

巨視的浮遊性大型粒子 (NUTA): 採取装置の開発と 懸濁粒子・沈降粒子との関係*

三島康史**・門谷 茂**・岡市友利**

Large amorphous particles (NUTA): The development of the sampling system and comparison with suspended and sinking particles*

Yasufumi MISHIMA**, Shigeru MONTANI** and Tomotoshi OKAICHI**

Abstract: Suspended and sinking particles were collected at northern part of Harima-Nada, the Seto Inland Sea, during two weeks in June 1985. In addition, we attempted to collect large amorphous particles (NUTA). The relationships of these particles were investigated by comparing organic matter contents in individual particles. The daily sinking total mass fluxes were comparable to about 10 % of the suspended particles standing stock in the surface through 10 m depth water column in each day. The daily organic carbon, organic nitrogen and Chl. *a* + pheophytin fluxes were comparable to 9.0%, 5.8% and 16.4% in suspended particle standing stock in the surface through 10 m depth water column, respectively. The high percentage of Chl. *a* + pheophytin, low percentage of nitrogen and low value of Ch. *a*/pheophytin ratio suggested that the sinking particle contained many zooplankton derived from materials such as fecal pellet. The vertical profiles of organic matter contents in NUTA and suspended particles in the water column were different from each other. Comparing with amino acids composition, NUTA were more similar to the sinking particles and also to aged phytoplankton debris. It is considered that NUTA are formed through the decomposition process of phytoplankton to detritus and also related to scavenging process of marine particles.

1. 緒言

海水中に存在する粒子の中には沈降速度が非常に小さいため海水の動きとほとんど同調している懸濁粒子と呼ばれるもの他に、相対的に大きな沈降速度を持っているものもあり、これらはセディメントトラップ (sediment trap) により採取され、沈降粒子と呼ばれている。沈降粒子は動物プランクトンの糞粒などを含む大型の粒子で、海洋における物質の除去や、底棲生物への食物の供給などに重要な役割をはたしていることが指摘されている (SMAYDA, 1969; HONJO, 1978 など)。

しかしながら沿岸海域では、春季および秋季のブルミング (blooming) の後や赤潮が発生した後、長さ数

cm にもおよぶ細長い巨大粒子が頻繁に観察され、この粒子はマリンスノー (marine snow), アグリゲート (aggregate) あるいは「ぬた」・「よごれ」などと様々な名前で呼ばれている (辻田, 1952 など)。これらの粒子が漁網に絡まったり、セディメントトラップ係留系のロープなどに付着することは、多くの人々によって観察されている (辻田, 1982)。

良く知られているように、マリンスノーは北海道大学水産学部の潜水調査艇「くろしお号」での観察により命名された大型の懸濁粒子の総称である (SUZUKI and KATO, 1953)。マリンスノーの物理的特徴は、粒子としてはもろく、空隙率も高い (KAJIHARA, 1971)。そのため採水器などで採取しようとしても採水時の衝撃等で容易に壊れてしまい、その原形をとどめたままでは採取することが非常に困難であり、その研究は最近までほとんど進んでいなかった。しかしながらスキューバダイビング

*1990年7月30日受理 Received July 30, 1990

**香川大学農学部 〒761-07 香川県木田郡三木町池戸
2393

Faculty of Agriculture, Kagawa University, Ikenobe
2393, Miki-cho, Kagawa, 761-07 Japan

グ等により直接、マリンスノーやアグリゲートを採取することや潜水艇などで直接観察することなどが試みられ、次第に海洋学的な関心を集めてきた。

マリンスノーの粒子密度は沿岸海域では1L当り数個から数10個であり (TRENT *et al.*, 1978; ALLDREDGE, 1979; SHANKS and TRENT, 1980), 有機態炭素・窒素, タンパク質, 脂質等の有機物含有量が非常に多く (TRENT *et al.*, 1978; ALLDREDGE, 1979; ALLDREDGE and Cox, 1982), マリンスノー粒子の空隙中に存在する栄養塩濃度は周辺に存在する海水に比べて数10~100倍高いと報告されている (SHANKS and TRENT, 1979)。基礎生産量の数10%に相当する量の栄養塩がマリンスノー粒子の空隙に存在している海域があることや (KNAUER *et al.*, 1982), マリンスノーはバクテリア等の微生物の繁殖の場でもあることなどが報告されている (ALLDREDGE and YOUNGBLUTH, 1985; ALLDREDGE *et al.*, 1986)。しかしながら, これらの粒子の化学的性質やその存在量は海域や季節によって変動が大きく, いまだに採取の困難さも解決されていないことなどから, 海洋環境におけるマリンスノーなどの浮遊性大型粒子の分布や生成過程等についての研究は立ち遅れている。

そこで著者は, 沿岸海域におけるこれらの浮遊性大型粒子 (漁師などによりこの粒子は, 粘液質で網などに絡まることなどから「ぬた」と呼ばれており, 本報告では以後“NUTA”と称する) の存在に着目し, NUTAがロープなどに付着するという現象を利用して, これまでに考えられていなかったその採取器具 (NUTAトラップ) の開発と現場海域での採取を試みた。そしてこの粒子が別に定義されている懸濁粒子や沈降粒子と質的などの様に異なっているのか, またこの粒子が海洋生態

系でどのような役割をはたすのか, 更にこれら各々の粒子間の相互関係も明らかにすることを目的とした。

2. 試料の採取

Fig. 1に示した播磨灘北部海域の定点 (St. 64, 水深17m)において1985年7月15日~27日の約2週間にわたり, 連日海洋観測と各試料の採取を行った。

海中懸濁粒子は6L型バンドン採水器を用いて0, 2, 5, 10, B-2 m(海底上2 m) 層で採取した。海中沈降粒子はセディメントトラップ (MONTANI *et al.*, 1988) を海底上5mの深度に設置して1昼夜ごとに合計15回にわたって採取した。またNUTAは浮遊性大型粒子採取装置 (NUTA Trap) を0, 2, 5, 10, B-2 m深に一昼夜垂下し採取した。使用したNUTA Trap M-1はロープにプラスチック製のホルダーを取り付け, それに予め450°Cで3時間強熱処理した2cm×10cmのWhatman GF/Cフィルターを巻きつけたものである (Fig. 2)。採取したNUTA試料はフィルターごと凍結し, 分析試料とした。各試料の分析項目は有機態炭素・窒素, Chl. *a*, アミノ酸等である。

3. 分析方法

3-1. 海中懸濁粒子量および沈降粒子束

海水1Lを, 予め再蒸留水で洗浄し450°Cで2時間強熱処理して重量を測定したWhatman GF/Cフィルターで吸引濾過し, フィルター上に残った粒子を濾紙ごと凍結(-20°C)した。これを実験室に持ち帰り凍結乾燥後, 精秤してその重量の差分を懸濁粒子量とした。

セディメントトラップにより採取された沈降粒子はトラップを船上に回収してからしばらく静置した後, 上澄

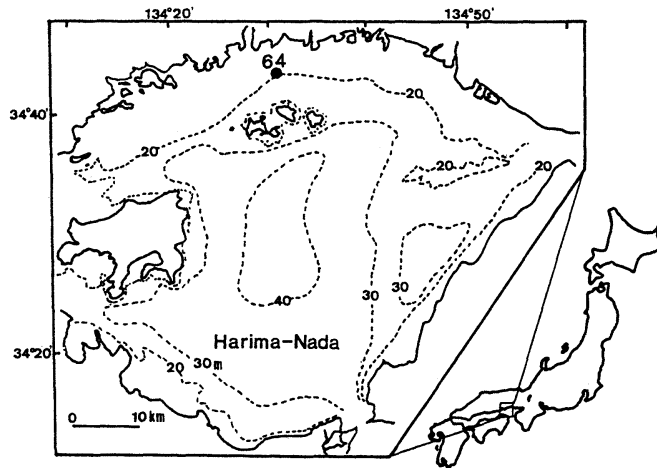


Fig. 1. Location map of sampling station in Harima-Nada, the Seto Inland Sea, Japan.

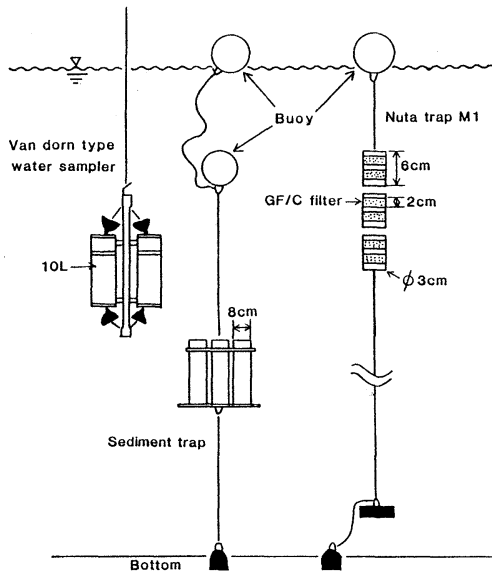


Fig. 2. Illustration of Van Dorn type water sampler, sediment trap and NUTA trap system.

みを除去し、重量既知の Whatman GF/C フィルターを用いてフィルター上に集め、懸濁粒子量と同様の方法で、沈降粒子重量を求め、垂下した時間とトラップの底面積から沈降粒子束を算出した。

3-2. 有機態炭素・窒素

懸濁粒子と沈降粒子については 3-1 のように処理したものを、NUTA の試料は GF/C フィルターごと凍結乾燥した試料を、柳本社製 MT-2 型 CHN コーダーを用いて有機態炭素・窒素を同時定量した。

3-3. クロロフィル a およびフェオフィチン

懸濁粒子では海水 1L を Whatman GF/C フィルターを用いて吸引濾過し、直ちに濾紙ごと 10ml 容のネジ口試験管に移し、90%アセトン 10ml を加え、10 時間冷暗所で抽出した。この試料を遠心分離後、吸光法 (PARSONS *et al.*, 1984) で測定した。

沈降粒子はトラップ 1 本の 1/3 量を Whatman GF/C フィルターを用いて吸引濾過し、懸濁粒子と同様の方法で測定した。

3-4. アミノ酸

懸濁粒子・沈降粒子および NUTA の試料を凍結乾燥後、試料をネジ口瓶にとり 6N HCl を 10ml 加え窒素ガスを 5 分間通気した後、110°C で 22 時間加水分解した。これを Whatman GF/C フィルターを用いて濾別し、濾液を 45°C 以下で減圧乾固し、適当量の 0.01N HCl で

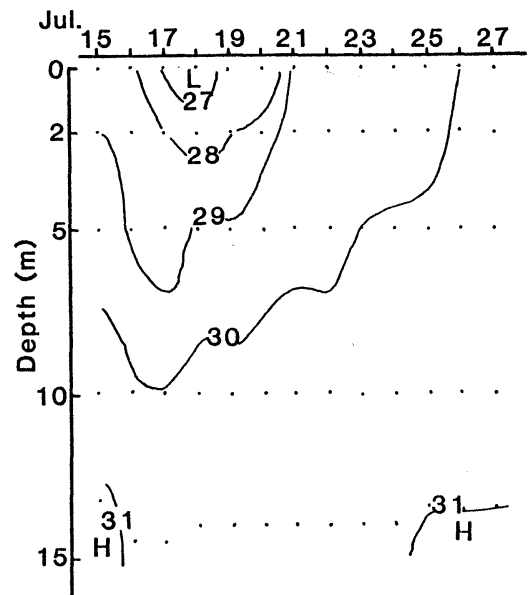
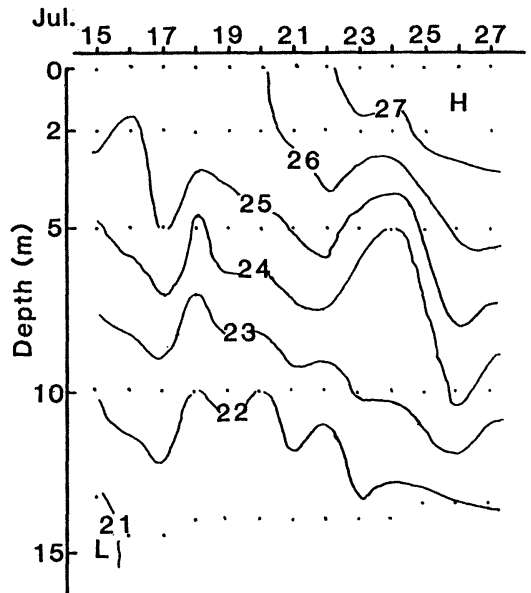


Fig. 3. Vertical distributions of water temperature (upper) and salinity (bottom).

溶解させ、日立 KLA-5 型アミノ酸分析計および日立 835 型アミノ酸分析計を用いて定性・定量を行った (門谷・岡市, 1984)。

4. 結果および考察

観測定点を設けた播磨灘北部海域では、7 月 15 日から 7 月 27 日にかけて表層で水温 25~28°C, 塩分 26.3

Table 1. Comparison of particulate matter, organic carbon, organic nitrogen and Chl. *a*+pheophytin settling fluxes and Chl. *a*/pheophytin ratio with their standing stocks.

	TPM*	Org.C	Org.N	Chl. <i>a</i> +pheophytin	Chl. <i>a</i> /pheophytin
0-10m standing stock (A) (g/m ²)	68.3±20.7	6.60±1.24	1.13±0.19	0.0689±0.0207	6.2±5.0
Settling flux (B) (g/m ² /day)	8.62±2.17	0.593±0.14	0.066±0.017	0.0113±0.0038	1.2±0.2
B/A (%)	10.5	9.0	5.8	16.4	

* : Total particulate matter.

~30.2であり、5mから10mにかけて水温躍層・密度躍層が見られ、成層構造をしていた (Fig. 3)。

この観測期間中に得られた沈降粒子束および有機態炭素・窒素、Chl. *a*+Pheophytin の沈降流束の平均値と、表層から10m深 (セディメントトラップ設置深度) までの水柱中の懸濁粒子、有機態炭素・窒素、Chl. *a*+Pheophytin の現存量の平均値との比較と、それぞれの粒子のChl. *a*/pheophytin比を Table 1 に示す。調査期間内の沈降粒子束の平均値は、8.62±2.17g/m²/dayであった。一方、懸濁粒子の現存量 (0~10m)は68.3±20.7g/m²であり、10m深における1日当りの沈降粒子束は表層から10m深までの現存量の10.5%に相当している。しかしながら、懸濁粒子の多い日に必ずしも沈降粒子束が大きいという明瞭な関係は見られなかった (Fig. 4)。

有機態炭素・窒素およびChl. *a*+Pheophytin の平均沈降流束は、それぞれ0.593±0.142g/m²/day、0.066±0.017g/m²/day、11.3±3.8mg/m²/dayであり、そ

れぞれの表層から10m深までの現存量は6.60±1.24g/m²、1.13±0.19g/m²、68.9±20.7mg/m²であった。そして各成分の平均沈降流束に対する現存量の割合は有機態炭素9.0%、有機態窒素5.8%、Chl. *a*+Pheophytin 16.5%であった。有機態窒素の沈降流束は懸濁粒子中の有機態窒素現存量の5.8%であり、全沈降粒子束や有機態炭素の沈降流束のそれぞれの現存量に対する比率と比べると小さい値であった。また、Chl. *a*+Pheophytin の沈降流束の現存量に対する比率は、これらの値に比べると大きな値となっていた。

また、Chl. *a*/Pheophytin比を比べてみると、懸濁粒子では6.2±5.0であったが、沈降粒子中のその比は1.2±0.2であった。このように懸濁粒子は沈降粒子に比べて非常に大きな値となっており、沈降粒子中には懸濁粒子に比べて新鮮な植物プランクトンをあまり含んでいないことを示している。加えて、懸濁粒子ではこの比の日変動は、変動係数にして80%にもおよんだにもかかわらず、沈降粒子の変動係数はわずかに13%であった。このように沈降粒子中のChl. *a*/Pheophytin比は懸濁粒子中のその比にほとんど影響されておらず、この点からみても懸濁粒子と沈降粒子は同質のものではなく、生成過程が異なっていることが分かる。

沈降粒子の主成分が動物プランクトンの糞粒 (fecal pellet) であるという報告が多くあるが、本研究で得られた沈降粒子についても同様だとすると、これらの現象は説明可能である。つまり、有機態窒素の沈降流束の現存量に対する割合が他と比べて小さいのは、動物プランクトンが植物プランクトンを含む懸濁粒子を摂食し、有機態窒素を選択的に体内で消化・吸収したためと考えることができる。また、Chl. *a*+Pheophytin の沈降流束の現存量に対する割合が他と比べて大きいのは、動物プランクトンが懸濁粒子中でも特に植物プランクトンを選択的に摂食したためと考えられる。加えて、沈降粒子中

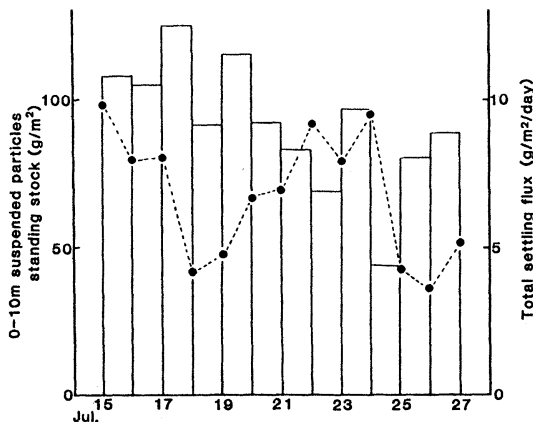


Fig. 4. Changes of total mass fluxes and suspended particles standing stock in the surface through 10 m depth water column.

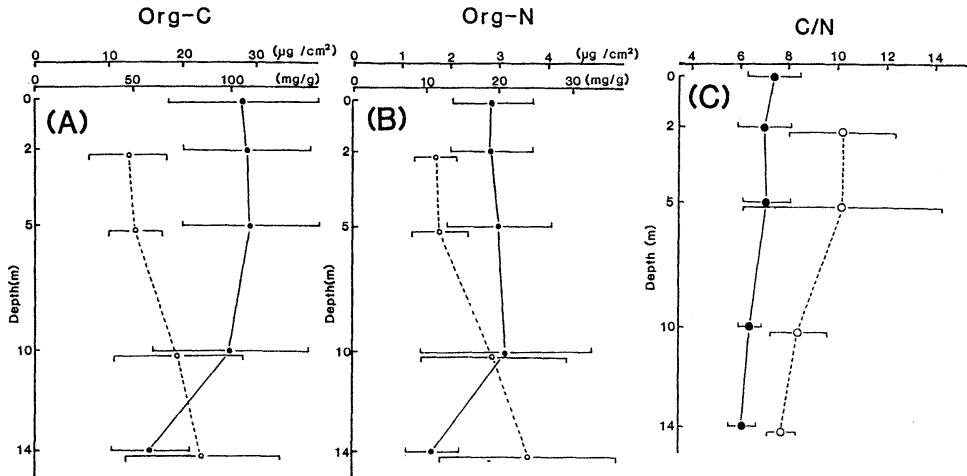


Fig. 5. Vertical distribution of organic carbon (A), organic nitrogen (B) and C/N ratio (C) in suspended particles (●) and NUTA (○).

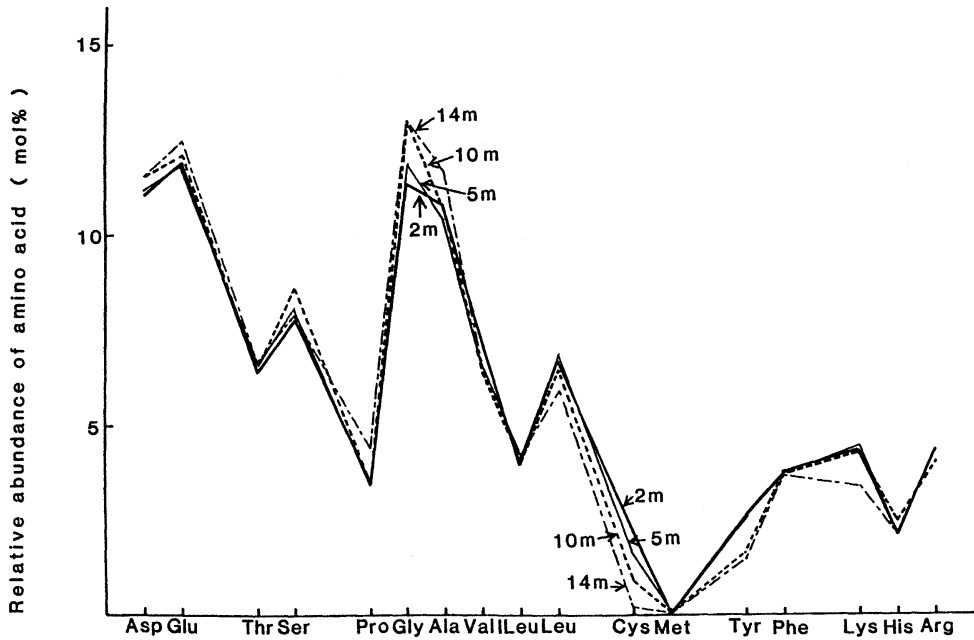


Fig. 6. Comparison of relative abundance of individual amino acid in NUTA.

の Chl. *a*/Pheophytin 比が懸濁粒子中でのこの比より小さく、また一定した値になっていることは、植物プランクトンが動物プランクトンの摂食および排泄により分解・消化されることにより、この Chl. *a*/pheophytin 比が 1.2 前後の値となるのではないかと推定できる。実際セディメントトラップ中には糞粒と思われる粒子が多数捕集されており、この事実もこの考え方を支持している。

次に、この 15 回の観測で得られた NUTA と懸濁粒子の有機態炭素・窒素濃度およびその C/N 比の鉛直分布を Fig. 5 に示す。両者とも同一深度について観測期間内に得られた全試料の平均値とその標準偏差を示している。懸濁粒子中の有機態炭素・窒素濃度は、10m 深まではほぼ一定（それぞれ 100mgC/g, 20mgN/g 程度）であったが、14m 深ではそのほぼ半分程度の値であった。一方 NUTA では、有機態炭素・窒素濃度は深度が増す

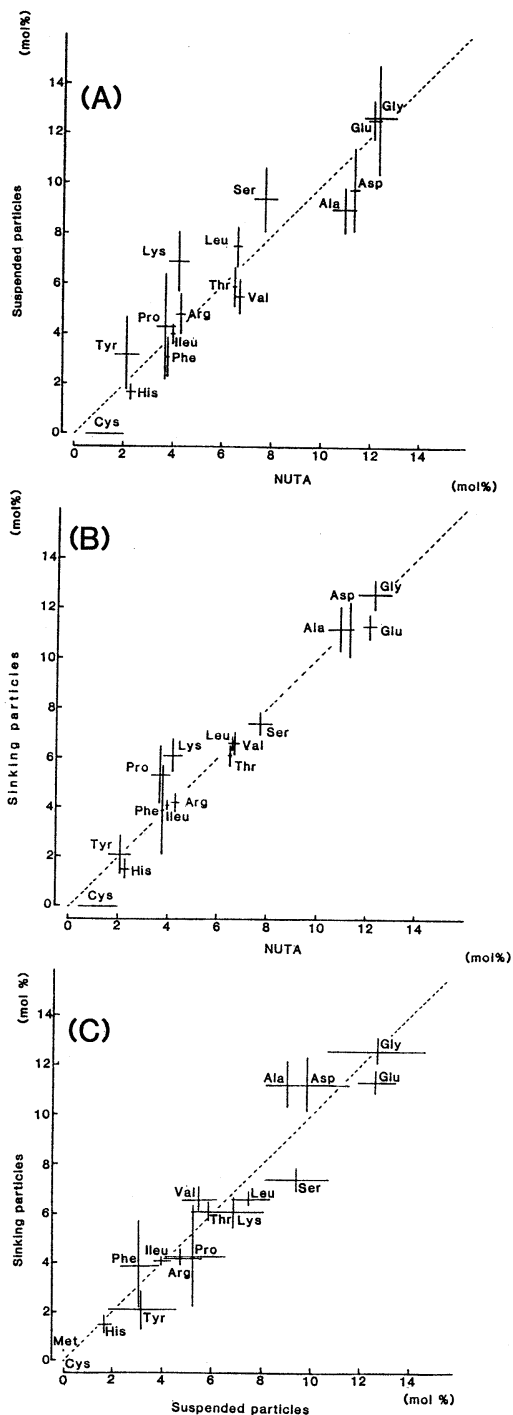


Fig. 7. Correlations of amino acid composition in suspended particles and in NUTA (A), in sinking particles and in NUTA (B), and in suspended particles and in sinking particles (C).

にしたがってそれぞれ漸増していた。C/N比はこの両者とも水深が増すに連れて漸減していったが、いずれの深度でも NUTAの方がかなり高く、平均値でそれぞれ 6.7(懸濁粒子) および 9.1(NUTA)であった。このことから NUTAは懸濁粒子に比べて相対的に窒素含有量が少ない、微生物的な分解が進み窒素化合物が選択的に離脱した、生成してからの経過時間の長い粒子ではないかと考えられる。ALLDREDGE(1979)はカリフォルニア湾およびサンタバーバラ海峡の水深 10m でスキューバダイビングにより採取されたマリンスノー(長径 3 mm 以上の粒子)の C/N 比は、平均でそれぞれ 11.3 および 9.7 であり、同時に採取された全懸濁粒子の C/N 比の平均値それぞれ 7.7 および 6.1 よりも高い値になっていると報告している。我々が NUTA Trap により採取した NUTA と懸濁粒子の C/N 比も同様の傾向をしており、NUTA Trap により、マリンスノー状の大型粒子を採取しているものと考えられる。

また NUTA のアミノ酸組成を深度別に比較したものを Fig. 6 に示す。ここで特徴的なことは各深度のアミノ酸組成にはあまり大きな相違が無いことである。しかしながら、含硫アミノ酸の Cysteine の含有比が深度とともに減少しており、また Lysine や Histidine も深層では減少していた。逆に中性アミノ酸の Alanine や Glycine が深度が増すにつれて増加しており、深度の増加と共に相対的に必須アミノ酸が減少している。各層で採取された NUTA の起源に大きな差はなく、水深が増すにつれて生成してからの経過時間が長い、古い粒子が存在しているのであろうと考えられる。

次に 3 種の粒子中(懸濁粒子・沈降粒子・NUTA)のアミノ酸組成の比較を行い、それぞれを Fig. 7A, B, C に示す。この図は 2 種類の粒子中に含まれている個々のアミノ酸のモルパーセントの平均値(十字の交点)をプロットし、それぞれの粒子中のアミノ酸モルパーセントの標準偏差を棒の長さで示している。ここで 3 種の粒子間のアミノ酸組成の類似度(アミノ酸組成比の相関係数)を見てみると、懸濁粒子と沈降粒子の間で $r=0.961$ 、懸濁粒子と NUTA で $r=0.952$ 、また沈降粒子と NUTA については $r=0.979$ の値が得られたことから、NUTA の化学的性質は懸濁粒子よりも沈降粒子に多少似ていることが推測された。また、この観測期間中の現場海域で植物プランクトン群集の優占種であった珪藻の *Skeletonema costatum* とラフィド藻の *Chattonella antiqua* を純粋培養したものを、実験室内で枯死させて、それぞれのアミノ酸組成と今回得られた NUTA の

アミノ酸組成の平均値を比較してみると類似度でそれぞれ $r=0.972$, $r=0.967$ となり, これらも似ていることが分かった。

以上の事から NUTA は一般的に定義されている懸濁粒子とは異なった性格を持つ粒子であることが明らかとなり, 採水時の衝撃等で容易に壊れてしまうため, 今までの採水法では採取されにくい粒子ではないかと考えられる。また, アミノ酸組成からみると NUTA は懸濁粒子よりもむしろ沈降粒子に類似していることが明らかとなった。そして NUTA のアミノ酸組成が枯死させた植物プランクトンのアミノ酸組成とも類似していた事などから, NUTA が沿岸海域における植物プランクトンのデトライタス化と, 沈降に何等かのかたちで関与している可能性が示唆された。

マリンスノーの起源については海中で生起する泡が関与しているという報告 (JOHNSON and COOKE, 1980), バクテリアによる作用とする報告 (PAERL, 1973; 1974), 動物プランクトンが関与しているとするもの (ALLDREDGE, 1976; POMEROY and DEIBEL, 1980) や陸から運ばれている粒子によるものとする報告 (SHOLKOVITZ, 1976) などがあるが, NUTA についてはその起源物質は主に植物プランクトンであり, これらがなんらかの過程を経て生成したものと考えるのが妥当であろう。

謝 辞

最後に試料採取に協力いただいた香川大学農学部海水利用学研究室の大学院生・学生諸君, ならびに兵庫県室津漁業協同組合の関係者の皆様に記して感謝する。

文 献

- ALLDREDGE, A.L. (1976): Discarded appendicularian house as suburces of food, surface habitates, and particulate organic matter in planktonic environment. *Limnol. Oceanogr.*, **21**, 14-23.
- ALLDREDGE, A.L. (1979): The chemical composition of macroscopic aggregates in two neritic seas. *Limnol. Oceanogr.*, **24**, 855-866.
- ALLDREDGE, A.L., J. J. COLE and D.A. CARON (1986): Production of heterotrophic bacteria inhabiting macroscopic organic aggregate (marine snow) from surface water. *Limnol. Oceanogr.*, **31**, 68-78.
- ALLDREDGE, A.L. and J.L. COX (1982): Primary productivity and chemical composition of marine snow in surface waters of the southern California Bight. *J. Mar. Res.*, **40**, 517-527.
- ALLDREDGE, A.L. and M. J. YOUNGBLUTH (1985): The significance of macroscopic aggregates (marine snow) as sites for heterotrophic bacterial production in the mesopelagic zone of the south tropical Atlantic. *Deep-Sea Res.*, **32**, 1445-1456.
- HONJO, S. (1978): Sedimentation of materials in the Sargasso Sea at 5367 m deep station. *J. Mar. Res.*, **36**, 469-492.
- JOHNSON, B. D. and R.C. COOKE (1980): Organic aggregate formation resulting from distribution of bubbles in sea water. *Limnol. Oceanogr.*, **25**, 653-661.
- KAJIHARA, M. (1971): Settling velocity and porosity of large suspended particles. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **27**, 158-162.
- KNAUER, G. A., D. HEBEL and F. CIPRIANO (1982): Marine snow: major site of primary production in coastal waters. *Nature*, **300**, 630-361.
- 門谷 茂・岡市友利(1984): 播磨灘における沈降・堆積過程での粒子態アミノ酸の変化. *地球化学*, **18**, 45-53.
- MONTANI, S., K. TADA and T. OKAICHI (1988): Purine and pyrimidine bases in marine particles in the Seto Inland Sea, Japan. *Mar. Chem.*, **25**, 359-371.
- 西村雅吉(編) 角皆静男・乗木新一郎(著)(1983): 海洋化学. 産業図書.
- PAERL, H. W. (1973): Detritus in Lake Tahoe: Structural modification by attached microflora. *Science*, **180**, 496-498.
- PAERL, H.W. (1974): Bacterial uptake of dissolved organic matter in relation to detrital aggregation in marine and fresh water system. *Limnol. Oceanogr.*, **21**, 966-972.
- PARSONS, T.R., Y. MAITA and C.M. LILLI (1984): A Manual of Chemical and Biological Methods for Sea Water Analysis. Pergamon Press, New York, pp.173
- POMEROY, E. R. and D. DEIBEL (1980): Aggregation of organic matter by pelagic tunicates. *Limnol. Oceanogr.*, **25**, 643-652.
- SHANKS, A.L. and J.D. TRENT (1979): Marine snow: Microscale nutrient patches. *Limnol. Oceanogr.*, **24**, 850-854.
- SHANKS, A.L. and J.D. TRENT (1980): Marine snow: sinking rates and potential role in vertical flux. *Deep-sea Res.*, **27**, 137-143.

- SHOLKOVITZ, E.R. (1976): Flocculation of dissolved organic matter inorganic matter during the mixing river and sea water. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **40**, 831-845.
- SMAYDA, T.J. (1969): Some measurements of the sinking rate of fecal pellets. *Limnol. Oceanogr.*, **14**, 621-625.
- SUZUKI, S. and K. KATO (1953): Studies on suspended materials marine snow in the sea: part 1. Source of marine snow. *Bull. Fac. Fish. Hokkaido Univ.*, **4**, 131-137.
- TRENT, J.D., A.L. SHANKS and M.W. SILVER (1978): *In situ* and laboratory measurements on macroscopic aggregates in Monterey Bay, California. *Limnol. Oceanogr.*, **23**, 626-635.
- 辻田時美(1952): 日本近海に発生する有機懸濁物に関する研究. *日本海洋学会誌*, **8**, 113-126.
- 辻田時美(1982): デトリタスー海洋水の新しい有機物像. *海洋科学*, **14**, 466-471.