

全岩組成分析を用いた 九十九里浜の供給源の検討

STUDY ABOUT ORIGIN OF BEACH SEDIMENT BASED ON CHEMICAL COMPOSITION OF BEACH SAND ON KUJUKURI COAST

石井敦子¹・萩谷宏²・渡辺国広³

Atsuko ISHII, Hiroshi HAGIYA, Kunihiro WATANABE,

¹凸版印刷株式会社 生活環境事業本部 (〒110-8560 東京都台東区台東1丁目5番1号)

²東京都市大学 知識工学部 自然科学科 (〒158-8557 東京都世田谷区玉堤1-28-1)

³正会員 農博 国土技術政策総合研究所 (〒305-0804 茨城県つくば市朝日1番地)

The mineral and chemical composition of each sediments were analyzed on Kujukuri coast, Japan. Chemical composition of Kujukuri coast sediments, especially in K_2O/Na_2O and Nb/TiO_2 indicates its 'continental' origin compared to Shonan coast, Japan, although mafic mineral composition and MnO/MgO shows similar trend on both coast. These result suggested that complicated origin of beach sediment, and not match for the idea that the sediments provided from adjacent Byobugaura and Taito area seashore erosion.

Key Words : sand resource, XRF, mineral, Kujukuri coast

1. 研究の背景と目的

九十九里浜は、北端の屏風ヶ浦と南端の太東崎の海蝕崖から供給された土砂が沿岸漂砂によって運ばれることで形成されていると考えられてきた¹⁾。しかし、実際に土砂量収支を推定すると、太東崎から九十九里浜への沿岸漂砂量が地質年代スケールで $1.3 \times 10^5 m^3/yr$ であるのに対して²⁾、過去約 100 年間における海蝕崖の後退速度をもとに求めた太東崎からの土砂供給量は約 3 割程度の $3.7 \times 10^4 m^3/yr$ にすぎない³⁾。そのため、太東崎より南に位置する夷隅川水系が九十九里浜の土砂供給に対して重要な役割を果たしていた可能性が示唆されている³⁾。また、九十九里浜の北部に位置する飯岡漁港を通過する沿岸漂砂量は地質年代スケールで $4.0 \times 10^5 m^3/yr$ と推定されているが²⁾、屏風ヶ浦の崖および海底基盤の侵食によって供給される土砂量は消波堤が設置される以前で $3.4 \times 10^5 m^3/yr$ ⁴⁾、このうち 48% は急速に拡散されて海浜材料とならないシルト分⁵⁾であることを考えると屏風ヶ浦だけでは土砂供給源として不十分である可能性がある。このように九十九里浜が南北の海蝕崖からの供給土砂によって形成されているという説にも、まだ議論の余地が残されているのが現状である。

九十九里浜の背後には、縄文海進時の海食崖を境に、下総台地の中期～後期更新世海成層（上総層群笠森層、下総層群地藏堂層・藪層・成田層）と関東ロームからなる海成段丘が広がっており、複数の小河川による開析が進んでいる。これら海成段丘の海成層は砂層を主体としていて、凝灰質シルト岩を主体とする屏風ヶ浦や太東崎の海食崖とは地質が異なる。こうした地層からの土砂も九十九里浜の形成に寄与している可能性が考えられる。

著者らはこれまでに、湘南海岸の海浜砂について鉱物組成分析と全岩組成分析をおこなうことで、湘南海岸の砂が海岸域に流入する大河川に由来し、砂の鉱物組成が明瞭に地域的に区分できることを示してきた⁶⁾。そこで本研究では、湘南海岸と同様の全岩組成分析を九十九里浜、周辺海岸、流入河川、露頭から採取した砂もしくは岩石について実施することで、九十九里浜の土砂供給源について砂の鉱物組成および化学的組成の点から考察することを目的とした。

2. 方法

(1) 試料の採取

2008年7月から2010年1月にかけて①九十九里浜全

域の砂浜31箇所から31検体，②飯岡漁港以北および太東崎以南の海岸8箇所から8検体，③九十九里浜に流入する3河川（栗山川，木戸川，一宮川）の下流域から5検体，④屏風ヶ浦及び太東崎の海食崖の露頭から岩石6検体を採取して分析に供した（図-1）。砂浜では汀線部表層，河川については下流の河岸付近に堆積している表層を採取した。屏風ヶ浦では，約12万～13万年前の下末吉層相当の海成砂層（GC5-2）とそれらが崩れ落ち堆積している部分（GC5-1）から採取した。

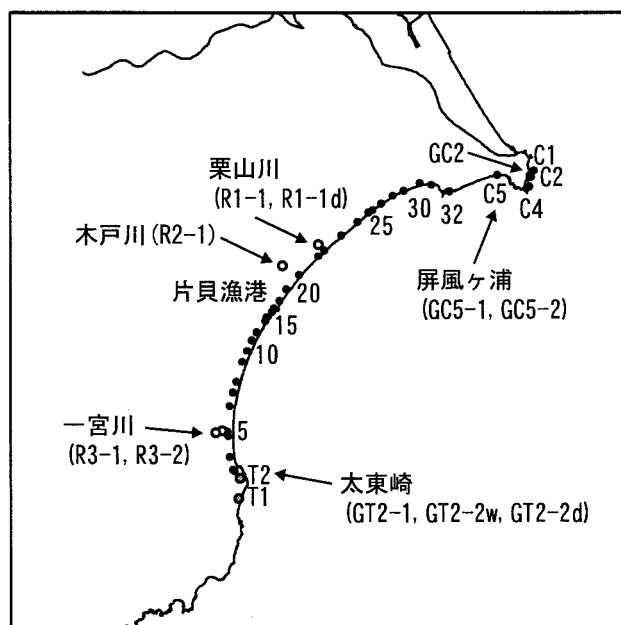


図-1 試料採取地点

(2) 鉱物組成分析

実体顕微鏡下で1試料につき200以上の砂粒をカウントした。カウントの際には石英，斜長石，カリ

長石，普通輝石，紫蘇輝石，黒雲母，かんらん石，角閃石，軽石，スコリア，岩石片，生物起源（貝殻片，有孔虫など），磁鉄鉱，人工物，その他の15種に分類した。

(3) 全岩組成分析

砂試料を粉碎機にかけて粉末にした後，専用のプラスチック製リングに入れて加圧プレス機で約10tの圧力をかけ，加圧成形ディスクを作成した。このディスクに含まれる主要10元素（ SiO_2 ， TiO_2 ， Fe_2O_3 ， Al_2O_3 ， MnO ， MgO ， CaO ， Na_2O ， K_2O ， P_2O_5 ）と微量元素9元素（Rb，Sr，Nb，Ni，Cr，Y，Zr，S，Ba）を，東京都市大学機器分析室の蛍光X線分析装置RIX3000（理学電気工業製）により定量した。

3. 結果

(1) 海浜砂の鉱物組成

九十九里浜は全体として，無色鉱物の割合が平均53.4%と，半分以上を占めているのに対し，太東漁港以南は24.9%，屏風ヶ浦以北は43.1%と，九十九里浜は，その周辺海岸に比べて無色鉱物の割合が高かった（図-2）。ただし，生物起源粒子を除いて考えると，屏風ヶ浦以北の無色鉱物は，50.1%となり，九十九里浜の値と近くなる。

一方で，有色鉱物については九十九里浜が18.2%であったのに対して，屏風ヶ浦以北において有色鉱物がカウントされたのは2地点のみであり，屏風ヶ浦以北における有色鉱物の割合は4.1%と低い値を示した。岩石片は，九十九里浜が24.8%，屏風ヶ浦以北が45.4%と，屏風ヶ浦以北は有色鉱物が少ない分岩石片の割合が多くなっていた。

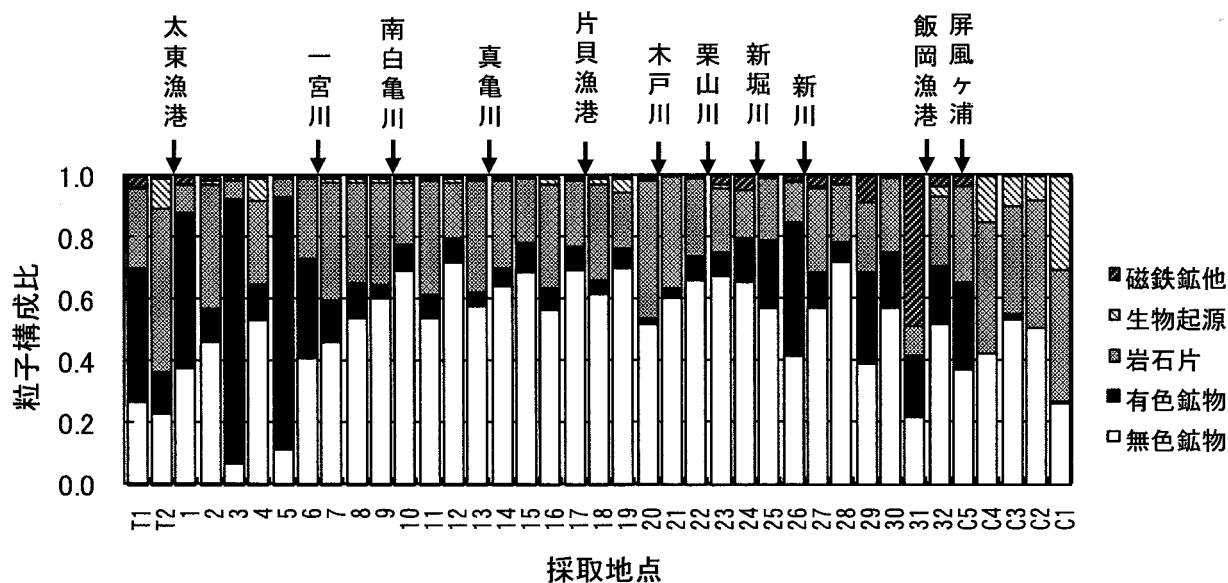


図-2 九十九里浜周辺の海浜砂の鉱物組成

地点10の南白亀川から新堀川の南に位置する地点24にかけては無色鉱物の割合が60%を越える地域が多くみられたが、これは南北から流れてくる沿岸流の影響で、比重の軽い無色鉱物が九十九里浜中央部に流されて堆積した結果と考えられた。これとは逆に、太東崎から一宮川にかけての地点（地点1～6）と新堀川から飯岡漁港にかけての地点（地点25～31）では有色鉱物が多くなる傾向にあった。これも沿岸漂砂の状況を反映したもので、下手に向けて比重の軽い無色鉱物が運び去られた結果、比重の重い有色鉱物が残ったものと考えられた。東浪見（地点3）と一宮海岸（地点5）では有色鉱物の比率が極端に高くなっているが、これは構造物付近で採取したためのものであるため、局所的な海浜流等の影響を受けて比重の重い有色鉱物が選択的に残された結果による特異値と思われる。

(2) 海浜砂および土砂供給源候補の全岩組成分析

a) SiO_2 含有量

SiO_2 重量%の値は、九十九里浜内では70%前後となっており、地点による違いはほとんど無かった（図-3）。九十九里浜に流入する河川の砂も同様に70%前後で、海浜砂と違いは見られなかった。屏風ヶ浦以北の銚子周辺の海浜砂は屏風ヶ浦に近い南部の海岸で約60%であったのに対して、犬吠埼の北に位置する君ヶ浜では約80%と高くなっており、わずか5km程度の範囲内でも地点による違いが見られた。また、屏風ヶ浦の岩石（GC5-1, GC5-2）は九十九里浜の海浜砂と同じく70%近い値を示したが、太東崎周辺の岩石（GT2-1, GT2-2W, GT2-2D）は40～60%と低い値を示した。

b) Rb含有量

Rb含有量は九十九里浜では南白亀川から栗山川にかけての範囲で50ppmを越えたが、栗山川以北と南白亀川以南では40ppm以下となっており、九十九里浜の中央部で値が高くなる傾向が見られた（図-3）。

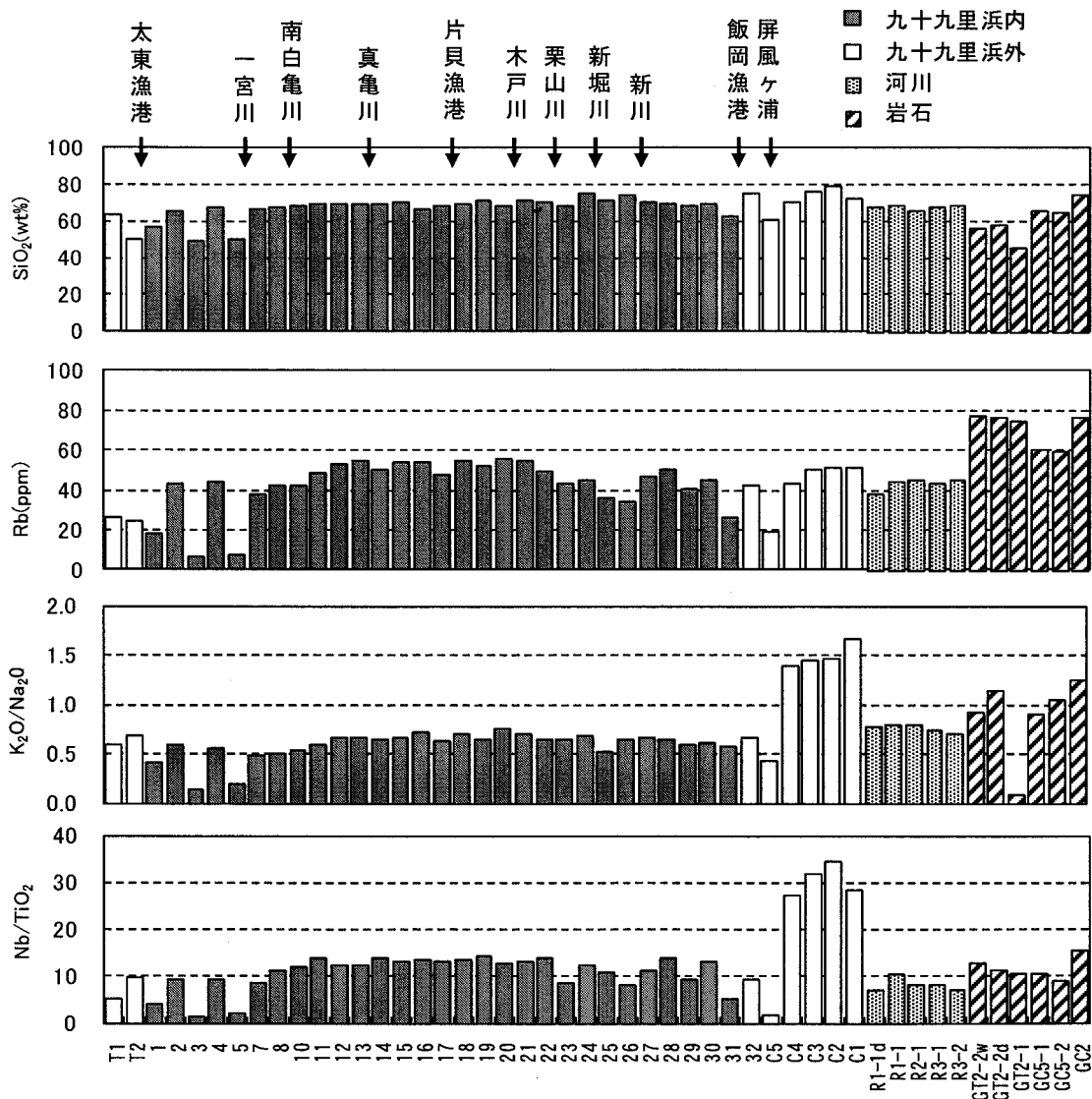


図-3 九十九里浜周辺の土砂の全岩化学組成

また、流入河川から採取した砂では40ppm前後と概ね九十九里浜の海浜砂に近い値を示した。

一方で、屏風ヶ浦の汀線から採取した砂 (C5) は20ppmと極端に低い値を示し、九十九里浜の海浜砂や屏風ヶ浦以北の海岸から採取した砂の値 (40～50ppm) とは明瞭に異なる値を示した。太東崎周辺から採取した岩石では80ppm近い値、屏風ヶ浦から採取した岩石では約60ppmとなっており、海浜砂よりも高い値となっていた。

c) K_2O/Na_2O

K_2O/Na_2O の値は九十九里浜では0.5～0.7を示し、太東崎以南の和泉浦海岸 (長者ヶ浜: T1) および太東崎周辺 (T2) の海浜砂もほぼ同等の値を示した (図-3)。また、屏風ヶ浦の海浜砂 (C5) は0.44とやや低く、流入河川の砂は0.7～0.8とやや高い傾向にあったが、九十九里浜に近い値であった。一方で、屏風ヶ浦の東端に位置する外川漁港よりも北の海岸では、1.3～1.7と九十九里浜に比べて明らかに高い値を示した。屏風ヶ浦および太東崎から採取した岩石は0.9～1.2を示し、九十九里浜と外川漁港以北の海岸の値のほぼ中間の値であった。

d) Nb/TiO_2

Nb/TiO_2 の値は九十九里浜では局所的に低い値を示す地点もあったものの、全体としては9～14であった (図-3)。これに対して屏風ヶ浦、太東崎から採取した岩石は9～16と同程度の値であったが、流入河川の砂はやや低い7～10であった。外川漁港以北の海岸は19～35と極端に高い値を示した。

e) MgO, MnO

有色鉱物の主成分のうち、 MgO と MnO の重量%は、九十九里浜の海浜砂で正の相関関係を示した。この傾向は、湘南海岸の海浜砂とほぼ一致していた (図-4)。

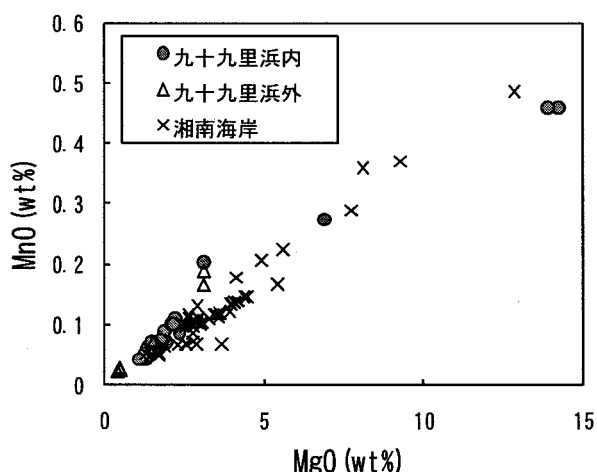


図-4 海浜砂に含まれるMnOとMgOの比率

4. 考察

(1) 全岩分析による無色鉱物の起源の推定

a) 石英の含有量

SiO_2 重量%の値は、60%～70%程度までは各種の造岩鉱物及び岩石片の量比によって決まるが、70%を越える鉱物や岩石片は、石英を除いて当地域の砂粒子のEPMAによる分析では検出されていない。従って、本研究で確認された SiO_2 が70%を越えるような砂の組成は、石英の存在割合を反映していると考えられた (図-3)。外川漁港以北の海岸で SiO_2 重量%が九十九里浜よりも高い値となったのは、外川漁港以北の海浜砂には無色鉱物の中でも特に石英が多く含まれていることを示唆するものである。

b) 長石の含有量

K_2O/Na_2O の値は地殻組成の成熟度を判断する上で良い指標となることが知られており⁷⁾、岩石片と無色鉱物の起源を推定するのに使える。なぜならば、砂を構成する粒子のなかで、斜長石は Na_2O を、カリ長石は K_2O をそれぞれ固溶体の端成分の一つとして含み、また岩石片のうち、軽石・スコリアの火山ガラス部分と斑晶の斜長石、堆積岩片の粘土鉱物や斜長石片、雲母片に、これらの元素が含まれる。これに対して有色鉱物及び鉄鉱物には、黒雲母や角閃石にわずかに含まれる場合を除き、 Na_2O と K_2O は含まれないからである。

本研究で K_2O/Na_2O は、九十九里浜が0.5～0.7であったのに対し、外川漁港以北の海岸で1.3～1.7と明らかに高い値が得られた。湘南海岸での値が0.2～0.5であった⁸⁾ことを考えれば (図-5)、この違いは海浜砂のうちの無色鉱物の供給源が外川漁港を境に異なることを強く示唆するものと言える。 K_2O の重量%に大きな違いは見られないため、 K_2O/Na_2O の違いは Na_2O の重量%が外川漁港以北で際だって低いことによるが (図-6)、これは斜長石が外川漁港以北の海岸で少ないことを反映したものと考えられた。

次に、Rbの含有量に着目する。マグマや造岩鉱物中におけるRbの挙動はKとほぼ同じであり、無色鉱物の中ではカリ長石の割合に対応する。屏風ヶ浦の汀線から採取された砂 (C5) のRb含有量が、約20ppmと大部分の九十九里浜の海浜砂の値40～60ppmに比べて低い値を示したことは、九十九里浜の多くの地点と比較してカリ長石の含有量が少ないことを示唆する (図-3)。このことは、屏風ヶ浦の海浜砂の供給源と考えられる凝灰質シルト岩が、一般にカリ長石の含有量が少ないとされていることと整合する。

一方で、C5とほぼ同じ地点の下末吉層相当の海成砂層 (GC5-2) とその崩壊土砂 (GC5-1) はRbが約60ppmと直近にも関わらず非常に高い値を示した。しかし、屏風ヶ浦における下末吉相当の砂層は厚みが薄いため、九十九里浜の砂の主要供給源としては

不十分である。Rbについては、より年代の古い飯岡層、名洗層についても調べたうえで慎重に議論する必要があると考えられた。

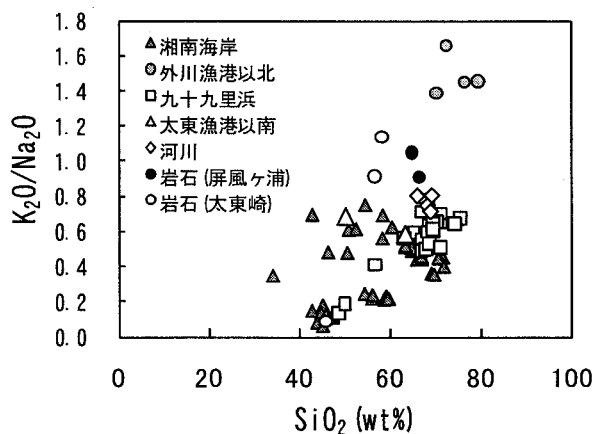


図- 5 SiO_2 重量%と $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ の関係

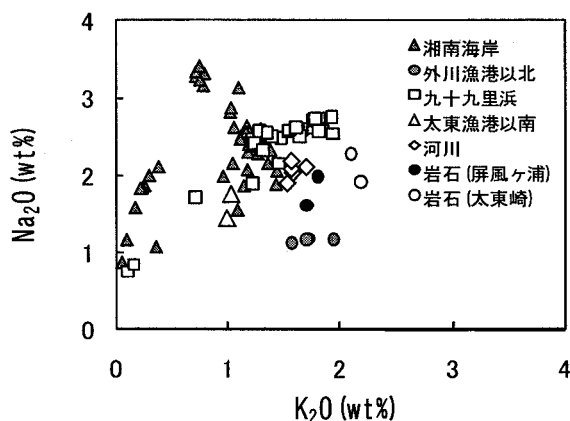


図- 6 K_2O と Na_2O の含有率の関係

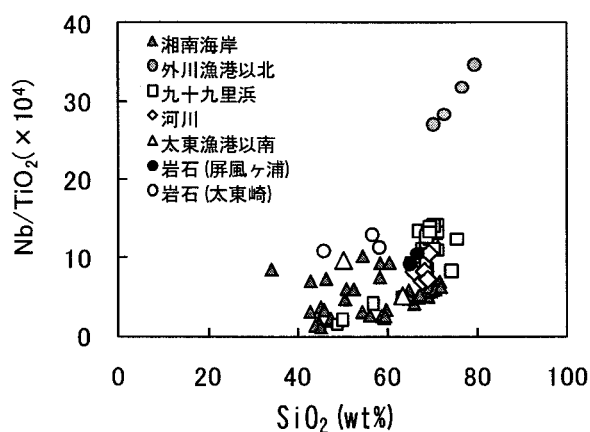


図- 7 SiO_2 重量%と Nb/TiO_2 の関係

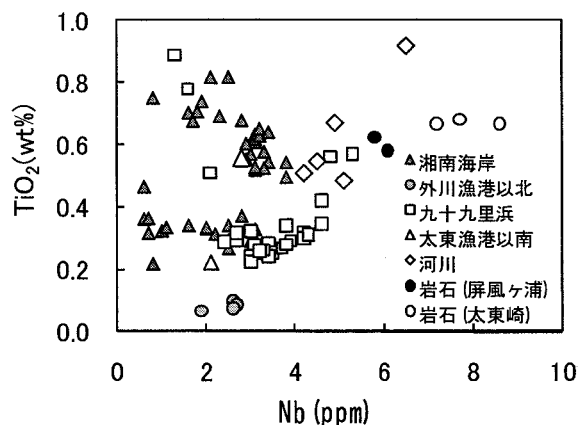


図- 8 Nbと TiO_2 の含有率の関係

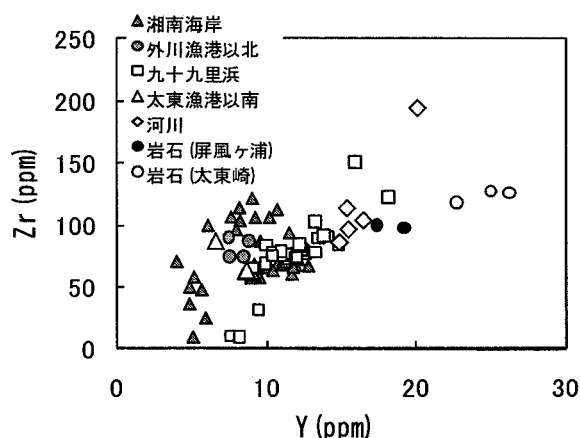


図- 9 YとZrの含有率の関係

c) 無色鉱物の起源

上記の SiO_2 重量%、 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 及びRb含有量の結果より、海浜砂中の無色鉱物の起源は外川漁港を境界に大きく異なることが確認された。外川漁港以北の海浜砂は石英が多いことから、石英を多く含む花崗岩質の岩石を起源とする、白亜系銚子層群の浸食によりつくられていることが示唆された。

九十九里浜については、カリ長石の含有量によく対応するRbの含有量は屏風ヶ浦の汀線では少なかったが、全体的には40～60ppmを示し、湘南海岸の値（10～40ppm）に比べて高かった。また、 SiO_2 重量%は石英が多く含まれることを示唆する値であった。一般に、島弧の火山岩及び火山噴出物の斑晶鉱物には、石英及びカリ長石はほとんど含まれない。このことから、九十九里浜の無色鉱物は、カリ長石が多く含まれる深成岩または変成岩、及び古い時代のそれらを起源とする堆積岩に由来するものが多い可能性が考えられた。

(2) 全岩分析による有色鉱物の起源の推定

a) 鉄鉱物の起源

Nb, Ti, Y, Zr などの元素は、岩石の種類によって濃度が大きく異なり、また水に溶けにくく風化過程で変化を受けないことから、堆積物の起源を探る上で非常に都合がよい。主に鉄鉱物や有色鉱物に Nb と Ti が多く含まれることから、Nb/TiO₂ の値はこれらの鉱物、特に磁鉄鉱—イルメナイトなど、鉄鉱物の起源を示すと考えられる。日本列島のような島弧の上部地殻では Nb が他の元素よりも少ないことは良く知られているが⁸⁾、詳しく見ると日本の中でも地質によって Nb と他の元素の比は大きく変化するため⁹⁾、起源を推定するうえで重要な手がかりとなる。

九十九里浜の砂は Nb/TiO₂ が 12~14 であったが、これは湘南海岸の 2~5 に対して、明らかに高い (図-3)。このことは、九十九里浜の砂が湘南海岸よりも地殻の成熟の進んだ花崗岩や中古生層の堆積岩によって主に構成されていることを示唆する (図-8)。また、外川漁港以北の海浜砂は 27~35 とさらに際だって高い値を示しており、九十九里浜とは起源の異なる砂によって構成されていることがうかがえた。

Nb の含有量に着目すると、九十九里浜は 1~5 ppm なのに対して、太東崎の岩石は 7~9 ppm で明らかに高く、九十九里浜の鉄鉱物は太東崎のものとは別のものに由来することが示唆された。このことは、Y, Zr の分布からもうかがうことがえた (図-9)。

b) 輝石の起源

有色鉱物の主成分のうち、MgO は鉄鉱物に含まれず、主に輝石・かんらん石に含まれる。MnO は輝石の中でも斜方輝石 (紫蘇輝石など) に特に多く含まれるので、輝石 (MgO) の割合と MnO が正の相関を示すパターンで九十九里浜と湘南海岸が一致したことは、両者の有色鉱物に斜方輝石が多く含まれ、共通の起源を持つことを示唆する (図-4)。

このことは両地域共に輝石の多くが関東ローム層の削剥により供給されていることを暗示する。実際に、実体顕微鏡下での観察でも、輝石が比較的摩耗の少ない外形を示すことが確認されている。また、本来は輝石やかんらん石は風化に弱く、地表で風化にさらされると残りにくい鉱物であり、これらの鉱物が海浜砂に濃集することは、比較的最近供給された、新しい時代の火山噴出物に由来することを意味している。

5. 結論

本研究では、九十九里浜とその周辺海岸を構成する海浜砂の起源について鉱物別に考察をおこなったが、まとめると以下の通りである。

①九十九里浜と外川漁港以北の海岸では砂の供給源が全く異なる。

②九十九里浜の無色鉱物には石英やカリ長石が多く含まれ、古い時代の深成岩や変成岩を起源とする堆積岩による寄与も大きい。

③九十九里浜の鉄鉱物は Nb の含有量が太東崎のものとは異なり、より地殻の成熟の進んだ花崗岩や中古生層の堆積岩に由来する。

④九十九里浜の輝石の多くは湘南海岸と同じ関東ローム層に由来する。

本研究で屏風ヶ浦や太東崎以外の九十九里浜の砂の起源と指摘した花崗岩・変成岩質、または中古生層のような地質を持つ場所としては、関東山地や足尾山地、八溝山地などがある。本研究では流入河川の砂について、九十九里浜の砂とほぼ対応した値が得られたが、今回採取した地点は下流付近であったため、上流の岩石なども採取して資料の数を増やし、量の問題も含めて慎重に考察する必要がある。

謝辞：本研究を実施するにあたり、東京都市大学総合研究所機器分析室のご協力をいただいた。著者の一人 (石井) は環境情報学部室田昌子准教授にご指導をいただいた。ここに記して深く謝意を表する。

参考文献

- 1) 宇多高明：日本の海岸侵食，山海堂，p. 304，1997。
- 2) 宇多高明，高田修，星上幸良，芹沢真澄，三波俊郎，古池綱：九十九里海岸における地質年代スケールの沿岸漂砂量の推定，海岸工学論文集，第 47 巻，pp. 686-690，2000。
- 3) 星上幸良，宇多高明，野志保仁，小澤宏樹：九十九里浜の形成にかかわる土砂供給源に関する一考察，海洋開発論文集，第 22 巻，pp. 403-408，2000。
- 4) 堀川清司，砂村継夫：千葉県屏風ヶ浦の海岸侵蝕について (2) —航空写真による海蝕崖の後退に関する研究・第 3 報—，第 17 回海岸工学講演会論文集，pp. 289-296，1970。
- 5) 渡辺剛士，小林昭男，宇多高明，星上幸良，野志保仁，清水達也：海蝕崖の崩落土砂の漂砂系への供給メカニズム，海洋開発論文集，第 24 巻，pp. 1273-1278，2007。
- 6) 石井敦子，萩谷宏，渡辺国広：海岸砂の鉱物組成および全岩組成に基づく土砂移動動態の推定—湘南海岸・九十九里浜を例として，海洋開発論文集，第 25 巻，pp. 1107-1111，2009。
- 7) Taylor, S.R., and McLennan, S.M., *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*: Oxford (Blackwell Scientific), 1985。
- 8) 富樫茂子，他 7 名：日本列島の”クラーク数” 若い島弧の上部地殻の元素存在度，地質ニュース，558 号 pp. 25-33，2001。
- 9) 萩谷 宏：微量元素から見た東北日本の変成堆積岩の原岩堆積場，日本地質学会第 104 年学術大会 (福岡) 講演要旨集，p. 436，1997。