

特集 1 生態系における汚染の動態と影響

海洋プラスチック汚染:海洋生態系における プラスチックの動態と生物への影響

山下 麗*·田中 厚資·高田 秀重 東京農工大学農学部

Marine Plastic Pollution: Dynamics of plastic debris in marine ecosystem and effect on marine organisms

Rei Yamashita*, Kosuke Tanaka and Hideshige Takada

Tokyo University of Agriculture and Technology

要旨:プラスチックの生産量は増加傾向にある一方で、廃棄量も増加しており、適切に処理されないものは最終的に海洋へと流出していく。プラスチックは難分解性であるため長期間にわたって海洋中に存在し、鯨類やウミガメ類など様々な海洋生物に摂食されている。特に、海鳥類では高頻度のプラスチック摂食が確認されている。プラスチック摂食による影響は、物理的な摂食阻害とプラスチック由来の化学物質が体内へ移行して起こる毒性の2つが考えられる。近年、プラスチックに吸着するポリ塩化ビフェニル(PCBs)と難燃剤として添加されているポリ臭素化ジフェニルエーテル(PBDEs)がプラスチック摂食によって外洋性海鳥の体内に移行する証拠が出された。また、動物プランクトンなどの低次栄養段階の生物にもマイクロプラスチックと呼ばれる微小なプラスチックと化学物質が取り込まれていることが報告され始め、海洋生態系全体に汚染が広がっていることが明らかになってきた。このようにプラスチックが汚染物質のキャリヤーとしてふるまうことから、海洋生物のプラスチック摂食が生態系内での新たな汚染物質の暴露ルートとなる。今後、海洋へのプラスチック流出量の増加に伴って海洋生物への汚染物質の負荷量が大きくなり、海洋生態系全体へ脅威が増すと考えられる。

キーワード:海洋ごみ、残留性有機汚染物質、マイクロプラスチック、プラスチック摂食

Keywords: marine debris, Persistent Organic Pollutants (POPs), microplastic, plastic ingestion

はじめに

プラスチックは軽くて耐久性があるという性質から、パソコンなどの電化製品や食品保存容器などに使われており私たちの身の回りに溢れている。プラスチックはセルロイドとして発明され、1930年頃から世界的にプラスチックの生産が始まり、現在の世界生産量は年間2億8千万トンに達し増加傾向にある。一方で、プラスチックの年間生産量の約40%が使い捨てのプラスチックである(Hopewell et al. 2009; PlasticsEurope 2013)。海岸を訪れると、貝殻や海藻などと一緒に漁網や発泡スチレン、空き

2015年2月28日受付、2015年10月13日受理

*e-mail: reiy@cc.tuat.ac.jp

缶やビンなどのごみを目にする。これら海ゴミのうちプラスチックは7~8割を占めており(Derraik 2002)、このことから、陸上での不十分な管理によって流出したプラスチックの一部が海岸に漂着していることが分かる。

プラスチックの主要な素材はポリエチレン(29.6%)、ポリプロピレン(18.9%)、ポリ塩化ビニル(10.4%)、ポリスチレン(7.1%)である(PlasticsEurope 2013)。生産量の多いポリエチレンやポリプロピレンは海水に対して比重が軽く海表面に浮く(比重:ポリエチレン 0.79 \sim 0.97、ポリプロピレン 0.9 \sim 0.92)。プラスチックはポリマー重合体として安定な構造をもっているが、海洋へ流出したプラスチックは主に光分解や熱酸化分解によって劣化し、微細化していく(Andrady 2011)。

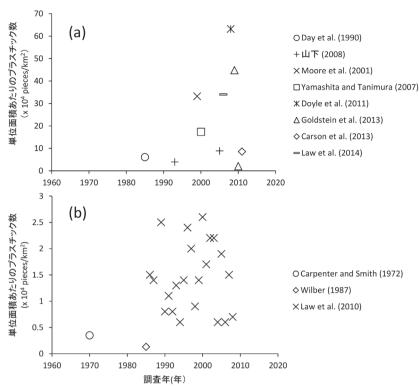


図 1. 北太平洋(a) および北大西洋(b) における表層の単位面積あたりのプラスチック数(x 10⁴ pieces per km²) の経年変化。 データの引用は次のとおり: Day et al. 1990; Moore et al. 2001; Yamashita and Tanimura 2007; 山下 2008; Doyle et al. 2011; Goldstein et al. 2013; Carson et al. 2013; Carpenter and Smith 1972; Wilber 1987; Law et al. 2014, 2010。 Law et al. (2014) は 2002 ~ 2012 年にわたる調査・解析を行っているため 2006 年に平均値を載せた。

海洋におけるプラスチック汚染の研究は 1970 年代ごろから行われているが、その情報は断片的で、海洋生態系全体を俯瞰できるほど研究は発展していない。本特集号のテーマは「生態系における汚染の動態と影響」であるが、本稿では、1. 海洋におけるプラスチック汚染の現状、2. 海洋生物への物理的影響(プラスチック摂食の現状と摂食阻害)、3. 海洋生物への化学的影響(プラスチック由来の化学物質による暴露と生体への移行)4. 海洋における最新のプラスチック汚染研究と今後の研究の展望、について述べる。

海洋におけるプラスチック汚染の現状

1971 年にサルガッソー海で流れ藻の調査時にプラスチック小片が採取され、初めて海洋におけるプラスチック汚染が報告された(Carpenter and Smith 1972)。それ以降、さまざまな海域でプラスチック分布量に関する調査が行われてきた。北太平洋および北大西洋におけるプラスチック量は1970年代や1980年代では1平方キロメートル

あたり数千個程度であったが、その後、北太平洋、北大 西洋のどちらも増加する傾向が認められた(図 1)。同じ 時期で比べると、北太平洋の方が北大西洋に比べて 1 桁 高い値を示している。その理由の一つは、プラスチック 廃棄物の海洋への推定年間流出量が、中国、インドネシア、フィリピン、ベトナムの順で高く(Jambeck et al. 2015)、これらの国々は北太平洋に面しているからである。

漂流するプラスチックが多く採取される場所の一つに潮目がある。潮目は性質や起源が異なる水塊の境界(フロント)にほぼ対応している。フロントでは表面流が収束するために浮遊物(プランクトン、海藻、木の実、軽石、プラスチックなど)が集まって筋状に伸びており、これを潮目という。潮目は魚類が集まるため水産業にとって重要な場所である。潮目の他にプラスチックが多い場所として海流や風が弱い場所(gyre)が挙げられる(Cózar et al. 2014)。Gyre はプラスチックの海洋漂流観測結果の実測値と海流や風の動きを取り入れたシミュレーションによって明らかにされている(Maximenko et al. 2012)。これら gyre では、栄養塩の供給が少ないため生産性は低

いが生物多様性は高いので、さまざまな生物がプラスチックを摂食する可能性が高い。

海洋に漂流するプラスチックの種類は、プラスチック の中間原料であるレジンペレット(直径1~5 mm、球状、 円盤状あるいは円柱状)、プラスチック製品(形状が欠け ていないもの)、製品破片、薄膜状プラスチック (フィル ムなど)、発泡スチレン、繊維(漁網やテグスなど)、ゴ ムなどが挙げられ、中でも最も多いのは破片である (Yamashita and Tanimura 2007 など)。レジンペレットはプ ラスチック製品を加工・成型する際に使用されるので、 その起源は陸上由来に限定される。北太平洋表層におけ るプラスチック中のレジンペレットの割合に注目すると、 1990年代では全体数の 2.1%であったのに対し、2000年 代では0.88%とわずかに減少傾向を示している(山下 2008)。現在、アメリカや日本でレジンペレットの漏出防 止策がとられており、その効果が多少は現れているのか もしれない。しかし、それ以外の種類では増加傾向がみ られることから(山下 2008)、プラスチック廃棄物の管 理は改善されていないことを示している。

海洋中のプラスチックのサイズを調べることは、それを摂食する可能性のある生物を知る上で重要になってくる。例えば、海洋表層中のプラスチックサイズは 3 mm以下のものが最も多く採取されており(Yamashita and Tanimura 2007:Morét-Ferguson et al. 2010)、体長 7 cm 程度のハダカイワシ類が $1 \sim 2.79$ mm のプラスチックを摂食していることが報告されている(Boerger et al. 2010)。年代別にみると、北大西洋で採集されるプラスチックサイズは 1990 年代(平均約 10 mm)に比べて 2000 年代(平均約 5 mm)の方が有意に小さくなっていることから(Morét-Ferguson et al. 2010)、今後、より小さな体サイズの生物によるプラスチック摂食が危惧される。

海洋生物への物理的影響

海洋生物のプラスチックによる影響は、①摂食と絡まり②プラスチックに由来する化学物質による暴露、が挙げられている。次節では①の海洋生物による摂食に着目して、海洋プラスチック汚染の生態系への影響を議論したい。その後、プラスチックに由来する代表的な2つの化学物質の挙動について簡単に触れてから化学物質による暴露について記述する。

海洋生物によるプラスチック摂食の現状

プラスチック摂食は1960年代からさまざまな海洋生物

で報告されているが、特に鯨類やウミガメ類、海鳥類などの高次捕食者の報告例が多い(表 1, Laist, 1997; Derraik 2002)。一方、魚類や貝類、甲殻類といった低次栄養段階生物についての報告例は少ない。この理由として、一般的に大型の生物は大きなサイズのプラスチックを摂食するため、胃内容物中のプラスチックが視認されやすいからである。また、大型の生物ほどプラスチックの体内での滞留時間が長くなるので、検出されやすくなるからである。

プラスチック摂食報告例が比較的多いハシボソミズナギドリ Puffinus tenuirostris、マッコウクジラ Physeter macrocephalus、アオウミガメ Chelonia mydas、ミズウオ Alepisaurus ferox のプラスチック摂食検体割合の変化について年代別にみてみると、それぞれの種で幅広い値を示したが概ね増加する傾向がみられた(図 2)。ハシボソミズナギドリのプラスチック摂食検体割合は 1980 年代以降80~100%を示し頭打ちになっている(図 2a)。これらの結果は、海洋中のプラスチックが増加した為に、海洋生物がプラスチックを摂食する機会が増えたことが原因であると考えられる。

プラスチック摂食報告例は高次捕食者の中でも特に海 鳥が多い (表1)。また、著者らが知る限りでは、海洋生 物によるプラスチック摂食は1962年に海鳥で最初に報告 されており、これは海洋でのプラスチックの発見より10 年ほど前である (表 1: Rothstein 1973)。海鳥がプラスチ ックを摂食する理由はまだ明らかになっていない。これ までの研究から、プラスチックを摂食しているのはミズ ナギドリ科やアホウドリ科であり (Day 1980)、これらは 表面採取型、表面ついばみ型の方法で採餌し(Moser and Lee 1992)、海水より比重が軽いプラスチックが検出され ていることが分かっている (Yamashita et al. 2011)。また、 プランクトン食性の方が魚食性に比べてプラスチック摂 食の割合が高く(Day 1980; Moser and Lee 1992)、これら の海鳥が餌場として利用する潮目にプラスチックが溜ま りやすい。これらのことから、海鳥は表面に浮いている プラスチックを餌と間違えて、あるいは一緒に食べると 考えられている (Day 1980; Ryan 1987)。一方、海鳥の 胃内容物をみると、餌生物とプラスチック以外にも、木 の実や軽石や木片や石が入っていることから(Moser and Lee 1992 など)、消化を促すために固いものを取り入れて いると考えられている。

混獲された海鳥を調べてみると、体重が重い海鳥ほどより多くのプラスチックを摂食している傾向が認められており、最も多くプラスチックを食べていたのはワタリ

°
函
6
₽
#
<u>₩</u>
無
たぎ
7
XU
∄□
報信
Ž
倒
撰
7
5
*
1
K
IV.
7
_
表

種名	将名	プラスチック種類	調査年	調査海域	文献
					
マッコウクジラ	Physeter macrocephalus	プラスチックバッグ, 温室のカバー材, 漁網	1963-2012	地中海, 東部北太平洋, 北大西洋	Walker and Coe 1990 : de Stephanis et al. 2013 ; Jacobsen et al. 2010
コマッコウ	Kogia breviceps	プラスチックシート	1993	北大西洋	Stamper et al. 2006
ッチクジラ	Berardius bairdii	プラスチックシート,タバコフィルター, プラスチック 1963-1986	1963-1986	西部北太平洋(三陸沖),南大西洋(ブランジュンジュナ)	西部北太平洋(三陸沖),南大西洋(プ Walker and Coe 1990 : Secchi and Zarzur 1999) - **** ユン
		778-1, 70X		ンンです)	
1 22 - 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	Lipnius cavirostris	ノラスナジクガジノ	7007 - 7007		Gomercic et al. 2006
ヒガンアメリカオウキハクンフ	Mesoplodon europaeus	フラスナックバック	1996-2006		Fernández et al. 2009
カマイルカ	Lagenorhynchus obliquidens	プラスチックカップ,ボトルキャップ,ストロー	1963-1986	北太平洋(カリフォルニア冲)	Caldwell et al. 1965: Walker and Coe 1990
マイルカ	Delphinus delphis	プラスチックカップ, セロハン, プラスチックシート, 1963-1986 パルーン	1963-1986	北太平洋(カリフォルニア冲)	Walker and Coe 1990
ノベンドウイルカ	Tursiops truncatus	プラスチックシート,プラスチックカップ,ポトルキャッ 1963-1986	1963-1986	北太平洋(カリフォルニア沖)	Walker and Coe 1990
			9		
たべんびかい。ここことは、	Lissodelphis borealis	フレスナックへジタ、ヒール片	1963-1986		Walker and Coe 1990
ンロハンセミイア ムジン・オ	Lagenodelphis hosei	フラスナック版片, テクス	1996-2006	北大四洋(カナリー諸島周辺)	Fernández et al. 2009
XX 1VX	Stenetia coeruteoatiba	7.7.	1996-2006		remandez et al. 2009
器内領 ナジナイ	A 4	プレント・アンボア	1000 1007	本十条(プップコー)	T-:1-2000
コントカイー・ボーン	Arctocephatus sp.	ノンケナツン吸口	1990-1997	(1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1)	Effesson and Burton 2003
キタゾウアザラシ	Mirounga angustirostris	発泡スナレン、ブラスナックキャップ		- 光大・子(トレン) - 大大・子(トレン)	Mate 1985
, , , , , , , , , , , , , , , , , , ,	Eumatopias jubatus	発泡スチレン,ブラスチックキャップ		- 岩大・井 (オフゴン中)	Mate 1985
海牛類		:			
フロリダマナティー	Trichechus manatus	プラスチックハシグ,繊維,ゴムバンドなど	1978-1986	北太平洋(フロリダ冲)	Beck and Barros 1991
ウミガメ類					
アカウミガメ	Caretta carreta	発泡スチレン, プラスチックバッグ, テグス, ブラ 1986-2013	1986-2013	北大西洋,地中海,南大西洋,インド洋	Plotkin and Amos 1990; Hoarau et al. 2014
		スナックボトレなど。			
アオワミガメ	Chelonia mydas	フンスナックカッフ、フンスナックンート、アクス、 不維維・プラスチック確臣	1986-2011	北太半洋(日本,ハワイ冲)	Plotkin and Amos 1990; Schuyler et al. 2014
カイマイ	Eretmochelys impricata	プラスチックシート プラスチックバッグ プラスチッ 1986-1988	1986-1988	北大西洋(コスタリカ油 フロリダ油 テキ Plotkin and Amos 1990	Plotkin and Amos 1990
-,		/ / パン・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	00/1-00/1		
ケンプヒメウミガメ	Lepidochelys kempi	ミルケカートン プラスチックバーラック	1986-1988	- 1 - 1 - 1 - 1 - 1 - 1 - 1 - 1 - 1 - 1	Plotkin and Amos 1990
ヒメウミガメ	Lenidochelys olivacea	プラスチック時片 プラスチックバッグ		南大西洋(ブラジル)	Mascarenhas et al 2004
ナキゼメ	Dermochelys coriacea	プラスチッケンジグ シート プラスチック部 下など 1968-2007	1968-2007		Mrosovsky et al. 2009
海鳥					
イワトビペンギン	Eudyptes chrysocome	プラスチック破片	1979-1985	南大西洋(南アフリカ沖)	Ryan 1987
コアホウドリ	Phoebastria immutabilis	プラスチック破片、ライトスティック、ライター、セ	1986-1991		Sileo et al. 1990; Robards et al. 1997
クロアシアホウバリ	Phoebastria nigripes	プラスチック破片、レジンペレット	1992	日本沿岸(茨城冲)	Ogi et al. 1994
ハイガシラアホウドリ	Thalassarche chrysostoma	プラスチック破片		インド洋(マリオン島)	Fumess 1983
フルマカモメ	Flumarus glacialis	レジンペレット、プラスチック破片、シート、タバコ	1969-2004	北太平洋 (アラスカ冲)、北大西洋	Day 1980; Robards et al. 1997; Van Franeker 1985;
)	フィルター,風船など			Moser and Lee 1992; Mallory 2008
ギンフルマカモメ	Flumarus glacialides	プラスチック破片	1979-1985	南大西洋(南アフリカ沖)	Ryan 1987
ガラパゴスシロハラミズナギドリ	Pterodroma phaeopygia	プラスチック破片	1988-1991	北太平洋	Robards et al. 1997
ハジロミズナギドリ	Pterodroma solandri	プラスチック破片	1988-1991	北太平洋	Robards et al. 1997
マダラシロハラミズナギドリ	Pterodroma inexpectata	プラスチック破片	1988-1991	北太平洋	Robards et al. 1997

種名	学名	プラスチック種類	調査年	調査海域	文献
ヒメシロハラミズナギドリ	Pterodroma longirostris	プラスチック破片	1984-1988	赤道太平洋	Ainley et al. 1990b
ウスヒメシロハラミズナギドリ	Pterodroma pycrofti	プラスチック破片	1984-1988	赤道太平洋	Ainley et al. 1990b
ハグロシロハラミズナギドリ	Pterodroma nigripennis	プラスチック破片	1984-1988	赤道太平洋	Ainley et al. 1990b
セグロシロハラミズナギドリ	Pterodroma rostrata	プラスチック破片	1984-1988	赤道太平洋	Ainley et al. 1990b
カワリとメシロハラミズナギドリ	Pterodroma brevipes	インプングレ	1984-1991	赤道太平洋	Spear et al. 1995
ウスハジロミズナギドリ	Pterodroma ultima	アジンペフシ、ナイロン米	1984-1991	赤道太平洋	Spear et al. 1995
ケルゲレンミズナギドリ	Aphrodroma brevirostris	イジンペンジン	1976-1988	■ 大洋	Ainley et al. 1990a
シロハラミズナギブリ	Pterodroma hypoleuca	プラスチック破片	1986-1987	北太平洋(ハワイ諸島)	Sileo et al 1990
ズキンミズナギドリ	Pterodroma incerta	1.5.7.5.1.2.F	1983	「「「」」 「一」 「一	Firmess 1985a
カインロッズナギバリ	Pterodroma mollis	ナジングン	1983	「一、」 「一、 「一、」 「一、。 「一、」 「一、 「「 「一、 「「 「 「 「 「 「	Furness 1985a
ズグロシロハラミズナギドリ	Pterodroma hasitata	18/18/18/18	1975-1989	ころには、「一、ころ」で、一、「一、」の一、「一、」の「一、「一、」の「一、」を「一、」を「一、」を「一、」を「一、」を「一、」を「一、」を「一、」を	Moser and Lee 1002
イナンロンコンイギに	Pterodroma externa	プラスチック部ド	1984-1988	15人工は、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、	Ainley et al. 1990h
なない こうかい ニーク ない アイナー・ファイー・ファイナー・ファイナー・ファイナー・ファイナー・ファイナー・ファイナー・ファイナー・ファイナー・ファイナー・ファイナー・ファイナー・ファイナー・ファイナー・ファイナー・ファイン・ファイナー・ファイナー・ファイナー・ファイー・ファイー・ファイト・ファイー・ファイー・ファイー・ファイー・ファイー・ファイー・ファイー・ファイー	Pterodroma cervicalis	ノノバング吹に プラスキック語 片	1984-1988	计一次可分 计一次可分 计一次可分 计一次 计一次 计一次 计一次 计二次 计二次 计二次 计二次 计二次 计二次 计二次 计二次 计二次 计二	Ainley et al. 1900h
コキジョ	Dago duoma minoa	1 3 3 7 7 8 7 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	1076 1000	2. 6/2 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	Ainley of all 1000s
14-15-14-15-14-15-14-15-14-15-14-15-14-15-14-15-14-15-15-14-15-15-15-15-15-15-15-15-15-15-15-15-15-	ragoaroma nivea	上はないとして	1970-1966	男人午(玉襴) 計十深(井宮)	Ainey et al. 1990a
イントョンノアマカイメ	I halassoica antarctica	ノフスナジク吸力・ジュー・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	19 /6-1988		Ainley et al. 1990a
アオミスナギドリ	Halobaena caerulea	ンジング	1979-1985	南大西洋 (南アフリカ冲)	Ryan 1987
ハシボンクジラボリ	Pachyptila belcheri	プラスチック破片	1984-1988	赤道太平洋	Ainley et al. 1990b
アナドリ	Bulweria bulwerii	プラスチック破片	1978-1981	北太平洋(ハワイ諸島)	Harrison et al. 1983
ノドジロクロミズナギドリ	Procellaria aequinoctialis	プラスチック破片	1979-1985	南大西洋(南アフリカ沖)	Ryan 1987
マダラフルマカモメ	Daption capense	プラスチック破片	1984-1988	赤道太平洋	Ainley et al. 1990b
モグリウミツバメ	Pelecanoides urinatrix	プラスチック破片	1979-1985	南大西洋(ゴフ島)	Ryan 1987
シロハラアカアシミズナギドリ	Puffinus creatopus	レジンペレット,プラスチック破片	1974-1991	北太平洋(カリフォルニア沖)	Baltz and Morejohn 1976: Robards et al. 1997
アカアシミズナギドリ	Puffinus carneipes	レジンペレット,プラスチック破片	1988-1991	北太平洋	Robards et al. 1997
ズグロミズナギドリ	Puffinus gravis	レジンペレット、ポリスチレン、テグス	1981, 2003	南大西洋, 北大西洋	Furness 1983; Pierce et al. 2004
セグロミズナギドリ	Puffinus lherminieri	レジンペア・ゲ、発泡スチレン	1975-1989	北大西洋(ノースカロライナ冲)	Moser and Lee 1992
ミナミオナガミズナギドリ	Puffinus bulleri	プラスチック破片	1984-1988	赤道太平洋	Ainley et al. 1990b
オナガミズナギドリ	Puffinus pacificus	レジンペレット,プラスチック破片	1986-1987	北太平洋(ハワイ諸島)	Sileo et al. 1990
ハイイロミズナギドリ	Puffinus griseus	レジンペレット,プラスチック破片	1975-2003	北太平洋	Ogi 1990 ; 山下 2008
ハシボンミズナギドリ	Puffinus tenuirostris	レジンペレット、プラスチック破片	1969-2003	北太平洋	Day 1980: Ogi 1990: Robards et al. 1997: Vlietstra
					and Parga 2002 ; 山下 2008
ハワイマンクスミズナギドリ	Puffinus newelli	プラスチック破片	1986-1987	北太平洋(ハワイ諸島)	Sileo et al. 1990
コミズナギドリ	Puffinus nativitatis	プラスチック破片	1986-1987	北太平洋(ハワイ諸島)	Sileo et al. 1990
ヒメミズナギドリ	Puffinus assimilis	アジンペアット	1983	南大西洋(ゴフ島)	Furness 1985a
マンクスミズナギドリ	Puffinus puffinus	トジンペアシー	1975-1989	北大西洋(ノースカロライナ冲)	Moser and Lee 1992, Furness 1985b
オニミズナギドリ	Calonectris diomedea	レジンペレット,プラスチック破片	1975-1998	北大西洋 (ノースカロライナ沖),南大西	北大西洋(ノースカロライナ冲),南大西洋 Moser and Lee 1992 : Petry et al. 2009
				(ブラジル冲)	
オオミズナギドリ	Calonectris leucomelas	プラスチック破片	2005	北太平洋	山下未発表
アシナガウミツバメ	Oceanites oceanicus	プラスチック破片,発泡スチレン	1975-1989	北大西洋(ノースカロライナ沖)	Moser and Lee 1992
カオジロウミツバメ	Pelagodroma marina	レジンペアシー	1979-1985	南大西洋(南アフリカ沖)	Ryan 1987
コシジロウミツバメ	Oceanodroma leucorhoa	プラスチック破片	1962-1982	北大西洋(カナダ冲)、北太平洋(アラ	北大西洋(カナダ冲),北太平洋(アラス Rothstein 1973:Day 1980;Watanuki 1985
				カ冲,日本沿岸)	
ペルーウミツバメ	Oceanodroma markhami	プラスチック破片	1984-1988	赤道太平洋	Ainley et al. 1990b
ガラパゴスウミツバメ	Oceanodroma tethys	プラスチック破片	1984-1988	赤道太平洋	Ainley et al. 1990b
オーストンウミツバメ	Oceanodroma tristrami	プラスチック破片	1986-1991		Sileo et al. 1990 : Robars et al. 1997
ハイイロウミツバメ	Oceanodroma furcata	プラスチック破片	1969-1991	北太平洋(アラスカ沖)	Day 1980; Robards et al. 1997

種名	學名	プラスチック種類	調査年	調査海域	文献
ヒメアシナガウミツバメ	Garrodia nereis	プラスチック破片	1983	南大西洋(ゴフ島)	Furness 1985a
アカオネッタイチョウ	Phaethon rubricauda	プラスチック破片	1986-1987	北太平洋(ハワイ諸島)	Sileo et al. 1990
オオグンカンドリ	Fregata minor	プラスチック破片	1986-1987		Sileo et al. 1990
ヒメウ	Phalacrocorax pelagicus	プラスチック破片	1988-1991	北太平洋	Robards et al. 1997
アカアシカツオドリ	Sula sula	プラスチック破片	1986-1987	北太平洋(ハワイ諸島)	Sileo et al. 1990
アオツラカツオ「バ」	Sula dactylatra	プラスチック破片	1986-1987	北太平洋(ハワイ諸島)	Sileo et al. 1990
シロカツオドリ	Morus bassanus	プラスチックボトルキャップ	2004		Pierce et al. 2004
アセトニアレッシェ	Phalaroms lobatus	プラスチック部片	1975-1989	_	Moser and Lee 1902
ノストンファンフィーナインコンジング・オープランジング・オープランジング・オープランジング・オープー・オープー・オープー・オープー・オープー・オープー・オープー・オープ	I manage learnes	/ / / / / 変/ / / / / / / 変/ / / / / 変/ / / / / / / / 変/ / / / / / / / 変/ / / / / / / / / / / / / / / / / / / /	1000 1001		Mosel and Lee 1992
マムノン・ソント	Limosa tapponica	ノンベナンダエ まれま まれが プロイン・プロイン・プロイン・プロイン・プロイン・プロイン・プロイン・プロイン・	1988-1991		Kobards et al. 199/
ンイイロヒアアンツル	Phalaropus fulicaria	フラスナック破片、ホリスナレン、フラスナック小	1975-1989	光大西洋(ノースカロフィナ洋)	Moser and Lee 1992; Connors and Smith 1982
	(fulicarius)	益			
トウゾクカモメの一種	Cartharacta skua hamiltoni	プラスチック破片	1983	南大西洋(ゴフ島)	Furness 1985a
オオトウゾクカモメ	Stercorarius (Catharacta) skua プラスチック破片	1 プラスチック破片	1982-1983	南大西洋(ゴフ島)	Ryan and Fraser 1988
シロハラトウゾクカモメ	Stercorarius longicaudus	プラスチック破片	1975-1989	北大西洋(ノースカロライナ冲)	Moser and Lee 1992
クロトウゾクカモメ	Stercorarius parasiticus	プラスチック破片	1975-1989	北大西洋(ノースカロライナ沖)	Moser and Lee 1992
トウゾクカモメ	Stercorarius pomarinus	プラスチック破片	1975-1989	北大西洋(ノースカロライナ沖)	Moser and Lee 1992
ボナパルトカモメ	Larus philadelphia	プラスチック破片	1975-1989	北大西洋(ノースカロライナ沖)	Moser and Lee 1992
カモメの一種	Larus heermanii	レジンペレット、プラスチック破片	1974-1975	北太平洋(カリフォルニア沖)	Baltz and Morejohn 1976
カモメ	Larus canus	プラスチック破片	1974-1991	北太平洋(カリフォルニア冲)	Baltz and Morejohn 1976; Robards et al. 1997
セグロカモメ	Larus argentatus	プラスチックカップ、発泡スチレン、セロハン		北大西洋	Day et al. 1985
ワシカモメ	Larus glaucescens		1974-1975	北大平洋(カリフォルニア洋)	Baltz and Morejohn 1976
シロカモメ	Larus hyperboreus	プラスチック破片	1969-1977	北太平洋	Day 1980
オオカモメ	Larus marinus	プラスチックカップ,発泡スチレン等		北大西洋	Day et al. 1985
ミナミオオセグロカモメ	Larus dominicanus	プラスチック破片	1979-1985	南大西洋(南アフリカ冲)	Ryan 1987
ミツユビカモメ	Rissa tridactyla	レジンペレット、プラスチック破片、ナイロン糸	1974-1991	北太平洋(カリフォルニア冲)	Baltz and Morejohn 1976: Robards et al. 1997
アカアシミツユビカモメ	Rissa brevirostris	レジンペレジト	1969-1977		Day 1980
クビワカモメ	Xema sabini	プラスチック破片	1975-1989		Moser and Lee 1992
セグロアジサシ	Sterna fuscata	プラスチック破片	1986-1987		Sileo et al. 1990
マミジロアジキシ	Sterna anaethetus	プラスチック破片	1975-1989	北大西洋(ノースカロライナ沖)	Moser and Lee 1992
ハシゲロクロハラアジサシ	Chlidonias niger	プラスチック破片	1975-1989	北大西洋(ノースカロライナ冲)	Moser and Lee 1992
ツロアジキツ	Gygis alba	プラスチック破片	1984-1991		Spear et al. 1995
クロアジキシ	Anous stolidus	プラスチック破片	1986-1987		Sileo et al. 1990
ヒメクロアジサシ	Anous minutus	プラスチック破片	1986-1987	北太平洋(ハワイ諸島)	Sileo et al. 1990
ヒメウミスズメ	Alle alle	プラスチック破片	1	北大西洋	Van Franeker 1983
ウミバ	Cepphus columba	プラスチック破片	1988-1991	北太平洋	Robards et al. 1997
ウミガラス	Uria aalge	プラスチック破片	1988-1991		Robards et al. 1997
ハシブトウミガラス	Uria lomvia	レジンペレット,プラスチック破片	1969-2007		Day 1980 : Ll
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	-				
ノメリがノボススメ	Ptycnorampnus aleuncus	アンシンフラン、レストシン数エコンジュニュープログラー	1969-1991	元人十年(ノフヘル中) 岩土は深	Day 1980 , Robards et al. 199/
した。これでは、これでは、これでは、これでは、これでは、これでは、これでは、これでは、	Cyclorrhynchus psuidcuid	アンノ・ハフシア・ノレイナシン数によって、サール・カー・カー・カー・カー・カー・カー・カー・カー・カー・カー・カー・カー・カー・	1969-1977	. 古人十年 七十月 18	Day 1980
していると	Aetma pusma	ノンクンン受力しい。お辞刊	1909-1991	- 1- 1- 1- 1- 1- 1- 1- 1- 1- 1- 1- 1- 1-	Day 1900; Robalus et al. 1997
エトロノンベイスメ	Aetma cristatetta	アンシンフラン・ノンストシン数エルコレル・マギュー・ジャン・コード	1988-1991		Kobards et al. 1997
717	Cerorninca monocerata	ノレスナック最后,アンノスアット	19/4-2008	北太平洋(カリノギルー/泙,日本台岸)	Baltz and Morejohn 1976, Robards et al. 1997, 中下未発表
にシッノメドリ	Fratercula arctica	プラスチック製糸	1969- 2003	北大西洋, 北太平洋	Parslow and Jefferies 1972;山下 2008
エトピリカ	Fratercula cirrhata	レジンスアット	1969-2003	北太平洋(アラスカ沖, ベーリング海)	Day 1980;山下 2008
					•

表1 プラスチック摂食が報告された海洋生物の例 (つづき)

種名	小公	プラスチック種類	調査年	調査海域	大製
魚類					
イタチザメ	Galeocerdo cuvier	プラスチックシートなど	1978-2000	南アフリカ	Cliff et al. 2002
カジカの一種	Myoxocephalus aenus	ポリスチレン小球	1971	東部北大西洋	Carpenter et al. 1972
ホウボウの一種	Prionotus evolans	プラスチックレジンペレット、ポリスチレン小球	1971	東部北大西洋	Carpenter et al. 1972
フユヒラメ	Pleuronectes americanus	ポリスチレン小球	1971	東部北大西洋	Carpenter et al. 1972
ホワインパーチ	Roccus americanus	フジンペフシー・ポリスチフンプ、禁	1971	東部北大西洋	Carpenter et al. 1972
シイラ	Coryphaena hippurus	ロープ,ボトル,プラスチック破片	2007-2012	西部北大西洋, 北太平洋	Choy and Drazen 2013
カマスサワラ	Acanthocybium solanderi	プラスチックシート	1965-1981	西部北大西洋	Manooch and Hogarth 1983
クロタチカマス	Gempylus serpens	プラスチック破片	2007-2012	北太平洋	Choy and Drazen 2013
キハダマグロ	Thunnus albacares	プラスチック破片	1980-1982	西部北大西洋(メキシコ湾)	Manooch and Mason 1983
タイセイヨウクロマグロ	Thunnus atlanticus	プラスチック破片	1980-1982	西部北大西洋(メキシコ湾)	Manooch and Mason 1983
メバチマグロ	Thunnus obesus	プラスチック破片	2007-2012	北太平洋	Choy and Drazen 2013
ミナミマグロ	Thunnus maccoyii	プラスチックバッグ	1992-1994	南太平洋(タスマニア東部沖)	Young et al. 1997
メカジキ	Xiphias gladius	プラスチック破片	2007-2012	北太平洋	Choy and Drazen 2013
ニシマアジ	Trachurus trachurus	プラスチック破片など	2010-2011	北大西洋 (北海)	Foekema et al. 2013
トウゴロウイワンの一種	Menidia manidia	ポリスチレン小球	1971	東部北大西洋	Carpenter et al. 1972
タイセイヨウニシン	Clupea harengus	ポリスチレン小球、プラスチック破片など	2010-2011	北大西洋(北海)	Foekema et al. 2013
ミズウオ	Alepisaurus ferox	ポリエチレン破片、プラスチックキャップ、プラス	1964-2012	北太平洋, 日本沿岸	Kubota 1990; Jantz et al. 2013; Choy and Drazen 2013
		チック製漁具、ストラップ、プラスチックバッグなど	3.1		
タイセイヨウダラ	Gadus morhua	プラスチック破片など	2010-2011	北大西洋(北海)	Foekema et al. 2013
ホワイティング	Merlangius merlangus	プラスチック破片など	2010-2011	北大西洋(北海)	Foekema et al. 2013
コダラ	Melanogrammus aeglefinus	プラスチック破片など	2010-2011	北大西洋(北海)	Foekema et al. 2013
ミナミマンダイ	Lampris immaculatus	プラスチックシート,テグス	1993-1994	南大西洋	Jackson et al. 2000
アカマンボウの一種	Lampris sp (big-eye)	プラスチック破片, テグス, ロープ	2007-2012	北太平洋	Choy and Drazen 2013
アカマンボウの一種	Lampris sp (small-eye)	プラスチック破片, テグス, ロープ	2007-2012	北太平洋	Choy and Drazen 2013
ヒカリハダカ	Myctophum aurolanternatum	プラスチック破片	2008	北太平洋	Boerger et al. 2010
ナガハダカ	Symbolophorus californiensis	プラスチック破片	2008	北太平洋	Boerger et al. 2010
ドンゲリハダカ	Hygophum reinhardtii	プラスチック破片	2008	北太平洋	Boerger et al. 2010
キララハダカの一種	Loweina interrupta	プラスチック破片	2008	北太平洋	Boerger et al. 2010
クロトカゲギス	Astronesthes indopacifica	プラスチック破片	2008	北太平洋	Boerger et al. 2010
キント	Cololabis saira	プラスチック破片	2008	北太平洋	Boerger et al. 2010
月類					
ヨーロッパイガイ	Mytilus edulis	プラスチック破片		北大西洋(ドイツ)	Van Cauwenberghe and Janssen 2014
マガキ	Crassostrea gigas	プラスチック破片	-	北大西洋(フランス)	Van Cauwenberghe and Janssen 2014
甲殼類					
ヨーロッパアカザエビ	Nephrops norvegicus	テゲス	2009	イギリス(クライド湾)	Murray and Cowie 2011
オキアミ類の一種	Euphausia pacifica	テグス, プラスチック破片	2012	北太平洋(カナダ冲)	Desforges et al. 2015
カイアン類の一種	Neocalanus cristatus	テグスプラスチック破片	2012	北大平洋(カナダ冲)	Desforces et al. 2015

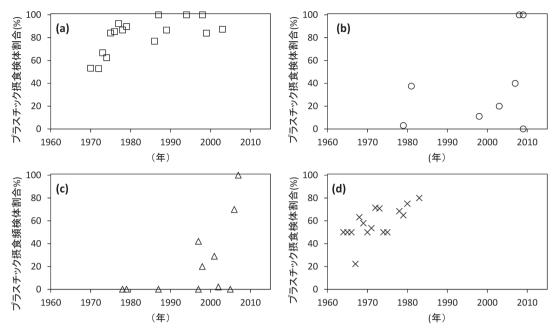


図 2. ハシボソミズナギドリ (a)、マッコウクジラ (b)、アオウミガメ (c)、ミズウオ (d) のプラスチック摂食 検体割合。データの引用は次のとおり:山下 2008: Baulch and Perry 2014: Schuyler et al. 2014; Kubota 1990。 調査年が複数年にわたる場合は調査年の中央の年で記載した。

アホウドリ Diomedea exulans で最大 18.4 g(体重の 0.21%) であることが分かっている (Ryan 1987)。体重あたりの プラスチック重量の最大値は、カオジロウミツバメ Pelagodroma marina で体重の 0.71%となっており、平均 的な成鳥(体重の 0.02%程度)の 35 倍となっている(Ryan 1987)。このように、種によってプラスチックの摂食割合 が異なる理由として、胃の形によってプラスチックの滞 留時間に違いがあるためかも知れない。海鳥には前胃と 砂嚢(後胃)があり、前胃と砂嚢の間の部分が細くなっ ているミズナギドリ科やアホウドリ科の方が、この部分 が太くなっているウミスズメ科に比べて砂嚢にプラスチ ックが見つかることが多い (Furness 1985a)。Rvan and Jackson (1987) はノドジロクロミズナギドリ Procellaria aequinoctialis にプラスチックレジンペレットを食べさせ 12 日間後の重量の減少率から滞留時間を少なくとも1年 であると推測している。また、Day (1980) はハシボソミ ズナギドリの胃中のプラスチックの摩耗度から滞留時間 は6か月以上だと述べている。プラスチックレジンペレ ットをオオミズナギドリ Caolorina leucomelous の雛に食 べさせたところ 42 日以上胃内にとどまっていた(山下 2008; Teuten et al. 2009) のに対し、ウミスズメ科ウトウ Cerorhinca monocerata の雛に食べさせたプラスチックレ ジンペレットは 2,3 日程度で排泄された(山下 未発表)。

このことから、ウミスズメ科のプラスチック摂食割合は 過少評価されている可能性がある。アホウドリ科やミズナギドリ科などミズナギドリ目の多くの種類は雛へ餌と 共にプラスチックを吐き戻して与えていることから、成 鳥は繁殖可能な年齢に達していない亜成鳥や幼鳥と比べ てプラスチックが少ないことが分かっている (Day 1980)。このように、同一種で比べても繁殖などのライフイベントによってプラスチック摂食量や頻度が異なることから、プラスチックの海鳥体内の滞留時間の推定は難しい。

摂食プラスチックの種類について注目してみると、ハシボソミズナギドリの胃から見つかったプラスチックは、プラスチック破片、レジンペレット、薄膜状プラスチック、テグス、発泡スチレンなどがある(図 3)。最も多く見つかるものはプラスチック破片である(Vlietstra and Parga 2002)。年代別にみると、レジンペレットの割合は 1990年代にくらべ 2000年代の方が減少しているのに対して、プラスチック破片(ここではレジンペレットとテグスを除くプラスチックと定義されている)が高くなっており(Vlietstra and Parga 2002)、他の種類の海鳥でも同様の傾向を示している(Ryan 2008:Avery-Gomm et al. 2012)。これは前述したように、海洋中のレジンペレットが減少し、それ以外のプラスチックが増加するという傾向と一



図3. 海鳥の胃から見つかったプラスチックの一例。

致している。

海鳥のプラスチックによる摂食阻害

プラスチック摂食による影響は、1)腸閉塞や胃潰瘍が生じる、2)有効な砂嚢の体積の減少によって消化能力が減少する、といった仮説がある。海鳥では、1)の胃潰瘍が生じることについては、少ないながらも確認されている(Pierce et al. 2004)が、腸閉塞を起こすことは確認されていない。2)については、プラスチック摂食量と体重や体長などのパラメーターとの間に関係がある(Connors and Smith 1982)という報告もあるが、関係性が認められない(Furness 1985b;Yamashita et al. 2011)という報告もあり、生理学的側面からみた被害仮説に対してまだ明確な答えが得られていない。

海洋生物への化学的影響

海洋中のプラスチックと化学物質との関係

海洋プラスチックに含有、あるいは吸着した化学物質を海洋生物が摂食した場合、その化学物質による暴露の影響が懸念される。そこで、まず海洋プラスチックに関わる化学物質について整理する。

最近の研究から、海洋中のプラスチックから様々な化学物質が検出されることが明らかになっている(Hirai et al. 2011)。これらの化学物質は、添加剤としてプラスチックに加えられたものとその分解産物、海水中から吸着した疎水性の物質の2つに分けられる。

プラスチックには酸化防止剤、難燃剤、可塑剤、帯電防止剤、紫外線吸収剤など、用途に応じて様々な添加剤が加えられて製品となる。たとえば、難燃剤としてポリ

臭素化ジフェニルエーテル (polybrominated diphenyl ethers: PBDEs) が車の内装やパソコン、カーテンやカーペットなどの製造時に添加される。PBDEs は二つのベンゼン環がエーテル結合したものに臭素がついており、臭素の数と置換位置によって毒性や代謝が異なる。PBDEs 工業製品には、臭素数が $4 \sim 5$ 個のペンタ製剤、 $7 \sim 8$ 個のオクタ製剤、10 個のデカ製剤のいずれかが製品に配合されている(図 4、La Guardia et al. 2006)。PBDEs は甲状腺攪乱作用や神経毒性を持っており、その中でもペンタ製剤とオクタ製剤は有害な残留性有機汚染物質 (Persistent Organic Pollutants; POPs) の一つである。ストックホルム条約でペンタ製剤とオクタ製剤は使用規制の対象となっている。

添加剤は海水中でプラスチックから溶出していく。溶出は化学物質の疎水性が高いほど溶出速度が遅くなることが分かっている(Endo et al. 2013)。ペンタ製剤、オクタ製剤、デカ製剤のいずれも疎水性が高いが、特にデカ製剤の疎水性は極めて高い。したがって、疎水性が高い添加剤であるデカ製剤は海洋中へ溶出し難いので、外洋を漂流しているプラスチックからデカ製剤に由来する高臭素 PBDEs が検出される(図 5a)。都市域周辺で採取されたプラスチックだけではなく、遠隔地周辺や外洋で採取されたプラスチックがらも PBDEs が散発的かつ高濃度に検出されている。このように散発的に高濃度で検出される理由として、難燃剤がすべてのプラスチックに添加されているわけではなく、難燃剤を必要とする特定の製品に添加されているからである。このように、疎水性が高い添加剤は海洋を漂流しても溶出しきらず外洋や遠隔

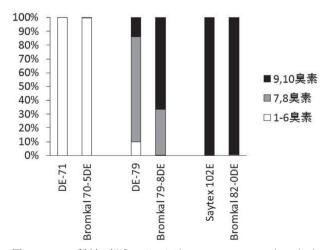


図 4. PBDEs 製剤の組成。データは La Guardia et al. (2006) より引用した。

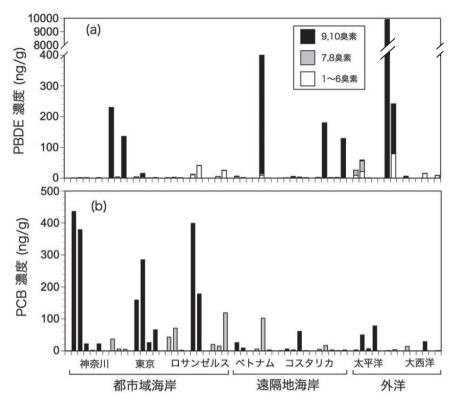


図 5. 海岸および海洋中で採取されたプラスチックの PBDEs 濃度 (a)、および PCBs 濃度 (b)。データは Hirai et al. (2011) から引用した。

地のプラスチックに残留していることが分かる。外洋や 遠隔地の海水や堆積物中では疎水性の高い化学物質の濃 度は低いので、プラスチックが添加剤由来の化学物質を 運ぶ担い手となり、その海域の生物へ脅威となる。

プラスチックは炭化水素骨格から構成されており、そ れ自体、疎水性が高い素材である。したがって海水中で は疎水性の高い化学物質はプラスチックとの親和性が高 く海水からプラスチックに吸着する (Mato et al. 2001)。 そのような化学物質の一つにポリ塩化ビフェニル (polychlorinated biphenlys; PCBs) がある (Mato et al. 2001 ; Ogata et al. 2009 ; Hirai et al. 2011 ; Rochman et al. 2013a など)。PCBs は 1970 年までコンデンサーなどの絶 縁体に使われていたが、現在では製造禁止になっている。 化学構造は、二つのベンゼン環に塩素がついており、そ の組み合わせで209個の同族異性体を持ち、塩素数が多 いほど疎水性が高くなる。生体内では、塩素の置換位置 や数によって毒性や代謝が異なる。一般的に、塩素数が 少ないものは生体内で比較的容易に代謝されるが、塩素 数が多くなると代謝しにくくなり蓄積性が高くなる。生 物中で PCBs 濃度が高くなると免疫力や生殖能力の低下

や発癌性を示す。

海洋中で採取されたプラスチックの PCBs 濃度は図 5b のように都市周辺海域で高く外洋で低いという傾向があ る。これは、都市域の海水中の PCBs 濃度が外洋に比べ て高く、プラスチックに吸着される PCBs を反映してい ると考えられる (Mato et al. 2001; Hirai et al. 2011; Heskett et al. 2012; 高田 2014)。同じ海域から採取したプ ラスチック片でも濃度にばらつきがあるが、この理由と して、各プラスチック片の履歴が異なる、すなわち、そ れぞれのプラスチック片が異なる漂流経路・漂流時間を 持つため、であると考えられる。汚染物質のプラスチッ ク片への吸脱着速度は遅く、濃度が平衡状態に達するの に時間がかかる。例えば PCBs の場合、概ね1年程度で 平衡に達すると報告されている (Rochman et al. 2013a)。 このように吸脱着に時間がかかるため、プラスチック片 は漂流経路の途中での汚染物質への曝露の履歴を保持し ているものがあり、漂流経路や時間が異なると、プラスチ ック片間で汚染物質濃度が大きく変動すると考えられる。

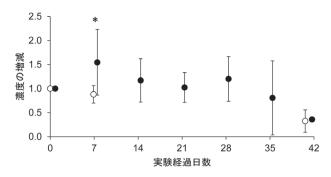


図 6. 飼育実験期間中のオオミズナギドリ雛の尾腺ワックス中の 低塩素 PCBs(塩素数 2 ~ 4 個)濃度の変動(*: two-tiled test, t=2.57, p<0.05)。図中の○はコントロール区、●はプラスチック摂食区を示す。バーは標準偏差を示す。データは山下 (2008) から引用した。

プラスチック摂食に伴う化学物質による暴露と生体への 移行

前述したように、プラスチックにはさまざまな化学物質が吸着・添加されている。したがって、プラスチックを摂食することは、同時に化学物質も一緒に摂取するということになる。これらのプラスチックを摂食することによって、生物へ化学物質が取り込まれるという点も問題になってくる。そこで著者らは1)海鳥の雛を飼育しPCBsが吸着したプラスチックを摂食させる実験、2)海鳥の胃中のプラスチックと脂肪中のPCBs 濃度を測定、3)プラスチックに含まれ且つ餌由来ではないPBDEs 濃度をプラスチックと脂肪で測定し比較する、の3つによって、海鳥が食べたプラスチック中のPOPsが海鳥体内へ移行しているかどうかを調べた。

まず、オオミズナギドリの 40 日齢の雛に、予め PCBs が吸着していることを確認したプラスチックレジンペレット (ポリエチレン)を約 0.1 g (40粒)を与えた (山下 2008; Teuten et al. 2009)。実験期間を通して、体重はプラスチック摂食区と対照区との間に差はなかったが、プラスチック摂食区の尾腺ワックス中の低塩素 PCBs (塩素数 2~4) 濃度はコントロール区に比べ有意に上昇することが確認された (図 6)。また、実験終了後の肝臓中の低塩素 PCBs 濃度はプラスチック摂食区の方が有意に高い値を示した。

次に、ベーリング海で混獲されたハシボソミズナギドリ Puffinus tenuirostris の胃から摘出したプラスチック重量と腹腔内脂肪中の低塩素 PCBs(塩素数 $2 \sim 4$ 個)濃度を調べたところ、両者に相関が認められた(図 7a)(Yamashita et al. 2011)。 PCBs は食物連鎖によって濃度が増幅される

ので海鳥の餌生物にも高濃度のPCBs が含まれている。さらにプラスチックからのPCBs 暴露が加わることになり、胃内容物からのプラスチック経由のPCBs 暴露は簡単に読み取れない。高塩素PCBs(塩素数5~9個)は食物連鎖で増幅されやすく餌からの寄与が大きくなるため、プラスチックからのPCBsの寄与は有意にはならなかった(図7b)。一方、低塩素PCBsは餌生物中の濃度が比較的低いためプラスチックからの寄与が大きくなり、プラスチック量との関係に有意な相関が認められたと考えられた。この野外調査と前述の飼育実験の結果を併せると、胃中のプラスチックからPCBs濃度が移行することが示唆された。

前述した PBDEs は、特にデカ製剤に含まれる高臭素の 同族異性体において、食物連鎖を通して生物増幅されな いことが分かっている (Mizukawa et al. 2009)。そこで、 プラスチック由来の PBDEs (特に高臭素の同族異性体) が生物体内へ移行するかどうかを、ベーリング海で混獲 されたハシボソミズナギドリの腹腔内脂肪と胃から摘出 したプラスチックを使って検討した(Tanaka et al. 2013)。 海鳥脂肪中のPBDEs組成は低~中臭素(臭素数1~6) の同族異性体が高い割合を示しており(図8(b))、餌生物 の一つであるハダカイワシ Myctophidae と同様の組成と なっていた(図8c)。一方、脂肪中で高いPBDEs濃度を 示した個体に注目すると、高臭素(臭素数7~10)が主 体の組成を示し(図8(a),(b))、対応する個体から摘出し たプラスチックも高臭素、中でもデカ製剤由来とみられ る9~10臭素の高臭素の組成が主体であった(図 8(d),(e))。この PBDEs の組成から、プラスチック由来の 高臭素 PBDEs が海鳥成体内へ移行したことが明らかにな った。高臭素 PBDEs のようにプラスチックに含まれてい るが食物連鎖によって濃度が増幅しない化学物質は、海 洋漂流するプラスチックが海洋生物への主たる暴露源と なることが分かった。

PBDEs のように添加剤としてプラスチックに含まれる 化学物質や PCBs のように海水中からプラスチックに吸着する化学物質のどちらも当てはまることであるが、海洋生物への暴露は体内でのプラスチックの滞留時間が生物影響に関係してくると考えられる。しかし、滞留時間と汚染物質との体内への吸収について関係について着目した研究はまだ進んでいない。

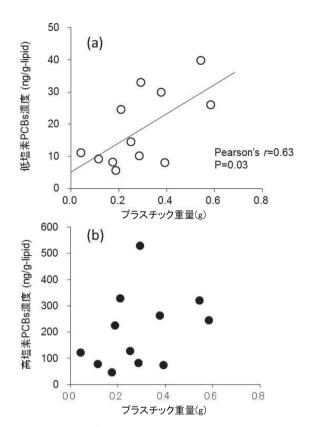


図 7. ハシボソミズナギドリ中のプラスチック重量と低塩素 PCBs (塩素数 2 ~ 4 個) 濃度 (a) と高塩素 PCBs (塩素数 5 ~ 9 個) 濃度 (b)。低塩素 PCBs 濃度は塩素数 2-4 の濃度の 総和、高塩素 PCBs 濃度は塩素数 5-9 の濃度の総和を示す。 データは Yamashita et al. (2011) から引用した。

最新のプラスチック汚染研究と今後の展望

近年、小さなプラスチック破片、すなわちマイクロプラスチック(5 mm 以下のサイズのプラスチックの総称)の問題が注目され始めている。マイクロプラスチックはマクロプラスチックが微細化して形成されるものだけではなく、マイクロビーズとして洗顔料などに入っており、生活排水から環境へ排出されているものも含まれている(Gregory 1996:Fendall and Sewell 2009)。

Thompson et al. (2004) は、目視による直接観察では見逃してしまうマイクロプラスチックを連続プランクトン採集器で採取されたサンプルから電子顕微鏡下で検出した。さらに摂食実験によって動物プランクトンによる取り込みが明らかになった。しかし、実際に野外において低次栄養段階生物によるマイクロプラスチックの摂食はほとんど確認されておらず、現在のところ養殖のヨーロッパイガイ Mytilus edulis とマガキ Crassostrea gigas (Van

Cauwenberghe and Janssen 2014)、アカザエビ Nephrops norvegicus (Murray and Cowie 2011)、オキアミ類 Eupausia pacifica、カイアシ類 Neocalanus cristatus (Desforges et al. 2015)でマイクロプラスチックの取り込みが確認されている(表1)。これら低次栄養段階生物で報告例が少ない理由として、生物体内のプラスチック滞留時間が海鳥などの高次栄養段階生物と比べて短いために検出が困難であることが考えられる。また、低栄養段階生物が取り込むプラスチックのサイズは小さいため、従来の検出方法ではプラスチックが見落とされている可能性もある。

低次栄養段階生物のマイクロプラスチック摂食に伴う 化学物質の取り込みと影響についての検証は、摂食実験 が主体となっている。例えば、メダカ Orvzias latipes を使 った摂食実験では、3か月間プラスチックレジンペレッ トを海洋中に係留したものを粉砕して(< 500 um) 餌と 一緒に与え、PCBs、PBDEs、多環芳香族炭化水素 (PAHs) の体内濃度を調べた (Rochman et al. 2013b)。2か月後に メダカの PCBs, PBDEs (4-6 臭素) の体内濃度は増加して いたが、PBDEs の体内濃度がコントロール区に比べてプ ラスチック摂食区で有意に高くなったのに対して、PCBs の体内濃度は差が見られなかった。この結果は餌の中に これらの化学物質が含まれていている可能性について考 える必要がある。PBDEs(4-6臭素)は生物増幅されにく いため (Mizukawa et al. 2013)、餌中の濃度は低い。一方、 PCBs は生物増幅されやすい物質なので餌中の濃度は高く なる。PBDEs (4-6 臭素) も PCBs もプラスチックに吸着 して生物に暴露されるが、PCBs の方が餌中の濃度が高い ためプラスチックの寄与が見えにくくなっていると考え られる。PAHs の体内濃度についてもこの実験で分析され ているが、その結果についての解釈は不明な点が多い。 また、肝臓における細胞診を行ったところ、汚染物質の 代謝で活性する薬物代謝酵素 CYP1A にはプラスチック摂 食区とコントロール区の間で差が認められず、毒性影響 はみられなかった。

Besseling et al. (2013) は PCBs で汚染された堆積物にポリスチレン製のマイクロプラスチックビーズ(直径 $400\sim1300~\mu m$ 、堆積物重量に対して $0.074\sim7.4\%$)を混ぜ、ゴカイ *Arenicola marina* を飼育したところ、PCBs の生物濃縮はポリスチレンビーズによって大きくなることを明らかにした。Browne et al. (2013) はポリ塩化ビニル(直径 $230~\mu m$)に化学物質(フェナンスレン、トリクロサン、ノニルフェノール、臭素化ジフェニルエーテル (BDE47))を吸着させ、それを砂の重量の 5%になるように混ぜてゴカイを飼育した。その結果、これらの化学

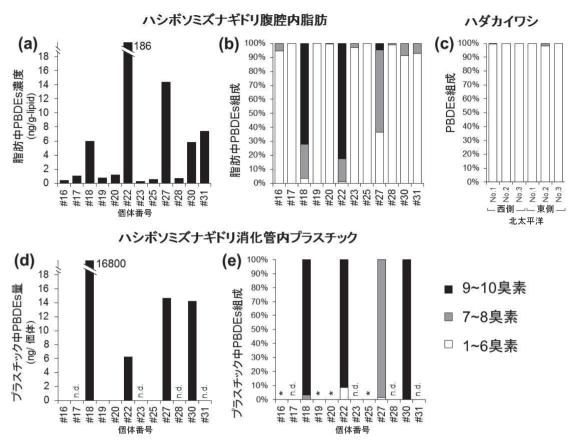


図 8. ハシボソミズナギドリ腹腔内脂肪中の PBDEs 濃度 (a) と組成 (b)、ハダカイワシ中の PBDEs 組成 (c)、ハシボソミズナギドリの消化管内プラスチック中の PBDEs 濃度 (d) と組成 (e)。データは Tanaka et al. (2013) から引用した。

物質がゴカイ体内へ移行し、それによって生存率、摂食率、 免疫力、抗酸化能力の低下といった生物影響が明らかに なった。これらの実験結果から、疎水性の化学物質がマ イクロプラスチックからゴカイへ移行し、毒性影響を与 えたことが示された。

動物プランクトン Centropages typicus にポリスチレン (直径 7.3 μ m) を摂食させたところ (\geq 4000 個/mL)、藻類の摂食量が低下した (Cole et al. 2013)。また、動物プランクトン Calanus helgolandicus にポリスチレン (直径 20 μ m、75 個/mL) を摂食させたところ、摂食量の減少、卵の孵化率と生残率の低下がみとめられた (Cole et al. 2015)。これらの結果から、プラスチック摂食によって動物プランクトンの摂食阻害が認められた。しかし、実際の環境下よりも過剰のプラスチックを使って実験を行っているので、野外に近い環境下での観察も必要になる。

摂食実験ではないが植物プランクトンとプラスチック との関係について調べた研究もある。イカダモ Scenedesmusとポリスチレン製のナノサイズのプラスチッ クビーズ(20 nm)を混在させて培養することで ROS(酸化ストレスの指標)生成率が高くなることが分かった(Bhattacharya et al. 2010)。これはプラスチックビーズとセルロースとの間に静電気引力がおこり、プラスチックが吸着することで物理的に光合成を妨げたと考えられる。

マイクロプラスチックが小さなサイズの生物(特に濾過摂食者、懸濁物摂食者、堆積物摂食者)へ与える影響は基本的に大きなサイズの生物への影響(摂食障害とプラスチック摂食に伴う化学物質による暴露)と同じである。しかし、プラスチックに係る化学物質の挙動はプラスチックのサイズによって異なってくる。添加剤由来の化学物質はプラスチックの細片化によって海水への溶出が促進される。そのため、外洋で採取されるプラスチック破片からは比較的低濃度になっている。一方、細片化したプラスチックはPCBs などの疎水性の汚染物質を海洋中から吸着していくため、添加剤に比べて吸着する化学物質の方が濃度の寄与が大きくなってくる。したがって、海洋中のマクロサイズとマイクロサイズのプラスチ

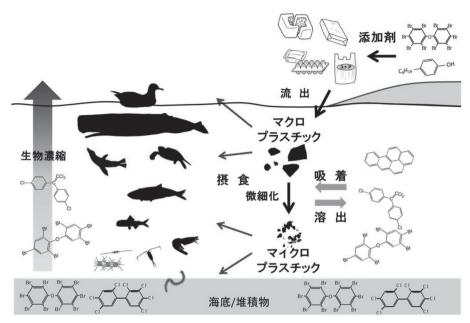


図9. 海洋生態系におけるプラスチックの挙動。

ックの化学物質の挙動について、どちらも注意が必要と なってくる。

プラスチックによる海洋汚染の研究はマクロなサイズ のプラスチックにのみ焦点があてられてきた。しかし、 前述したように顕微鏡下でしか見つけることができない ような小さなサイズのプラスチックが存在することが最 近になって明らかとなり、これまで注目されてこなかっ た低次栄養段階の小さな生物への影響が危惧されている。 従来、PCBs や PBDEs といった疎水性の汚染物質による 海洋生物への取り込みは、餌由来で生物濃縮することが 知られており、化学物質による生物濃縮とプラスチック 摂食の研究は別々に行われていた。しかし、プラスチッ クが汚染物質の運び手(キャリヤー)としてふるまうこ とから、海洋生態系の生物濃縮による汚染物質のフロー に生物によるプラスチック摂食が新たな暴露ルートとし て加わることになる(図9)。今後、海洋へのプラスチッ ク流出量が増えることによって汚染物質による負荷量が 大きくなり、海洋生態系全体へ脅威が増すと考えられる。

プラスチック汚染による海洋生態系のリスク評価は化学物質とプラスチックという二つの事項を考慮しなければならない。リスク評価には、1)海洋環境中におけるプラスチック(特にマイクロサイズ)の定量、2)海洋環境中のプラスチック由来の化学物質の挙動、3)海洋生物のプラスチック摂食のモニタリング、4)野外における摂食阻害(物理的影響)の調査、5)プラスチック摂食に伴う

化学物質の生体内移行の程度、6)毒性影響評価、といっ た項目に関する研究が必要だと考えられる。1)について は、特にマイクロプラスチックの調査自体が数年前から 始まったばかりで、海洋環境からのサンプリング方法や 同定・定量方法といった基本的なものでさえ技術的に困 難で、確立していないのが現状である。2)については、 プラスチックから溶出、或いは吸着する化学物質とサイ ズについての関係について、野外調査も行い詳しく調べ る必要がある。3)と4)では、野外調査でマイクロサイ ズのプラスチックの摂食状況を調べる必要がある。さら に、3)ではモデル生物を決めて(海鳥、魚類、動物プラ ンクトンなど) 長期的なモニタリングを行うことも大切 である。5) と 6) は室内実験が行われ始めているが、こ れらは低次栄養段階生物が中心となっているので、高次 栄養段階生物について野外調査も並行して調べていく必 要がある。

プラスチック汚染の問題の解決には、海洋学、環境化学、生物学、毒性学、生態学といった多くの分野が関係してくる。例えば、海洋学ではプラスチックが最終的に海洋中で溜まる場所を推定する、環境化学では環境中でのプラスチックと化学物質との関係を明らかにする、生物学や毒性学ではプラスチック摂食による生体への影響を調べる、生態学では生態系へのインパクトと将来を予測するために、研究を進めていく必要がある。したがって、他分野の研究者との連携が重要であり、様々な視点とアプ

ローチがプラスチック汚染を解決する鍵となるであろう。

謝辞

研究を進めるにあたり、多くのご助言を賜りました小城春雄博士と福本由利氏に厚く御礼申し上げます。また、本稿を書くにあたり、東京農工大の水川薫子博士に貴重な助言を賜りました。御礼申し上げます。

引用文献

- Ainley DG, Fraser WR, Spear LB (1990a) The incidence of plastic in the diets of Antarctic seabirds. In: Shomura SR, Godfrey ML (ed), Proceedings of the second international conference on marine debris, 682-691. U.S. Dep. Cmmer., NOAA Tech. Memo., Honolulu
- Ainley DG, Spear LB, Ribic CA (1990b) The incidence of plastic in the diets of pelagic seabirds in the eastern equatorial Pacific region. In: Shomura SR, Godfrey ML (ed), Proceedings of the second international conference on marine debris, 653-664. U.S. Dep. Commerce, NOAA Tech. Memo, Honolulu
- Andrady AL (2011) Microplastics in the marine environment. Marine Pollution Bulletin, 62:1596-1605
- Avery-Gomm S, O'Hara PD, Kleine L, Bowes V, Wilson LK, Barry KL (2012) Northern fulmars as biological monitors of trends of plastic pollution in the eastern North Pacific. Marine Pollution Bulletin, 64:1776-1781
- Baulch S, Perry C (2014) Evaluating the impacts of marine debris on cetaceans. Marine Pollution Bulletin, 80:210-221
- Baltz DM, Morejohn GV (1976) Evidence from seabirds of plastic particle pollution off central California. Western Birds, 7:111-112
- Beck CA, Barros NB (1991) The impact of debris on the Florida manatee. Marine Pollution Bulletin, 22:508-510
- Besseling E, Wegner A, Foekema EM, van den Heuvel-Greve MJ, Koelmans AA (2013) Effects of Microplastic on Fitness and PCB Bioaccumulation by the Lugworm Arenicola marina (L.). Environmental Science & Technology, 47:593-600
- Bhattacharya P, Lin S, Turner JP, Ke PC (2010) Physical Adsorption of Charged Plastic Nanoparticles Affects Algal Photosynthesis. The Journal of Physical Chemistry C, 114:16556-16561
- Boerger CM, Lattin GL, Moore SL, Moore CJ (2010) Plastic ingestion by planktivorous fishes in the North Pacific Central Gyre. Marine Pollution Bulletin, 60:2275-2278
- Browne MA, Niven SJ, Galloway TS, Rowland SJ, Thompson RC (2013) Microplastic Moves Pollutants and Additives to Worms, Reducing Functions Linked to Health and Biodiversity. Current Biology, 23:2388-2392.
- Caldwell MC, Caldwell DK, Siebenaler JB (1965) Observations

- on captive and wild Atlantic bottlenosed dolphins, *Tursiops Truncatus:* In the northeastern Gulf of Mexico. Los Angeles County Museum, 91:1-10
- Carpenter EJ, Smith KLJ (1972) Plastics on the Sargasso Sea Surface. Science, 175:1240-1241
- Carpenter EJ, Anderson SJ, Harvey GR, Miklas HP, Peck BB (1972). Polystyrene spherules in coastal waters. Science, 178:749-750
- Carson HS, Nerheim MS, Carroll KA, Eriksen M (2013) The plastic-associated microorganisms of the North Pacific Gyre. Marine Pollution Bulletin, 75:126-132
- Choy CA, Drazen JC (2013) Plastic for dinner? Observations of frequent debris ingestion by pelagic predatory fishes from the central North Pacific. Marine Ecology Progress Series, 485:155-163
- Cliff G, Dudley SF, Ryan PG, Singleton N (2002) Large sharks and plastic debris in KwaZulu-Natal, South Africa. Marine and Freshwater Research, 53:575-581
- Cole M, Lindeque P, Fileman E, Halsband C, Goodhead R, Moger J, Galloway TS (2013) Microplastic Ingestion by Zooplankton. Environmental Science & Technology, 47:6646-6655
- Cole M, Lindeque P, Fileman E, Halsband C, Galloway TS (2015) The Impact of Polystyrene Microplastics on Feeding, Function and Fecundity in the Marine Copepod Calanus helgolandicus. Environmental Science & Technology, 49:1130-1137
- Connors PG, Smith KG (1982) Oceanic plastic particle pollution: suspected effect on fat deposition in red phalaropes. Marine Pollution Bulletin, 13:18-20
- Cózar A, Echevarría F, González-Gordillo JI, Irigoien X, Úbeda B, Hernández-León S, Palma ÁT, Navarro S, García-de-Lomas J, Ruiz A, Fernández-de-Puelles ML, Duarte CM (2014) Plastic debris in the open ocean. Proceedings of the National Academy of Sciences, 111:10239-10244
- Day RH (1980) The occurrence and characteristics of plastic pollution in Alaska's marine birds pp. 111. University of Alaska, Fairbanks, Alaska.
- Day RH, Wehle HS, Coleman FC (1985) Ingestion of plastic pollutants by marine birds. In: Shomura RS, Yoshida HO (ed), Proceedings of the Workshop on the Fate and Impact of Marine Debris, 344-386. U.S. Dept. of Commerce, NOAA Tech. Memo, Honolulu
- Day RH, Shaw DG, Ignell SE (1990) The quantitative distribution and characteristics of neuston plastic in the North Pacific, 1984–1988. In: Shomura RS, Godfrey ML (ed), Second International Conference on Marine Debris, 247-266.
 U.S. Dep. Cmmer., NOAA Tech. Memo., Honolulu
- Derraik JGB (2002) The pollution of the marine environment by plastic debris: a review. Marine Pollution Bulletin, 44:842-852
- de Stephanis R, Giménez J, Carpinelli E, Gutierrez-Exposito C, Cañadas A (2013) As main meal for sperm whales: plastics debris. Marine Pollution Bulletin, 69:206-214

- Desforges JPW, Galbraith M, Ross PS (2015) Ingestion of microplastics by zooplankton in the Northeast Pacific Ocean. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 69:320-330
- Doyle MJ, Watson W, Bowlin NM, Sheavly SB (2011) Plastic particles in coastal pelagic ecosystems of the Northeast Pacific ocean. Marine Environmental Research, 71:41-52
- Endo S, Yuyama M, Takada H (2013) Desorption kinetics of hydrophobic organic contaminants from marine plastic pellets. Marine Pollution Bulletin, 74:125-131
- Eriksson C, Burton H (2003) Origins and biological accumulation of small plastic particles in fur seals from Macquarie Island. AMBIO: A Journal of the Human Environment, 32:380-384
- Fendall LS, Sewell MA (2009) Contributing to marine pollution by washing your face: Microplastics in facial cleansers. Marine Pollution Bulletin, 58:1225-1228
- Fernández R, Santos MB, Carrillo M, Tejedor M, Pierce GJ (2009) Stomach contents of cetaceans stranded in the Canary Islands 1996-2006. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom, 89:873-883
- Foekema EM, De Gruijter C, Mergia MT, van Franeker JA, Murk AJ, Koelmans AA (2013) Plastic in North sea fish. Environmental Science & Technology, 47:8818-8824
- Furness BL (1983) Plastic particles in three procellariiform seabirds from the Benguela Current, South Africa. Marine Pollution Bulletin, 14:307-308
- Furness RW (1985a) Ingestion of plastic particles by seabirds at Gough Island, South Atlantic Ocean. Environmental Pollution Series A, Ecological and Biological, 38:261-272
- Furness RW (1985b) Plastic particle pollution: Accumulation by procellariiform seabirds at Scottish Colonies. Marine Pollution Bulletin, 16:103-106
- Goldstein MC, Titmus AJ, Ford M (2013) Scales of spatial heterogeneity of plastic marine debris in the northeast Pacific Ocean. PLoS ONE, 8:e80020
- Gomerčić H, Gomerčić MD, Gomerčić T, Lucić H, Dalebout M, Galov A, Škrtić D, Ćurković S, Vuković S, Huber D (2006) Biological aspects of Cuvier's beaked whale (Ziphius cavirostris) recorded in the Croatian part of the Adriatic Sea. European Journal of Wildlife Research, 52:182-187
- Gregory MR (1996) Plastic "scrubbers" in hand cleansers: a further (and minor) source for marine pollution identified. Marine Pollution Bulletin, 32:867-871
- Harrison CS, Hida TS, Seki MP (1983) Hawaiian seabird feeding ecology. Wildlife Monographs, 85:3-71
- Heskett M, Takada H, Yamashita R, Yuyama M, Ito M, Geok YB, Ogata Y, Kwan C, Heckhausen A, Taylor H, Powell T, Morishige C, Young D, Patterson H, Robertson B, Bailey E, Mermoz J (2012) Measurement of persistent organic pollutants (POPs) in plastic resin pellets from remote islands: Toward establishment of background concentrations for International Pellet Watch. Marine Pollution Bulletin, 64:445-448.

- Hirai H, Takada H, Ogata Y, Yamashita R, Mizukawa K, Saha M, Kwan C, Moore C, Gray H, Laursen D, Zettler ER, Farrington JW, Reddy CM, Peacock EE, Ward MW (2011) Organic micropollutants in marine plastics debris from the open ocean and remote and urban beaches. Marine Pollution Bulletin, 62:1683-1692.
- Hoarau L, Ainley L, Jean C, Ciccione S (2014) Ingestion and defecation of marine debris by loggerhead sea turtles, Caretta caretta, from by-catches in the South-West Indian Ocean. Marine Pollution Bulletin, 84:90-96
- Hopewell J, Dvorak R, Kosior E (2009) Plastics recycling: challenges and opportunities. Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences, 364:2115-2126
- Jackson GD, Buxton NG, George MJ (2000) Diet of the southern opah Lampris immaculatus on the Patagonian Shelf; the significance of the squid Moroteuthis ingens and anthropogenic plastic. Marine Ecology Progress Series, 206:261-271
- Jacobsen JK, Massey L, Gulland F (2010) Fatal ingestion of floating net debris by two sperm whales (Physeter macrocephalus). Marine Pollution Bulletin, 60:765-767
- Jambeck JR, Geyer R, Wilcox C, Siegler TR, Perryman M, Andrady A, Narayan R, Law KL (2015) Plastic waste inputs from land into the ocean. Science, 347:768-771
- Jantz LA, Morishige CL, Bruland GL, Lepczyk CA (2013) Ingestion of plastic marine debris by longnose lancetfish (Alepisaurus ferox) in the North Pacific Ocean. Marine Pollution Bulletin, 69:97-104
- Kubota T (1990) Synthetic materials found in the stomachs of longnose lancetfish from Suruga Bay, central Japan. In: Shomura RS, Godfrey ML (ed), Proceedings of the Second International Conference on Marine Debris, 710-717. U.S. Dep. Cmmer., NOAA Tech. Memo., Honolulu
- La Guardia MJ, Hale RC, Harvey E (2006) Detailed Polybrominated Diphenyl Ether (PBDE) Congener Composition of the Widely Used Penta-, Octa-, and Deca-PBDE Technical Flame-retardant Mixtures. Environmental Science & Technology, 40:6247-6254
- Laist DW (1997) Impacts of marine debris: entanglement of marine life in marine debris including a comprehensive list of species with entanglement and ingestion records. In: Coe JM, Rogers DB (ed), Marine Debris: Sources, Impacts, and Solutions, 99-139. Springer-Verlag, New York, Berlin, Heidelberg
- Law KL, Morét-Ferguson S, Maximenko NA, Proskurowski G, Peacock EE, Hafner J, Reddy CM (2010) Plastic accumulation in the North Atlantic subtropical gyre. Science, 329(5996):1185-1188
- Law KL, Morét-Ferguson SE, Goodwin DS, Zettler ER, DeForce E, Kukulka T, Proskurowski G (2014) Distribution of Surface Plastic Debris in the Eastern Pacific Ocean from an 11-Year Data Set. Environmental Science & Technology, 48:4732-4738

- Mallory ML (2008) Marine plastic debris in northern fulmars from the Canadian high Arctic. Marine Pollution Bulletin, 56:1501-1504
- Manooch III CS, Hogarth WT (1983) Stomach contents and giant trematodes from wahoo, Acanthocybium solanderi, collected along the South Atlantic and Gulf coasts of the United States. Bulletin of Marine Science, 33:227-238
- Manooch III SC, Mason DL (1983) Comparative food studies of yellowfin in tuna, Thunnus albacares, and blackfin tuna, Thunnus atlanticus, (Pisces: Scombridae) from the southeastern and Gulf Coast of the United States. Brimleyana, 9:33-51
- Mascarenhas R, Santos R, Zeppelini D (2004) Plastic debris ingestion by sea turtle in Paraíba, Brazil. Marine Pollution Bulletin, 49:354-355
- Mate BR (1985) Incidents of marine mammal encounters with debris and active fishing gear. In: Shomura RS, Yoshida HO (ed), Proceedings of the Workshop on the Fate and Impact of Marine Debris, 453-457. U.S. Dept. of Commerce, NOAA Tech. Memo, Honolulu
- Mato Y, Isobe T, Takada H, Kanehiro H, Ohtake C, Kaminuma T (2001) Plastic Resin Pellets as a Transport Medium for Toxic Chemicals in the Marine Environment. Environmental Science and Technology, 35:318-324
- Maximenko N, Hafner J, Niiler P (2012) Pathways of marine debris derived from trajectories of Lagrangian drifters. Marine Pollution Bulletin, 65:51-62
- Mizukawa K, Takada H, Takeuchi I, Ikemoto T, Omori K, Tsuchiya K (2009) Bioconcentration and biomagnification of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) through lower-trophic-level coastal marine food web. Marine Pollution Bulletin, 58:1217-1224
- Mizukawa K, Yamada T, Matsuo I, Takeuchi K, Tsuchiya K, Takada H (2013) Biomagnification and debromination of polybrominated diphenyl ethers in a coastal ecosystem in Tokyo Bay. Science of The Total Environment, 449:401-409
- Moore CJ, Moore SL, Leecaster MK, Weisberg SB (2001) A Comparison of Plastic and Plankton in the North Pacific Central Gyre. Marine Pollution Bulletin, 42:1297-1300
- Morét-Ferguson S, Law KL, Proskurowski G, Murphy EK, Peacock EE, Reddy CM (2010) The size, mass, and composition of plastic debris in the western North Atlantic Ocean. Marine Pollution Bulletin, 60:1873-1878
- Moser ML, Lee DS (1992) A Fourteen-Year Survey of Plastic Ingestion by Western North Atlantic Seabirds. Colonial Waterbirds, 15:83-94
- Mrosovsky N, Ryan GD, James MC (2009) Leatherback turtles: The menace of plastic. Marine Pollution Bulletin, 58:287-289
- Murray F, Cowie PR (2011) Plastic contamination in the decapod crustacean Nephrops norvegicus (Linnaeus, 1758). Marine Pollution Bulletin, 62:1207-1217
- Ogata Y, Takada H, Mizukawa K, Hirai H, Iwasa S, Endo S, Mato Y, Saha M, Okuda K, Nakashima A, Murakami M,

- Zurcher N, Booyatumanondo R, Zakaria MP, Dung LQ, Gordon M, Miguez C, Suzuki S, Moore C, Karapanagioti HK, Weerts S, McClurg T, Burres E, Smith W, Van Velkenburg M, Lang JS, Lang RC, Laursen D, Danner B, Stewardson N, Thompson RC (2009) International Pellet Watch: Global monitoring ofpersistent organic pollutants (POPs) in coastal Waters. 1. Initial phase data on PCBs, DDTs, and HCHs. Marine Pollution Bulletin, 58:1437-1446
- Ogi H (1990) Ingestion of plastic particles by sooty and short-tailed shearwaters in the North Pacific. In: Shomura RS, Godfrey ML (ed), Proceedings of the second international conference on marin debris, 635–652, U.S. Dep. Cmmer., NOAA Tech. Memo., Honolulu
- Ogi H, Momose K, Sato F, Baba N (1994) Plastic particles found in the gizzard of a starved black-footed albatross (*Diomedea nigripes*). Journal of the Yamashina Institute for Ornithology, 26:77-80.
- Parslow JLF, Jefferies DJ (1972) Elastic thread pollution of puffins. Marine Pollution Bulletin, 3:43-45
- Petry MV, Krüger L, da Silva Fonseca VS, Brummelhaus J, da Cruz Piuco R (2009) Diet and ingestion of synthetics by Cory's Shearwater Calonectris diomedea off southern Brazil. Journal of Ornithology, 150:601-606
- Pierce KE, Harris RJ, Larned LS, Pokras MA (2004) Obstruction and starvation associated with plastic ingestion in a northern ganet *Morus bassanus* and a greater shearwater *Puffinus gravis*. Marine Ornithology, 32:187-189
- PlasticsEurope (2013) Plastics the Facts 2013, an Analysis of European Latest Plastics Production, Demand and Waste Data pp. 40, Brussels
- Plotkin P, Amos AF (1990) Effects of anthropogenic debris on sea turtles in the northwestern Gulf of Mexico. In: Shomura RS, Godfrey ML (ed), Proceedings of the second international conference on marin debris, 736–743, U.S. Dep. Cmmer., NOAA Tech. Memo., Honolulu
- Provencher JF, Gaston AJ, Mallory ML, O'hara PD, Gilchrist HG (2010) Ingested plastic in a diving seabird, the thick-billed murre (Uria lomvia), in the eastern Canadian Arctic. Marine Pollution Bulletin, 60:1406-1411
- Robards MD, Gould PJ, Piatt JF (1997) The highest global concentrations and increased abundance of oceanic plastic debris in the North Pacific: evidence from seabirds. In: Coe JM, Rogers DB (ed), Marine Debris: Sources, Impacts, and Solutions, 99-139. Springer-Verlag, New York, Berlin, Heidelberg
- Rochman CM, Hoh E, Hentschel BT, Kaye S (2013a) Long-Term Field Measurement of Sorption of Organic Contaminants to Five Types of Plastic Pellets: Implications for Plastic Marine Debris. Environmental Science & Technology, 47:1646-1654
- Rochman CM, Hoh E, Kurobe T, Teh SJ (2013b) Ingested plastic transfers hazardous chemicals to fish and induces hepatic stress. Scientific Reports 3.
- Rothstein SI (1973) Plastic particle pollution of the surface of

- the Atlantic Ocean: evidence from a seabird. Condor, 75:5
- Ryan PG (1987) The incidence and characteristics of plastic particles ingested by seabirds. Marine Environmental Research, 23:175-206
- Ryan PG, Jackson S (1987) The life-span of ingested plastic particles in seabirds and their effect on digestive efficiency. Marine Pollution Bulletin, 18:217-219
- Ryan PG, Fraser MW (1988) The use of Great Skua pellets as indicators of plastic pollution in seabirds. Emu, 88:16-19
- Ryan PG (2008) Seabirds indicate changes in the composition of plastic litter in the Atlantic and south-western Indian Oceans. Marine Pollution Bulletin, 56:1406-1409
- Schuyler Q, Hardesty BD, Wilcox C, Townsend K (2014) Global analysis of anthropogenic debris ingestion by sea turtles. Conservation Biology, 28:129-139
- Secchi ER, Zarzur S (1999) Plastic debris ingested by a Blainville's beaked whale, Mesoplodon densirostris, washed ashore in Brazil. Aquatic Mammals, 25:21-24
- Sileo L, Sievert PR, Samuel MD, Fefer SI (1990). Prevalence and characteristics of plastic ingested by Hawaiian seabirds.
 In: Shomura RS, Godfrey ML (ed), Proceedings of the Second International Conference on Marine Debris, 665-681.
 U.S. Dep. Cmmer., NOAA Tech. Memo., Honolulu
- Spear LB, Ainley DG, Ribic CA (1995) Incidence of plastic in seabirds from the Tropical Pacific, 1984–1991: relation with distribution of species, sex, age, season, year and body weight. Marine Environmental Research, 40:123-146
- Stamper MA, Whitaker BR, Schofield TD (2006) Case study: Morbidity in a pygmy sperm whale *Kogia breviceps* due to ocean bourne plastic. Marine Mammal Science, 22:719-722
- 高田 秀重 (2014) International Pellet Watch (IPW): 海岸漂着 プラスチックを用いた地球規模でのPOPsモニタリング. 地球環境, 19(2):135-145
- Tanaka K, Takada H, Yamashita R, Mizukawa K, Fukuwaka M-a, Watanuki Y (2013) Accumulation of plastic-derived chemicals in tissues of seabirds ingesting marine plastics. Marine Pollution Bulletin, 69:219-222
- Teuten EL, Saquing JM, Knappe DRU, Barlaz MA, Jonsson S, Bjorn A, Rowland SJ, Thompson RC, Galloway TS, Yamashita R, Ochi D, Watanuki Y, Moore C, Pham HV, Tana TS, Prudente M, Boonyatumanond R, Zakaria MP,

- Akkhavong K, Ogata Y, Hirai H, Iwasa S, Mizukawa K, Hagino Y, Imamura A, Saha M, Takada H (2009) Transport and release of chemicals from plastics to the environment and to wildlife. Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences, 364:2027-2045
- Thompson RC, Olsen Y, Mitchell RP, Davis A, Rowland SJ, John AWG, McGonigle D, Russell AE (2004) Lost at sea: Where is all the plastic? Science, 304:838
- Van Cauwenberghe L, Janssen CR (2014) Microplastics in bivalves cultured for human consumption. Environmental Pollution, 193:65-70
- Van Franeker JA (1983) Plastics—Een bedreiging voor zeevogels. Nieuwsbrief NSO, 4:41-61
- Van Franeker JA (1985) Plastic ingestion in the North Atlantic fulmar. Marine Pollution Bulletin, 16:367-369
- Vlietstra LS, Parga JA (2002) Long-term changes in the type, but not amount, of ingested plastic particles in short-tailed shearwaters in the southeastern Bering Sea. Marine Pollution Bulletin, 44:945-955
- Walker WA, Coe JM (1990) Survey of marine debris ingestion by odontocete cetaceans. In: Shomura RS, Godfrey ML (ed), Second International Conference on Marine Debris, 747-774. U.S. Dep. Cmmer., NOAA Tech. Memo., Honolulu
- Watanuki Y (1985) Food of breeding Leach's storm-petrels (Oceanodroma leucorhoa). The Auk: 884-886
- Wilber RJ (1987) Plastic in the North Atlantic. Oceanus, 30:61-68
- Yamashita R, Takada H, Fukuwaka M-a, Watanuki Y (2011) Physical and chemical effects of ingested plastic debris on short-tailed shearwaters, Puffinus tenuirostris, in the North Pacific Ocean. Marine Pollution Bulletin, 62:2845-2849
- Yamashita R, Tanimura A (2007) Floating plastic in the Kuroshio Current area, western North Pacific Ocean. Marine Pollution Bulletin, 54:485-488
- 山下 麗 (2008) 北太平洋におけるプラスチック汚染と海鳥への影響に関する研究. 北海道大学博士論文
- Young JW, Lamb TD, Le D, Bradford RW, Whitelaw AW (1997) Feeding ecology and interannual variations in diet of southern bluefin tuna, Thunnus maccoyii, in relation to coastal and oceanic waters off eastern Tasmania, Australia. Environmental Biology of Fishes, 50:275-291