HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	海洋表層浮遊，および砂浜海岸漂着廃棄プラスチック微小粒子のソーティング方法
Author(s)	小城，春雄；福本，由利
Citation	北海道大學水産學部研究彙報，51(2)，71-93
Issue Date	2000-09
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/24204
Type	departmental bulletin paper
File Information	51(2)_P71-93.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

北大水産彙報
51(2), 71-93, 2000.

海洋表層浮遊，および砂浜海岸漂着廃棄プラスチック微小粒子のソーティング方法

小城　春雄[1)]・福本　由利[2)]

A Sorting Method for Small Plastic Debris Floating on the Sea Surface and Stranded on Sandy Beaches

Haruo Ogi[1)] and Yuri Fukumoto[2)]

Abstract

A sorting method for plastic marine debris is proposed based on past experiences sorting plastic marine debris taken by a neuston net (50×50 cm net mouth), a quadrate method (40×40×5 cm in the volume) on beaches and stomach-content analysis of seabirds. The sorting method can be used and modified for the plastic debris samples collected in various kinds of sampling, such as volunteer coastal cleanups and scientific studies.

The sorting process for plastic particles taken at a sampling station consists of seven main steps : washing, categorizing, selecting, drying,counting, weighing, and entering data on a personal computer.

Plastic-particle densities (n/km^2) in the world's oceans have increased drastically from several thousand in the 1970s, to 10,000～70,000 in the 1980s, and ca. 490,000 in the early 1990s. During the 1970s to 1980s, marine plastic-particle densities increased ten fold every ten years. However, in the 1990s, densities appear to have increased ten fold every 2-3 years.

A worldwide monitoring system for plastic marine debris in the ocean is needed to prevent a further increase in marine plastic-particle density.

Key words : Sorting method, Plastic debris, Resin pellets, Fragments of plastic products, Marine pollution

はじめに

1970年代の初めに Carpenter and Smith (1972) は，北大西洋のサルガッソ海の表面にレジンペレットを主体とするプラスチック粒子が多数浮遊していることを報告した。これを契機として，以後海洋におけるプラスチック汚染物質の分布数量に関する調査は，外洋域ばかりでなく沿岸海域 (Carpenter et al., 1972 ; Colton et al., 1974 ; Morris and Hamilton, 1974) へと及んだ。北太平洋域では，Wong et al. (1974) を初めとして，Day and Shaw (1987) や Day et al. (1990) が，ニューストンネットでの採集試料より微小プラスチック粒子の分布を論じた。また，砂浜海岸域への漂着プラスチックについては，ニュージーランドや南太平洋の海洋島で Gregory (1990, 1997) が，そ

[1)] 北海道大学大学院水産科学研究科環境生物資源科学専攻資源生産生態学講座
(*Laboratory of Marine Bioresources Ecology, Division of Marine Environment and Resources, Graduate School of Fisheries Science, Hokkaido University*)
[2)] 北海道，函館市日吉町 1-6-3
(*1-6-3 Hiyoshi-cho, Hakodate, Hokkaido 041-0841, Japan*)

して我が国の小笠原諸島の父島で小城 (1995) が調査した。海岸域における散乱ゴミや漂着ゴミについては米国で 1972 年に設立された CMC (Center for Marine Environment) が，市民や海外のボランティアに呼びかけ活発な海岸清掃活動を行なっている (CMC, 1988)。CMC の清掃活動の報告書 (Hodge et al., 1993) では，海岸域に卓越するゴミの順位から International Dirty Dozen (国際最悪 12 ゴミ品目) を定めたが，この内の 8 品目はプラスチック製品であった。比較的大型の漂着海洋ゴミについては Ribic et al. (1992) が詳細に調査方法を解説し，Baseline Study (ある場所に，どのようなゴミがどれくらいあるのかを特定の期間に調査すること) と Trend Assessment Study (特定の場所で，長期間に亘りゴミの種類と数量を追跡する調査) に分類した。

海洋汚染物質としてのプラスチック粒子は，1970 年以降急激に増加する傾向にあり，今後も増加が予測される。特に 1990 年以降の世界の年間プラスチック生産量は総計 1 億トンを超し始め，更に増加の一途を辿っている。因みに 1998 年の世界のプラスチック総生産量は，1.4 億トンにも達している。プラスチック廃棄物は非分解性の海洋汚染物質であり，海洋の表層，中深層，深海，海底，そして海岸の全域に及び (小城ら，1999)，今後も汚染の度合いが増すことは確実である。

以上のように，プラスチック廃棄物は海洋環境保全のためにも，今後厳しく監視して行くべき汚染物質である。大型ゴミもやがては破砕や劣化により微小なゴミとなる。特にプラスチックは，判別が不可能な 0.3 mm 以下の粒子となっても環境中に存在する。本報での微小プラスチック粒子は，下限が長さ 0.3 mm までの小型粒子である。この微小なプラスチック粒子については，その調査法はおろか汚染の程度を判断する基準，汚染物質の分類，実際のソーティング方法も定まっていないのが現状である。そこで本報では，微小なプラスチック粒子のソーティング方法を提案する。

材 料 と 方 法

これまでに研究室で，砂浜海岸域における方形枠法 (40×40×5 cm) (小城，1995) により得られた約 300 試料，および沿岸域や外洋域の海洋表層でニューストンネット (網口：20×50 cm，網目寸法：前方 2 m は 1.8 mm，後方 1 m は 0.3 mm) (小城ら，1999) を曳網して得られた約 300 試料，そしてミズナギドリ類およびウミスズメ科海鳥類の後胃 (砂嚢) 内容物約 1,700 試料 (小城，1989, 1990, 1991, 1992) 等で見出されたプラスチック粒子の解析過程で得られた経験を基にして，ソーティング方法を模索し確立した。このソーティング方法は，海浜でも海洋でも，いずれの場所で得られたプラスチック採集物，あるいは胃内容物中より見出されたプラスチック粒子にも共通に利用できるものである。

使 用 器 具

濾紙

定性濾紙の No. 2 (東洋濾紙株式会社) で，直径は 125 mm のものが良い。慣れれば No. 1 の濾紙でも良いが，操作の過程で丁寧に扱う必要がある。

パラピン紙

医薬用の薬包紙で秤量時に使用。サイズは，12 cm×12 cm である。

濾紙適合タイプのビフネルロート

濾紙がきちんとおさまる，外径 145 mm のものが必要。ビフネルロートをゴムまたはシリコンの

栓で吸引濾過ビンに接続する。吸引した溶液を廃棄する際にビフネルロートをはずすが，その際に陶器製のビフネルロートを破損する場合が往々にしてあるため，予備のものを常に保管しておくことを薦める。

吸引濾過瓶

多数の採集試料を処理するので2,000 ml以上の容量が必要である。吸引ポンプに接続するチューブには三方活栓を付けておくと便利である。

静電気帯電防止マット

プラスチックの中には，発泡スチレンの微小粒子のように乾燥すると著しく静電気を帯びるものがあり作業が停滞するので，準備することが望ましい。任意の大きさに切り，作業台の上に敷く。静電気除去スプレーもあれば重宝する。

ガラスシャーレ（ペトリシャーレ）

大型と小型のシャーレが必要である。小型のシャーレは，濾紙が一枚おさまる大きさがよい。試料の一時保存，作業の中断，乾燥のための放置，個数の計数等20～30個準備すると便利である。シャーレは蓋付きのものを選ぶこと。また，シャーレは平面性と透明性に優れたものを使用すると効率が上がる。

大型シャーレ（内径20 cm）は，採集試料を清水と共に流し込み，プラスチック粒子を摘出する際に使用する。最低10個程度は常備しておくと便利である。このシャーレも蓋付きのものを選ぶことが必要である。ソーティングを中断するときには蓋をしておくと良い。

ピンセット

採集した試料を容器から取り出してビフネルロートに移したり，大型シャーレにソーティングのために試料を移す場合には大型のピンセットが必要である。ソーティング時には外科用，眼科用，あるいは半導体用の細く鋭い刃先のステンレス製の小型ピンセットが必要である。その他，必要に応じて数種類のピンセットを用意すべきである。ぬめりのあるプラスチック粒子を扱っていると，粒子がピンセットの先に付着して始末が悪くなることがあるが，この場合にはピンセットの先端を小瓶に入れたアセトンで洗うと良い。

色紙

大型シャーレよりプラスチック粒子を摘出する際にシャーレの下に敷くと粒子の所在がはっきりするので作業が捗ることがある。ただし粒子の色が様々であるので数種の色を準備しておくと良い。特に，粒子の摘出終了後に残存している粒子の確認に使用すると便利である。

ステンレス製の薬用スプーン

採集物のビフネルロート上での水洗い，採集物の移し換え，その他最も使用頻度の高い道具の一つである。180～300 mmの長さのスプーンが必要であるが，300 mmのものが最も使用頻度が高い。

薬品類

エタノール，アセトン，ホルマリン。

洗浄瓶

250, 500, 1,000 ml のものを準備し，清水 (水道水) 用，エタノール用，ホルマリン用と区別すること。作業過程で適宜使いやすいものを使用する。ソーティングに至るまでの過程では，清水を入れた 1,000 ml 用洗浄瓶を多用する。特にビフネルロートの壁面に付着した試料を濾紙上に流し落とす時には便利である。

標本瓶 (サンプル瓶)

ガラス製でプラスチック製のキャップが付いた標本瓶が良い。容量は，10 ml より 50 ml までの大きさのものを 5～6 種類準備すると良い。特に使用頻度の多いサイズは，10 ml 容量の標本瓶である。

チャック付きポリエチレンバッグ

採集された大型のプラスチックゴミの保存のために必要である。ボールペンや油性ペンで標本番号やその他必要事項を記入できる欄のあるものが良い。標本瓶に収容できない大きさのプラスチックゴミを保存するために必要である。砂浜海岸における方形枠法による調査時には，結構大型のプラスチックゴミが採集されるので，その際には役に立つ。

測定機器

プラスチック粒子の重量を計測するための秤量計は必需品であり，その精度は，0.0001 g であることが望ましい。ノギスは大型プラスチック片の計測に必要であり，目盛ダイアルのついた 0.01 mm 精度のものが良い。マイクロメーターはシート状プラスチックの厚さを計測するために必要である。

あれば便利なものとしては，プラスチック片の色を計測するための色彩色差計，そしてプラスチックの種類を判別するための赤外線分光光度計 (IR) で，あらかじめ数十種類のプラスチック類の吸収曲線がソフトとして組み込まれているもの。

ラベル

試料番号，種類，サイズ，重量，個数等を記入し標本瓶，またはプラスチックバッグに貼るために必要。10 ml の小さな標本瓶から 500 ml 程の容器にも使用する場合があるので，4～6 種類ほどのサイズをあらかじめ用意すること。プラスチック紙でできたラベルは，長期間の保存中糊が劣化し，平板に復元しはがれてしまうので避けること。紙製のものが良い。

ペーパータオル

水分やアルコール分の除去，また汚れを取る際に多用する。簡単な汚れは洗った後に乾燥させ，再度利用できるキムタオル (株式会社クレシア) が極めて便利である。

耐水性透明方眼紙

プラスチック粒子のサイズを決めるときに有れば便利である。透明なプラスチック紙でできているので表面 (おもてめん) に各サイズの大きさをあらかじめ製図用のペンでなぞり黒線で枠を書きサイズ番号を記入しておくと，ソーティングの際には裏面 (うらめん) を表面にして使用する。濡れた粒子を方眼紙上に置くことにより，裏面から浮き出た各サイズの黒線枠のいずれに当てはまるか容易に判断できる。

油性ペン

標本瓶の分類のため，キャップの上にカラーの油性ペンで印を付けておくと，整理と保管に便利である。4〜5色あれば都合が良い。小さいラベルから大きいラベルまで記入できるように，極細から中細の字が書ける黒色の油性ペンを用意する。

ソーティングの手順

1. 試料の前処理

試料保存容器は，チャック付ポリ袋，ガラスまたはプラスチック製標本瓶，布袋等目的に応じて多様である。そして保存溶液はホルマリン，エタノール，プロピルアルコール等の薬品が用いられるのが常である。プラスチックゴミだけで生物の混入がない場合には，保存容器に入れ常温のまま実験室に持ち帰るか，冷凍して持ち帰る。

常温で，保存のための薬品を使用しなかった場合には，腐敗している場合があるので，ソーティングのために蓋をあけたり，封を切った時点で70%のエタノール溶液で消毒することを薦める。容器が複数ある場合には，個別にエタノール溶液を入れ，実際のソーティング時まで放置しておけば良い。

Fig. 1には，チャック付ポリ袋に封入し，常温にて長時間保存したプラスチックゴミのソーティング時に開封した際に，洗浄瓶に入れたエタノールで消毒中の様子を示した。エタノールは，70%溶液が殺菌作用の強いことが知られているが，実際のプラスチックのソーティングでは常に99%のエタノール原液を使用した。

2. 保存薬品，塩分，およびぬめりの除去

吸引瓶に取り付けた外径145 mmのビフネルロート (Buchner Type) にNo. 2の定性濾紙を敷き，そこに試料を大型のピンセットでつまみ出すか，またはステンレス製の薬用スプーンで掻き出し，残りは清水を入れた洗浄瓶で洗い落とし吸引する。その際，保存薬品，塩分，およびぬめりが取れるまで何回も清水を加えて吸引する。なお，オイルボールが試料中に見出される場合には，ピンセットでつまみ出すか，グリースのような油はヘラで除去し，別途に個数を数え，秤量し保存する。後の作業効率を高めるため，清水での洗いは，徹底して行うと良い。

試料によっては，植物プランクトン，微小な動物プランクトン，クラゲ，サルパ，落ち葉や木屑の微小片等の濾紙の目詰まりの原因となる生物や，砂浜海岸で得られた試料中に細かい泥など

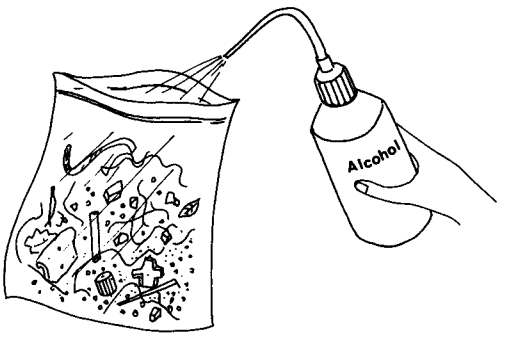

Fig. 1. Disinfecting a plastic debris sample with ethyl alcohol.

Fig. 2. Transferring a plastic debris sample to a filter paper set in a Buchner type funnel.

が混入している場合には，適宜の分量ごとに分けて水洗いを行うと良い。特に海浜試料の場合には油まみれのことがあり，後にピンセットでプラスチック粒子を摘み上げるときに，付着してしまい始末に困る場合があるので，その場合には吸引濾過時にエタノール溶液をふりかけると良い。ぬめりの原因は殆ど油によることが多い。ただし，強い有機溶媒は，劣化したプラスチック粒子を溶かしたり，細分化する原因となるので避けたほうが良い。場合によってはエタノールでも劣化したプラスチック粒子がばらばらになるので注意を要する。ビフネルロート上で繰り返し清水を加えながら吸引し水洗いを十分に行う。その際清水が少なくなった時点でビフネルロートの壁面に付着した採集物を洗浄瓶の清水で洗い流し全ての試料を濾紙上へと移動させる。吸引濾過を終了するタイミングは，濾紙が乾燥して反り返り，吸引音が変わる時である。この時点で，吸引を停止する。

Fig. 2 には，採集物を収容している容器よりビフネルロートの濾紙上に移す場面を示した。

3. 採集試料全体の湿重量の秤量

採集物の水洗いを終了したら，濾紙上の採集物を注意深く，予め重量を測定しておいたパラピン紙に移して秤量する。Fig. 3 には，上皿電子天秤での湿重量秤量時の様子を示した。なお，プラスチック汚染物質そのものには湿重量はなく，重量はあくまでも乾重量だけである。ここで湿重量を計測するのは，プラスチック汚染物質の試料中に占める割合を知ることよりもむしろ，同時に採集される生物群を後日研究する際に役に立つ。

4. ソーティングの準備

ガラス製の大型シャーレに先のパラピン紙上の採集物を，ポリ洗浄瓶の清水で洗うようにシャーレに流し入れる (Fig. 4)。さらに全てのプラスチック粒子がシャーレに入れた清水の表面に浮かび上がる程度まで清水を加える。

ここから，シャーレの清水上に浮遊していたり，沈下しているプラスチック粒子を，個別にピ

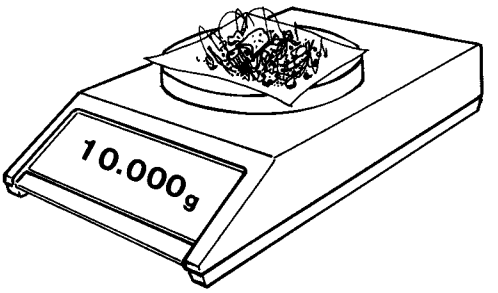

Fig. 3. Measuring the wet weight of a sample on wrapping paper commonly used for powdered medicine.

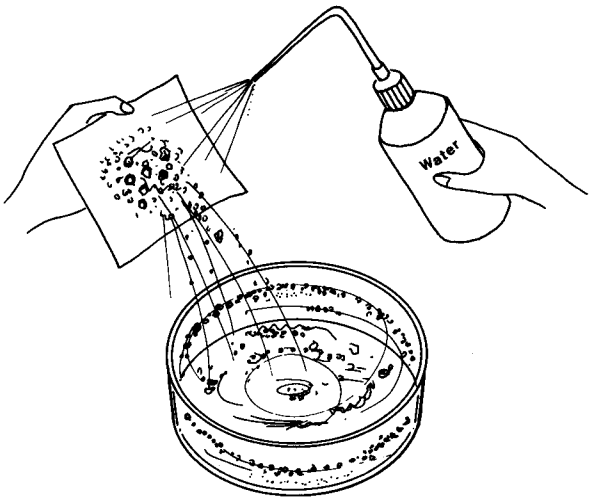

Fig. 4. Washing a plastic debris sample with fresh water from the wrapping paper to a large dish.

ンセットで摘み取る作業を開始する準備が整ったことになる。

シャーレの中のプラスチック粒子やその他の生物の体色，あるいは非生物物質の色により下敷きの色を変化させると，プラスチック粒子を拾い上げやすいことがある。また，ソーティングが終了したと考えられる時には，未摘出のプラスチック粒子を最終的に確認するために，下敷きの色を変えると良い。下敷きの色は数色準備しておくと良い。

5. 出現プラスチック項目のコード化

ソーティング結果を後にパソコン処理する場合の便宜を考えて，出現したプラスチックゴミは項目別にコード化する。Table 1 には日本海の山口県から北海道までの各県の砂浜海岸に漂着したプラスチックゴミをソーティングした際の出現ゴミのリストを示した（とやま環境財団，1997)。海洋表層の微小プラスチックゴミや，海鳥類の砂嚢から出現するプラスチック粒子類等の項目数は，Table 1 のそれらよりもかなり少なくなる。従って普通に見られるプラスチックの微小ゴミの項目をほぼ全て網羅しているといえる。

Table 1. Items identified in plastic marine debris.

Plastic Item (P-item)	Sub-item	Type of Debris
1 Resin pellets	1	Resin pellets
2 Plastic products	2	Flower-shaped plastic (yellow)
	3	Hard packing tape
	4	Twisted rope
	5	Caps
	6	Pull tabs, Inner caps, Packing
	7	Spherical pellets
	8	Containers
	9	Fishing gear (float)
3 Fragments of plastic products	10	Fragments of plastic products
	11	Straws
	12	Scraped refuse (pale blue color)
	13	Tube
	14	Cord
	15	Hard tape
	16	Spherical pellets
	17	Bubble-type pellets
	18	Fragments of sieve
4 Synthetic rubber	19	Synthetic rubber
	20	Elastic bands
5 Synthetic fiber	21	Mono-filament
	22	String, Soft tape
	23	Fiber
6 Styrofoam	24	Styrofoam
	25	Styrofoam coated with other materials
7 Sponge	26	Soft sponge
	27	Hard sponge
8 Plastic sheet (thickness : <2 mm)	28	Plastic sheet
	29	Tape
	30	Bags
9 Oil ball	31	Oil ball
10 Paint	32	Paint
11 Cigaret filter	33	Cigaret butts
	34	Fragment of cigaret butts
12 Others (non-plastics)	35	Chewing gum
	36	Pieces of paper
	37	Aluminum foil
	38	Rubberized cloth with metal eyelet
	39	Pieces of wood
	40	Wax
	41	Pieces of cloth
	42	Pieces of glass
	43	Thread
	44	Aluminum caps
	45	Cork
	46	Waste thread
	47	Glue
13 Unidentified matters	48	Unidentified matters

コード化は，まずP項目 (Plastic item) として原材料より不明物までの13項目に大別した。ほぼ全てのゴミはこのカテゴリー内に分類できる。プラスチック製品は極めて多様なため，実際に採集されるプラスチック製品やその破片は，種番 (Sub-item) で区分すればゴミ種類名からでも判るようにゴミの数だけあると言うことになる。ある程度の標本数をこなしてゆく過程で，種番にまとめる作業をすれば良い。

P項目の内訳を若干説明すると，原材料は全てレジンペレット (樹脂ペレット) である。海洋の表層に浮遊しているのは，比重の軽い四大樹脂の内のポリエチレン，ポリプロピレン，ポリスチレン等の粒子であり，これらで98%以上を占める。ポリ塩化ビニールの原材料は，殆どが粉末状であり，ゴミとして眼に触れるのは全て製品の破片である。ビニール製品は，比重が海水より大きく，海洋表層に浮遊していることはない。しかし，袋状で中に空気が閉じ込められている場合には，水面下を漂流していることがある。気を付けなければいけないのは，袋状のプラスチック製のバッグを一般にビニール袋と呼称する習慣が浸透していることである。海洋の表層を浮遊しているプラスチック製の薄膜状シートでビニール製のものは殆ど見出せない。

P項目の種番12の水色の削りかすは，サーフボードやボート等の形を整えるためにカンナで削った削りかすである。

プラスチック製品とプラスチック製品の破片は，採集物中の両者の出現傾向を見て，まとめて扱っても良い。但しソーティング時には，採集地域に特有な漁具の破片があることや，製品から国籍が判明することがあるので，煩わしがらず区分したほうが良い。

ゴムと繊維は，材質が例えプラスチックであっても，プラスチックの範疇には入らないことが，プラスチック工業界により決められているが，海洋のゴミを扱う場合には，プラスチックとして扱ったほうが良い。

その他のP項目の内の種番40の蠟は，海岸の採集試料の中に見出されたが，これは特に観光地で夜間花火遊びをする機会があるらしく，その際に火種としてロウソクを使用するため融けた蠟が砂上に落下してゴミとなったものである。

6. ゴミのサイズ区分

出現したゴミの大きさは様々であるので，個別に大きさを記録すると後の数的処理に便利である。ここでは大きさをサイズとよぶ。サイズは11段階に区分した。各サイズはゴミが以下の大きさの正方形 (一辺が1 mmより10 mmまでとそれ以上の大きさ) の内部に収まるかどうかで決め

Fig. 5. Large plastic debris should first be picked up from the large dish and placed on filter papers placed in the small dishes.

た。

サイズ1≦1 mm²<**サイズ2**≦4 mm²<**サイズ3**≦9 mm²<**サイズ4**≦16 mm²<**サイズ5**≦25 mm²<**サイズ6**≦36 mm²<**サイズ7**≦49 mm²<**サイズ8**≦64 mm²<**サイズ9**≦81 mm²<**サイズ10**≦100 mm²<**サイズ11**

これら各サイズの正方形は耐水方眼紙に輪郭を書いておきピンセットでつまみ出したゴミを当てはめて，どのサイズに該当するか決めれば良い。

Ribic (1990) は，海洋ゴミのサイズに関しては mega-debris (>2～3 cm), macro-debris (5 mm・2-3 cm), meso-debris (<5 mm), micro-debris (powdered) と分類することを提唱した。しかし，ゴミのサイズは実に様々であり，Ribic (1992) は，小型ゴミ (small): <2.5 cm, 中型ゴミ (medium): 2.5≦≦10 cm, 大型ゴミ (large): 10 cm<≦1 m, 非常に大きいゴミ (very large): >1 m, と分類することを推奨している。なお，この最小値の 2.5 cm は，船舶から投棄されるゴミのサイズを規定したマルポール条約の付属書 V に基づいている。

7. ソーティングの開始

大型シャーレ内の水に浮いたプラスチックゴミの内より，プラスチック製品やその破片等の目立つ大きなサイズのプラスチックゴミを取り上げる (Fig. 5)。それらは採集地点，P 項目，種番，サイズを鉛筆で明記した濾紙上に分類して置く。同時に，木片，落ち葉，軽石等の自然物を取り除く。次に，サイズ 6 以上のものや長いもの等を選り分ける。この際には，小さくても目立つプラスチックゴミも選り分けておく。選り分けたものはサイズごとに，濾紙上に整えながら並べる

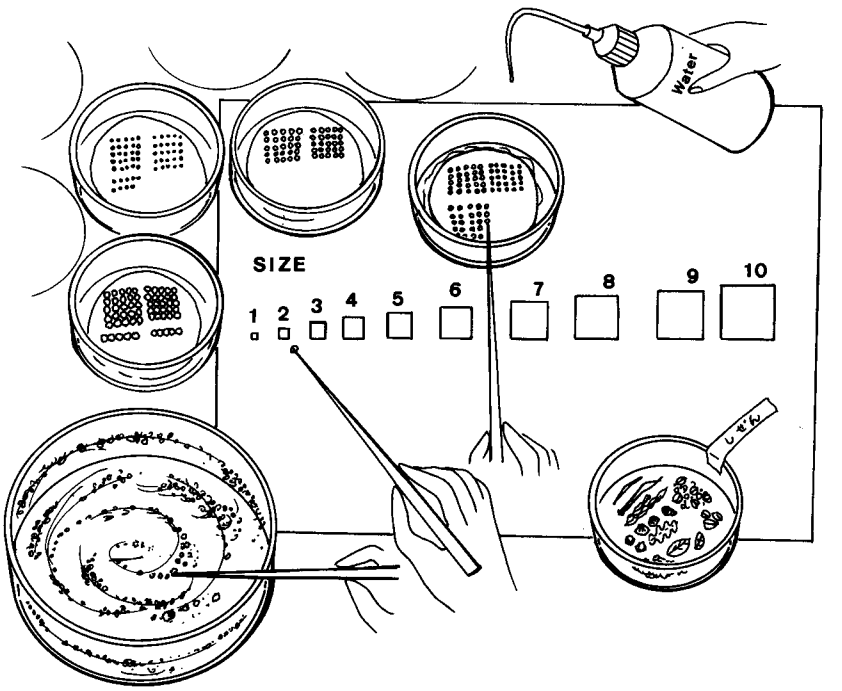

Fig. 6. Size classification of plastic pieces using water-repellent graph paper. Sorting of plastic pieces according to their P items, sub-items, and sizes.

(Fig. 6)。この際に使用する濾紙は新しいものに，鉛筆で必要事項を記入し，濾紙を軽くはたき，鉛筆の粉を払っておく。濾紙の大きさは大小3種くらいを使い分ける。サイズ10以下のプラスチックゴミに対しては，種番とサイズも記入する。

8. 大量の微小破片が出現した場合

沿岸海域の表層をニューストンネット (Neuston Net) で曳網したり，砂浜海岸での方形枠による採集物中からは，プラスチック製品の微小な破片や発泡スチレンの微小破片が無数と言って良いほど出現することがある。この様な大量出現は，P項目3，種番10の製品破片，およびP項目6，種番24の発泡スチレンが大部分であるが，まれにはP項目3，種番12の水色の削りかす，種番16の球状のプラスチック粒子，そして種番17の泡状のプラスチック粒子で見られることがある。

大量出現したプラスチック粒子が採集物中に出現した場合には，小型のガラスシャーレの中に採集地点，P項目，種番，サイズをあらかじめ書き込んだ濾紙をおき，清水を含ませる。ソーティングしたプラスチック粒子を濾紙上にFig. 7に示すように，5行5列，合計25個のブロックとして配列する。1枚の濾紙に4ブロック，すなわち100個の粒子が並ぶようにすると後で集計し易い。この作業中には濾紙が乾かぬように時々清水をシャーレに加え乾燥しないようにする事が肝心である。これはピンセットからプラスチック粒子が離れ易くするためである。また，ピンセットで濾紙をつつかないように心がける。濾紙が乾燥すると，呼気，吸気，および人体の急激な動きに起因する空気の動きにより，プラスチック粒子は一気に飛散してしまい，ソーティングは不可能となる。さらに乾燥すると，静電気を生じてしまい，こうなると対処する方法が無い。微小なプラスチック粒子の計数方法をいろいろ試したが，この計数方法が最も信頼性があると考えられた。このソーティングを開始する前には，少数の特に目立つ色の粒子や，極端な大きさの粒子等は除き，概ね均一と思われる粒子の集まりにしておくと良い。同じサイズのプラスチック粒子に目が慣れるまでは，方眼紙の上で大きさを測るようにする。あるサイズの大きさの粒子だけを集める場合，慣れとは恐ろしいもので，そのサイズだけを集めている結果となり，このような状態となるとソーティングの進行は早くなる。

ソーティング中には，見逃しやすい泡状のプラスチック粒子，木炭と間違いやすい黒色のプラスチックの破片，水に浮く軽石等に注意する。ソーティング終了間際には，ボロボロで大きさの曖昧な発泡スチレンが残るため，細心の注意を払う必要がある。このようなソーティングの場合，肉眼で認識できる最小のプラスチック粒子の大きさは，直径約0.3 mmである。これ以下の大きさ

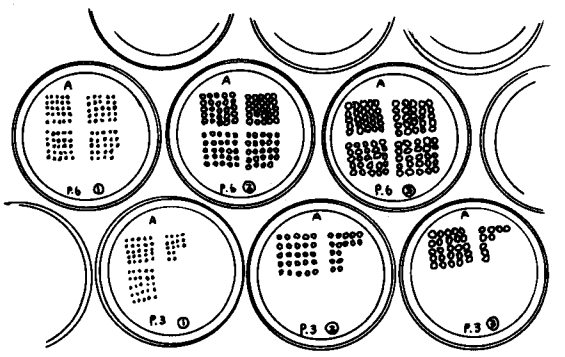

Fig. 7. When a sample contains many plastic pieces, it is convenient to set four blocks of plastic pieces each arranged in 5 lines×5 rows on a filter paper.

の粒子は実体顕微鏡下でも材質が判定できない。従って，直径が 0.3 mm 以下のプラスチック粒子は無視せざるを得ない。

微小なプラスチック粒子を一つ一つ拾い上げ大きさを判定して分類する作業は，極めて根気と集中力を要する仕事であり，手順を間違えてもう一度ソーティングを繰り返すことがない様にすべきである。砂浜海岸での微小な発泡スチレンだけで，使用した濾紙の枚数が 100 枚を越すことが何回かあった。その時には，濾紙の枚数から各サイズの発泡スチレンの個数を検証することができた。一枚の濾紙上に，4 ブロック，合計 100 個の粒子数に達しなかった場合には，その数を濾紙が乾燥した時に記入しておいた。

9. サイズ 5 以下のプラスチック粒子が極めて多数出現した場合

微小なサイズ 5 以下のプラスチック製品破片や発泡スチレンが極端に多く出現した場合には 4 分割して，1/4 の部分をソーティングし，その結果を 4 倍して一地点の計数値とする。この分割を行う以前に，大きなプラスチック粒子，自然物，特に目立つプラスチック粒子等を全て取り除くことが肝心である。

分割のために大型シャーレに嵌め込む仕切り板は以下の手順で作成する。大型シャーレの内径と高さをあらかじめ測っておく。アクリル板をカッターで切り，シャーレの内側に密着する長方形板を二枚作る。中央に切れ込みを入れ，十文字になるように 90 度に差し込み，接着する。これを仕切板とする。ガラスシャーレは製品間で大きさが微妙に異なるため，分割に用いるシャーレは特定しておくと良い。また，仕切板を差し込むシャーレの位置も印を付けておくと良い。

ソーティングに際しては，まずシャーレに清水をプラスチック粒子全体が浮く程度に注入する。次いで，ガラス棒で円を描くように掻きまわし渦を作る。浮遊するプラスチック粒子が表面に均一になったら掻きまわすのを止め，しばらく放置し，シャーレ内の水が静止するのを待つ。シャーレ内の動きが静止したら，真上から印を付けておいたところに，慎重に仕切板をシャーレ内に沈める。仕切った 1/4 の部分を，スプーンやスポイトを使い，別のシャーレに移して，以降のソーティングを行う。この分割作業はサイズ 5 以下の粒子だけが大量に大型シャーレの表面に浮遊している場合に有効である。自然物や軽石など他の粒子が混在している場合には，それらを取り除いてから分割すべきである。

なお，ソーティング時に数取り器 (Counter) の使用も有効ではあるが，実際に使用してみるとかなり効率が悪く，疲労の原因にもなるので，必要に応じて使用すると良い。

10. 乾燥

水分を含んだ濾紙上のプラスチック粒子を乾燥させる場合には，なるべくシャーレ内で蓋を半開きにして行うのが安全であるが，濾紙数が多い場合には適当な空き箱を利用すれば良い。発泡スチレンの微小粒子は，呼吸時の息でも容易に飛んでしまうので注意を要する。微小なプラスチック破片の乾燥は，室内に一昼夜放置すれば十分である。この乾燥中に，プラスチック粒子のサイズと数の確認を入念に行う。特に，複数の人員でソーティングを行った場合には各人の癖が出るため，最終的なサイズと数の確認は経験を積んだ者が行うと良い。

11. 乾燥後の処置

シャーレに入れた濾紙上でプラスチック粒子を乾燥後，洗浄瓶に入れたエタノールを濾紙の端から染み込ませる (Fig. 8A)。この際，濾紙上のプラスチック粒子にエタノールを直接ふりかけないようにする。乾燥後プラスチック粒子は濾紙に貼りついていてはがしにくいが，濾紙にエタノールをしみこますと自然にはがれるようになる。また，静電気発生の防止ともなる。

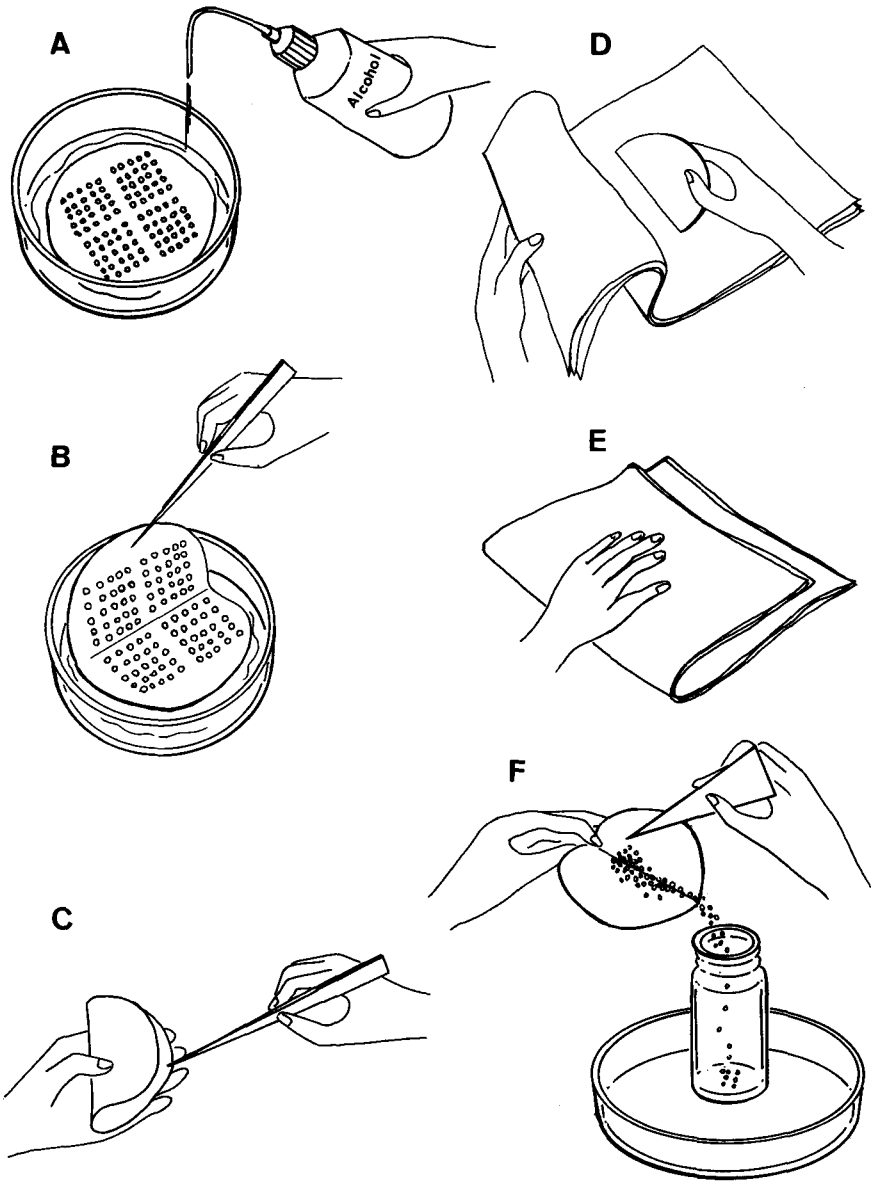

Fig. 8. The final steps of plastic sorting from drying to putting into a sample bottle. A: Wetting the filter paper with ethyl alcohol, B: Removing filter paper with plastic pieces, C: Folding filter paper in half, D: Placing filter paper on a paper towel, E: Pressing softly by hand to absorb alcohol, F: Transferring plastic particles into a sample bottle along the fold of the filter paper.

濾紙にエタノールを染み込ませたら，シャーレから濾紙を取り上げ，二つ折りにし，そのままペーパータオルに挟み余分なエタノールを吸い取る (Fig. 8B～D)。この時ペーパータオルを上から軽く押さえ，エタノールを吸い取り易くする (Fig. 8E)。

12. 秤量前のまとめ

特にサイズ1の微小プラスチック粒子は極めて軽量で，100個まとまっても0.0001 gに達しない場合もある。そのために，個数が判明しているプラスチック粒子をグループ毎にまとめることが必要がある。サイズ2以上のプラスチック粒子も数個体では0.0001 gに達しない場合もあるためまとめる。

ペーパータオルで余分なエタノールを吸い取ると，エタノールは急速に蒸発してしまうので，二つ折りした濾紙を開き，折れ目に集めたプラスチック粒子を慎重に集合用の標本瓶にいれる (Fig. 8F)。瓶に入れる際には，プラスチック粒子は飛びやすいので特に注意する。この場合にはピンセットを使用するより，使用済みのタック紙の台紙を三角形に切ったものを使用した方が効率が良い。また，集合用の標本瓶は必ず大きなシャーレの中央において散逸したプラスチック粒子を回収できる体制で行う (Fig. 8F)。

多数の微小粒子が出現した場合には，この作業だけで半日から丸一日もの長時間を要することがある。

ここで集合用の標本瓶としたのは，秤量後に最終的に保存するための標本瓶とは同じサイズの標本瓶であるが，区別していることを意味する。従って，集合用の標本瓶はプラスチック粒子の量に応じたサイズを適宜選ぶと良い。集合用の標本瓶にプラスチック粒子を入れ終わったら，その瓶に残存しているエタノール分を完全に蒸発させるため，少なくとも一昼夜以上瓶の蓋をあけたまま放置する。

これらの集合用の標本瓶に入れての乾燥過程では，各瓶に入っているプラスチック粒子の内訳が判る様にしておくことが肝心である。

13. 測定台帳への記入

集合用のサンプル瓶中で乾燥させた一採集地点のプラスチック粒子は，原則として個別に，サイズ番号，プラスチックの種類，特記事項，P項目をTable 2に示す測定台帳 (Plastic data sheet) に記入する。このさい，後の秤量を行ない易くするため，台帳に記入した順に集合瓶を配列しておくと良い。P項目に分類できないプラスチック粒子については，特記事項欄に可能な限りの特性を記入しておくと良い。また，測定台帳に記入する順序はP項目別，種番別，サイズ別に整理して，現場のプラスチックの汚染傾向を把握できるようにしておくことが肝心である。現在プラスチックはあらゆる分野の製品に利用されているため，ある程度の経験を積まないと分類できない。そのために特記事項欄には面倒がらず可能な限りのことを記入しておく必要がある。

この時点では重量はまだ測定していない。

測定台帳には，測定日と測定者名を記入するばかりでなく，ソーティングに要した合計時間数，および測定台帳に記入する際の測定時間数を記録しておく。多数の試料を処理して行く内に，採集したプラスチック粒子を見ただけで大体の処理時間が判るようになり調査計画を立てる際の参考となる。また事前の調査時には採集地域の汚染情況を視察しただけで，限られた期間内に分析可能な試料数の推定ができるようになる。

14. 秤量

前項で記したように，一採集地点のプラスチック粒子を標本瓶に入れ，P項目別，種番別，そし

Table 2. Example of plastic data sheet listing plastic pellets by collected at station A by items, sub-items, and sizes.

Plastic Data Sheet

Sample No. :

Sampling Position : *ST. A*

				Plastic item (P-item)														
	Dry Weight (g)	n	Size Category	Resin pellet	Products	Fragment of products	Synthetic rubber	Synthetic fiber	Styrofoam	Sponge	Vinyl	Oil ball	Paint				Remarks	Sub-item
NO.				P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10					
1	*1.1307*	*1*	*11*		○													*22*
2	*0.0040*	*1*	*11*		○													*14*
3	*0.0015*	*1*	*3*		○													*16*
4	*0.4899*	*1*	*11*			○												*3*
5	*0.1195*	*1*	*11*			○												*3*
6	*0.2438*	*6*	*10*			○												*3*
7	*0.3686*	*13*	*8*			○												*3*
8	*0.4714*	*21*	*6*			○												*3*
9	*0.7431*	*71*	*5*			○												*3*
10	*0.7050*	*125*	*4*			○												*3*
11	*0.6880*	*282*	*3*			○												*3*
12	*0.2754*	*371*	*2*			○												*3*
13	*0.0073*	*80*	*1*			○												*3*
14	*0.4734*	*22*	*5*	○														*1*
15	*0.1681*	*10*	*4*	○														*1*
16	*0.0212*	*3*	*3*	○														*1*
17	*0.0296*	*20*	*2*	○														*1*
18	*0.0043*	*1*	*3*			○												*16*
19	*0.0031*	*2*	*2*			○												*16*
20	*0.0006*	*2*	*2*			○												*17*

Soating date : year month day

Total sorting hour : minutes

Sorter's name :

てサイズ別に，台帳に記入した順に並べ，一昼夜放置し乾燥させる。この時点から秤量を開始する。

各集合用の標本瓶と同じ大きさの新しい保存用の標本瓶を秤量計で風袋としてゼロ点に合わせる。その新しい標本瓶を秤量計より取り，逆さにして集合用の標本瓶の口にぴったりと合わせてからひっくり返し，上方の集合用の標本瓶中のプラスチック粒子を下方の保存用標本瓶へと全て落下させて移す。そのプラスチック粒子が新たに入った保存用の標本瓶を再度秤量計に置き，プラスチック粒子の重量を秤量し，値を測定台帳に記録する。Table 2 には，例として，仮の調査地点 A (ST. A) から出現したプラスチック粒子の測定結果を示した。

最終的にプラスチック粒子を保存する標本瓶には，個別に取り出しても中に保存されているプラスチック粒子の採集地点やその他の情報を可能な限り記入したラベルを付しておくと良い。

集合用標本瓶を何回も使用すると，微小な砂粒やプラスチックの残滓が残るため，適宜，清水，アルコール，またはアセトンで洗浄後乾燥させておくことが必要である。保存用の標本瓶は，新しいものか，または洗浄がなされたきれいなものを使用すると良い。

15. パソコンへの入力方法

各採集地点のプラスチック粒子のデータを個別にパソコンに入力するに当っては可能な限り効率よく行なう必要がある。現在においてはパソコン上で計算ソフトを利用できるので，各自工夫すればソーティング機能を駆使すると効率良くデータの処理が可能である。Table 3 に測定台帳から簡略化してパソコンに入力したデータシートを示す。

データシートの最左列には，後のソーティングの便利さを考えて 1 から始まる一連番号を設定すると良い。採集地点は Table 3 においては便宜上 ST. A, ST B, ST. C とした。

なお ST. A のプラスチック粒子は Table 2 に示したものを入力したものであり，パソコン上では採集地点が異なっていても連続して入力できることを示した。

その他採集場所や採集方法の状況に応じて海岸散乱，海岸漂着，水中漂流，海底堆積等の区別，国，地名，地点，カテゴリー別の番号等についての列項目を適宜追加すれば良い。外洋域での調査地点の場合には，海域，採集地点を示す緯度経度，採集器具の種類，曳網速度，曳網時間等を記入することになる。

なお，海上ではゴミを船上に設置された焼却炉で燃やしたり，また海辺ではゴミを集めて焚き火として燃やしたりした際などには，一度は熱で融けたものの完全には燃焼せず，一部が融けていたり，燃え滓に近い状態となったプラスチック粒子が必ず出てくる。このようなプラスチック粒子を区別することは重要である。特に，薄膜状 (シート状) のプラスチックを焼却炉で燃やした場合には，熱で融けたとしても火勢で飛び散り空中で冷却されて微小な紙縒り状となって飛散する。このような紙縒り状のプラスチックの微小粒子が，ミズナギドリ類の胃中より多数出現することがある (小城，1995)。

論　　議

海洋のプラスチック汚染に関する調査は，1970 年代初めより 1980 年代中頃まで先進各国の研究者により活発に行われたにも拘わらず，汚染が進行し，深刻な事態になりつつある現在の方が活発には行なわれていない。そのため，特定海域のプラスチック汚染の経年的変化を辿ることは殆ど困難である。しかしながら，微小なプラスチック粒子については年代別に，増加傾向が見て取れるので Table 4 に示した。なお，1970 年代の北太平洋の外洋域における調査が一例しかないので，北大西洋の比較的外洋域で行なわれた調査結果を引用した。プラスチック粒子の年代別の

Table 3. Example of plastic pellet data format for entry on a personal computer.

NO.	Station	Weight(g)	n	Size	P-item	Sub-item	Type of debris (Size: mm)
1	A	1.1307	1	11	2	22	Cap 21×21×10
2	A	0.0040	1	11	2	14	Hard tape 0.3×1.7×20
3	A	0.0015	1	3	2	16	Rope 1.7×1.3×3
4	A	0.4899	1	11	3	3	Fragment of plastic products
5	A	0.1195	1	11	3	3	Fragment of plastic products
6	A	0.2438	6	10	3	3	Fragment of plastic products
7	A	0.3686	13	8	3	3	Fragment of plastic products
8	A	0.4714	21	6	3	3	Fragment of plastic products
9	A	0.7431	71	5	3	3	Fragment of plastic products
10	A	0.7050	125	4	3	3	Fragment of plastic products
11	A	0.6880	282	3	3	3	Fragment of plastic products
12	A	0.2754	371	2	3	3	Fragment of plastic products
13	A	0.0073	80	1	3	3	Fragment of plastic products
14	A	0.4734	22	5	1	1	Resin pellet
15	A	0.1681	10	4	1	1	Resin pellet
16	A	0.0212	3	3	1	1	Resin pellet
17	A	0.0296	20	2	1	1	Resin pellet
18	A	0.0043	1	3	3	16	Spherical pellet
19	A	0.0031	2	2	3	16	Spherical pellet
20	A	0.0006	2	2	3	17	Bubble-type pellet
21	B	0.0297	1	11	3	11	Straw 2×2×14
22	B	0.0281	1	11	3	10	Plastic sheet
23	B	0.0131	1	11	5	22	String 0.26×1.64×39
24	B	0.0036	1	11	5	22	String 0.22×0.74×22
25	B	0.0091	1	11	6	24	Styrofoam
26	B	0.0293	10	9	6	24	Styrofoam
27	B	0.0060	5	8	6	24	Styrofoam
28	B	0.0511	70	6	6	24	Styrofoam
29	B	0.3390	411	5	6	24	Styrofoam
30	B	0.9954	3,412	3	6	24	Styrofoam
31	B	0.2807	5,767	2	6	24	Styrofoam
32	B	0.0168	1,020	1	6	24	Styrofoam
33	B	0.0020	1	8	8	28	Plastic sheet
34	B	0.0035	2	5	3	15	Hard tape
35	B	0.0156	2	4	4	19	Synthetic rubber
36	B	0.0019	2	4	5	21	Mono-filament
37	B	0.0018	2	3	5	21	Mono-filament
39	B	0.0039	1	3	9	31	Oil ball
40	B	0.0000	1	2	4	19	Synthetic rubber
41	B	0.0016	15	1	3	17	Bubble-type pellet
42	C	0.0844	1	9	11	33	Cigaret butt 6×6×10
43	C	0.0042	1	8	10	32	Paint
44	C	0.0124	1	6	12	47	Glue
45	C	0.0325	1	5	12	40	Wax

Table 4. Annual changes in the density distribution of plastic pellets recorded in the literature.

Year	Research Area (No. of net towing)	Plastic Item	Average Density (Range) Number of plastic pellets/km²	Literature *
1971	Sargasso Sea in the North Atlantic Ocean (11)	all	3,500 (50～12,000)	1
1972	Caribbean Sea off the east coast of North America	resin pellets	61	2
	Sea area off Florida, USA	resin pellets	148	2
	Sea area off New York, USA	resin pellets	1,996	2
1972	North Pacific along 35°N (33)	all	maximum number 34,000	3
1985～88	Bering Sea (66)	all	100	4
	Subarctic Domain in the North Pacific (64)	all	12,800±22,300	4
	Transition Domain in the North Pacific (60)	all	57,900±72,800	4
	Subtropical Area in the North Pacific (2)	all	61,000±74,000	4
	Japan Sea and coastal areas in Japan (11)	all	74,700+73,800	4
1994～95	Southeast coastal area of Hokkaido (87)	all	493,974±1,564,582 (0～9,894,044)	5

*: 1, Carpenter and Smith (1972), 2, Colton et. al (1974), 3, Wong et al. (1974), 4, Day et. al. (1990), 5, Ogi unpubl. data.

分布密度を見ると，1970年代は数千個の水準にある。北太平洋の結果は，Wong et al. (1974) が報告の中で最大数のみにしか言及していなかったので平均粒子数は判らないものの，33調査地点中の21地点でプラスチック粒子が見出されたことから，平均すれば1,000～2,000粒子/km² の範囲内にあるだろう。残念ながらこの報告の中にはレジンペレットに関しての記載は無い。1980年代となると，北太平洋の平均粒子数は数万となっている様子が窺える。1990年代のデータは，採集方法を小城ら (1999) が考案したニューストンネットを使用し，得られた標本のソーティングは本報で述べた方法に従った。採集地点が北海道南東部の沿岸域に限定されるものの，87採集地点中プラスチック粒子が見出されなかったのは僅か2地点であり，平均粒子数は49万個，範囲は0～989万個であった。すなわち，北太平洋域のプラスチック粒子の平均数は，10年経過すると値が一桁上昇していたが，1990年代となると2～3年で平均分布数は一桁上昇する可能性が窺えた。このように，本報で述べたプラスチック粒子のソーティング方法による結果は，海洋表層を浮遊するプラスチック粒子の経年変化を追跡することを可能にしていると考えられる。

最近の日本沿岸で行なわれた漂着物調査やボランティア団体によるビーチクリーンアップ活動の成果をみると，発泡スチレンの破片が著しく増加している。例えば，日本海に面した日本，韓国およびロシアの砂浜海岸等の15ヶ所において方形枠法 (小城，1995) により集めた85標本を，筆者等の属す研究室にて本報で述べたソーティング方法で解析し，総計25,932個のプラスチック粒子を見出したが，この内の19,201個，すなわち74.0% が発泡スチレンの粒子で占められていた (環日本海環境協力センター，1998)。また，瀬戸内海に面した広島湾の3ヶ所でのビーチクリーンアップ活動では発泡スチレンの破片が個数で第一位を占めた (クリーンアップ関西事務局，1999)。この発泡スチレンは生鮮魚介類の容器，電気製品やその他の機械類の包装容器やクッショ

ン材，インスタント食品類の容器，スーパーマーケットでの食品類のトレー等に使用されている。いわば我々の生活空間ではあらゆる面に多用されている。このことは当然廃棄後にゴミとして漏出することは免れない。発泡スチレンは体積の95%以上は空気であるため，海に流れ出た小さな破片はしばらくは海面を漂流しているものの，やがては海水が染み込んで海中へと沈降する。そのために外洋域での出現数は減少する。沿岸環境でのプラスチック汚染物質中では，この発泡スチレンの破片漏出が問題点として挙げられている。なお，広島県の宮島における，発泡スチレンの破片の発生源の一つとしてカキ養殖用筏のフロートであることが判明しているため，環境団体がこのフロートの材質を発泡スチレン製から破片が飛散しない硬質樹脂製へと転換することを地元の漁業協同組合に求めている（山藤，私信)。以上のように，本報で示したソーティング方法は沿岸域や海岸漂着プラスチック汚染の傾向を知る上で有効であるばかりでなく，多少方法を簡略化することにより一般市民の参加の下に行われる海岸清掃活動にも応用できると考えられる。

プラスチックによる海洋汚染では，プラスチック製品の原材料であるレジンペレットの海岸漂着や海洋表層分布が注目される。そこで，本報で述べたソーティング方法で解析した結果から近年のレジンペレットの分布傾向を類推してみる。先に述べた北海道南東部沿岸海域での87地点で行なったニューストンネットで得られた試料を解析した結果，レジンペレットは全採集プラスチック数の内の僅か0.2%を占めているだけであった（小城，未発表データ)。砂浜海岸への漂着プラスチック調査を小笠原諸島の父島で1992年に行なったところ，レジンペレットは全数中3.5%であった（小城，1995)。また，我が国の日本海に面する10県の合計16海岸で1996年に行なわれた漂着プラスチックゴミ調査では，レジンペレットの全採集数に占める割合は1.9%であった（とやま環境財団，1997)。同様の調査を1997年には規模を拡大し，韓国およびロシアの海岸まで含めて行なったがレジンペレットの占める割合は2.3%であった（環日本海環境協力センター，1998)。これらの結果も，海洋の表層域に浮遊するレジンペレットの割合が，他のプラスチックゴミの相対的な増加により見かけ上減少していると考えられる。しかしながら，琉球列島，宮古島の砂浜海岸で方形枠法により約150地点でプラスチック粒子の分布を調査したところ，島の北側海岸には多数のレジンペレットが見出されたのに反し，南側の海岸にはレジンペレットが殆ど見出されなかった（小城，未発表データ)。宮古島の北側沖合いには東南アジアに起源を有する黒潮の分派流が流れているため，レジンペレットの大部分はこの海流により台湾，中国，東南アジア諸国より運ばれてきたものであろう。東南アジアの新興工業国では経済効率を優先するあまり，環境対策が等閑にされているため，レジンペレットをはじめプラスチック製品類の海洋への漏出が多いと指摘されている（伊藤，私信)。例え大洋中に孤立する，プラスチック産業が無い離島海岸であっても，近隣に卓越する海流が存在する場合には，プラスチック粒子が大量に漂着する。同様の現象は，南太平洋の楽園と言われる，フィージーやサモア諸島でも観察されている(Gregory, 1990)。

本報で示したソーティング方法で海鳥類がパイカ現象により取り込んだプラスチック粒子を調査した例を以下に示す。1970年より1992年までの間ほぼ連年採集した外洋性海鳥類のハイイロミズナギドリ（*Puffinus griseus*）とハシボソミズナギドリ（*P. tenuirostris*）の胃中より出現したプラスチック粒子の種類組成に年代的変化が見て取れた。取り込むプラスチック粒子数の割合を見てみると，魚食性の強いハイイロミズナギドリはプラスチック製品の破片が62%，レジンペレットが38%であった，そしてプランクトン食性が強いハシボソミズナギドリはプラスチック製品の破片が33%，レジンペレットが67%であった。この傾向は1970～79年の間に観察された(Ogi, 1990)。このような取り込むプラスチック粒子の種類に種間差があるのは，食性が反映されていると考えられた。ところが，1989～1992年になると，取り込み差はなくなり両種共にプラスチック製品破片が69～79%，そしてレジンペレットが21～29%となり類似していた（小城，

1999)。このことは，海洋表層にレジンペレットに比してプラスチック製品の破片が著しく増加したことにより，ミズナギドリ類二種がプラスチック粒子の種類に関して選択性を発揮できなくなった結果と考えられる。恐らく1970年代に顕著になりだした海洋のプラスチック汚染は，それまでの化学先進国で生産されたレジンペレットの後進国への海運を通じての輸送過程における漏出から始まったのであろう。その後，各国でプラスチック工業が擁立されるにつれ，プラスチック製品があらゆる分野に進出し，さらに使い捨てのプラスチック製品が増すに従い，海洋表層にはレジンペレットよりもプラスチック製品の破片が卓越するようになったと考えられる。

我が国における代表的な沿岸性海鳥であるウミネコ (*Larus crassirostris*) のプラスチック粒子取り込みを，1998年利尻島で駆除された232羽について調査したところ69羽 (29.7%) の胃中からプラスチック類が出現した。これらについて，本報で述べたソーティング法にて調査した。レジンペレットやプラスチック製品類の破片は僅か3羽の胃中から見出されただけであったが，69羽全ての胃中より釣り糸，漁網，ロープ類等の劣化した破片が多数見出された (小城，未発表データ)。ウミネコは沿岸域の化学合成繊維汚染の指標生物として有効であると考えられた。

海鳥類の種特異的なプラスチック粒子取り込み特性を継続的に調査した結果が，海洋におけるプラスチック汚染の質的および量的傾向を間接的に知るのに役立つことから，本報で述べたソーティング法における分類基準は妥当性のあるものと考えられた。

プラスチックの生産量は今後も増加することは確実である。それに伴い微小なプラスチックのゴミも近未来には天文学的な数量が海洋に存在することになるであろう。このことの背景には，プラスチック生産量の推移，消費の拡大，そして廃棄された後の処理の現状を理解することが必要である。

まず世界のプラスチック生産量の年別推移を見ると，1960年は527万トン，1970年は3,000万トン，1980年は6,000万トン，そして1990年は1億トンに達した。ちなみに1998年の総生産量は1.443億トンである (日本プラスチック工業連盟，1999)。プラスチックは軽くて丈夫，透明である，酸素や水を通さない，断熱性がある，加工しやすい等の利点から，年々その用途が拡大され，消費量が増え，そのために生産量が増大している。わが国の年別プラスチック生産量も，1950年が1.7万トン，1960年が55.4万トン，1970年が512.7万トン，1980年が751.8万トン，1990年が1,264.8万トン，そして1998年が1,389.7万トンと言うように著しく増加してきた (日本プラスチック工業連盟，1999)。わが国の毎年のプラスチック生産は，好景気や不況の影響はあるものの，前年比で毎年3～8%の範囲で増加している。今後もプラスチックの生産量は増加の一途を辿ることは，我々の生活環境を観察すれば容易に推察できる。

プラスチックは極めて優れた利便性がある反面，一度廃棄物として自然環境中へ放出されると非分解性が災いして，例え劣化して微小片となっても長期間環境中に残存することになる。プラスチックのゴミは海洋環境中では異物であり，完全に自然分解するまでには多年月を要するし，プラスチックに含まれる化学物質の海水中への溶け出しによる海洋生物への影響も考えられる。従って，プラスチックは海洋生態系中に，在ってはならない非分解性の汚染物質，として位置づけられる (Clark, 1997)。

わが国の年別のプラスチック生産量に対する廃棄物としての排出量割合を見ると，1970年代は33.6～50.6%，1980年代は42.5～49.6%であった (プラスチック処理促進協会，1992)。しかしながら，プラスチック製品は使い捨ててすぐゴミになるものから，1～10年の間使用されてからゴミになるものまである。これらのプラスチックのゴミに加えて，年毎のプラスチック生産量の増加が加わり，1990年代になるとプラスチック生産量に対するゴミの割合は50～70%と，増加傾向に転じている (プラスチック処理促進協会，1999a)。

わが国における1993年のプラスチック廃棄物は，全体で756万トンであるが，これを100%と

すると，マテリアルリサイクルが9%，焼却が51%，そして埋め立てが40%であった（プラスチック処理促進協会，1997)。しかし1997年の排出量949万トンでは，マテリアルリサイクルが12%，焼却が53%，そして埋め立てが34%であった（プラスチック処理促進協会，1999b)。埋め立てられた実際の量は，1993年が299万トンであるのに対して1997年は325万トンと増加していた。プラスチック生産量の年々の増加に伴い，廃棄物の完全処理が間に合わない現状にある。

プラスチックは，プラスチック工業界や行政府が作成した，生産から廃棄までの流れ図上では，ゴミとして環境中へ漏出していないことになっているものの，石油コンビナートで生産された原材料のレジンペレットの段階，プラスチック製品となりそれらが廃棄されるまでの段階，そして廃棄物となった段階の三段階中にゴミとして環境中へと漏出する。プラスチック処理促進協会(1999b) では，これら三段階を以下のように定義して分類している：① **樹脂製造・製品加工・市場投入段階**，② **排出段階**，③ **処理処分段階**。Table 4 には示さなかったものの，1970年代に海洋表層に浮遊していたり，海岸に漂着したプラスチック粒子の分布に関する報告を見ると，それらのほとんどが樹脂製造・製品加工・市場投入段階に海洋へと漏出したレジンペレットについてのものが多い (Morris and Hamilton, 1974; Carpenter et al.; 1972, Gregory, 1997; Hays and Cormons, 1974)。

レジンペレットについては，1986年以降米国プラスチック工業界で漏出防止対策 (Anon, 1991) が開始された。我が国でも日本プラスチック工業連盟が注意を喚起し，実際に漏出防止マニュアルを製造工場へと配布したため（伊澤，私信)，以前に比し実際の漏出量の減少が期待されている。

本報で紹介した，微小なプラスチック粒子のソーティング方法によりこれまでに得られた成果は，分布しているプラスチック粒子の種類組成に年代的な変化のあること，沿岸域と外洋域では卓越するプラスチック粒子の種類が異なること，強力な海流の本流や分派流に近い沿岸域や離島海岸には大量のプラスチックが漂着すること，そしてプラスチック生産量に応じて廃棄プラスチックの分布数量が増すこと，沿岸域では人口密度が集中した場所の周辺海域では発泡スチレンの微小粒子が極めて多く出現すること，プラスチック汚染が進行するにつれ海鳥類が取り込むプラスチック粒子の種類に変化が見られた等である。すなわち，本報で述べたプラスチック粒子のソーティング方法で得られた結果は，海洋のプラスチック汚染の現状を知るに留まらず，将来の汚染状況を予測できることになり，具体的な汚染防止対策を構築する基礎資料となることを示している。

海洋が許容できるプラスチック廃棄物の収容量の限度となる数量値があるとすれば，具体的なプラスチックゴミの海洋への漏出防止のための対策を立てなければ，やがてはその閾値に達する時が来るであろう。そのような事態となる前に，海洋のプラスチック汚染に関しては定期的に調査を行ない汚染の現状を把握するべきである。

謝　　辞

本研究は，平成11年の環境庁による内分泌撹乱物質による生殖への影響とその作用機構に関する研究の委託調査費より援助を受けた。

プラスチック生産量の統計値については日本プラスチック工業連盟専務理事である伊澤　伯氏に御教示を受けたので御礼申し上げます。また，広島県での漂着物調査の結果については，クリーンアップ関西事務局の山藤一雄氏に御教示を受けたので御礼申し上げます。プラスチックのソーティングに関しては佐々木美帆氏の協力を得たので感謝します。

英文校閲では J. Bower 博士にお世話になったので御礼申し上げる。

文　　献

Anon. (1991). *An manual on preventing pellet loss.* The Society of the Plastic Industry, Inc., 36 p.

Carpenter, E.J. and Smith, K.L., Jr. (1972). Plastics on the Sargasso Sea surface. *Science*, **175**, 1240-1241.

Carpenter, E.J., Anderson, S.J., Harvey, G.R., Miklas, H.P. and Peck, B.B. (1972). Polystyrene spherules in coastal waters. *Science*, **178**, 749-750.

Clark, R.B. (1997). *Marine Pollution* (4th edition). Clarenndon Press, Oxford.

CMC (Center for Marine Conservation) (1988). *A citizen's guide to plastics in the ocean : more than a litter problem.* (3rd edition). 143 pp.

Colton, J.B., Knapp, F.D., Jr. and Burns, B.R. (1974). Plastic particles in surface waters of the northwestern Atlantic. *Science*, **185**, 491-497.

Day, R.H. and Shaw, D.G. (1987). Patterns in the abundance of pelagic plastic and tar in the North Pacific Ocean, 1976-1985. *Mal. Pollut. Bull.*, **18**, 311-316.

Day, R.H., Shaw, D.G. and Ignell, S.E. (1990). The quantitative distribution and characteistics of neuston plastic in the North Pacific Ocean, 1985-88. pp. 247-266. In Shomura, R.S. and Godfrey, M.L. (eds.), Proceeding of the Second International Conference of Marine Debris, 2-7 April 1989, Honolulu, Hawaii U.S. Dep. Commer., NOAA Tech. Memo., NMFS-TM-SWFSC-154.

Gregory, M.R. (1990). Plastics : Accumulation, distribution, and environmental effects of meso-, macro-, and megalitter in surface waters and on shores of the Southwest Pacific. pp. 55-84., In Shomura, R.S. and Godfrey, M.L. (eds.), Proceeding of the Second International Conference of Marine Debris, 2-7 April 1989, Honolulu, Hawaii U.S. Dep. Commer., NOAA Tech. Memo., NMFS-TM-SWFSC-154.

Gregory, M.R. (1997). Plastic pellets on New Zealand beaches. *Mar Pollut. Bull.*, **8**, 82-84.

Hays, H., and Cormons, G. (1974). Plastic particles found in tern pellets, on coastal beaches and at factory sites. *Mar. Pollut. Bull.*, **5**, 44-46.

Hodge, K.L., Glen, J., and Lewis, D. (1993). 1992 International Coastal Cleanup Report. (eds. Bierce, R., and O'hara, K.), Center for Marine Conservation. 217 pp.

環日本海環境協力センター (1998). 日本海沿岸海辺の埋没・漂着物調査報告書.

クリーンアップ関西事務局 (1999). 1999年広島湾での国際ビーチクリーンアップの結果報告.

Morris, B.S. and Hamilton, R.C. (1974). Polystyrene spherules in the Bristol Channel. *Mal. Pollut. Bull.*, **5**, 26-27.

日本プラスチック工業連盟 (1999). プラスチックス. **50**, 17-95, 株工業調査会.

小城春雄 (1989). 海洋廃棄物対策調査委託事業報告書 : 海鳥類によるプラスチック粒子の取り込み. 北海道大学水産学部.

小城春雄 (1990). 海洋廃棄物対策調査委託事業報告書 : 海鳥類によるプラスチック粒子の取り込み. 北海道大学水産学部.

Ogi, H. (1990). Ingestion of plastic particles by sooty and short-tailed shearwaters in the North Pacific. pp. 635-652., In Shomura, R.S. and Godfrey, M.L. (eds.), Proceeding of the Second International Conference of Marine Debris, 2-7 April 1989, Honolulu, Hawaii U.S. Dep. Commer., NOAA Tech. Memo., NMFS-TM-SWFSC-154.

小城春雄 (1991). 海洋廃棄物対策調査委託事業報告書 : 海鳥類によるプラスチック粒子の取り込み. 北海道大学水産学部.

小城春雄 (1992). 海洋廃棄物対策調査委託事業報告書 : 海鳥類によるプラスチック粒子の取り込み. 北海道大学水産学部.

小城春雄 (1995). 微小プラスチックの広がり : 小笠原諸島父島海岸より. p. 75-88, 佐尾和子, 丹後玲子, 根本　稔, プラスチックの海 : おびやかされる海の生きものたち, 海洋工学研究所出版部, 東京.

小城春雄, 馬場徳寿, 石原昭治, 柴田康行 (1999). ニ種類のニューストンネットによるプラスチック粒子採集と海洋のプラスチック汚染. 北大水産彙報, **50**, 77-91.

小城春雄 (1999). 海鳥類によるプラスチック粒子の取り込み. 内分泌撹乱化学物質研究発表会—内分泌撹乱化学物質調査研究の進展と課題—. pp. 83-84, 環境庁国立環境研究所・科学技術庁研究開発局主催, 講演要旨.

プラスチック処理促進協会 (1992). ファクト・シート：環境・廃棄物・プラスチック. 社団法人 プラスチック処理促進協会, 60 p.
プラスチック処理促進協会 (1997). プラスチックリサイクルの基礎知識. 社団法人 プラスチック処理促進協会, 28 p.
プラスチック処理促進協会 (1999a). プラスチックリサイクルの基礎知識. 社団法人 プラスチック処理促進協会, 28 p.
プラスチック処理促進協会 (1999b). プラスチック製品の生産・廃棄・再資源化・処理処分の状況, 1997. 社団法人 プラスチック処理促進協会, 7 p.
Ribic, C.A. (1990). Report of the working group on methods to assess the amount and types of marine debris. pp. 1201-1206., In Shomura, R.S. and Godfrey, M.L. (eds.), Proceeding of the Second International Conference of Marine Debris, 2-7 April 1989, Honolulu, Hawaii U.S. Dep. Commer., NOAA Tech. Memo., NMFS-TM-SWFSC-154.
Ribic, C.A., Dixon, T.R. and Vining, I. (1992). Marine debris survey manual. NOAA Technical Report NMSF 108.
とやま環境財団 (1997). 日本海沿岸海辺の埋没・漂着物調査報告書.
Wong, C.S., Green, D.R. and Cretney, W.J. (1974). Quantitative tar and plastic waste distributions in the Pacific Ocean. *Nature*, **247**, 30-32.