

CONTENTS—目次

G20を終えて

～海洋マイクロプラスチックについて

九州大学応用力学研究所 教授 磯辺 篤彦 …… 1～3

水中音響機器の開発と将来展望

株式会社アクアサウンド 代表取締役会長

東京海洋大学客員研究員 水産学博士 笹倉 豊喜 …… 3～4

G20を終えて ～海洋マイクロプラスチックについて

九州大学応用力学研究所 教授 磯辺 篤彦

海洋マイクロプラスチックの生成

安価で軽量、そして丈夫な材質であるプラスチックは、日常で目にするだけでも包装材料や容器など多種多様に加工され、私たちの暮らしを快適で便利なものになっている。ところが、日常生活から視野を広げて地球環境といった観点から眺めれば、このようなプラスチックの利点は、ことごとく欠点なのである。安価ゆえに大量に消費され安易に破棄されるプラスチックは、現在では、世界中で年間約3,000万トンが適正に処理されず外に捨てられ、そして、このうちの15～40%が海に流出する¹⁾。海に直接捨てられるプラスチックごみは、海洋ごみ（漂流ごみや漂着ごみ）の約20%程度（個数比、重量比とも）とされ²⁾、残りは街中で不用意に捨てられたプラスチックごみが小さな川に入り、そのうち大きな川に合流して、やがて海に流れ出ていく³⁾。軽いプラスチックであれば、ひとたび海に流出すれば、海流や風に乗って容易に世界中に散らばっていくだろう。また、腐食分解せず丈夫なプラスチックは、細かく碎けることはあっても、地球から消えて無くなることがない。

このように、プラスチックは海洋ごみとなる要件を十二分に満たしており、実際に個数比にして海岸漂着ごみの約70%はプラスチックなのである⁴⁾。2015年エルマウ以降のG7サミットや2019年G20サミットなど、最近になって様々な国際的枠組みの中で海洋プラスチックごみに対する懸念が表明されている。

さて、海岸に漂着したプラスチックごみを半年ほど放置しておけば、紫外線などによる劣化が進行する⁵⁾。海岸漂着したプラスチックゴミが海へ再漂流するまで、平均で約半年かかるとの観測結果⁶⁾もあって、この期間は漂着プラスチックが劣化するのに十分な時間なのである。劣化したプラスチックごみは波に洗われ、そして砂との摩擦など刺激が加わることで、次第に細かく碎けていくのだろう。同じ期間を陸に置いたものに比べ、海中に置いた場合にプラスチック劣化の進行は遅い⁵⁾。そもそも海中での物理的な刺激は、海岸に比べ大きくはない。これらのことより、マイクロプラスチック（5mm以下となった微細プラスチック片；図1）は海に漂流中に生成されるのではなく、主として漂着後の海岸であると考えられる。細かく碎けたプラスチック片にも劣化や破砕は進行し、さらに細かな小片へと変化していくのであろう。このように、プラスチックごみが漂流と漂着、そして再漂流を繰り返すことで、次第に細かなマイクロプラ

スチックが作られていく。プラスチック表面への化学汚染物質の吸着と誤食した海洋生物体内での脱着や、あるいは栄養にもならないプラスチックを摂取することの負担（粒子毒性）に関する実験報告が、最近になって数多く発表されている⁷⁾。

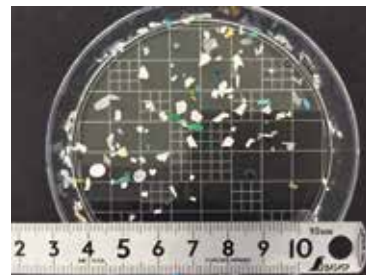


図1 山陰沖で採取された浮遊マイクロプラスチック

海洋マイクロプラスチックの現状

いま実際の海には、それほど多くのマイクロプラスチックが浮遊しているのだろうか。私たちの研究グループは、環境省から委託を受けて、日本周辺を中心とした北西太平洋に5隻の船を派遣し、浮遊マイクロプラスチック量の調査を毎年70～100箇所で行なってきた。これ以外にも、私たちは南極海から東京に至る太平洋縦断調査を実施した。海に浮遊するマイクロプラスチックは、船から目合い0.3mmの網を水平方向に曳きつつ、網を通過した海水ごとマイクロプラスチックをこし採る方法で採取する。浮遊マイクロプラスチックは、ほとんどがポリエチレンやポリプロピレンで海水よりも軽いため、網は海面近く（海面から深さ1m程度）に固定する。

これらの調査によって、日本近海の東アジア海域は、浮遊マイクロプラスチックのホット・スポットであることがわかった⁸⁾。海面近くの海水1m当たりの浮遊個数（浮遊密度）は3.7個を数え、この値は他海域と比べて桁違いに多い（表1）。水深方向に積分をした海面1km当たりの浮遊個数に換算しても、世界の海洋における平均値の27倍の浮遊量である（図2）。また、生活圏から最も遠い南極海ですら、マイクロプラスチックの浮遊が確認された⁹⁾。もはや世界中でプラスチック片が浮遊しない海など存在しないのであろう。実際に、太平洋や大西洋、あるいはインド洋の中央であろうと、浮遊するマイクロプラスチックが発見されている¹⁰⁾。

表1 マイクロプラスチックの観測浮遊密度

海域	浮遊密度(個 m ⁻³)
東アジア海域	3.70
北大西洋(収束域)	1.70
瀬戸内海	0.39
北極海	0.34
地中海	0.15
北太平洋	0.12
南極海	0.031

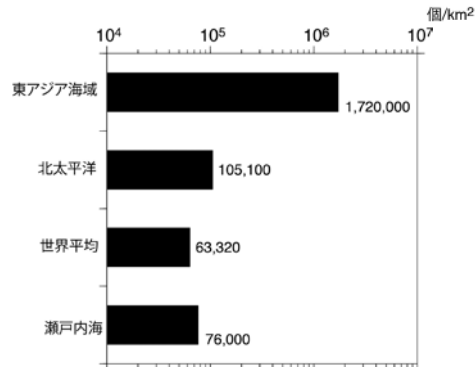


図2 海表面1km²あたりに浮遊するマイクロプラスチックの浮遊個数

50年後の予測浮遊量

最近になって私たちは、現在のマイクロプラスチック浮遊量をコンピュータ・シミュレーションで再現し、さらに50年先の太平洋での浮遊量を予測した²⁾。別のシミュレーションで計算しておいた海流と波(ストークスドリフト: 波向き方向に発生する緩やかな流れ)を太平洋全域に与え、ここにマイクロプラスチックに見立てた仮想粒子を流すシミュレーションである。陸から海に向けて、太平洋周辺国の廃棄プラスチック量に比例させた数で仮想粒子を投入して、その行方を追跡した。シミュレーションでは、最近までの観測結果と整合するよう、3年程度の時間規模で、マイクロプラスチックが海の表層から消失する過程を組み込んでいる。

消失過程の詳細は現時点では不明である。海面近くを浮遊するマイクロプラスチックは、さらに網目を抜けるほど細くなって、なお海洋に浮遊しているのかもしれない。あるいは生物付着を経て海底に沈降するか、砂浜や海水に吸収されるか、いずれ腐食分解しないプラスチックであれば地球のどこかに滞留しているはずであるが、私たちはその行方を見失っているのである。

シミュレーションは、廃棄プラスチックの海洋流出がこのまま続くならば、日本近海や北太平洋中央部の広い範囲で、2060年までに海面近くの浮遊マイクロプラ

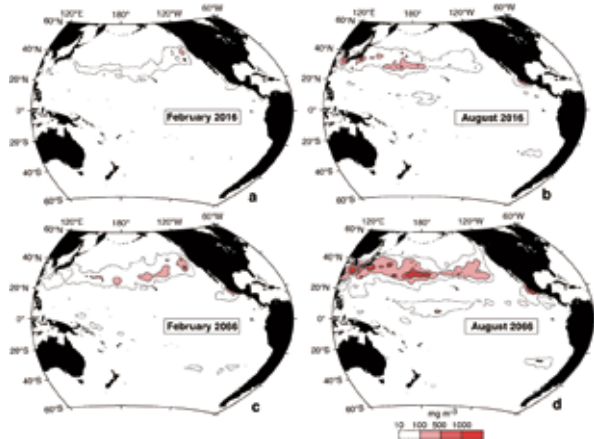


図3 シミュレーションで求めた海表面に浮遊するマイクロプラスチック(サイズが0.3mm以上、5mm以下)の重量濃度分布。上段は2016年現在で下段は50年後。左が2月で、右は8月の分布を示す。

スチック濃度が1g/m³を超えることを示唆した(図3)。実のところ、最近まで発表された多くの室内実験で、生物に影響が出始める浮遊マイクロプラスチックの濃度は1g/m³程度からなのである。ただし、実験のほとんどは、観測やシミュレーションの対象となったプラスチック片(>0.3mm)より、一桁から四桁以上小さな粒を使用している。実験で用いるほど小さなマイクロプラスチックを海でも監視し、浮遊量の将来を予測することが、今後海洋生物への影響を結論づけるためには必要である。しかし、数μmやナノレベルまで細かく砕けたプラスチックが、実際の海で本当に数多く浮遊しているのか、今はまだよくわかっていない。このような小さなプラスチック片を観測する方法が確立していないのが現状である。

海洋プラスチック汚染の軽減に向けて

我が国では、毎年、約900万トンの廃棄プラスチックが回収され、リサイクルや焼却処分、あるいは埋め立て処理に回されている⁸⁾。しかし、年間廃棄量の1~2%に当たる14万トンの廃棄プラスチックは、毎年、環境中に流出すると試算されている¹¹⁾。一方で、世界の海洋に漂流するプラスチックごみの総重量は、25万トン程度とされる¹²⁾。14万トンの全てが海洋に漏出するわけではないにせよ、決して無視できる量ではない。一般論として50%を90%に高めることは可能であっても、99%を100%に上げることは、コストを勘案しても簡単ではないだろう。我が国において廃棄プラスチックの回収率をこれ以上高めることは期待できず、新素材への転換もすぐには困難であるならば、プラスチック(まずは使い捨て)の使用量を削減するよりほか当面の方策はない。我が国のみならず、どの国であっても、いずれ回収率の向上は頭打ちになって、プラスチック使用量の削減は避けられないであろう。

一方で、プラスチックは富裕層の贅沢品ではなく、安価で丈夫、そして清潔であったからこそ広く世界に普及したことは留意すべきである。拙速なプラスチック使用の規制が、高コストで不衛生な日用品の利用を経済的弱者に強いるようでは、持続的なプラスチック削減など不可能だろう。プラスチックの使用削減に先進国は耐えられても、中進国・発展途上国にとって、プラスチックを使わないリスクもまた大きいかもしれない。それでも現状での廃棄プラスチック量をみる限り、中進国・発展途上国における排出量の大幅な削減が、海洋プラスチック汚染の回避には必要なのである。

海洋プラスチック汚染と地球温暖化は、問題の構造がよく似ている。どちらも人類の廃棄物による地球環境の変質である。これまでの地球温暖化に対する取り組みが、海洋プラスチック汚染の回避に指針を与えるだろう。今後のプラスチック削減には、気候変動に関する政府間パネルのような、研究者や行政が参加する国際機関が必要ではないか。ここにおいて、最新の科学的知見を基盤に、プラスチックを使うリスクと使わないリスクを最小化できるよう、持続的なプラスチック削減へ向けた行動計画が策定されるべきである。そして2019年のG20は、発展途上国・中進国を巻き込んだ国際合意形成の第一歩であった。

参考文献

- 1) Jambeck, J. R. et al. (2015), Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*, 347, 768-771.
- 2) Isobe, A. et al. (2019), Abundance of non-conservative microplastics in the upper ocean from 1957 to 2066. *Nature Communications*, 10, 417.
- 3) Lebreton et al., (2017), River plastic emissions to the world's oceans. *Nature Communications*, 8:15611.
- 4) Derraik, J. G. B. (2002), The pollution of the marine environment by plastic debris: a review. *Marine Pollution Bulletin*, 44, 842-852.

- 5) Andrady, A. L. (2011), Microplastics in the marine environment. Marine Pollution Bulletin, 62, 1596-1606.
- 6) Kataoka, T. et al. (2013), Analysis of a beach as a time-invariant linear input/output system of marine litter. Marine Pollution Bulletin, 77, 266-273.
- 7) de Sá, L.C. et al. (2018), Studies of the effects of microplastics on aquatic organisms: What do we know and where should we focus our efforts in the future? Sci. Total Environ. 645, 1029-1039.
- 8) Isobe, A. et al. (2015), East Asian seas: a hot spot of pelagic microplastics. Marine Pollution Bulletin, 101, 618-623.
- 9) Isobe, A. et al. (2017), Microplastics in the Southern Ocean. Marine Pollution Bulletin, 114, 623-626.
- 10) Cózar, A. et al. (2014), Plastic debris in the open ocean. PNAS, 111, 10239-10244.
- 11) プラスチック循環利用協会 (2018), 2017年プラスチック製品の生産・廃棄・再資源化・処理処分の状況マテリアルフロー図 <https://www.pwmi.or.jp/pdf/panf2.pdf>
- 12) Eriksen, M. et al. 2014, Plastic pollution in the world's oceans: More than 5 trillion plastic pieces weighing over 250,000 tons afloat at sea. PLOS ONE, 9 e111913.

水中音響機器の開発と将来展望

株式会社アクアサウンド 代表取締役会長 東京海洋大学客員研究員 水産学博士 ささくら とよき
笹倉 豊喜

まえがき

水中音響機器とは、水中の音を聞いたり、水中で超音波を発信するピンガーと呼ばれる装置やデバイスのことです。株式会社アクアサウンドではイルカの音を聞いて彼らの生態を研究する研究者のための装置や、カツオがどのような回遊経路をたどっているかなどを調査するデバイスを開発しています。今回は開発している水中音響機器の紹介やその装置で解明した生物の生態や行動の一部を紹介します。また、3,000万年前から水中音響を使用しているイルカたちが、我々人間が開発した水中音響機器をどのように見ているかを想像してみました。

水中音響機器

水中音響機器は大きく2つに分類できます。1つは図1に示すようなイルカやクジラなどの音を聞く水中録音装置と呼ばれる装置で、これらのことをパッシブ（受信専用）音響装置と言います。もう1つは、図2に示すような水中で自から音を出し、そのデバイスをカツオなどに装着することによりカツオの行動を追跡しようとするアクティブ（送信機能あり）音響デバイスというものがあります。弊社ではその両方とも開発し販売しておりますが、世界でもその両方の装置を開発販売している会社は希です。これらを使用する人は主に海洋関係の研究者ですが、網などにピンガーを取り付けて使用する漁業者もユーザーの一人です。

水中音響機器を使用したらどんなことができるのでしょうか。具体的な例を紹介しましょう。小型の水中録音装置を沖縄の海に沈めておきます。パチパチと天ぷらを揚げるような音が聞こえます。この音は沖縄の海に生息するテッポウエビという小型のエビがハサミを鳴らしている音です。テッポウエビが指パッチンをしているのです。音を出している目的は自分の縄張りを主張したり、異性を惹きつけるためだと言われています。この指パッチン音は結構うるさくて、我々がイルカの音や小さな魚の音を録音したいときには邪魔になります。だからこの音を天ぷらノイ

ズなどということもあります。イルカの音はピューピューと口笛のような音や、ドドドドという機関銃のような音もあります。

イルカの出す音は人間が聞こえる音の周波数よりもはるかに高い周波数の音まで出しており、音を出す目的は家族や仲間とのコミュニケーションのためのほか、エサである小魚を探知する魚群探知機のような目的で使用しています。鯨の音はボー、と船の汽笛のような低い音があります。この音は海の中では数十kmから100km以上届くと言われており、やはり仲間とのコミュニケーションや危険を知らせるための音だと言われています。また、遠くにいる恋人と遠距離恋愛のラブコールかもしれません。100km離れた恋人に会いに行くには鯨が全速力で泳いだとしても10時間以上もかかるとは思いますが…。

あまりみなさんが聞きなれない音としてジュゴンの鳴き声があります。ジュゴンはピヨピヨと小鳥のさえずり声のような細かい声で鳴きます、体重は数百キロもある大きな哺乳類なのに。日本には数少ない棲息しか確認されていませんが、タイやオーストラリアには数多くのジュゴンが棲息していて、一大ハーレムを形成しています。日本の水族館では鳥羽水族館でジュゴンが飼われています。世界でもわずか4ヶ所の水族館しかジュゴンを飼っておらず、その声を聞くことは極めて難しいわけですが、我々は沖縄で棲息しているジュゴンの音を聞くための水中録音機を開発を行っており、幸いにもジュゴンの鳴き声の録音に成功しています。一方、小さな魚にも鳴く魚がいます。代表的な魚はグチでしょう。グチはグーグーと鳴いてまさに愚痴をこぼしています。愚痴を言う魚だからグチという名が付いたとか。

水中音のもう一つのものは生物の発する音ではなく人工的な音です。人工の音とは水中での工事音です。近年人工島の埋め立てや海上風車の建設などが増えてきておりその際に工事音が発生します。水中での工事音は空中のそれに比べてはるかに遠い距離伝搬するので、その音が水中生物にどんな影響を及ぼしているかを知ることは環境



図1 水中の音を聴く商品



図2 超音波を発する商品

問題として重要なことです。海中の人工的な騒音からグチの愚痴まで広い範囲の音を録音する水中録音機を作っていますが、その大きさも様々で小さなものは手のひらにのるマジックインキくらいのものから大きなものは長さ1メートルの丸太棒のようなものまであります。電池寿命も1日くらいものから1年もつものもあります。1年も電池寿命がある水中録音機は北極海の氷の下に沈めておき氷の下で様々な海洋生物がどのような音を出しているかを調査しています。水が薄くなった夏場に沈めに行き、1年後の夏にその装置を回収に行きます。録音機を沈める深度も数十メートルから深いものでは2,000mも沈めることがあります。マッコウクジラの背中に水中録音機を装着して録音したことがあって、そのマッコウクジラが潜った最深部は2,000mにもなっていました。彼らも餌を求めて深いところまで潜っているのではないかと言われています。

水中で超音波を発信するピンガーを用いてカツオの行動を調査しています。ピンガーをカツオに装着して、ピンガー受信機を漁船や浮漁礁と言われる人工的なブイに装着しておいてピンガーの発信する信号を受信することによってカツオがどのような行動をしているかがわかります。日本の最西端の与那国島でカツオにピンガーを取り付けて放流し、そのピンガーがどこで受信されたかを解析すればカツオの行動が把握できるわけです。今この原稿はまさに与那国島で執筆しています。ピンガーが受信できる距離はせいぜい1kmなので、広い範囲をカバーするには2kmごとに受信機を設置しなければなりません。予算の関係でそこまでは受信機を設置するわけにはいかないので、その代わりにロガーという小さな電子タグもカツオにつけています。このロガーは水温や水深情報の他に照度の情報も記録することができ、カツオが再捕されてロガーが回収されるとその照度データを解析してカツオがどのような経路を辿って回遊してきたかを知ることができます。図3はロガーを回収して解析した結果ですが、与那国島で放流されたカツオたちは遠くは八丈島まで回遊しており、やはりカツオは偉大な回遊魚だということがわかりました。

ピンガーの他の応用例として養殖マグロがいけすの中でどのように泳いでいるかを計測した例があります。何のためにいけすの中のマグロの行動を計測したかということ、いけすの中のマグロの数を数えるためです。音響カーテン

という超音波のカーテンを横切るマグロがどのくらいの速度で泳いでいるかがわかれば1周何秒で回るかがわかるので、音響カーテンを横切るマグロの数に周回時間を掛け合わせることでいけすの中のマグロの数がカウントできるわけです。その他ピンガーを漁具に取り付けて漁具の深度を船上でリアルタイムに知ることによって網を海底などに引っ掛けることなく曳けるという応用もあります。ピンガー技術はいろんなところで使われはじめています。

将来展望

水の中では光はなかなか届かず数メートルが限界です。濁った水中ではほとんど届きません。それに対し音波は10kmでも100kmでも届きます。音波による水中でのコミュニケーションや水中情報の可視化は人類が海洋の利用を進める上では必須の課題です。音波、超音波を人類が利用しはじめたのはせいぜい第1次世界大戦以来です、まだ100年ちょっとの歴史です。それに対しイルカは少なくとも3,000万年前くらいから生存していたようです。イルカたちが最初から超音波を使ってコミュニケーションや餌魚の探知をしていたかどうかは不明ですが、少なくとも人類が超音波を利用するよりはるか前から超音波を利用していたのは間違いないでしょう。イルカは自らが出す音波に区別があり、自分の名前を音波で発しています。ある個体はピュー↵の音を発し、また別の個体はピュー↵の音を出して区別できます。これは家族が離れ離れになって視認できない距離にいても親が鳴いて子供に伝え、子供も鳴き返して存在を知らせてお互い無事を確認しています。他の親子はピューピューとかピーピーとか固有の音を発します。生まれた時に名前を付けるように、生まれてからずっと同じ音を出して自己を主張しているようです。また彼らは餌になる魚を探知することができます。まさに魚群探知機を持っているようです。人類が魚群探知機を発明したのは第2次大戦後ですからまだ70年余しかたっていませんが、彼らは何千万年も前から魚探を駆使して魚を獲っていたわけです。我々が開発している水中音響機器もイルカのそれに比べれば幼稚な装置でしかありえないでしょう。イルカたちはこんな会話をしているに違いありません。「人間たちもようやく魚群探知機を発明したようだが、まだまだ性能は僕らのものに比べれば劣っているな。早くもっと高性能な魚探を開発して僕らと一緒に海洋利用を進めようよ。」

図4はイルカの魚群探知能力にはまだ及びませんが、魚1匹1匹を映し出すことができる水中情報可視化装置の映像です。

※ TON セミナーで講演いただいた内容です。

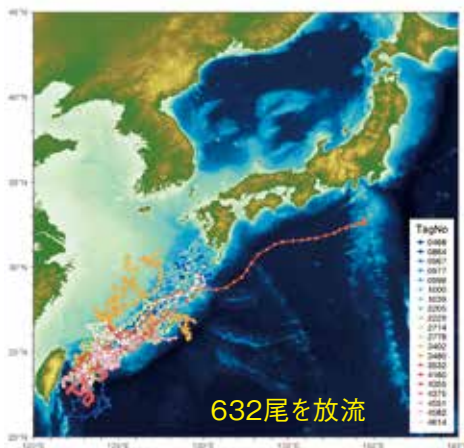


図3 再捕されたカツオ(20尾)の推定移動経路

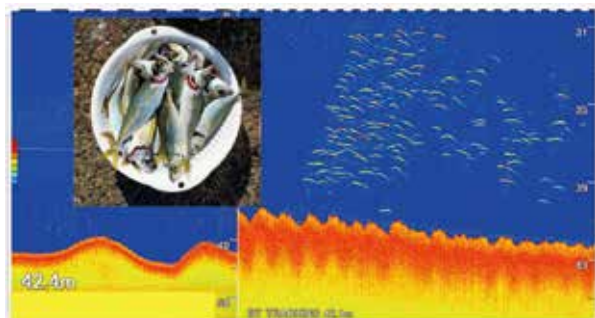


図4 魚1匹1匹を映し出すことができる水中情報可視化装置

編集室から

全海洋に拡散しているプラスチック汚染。我々が求めた利便性の結果として、地球環境に影響を与え、ひいては人類にも負の影響を与える。地球で暮らす人類のあり方を再考すべき時期を迎えているといえる。海洋生物は太古から水中で音による高度なコミュニケーションをとっている。もしかして水中から我々に何か警鐘を鳴らしているかもしれない。彼らの知恵を借りて行方知らずのプラスチックを探知することができないだろうか。(嶋)

Techno-Ocean News No.71 2019年7月発行(年4回)

発行: テクノオーシャン・ネットワーク (TON)

〒650-0046 神戸市中央区港島中町6丁目9-1

(一財) 神戸観光局内

☎078-303-0029 ☎078-302-6475

URL: <http://www.techno-ocean.com>

e-mail: techno-ocean@kcva.or.jp