

資 料



遠州灘における砂浜の線量率

湊 進, 下 道國*

放射線地学研究所

461-0024 愛知県名古屋市東区山口町 9-6

*藤田保健衛生大学

470-1192 愛知県豊明市沓掛町田楽ヶ窪 1-98

駿河湾の大井川河口から御前崎, 天竜川河口, 浜名湖, 伊良湖を経て三河湾まで(全長 140 km)の砂浜 35 か所で各浜 5 点ずつ線量率を測定した。このうち 10 か所では砂を採取して Ge (Li) 検出器によりカリウム, ウラン及びトリウムの濃度を測定した。これらのデータに, 地質調査総合センターにより測定された沿海の海底堆積物のデータを加えて, 砂浜の線量率レベルの場所による変化の要因を考察した。線量率分布の微細構造を知るため, 天竜川河口近くの 2 か所の浜でそれぞれ 50 点ずつ測定した。線量率の等高線を描いたところ, かなりの規則性を持った分布を得た。本研究で集めたデータから, 砂浜における自然 γ 線量率レベルは, 河口からの距離, 砂浜の侵食・堆積状況及び海水の深さ分布に影響されることがわかった。

Key Words : dose rate, beach sand, Enshu-nada, erosion, sedimentation

1. はじめに

海岸における砂浜の自然 γ 線量率レベルはどのようなメカニズムで決定されるのであろうか? 河川から海へ運搬された土砂は沿岸流により海底を移動し, 海岸に打ち上げられる。このとき土砂は限界掃流曲線¹⁾にしたがって 0.1 ~ 1 mm 程度の比較的粒径の揃った砂として打ち上げられ, 砂浜を形成する。この一連の動きに際して土砂中の自然放射性核種(カリウム, ウラン, トリウム)の濃度はどのように変化していくのか? というのが本研究の問題設定である。しかし我が国では砂浜の自然放射性核種に関する報告はきわめて少ない。筆者らの文献調査では, まとまった報告は以下の 3 例のみであった。

佐藤ら²⁾は宮城県及び福島県における海浜砂中のトリウムをトレーサとして漂砂の供給源を推定した。西出ら³⁾は石川県の河口での海浜砂の自然放射性核種濃度を測定し, それに基づい

て線量率を計算した。また, 早川ら⁴⁾は福井県若狭湾の海浜砂と周辺土壌の線量率の関係を考察した。だが, これらの研究は試料数が十分ではないため事例研究の域にとどまっている。

海外に目を向けると, 高線量率の砂浜を持つ諸国では, 保健物理的関心から海浜砂の自然放射性核種濃度及び線量率を測定した報告が多数ある(例えば文献 5) - 7))。しかしながらメカニズムまで踏み込んだ研究はほとんどない。

ここでは砂浜の線量率を決定するメカニズム解明のための第一歩として遠州灘の海浜を研究対象とする。遠州灘の砂浜を形成するための土砂供給はそのほとんどを天竜川一本が担っている⁸⁾。そのためデータ解析しやすいと判断したからである。具体的には, 海底堆積物と海浜砂との関係に的を絞って調査する。この調査で得るデータを整理して, 将来のより精緻なモデル構築のための基礎資料としたい。

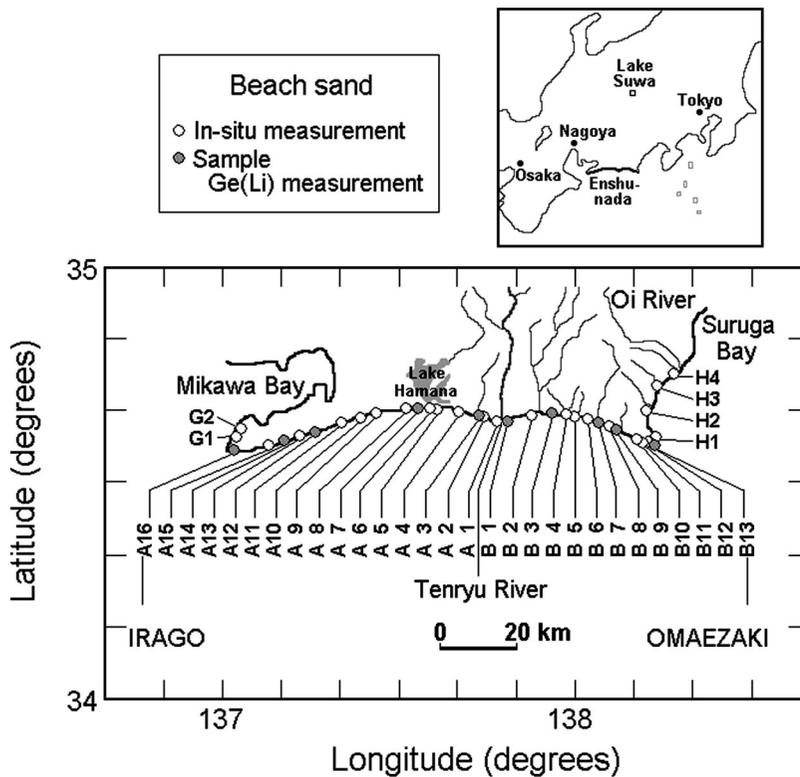


Fig. 1 Location of measurement sites.

2. 予測モデルと測定方法

観測を効率的に実施するために予備的なモデルで大雑把に結果を予測してみる。1回目の観測で遠州灘全域の各砂浜内の数点で線量率を測定し、予測とズレた地点を2回目の観測で重点的に精査するためである。予測モデルの概要は以下の通りである。

天竜川河口から海中に放出された土砂は沿岸流により海岸に沿って運ばれる。土砂の線量率はカリウム、ウラン、トリウム濃度で決まる。このうちカリウムはおもに長石(2.6–2.8)や雲母(2.8–3.4)などの軽鉱物に含まれる⁹⁾。括弧内の数字は比重である¹⁰⁾。ウランやトリウムはジルコン(4.7)、モナズ石(4.6–5.4)などの重鉱物に含まれる^{5),9)}。比重の小さい長石、雲母などは海岸に沿って天竜川河口から遠い地

点の海底まで運搬される。一方、比重の大きいモナズ石やジルコンなどは運搬されにくい。つまり海底でのカリウムは河口からの距離にしたがってきわめて緩やかに濃度が減少するが、ウランやトリウムは河口付近では濃度が高く、距離が増すにしたがって急激に濃度が減少する。海底砂が打ち上げられる砂浜ではこれらの重量関数として観測される。以上が予測である。

Figure 1に測定場所を示す。遠州灘の測定が主対象であるが、参考のため隣接湾の一部の砂浜も含めている。全35の砂浜における測定は2012年10月10日及び11日、同年11月15日及び16日に実施した。測定器は1"φ×2" NaI(Tl)シンチレーション・カウンタを用い、砂上1mの位置で1分間測定した。計数率から線量率への換算は文献11)に従った。

図中、灰色の○印は自然放射性核種であるカ

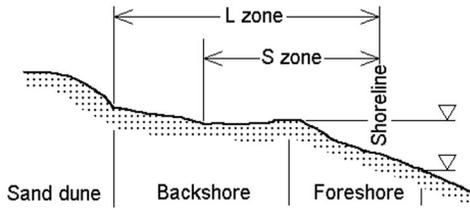


Fig.2 Beach profile perpendicular to the shoreline.

リウム, ウラン, トリウムを Ge (Li) 検出器で分析するために砂試料を採取した浜である。これらの浜でもシンチレーション・カウンタによる現場測定を実施している。

3. 測定結果と考察

3.1 全域の浜ごとの線量率変化

Figure 2 は典型的な砂浜の断面図である。満潮汀線と干潮汀線も示してある。両汀線の間が前浜であり, 砂丘と前浜の間が後浜である。

3.1.1 シンチレーション・カウンタによる現場測定

本研究では一つの砂浜において潮の満ち引きの状態にかかわらず, 後浜の中央から測定時刻の汀線までの5地点で測定した(図中のS zone)。Figure 3 に全測定値の頻度分布を示す。日本の陸土の線量率¹¹⁾のうち天竜川及び大井川流域分を取り出して評価した値の平均値 42.6 nGy/h と比べると砂浜の線量率の平均値は

36.7 nGy/h であり, 陸土より幾分低い値を示す。この傾向は石川県³⁾や福井県⁴⁾の例でも報告されている。後者の報告ではこの理由を陸土と浜砂の粒径分布の違いによるとしている。

測定途中, A3 地点 (Fig.1 参照) の砂丘と後浜の境界 (Fig.2 参照) でかなり黒っぽい砂を見つけたので, 参考までに測定した。その結果きわめて高い線量率値を得た。このデータも Fig.3 に示しておく (A3 : SBB 参照)。この地点でも砂を採取して Ge (Li) 分析した。さらに, 日を改めて詳しい分布を調査することにした (3.2 節に記述)。

Figure 4 に各浜における平均値と最大最小値を示す。便宜上, 天竜川河口から御前崎方面の距離を正号, 伊良湖方面を負号で表してある。天竜川河口から伊良湖あるいは御前崎方面に向かって線量率が漸減している傾向は予測した通りである。しかし図で明らかなように浜ごとに凹凸が激しい。すなわち砂浜間変動が大きい。特に天竜川だけでなく小河川も含めて河口付近でこれが顕著である。また最大値と最小値の幅(砂浜内変動)に関しても同様な傾向が見られる。A10 地点以降は幅が小さい。

御前崎近傍では B12 地点の突起が目立つ。この近辺は小石混じりのきわめて未熟な浜であり, B12 地点には海食崖がある。B12 地点の浜の線量率とその後背地である海食崖の線量率はほぼ同程度であった。このため崖崩れの影響

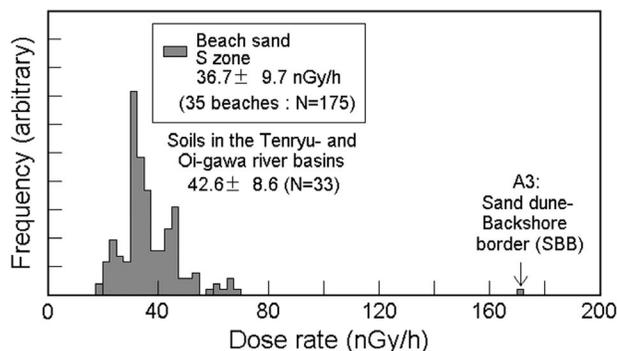


Fig.3 Frequency distribution of observed dose rates.

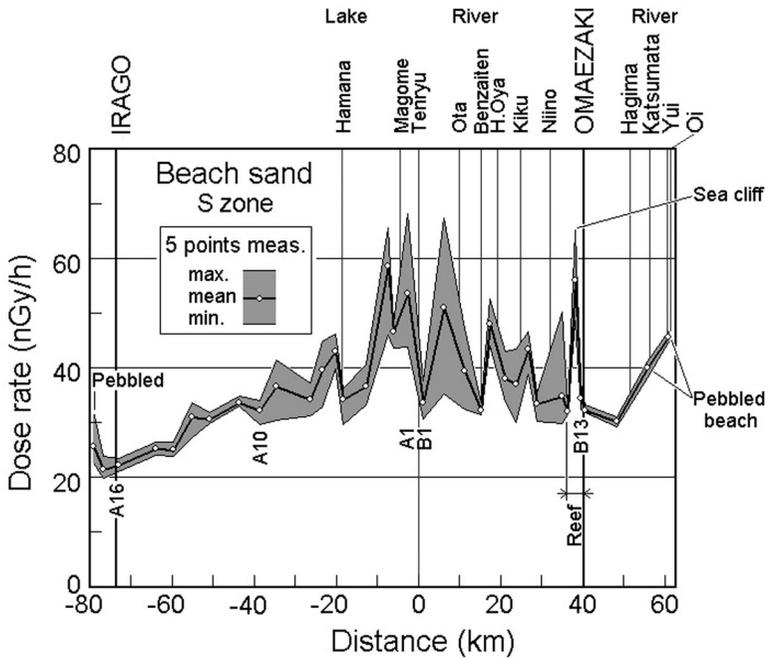


Fig. 4 Variation in observed dose rates with distance.

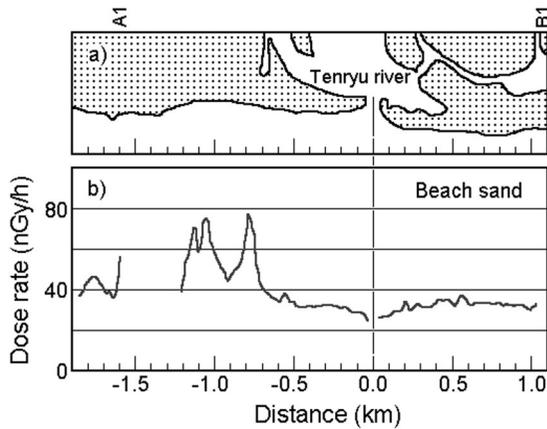


Fig. 5 Detailed measurements at the river mouth of the Tenryu river.

による可能性も考えられるが、今回は原因を特定できなかった。

A1地点とB1地点は同じ天竜川の右岸と左岸であるにもかかわらず差がきわめて大きい。そのため、日を改めてこのあたりの線量率変化

を詳しく調査した。Figure 5がその結果である。測定日時は2013年4月4日、約3kmを25mおきに測定した。図中、-1.2～-1.6kmの欠測区間は、海岸侵食により砂浜が消失している場所である。図からわかるように、3km程度

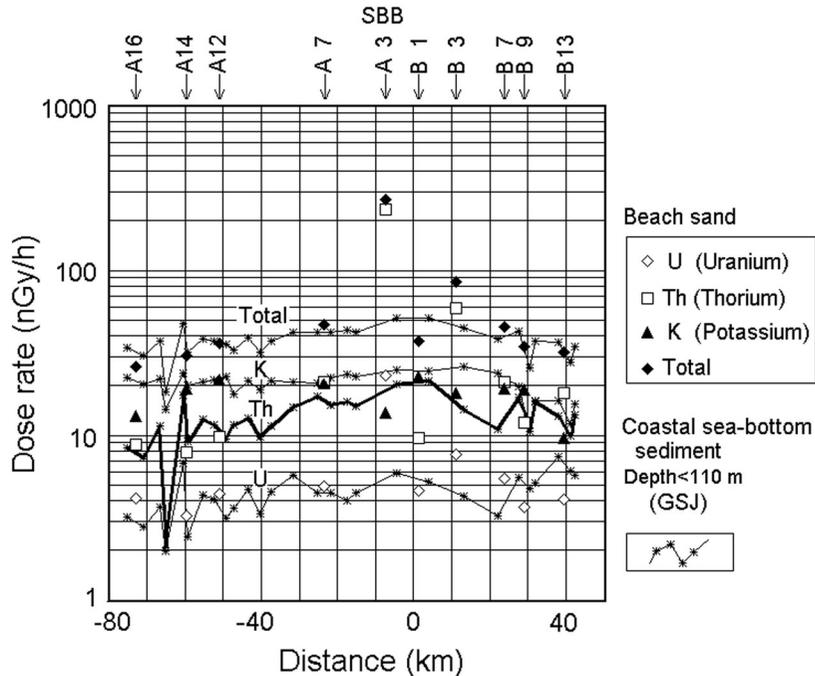


Fig. 6 Ge(Li) measurements of beach sand and sea-bottom sediment samples. The term SBB above A3 is explained in Fig. 3.

の距離でも線量率が大きく変動する場合がある。後節で暫定的なモデルを立てて、なぜ短い区間でもこのように大きく変化するのか？ について考察してみる。

3.1.2 Ge (Li) 検出器による砂試料分析

Figure 1 に示す 10 か所の浜で砂試料を採取した。採取位置は Fig. 2 の L zone の任意の地点である。砂試料を宮城県原子力センターに送り、Ge (Li) 検出器によるカリウム、ウラン、トリウムの分析を依頼した。分析法の詳細は文献 12) を参照されたい。今回の分析では試料から¹³⁴Cs 及び¹³⁷Cs は検出されていない。

Figure 6 に分析結果を示す。また、地質調査総合センターのウェブサイト¹³⁾にある遠州灘の水深 110 m 以浅の海底堆積物のデータも併せて載せる。地質調査総合センターのデータは測定値を結んだ線で表した。カリウム、ウラン、トリウム濃度から線量率への変換は文献 11) に従った。水深を 110 m 以浅に絞った理由は

以下の通りである。西村ら¹⁴⁾によれば、暴風時の波が海底に届く限界の深さ、すなわち暴浪時波浪限界は水深 80 ~ 100 m とされている (晴天時波浪限界は 20 m)。つまり砂浜の形成にはこの深さまでの海底堆積物を考慮すればよいということである。本研究ではさらに 10 m 増やして余裕を持たせてある。

地質調査総合センターの海底堆積物データで注目すべきは次の点である。A 16 ~ B 9 の区間でカリウムの濃度がほぼ一定だが、ウランやトリウムは河口 (距離 0 m 地点) から離れるほど濃度が減少している。これは前述の予測モデルを支持する結果である。B 10 以東では前述のごとく海底が岩礁で構成されているため、他所の海底堆積物とは放射性核種濃度が異なる。

予測モデルが海底堆積物の距離変化をよく表すのに対して、Fig. 4 で見たように砂浜の線量率は海底堆積物に比べて凹凸が激しい。この原因は、砂が浜に打ち上げられた後の環境変化に

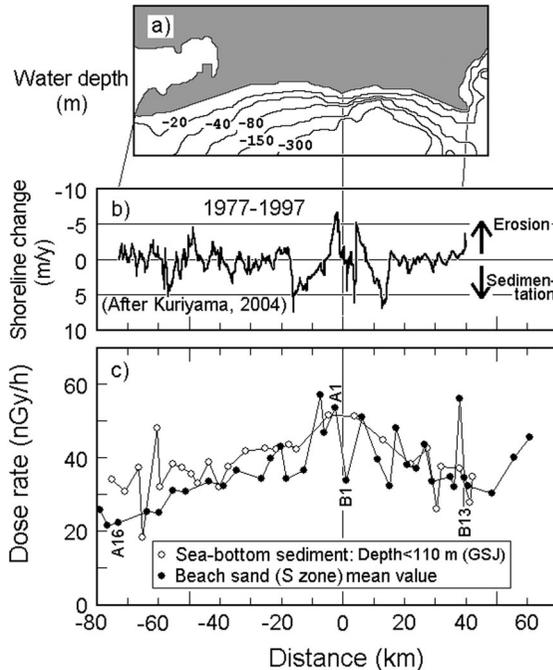


Fig.7 Relationship between water depth a), shoreline change b), and dose rate c).

よるものと考えるのが順当であろう。

次に砂浜で採取した10試料を見てみよう。ここでもカリウム濃度は河口からの距離にあまり影響されないことが見てとれる。特にA3のSBB (Fig.3参照), すなわち砂丘-後浜境界に存在した黒っぽい砂は, ウラン及びトリウム濃度がきわめて高いにもかかわらずカリウムは他所とほとんど同じである。また, 比較的砂丘寄りで採取したB3地点の砂試料も同様の傾向を示している。これはウラン及びトリウムが何らかの理由で濃縮されるメカニズムが働いていると考えられる。これを検討してみる。

3・1・3 砂浜間変動要因の推定

ウラン及びトリウムを含むジルコンやモナズ石などの重鉱物は比重が大きい。そのためカリウムを含む長石, 雲母などの軽鉱物に比べて海岸に打ち上げられにくい。比較的静穏なときは軽鉱物のみが浜に打ち上げられる。しかし, 台風・高潮などの暴浪時には軽鉱物と重鉱物がと

もに浜に打ち上げられる。打ち上げ後は, その浜が侵食傾向にあるのか堆積傾向にあるのかで軽鉱物と重鉱物の挙動が異なる。つまり比重の違いが挙動の違いに現れるはずである。

静穏時には侵食域では比重の小さい軽鉱物は流出し, 比重の大きい重鉱物は残留する。一方, 静穏時の堆積域では軽鉱物のみが堆積するのである。言い換えれば, 侵食域ではウラン及びトリウムが濃縮し, 堆積域では希釈される。これが河口から距離の近い領域で線量率の変動が大きくなる原因であると考えられる。この考えは, ジルコンやモナズ石などと比重が同程度である砂鉄(4.5-5.3)の挙動に関する文献¹⁵⁾によっても裏付けられる。

Figure 7c) はこれまでの線量率データの平均値をまとめたものである。また, Fig.7b) は栗山¹⁶⁾がまとめた海浜の侵食・堆積データである。河口近傍では汀線の凹凸がFig.7c)の線量率の凹凸とかなり対応している様子がわか

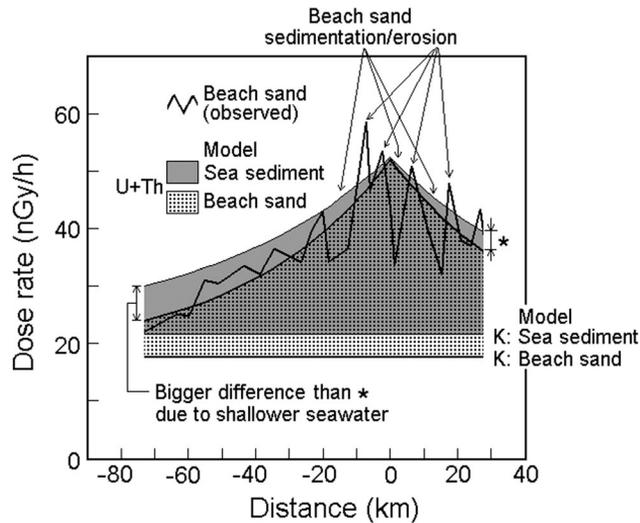


Fig. 8 A model for interpreting dose rate variation with distance from the Tenryu river mouth.

る。このような侵食・堆積域は一つの砂浜内でも観察されている¹⁷⁾。Fig. 5 で見た天竜川河口の例のように、わずか 3 km 以内で大きな変化をする理由も侵食・堆積状況による可能性が大きい。

もう一つ注目されるのは、河口から離れるにしたがって海底堆積物と砂浜の線量率の差が開いていくことである。詳しく見ると、天竜川河口西側（伊良湖方面）は東（御前崎方面）に比べて海底線量と砂浜線量の差が大きい。増井¹⁸⁾によれば遠浅の海岸では砂鉄の打ち上げ量が少ない。遠浅の海岸では、津波や高波のエネルギーは海底摩擦により陸に到達するまでに弱くなるからである。Figure 7 a) の海底深度分布を見ると伊良湖側は御前崎側に比べてかなり遠浅になっている。

以上の議論をモデル化してまとめると Fig. 8 のように表現できる。要約すれば、

- 海底堆積物中のカリウムによる線量率は距離に関してほぼ一定である (Fig. 8 で K と記してある 2 本の直線はカリウムによる線量率レベルを示す)。
- 海底堆積物のウラン及びトリウムによる線

量率は、河口からの距離にしたがって減少する (Fig. 8 の場合は指数関数で表している)。

- 打ち上げられた砂中のカリウム、ウラン及びトリウムによる線量率は海底堆積物による値より低い。
- 線量率の急激な砂浜間変動は主に海浜の侵食・堆積状況による。
- 遠浅の海岸ではウラン、トリウムの打ち上げ量が少なく、砂浜内変動も小さい。

3.2 二つの砂浜における浜内変動の詳細測定

前述のように、A 3 地点での砂丘-後浜境界では他のデータと比べてきわめて大きい線量率であった。これが例外事象なのかどうかを詳しく調査することにした。砂浜内変動の大きい、天竜川河口近傍の砂浜を選び、Fig. 2 の L zone 5 点を 25 m おきに 10 列、シンチレーション・カウンタで測定した。測定年月日は 2013 年 5 月 15 日である。Figure 9 がその結果である。

両浜ともに汀線から砂丘-後浜境界の方向に線量率が大幅に増加している。砂浜の測定にお

L zone data (N=50 each)

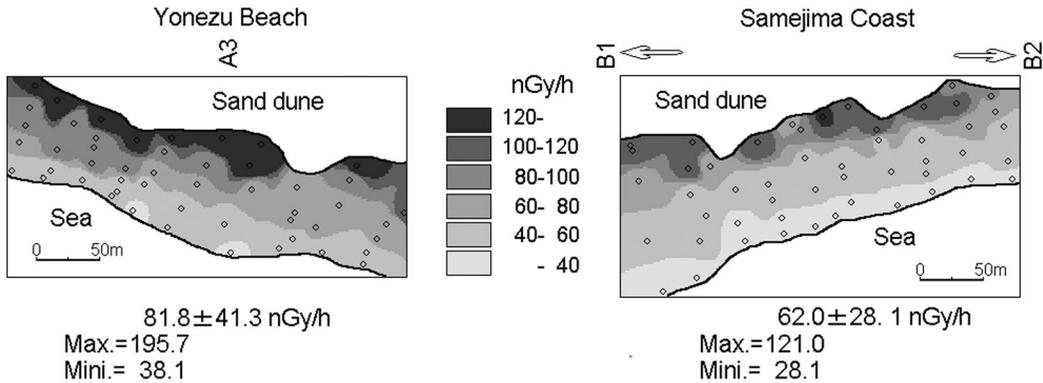


Fig. 9 Contour maps of dose rates at the two beaches. The open circles represent measuring points.

いては、どの位置を選ぶか、が重要であることが Fig. 9 からわかる。すなわち、この図は砂浜線量率の代表値を決めるための基礎資料となる。

汀線近傍で線量率が低い理由として、海水による遮蔽効果が考えられる。しかしながら、この効果は大きくない。媒質境界（この場合、海水-砂浜境界）から 2 m 程度離れると影響が無視できるからである¹⁹⁾。

では、なぜこれら二つの浜では汀線-砂丘方向の変化が大きいのであろうか？ このような放射性核種の濃度変化の傾向は Vassas et al.²⁰⁾ の報告にも見られる。彼らはこの理由を風による選別であろうと推定している。すなわち海から砂丘方向に吹く風は重鉱物を砂丘の麓に濃縮させ、軽鉱物を除去するというメカニズムである。彼らの論文よりもずいぶん前に増井¹⁸⁾が砂鉄について全く同様の考察をしている。

砂丘近傍の変化にはもう一つの考え方がある。原田²¹⁾の砂鉄に関する考察である。それによると、暴浪時に打ち上げられた砂鉄は、風力や雨水などのため浸食され、砂中を移動し、砂丘の頂上周辺から砂丘の斜面や谷にかけて濃集層ができる。

これらは独立した二つの考えである。風による分級の仮説については、砂丘-砂浜系のモデ

ル実験や計算機シミュレーションなどで検証する必要がある。また、砂中の移動の仮説を採るのであれば、砂丘から汀線までのいくつかの点で試掘を行い、放射性核種の深さ方向の分布を調査することが必須となる。

4. おわりに

以上の研究で砂浜における線量率変化の支配要因の一端を理解することができた。さらに精緻なモデルを構築するには以下の事項の詳しいデータが必要であると思う。

- (1) 遠州灘全浜の等間隔連続データ
- (2) 砂浜の侵食・堆積状況の最新データ
- (3) 砂浜における放射性核種濃度の深さ分布データ
- (4) 砂丘全域を含めた線量率の表面分布データ
- (5) 打ち上げ状況や侵食・堆積状況の季節変化データ

などである。さらに、後背地の土壌や河床・海底堆積物との因果関係に焦点を当てるつもりならば、試料の粒径分布のデータも必要となろう。この報告を機に砂浜研究が深まっていくことを願っている。

謝 辞

本研究において基本データである砂試料中の

カリウム, ウラン, トリウム濃度は宮城県原子力センターの石川陽一博士が分析して下さった。心より感謝いたします。

文 献

- 1) Sheidegger, E., *Theoretical Geomorphology*, Springer-Verlag, Berlin (1970)
- 2) 佐藤昭二, 入江 功, 杉山茂信, 天然放射能による漂砂の供給源および卓越方向の推定について, 第14回海岸工学講演会講演集, 300-305 (1967)
- 3) 西出 隆, 北本正明, 浅野敏夫, 宮井豊晴, 石川県内の地層・河川床・海浜における自然放射性核種の分布, 石川県教育センター紀要, 第33号, 1-68 (1988)
- 4) 早川博信, 五十嵐修一, 松浦廣幸, 海浜砂中およびその周辺土壤中の天然放射性核種, 福井県原子力環境監視センター所報, 12, 45-52 (1995)
- 5) Mohanty, A. K., Sengupta, D., Das, S. K., Vijayan, V. and Saha, S. K., Natural radioactivity in the newly discovered high background radiation area on the eastern coast of Orissa, *India, Radiat. Meas.*, 38, 153-165 (2004)
- 6) Veiga, R., Sanches, N., Anjos, R. M., Macario, K., Bastos, J., Iguatemy, M., Aguiar, J. B., Santos, A. M. A., Mosquera, B., Carvalho, C., Baptista Filho, M. and Umisedo, N. K., Measurement of natural radioactivity in Brazilian beach sands, *Radiat. Meas.*, 41, 189-196 (2006)
- 7) Withanage, A. P. and Mahawatte, P., Radioactivity of beach sand in the south western coast of Sri Lanka, *Radiat. Prot. Dos.*, 153, 384-389 (2013)
- 8) 服部千佳志, 板生考司, 寺田利博, 片野明良, 黒木敬司, 遠州・駿河海岸の広域土砂取支, 海岸工学論文集, 48, 611-615 (2001)
- 9) 松田秀晴, 湊 進, 主な造岩鉱物中の放射能(線量率)の測定, 名古屋工業技術研究所報告, 45, 609-614 (1996)
- 10) 大久保雅弘, 藤田至則, 地学ハンドブック, 築地書館 (1987)
- 11) 湊 進, 日本における地表 γ 線の線量率分布, 地学雑誌, 115, 87-95 (2006)
- 12) 文部科学省科学技術・学術政策局原子力安全課防災環境対策室, 放射能測定法シリーズ7, ゲルマニウム半導体検出器によるガンマ線スペクトロメトリー (1992)
- 13) 産業技術総合研究所地質調査総合センター, AIST 海と陸の地球化学図
<https://gbank.gsj.jp/geochemmap/>
- 14) 西村瑞恵, 渡辺大輔, 保柳康一, 波浪卓越沿岸の堆積層: 北部フォッサマグナ中期中新世の礫質堆積物から, 信州大学理学部紀要, 29, 71-77 (1995)
- 15) 野志保仁, 熊田貴之, 宇多高明, 小林昭男, 星上幸良, 和田信幸, 侵食海岸の前浜に見られる砂鉄高含有率砂層の形成機構, 海岸工学論文集, 51, 416-420 (2004)
- 16) 栗山善昭, 航空写真を用いた広域土砂収支図作成方法とその適用例, 港湾技術研究所資料, No.1078 (2004)
- 17) 村上 亘, 砂浜の侵食域・堆積域における地形断面の季節変化についての一考察, 季刊地理学, 53, 240-247 (2001)
- 18) 増井次夫, 砂鉄の堆積機構について, 横浜国立大学理科紀要, 第2類, 生物学・地学, 1, 79-85 (1952)
- 19) 湊 進, 環境放射線の走行サーベイ技術, 名古屋工業技術研究所報告, 44, 609-628 (1995)
- 20) Vassas, C., Pourcelot, L., Vella, C., Carpena, J., Pupin, J. -P., Bouisset, P. and Guillot, L., Mechanisms of enrichment of natural radioactivity along the beaches of the Camargue, France, *J. Environ. Radioactivity*, 91, 146-159 (2006)
- 21) 原田種成, 黒い砂, 地質ニュース, No.146, 12-27 (1966)

Abstract

Dose Rates of Beach Sands along the Enshu-nada Coast

Susumu MINATO and Michikuni SHIMO*: Radiation Earth Science Laboratory, 9-6 Yamaguchi-cho, Higashi-ku, Nagoya-shi, Aichi Pref. 461-0024, Japan, *Fujita Health University, 1-98 Dengakugakubo, Kutsukake-cho, Toyoake-shi, Aichi Pref. 470-1192, Japan

In order to understand the mechanism of beach-to-beach variations in dose rates, measurements at 35 sand beaches were carried out along the Enshu-nada coast

(a total of 140 km). The sand samples were collected at 10 beaches to obtain the concentrations of potassium, uranium and thorium by means of Ge(Li) spectroscopy. Factors affecting the variation in dose rates were discussed, incorporating these data with data of coastal sea-bottom sediments taken by the Geological Survey of Japan.

Two-dimensional measurements were performed at 50

locations each in two beaches near the Tenryu river mouth to know within-beach variations in detail. Contour maps of the data revealed a considerable regularity.

It was found from simple analyses of the data collected in this work that the dose rate levels at beaches are affected by the distance from the river mouth, erosion or sedimentation of beach, and depth distribution of seawater.