

## 微細なプラスチック破片による生態系への影響調査

### 微小プラスチックによる海洋汚染、およびその海洋生態系への影響

北海道大学名誉教授 小城春雄

#### はじめに

海岸に漂着したり、海面上に浮遊している微小プラスチックについて言及する場合にはまずプラスチック生産の歴史的過程と、どのようなプラスチックの種類が生産されて来たかを知る必要がある。それは海洋表層に浮遊するプラスチックの殆どは四大汎用樹脂と呼ばれるポリエチレン、ポリスチレン、ポリプロピレン等の日用雑貨といった我々の日常の生活と密接に関連した比重の軽いものだからである。なお、塩化ビニル樹脂は比重が重く破片としては海表面に浮遊していない。ただし稀にペレットとして流通することもある。

現在のプラスチック製品類は、日用雑貨ばかりでなく、金属の代替品として産業的にも使用されているため、海洋表層に浮遊するもの、水柱内に浮遊するもの、海底に沈むものなど、比重は様々であり、海洋の 3 次元空間のあらゆる水柱内の何処にも存在する。現在、海岸に漂着したり海表面に漂流している事ばかりに注意が集まっているが、実は、海洋全体が正にプラスチックの海となっているのが現状である。

衝撃的なプラスチックゴミとしては、日本海溝の水深 6270m の海底にマネキンの首が発見された(藤岡ら 1993)。その周辺にはビニールのシートやその他のプラスチックゴミも散乱していた。その箇所はマネキン谷と名付けられた。この事実を見てもプラスチック製品の海洋汚染が一筋縄ではいかない現実がある。

現在世界のプラスチック生産量は指数函数的に増加の一途を辿っている。毎年生産されるプラスチック製品類の 60~70%はゴミとして廃棄されている。各国政府の発行するゴミ処理の報告書では、すべてが焼却されたり、リサイクルされたり、埋め立てられたりしたとされ、完全に処理された記述となっている。しかし現実には、かなりの量が海洋へと漏出している。

プラスチック製品となると極めて安定した物質で、ペットボトルでも自然界に放置して完全に分解するまでに 150 年を要すると言われている。何故プラスチック製品はそんなにも安定した物質で自然界に放置しても完全分解までに長年を要するのか、という質問を化学研究者に投げかけても、納得のゆく答えは戻ってこない。ただ、地中で何千万年から数億年間という時を経て形成され今に至るまでに残存した原油を原料として合成されているのでそうなるのでしょう。というコメントが戻ってくるだけである。

海洋表層に漂流しているプラスチック製品は、時間が経過するにつれ物理的外力や太陽光の紫外線により、破壊、碎片化、劣化、強度低下により、眼には見えないほどの微小粒子となる(兼広 2007)。し

かし、微小粒子となっても巨大分子としてのプラスチックの性質は維持したままの粒子として存在し続ける。このような微小粒子が魚類の幼稚仔(Hoss and Settle 1990)や動物プランクトン (Andrady 2004) にまで取り込まれている事が見出されている。しかし、兼広(2007)は、紫外線が関与する間では、温度、塩分、水分等が劣化を促進する要因となりうることを示した。このことはプラスチック粒子の破片が太陽光の達しない深度や海底、あるいは土中に埋没した際には、半永久的に残存することを示唆している。

北欧の研究者がレジンペレットを土中に埋め、毎年1回掘り出して、その重量を計測した。数年間継続したが何の変化も無いので計測を止めてしまった。それほどにプラスチックの残存性は凄い。

プラスチック製品類の環境への影響ということになると、避けて通れないのは製品を造る過程で使用される様々な化学物質の影響である。いわゆる外因性内分泌攪乱化学物質(EDC:Endocrine Disrupting Chemicals)である。一般には「環境ホルモン」と呼称されている。田辺(1998)は、人工合成化学物質は生物の30~40億年の進化の過程で生物が取り込んだ経験を持たないために、生物体内で薬物代謝酵素がどのように働いても排泄や無毒化することができないばかりでなく、さらに有毒な物質を誘導することがあると指摘している。田辺(1998)はこれまで地球上には存在しなかった人工合成化学物質で、ホルモンと類似した機能を発揮するものを「環境ホルモン」と定義すべきであると提案している。

この人工合成化学物質では登録されているもので1200万種とされ、日常生活で使用されているものは10万種、そのうちで環境ホルモン作用が確認されているのは約70種である(田辺 1998)。

これら環境ホルモンとされる人工合成化学物質についての調査報告は分野も多岐にわたり、とてもではないがすべてを読んで海洋環境との関連を検証することはできない。幸にして、国立環境研究所が2002年に「平成13年度 内分泌攪乱化学物質に関する情報収集・データベース作成」を公表した。この中には海外の22学会誌の2001年誌上で発表された論文が集録されている。環境ホルモンとして注目したのは65種の化学物質である。特に断わりの無い場合は、このデータベースを参照にした。

海洋における微小プラスチック粒子の分布は、世界のプラスチック生産量が指数函数的に増加している現状から、将来には深刻な影響が発現することは容易に推定できる。現段階においては、その具体的な影響を予測できない。今後もプラスチック生産量の増加は確実なため、膨大な数のプラスチック粒子の海面被覆から、海洋表層における光合成層の薄層化は十分に予測できる。次には、石油化学製品であるプラスチック粒子は、化学的親和性から、他の石油化学製品類である有機塩素化合物類を吸着することが近年証明されている。このことは、PCBsのような地球規模で循環するメカニズムに新たな視点を加えなければならないと化学者により注目されている。

近年、地球の海洋環境も有限であることが次第に認識されるようになってきている。人間活動の影響を強く受ける、比較的閉鎖的な海洋環境では海洋汚染が深刻化していて、それらの汚染を防止する対策が取られている。ところが、特定海域を科学的に長期間調査し、生態系の変容という観点から追跡した研究成果は極めて少ない。

幸にして、内海ではあるが黒海(Black Sea)において約40年間に亘り、汚染の進行とともに生物相がどのように変容したかを Zaitsev(1992)が発表した。その成果は、今後の地球の海洋環境の変容の「最悪

のシナリオ」を暗示していると思わせるので紹介する。

注意して欲しいことは、プラスチックの微小粒子だけの生態系への影響だけを峻別して予測できないことである。プラスチックの微小粒子と他の汚染物質が合わさった複合的なものとして捉える事が肝腎であろうことである。またプラスチックの微小粒子の増加に伴い生態系が劇的に変容するのではなく、少しづつ「ジワジワ」と影響を及ぼして行くことが考えられる。

## 1. 世界のプラスチック生産量の推移

第二次世界大戦以前のプラスチックといえば、セルロイド製のキューピー人形が有名である。第2次世界大戦中は航空機の風防にメタクリル樹脂が使用されていたためプラスチック産業は軍需用の先端技術として一般向けの使用は制限されていた。

第二次大戦後になると、プラスチックの利便性が認識されるにつれ先進諸国を中心として石油化学は一気に発展した。石油化学工業は第二次世界大戦当時アメリカでは天然ゴムやその他の戦略物質の払底による代替物質の開発から進展した(CMC 1988)。日本やドイツは石油資源に恵まれなかったために、主に石炭化学工業に活路を見出さざるを得なかった。このような下地が、敗戦国でありながら日本やドイツが、戦後アメリカより新技術が導入され、他国に比して迅速に石油化学工業の発展の礎になったのであろう。

主要各国のプラスチック生産量を表1に示した。世界のプラスチック生産は1950年頃から急激に発展を開始した。1960年には総生産量は560万トン、1970年には3000万トン、1990年には9892万トンとなった。1993年には1億トンを越し、2003年には2億トンを越した。このままでの発展状況から見ると2010年以前に3億トンを越す可能性が強い。

年代別のプラスチック生産量をたどると、1973年の第1次石油ショック後、そして1979年の第2次石油ショック後の数年間の生産量は停滞した状況がわかる。

プラスチック産業の発展は1975年頃までは、主に北半球に位置する先進工業国で活発であった。プラスチックの利便性はもはや人間生活に欠く事のできない状況が理解されるにつれて、大量のプラスチック原材料であるレジンペレットが発展途上国へと主に海運を通じて流通した。恐らく1975年頃までは特に大量のレジンペレットの輸送があったのではないだろうか。Day(1980)はコスタリカ共和国での波止場労働者のストライキの際に、230トンのポリプロピレン原材料粒子(レジンペレット)が海中投棄された事を記している。レジンペレット1粒子の平均重量は0.02gとされているので(Day 1980)、230トンを個数に換算すると約115億個となる。

当時、石油コンビナートは北米太平洋岸にはカリフォルニア州にしかなかったことから、当時の主要製造国は太平洋岸では日本とカリフォルニア、そして北大西洋では北米東岸に集中していた。このことは、レジンペレットの海洋汚染は太平洋側では日本とカリフォル

表 1 主要各国のプラスチック生産量(万トン)

年	日本	米国	ドイツ	韓国	中国	世界の生産量
1935	0.34					
1945	0.63					
1950	1.69					
1955	16	142	42			
1956	25	153	51			
1957	33	204	55			
1958	36	211	62			
1959	56	273	80			
1960	55	285	98			560
1961	69	287	108			
1962	83	360	126			
1963	107	407	143			
1964	138	458	175			
1965	173	491	198			
1966	199	596	229			
1967	268	620	261			
1968	341	738	325			
1969	419	843	394			
1970	513	966	432	4		3000
1971	520	957	478			
1972	568	1176	547			
1973	654	1372	624			
1974	669	1376	627			
1975	517	1021	505	22		
1976	580	1240	644	27		
1977	585	1123	627	32		
1978	675	1238	675	35		
1979	821	1900	724	47		
1980	752	1608	674	78	90	6000
1981	704	1680	660	72		
1982	713	1619	627	78		
1983	781	1904	703	92		
1984	891	2100	741			
1985	923		764	145	121	7674
1986	937	2280	748			7894
1987	1003	2531	830			8576
1988	1102	2673	890		180	9154
1989	1197	2693	907	251	200	9623
1990	1265	2811	937	294	230	9892
1991	1280	2852	1000			
1992	1258	3000	930			
1993	1225	3150	995	578	520	10651
1994	1314	3280	1098	622	320	11530
1995	1404	3580	1110	680	424	11959
1996	1466	3860	1087	726	495	12978
1997	1521	4250	1186	820	611	13544

1998	1390	4360	1260	846	677	14912
1999	1457	4620	1386	908	842	15730
2000	1474	4539	1550	914		17800
2001	1388	4596	1580	1199		18100
2002	1385	4875	1650	1008		19400
2003	1362			1036		20600
2004	1408			1062		
2005	1415			1089		
2006	1405			1125		
2007						25000
2008						

国際連合世界統計年鑑(1965、1970、1977、1982、1984)

日本国勢図会(1958～2007年)参照

ニアから、そして大西洋では北米東岸と北欧の工業地帯から始ったと考えて良い。昭和 40 年(1965 年)頃までは東アジアでは石油化学工業は日本にしかなかった

レジンペレットは大型のプラスチック製の巾着型の袋に入れて船積みされる。輸送過程の港での船への積み込みや、船からの積み下ろしの際、フォークリフトの爪でレジンペレットを入れた袋を破損してしまう事がある。そこで漏出したレジンペレットの回収はほとんど不可能であり、散逸したレジンペレットは海洋へと漂い出してしまう。

1975 年頃からは、先進諸国の急激な重工業化の進展で、その原料確保と製品輸出市場の開拓が大きな課題となった。一方、発展途上国は工業開発で経済の自立を目指し、国民生活と密接に関連する、石油化学工業の導入に注目した。日本の海外投資は、韓国、ブラジル、イラン、シンガポール、サウジアラビアで具体化した。1978 年以後になると韓国および台湾等がプラスチック生産量の統計資料に名を連ね始めた(表 1)。

現在世界のプラスチック生産量は中国がアメリカに次ぐ地位にある。すなわち、中国は世界第 2 位の生産量を誇っている。ただし、生産量を公表していないために正確な生産値は推定の域を出ない。2007 年時点での生産量の順位は、第 1 位アメリカ、第 2 位中国、第 3 位ドイツ、第 4 位日本となっていると石油化学関係者間では認識されている。

各国は国際連合の統計事務局にプラスチック生産高を報告する義務はあるものの産業発展国は自国の産業の水準が公開されると国益に影響するといっているので、1985 年以降は数年遅れで公表しているようである。国連の統計資料でも 1985 年以降はプラスチック生産量に関しては削除されるに至っている。特に中国は農産物を始めとして多くの産業品目の統計値は公表していない現状にある。表 1 の中国のプラスチック生産量は推定値である。

中国の石油化学工業は昭和 40 年から小規模設備での生産が開始され、大量生産が本格化したのは昭和 52 年からである。技術支援や中国で生産されるナフサの受け入れで日本は大きな役割を果たした。

昭和 59～60 年に、中国は農業生産振興のための農業用マルチフィルムの自国内生産を求めていた。中国での農業用フィルムの原料となるエチレンの生産能力は昭和 52 年の 36 万トンから昭和 61 年の 99 万

トンにまで上昇した。その後の中国におけるプラスチック生産量の正確な統計値は前述した理由から一切不明である。

しかしながら、4大汎用樹脂(塩化ビニル、ポリエチレン、ポリスチレン、ポリプロピレン)の生産量を見ると、次のようになっている。

国 / 年	1995	2000	2002	2004	2005
中国(万トン)	395	845	1135	1500	1816
日本(万トン)	903	960	903	924	932

2004年には日本やドイツを総生産量では凌駕した可能性があり、2005年には世界第2位の地位を占めた。

東南アジアへの技術移転の交渉に関与した人の述懐によると、技術移転計画の中には必ず環境対策のための配慮が為されている。ところが相手国にとってみると環境対策設備を受け入れると生産品の原価が10~15%高くなるという事情がある。それでは国際競争力でマイナスになるという事で、ほとんどの場合環境対策設備が欠如した結果となったという事である。相手が嫌がる事を日本側でも強制できないのだそうである。

1989~1990年に日本の水産庁が行なった漁船活用型地球環境モニタリング事業の結果では、海洋表層に浮遊する微小プラスチックゴミが東南アジア海域より、黒潮により北太平洋海域へと流出している様相が見て取れた。

プラスチック生産の増加と共に当初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洋への漏出から海洋のプラスチック汚染が始り、1970年代となると海岸に漂着するプラスチック製品類の漂着が顕著となり、各国のプラスチック製品類の60~70%がゴミとして排出される過程で海洋中のプラスチック製品類の微小ゴミが増加する過程を辿ったと考えて良い。

## 2. 我が国のプラスチック生産量の推移

日本のプラスチック産業は、セルロイドから始った。1918年にはすでに日本セルロイド製品同業組合が設立されていた。1935年には、主に石炭を原料としてセルロイドとフェノール樹脂を中心に、約1.3万トンのプラスチックを生産していた。

日本のプラスチック産業発展については遠藤(1999)が文化史的観点から要領良く纏めているので参考になる。

我が国で石油化学製品が国産化されたのは1957年(昭和32年)であり、コンビナートの形態を取ってエチレンなどの本格的な生産を開始したのは1958年(昭和33年)である(石油化学工業協会 1989)。それまでの合成樹脂は非石油系のセルロイド、フェノール樹脂(ベークライト)等であり、第二次大戦中には塩化ビニル、メタクリル樹脂等が軍用に少量生産されていたにすぎない。

戦前の年間の生産量は、1935年(昭和10年)が3.44千トン、1945年(昭和20年)が6.3千トンといった少量であった。

戦後の復興期になるとプラスチック生産量は1957年に30万トンに達するも、低迷状態であった。1955年(昭和30年)~1965年(昭和40年)の間は、海外の先端技術の導入期であった。戦後は食糧増産に主眼

を置いたため化学肥料を中心とした無機化学の復興に追われ、プラスチック類を含む石油化学技術は大きく立ち遅れた。しかし、昭和30年以後プラスチック産業は一気に発展の道を辿った。

1979～1999年は生産量世界第2位の位置を占めたが、2000年以降はドイツ、中国に抜かれ、第4位である。

4大汎用樹脂の戦後の我が国の本格的な企業化による大量生産開始時期は、塩化ビニル樹脂が一番早く昭和24年(1949)6月、ポリスチレンが昭和32年(1957)1月、ポリエチレンが昭和33年(1958)3月、ポリプロピレンは昭和37年(1962)4月であった(石油化学工業協会 1989)。

コンビナートにおいてプラスチック製品を成形する前の原材料であるレジンペレットが生産され、全国各地のプラスチック成形工場へと輸送され、そこで製品化された。ただし、塩化ビニル樹脂の多くの原材料は粉末状として輸送された。すなわち、プラスチック粒子の環境への漏出はレジンペレットに始まったと言える。

昭和33年10月18日にはフラフープが全国一斉に発売され爆発的に大流行した。このフラフープは低密度ポリエチレン製であり、1ヶ月で80万個も売れた。この年に日本でのポリエチレンの企業化が開始された。このフラフープの流行はポリエチレンの生産開始時期であり、今だ用途が開発中であるポリエチレン産業界も将来像が見出せないで苦悩していた時期であったので、一息付くといった状態にあった。フラフープはあまりに売れるので製造が間に合わなくなったが、レジンペレットの輸入が間に合わなかったであろう。また、プラスチック製のオモチャとして、昭和35年には塩化ビニル製のウインキー(だっこちゃんは読売新聞の命名)が大流行した(佃 1988)。

そこで、現在海洋表層で最も普遍的に見出せるポリエチレンの我が国における生産量、輸入量、輸出量を表2に示した。

表2 日本のポリエチレン生産量、輸入量、輸出量(トン)

西暦	日本歴	生産量	輸入量	輸出量
1957	昭和32	0	17,926	6
1958	昭和33	10,226	19,923	178
1959	昭和34	21,280	33,254	316
1960	昭和35	41,179	23,384	1,172
1961	昭和36	58,098	42,624	509
1962	昭和37	142,512	12,327	11,834
1963	昭和38	223,377	4,871	24,482
1964	昭和39	289,385	2,871	23,204
1965	昭和40	396,264	1,451	71,525
1966	昭和41	556,383	1,359	152,235
1967	昭和42	747,764	1,665	164,052
1968	昭和43	856,623	2,096	199,860
1969	昭和44	1,089,414	2,255	256,711
1970	昭和45	1,304,770	2,374	373,001
1971	昭和46	1,340,000	2,266	457,413
1972	昭和47	1,480,225	1,067	505,555
1973	昭和48	1,671,695	4,760	399,720
1974	昭和49	1,897,047	18,771	363,655

1975 昭和50	1,294,529	251	413,365
1976 昭和51	1,392,461	1,188	355,130
1977 昭和52	1,466,724	999	437,407
1978 昭和53	1,766,572	7,722	423,474
1979 昭和54	2,165,308	8,831	304,449
1980 昭和55	1,860,198	14,884	274,532
1981 昭和56	1,670,675	49,045	281,392
1982 昭和57	1,674,101	67,654	273,185
1983 昭和58	1,773,050	39,275	249,304
1984 昭和59	2,251,072	28,446	297,292
1985 昭和60	2,027,308	62,851	256,486
1986 昭和61	2,066,273	106,855	320,748
1987 昭和62	2,180,518	81,118	279,625
1988 昭和63	2,380,836	59,120	235,445
1989 平成 1	2,712,195	71,806	297,330
1990 平成 2	2,887,600		
1991 平成 3	2,982,000		
1992 平成 4	2,981,000		
1993 平成 5	2,762,000		
1994 平成 6	2,944,000		
1995 平成 7	3,193,000		
1996 平成 8	3,313,000		
1997 平成 9	3,366,000		
1998 平成 10	3,143,000		
1999 平成 11	3,369,000		
2000 平成 12	3,342,300		
2001 平成 13	3,294,300		
2002 平成 14	3,176,100	46,108	506,035
2003 平成 15	3,165,300	39,222	458,968
2004 平成 16	3,238,000		
2005 平成 17	3,240,000		
2006 平成 18	3,166,000		

石油化学工業協会(1989)より抜粋  
化学工業統計年表(1989)  
プラスチック6(2004)

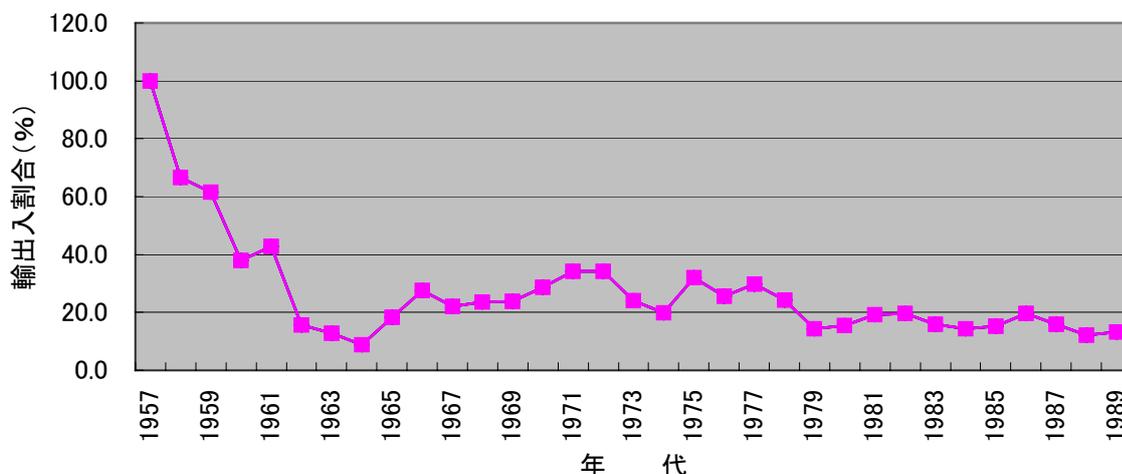


図1 ポリエチレンの輸出入量の年代別変化 (%)

昭和 32～39 年は大量輸入期であると同時にポリエチレン産業の勃興期である。昭和 40～55 年の期間は大量輸出期であると同時に最小輸入期であり、変動期と見なせる。昭和 56～平成元年の期間は、プラスチックプラントの東南アジア諸国への輸出、経済のグローバル化、高品質の原材料輸入等で、輸出入の動きは一定の傾向があり、安定期と見なせた。

この傾向は、図2に示した。x軸に西暦の年代、そしてy軸に各年の((輸入量+輸量)/(生産量+輸入量))×100の値を配置した。これは我が国でレジンペレットとして生産および輸入した総量に対しての相対的な流通量をパーセントとして示した値である。これらは、恐らく大部分は船積みされたものである。ポリエチレンの各年の生産量が増加するにつれ流通量は多くなるものの、我が国のポリエチレン生産体制が整うと相対的な流通割合は減少する傾向が窺えた。

表2の輸出入量については統計資料に原材料であるのか製品であるのか、あるいは両者を併せてあるのかが窺えない点に注意を要する。ただし、2002年と2003年とは原材料だけに限定した値である(プラスチック 2004)。この両年だけ見てもポリエチレンの原材料粒子は各年50～55万トンが輸出入されていることから港での漏洩が考えられる。

東京湾や相模湾の周辺海岸でのレジンペレット調査から栗山ら(2002)は、京葉工業地帯のプラスチック製造工場や成形工場からの漏出が現在でも継続していると示唆している。

他のプラスチック原材料の国内外の流通量も同様な傾向が窺えるものと考えられる。レジンペレットの海洋への漏出は生産活動が続く限り継続していると考えられ、一層厳密な漏出防止策も継続して行わなければならないことを示している。

### 3. 採集方法について

海洋表層にレジンペレットが大量に浮遊している事実が始めて明らかになったのは、科学雑誌 Science に Carpenter and Smith(1972)が北大西洋のサルガッソ海の表層に 1km<sup>2</sup> 当り平均 3537 個(範囲: 47~12080 個、採集地点数: 11)のプラスチック粒子を見出したことにはじまる。それらの大部分はレジンペレットであった。この際プラスチック粒子はニューストンネットにより採集された。ネットの目合いは 0.33mm (GG54) であった。また曳網時間は 0.50~6.50 時間、曳網速度は 2 ノットであった。

結論から述べると、この採集方法では正確なプラスチック粒子の分布密度は明らかにできない。採集海域が北緯 30~37 度であることから、表層にはクラゲ類やサルパ類が多く 10 分も曳航していれば、植物プランクトンやゼリー状生物によりネットの目詰まりが生じる。ネット口は沈下し、水面をネット口で捉え難くなる。採集域が外洋域なのでうねりが定常的にあり、風力 1~2 の海況でもネット口は海面を滑ったり、海面下への沈下することを周期的に繰り返す。ネットの網口がうねりや波の斜面を滑り落ちる時には網口の下面が傾斜した波の傾斜を滑り降りるが、この際に海水は網口に入らない現象が起きる。更には 20 分以上の曳網ではネットに微小プランクトン類やゼリー状生物が付着することによる目詰まりで、曳網中に海水が網口から入らないネットアボイダンス(net avoidance または net dodging)が生じてしまう。また夜間の曳網では表層に動物プランクトン類が豊富になるので、ネットアボイダンスの発生する時間は昼間時より更に短縮される。ニューストンネットによる夜間曳網標本は、昼間曳網標本より微小プラスチック粒子のソーティング作業では 2~3 倍以上の労力が必要となる。従って、Carpenter and Smith(1972)の成果は信用できない。ただしプラスチックの微小粒子の海洋汚染がレジンペレット(原材料粒子)から始まったことが明瞭に示された点だけが評価される。

ニューストンネットの曳網で何よりも大切なことは、曳網中いかなるうねりや波が押寄せても、網口が常に水面を捉えていることにある。これが最大で絶対不可欠の課題である。

続いて Science に Colton et al. (1974)が、大西洋の北米東岸域におけるプラスチック粒子の分布調査結果を発表した。3 隻の調査船を使用して調査された。使用した採集器具はニューストンネットで網口は長方形で 2×1m、網の目合いは 0.947mm、曳網時間は 5 ノット、曳網時間は 10 分である。目的はプランクトン生活期の魚類稚仔の採集であった。採取器具の仕様、網の目合、曳網時間、曳網速度等は納得できるものであった。しかし、これまでの曳網方法であれば、外洋域のうねりのある海面であれば、網口の波やうねりの斜面での海水の非流入、そしてピッチング時の曳網ロープの緩みによる網口の海没が生じているものと推察される。従って、分布密度は過小評価の値となり正確なものとは言えなくなる。ただしこの報告には極めて興味深い結果が明らかにされた。

北緯 20 度以南のカリブ海での調査ではレジンペレットの出現数は少なく、くすんだ色のシリンダー型レジンペレットの 1km<sup>2</sup> 当りの平均分布密度は 60.6 個(n=64)であった。このレジンペレットが出現したのは 4 地点で、その平均分布密度(N/1km<sup>2</sup>)は 1292 個であった。なおプラスチック製品破片類の平均重量密度(g/km<sup>2</sup>)は 9.0g であった。

北緯 20~30 度のフロリダ半島東岸からキューバ、ドミニカ、プエルトリコ北部海域では、くすんだ色のシリンダー型レジンペレットの 1km<sup>2</sup> 当りの平均分布密度は 148.4 個(n=40)で、プラスチック製品破片

類の平均重量密度(g/km<sup>2</sup>)は15.2gであった。

北緯30～42度の、北米沿岸海域では、143採集地点におけるレジンペレットの分布密度(n/km<sup>2</sup>)は増加していた。くすんだ色の球形型レジンペレットは1996.4個、透明な球形型レジンペレットは5465.7個、くすんだ色のシリンダー型レジンペレットは855.4個であった。これらのレジンペレットが出現した採集地点だけについての1回の曳網で採集されたレジンペレットの平均個数を見てみると以下のようであった。

レジンペレット の形状	曳網回数	1 曳網当りの 個数	分布数密度 n/km <sup>2</sup>
くすんだ色の球形型	31	188	60724
透明な球形型	43	517	166991
くすんだ色の透明型	40	107	34561

ここで注目して欲しいことは、1回のニューストーンネットの曳網で107～517個もレジンペレットが入網するなどということは極めて異常であり、余程の大量のレジンペレットの海洋への流出がなければ生じない現象である。

このことは北米東岸のハッテラス岬よりコッド岬の北緯35～42度の間にプラスチック産業のコンビナートや積み出し港が分布していることを示唆している。この頃はプラスチックの原材料であるレジンペレットの海洋汚染に対する防止対策や将来に亙る汚染の深刻が認識されていなかった。

Colton et al. (1974)の報告は北米の北東岸域より、レジンペレットの海洋への流出が極めて明瞭に示されている結果となり。プラスチックによる海洋汚染はレジンペレットにより開始されていた事を裏づけている。

小城ら(1999)は、海洋表層における微小なプラスチックゴミを正確に曳網中に海面を網口に捕らえ分布密度を正確に算出する目的でネットを開発したが、結果は上手く行かなかった。しかし問題点が明確となった。採集に従事する船舶の大きさや海洋観測のための装備は船舶毎に異なるため、曳網中に船舶のローリング(横揺れ)、ピッチング(縦揺れ)、ヨーイング(船首の円運動)等がニューストーンネットに影響を与えない曳網方法の開発であった。

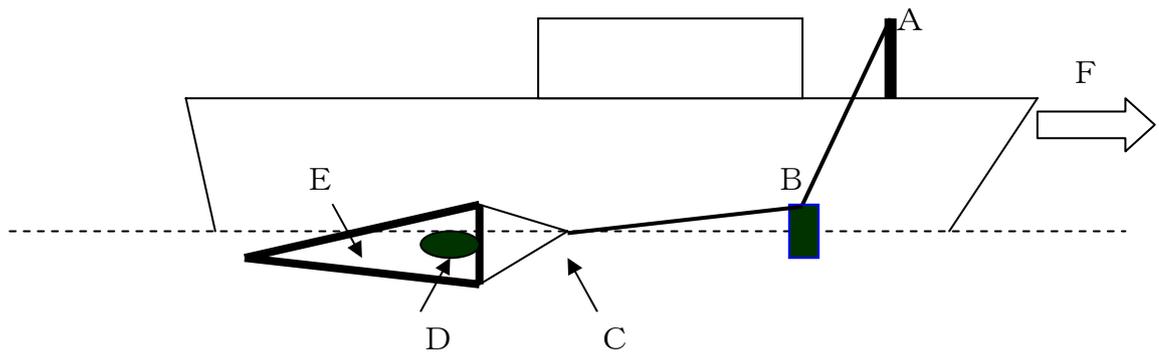


図2 ニューストンネットの最適な曳網方法

A：曳網索の繰り出し点、B：50kgの鉄製錘、C：ネットと曳網索の結び目、D：フロート(浮子)、E：ニューストンネット、F：船の進行方向。

(環境省HP、[http://www.env.go.jp/press/file\\_view.php?serial=9369&hou\\_id=8188](http://www.env.go.jp/press/file_view.php?serial=9369&hou_id=8188)、平成16年度海洋環境モニタリング調査結果について、図7(2)を改変)。

曳網方法は図2に示した。この曳網方法の利点はどんな大きさの船でも応用できる事である。大型船ではA点が海面から5m以上の事がある、その場合はAB長は長くなる。AB長は船の大きさとA点の高さにより変化する。肝心なことはネットの網口が常に水面を捉えている長さに調整することである。BC長は3~5mが良い。この場合にB点の錘を鉄製など小さくて重いものを使用することである。錘による海面の攪乱を防止するためである。D点のフロートは網口の左右に結びつける。結びつける位置は曳網中に海面が網口の midpoint になるように調整する。曳網中のかかなり激しいピッチングやローリングでもB点の錘は常に下方へと力が加わるので、BC間は常に張力が加わり網口が海面下や海面上に上下することが無い。風力3~4の荒天時でも、極めて上首尾に曳網できる。ただし、植物プランクトンが豊富な海域は、曳網中にネットが目詰まりし、ニューストンネット全体が沈下するので、その際はAB長を若干短くしB点の錘が海面上すれすれまで短縮すれば良い。曳網中は常時ニューストンネットの状態を監視する必要があるのは言うまでもない。

ヨーイングの影響はB点の錘が下方への重力の方が大きいと和らげられ、網口が微動するだけとなり、ほとんど影響はなくなる。

ニューストンネットを製作する点で留意すべきことは、目合いが0.3mm(GG54)の場合の海水の濾過効率は2~3ノットが最適である。これ以上の曳網速度では濾過効率が低下する。曳網速度を早めようとするならば、目合いは0.3mm以上に必要がある。ニューストンネットの網口よりコードエンドまでの長さ、すなわちネットの全長は、OBI ネットで網口が50×20cmでは3.5m、JM ネットで網口が50×50cmで3mというように通常の生物採集用のネットより若干長めにするが良い(小城ら1999)。それは吸引効果があるらしいからである。

曳網速度であるが、船舶が大型になると2ノットの低速航行が難しくなったり、また小型船でも不慣れなためできない場合がある。それらへの対応として3~4ノットで曳網できるニューストンネットの仕

様、特に目合い、を考えるべきなのであろう。

今後の海洋表層のプラスチック粒子採集では図 1 に示した方法を強く推薦する。さらに緊急に求められるのはネットの仕様である。ネット口の形状、網地の目合い等の微小ゴミの採集用ニューストーンネットの国際的な合意を図るべきである。

砂浜海岸に漂着した微小プラスチック粒子の採集には方形枠が適切である。この方法は小城(1995)が考案した。厚さ 5mm の金属板で内径が  $40 \times 40 \times 7$ cm の方形枠を作り、 $40 \times 40 \times 5$ cm の体積、すなわち 8 リットルの砂を正確に採集できるように工夫した。それらのプラスチック粒子混じりの砂を 20 リットルのバケツに移して、そこに海水を流し込み攪拌しプラスチック粒子を浮かび上がらせる。それを海水と共に漉し網に流し込み標本とする。浮上するプラスチック粒子が無くなるまで何回も海水をバケツに流しこんでは上澄み海水を漉し網に移す。1日に2人がかりで40～50地点を採集可能である。小笠原諸島父島の砂浜海岸の例では、一採集地点で9525個のプラスチック粒子が見出された。この標本のソーティングだけで2人がかりで1週間を要した。あまり大きな方形枠を設計すると、後でとんでもない時間をソーティングに割かなければならないことに注意すべきである。

この砂浜海岸における微小プラスチック粒子の採集方法は、1996年以來、財団法人 環日本海環境協力センターによる我が国の日本海沿岸、韓国、ロシア等の調査で採用され、現在も踏襲されている。

#### 4. 標本処理方法

微小ゴミのソーティング方法については小城・福本(2000)がまとめた。この報告書を参照にすると良い。

ニューストーンネットの採集物、そして砂浜海岸において方形枠の採集物を実験室でソーティングする作業は、集中力、持続力、根気の良さを求められる結構ハードな仕事である。肝要なのは、夜間曳網標本のようなプランクトン生物が多く採集されていると作業は一気に進まなくなる。可能な限り漂流微小プラスチックゴミの調査では昼間に曳網することを心掛けるべきである。

大型の採集器具で採集した場合に、大量の微小ゴミが流入するとソーティングの時間は長時間となる。ネットの網口の面積は  $1000 \sim 4000 \text{cm}^2$  の範囲内にすることが望ましい。また網口の形状は4角形とすると良い。

ニューストーンネットを実際に曳網するのは船速2ノットで10分間であるとする。OBI ネットで曳網した場合、ゴミの  $1 \text{km}^2$  当りの密度を算出するためには、採集数を 3241.491 倍することになる(小城ら 1999)。このためには曳網時には網口が、船舶のピッチングやローリングの影響を受けて、海没したり、波の斜面を滑り降りるため海水が網口から入らない状態を防止すべきなのである。

曳網時に海面が常に網口の中央に維持しているようにするのは、ゴミ1粒子が  $1 \text{km}^2$  当りに換算する場合には 3241 個分の価値を持っていることに留意すべきである。標本カバー率が極めて小さいことに注目すべきである。この為に曳網方法にこだわるのである。

これまでに洋上での微小プラスチック粒子の分布についての報告では、全て曳網方法に問題があり信

頼性に欠けると断言できる。本報告で紹介した曳網方法が国際基準となることを強く主張したい。この方法の世界各国への普及に努めるべきである。

## 5. レジンペレット(樹脂ペレット)の漏出防止策

米国内でのレジンペレットの漏出防止対策は、1986年に調査が開始された。その結果逸散したレジンペレットの大部分は工場からの漏出である事が判明し、プラスチック工業協会(SPI)は、1990年に違反した場合には罰金や実刑をも伴った「ペレット逸散防止マニュアル」を作成した(佐尾ら 1995)。

これを受けて我が国では1993年に「樹脂ペレット漏出防止マニュアル」をプラスチック業界が通商産業省の監修の下に作成した。しかしこのマニュアルには、違反に対しての罰則を伴わないものであった。

我が国の大企業や中小企業等、組織の大きな企業ではかなり厳正にレジンペレットの漏出防止対策が施されている。しかし、成形工場の多くは家族経営の零細企業であり、成形以前に工場内でレジンペレットを乾燥を維持しつつ保管する倉庫の無い場合が多い。湿気を含まないようにする保管設備を建設するより、湿気を含んだレジンペレットを投棄して新たに購入した方が効率的であるため、安易にゴミとして投棄してしまう。このような零細企業はプラスチック工業連盟にも加盟していないので、指導が徹底できない事情があるようである。この事に関しては東京海洋大学の兼広春之教授が中心となって調査しているのでその調査結果を参照すべきである。兼広教授の研究で興味ある成果の一つは東京湾の海底におけるプラスチックゴミの定量化である(兼広 1999)。

1992年に小笠原諸島の父島の砂浜海岸で漂着微小ゴミを調査した当時、現地の漁業者より台湾の密漁船が、カツオ釣りの際にレジンペレットをコマセとして撒いている可能性のあることを指摘していた。

その他のレジンペレットの使用例としては、我が国でのパチンコ店においては、パチンコ玉を磨くためにレジンペレットが使用されている。使用後の適正な処理が望まれる。

## 6. 汚染指標としての漂着物

海岸漂着物には生産国、流出国、流出地域、海流系等が判明する製品がある。微小プラスチック粒子調査時に以下の製品類が見出された場合には、チェックしておくことと漂着ゴミの判断時に参考となるので野帖に記録したり、写真撮影しておくことと良い。以下にそれらの製品類を紹介する。

### 6-1. レジンペレット(樹脂ペレット)

レジンペレットが化学的親和性の観点から、同じ石油起源の化学物質を吸着するというを何人かの海外の研究者が示唆していたが、始めてその証拠を明確に証明したのは、東京農工大学の高田秀重教授の研究室である(Mato et al. 2001)。ポリエチレンのバージンペレットの6日間の吸着実験では、PCBsとDDEの海水中のペレットにおける濃度と周囲の海水中の濃度の比較から、ペレットへの高い濃縮(吸収係数： $10^5 \sim 10^6$ )が見出された。この事実はPCBsのように水中、土中、大気中に分布し地球規模で循環する汚染物質の経路や移動機構をプラスチック汚染物質の環境中での増加という面を考慮しなければならぬ事態となっている。

今後のレジンペレットについての問題点は海中に漂っていたり、海底まで沈下する高密度のレジンペレットの分布数やそれらの挙動を知ることが重要である。

また近年 Takada(2006)は、「International Pellet Watch Global Monitoring of POPs」という運動を提唱している。

今だ海洋への流出が継続していることから、全国的な調査が必要である。我が国では南部に多く北部で少ない。

## 6 - 2. マアナゴ捕獲用の筒

我が国の特に日本海側での海岸漂着物として特に目立つのは韓国製のアナゴ筒である。北海道のほぼ全ての海岸で発見されるばかりでなく北方四島の国後島北岸の材木岩でも2008年夏季の調査時に見出された(小城 未発表記録)。恐らく対馬暖流を起源とする宗谷暖流の最終到達海域だからだろう。

東海・野津(2001)によると、筒で漁獲されたマアナゴは殆どが活魚として流通可能であり、販売価格が高い。1970年以降幾つかの形状が試された後、現在のスチロール樹脂製の筒(長さ55cm、直径11.8cm)が韓国全体に普及した。現在使われている筒は片側だけに入口と返しがあり、その反対側は枝縄を結びつけられるようにすぼめられており、筒の表面全体に水抜き孔がある。このスチロール製樹脂の筒は浮力を持って浮くために、沈子として筒の入り口内側に直径約6mmの鉄製の輪が入れている。これによって、海中では、入口を海底につけて、枝縄側が浮きあがるようになっている。

北海道に漂着するマアナゴ筒は殆どが長期間浮遊していたらしく、鉄製の沈子が無い。次に示すディスプレイブライターと共に、韓国海域や東シナ海の環境指標として評価できる。

我が国沿岸の砂浜海岸では、南部に多く、北部で少ない傾向がある。今後も海洋への流出が継続している可能性が高いので、常時モニタリングが肝要である。

## 6 - 3 ディスポーザブルライター

外洋域でこのディスプレイライターがニューストーンネットに入網することはほとんどないが、沿岸域や沿海域での調査では漂流物として注意すべき品目である。

鹿児島大学の藤枝 繁博士が精力的に研究されているのでその結果については事前に読破しておく必要がある(藤枝1999a、1999b、2002、2003、藤枝ら2002、藤枝2003、倉重・藤枝)。また、京都府の琴引浜でディスプレイライターの漂着に注目して学校教育に応用した東山高等学校地学部(1996)の成果も注目すべきである。

特に日本海では、九州より北海道にいたるにつれ海岸漂着数は減少する。北海道以南では対馬暖流系の指標になる。

流出源の追求は無理であるものの、製造国が判明できるケースが多い。

## 6 - 4 タコツボ

韓国性のタコツボはハングル文字が記されているのと、形状が日本のそれとは異なるので隣国よりの

漂流物として評価できる。

### 6-5 発砲スチレンの破片

沿岸および沿海海域や海岸漂着物として極めて厄介なプラスチックゴミである。大きさが様々であり、また個数も多い。単位面積当りの個数である密度を計測する場合には、多大な労力を要する。98%が空気であるためか、海中に長時間浮遊している間には、やがて海水が染み込み沈下する。従って、外洋域では少なくなる。沿岸海域や沿海海域の指標ゴミである。

魚や野菜の収納容器、そして製品輸送の際のクッションとしてばかりでなく、スーパーマーケットやコンビニエンスストアでは、食品トレーとして多用されているので、今後も厄介な沿岸ゴミであり続けるであろう。

### 6-6 白樺ウキ

この白樺ウキは、我が国の日本海の南部沿岸に多く漂着する。流出源はロシアの日本海沿岸あるいは日本海に注ぐロシアの河川域と推定されているものの不明である。ロシアの国後島の自然保護員の言では、淡水域の漁業者が使用しているとのことである。

白樺の表皮を剥がし、筒状に巻いて作成されている。白樺は油分を含むため耐水性に優れているため、刺し網の浮き(浮子)として使用している。

恐らく沿海州沿岸に居住する原住民が使用していた刺し網が日本海に流出した後、朝鮮半島の西岸沿いに南下し、その後対馬暖流に取り込まれ我が国の沿岸域に漂着したものであろう。

漂流ゴミではあるものの、自然素材であり、民族学的にも興味をそそるものである。

### 6-7 船体塗料の破片

海洋での漂流ゴミ調査時にニューストーンネットを曳網すると、採集物中に必ずといって良いほど、船体塗料の破片が入網する。ニューストーンネットの曳網時に船首波の影響を受けないように注意深くしても、必ずといって良いほど入網する。

船舶は、船体に塗られた塗料を削られながら航走していることを認識すべきである。これらの破片は、海水中では比重が重く沈下してしまう。

今後船舶が頻繁に航行する海域での海底への船体塗料破片の堆積も注目すべき時が来るであろう。船舶の航走時にも剥がれない塗料の開発も必要であろう。

## 7. プラスチック汚染とその影響の特性

地球上で1935年以来生産されたプラスチックの総生産量は恐らく50~60億トンに達すると考えられる。ひとたび製品となり耐用年数に達すると廃棄されるため、その殆どが廃棄物として処理されてしまう。単一物質でこれほどに多量な廃棄物は他に例を見出せない。

廃棄物となったプラスチックは重量の割に体積が大きく環境中で目立つ。巨大分子であることと難分

解性のためにいつまでも環境中に存在し続ける。また石油化学製品であるため親和性から他の石油関連の化学物質を高濃度に吸着するなど厄介な性質がある。

特に注目すべきは、プラスチック製品はその用途に応じて多様な人工合成化学物質である添加剤が加えられる。それらの多くが環境ホルモン様化学物質であり、生物個体ばかりでなく、食物連鎖を通じて高次捕食者へ高濃度に蓄積される。このことはプラスチック廃棄物の蔓延は海洋生態系の質を脆弱にするために、やがては生態系の崩壊への道が備えられることを暗示している。

プラスチック製品のような人工合成化学物質は自然環境中では正に異物であることを銘記すべきである。我々の日常生活では最早プラスチック製品無しでは潤滑に機能しない時代となっている。その利便性とは裏腹に、廃棄物となった場合には極めて厄介な物質となる。

微小プラスチック粒子の増加傾向は、今後世界の海洋で急速に進行するであろう。この単一要因での世界の海洋生態系の変容を推測することは困難である。ただし、今後の海洋生態系における重要な汚染因子の一つとして現時点で影響の将来予測を行うことは極めて重要と考えられる。

現在の環境問題の原因となる要因は極めて複雑な人間活動の結果である。世界の人口増加傾向、世界の人口の70%は海岸線に面した大都市に集中する現状、未開発国の工業化、世界経済のグローバル化による物流の活発化、世界の富の偏在化による貧困国の増加、自然破壊による乾燥化、漁業による生物資源の乱獲、レジームシフトによる海洋環境や生物資源の大規模変動、武力を伴った民族紛争に伴う著しい自然破壊と人口の移動、大量の生活廃水、工業地帯よりの有害汚染物質の排出等が複雑に組み合わさった複合的な影響となる。

海洋は全ての固体状、液体状、気体状の汚染物質の最終到達場所である。

近年、「生態系」という学術用語を一般の人達も日常会話で頻繁に使用する時代となった。しかし、「海洋生態系」というとあまりに大きく、例え汚染物質が流入しても、複雑な自己制御システムを内蔵していて、生物種間のバランスをとるために、人間の目から見た生物の生理状態、分布、生息域の変容の実態は分からない。ところが、海洋島のような離島生態系となると、人間活動に由来する攪乱で簡単に生態系が破壊されることは、ガラパゴス諸島やハワイ諸島での固有生物種の絶滅が我々に警告を与えてきた。自然の生態系というものは実は極めて脆いものである。

東京などの大都市では、この50年間に都心部では、それまでに身近に生息していた甲虫類のタマムシがまず姿を消した。続いてホタル、キリギリス、ヒグラシ等が皆無となった。これらの昆虫類は、ほとんど誰にも気づかれず姿を消した。東京湾の砂浜海岸ではそれまで豊富に生息していたハマグリが消滅した。現在では全く漁獲されない。

海洋汚染にはその人間への影響から見て二面性がある。一つは、特定海域での重金属汚染、生活廃水や工業廃水、重油の大量流出、化学物質の大量廃棄といった人間生活や人間の健康に直接影響を与える急性毒性が問題となる事態である。この場合には行政が活発に動き防止対策が施行される。二つは、人工合成化学物質、すなわち「環境ホルモン」のような、高濃度であれば直接人間の健康に即効的に被害を与えるものの、低濃度の場合には、食物連鎖や地球規模の物質循環という間接経路を経て人間に影響を与える汚染物質である。さらに厄介なのは、低濃度の場合には被曝した人間よりもむしろ、その次世代

の子供に影響が発現するという、慢性毒性的な影響があることである。

海洋における微小プラスチック汚染は、近未来的にもその顕著な海洋生態系に対しての影響は予測できない。しかし、かなり先の未来に達するまでに他の汚染物質と複合してじわじわと影響を与え続け、最終的に汚染が進んだ段階で、最早取り返しのつかない事態となり、そこで初めて気付く事態となるのではないだろうか。このような汚染の進行状況はじわじわと進行するのでここでは「ジワジワ・シンドローム」と呼ぶことにする。

ジワジワ・シンドロームを図3に示した。海洋生態系に対しての微小プラスチックの増加は継続的に続くが、他の複合的な汚染に伴うことに注目すべきである。図中の縦の矢印は、ある年代での卓越する海洋へと流出した汚染物質である。それらは局所的な汚染も含まれている。例を挙げると、有機塩素系の殺虫剤、原油の大量流出、船体塗料として使用される有機スズ、工場廃水、都市廃水、軍事演習、沈船よりの油漏出、温暖化、富栄養化、漁業による乱獲等である。これらは例を挙げればきりが無いであろう。海洋の生物多様性は、汚染が顕著な年代には一時低下するが、やがて回復するものの、次の汚染時には再び顕著に低下する。このように長年月の間に、海洋の生物多様性はジワジワと低下して行くのであろう。

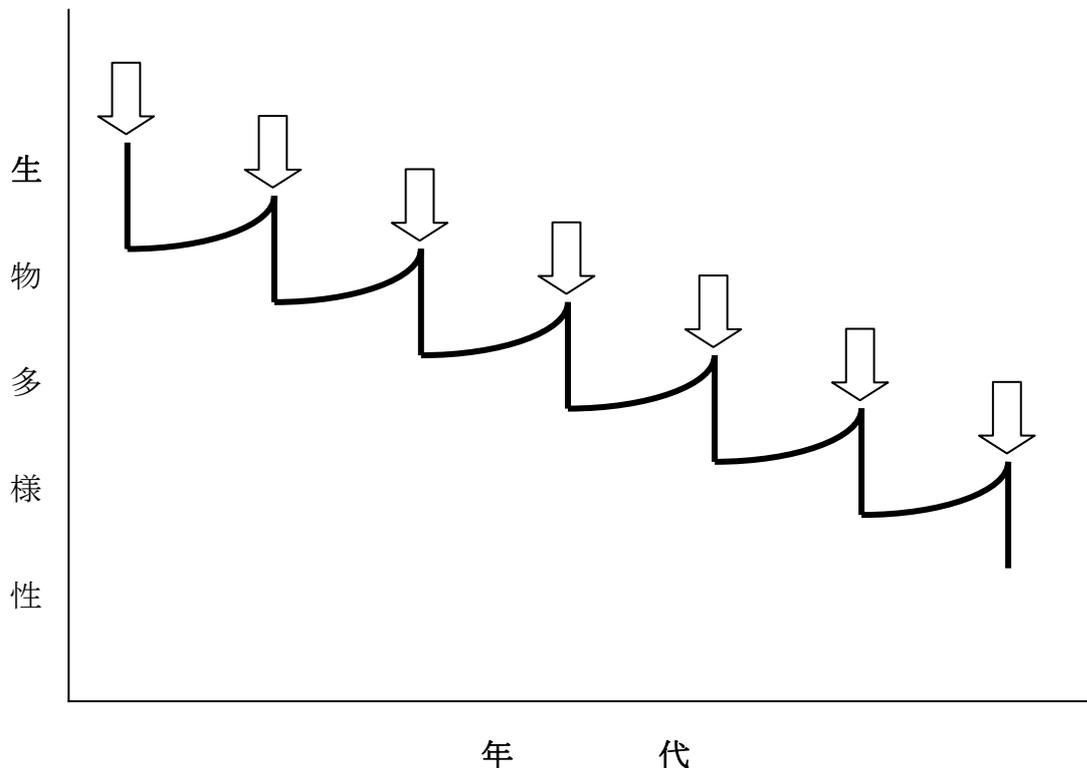


図3 海洋の生物多様性の将来予測モデル。縦の矢印は地球規模で生じる汚染物質の著しい海洋への負荷。

生物現象を見てみても、日本周辺で1970年頃黒潮や対馬暖流の影響を受ける海域でウマズラハギが大量に押寄せた(水島・鳥澤 2003)。北海道にも1981年頃から大群が押寄せ始めた。1990年頃から資源量は減少した。この原因は判明していない。近年では、対馬暖流域でエチゼンクラゲが増加し問題となっている。なおクラゲ類の大発生については、

Brodeur et al. (1999a, 2002b), Mills(1995) Parsons and Lalli (2002) Purcell et al. (Eds) (2001), Sommer et al. (2002)等が考察している。彼らの結論から類推できるのはクラゲ類の大発生は、乱獲、温暖化、富栄養化、気候変動、他海域からの生物種の侵入と異常増殖(船舶のバラスト水等による)等が原因であると推定していた。すなわち直接的にせよ、間接的にせよ、人間活動による攪乱が作用していることになる。

恐らく様々な要因が複合的に作用してウマズラハギやエチゼンクラゲの幼生期における海洋環境が従来とは異なったため、生残率が高まったためであろう。特にウマズラハギの幼稚仔は微小なプラスチック粒子が濃密に分布する場所をうまく隠れ家として利用する習性がある。こんなことも大量発生の一つの要因であるのかもしれない。微小なプラスチック粒子が局所的に分布する場所を大型の回遊魚などは嫌う性質があることが知られている。

結論として言えることは、プラスチック製品は石油化学の申し子であることから、他の石油関連から合成された人工合成化学物質と合わせて、それらの海洋生態系への影響を検証して行くことが大切であろう。ただしそれらの海洋生態系への汚染の影響は、時間差を持って、慢性毒性的にじわじわと進行することが特性なのであろう。

## 8. 海洋表層の基礎生産層の薄層化

現在の海洋における特にプラスチック粒子の分布数の増加は、毎年のプラスチック生産量の60~70%がゴミとなり廃棄されている現状から今後も増加の一途を辿ることは間違いない。プラスチックの原材料であるレジンペレットから開始された海洋のプラスチック汚染は、海鳥類に取り込まれたプラスチック粒子を調査した結果からも推察できる。従来はレジンペレットを特異的に取り込んでいたハシボソミズナギドリ、そしてプラスチック製品破片を特異的に取り込んでいたハイロミズナギドリ等が、1990年以降では、プラスチック製品類の汚染が相対的にも実質的にも増加した結果、両種のプラスチック粒子取り込みはプラスチック製品破片が60~70%を占めるという類似した結果となってきた。事実、プラスチック微小粒子の日本周辺海域の分布は、1km<sup>2</sup>当りの個数密度を見てみると、1970年代は数千個のオーダー、1980年は数万個のオーダー、1990年代は数十万個のオーダーと、10年を経るごとに桁が上昇している。

北海道周辺の海域では1990年代にある採集地点での記録から、1km<sup>2</sup>当り約1000万個のプラスチック粒子分布が算出された。この分布密度は海表面1m<sup>2</sup>当りにすれば10個の微小粒子が浮遊しているに過ぎない。しかし今後の海洋表層に浮遊するプラスチック粒子は指数函数的に増加するであろうことは十分想定できる。もしそうなれば、今後何十年後かあるいは何百年後かは分からないものの、将来においては海洋の表層はプラスチック粒子で覆われることになる。当然太陽光の透過深度は浮遊するプラスチッ

ク粒子に遮られて浅いものとなる。その結果は海洋の基礎生産量の減少ということになる。世界の海洋の一次生産は年間 48 ギガトンと推定されていて、これは陸上植物生産量の約 80%である(野崎 2002)。

図 4 に示す如く生態系の栄養段階の全般的な縮小により、生態系を支えている生物相に変化があるばかりでなく高次栄養段階の生物相は絶滅の方向を辿ることになる。

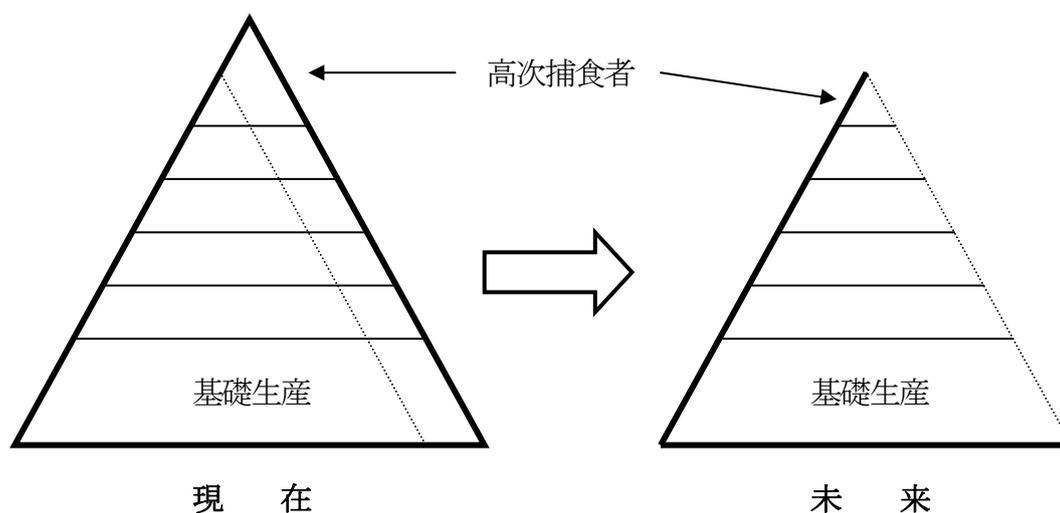


図 4 基礎生産の減少による生態系構成相の変化。

プラスチック製品類の多様さは驚くべき範囲で使用されていて我々が眼で見、手で触れることができるプラスチック製品類から、手の洗浄液や空気清浄器に含まれている 5mm 以下の微小プラスチック粒子の使用後の投棄に由来する海洋環境への流入(Gregory 1996)、液体状のプラスチック等我々の想像を超えた分野にまでプラスチックが使用されていることに留意すべきである。

この現象で最も杞憂すべき事態は、光合成生物の多様性の変化と優占植物プランクトン生物種の変容であろう。世界の海洋の海域を問わず、すなわち極海より赤道に至るまで生物生産性(Productivity)は海域的な変化は無いといわれている。ただ回転率が熱帯域では早く極海域では鈍い。このバランスが変容すると、基礎生産生物を捕食する次の生物相への影響が懸念される。恐らく動物プランクトン生物種の小型化やゼラチン状生物の増加など、優占生物種の変容へと続くことは容易に想像できる。

## 9. 海面下に浮遊するプラスチック粒子と有機塩素化合物(OCs)

レジンペレットの表面に他の石油関連の化学物質が高濃度に吸着されるということは、PCBs のような汚染化学物質の地球規模の物質循環にも浮遊する多くのプラスチック粒子が影響を与える可能性が明らかとなった。

POP s は難分解性でありひとたび環境中に放出されると長期間残存し、地球規模で輸送され(Wania and Mackay 1996)、食物連鎖を通じて高次捕食者へと高濃度に蓄積される。これら POP s は海洋に達す

るとやがては深層にまで輸送されている実態が判明しつつある(Kannan et al. 1998)。PCBs やノニルフェノールが日本海の中深層に達していることが見出された。また表層水より中深層水で濃度が高かった。ダイオキシン類(TCDD, TCDF, Co-PCB)は海の表面に達すると、溶存態と粒子吸着態となって深海へと移行して行く。この場合には溶存態の方が濃度は低いものの移動速度が早かった。

また、底魚類であるスケトウダラの肝臓中にも PCBs、DDTs、CHLs、HCHs、HCB 等の有機塩素化合物(OCs)が検出されている(Brito et al. 2002)。日本海、ベーリング海、アラスカ湾間のスケトウダラの肝臓中の有機塩素化合物濃度の比較では、日本海のスケトウダラで高い濃度が検出された。これは、シベリア地方で蚊の防除のために殺虫剤が多量に使用されていたことが時間差を持って反映されていると考えられた。

これら OCs の海洋における汚染は、水柱の表層から、中層、そして深層まで今後進行することが予想される。そこにプラスチック粒子が浮遊していれば、OCs の挙動に何らかの影響を与えることも予測される。海洋の中深層には、非上昇種と呼ばれる深海性の魚類や動物プランクトンの生息が知られている。特にハダカイワシ類や植食性の大型動物プランクトン類は体内に脂肪を蓄える習性があるため、それに蓄積される OCs の影響が懸念される。動物プランクトンの大型カイアシ類等は摂餌期に大量の油球を体内に蓄え数カ月間の非摂餌期を過ごす。その際体内の脂肪を消費するが、OCs は難分解性のために相対負荷量は変化しないまま、体重は減少するため体内の OCs 濃度は上昇することになる。その結果 OCs の毒性が発現し、神経系や生殖器官の機能傷害を引き起こすことになる。

海洋の深層における OCs は、周囲の環境が低温のため、まず分解しないまま食物連鎖を通じて循環し続けることになる。

ノニルフェノールは、プラスチック製品、洗剤、化粧品等が生産される間は添加剤として使用されつづけるであろう。メダカのみス化が明らかとなり内分泌攪乱化学物質とされた。中深層の生物集団への影響が懸念される。

北米西岸の河川に生息するサケ属魚類では、遺伝子のアミノ酸配列から見て明らかにオスであるのに表現型はメスであり、メスとして機能していることが知られている。この影響は環境ホルモンであると結論されている。

OCs による海洋汚染は、添加剤としてプラスチック製品類に含まれているものの、それら製品が廃棄された後も、地球環境中を三次元的に拡散して、かなり後までも影響を与え続ける厄介さのあることに注目すべきである。

## 海洋生態系変容の最悪のシナリオ (世界の海洋の黒海化)

黒海は南東ヨーロッパに位置し、ルーマニア、ブルガリア、ウクライナ、ロシア、グルジア、およびトルコの6カ国に囲まれた、水域面積42.3万km<sup>2</sup>の閉鎖性海域である。最大水深は2212mで、水深150m以深は硫化水素の充満する嫌気性環境である、外海との接点はボスポラス海峡だけで、その水深は39～100m、幅は0.7～3.5kmである。

現在確認されている生物群は、無脊椎動物 1983 種、魚類 168 種、海産哺乳類 4 種(イルカ類 3 種、モンクアザラシ 1 種)である。生物の住めない水深 150m 以深には、原生動物、細菌、無脊椎動物等が数種生息するものの詳細は不明である。

1960 年以後の黒海は自然環境の変容はすさまじく、その原因は有機物質の河川よりの流入による富栄養化、油汚染、外来種の移入、水産資源の乱獲等にあると言われている。

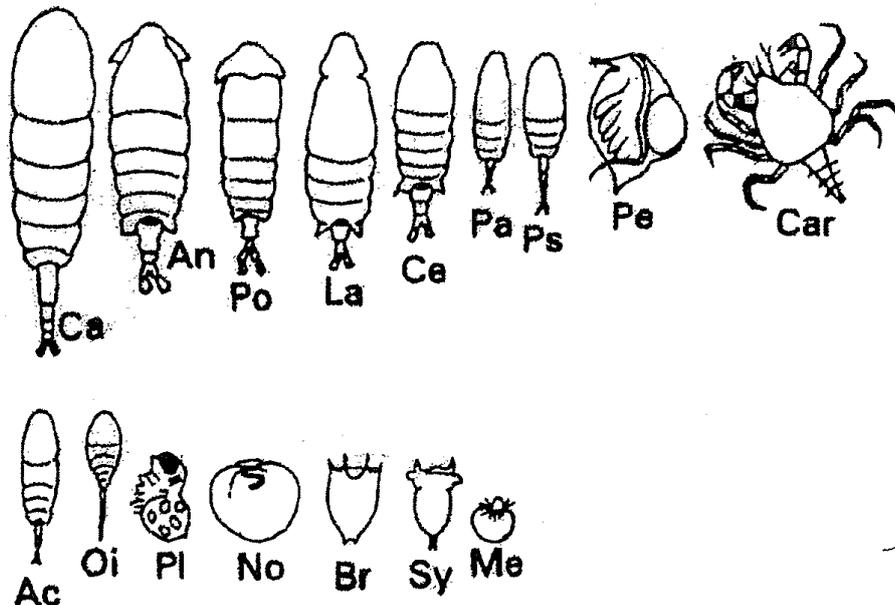
ここでは Zaitsev(1992)の報告より、1960 年代より 1990 年代に至る間の、①動物プランクトン群集の種組成の変化、②漁業資源となる魚種の変化、そして③黒海北西の浅海域における主要動植物相の年代変化等を以下に示した。

現在黒海は環境保護対策として、黒海汚染防止協定(ブカレスト条約)、黒海生態系修復プロジェクト、黒海ドナウ川流域対策委員会、NGO 関連団体、FAO 等が活動している。

### ① 動物プランクトン群集の種組成の変化

大型の植食性動物プランクトンであるカイアシ類が消滅し、小型種になった。

**Figure 2.** Top row: the large-size planktonic organisms that dominated Black Sea coastal waters until the 1960s. Ca, *Calanus helgolandicus*; An, *Anomalocera patersoni*; Po, *Pontella mediterranea*; La, *Labidocera brunescens*; Ce, *Centropages krøyeri*; Pa, *Paracalanus parvus*; Ps, *Pseudocalanus elongatus*; Pe, *Penilia avirostris*; Car, megalopa of *Carcinus mediterraneus*. Bottom row: the small-size planktonic organisms that replaced the larger species and dominated coastal waters in the 1980s. Ac, *Acartia clausi*; Oi, *Oithona minuta*; Pl, *Pleopis polyphemoides*; No, *Noctiluca miliaris*; Br, *Brachionus*; Sy, *Snychaeta*; Me, *Mesodinium rubrum*.



## ② 漁業資源となる魚種の変化

大型種が殆ど消滅し、ニシン科魚種の sprat、キス、カタクチイワシ、マアジ等の小型浮き魚類が優占するようになった。漁獲量は、1988年81.4万トン、1991年21.3万トン、2001年52.3万トンである。1960年代に商業的に利用されていた26種の内、現在では6種のみが商業利用されている。

Table 1. Commercial fishes of the Black Sea

In 1960-1970	In 1980-1990
1. <i>Squalus acanthias</i>	1. <i>Sprattus sprattus phalericus</i>
2. <i>Raja clavata</i>	2. <i>Alosa kessleri pontica</i>
3. <i>Dasyatis pastinaca</i>	3. <i>Engraulis encrasicolus ponticus</i>
4. <i>Acipenser stellatus</i>	4. <i>Odontogadus merlangus euxinus</i>
5. <i>Huso huso</i>	5. <i>Trachurus mediterraneus ponticus</i>
6. <i>Acipenser güldenstädti colchicus</i>	
7. <i>Sprattus sprattus phalericus</i>	
8. <i>Alosa kessleri pontica</i>	
9. <i>Engraulis encrasicolus ponticus</i>	
10. <i>Belone belone euxini</i>	
11. <i>Odontogadus merlangus euxinus</i>	
12. <i>Mugil cephalus</i>	
13. <i>Mugil auratus</i>	
14. <i>Mugil saliens</i>	
15. <i>Atherina mochon pontica</i>	
16. <i>Pomatomus saltatrix</i>	
17. <i>Trachurus mediterraneus ponticus</i>	
18. <i>Mullus barbatus ponticus</i>	
19. <i>Sarda sarda</i>	
20. <i>Scomber scombrus</i>	
21. <i>Gobius batrachocephalus</i>	
22. <i>Gobius melanostomus</i>	
23. <i>Gobius cephalargus</i>	
24. <i>Gobius fluviatilis</i>	
25. <i>Psetta maotica</i>	
26. <i>Platichthys flesus luscus</i>	

## ③ 黒海北西の浅海域における主要動植物相の年代変化

主要な生態系構成員の年代的变化。原生の黒海とは全く異なる生態系の機能と構造になってしまったことに留意すべきである。

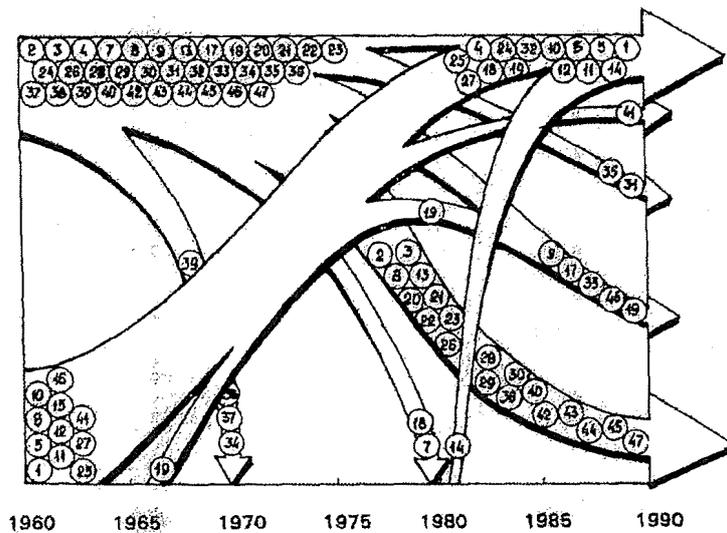


Figure 4. Changing relative abundance of some common taxa of fauna and flora in the northwestern coastal waters of the Black Sea from 1960 to 1990.

Bacteria

1. Coliforms

Diatoms

2. *Rhizosolenia calcar avis*
3. *Leptocylindrus danicus*
4. *Skeletonema costatum*
5. *Ceratium bergonii*

Dinoflagellates

6. *Exuviaella cordata*

Macroalgae

7. *Cystoseira barbata*
8. *Phyllophora*

Seagrasses

9. *Zostera*

Protozoans

10. *Mesodinium rubrum*
11. *Noctiluca miliaris*

Medusae (jellyfish)

12. *Aurelia aurita*
13. *Rhizostoma pulmo*

Ctenophores

14. *Mnemiopsis leidyi*

Rotifers

15. *Brachionus*

Mollusks

16. *Rapana thomasiana*
17. *Mytilus galloprovincialis*
18. *Ostraea edulis*
19. *Mya arenaria*

Copepods

20. *Pontella mediterranea*
21. *Anomalocera patersoni*
22. *Labidocera brunescens*
23. *Centropages krøyeri*
24. *Acartia clausi*
25. *Oithona minuta*

Cladocera

26. *Penilia avirostris*
27. *Pleopsis polyphemoides*

Decapods

28. *Crangon crangon*
29. *Diogenes pugilator* (hermit crab)
30. *Brachiura* (crabs)

Fish

31. *Engraulis encrasicolus ponticus* (anchovy)
32. *Atherina mochon pontica* (silverside)
33. *Mugilidae* (grey mullets)
34. *Pomatomus saltatrix* (bluefish)
35. *Trachurus mediterraneus ponticus* (horse mackerel)
36. *Labridae* (wrasses)
37. *Scomber scombrus* (mackerel)
38. *Sarda sarda* (bonito)
39. *Thunnus thynnus* (tuna)
40. *Gobiidae* (gobies)
41. *Gymnamodytes cicerellus* (sand lance)
42. *Callionymidae* (dragonets)
43. *Psetta (Scophthalmus) maotica* (turbot)
44. *Platichthys flesus luscus* (flounder)
45. *Solea lascaris nasuta* (sole)
46. *Gobiesocidae* (clingfishes)

Mammals

47. *Delphinidae* (dolphins)

## 文 献

- Brodeur, R. D., C. E. Mills, J. E. Overland, G. E. Walters, and J. D. Schumacher (1999a) Evidence for a substantial increase in gelatinous zooplankton in the Bering Sea, with possible links to climate change. *Fish. Oceanogr.*, 8, 296-306.
- Brodeur, R. D., H. Sugisaki and G. L. Hunt, Jr., (2002b) Increases in jellyfish biomass in the Bering Sea: implications for the ecosystem. *Mar. Ecol Prog Ser.*, 233, 89-103.
- Carpenter, E. J. and K. L. Smith, Jr. (1972) Plastics in the Sargasso Sea surface. *Science*, 175, 1240-1241.
- CMC(1988) A citizen's guide to plastics in the ocean: more than a litter problem. Center for Marine Conservation(CMC).
- Colton, J. B. Jr., F. D. Knapp, and B. R. Burns(1974) Plastic particles in surface

- waters of the northwestern Atlantic. *Science*, 185, 491-497.
- 遠藤 徹(1999) プラスチックの文化史、可塑性物質の神話学. 水声社.
- 藤枝 繁(1999a) 1998年8月鹿児島県薩摩半島沿岸に漂着した大量ゴミの実態. 水産海洋研究、63(2)、68-76.
- 藤枝 繁(1999b) 鹿児島県海岸における漂着散乱ゴミ. 鹿児島大学水産学部紀要、48、11-17.
- 藤枝 繁、池田治郎、牧野文洋(2002) 鹿児島県の海岸における発砲プラスチック破片の漂着状況. 日本水産学会誌、68、652-658.
- 藤枝 繁(2003) 鹿児島湾海面に浮遊するプラスチックゴミ. 自然愛護、29、9-12.
- 藤枝 繁(2003) ディスポーザブルライターを指標とした海岸漂着散乱ゴミの流出地推定. 漂着物学会誌、1、13-20.
- Gregory, M. R. (1996) Plastic 'scrubbers' in hand cleansers: a further (and minor) source for marine pollution identified. *Marine Pollution Bulletin*, 32, 867-871.
- Hoss, D. E. and L. R. Settle(1990) Ingestion of plastics by teleost fishes. NOAA Technical Memorandum NMFS, Vol.1, 693-709.
- 兼広春之(1999) プラスチックによる海洋汚染. *J. Mass. Spectrum. Soc. Jpn.*、47、319 - 321.
- Kannen, N., N. Yamashita, G. Petrick, and J. C. Duinker(1998) Polychlorinated biphenyls and nonylphenols in the Sea of Japan. *Environ. Sci. Technol.*、32, 1747-1753.
- 栗山雄司・小西和美・兼広春之・大竹千代子・神沼二真・間藤ゆき枝・高田秀重・小島あずさ(2002) 東京湾ならびに相模湾におけるレジンペレットによる海域汚染の実態とその起源. *Nippon Suisan Gakkaishi*、68、164 - 171.
- 国立環境研究所編(2003) 平成13年度内分泌攪乱化学物質に関する情報収集・データベース作成. 平成13年度環境省請負.
- Mato, Y., T. Isobe, H. Tanaka, H. Kanehiro, C. Ohtake, and T. Kamimura(2001) Plastic resin pellets as a transport medium for toxic chemicals in the marine environment. *Environmental Science and Technology*, 35, 318-324.
- Mills, C. E. (1995) Medusae, siphonophores, and ctenophores as planktivorous predators in changing global ecosystems. *ICES J. mar. Sci.*、52, 575-581.
- 野崎義行(2002) 地球温暖化と海：炭素の循環から探る. 東大出版会、東京.
- 水島敏博・鳥澤 雅 監修(2003) 漁業生物図鑑、新 北のさかなたち. 北海道

新聞社.

- 小城春雄・馬場徳寿・石原昭治・柴田康行(1999) 二種類のニューストー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. 北海道大学水産学部研究彙報、50、77-91.
- 小城春雄・福本由利(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. 北海道大学水産学部研究彙報、51、71-93.
- Parsons, T. R. and C. M. Lalli (2002) Jellyfish population explosions: revisiting a hypothesis of possible causes. *La mer* 40, 111-121.
- Purcell, J. E., W. M. Graham and H. Dumont (Eds) (2001) Jellyfish blooms: ecological and societal importance. Kluwer Academic Publishers, Boston.
- プラスチックス(2004) 日本プラスチック工業連盟誌、6.
- プラスチックス(2008) 日本プラスチック工業連盟、1.
- 佐尾和子・丹後玲子・根本 稔 編(1995) プラスチックの海. 海洋工学研究所出版部.
- 石油化学協会(1989) 石油化学工業 30 年のあゆみ.
- Takada, H. (2006) Call for pellets! International Pellet Watch Global Monitoring of POPs using beached plastic resin pellets. *Marine Pollution Bulletin*, 52, 1547-1548.
- 通商産業省監修(1993) 樹脂ペレット漏出防止マニュアル.
- 田辺信介(1998) 環境ホルモン: 何が問題なのか. 岩浪ブックレット、No. 456、岩浪書店
- 東海 正・野津倫子(2001) 韓国におけるマアナゴ漁業の実態. 月刊海洋科学、33(8), 585 - 589.
- 佃 光男(1988) だっちゃん始末記. pp. 515-520、文芸春秋にみる昭和史、株式会社文芸春秋.
- Sommer, U., H. Stibor, A. Katchakis, F. Sommer, and T. Hansen(2002) Pelagic food web configuration at different levels of nutrient richness and their implications for the fish production: primary production. *Hydrobiologia*, 484, 11-20.
- Wania, F. and D. Mackay(1996) Tracking the distribution of persistent organic pollutants. *Environmental Science and Technology*, 30, 390-396.
- Zaitsev, Yu. P. (1992) Recent changes in the trophic structure of the Black Sea. *Fisheries Oceanography*, 1(2), 180-189.