabaya's northern coastal waters ranged from 0.38 to 0.61 N/L, averaging 0.49 N/L. The highest microplastic abundance was obtained at the nearest ground station and, in turn, near the source of microplastic pollutant point. The lowest abundance was found in the mainland's farthest station. The dominance of foams and fragments in Surabaya's northern coastal waters showed that water microplastics result from a waste of population activity. The size ranges of microplastics 500-1000  $\mu\text{m}$  (48.54%) and 300-500  $\mu\text{m}$  (45.48%) indicate the state of microplastic particles that have not been deteriorated for a long time. Polystyrene was dominant relative to other forms of polymers, possibly due to the deterioration of the group's extensive waste activities (secondary microplastics).

#### **Chapter 5. Characterization of Microplastics in Mangrove Sediment of Muara Angke Wildlife Reserve, Indonesia**

Sediment samples in Muara Angke Wildlife Reserve were taken in the mangroves' inner and outer layers. Microplastics were found in all the stations in mangrove sediment of Muara Angke Wildlife Reserve, with an average of  $28.09 \pm 10.28$  particles per kg of dry sediment (n/kg). Sediments in the outside mangrove area contained more microplastics than the inside area. Foam form was the most dominant in all the samples and was found more abundant on the outside. More than half of microplastics were of size  $<1000 \mu\text{m}$ , and nearly 50% were polystyrenes. This polymer is widely used for food packaging, which is prone to be fragmented. Polypropylene and polyethylene form another 50% of microplastics, widely used for textiles and fishing gears. As Jakarta is the largest city in Indonesia, this microplastic dataset may be the benchmark for other mangroves around the country.

## **Chapter 6. Microplastic Pollution Distribution in Coral Reefs Sediment, Case Study Sekotong, West Nusa Tenggara**

Sediment samples in Sekotong by diving in the coral reef area. Microplastics concentration in coral reefs sediment in Sekotong ranged from 35 to 77 particles/kg, with an average of  $48.3 \pm 13.98$  particles/kg. The highest concentration was located in Gili Island's southwest (77 particles/kg). The microplastic types found were foam (41.20%), fragment (32.51%), granule (22.77%), and fiber (3.52%). The most frequent microplastics size ranged from more than 1000  $\mu\text{m}$  and was followed by a size range of 500-1000  $\mu\text{m}$ . Polymer analysis showed that microplastic found were composed of polystyrene, polyethylene, and polypropylene. This type of polymers indicates that the primary source of microplastics in the Sekotong coral reef sediment was styrofoam, food and beverage packages, and fishing devices.

## **Chapter 7. Microplastics Ingestion by Blue Panchax Fish (*Aplocheilus* sp.) from Ciliwung Estuary, Jakarta, Indonesia**

*Aplocheilus* sp. samples were collected randomly in North Jakarta's Ciliwung estuary and coastal region using a larva net. Moreover, floating microplastic in *Aplocheilus* sp. habitat (Ciliwung River Estuary and North Jakarta Coast) was taken using sterile manta trawl net. Different forms and sizes of microplastic were contained in the river flow of Ciliwung River Estuary ( $9.37 \pm 1.37$  particles/ $\text{m}^3$ ), North Jakarta coastal waters ( $8.48 \pm 9.43$  particles/ $\text{m}^3$ ), and 75% of *Aplocheilus* sp. (1.97 particles/individual). The microplastic size in *Aplocheilus* sp. was relatively small, ranging from 300 to 500  $\mu\text{m}$ . This small size suggests that fish have trouble distinguishing between their food and microplastics. Furthermore, the plastics were able to contain other contaminants.

## **4. CONCLUSIONS AND PERSPECTIVES**

### **Chapter 8. Conclusion and Recommendation**

The importance of long-term marine debris monitoring in major Indonesian cities provides critical information to minimize land-derived debris in Oceans. Plastics originating from land activities are predicted to become microplastic because the dominant macro- and microplastic forms found are plastic single-use types. Microplastic was found in all areas, in water, sediment, and selected marine organisms. Microplastics have pervaded relatively pristine habitats, including coral reef and mangrove areas, which may conflict with commercial fishing and aquaculture. Marine plastic debris, including microplastic, tends to reduce commercial fisheries and aquaculture production profitability through physical obstruction and destruction. Many marine species, including those

critical to the food supply, ingest microplastic. Humans eat marine plastic when the entire body, including the gut, is eaten, e.g., shellfish, sea snails, and anchovies. Food chain plastic contamination puts the fish product at risk of reduced reproductive success and growth, threatening fish stocks. Commercial fisheries industry sustainability, competitiveness, profitability, and safety are highly vulnerable to the effects of marine plastics, particularly with climate change and overfishing. Detailed research on the impact of plastic consumption on marine organisms, biomagnification, exposure, chemical toxicity, and socio-economy is recommended. Plastic pollution impacts coral reefs and mangrove economic viability, and thus preserving and protecting these areas will offer high economic benefits to local people using the marine and coastal ecosystem. However, plastics' possible social and economic effects on the marine and coastal ecosystem remains an open question. Investing in testing and analysis to resolve information gaps is, therefore, crucial. It is strongly suggested that plastic waste management be strengthened and that an environmentally friendly material be invented to replace synthetic plastics in the near future. A more reliable estimation of marine debris is a step towards achieving the Sustainable Development Goals 14.1 indicator to prevent and substantially reduce marine pollution, including marine debris, especially from land-based activities, by 2030. Accordingly, Indonesia's government has developed a National Action Plan, a policy action to tackle marine plastic debris. Until 2025, Indonesia's government will allocate up to \$1 billion per year to eliminate about 70 percent of plastic waste at sea. Other plastics waste sources, however, also lack Indonesia's government regulation. In order to quantify the effects of debris along with the Indonesian marine ecosystem, comprehensive studies, including large-scale, long-term, and detailed monitoring processes, are required.

It is imperative to invest in monitoring and research to address knowledge gaps and future subjects, e.g., (1) to understand the sources, pathways, and ecological impacts of marine debris using long-term field monitoring data; (2) to investigate the abundance and impact of microplastic from selected fish and invertebrate macrobenthic species in the Indonesian marine ecosystem; (3) to provide advice related to the management of plastic pollution in Indonesia; and (4) to understand societal and economic impacts of plastics on in Indonesian marine ecosystem.

## **(日本語の要旨)**

### **1. 背景と目的**

#### **第1章 諸言と概要**

1950年代初頭以来、プラスチックの生産量は飛躍的に増加し、2019年には3億6,800万トンに達した。これには、2015年に6,100万トンを占めた合成繊維は含まれていない。プラスチックの需要は近い将来増加し続けると予測されている。生産量は2025年までに2倍

になる可能性がある。不十分なプラスチック廃棄物処理は、淡水、河口域、および海洋における汚染の増加の一因となっている。2016年には約1900万から2300万トンのプラスチック廃棄物が海洋に負荷され、海洋のプラスチックゴミは2030年までに5300万トンに達すると予測されている。インドネシアの広大な海岸線、膨大な人口、および廃棄物処理が管理されていないことから、陸から海への大量のゴミが負荷されることとなる。インドネシアは、中国に次ぐ世界第2位のゴミ負荷国と見なされている。このため、インドネシアは、2017年から2025年の間にいくつかの措置を通じて海洋プラスチックゴミに取り組むための国家行動計画を策定した。インドネシア政府は、環境を保護するために、2025年までにインドネシア海のプラスチックゴミの70%を削減するために、年間最大10億ドルを割り当てることを約束した。環境中のマクロおよびマイクロプラスチックの中長期的な運命は不明であり、沿岸の生態系、特にインドネシアにおける存在量や分布は不明である。科学的な調査が、プラスチックゴミを管理するための適切な代替手段を取得するための鍵である。したがって、モニタリングデータは、陸上由来のゴミを減らすための効果的な戦略を策定する上で重要である。本研究の目的は、インドネシア海のプラスチックゴミ、特にマクロプラスチックとマイクロプラスチックの基礎的なデータを提供することである。このデータは、インドネシアの海洋ゴミ管理に関する大統領令第83号に記載されているように、海洋ゴミの管理に役立つであろう。本研究は、次の目的に取り組む。(1) 海洋ゴミを減らすための環境政策をより適切に策定するための基盤として、人口密度が高く河川流量が多いインドネシアの主要都市からのゴミの発生源と流入に関する調査をする。(2) インドネシアの海洋生態系（水、堆積物、海洋生物）からのマイクロプラスチックの存在量と分布を調査する。

研究目的を達成するために、河川からのプラスチックゴミの負荷に関する調査を実施し、さらに海洋生態系におけるマイクロプラスチックの定量と同定を実施した。前者の調査は、ジャカルタ湾につながる河川出口における空間的および時間的な海洋ゴミのモニタリングである。後者はマイクロプラスチックに関することであり、スラバヤ沿岸域、ムアラアンケ野生生物保護区のマングローブ、セコトン珊瑚礁においてマイクロプラスチックの調査が実施され、ブルーパンチャックス (*Aplocheilus* sp.) によるマイクロプラスチックの摂取についても調査された。

## 2. 河川からのプラスチックゴミの負荷

### 第2章 インドネシア、ジャカルタ地域からの海洋ゴミの流入

最初の陸上由来のゴミモニタリングは、2015年6月から2016年6月の間に実施され、インドネシアのジャカルタ湾にある9つの河川の出口で海洋ゴミの主要な発生源と月ごとの変動が明らかにされた。9つの河川は西から東に向かって、タンゲランのダダップ川、首都ジャカルタのアンケ川、プルイット川、チリウン川、カリアイテム川、コジャ川、チリンシ

ン川，並びにマルンダ川，そしてブカシのブカシ川である。陸上由来のゴミは，長さ 75m，深さ 1.5m，目合い 5cm のネットを使用して収集された。河川の流出口の幅は 18~64.9m であった。ネットは川幅に沿って 15 分間設置され，川の流量に応じて 3~6 回繰り返された。NOAA Marine Debris Program データシートに従い数えられたゴミは 6 種類（プラスチック類，金属，ガラス，木/紙，布/繊維，その他）に分類され，プラスチック類は 19 種類に分類された。

陸上由来のゴミのモニタリングから，プラスチックがジャカルタ湾に流入する最も多いゴミであり，すべてのゴミの 59%（数量）または 37%（重量）を占めていた。発泡スチロールがプラスチックゴミで優占し，プラスチックとくに発泡スチロールの除去の重要性を示している。雨季（12 月から 2 月）のゴミの放出が多いことは，清掃活動を強化する必要性を強調する。ジャカルタ湾でのゴミの 1 日の平均放出量は数量で  $97,098 \pm 28,932$  個，重量で  $23 \pm 7.10$  トンであった。プラスチック類の現場でのモニタリングデータによると，ジャカルタ地域からの毎日のプラスチックゴミの放出量が  $8.32 \pm 2.44$  トンであり，モデルを用いた推定値に比べて 8~16 倍低かった。調査地域（ジャカルタ）の河川には浮遊物を捉える網が設置されているためにゴミの放出を減らすからで，モデルでは捉えられていない要因の 1 つである。ただし，陸上由来のゴミを最小限に抑えるための地域の様々な取り組みを考えると，他の都市の包括的な取り組みと比較して，現場でのゴミの放出が多い可能性がある。プラスチックはジャカルタ湾に流入する最も一般的なゴミであり，海洋ゴミを最小限に抑えるための河川での調査はグローバルな取り組みにも貢献する。

### 第 3 章 COVID-19 パンデミック時における 2 つの河川からジャカルタ湾に流入する海洋ゴミ

COVID19 パンデミック時におけるジャカルタの河口域に流入するゴミの量を明らかにするために，2020 年 3 月から 4 月にかけて，ジャカルタ湾の 9 つの河川のうち 2 つの河川（チリンシン川とマルンダ川）の河口域でのモニタリングが実施された。ロックダウンのため，9 つの河川の河口域すべてで調査を実施することはできなかった。COVID-19 パンデミックの間，2 つの調査点での毎日のゴミの放出数は 5% 増加した。どちらの調査点でも，3 月の 1 日あたりのゴミの放出量は 2.30 トンから 1.78 トンに 23% 減少し，4 月には 2.19 トンから 1.58 トンに 28% 減少した。プラスチックは，数量で 43~47%，重量で 50~62% を占め，2020 年 3 月から 4 月にジャカルタ湾に流入する主要なゴミであった。調査結果は，パンデミックにおける個人用保護具（PPE）の前例のない存在量と拡がりを示した。収集された河川のゴミの 16% を占める PPE は，パンデミックの前には見られなかった。長い距離を移動できる軽量のプラスチック製 PPE の増加は，規制および管理されている医療道具とは異なる PPE 廃棄物管理の必要性を強調する。ジャカルタ湾への陸上由来のゴミの放出の主要な発生源と

月ごとの変動に関するモニタリングデータは、利害関係者と政策立案者に、ジャカルタ地域から陸上由来のゴミを排除するために、どのようなゴミやプラスチック類、および時期(月)を優先すればよいかを決めるうえで役にたつ。さらに、データは、河川における陸上由来のゴミを最小限に抑えるための近年の取り組みを評価するのに役立つ可能性がある。

### 3. 海洋生態系におけるマイクロプラスチックの定量と同定

マイクロプラスチック(5mm未満の小さなプラスチック粒子)は、海洋で新たに発生している問題として認識されており、政府間を通じて取り組む必要がある。特にインドネシアの海洋生態系において、さまざまな場所と環境で包括的なマイクロプラスチック汚染データを収集することが重要である。マイクロプラスチックで汚染されたシーフードの消費により、海洋環境や沿岸漁業、水産養殖、人間の健康にさまざまな影響を及ぼすだろう。しかし、プラスチック汚染、特にマイクロプラスチックに関するデータは不十分であり、限られた設備やインドネシア海の多様な環境のために研究は困難である。

堆積物、水、および魚のサンプルのマイクロプラスチック抽出手順は、改良浮遊法と湿式過酸化水素酸化法によった(Guidelines for Harmonizing Ocean Surface Microplastic Monitoring Methods)。粒子には次の特徴が見られた。粒子サイズが5mm未満、均一な色、繋がっていない、分岐していない、である。数えられたマイクロプラスチックの形状は、fragments(破片状)、fibers(繊維状)、granules(粒状)、foam(泡状)の4つのカテゴリに分類された。サンプルはさまざまなサイズに分類された。収集されたマイクロプラスチックの材質は、ATR FT-IR(減衰全反射フーリエ変換赤外)分光計を用いて調べられた。

## 第4章 インドネシア、スラバヤの北部沿岸域におけるマイクロプラスチックの数量と特性

スラバヤの北部沿岸域の浮遊マイクロプラスチックは、滅菌HDPEボトルを使用して採取された。スラバヤの北部沿岸域のマイクロプラスチック濃度は0.38から0.61N(個)/Lで、平均0.49 N/Lであった。マイクロプラスチックの最大数は、陸地に最も近い調査点で得られ、マイクロプラスチック汚染の発生源の近くであった。最少数は、陸地から最も遠い調査点で見つかった。スラバヤの北部沿岸域においてfoamとfragmentsが多かったことは、マイクロプラスチックが活発な人間活動に起因することを示している。サイズが500~1000 $\mu$ m(48.54%)と300~500 $\mu$ m(45.48%)のマイクロプラスチックは、マイクロプラスチックが長期間劣化していないことを示している。ポリスチレンが他のプラスチック類に比べて優占していた。

## 第5章 インドネシア、ムアラアンケ野生生物保護区のマングローブ堆積物中のマイクロプラスチックの特徴

ムアラアンケ野生生物保護区の堆積物サンプルは、マングローブの内側と外側で採取された。マイクロプラスチックは、ムアラアンケ野生生物保護区のマングローブ堆積物のすべての調査点でみられ、乾燥堆積物 1 kg あたり平均  $28.09 \pm 10.28$  粒子 (n/kg) であった。マングローブの外側の堆積物には、内側よりも多くのマイクロプラスチックが含まれていた。foam がすべてのサンプルで優占し、外側の方でより多く見られた。マイクロプラスチックの半分以上は  $1000\mu\text{m}$  未満のサイズで、50%近くがポリスチレンであった。ポリスチレンは、断片化しやすい食品包装に広く使用されている。マイクロプラスチックの残りの 50%は、ポリプロピレンとポリエチレンであり、繊維や漁具に広く使用されている。ジャカルタはインドネシア最大の都市であるため、このマイクロプラスチックデータは、全国の他のマングローブでの基準となるだろう。

## 第6章 サンゴ礁堆積物中のマイクロプラスチック汚染分布、西ヌサテンガラの子コトンのケーススタディ

セコトンの堆積物はサンゴ礁で潜って採取された。セコトンのサンゴ礁堆積物中のマイクロプラスチック濃度は 35 から 77 粒子/kg で、平均  $48.3 \pm 13.98$  粒子/kg であった。最大濃度はギリ島の南西でみられた (77 粒子/kg)。見つかったマイクロプラスチックの種類は、foam (41.20%), fragments (32.51%), granule (22.77%), および fiber (3.52%) であった。最も多くみつかったマイクロプラスチックのサイズは  $1000\mu\text{m}$  以上であり、 $500\sim 1000\mu\text{m}$  のサイズがそれに続いた。見つかったマイクロプラスチックの材質は、ポリスチレン、ポリエチレン、およびポリプロピレンであった。このことは、セコトンのサンゴ礁堆積物中のマイクロプラスチックの主な供給源が発泡スチロール、食品と飲料パッケージ、および釣り道具であったことを示している。

## 第7章 インドネシア、ジャカルタのチリウン河口からのブルーパンチャックス (*Aplocheilus* sp.) によるマイクロプラスチックの摂取

*Aplocheilus* sp. のサンプルは、北ジャカルタのチリウン河口と沿岸域で稚魚ネットを用いて収集された。さらに、*Aplocheilus* sp. の生息地 (チリウン川河口と北ジャカルタ海岸) の浮遊マイクロプラスチックは、無菌のマントロールネットを用いて採取された。様々な形態とサイズのマイクロプラスチックが、チリウン河口 ( $9.37 \pm 1.37$  粒子/ $\text{m}^3$ )、北ジャカルタ沿岸域 ( $8.48 \pm 9.43$  粒子/ $\text{m}^3$ )、および 75% の *Aplocheilus* sp. (1.97 粒子/個体) でみられた。*Aplocheilus* sp. のマイクロプラスチックのサイズは比較的小さく、 $300$  から  $500\mu\text{m}$  であった。この小さなサイズは、魚が餌とマイクロプラスチックを区別するのが難しいことを示

唆している。さらに、マイクロプラスチックは他の汚染物質を含んでいたかもしれない。

#### 4. 結論と展望

### 第8章 結論と推奨

インドネシアの主要都市における長期の海洋ゴミモニタリングは、海洋の陸上由来のゴミを最小限に抑えるための重要な情報を提供する。発見された主なマクロおよびマイクロプラスチックは使い捨てであるため、陸上由来のプラスチックはマイクロプラスチックになると予測される。マイクロプラスチックは、水、堆積物、および海洋生物で見つかった。マイクロプラスチックは、サンゴ礁やマングローブなど、比較的手付かずの生息地に浸透しており、漁業や水産養殖に悪い影響を与える可能性がある。マイクロプラスチックを含む海洋プラスチックゴミは、腸閉塞などにより、漁業や養殖生産の収益性を低下させる傾向がある。食料供給に不可欠なものを含む多くの海洋生物は、マイクロプラスチックを摂取する。人が貝類やアンチョビなどの内臓を含むすべてを食べると、海洋プラスチックを食べたことになる。食物連鎖のプラスチック汚染は、魚類の繁殖と成長へのリスクを高め、魚類資源を減少させることとなる。漁業の持続可能性、競争力、収益性、および安全性は、海洋プラスチックの影響に対して非常に脆弱である。プラスチックの消費が海洋生物に与える影響、生物濃縮、曝露、化学的毒性、社会経済に関する詳細な研究が望まれる。プラスチック汚染はサンゴ礁とマングローブの経済に影響を与えるので、これらの地域を保存し、保護することで、海洋と沿岸の生態系を利用する地元の人々に高い経済的利益をもたらすだろう。しかし、プラスチックが海洋および沿岸の生態系に及ぼす社会的および経済的影響は、未解決のままである。それで、知見不足を解決するための調査や分析に力を注ぐことは非常に重要である。プラスチック廃棄物管理を強化し、近い将来、合成プラスチックに代わる環境に優しい材料を発明することが強く望まれる。海洋ゴミについての信頼性の高い評価は、2030年までに、特に陸上由来の海洋ゴミを含む海洋汚染を防止し、削減するための持続可能な開発目標の14.1を達成するための一歩である。インドネシア政府は海洋プラスチックゴミに取り組むため、国家行動計画を策定した。2025年までに、海上でのプラスチックゴミの約70%を取り除くために、年間最大10億ドルを割り当てる予定である。しかしながら、他のプラスチック廃棄物がインドネシア政府の規制から漏れている。インドネシアの海洋生態系とともにゴミの影響を定量化するためには、大規模で長期的かつ詳細なモニタリングを含む包括的な研究が必要である。

知見の不足と将来の課題に対処するために、モニタリングと研究に継続することが不可欠である。今後の課題としては、(1) 長期の現場でのモニタリングデータを使用して、海洋ゴミの発生源、経路、および生態学的影響を理解すること、(2) インドネシアの海洋生態系における魚類や大型底生生物種のマイクロプラスチックの含有量や影響を調査すること、(3)

インドネシアのプラスチック汚染の管理に科学的なアドバイスをすること，(4) インドネシアの海洋生態系におけるプラスチックの社会的および経済的影響を理解すること，が挙げられる。

## 審査報告概要

世界第 2 位の海洋へのゴミ負荷国であるインドネシアの水域におけるプラスチックゴミとくにマイクロプラスチックの分布や挙動は不明であった。都市から海洋に流入するゴミの量や種類をモニタリングした結果，プラスチックが数量で過半を占め，発泡スチロールが最も多いプラスチックゴミであった。COVID-19 パンデミック時には，マスクなどの個人用保護具が多く見られたという特徴も明らかになった。インドネシアの沿岸域，マングローブやサンゴ礁の堆積物，海洋生物中のマイクロプラスチック（5mm 未満の小さなプラスチック粒子）の存在量と分布を調査し，いずれについても初めて確認された。マイクロプラスチックは，サンゴ礁やマングローブなど，比較的手付かずの場所にも浸透しており，漁業や水産養殖に悪影響を及ぼす可能性が示された。

本論文は世界的にも大きな関心が寄せられている海洋におけるマイクロプラスチックの問題の解決に大いに貢献する研究であり，研究成果等を総合的に評価した結果，審査員一同は博士（農学）の学位を授与する価値があると判断した。