

東部遠州灘海岸の地形変化に及ぼす飛砂の影響

宇多 高明¹・内藤 慎也²・袴田 充哉³・八木 裕子⁴

¹正会員 (一財) 土木研究センターなぎさ総合研究所兼日本大学理工学部海洋建築工学科
(〒110-0016 東京都台東区台東 1-6-4)

E-mail: uda@pwrc.or.jp (Corresponding Author)

²静岡県交通基盤部河川砂防局河川企画課 (〒420-8601 静岡県静岡市葵区追手町 9 番 6 号)

E-mail: kasenki@pref.shizuoka.lg.jp

³静岡県交通基盤部河川砂防局河川海岸整備課 (〒420-8601 静岡県静岡市葵区追手町 9 番 6 号)

⁴正会員 (株) 東京建設コンサルタント環境防災事業本部海岸・海洋部
(〒170-0004 東京都豊島区北大塚 1-15-6)

遠州灘海岸東部を対象として、汀線と砂丘地の変遷データを基に長期間での飛砂量の変遷について調べた。地質学的スケールでの砂丘の発達に要した総飛砂量をもとに、陸向きの飛砂量のcalibrationを行い、その沿岸方向分布を定めた。この海岸では、波の作用による沿岸漂砂と、飛砂の沿岸成分が同じ方向となっている。1947年当時、沿岸方向の飛砂量は浜岡海岸で1.9万 m³/yrに達し、このため浜岡砂丘の発達を招いたこと、また沿岸方向の飛砂量は、全漂砂量に対して最大で25%を占めていたことが分かった。しかし、近年では沿岸方向の飛砂量は激減し、飛砂が海浜変形に及ぼす効果は小さくなった。

Key Words : windblown sand, Enshunada coast, long-term topographic changes, longshore sand transport

1. まえがき

天竜川河口の両翼に広がる遠州灘海岸は、天竜川からの大量の土砂供給を受けて河口デルタとして発達してきた。河口デルタが突出するがゆえに、波による砂輸送はネットで見ると河口の西(浜松)側では西向きの、東(竜洋)側では東向きの沿岸漂砂が卓越し、河川流出土砂は河口両翼の海岸に配分されてきた。しかしながら、遠州灘海岸では冬季に西寄りの強い風的作用を受けるために、上記沿岸漂砂による地形変化に飛砂による地形変化が重なり、波の作用のみによる地形変化と大きな違いが出ると考えられる。事実、遠州灘海岸西部では西寄りの風がネットの沿岸漂砂の向きと逆方向の飛砂をもたらすため、天竜川からの流出土砂はいったん西向きに移動した後、前浜～後浜では飛砂により東向きに運ばれ、東端の馬込川河口の西側隣接部に堆積して中田島砂丘を形成してきた¹⁾²⁾。一方、東部遠州灘海岸にあつては、西寄りの風による飛砂は東向きの沿岸漂砂とほぼ同一方向であり、東向きの砂移動を助長する方向となっている。また大部分の区域では海岸線に対して斜めに海から陸へと吹き込む方向に風が吹くため、浜岡砂丘をはじめとして広域で砂丘の形成を促してきた。宇多ら³⁾は、東部遠州

灘海岸の海浜変形に関し、汀線から陸域へと運び去られる飛砂は海浜砂量の低減をもたらすと考え、長期的な沿岸漂砂分布を求めている。しかしながら、飛砂は陸方向に運ばれると同時に汀線方向にも運ばれ、この飛砂は東向き沿岸漂砂を助長すると考えられるが、両者の砂移動が海浜地形変化に及ぼす影響については過去に検討されることがない。とくに東部遠州灘海岸では、戦後飛砂が著しかった海岸線付近の裸地を保安林区域に指定して飛砂防備が行われ、浜幅が激減してきたが、これにより飛砂量も低減したと考えられる。しかし海岸線付近の土地利用の変遷と飛砂量の変化についての研究は乏しい。そこで本研究では、遠州灘海岸東部を対象として長期間での飛砂量の変遷について実態データを基に解析した。

2. 空中写真の比較による海浜の変遷調査

東部遠州灘海岸における海浜とその背後に形成されている海岸砂丘の変遷を調べるために、海岸全体を網羅する1947～2019年撮影の5時期の空中写真を収集し、写真判読を行った。まず、図-1には2019年12月20日撮影の空中写真を示すとともに、御前崎より西向きに設定した

区域 A~F の位置を示す。ここに、区域 A は御前崎~尾高、B は尾高~浜岡原発、C は浜岡砂丘、D は菊川河口、E は東大谷川河口、F は弁財天川~浅羽海岸である。以下では、A~F ごとに 1947 年と 2019 年の空中写真の比較を行ったが、ここでは顕著な特徴が見られた区域の一例として、区域 C の判読結果を図-2 に示す。なお、2019 年の写真には 1947 年の汀線形状も示す。

区域 C の浜岡砂丘付近においては、内陸側に破線で示すように、現浜岡砂丘から西向きに伸びた飛砂防備保安林の外縁線より海側は漏斗状の裸地が広がり、飛砂が飛ぶ環境にあったが、2019 年までに飛砂防備林の造成が進み、浜幅は 1947 年の 910 m から 2019 年の 90 m まで激減し、漏斗状の裸地の東端の一部のみが浜岡砂丘として残された。同様な特徴が区域 A~E でも見られたが、西端に位置する区域 F の浅羽海岸では、汀線位置はほとんど変化しておらず、浜幅の変化は主に背後地での保安林外縁線の前進によってもたらされたことが分かった。

3. 風の特徴

NEDONeoWins1 (洋上風況マップ) ⁴⁾ によれば、図-1 に P で示す菊川河口での風速階級別の風向 (推算値、通年) は図-3 のように与えられる。東部遠州灘海岸は南に太平洋を望み、海岸線は中央部ではほぼ東西方向に、ま

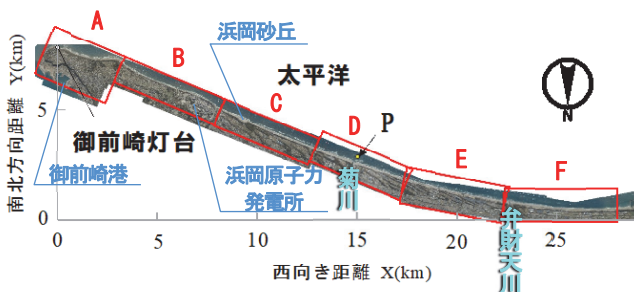


図-1 東部遠州灘海岸の空中写真，座標系および地域区分

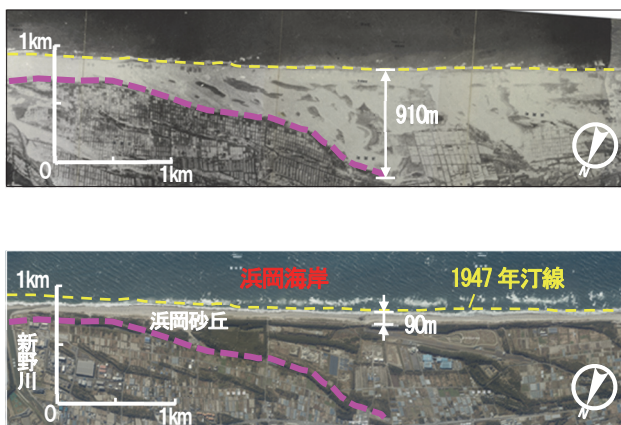


図-2 区域 C (浜岡砂丘付近) の空中写真の比較

た御前崎近傍ではほぼ WNW~ESE 方向に走行していることを考慮すると、N 寄りの風は陸風となって飛砂に関与せず、卓越風向は WNW で与えられる。しかしながら図-3 において WNW を挟む W と NW 方向の出現頻度を比較すると、W の出現頻度は NW 方向の頻度より高く、歪んだ分布形となっていることから、WNW より 11.25° 左回りの方向からの風向への偏りがあると考えられる。よって WNW 方向を中心として左回りに 11.25° 傾いた方向からの風が卓越すると推定される。

4. 汀線と保安林外縁線位置の変化

以下、汀線と保安林外縁線との距離を浜幅と定義して浜幅の変動を解析するが、その量は数百 m のオーダーとなり、潮位変動に伴う汀線位置の変化よりはるかに大きい。よって汀線位置は空中写真からの読み取り値とした。まず、空中写真より読み取った汀線形状と 1947 年基準での汀線変化量を図-4 に示す。菊川より西側区域では変動のみが目立っているのに対し、菊川の東側区域では侵食が進み、とくに新野川および箴川河口付近では 1947 年以降の汀線後退量は 100 m にも及んでいる。同様にして図-5 には保安林の外縁線位置の変化を示す。外縁線位置は、1947~1970 年に大きく海側へ前進していた。とくに東部の箴川から竜今寺川に至る 12 km 区間で保安林外縁線の海側への広がりが顕著であり、浜岡海岸では最大 680 m も海側へ広がった。これに対し、西部の浅羽海岸と東端の御前崎海岸では、汀線および保安林の外縁線位置の変化はほとんどない。

次に、図-6 の模式図に示すように、汀線より保安林外縁線まで、卓越風向に対し直角方向に測った距離を浜幅と定義し、沿岸方向に 10 m ピッチで浜幅を読み取った。なお、保安林が存在しない区間については、背後の道路

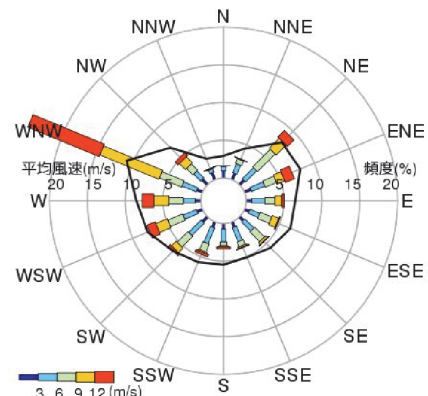


図-3 菊川河口地点における風配図 (推算値、通年) (NEDO NeoWins, 洋上風況マップ)⁴⁾

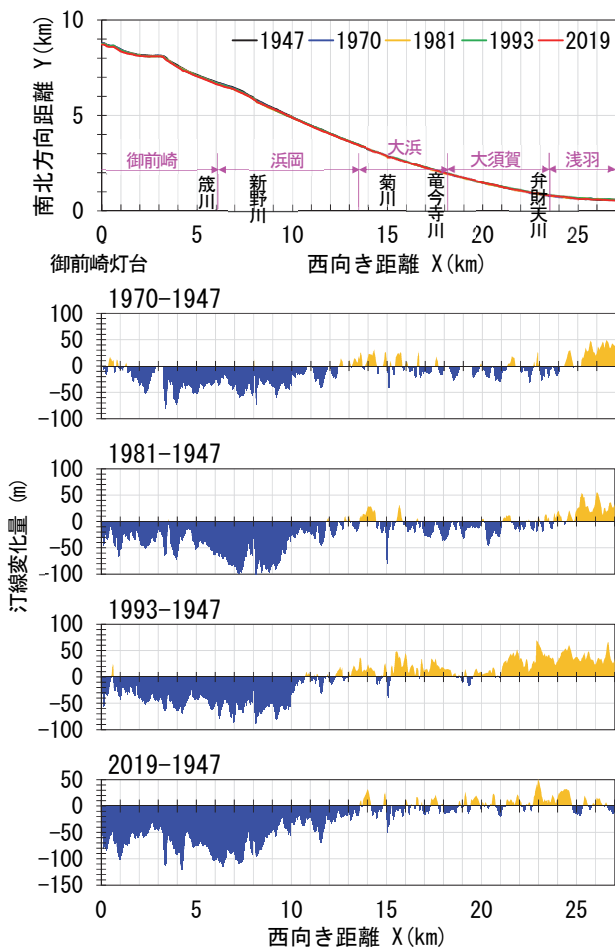


図4 海岸線位置の変化 (1947~2019年)

や海岸堤防等，土地利用状況に応じて海浜地と陸側の境界線を設定した。図-7には卓越風向をWNWとした場合における5時期の浜幅の沿岸方向を示す。これによれば，浜幅は場所的変動は大きいものの，1947年には浅羽海岸で150m程度であった浜幅は，弁財天川河口付近から東向きに広がり，浜岡海岸では最大910mの浜幅となり，そこから浜岡原発方面へと減少し，箴川の東側近傍では130m程度まで狭まる分布を有していた。その後，浜幅は1970, 1981年には急速に狭まり，場所によらず浜幅は約100mとなった。

図-1に示したように，海岸線の走行方向は浅羽海岸ではほぼE~W方向であるのに対し，浜岡原発付近ではほぼESE~WNWとなるので，同一方向の季節風が吹いたとしても，海岸線の方角と風向との相対関係により，陸風ないし海風となる。海岸砂丘は海から陸へと吹き込む風によってのみ成長できることを考えれば，季節風の方角と汀線とのなす角が重要となる。そこで季節風がWNW方向で与えられるとして海岸線の走行方向と風向とのなす角を求めた結果を図-8に示す。WNW方向の風と海岸線とのなす角度は，汀線方向に10m間隔で読み取った汀線位置より算出した上，場所的なノイズを消去するために沿岸方向に1km区間で移動平均を求め

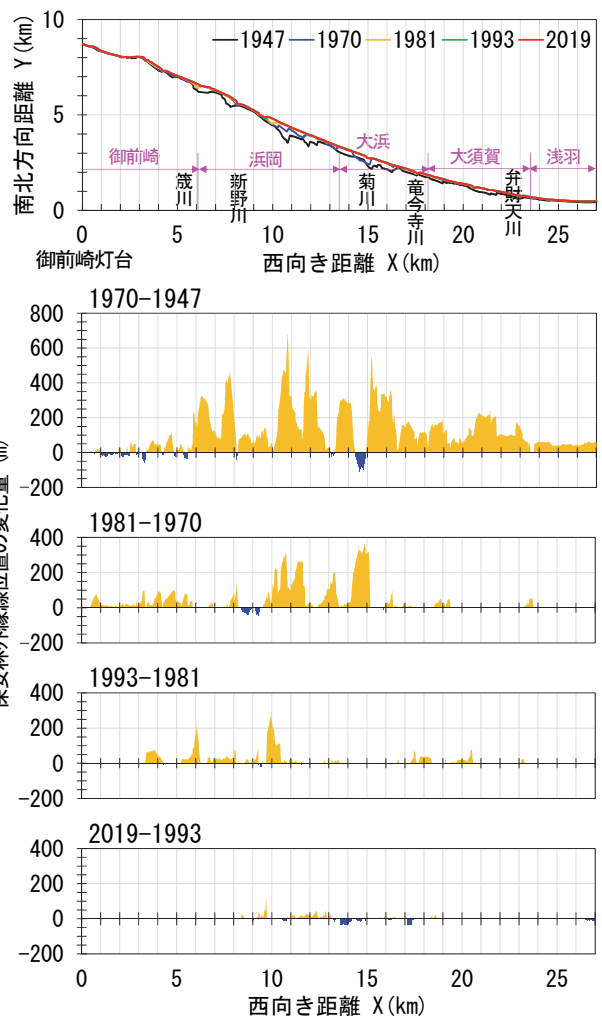


図5 保安林外縁線位置の変化 (1947~2019年)

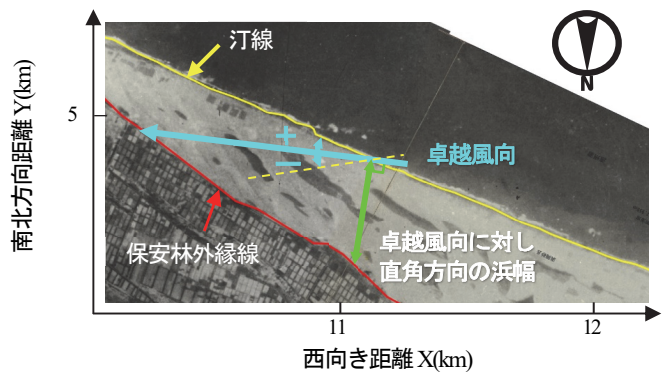


図6 卓越風向とそれに直角方向の浜幅の定義

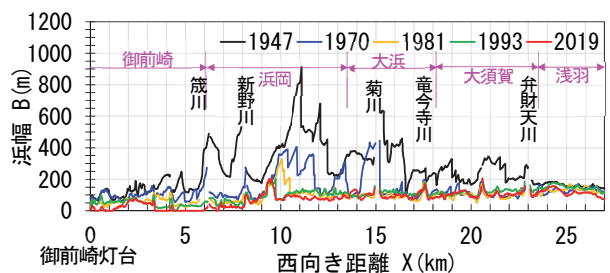


図7 WNW方向に対して直角方向の浜幅の分布

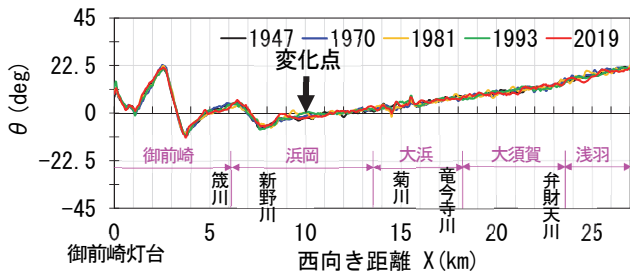


図-8 WNW方向と海岸線方向とのなす角の沿岸分布



図-9 自転車道背後保安林帯の堆砂状況（菊川左岸，2020年11月25日撮影）

て平滑化してある。この結果によれば、浜岡海岸の西端近くの $X=12\text{ km}$ を境に、西側の海岸ではほとんどの区域で海岸線方向と WNW 方向の風のなす角はプラスとなり、陸から海への風となって、大浜、大須賀海岸などでは海岸砂丘は発達できないことになる。風の卓越方向と汀線方向のなす角度がプラスからマイナスに変わる位置は、現存する浜岡砂丘の 2 km 西側に当たり、浜岡砂丘が大きく発達してきたことも説明できないし、また菊川周辺において自転車道への飛砂の堆積が著しく、自転車道が使用できない状況（図-9）も説明できない。

前述したように、図-3では WNW として区分される風向は実際には $W+11.25^\circ\text{ N}$ から $W+33.75^\circ\text{ N}$ の変域を有するが、実測風向は W 側に歪んでいることから、最も南側に傾いた方向としては $W+11.25^\circ\text{ N}$ となる。また、図-3に示したように、海岸線直角方向の飛砂量は、W～SW 方向の風の影響も受けるので、卓越風向の偏りにはこれらの方向からの風の影響の補正が含まれていると考えられる。そこで、この方向が卓越風の方向に等しいとして図-8と同様、風向と海岸線とのなす角 θ の分布を求めると図-10となる。この結果、陸風と海風となる区域の境界は、大須賀海岸の $X=21.5\text{ km}$ 付近となり、浅羽海岸では陸風であるが、それより東側の大部分の区域では海風となる事が分かる。図-11は $W+11.25^\circ\text{ N}$ 方向に対して直角方向に測った浜幅の分布を示す。この結果は弁財天川河口以東で砂丘の発達が著しいという既往研究

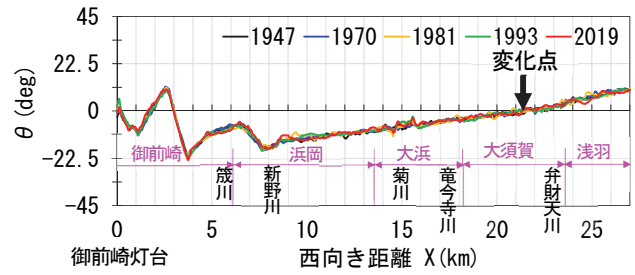


図-10 $W+11.25^\circ\text{ N}$ 方向と海岸線方向とのなす角の沿岸分布

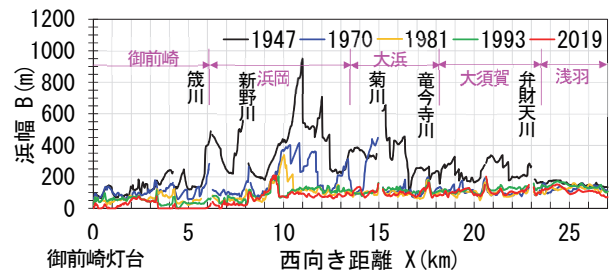


図-11 $W+11.25^\circ\text{ N}$ 方向と直角方向の浜幅の沿岸分布

結果³⁾と一致する。

5. 飛砂量の検討

卓越風向を $W+11.25^\circ\text{ N}$ とした時、この方向に対して直角方向に測った浜幅 B の分布が得られたことから、この結果を用いて飛砂量 Q について検討した。各地点での飛砂量は、浜幅に単位幅当たり飛砂量 q を乗じることにより得られる。现阶段では q は未知量であるが、単位幅当たり飛砂量は東部遠州灘海岸の海浜を構成し、飛砂となって運ばれる砂が場所によらず中砂・細砂から構成されており、またいずれの場所でも浜幅は 40 m はあり、飛砂が汀線から陸向きに運ばれる際 10 m 以上の広い助走区間のある条件を満足していること¹⁾²⁾、から、場所によらず一定値と見なすことができる。

さらに飛砂量は、海岸線と平行方向の成分と海岸線直角方向陸向き成分とに分けられる。これらのうち、海岸線と平行方向の飛砂量は、波による沿岸漂砂と同一方向の砂輸送である。一方、海岸線直角方向の成分は海岸砂丘の発達を促す成分である。飛砂量の沿岸方向と海岸線直角方向成分は、風の卓越方向 ($W+11.25^\circ\text{ N}$) と海岸線とのなす角 θ により、図-12の模式図のようになる。すなわち、飛砂量の沿岸方向成分は $B\cos\theta$ に、海岸線直角方向成分のうち、保安林外縁線を横切る飛砂量は $\sin\theta$ に比例することが分かる。図-13にはこれらの分布を示す。

単位幅あたりの飛砂量を q とすると
 ある断面で保安林外縁線を越える岸沖方向飛砂量: $q \sin \theta$
 ある断面を通過する沿岸方向飛砂量: $B \times q \cos \theta$

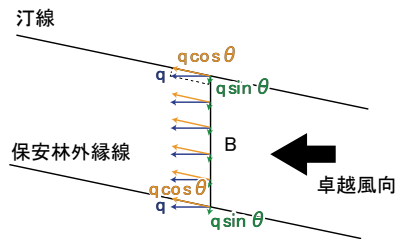


図-12 飛砂量の岸沖方向および沿岸方向成分

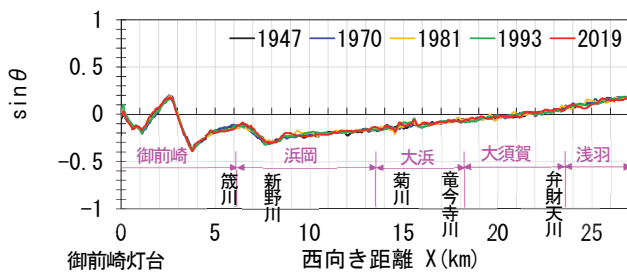


図-13 $\sin \theta$ と $B \cos \theta$ の沿岸分布

陸向きの飛砂量は、遠州灘海岸東部における地質学的スケールでの砂丘の発達に要した総飛砂量をもとに calibration が可能である。宇多ら³⁾は、東部遠州灘海岸の砂丘は、飛砂により内陸へ運ばれた砂が縄文海進最盛期以降の汀線の前進に伴って低地上に残されたものであるとし、砂丘の分布域と DEM データから砂丘を構成する総土砂量を $2.0 \times 10^8 \text{ m}^3$ と推定した。一方、鹿島ら²⁾によれば縄文海進期に内湾化した菊川河口部が砂州によって閉塞した時期が 3000~3500 年前以前とされていることから、砂丘は 3500 年前以降発達したとし、この年数で砂丘の総土砂量を除すことにより、飛砂量を $5.7 \text{ 万 m}^3/\text{yr}$ と算定した。この飛砂量は、図-14 に示すように御前崎海岸の $X=3 \text{ km}$ から大須賀海岸の $X=21.5 \text{ km}$ まで 18.5 km 区間において内陸へ向かう飛砂量の総和に等しいと考えられる。砂浜から陸側へ向かう飛砂量は、対象区域で風向風速が概ね一様で、および底質が概ね一様であると仮定すると、図-14 の陸向き飛砂の発生域における $\sin \theta$ の積分値に単位幅あたりの飛砂量 q を乗じたものとなる。よってこの区間での $\sin \theta$ の積分値を求め、上記の推定飛砂量 $5.7 \text{ 万 m}^3/\text{yr}$ をこの値で除すと、単位幅当たりの陸向

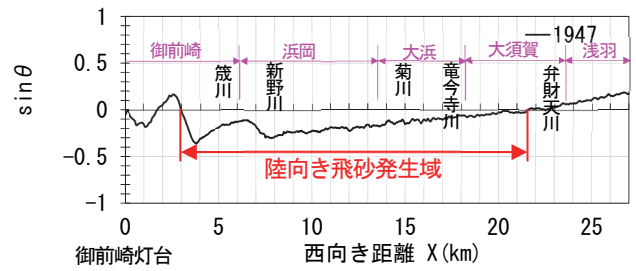


図-14 $\sin \theta$ の分布

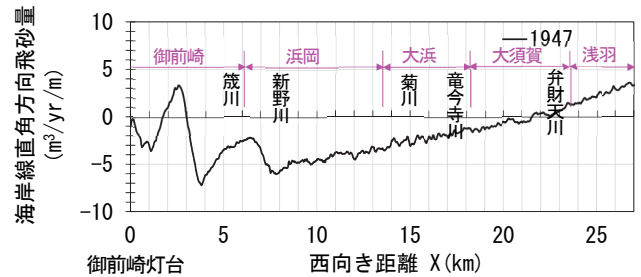


図-15 海岸線直角方向の飛砂量分布 (卓越方向: $W+11.25^\circ \text{ N}$)

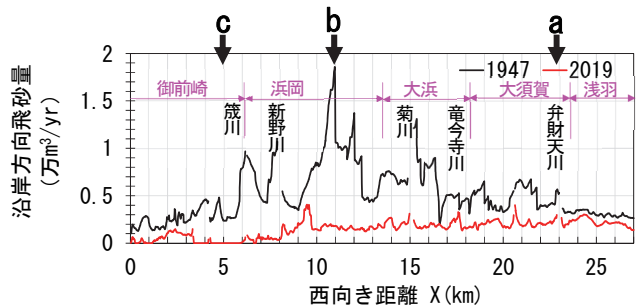


図-16 沿岸方向の飛砂量分布 (卓越方向: $W+11.25^\circ \text{ N}$)

き飛砂量 q は $19.9 \text{ m}^3/\text{m}/\text{yr}$ となった。このときの海岸線直角方向の飛砂量は図-15 に示すとおりである。

一方、算定された単位幅あたり飛砂量を図-11 の浜幅 $\times \cos \theta$ に乗じると、沿岸方向の飛砂量を算出することができる。1947 年および 2019 年の沿岸方向飛砂量分布を図-16 に示す。これによると、1947 年には現浜岡砂丘の西側で最大で $1.9 \text{ 万 m}^3/\text{yr}$ が飛砂として東向きに運ばれていたが、2019 年には沿岸方向に運ばれる飛砂量は $2000 \sim 4000 \text{ m}^3/\text{yr}$ まで激減したことが分かる。

6. 沿岸漂砂量と沿岸方向の飛砂量の比較

宇多ら³⁾は、空中写真から読み取った汀線変化量を基に、御前崎港での沿岸漂砂量を 0 とし沿岸方向西向きに海浜面積を積分して漂砂の移動高を乗じ、さらに経過年数で除すことにより沿岸漂砂量分布を推定した。その上で地盤沈降と内陸へ向かう飛砂損失の補正を行い、補正された沿岸漂砂量分布を求めた。図-17 には 1946~1966 年と 1977~2008 年の補正後の漂砂量分布を示す。

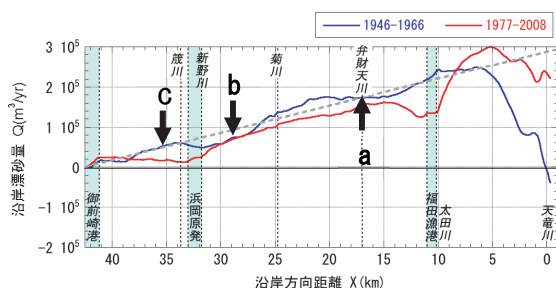


図-17 天竜川河口～御前崎間における沿岸漂砂量分布³⁾

この図によれば、大きな地形変化が行われる前の1946～1966年では、沿岸漂砂量は弁財天川河口での17.2万 m^3/yr から菊川河口での13.7万 m^3/yr へと緩やかに低下した後、新野川付近の5.0万 m^3/yr へと急減する分布形を有していた。一方、図-16において1947年当時の沿岸方向の飛砂量は、平均的に見ると弁財天川河口(a)から浜岡海岸中央(b)までは増大し、地点bでは最大値1.9万 m^3/yr を有した後、bから箴川の東1.2km地点(c)までに急減し、地点cでは0.2万 m^3/yr となっていた。

図-17の沿岸漂砂量分布は汀線変化をもとに推定されたものであるから、図-16に示す沿岸方向の飛砂量の効果が結果に含まれている。この場合、地点bでの沿岸漂砂量7.6万 m^3/yr のうち沿岸方向の飛砂量成分1.9万 m^3/yr は全体の25%を占めており、地形変化に対して無視できない効果を有していたと考えられる。しかしながら、沿岸方向の飛砂量は、2019年には新野川河口以西ではほぼ2000 m^3/yr の一定値で、新野川の東側ではほぼ0と大きく減少している。したがって沿岸漂砂に対して飛砂量の加算もなくなったと考えられる。以上より、新野川河口近傍では元々東向きの沿岸漂砂量が小さかったのに対し、東向きの飛砂量はかなり大きく、沿岸漂砂量に占める飛砂量の割合が相対的に大きかった。しかし、現在では飛砂による砂の供給量が激減する一方、東向きの沿岸漂砂による砂の流出は続くため、図-4に示す新野川以東での著しい汀線後退が生じたと考えられる。

7. まとめ

遠州灘海岸東部における地質学的スケールでの砂丘の発達に要した総飛砂量をもとに、陸向きの飛砂量のcalibrationを行い、陸向きに運ばれる飛砂量の沿岸方向分布を定めることができた。また、従来見落とされていた点として、この海岸では波の作用による沿岸漂砂と飛砂の沿岸成分が同じ方向となっており、飛砂が沿岸漂砂を助長させることが分かった。沿岸方向の飛砂量は1947年当時浜岡海岸では1.9万 m^3/yr に達し、このため浜岡砂丘の発達を招いたこと、また、沿岸方向の飛砂量は、全漂砂量に対し最大で25%を占めていたことが分かった。しかし近年では沿岸方向の飛砂量は場所によらず2000～4000 m^3/yr のほぼ一定値となり、飛砂が海浜変形に及ぼす効果は小さくなった。

参考文献

- 1) 横田拓也, 宇多高明, 小林昭男, 星上幸良, 勝木厚成, 野志保仁: 飛砂も考慮した遠州灘海岸の地形変化予測, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.76, No.2, pp.I_469-I_474, 2020.
- 2) 横田拓也, 宇多高明, 小林昭男, 星上幸良, 勝木厚成, 野志保仁: 海岸砂丘群形成の実測と予測 -遠州灘に面した浜松篠原海岸の例-, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.76, No.2, pp.I_240-I_245, 2020.
- 3) 宇多高明, 三波俊郎, 石川仁憲, 伊藤祐介, 白石慎重, 佐藤純一郎: 御前崎海岸の海浜変形に及ぼす地殻変動の影響, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.69, No.2, pp.I_666-I_670, 2013.
- 4) NEDO NeoWinds (洋上風況マップ) (2020年12月19日参照)
http://app10.infoc.nedo.go.jp/Nedo_Webgis/index.html
- 5) 鹿島薫, 長澤良太, 宮崎隆: 静岡県菊川平野における完新世の海水準変動に関する資料, 第四紀研究, Vol.24, No.1, pp.45-50, 1985.

(Received March 17, 2021)

(Accepted July 22, 2021)

EFFECT OF AEOLIAN SAND TO TOPOGRAPHIC CHANGES ALONG EAST ENSHU-NADA COAST

Takaaki UDA, Shinya NAITO, Mitsuya HAKAMATA and Hiroko YAGI

Long-term change in windblown sand was estimated on the basis of the changes in shoreline and width of sand dune using aerial photographs. Based on the total volume of windblown sand necessary for the development of sand dunes in the geological time scale at the Enshunada coast, the rate of windblown sand toward inland was calibrated as well as the determination of longshore distribution of landward windblown sand. Along this coast, longshore component of windblown sand was estimated to be $1.9 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ at maximum, which accounts for 25% of all the longshore sand transport.