

漂砂と構造物

Coastal structures and Longshore sand transport

宇多 高明

Takaaki UDA

1. まえがき

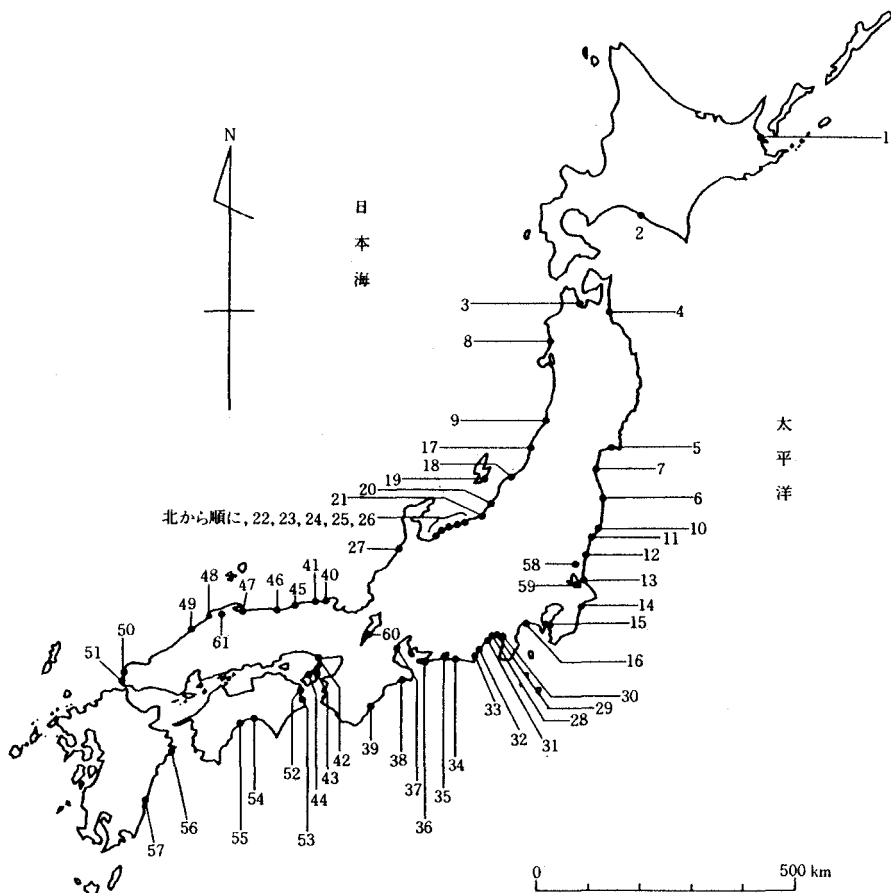
わが国の現地海岸を眺めると、沿岸域開発に伴う防波堤などの施設の建設に伴って構造物周辺で海岸侵食が進んだり、あるいは河川流下土砂量の減少に起因して河口周辺域の汀線が急速に後退した例が非常に目立っている。そして20～30年前には全国各地で見られた、昔ながらの白砂青松の砂浜海岸は急速に失われてしまった。海岸侵食に対する対策も取られてきたのであるが、対策の規模が小さすぎたり、あるいは対策の実施時期が遅すぎるなどの理由で、対策が効果を上げることができず、護岸と消波ブロックによって覆われた海岸に変貌を遂げた砂浜海岸の延長は膨大な長さに達する。

このような漂砂に伴う問題として、漂砂と構造物の関係は海岸工学上最も重要なテーマの一つとして古くから取り上げられてきたが、現象が複雑であるがゆえにその説明は十分ではないのが現状である。また、一般に海浜変形について論じる際には、便宜上岸沖方向漂砂と沿岸漂砂とに分けて議論されることが多いが、従来の見解は小規模な2次元移動床模型実験の成果を重視するあまり、岸沖方向漂砂にアクセントを置きすぎていたように思われる。その理由として、最近、筆者が行った日本全国の57海岸と4湖岸における、深淺測量データや空中写真を利用した実態データの分析によれば、わが国で著しい海岸侵食が起きたほとんどの事例は、沿岸漂砂の作用によるものであることが明らかにされたからである。その意味では、現地データの分析においては従来の考え方の適用は十分注意すべきことが指摘される。このことから、ここでは沿岸漂砂の作用を重視し、これと構造物との関係について実態論的に論じてみたい。なお、わが国の海岸侵食の実態論については文献¹⁾に詳述してあるのでこれを参照されたい。

2. 沿岸漂砂量の全国実態

沿岸漂砂については、防波堤の建設などにより卓越沿岸漂砂が阻止された場合、漂砂上手側の堆積域、または下手側の侵食域の土砂量変化から沿岸漂砂量を求めることができる。また、防波堤が伸ばされて波の遮蔽域が形成されると、波の遮蔽域外から遮蔽域内へと向かう沿岸漂砂が発生するので、波の遮蔽域内での堆積土砂量からも沿岸漂砂量の推定が可能である。表-1には全国調査から得られた沿岸漂砂量を一括して示す。また図-1には海岸の位置を示す。番号は、全海岸・湖岸の通し番号(1～61)にしたがっている。沿岸漂砂量の算定を行った海岸数は29、湖岸は3、合計で32である。一方向の沿岸漂砂が卓越する海岸であっても、沿岸漂砂の供給条件が変化する(例えば、海食崖の侵食対策が行なわれる、あるいは洪水により河川から土砂が流出するなど)ので、沿岸漂砂量の観測期間を明示してある。同様に、波の遮蔽構造物が伸ばされたため、その背後域で土砂が堆積する場合には、防波堤が大きく伸びた直後に漂砂量は大きく、時間経過とともに沿岸漂砂量は減少するから、表-1では観測期間中で最も大きな沿岸漂砂が観測された時期を選んでいる。表-1は、筆者自身が集めたデータであるが、そのほか既往の研究としては次の5例がある。

①三村・加藤²⁾は、1979～1985年における大洗港周辺の侵食・堆積域を示し(原著: p.363, 図-4)、大洗港の西防波堤から約1.7kmの区間で大規模な堆積が生じ、それより南側では侵食傾向にあることを明らかにした。北向きの沿岸漂砂量の沿岸分布を計算(原著: p.366, 図-9)し、堆積・侵食域が分かれる西防波堤から約1.5km地点での沿岸漂砂量が、 $2.3 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{yr}$ (1979～1981年)、 $3.0 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{yr}$ (1981～1985年)



番号	海岸・湖岸の名称	番号	海岸・湖岸の名称	番号	海岸・湖岸の名称
1	北海道野付崎權津海岸	21	新潟県直江津海岸	42	兵庫県東播磨海岸
2	北海道日高海岸	22	新潟県米魚川・青海海岸	43	兵庫県淡路島内田海岸
3	青森県青森海岸	23	新潟県鯉不知海岸	44	兵庫県淡路島西岸
4	青森県三沢海岸	24	新潟県市振海岸	45	鳥取県岩美海岸
5	宮城県石巻湾沿岸	25	富山県境海岸	46	鳥取県鳥取海岸
6	福島県北部～宮城県南部沿岸	26	富山県下新川海岸	47	鳥取県皆生海岸
7	宮城県仙台湾沿岸	27	石川県石川海岸	48	鳥取県差海川河口部
8	秋田県能代沿岸	28	静岡県蒲原海岸	49	鳥取県直江津海岸
9	山形県沿岸	29	静岡県富士川河口部	50	山口県八ヶ浜海岸
10	茨城県五浦海岸	30	静岡県富士海岸	51	山口県綾羅木海岸
11	茨城県神岡上海岸	31	静岡県静岡・清水海岸	52	徳島県沿岸(吉野川河口～栗津港)
12	茨城県阿字ヶ浦海岸(砂丘)	32	静岡県駿河海岸	53	徳島県今津坂野海岸
13	茨城県鹿島湖沿岸	33	静岡県相良片浜海岸	54	高知県高知海岸(物部川河口～瀬戸湾)
14	千葉県九十九里海岸	34	静岡県竜洋海岸	55	高知県高知海岸(仁淀川河口～桂浜)
15	千葉県富津岬	35	静岡県浜名湖今切口周辺	56	大分県黒島海岸
16	神奈川県湘南・西湘海岸	36	愛知県赤羽根漁港周辺	57	宮崎県宮崎海岸
17	新潟県神林海岸(岩船港周辺)	37	三重県鈴鹿川河口部	58	茨城県瀧沼観音鼻
18	新潟県新潟海岸	38	三重県御座海岸	59	茨城県霞ヶ浦浮島地区
19	新潟県佐渡島湾ノ瀬鼻	39	三重県七里御浜海岸	60	滋賀県琵琶湖旧野洲川河口部
20	新潟県柏崎港～荒浜海岸	40	京都府浅茂川海岸	61	鳥取県宍道湖島ヶ崎砂州
		41	京都府久美浜海岸		

図-1 調査対象の現地海岸(57海岸)と湖岸(4湖岸)の位置と名称

表-1 沿岸漂砂量の一覧（筆者による）

番号	名 称	沿岸漂砂量 (m^3/yr)	観測期間	番号	名 称	沿岸漂砂量 (m^3/yr)	観測期間
1	北海道野付崎標津海岸	8.6×10^4 2.7×10^4	1965-1970	23	新潟県親不知海岸	3.7×10^4	1979-1985
2	北海道日高海岸	5.4×10^3 1.3×10^5 (4.0×10^4 3.0×10^5)	1982-1990 1982-1990 1948-1956 1948-1956	24	新潟県市振海岸	8.0×10^4	1964-1976
3	青森県青森海岸	5.7×10^3	1977-1979	30	静岡県富士海岸	1.0×10^5	1968-1990
4	青森県三沢海岸	2.3×10^5 2.5×10^5	1961-1986 1961-1986	31	静岡県静岡・清水海岸	1.0×10^5 1.35×10^5	1983-1993 1988-1992
5	宮城県石巻湾沿岸	3.2×10^4 3.0×10^4	1969-1986 1969-1981	32	静岡県駿河海岸	8.0×10^4	1970-1982
6	福島県北部 ～宮城県南部沿岸	1.7×10^5 1.2×10^5	1983-1991 1975-1988	34	静岡県竜洋海岸	2.3×10^5	1981-1991
8	秋田県能代沿岸	1.8×10^5	1986-1990	35	静岡県浜名湖 今切口周辺	1.2×10^5	1963-1975
11	茨城県神岡上海岸	5.4×10^4	1984-1987	36	愛知県赤羽根漁港 周辺	5.8×10^4	1963-1973 1977-1986/ 平均
13	茨城県鹿島灘沿岸	2.3×10^5	1981-1984	37	三重県鈴鹿川河口部	2.7×10^4	1973-1980
14	千葉県九十九里海岸	8.0×10^4	1979-1986	38	三重県御座海岸	2.8×10^3	1980-1985
15	千葉県富津岬	1.7×10^4	1985-1994	45	鳥取県岩美海岸	1.6×10^4	1984-1987
17	新潟県神林海岸	2.6×10^5	1979-1980	47	鳥取県皆生海岸	6.7×10^4 1.2×10^5	1971-1988
20	新潟県柏崎港 ～荒浜海岸	1.5×10^5	1980-1992	55	高知県高知海岸 (仁淀川河口～桂浜)	1.4×10^5	1990-1991
21	新潟県直江津海岸	6.1×10^4	1969-1985	57	宮崎県宮崎海岸	1.1×10^5	1984-1990
22	新潟県糸魚川・青海海岸	5.8×10^4	1983-1988	58	茨城県瀧沼親沢鼻	1.0×10^2	1983-1988
				59	茨城県霞ヶ浦浮島地区	1.64×10^2	1983-1985
				60	滋賀県琵琶湖田野洲川河口部	1.58×10^3	1971-1991

に達するとした。

②土屋・芝野³⁾は、富山県の宮崎漁港の改修、とくに東防波堤の延長に伴って沿岸漂砂が阻止され、下新川海岸の侵食が助長されたことを明らかにするとともに、侵食土砂量の経年変化（原著：p.486，図-10）から、1958～1967年での沿岸漂砂量が約 $5.6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ とした。

③橋本⁴⁾は、富士海岸に関し、漂砂の移動高を10mと求め、さらに汀線変化の理論

式への現地データの当てはめから、沿岸漂砂量を $1.25 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{yr}$ と推定した。

④井島ら⁵⁾は、渥美半島の先端にある伊良湖港の、防波堤着工直前の1948年から1957年までの深浅図から、防波堤の西側への堆積土砂量の変化を計算（原著：p.99，図-4）し、この間、平均で $(5 \sim 10) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ の土砂が堆積したことを明らかにした。そして、この土砂は、夏季のうねり、とくに台風による波によって遠州灘海岸から伊良湖岬の先端を回り込んできた沿岸漂砂が堆積したもの、と結論した。

⑤矢島ら⁶⁾は、宮津湾の中で、天橋立の北東側に位置する日置港の1969～1981年の浚渫土砂量（原著：p.307，表-2）の平均から、沿岸漂砂量を約 $3.5 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{yr}$ と推定した。

表-2には以上の既往文献から得られた沿岸漂砂量をまとめて示す。表-1,2および図-1によれば、外海・

表-2 沿岸漂砂量の一覧（既往の文献による）

番号	海 岸 名	沿岸漂砂量 (m^3/yr)	観測期間	出 典
1	茨城県大洗海岸	2.3×10^5 3.0×10^5	1979-1981 1981-1985	三村・加藤(1987)
2	富山県下新川海岸	5.6×10^4	1958-1967	土屋・芝野(1973)
3	静岡県富士海岸	1.25×10^5	1959-1973	橋本(1976)
4	愛知県渥美半島 (伊良湖港)	$(5 \sim 10) \times 10^4$	1948-1957	井島ら(1958)
5	京都府宮津湾天橋立	3.5×10^3	1969-1981	矢島ら(1982)

外洋に面した海岸での沿岸漂砂量は $10^5 \text{ m}^3/\text{yr}$ のオーダーを有することが分かる。また、富津岬、石巻湾、鈴鹿川河口部など、半島などにより波が遮蔽されている海岸では $10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ のオーダーに、さらに天橋立や御座海岸など著しく波が遮蔽された海岸では $10^3 \text{ m}^3/\text{yr}$ のオーダーとなる。この沿岸漂砂量は規模の大きな湖である琵琶湖での値と同じオーダーである。さらに規模の小さな湖では $10^2 \text{ m}^3/\text{yr}$ の沿岸漂砂量を有している。

表-1において、防波堤のような波の遮蔽構造物が伸ばされた場合の最大沿岸漂砂量（波の遮蔽域外から遮蔽域内へ向かう）について整理しておくことは有意義と考え、表-1の中からとくに波の遮蔽構造物の建設にともなう最大沿岸漂砂量をまとめたのが表-3である。表には波の遮蔽域を形成する港湾・漁港名も合わせて示す。これによると、全国9海岸の事例での沿岸漂砂量は、 $3.0 \times 10^4 \sim 2.5 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{yr}$ の範囲で変化しており、全平均値は $1.36 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{yr}$ である。また平均計測期間は約7年であるから、この間での隣接海岸での平均侵食量は $9.5 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{yr}$ すなわち約100万 m^3 の土砂量の欠損が生じたことになる。

3. 波による地形変化の限界水深の全国実態

沿岸漂砂量の算定とともに、波による地形変化の限界水深を海（湖）浜縦断面形の変化から算出することができる。ここに、波による地形変化の限界水深とは、文献¹⁾に多くの事例を述べたように、ある期間（数年以上と比較的長い期間）を通じて平均的に見たとき、工学的に有意な地形変化が見られなくなる限界の水深と定義している。ここではこれらの全国実態をまとめてみる。まず、表-4には、個別海岸の検討で求められた波による地形変化の限界水深 h_c を示す。ここに、原著¹⁾ではそれぞれの判断の基礎となった海（湖）浜縦断面形の変化図を示すが、ここではそれらは省略する。また、表-5には既往文献から求めた波による地形変化の限界水深をまとめて示す。

既往データの中で、松富ら⁹⁾は秋田県南部で建設中の島式漁港周辺における、1990～1991年の深淺図を示しており、これによると、冬季には-4～-6mにおいて沿岸砂州の形成が見られるが、-7、-8mの等深線は沿岸方向にほぼ平行に伸びている。一方、-9m以深には切り込まれた海底谷の地形が見られる。これらのことから、この海岸における波による地形変化の限界水深は松富も指摘しているように、ほぼ8mにあると言える。また、合田・佐藤¹¹⁾は、愛知県渥美半島の先端にある伊良湖港の防波堤建設時の等深線の変化を示している。そして、その中で、1954、1957年の等深線の形状を比較すると、防波堤の南側において-8m以浅の等深線が防波堤に沿ってくさび状に前進していることから、伊良湖岬の先端を回って北向きに沿岸漂砂が移動しており、その場合の波による地形変化の限界水深がほぼ8mにあると判断できる。

表-4,5によれば、外海・外洋に面した海岸における波による地形変化の限界水深は10m程度であり、内海では2～3m、さらに湖では1m程度となる。表-4の中でとくに秋田県能代沿岸、山形県沿岸はそれぞれ14,15m以上と非常に深い所まで地形変化がみられるし、また鳥取県鳥取海岸でも14mと非常に深い。同程度の深さを持つものとしては、静岡県浜名湖今切口周辺が大きいのが、ここは浜名湖の入退潮流の影響があるため除外できる。したがって、上述の3海岸はいずれも日本海側に位置しているのが特徴である。そして、同じく日本海に面していても、新潟海岸のように佐渡島による波の遮蔽効果や、富山県の下新川海岸のように

表-3 防波堤による波の遮蔽域付近での最大沿岸漂砂量の一覧

番号	名 称	港 名	沿岸漂砂量 (最大値)(m^3/yr)	期 間 (年)
5	宮城県石巻湾沿岸	石巻港	3.0×10^4	1969～1981(12)
8	秋田県能代沿岸	能代港	1.8×10^5	1986～1990(4)
11	茨城県神岡上海岸	大津漁港	5.4×10^4	1984～1987(3)
13	茨城県鹿島灘沿岸	大洗港	2.3×10^5	1981～1984(3)
17	新潟県神林海岸	岩船港	2.6×10^5	1979～1980(1)
20	新潟県柏崎港～荒浜海岸	柏崎港	1.5×10^5	1980～1992(12)
21	新潟県直江津海岸	直江津港	6.1×10^4	1969～1985(16)
45	鳥取県岩美海岸	田後港	1.6×10^5	1984～1987(3)
57	宮崎県宮崎海岸	宮崎港	1.1×10^5	1984～1990(6)
			1.37×10^5 (平均値)	平均 7年

表-4 波による地形変化の限界水深の一覧（筆者による）

番号	名 称	波による地形変化の 限界水深： h_c (m)	番号	名 称	波による地形変化の 限界水深： h_c (m)
1	北海道野付崎標準海岸	4	32	静岡県駿河海岸	8
2	北海道日高海岸	6	33	静岡県相良片浜海岸	3
3	青森県青森海岸	2	34	静岡県竜洋海岸	10
4	青森県三沢海岸	8	35	静岡県浜名湖今切口周辺	13
5	宮城県石巻沿岸	8	37	三重県鈴鹿川河口部	2.5
6	福島県北部～宮城県南部沿岸	9	38	三重県御座海岸	1.7
7	宮城県仙台湾沿岸	8	39	三重県七里御浜海岸	10
8	秋田県能代沿岸	14↑	40	京都府浅茂川海岸	5
9	山形県沿岸	15↑	42	兵庫県東播磨海岸	1.5 (江井ヶ島) 1.5 (谷八木)
11	茨城県神岡上海岸	9	43	兵庫県淡路島内田海岸	4.5
13	茨城県鹿島灘沿岸	8	45	鳥取県岩美海岸	10
15	千葉県富津岬	2～3	46	鳥取県鳥取海岸	14
16	神奈川県湘南・西湘海岸	7	47	鳥取県皆生海岸	8
17	新潟県神林海岸	7	48	島根県差海川河口部	6
18	新潟県新潟海岸	8	50	山口県八ヶ浜海岸	5.5
20	新潟県柏崎港～荒浜海岸	11	52	徳島県沿岸(吉野川河口～栗津港)	7
21	新潟県直江津海岸	8	53	徳島県今津坂野海岸	7
22	新潟県糸魚川・青海海岸	8	54	高知県高知海岸 (物部川河口～浦戸湾)	11
23	新潟県親不知海岸	9	55	高知県高知海岸 (仁淀川河口～桂浜)	10
24	新潟県市振海岸	9	56	大分県黒島海岸	2
25	富山県境海岸	8	57	宮崎県宮崎海岸	10
26	富山県下新川海岸	9	58	茨城県潮沼親沢鼻	0.7
28	静岡県蒲原海岸	10	59	茨城県霞ヶ浦浮島地区	0.5 (浮島1号) 0.5 (浮島2号)
29	静岡県富士川河口部	8	60	滋賀県琵琶湖旧野洲川河口部	1.2
30	静岡県富士海岸	12	61	島根県宍道湖島ヶ崎砂州	0.5
31	静岡県静岡・清水海岸	7 (静岡) 7 (清水)			

能登半島などの遮蔽効果も受けない海岸であることが特徴であって、いずれの海岸も冬季風浪の作用を直接的に受ける海岸である。

沿岸漂砂を制御するための各種施設の先端水深は、波による地形変化の限界水深を一つの判断基準として設定されるが、この水深がこんなに深いことは、例えば波の遮蔽構造物が建設されて隣接域で侵食が生じた場合、その対策が非常に困難なことを意味している。

一般に沿岸漂砂量 Q は、Savage型の漂

表-5 波による地形変化の限界水深の一覧（既往の文献による）

番号	海 岸 名	波による地形変化の 限界水深 (m)	出 典
1	北海道日高海岸 (静内海岸)	5	尾崎(1974) : p.138, 図-4
2	青森県三沢海岸	8	佐藤ら(1972) : p.8, 図-3
3	秋田県秋田海岸	8	松富ら(1992) : p.344, 345, 図-4, 6
4	茨城県常陸那珂海岸	8	三村ら(1990) : p.357, 図-8
5	富山県下新川海岸	4.5	土屋・芝野(1973) : p.485, 図-7
6	愛知県渥美半島 (伊良湖港)	8	合田・佐藤(1972) : p.369, 図-5, 6

砂量式を用いれば次のように表される。

$$Q = k(EC_g)_b \cdot \sin\theta_b \cdot \cos\theta_b \quad (1)$$

ここに、 k ：漂砂量係数、 $(EC_g)_b$ ：砕波点における波のエネルギーフラックス、 θ_b ：砕波角である。いま、砕波点での砕波波高を H_b とし、長波近似が成立するとすれば、

$$(EC_g)_b \sim H_b^{5/2} \quad (2)$$

であって、さらに波による地形変化の限界水深 h_c と H_b の間にも比例関係が成立するので、

$$(EC_g)_b \sim h_c^{5/2} \quad (3)$$

となる。したがって式(1)の絶対値 $|Q|$ は、 $h_c^{5/2}$ に比例するはずである。このことから、前節で示した沿岸漂砂量の絶対値と h_c の関係を調べたのが図-2である。図示するように $|Q|$ は h_c の5/2乗に比例している。このことは、波による地形変化の限界水深の大きい場所ではその限界水深の5/2乗に比例して沿岸漂砂量が增大することを意味しているから、ある地点での波による地形変化の限界水深が推定されれば、これから沿岸漂砂量のオーダーの推定が可能であることを意味している。

いくつかの海岸の底質中央粒径の水深方向分布調査¹⁾によると、底質中央粒径は汀線付近で最大値を取ったのち、水深方向に単調に減少し、波による地形変化の限界水深付近では、水深によらず0.2～0.15mmの粒径となる場合が多い。このことは、逆に底質中央粒径の水深方向分布を調べることにより、波による地形変化の限界水深を推定できる可能性を示している。そこで、底質中央粒径の水深方向分布の測定されている全ての事例を表-6にとりまとめた。事例数は全体で16である。表には、沖合で水深によらずほぼ一定となる下限粒径、最大粒径、および汀線～浅い海域での粗な粒径が水深とともに減少し、ほぼ水深によらず0.2～0.15mm程度のほぼ一定となる限界の水深（以下、粒径変化の限界水深と呼ぶ）をまとめて示す。この限界水深は、三重県鈴鹿川河口部のように湾奥に位置する海岸では-2mと浅いが、外海・外洋に面した海岸ではほぼ-10m程度の値を有している。この特徴は、先に表-4,5に示した波による地形変化の限界水深と同様な傾向である。そこで、表-4,5に示した波による地形変化の限界水深と、粒径変化の限界水深の関係を調べたのが図-3である。1データを除いて両者は1対1の線にのっている。1対1の線からずれるのは、秋田県能代沿岸の場合である。これは-14m以深でも活発な地形変化が見られる海岸であって、他の海岸のように汀線付近で地形変化が活発な海岸と特性が異なる海岸である。以上のことから、図-3の相関はかなり良好と判断されよう。

波による地形変化の限界水深を定めるには、一般には深浅測量を繰り返し行い、これより明瞭な地形変化が見られなくなる限界の水深を定める必要があるが、これには少なくとも数回の深浅測量を行う必要があり、

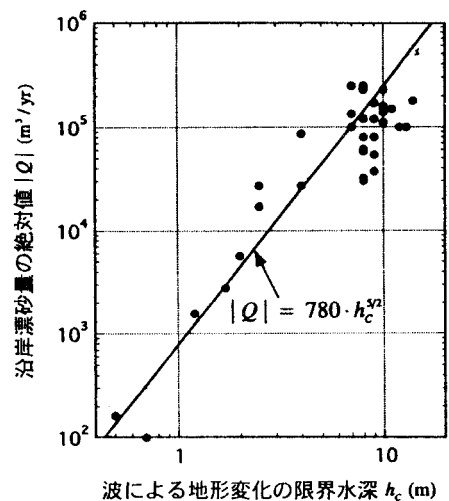


図-2 沿岸漂砂量の絶対値と波による地形変化の限界水深の関係

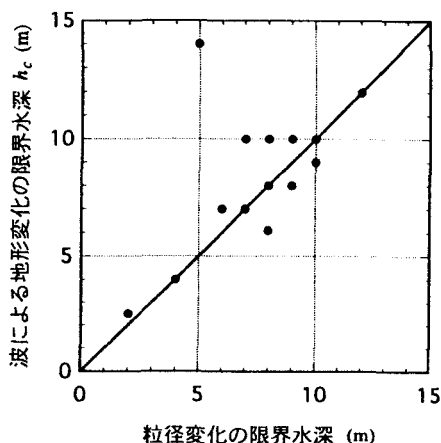


図-3 波による地形変化の限界水深と粒径変化の限界水深の関係

しかも沿岸漂砂による地形変化が活発ではなく、単に変動のみ卓越する場合には推定精度の低下は免れない。これに対し、底質中央粒径の水深方向分布は一回のみでも有効なデータが取れ、さらに、底質採取は厳密に一直線上の測線で行ったり、あるいはある特定の水深での値を取る必要がないから、観測は非常に容易である。このことから、波による地形変化の限界水深を定める方法として非常に有効である。また、地形変化の限界水深と、その海岸における沿岸漂砂量の間には図

-2の関係が成立するから、底質中央粒径の水深方向分布から粒径変化の限界水深を求め、それを地形変化の限界水深と置けば、沿岸漂砂量のオーダーも推定できることになる。

4. 漂砂の移動高の全国実態

表-7には各海岸ごとに得られた漂砂の移動高(海浜断面積の変化量と汀線変化量の相関を求めたときの回帰係数)を一括して示す。漂砂の移動高は外海・外洋に面した海岸の場合に10m程度であるが、波浪のエネルギーレベルの低い内海や湖では1~2m程度となる。さらに図-4は前出の波による地形変化の限界水深と漂砂の移動高の関係を調べたものである。データにはばらつきはあるが、漂砂の移動高 h は $(1.0 \sim 1.3)h_c$ の範囲にある。

ところで、沿岸漂砂量の水深方向分布 $\xi(z)$ が、波のうちあがり高さから波による地形変化の間で生じ、この間で

$$\xi(z) = 2/h_c^3 \{1/2 \cdot h_c - z\} \cdot (h_c + z)^2 \quad (4)$$

表-6 粒径変化の限界水深の一覧

番号	名 称	下限粒径 (mm)	最大粒径 (mm)	限界水深 (mm)
1	北海道野付崎標津海岸	0.15	3.0	4
5	宮城県石巻湾沿岸	0.15	0.55	8
6	福島県北部～宮城県南部沿岸	0.15	0.25	10
7	宮城県仙台湾沿岸	0.2	0.95	9
8	秋田県能代沿岸	0.15	4.5	5
16	神奈川県湘南・西湘海岸	0.2	15	7
17	新潟県神林海岸	0.13	10	6
22	新潟県糸魚川・青海海岸	0.18	80	9
25	富山県境海岸	0.4	19	9
28	新潟県蒲原海岸	0.8	18	8
30	静岡県富士海岸	0.6	11	12(No.75 除く)
34	静岡県竜洋海岸	0.2	13	9
37	三重県鈴鹿川河口部	0.25	4.2	2
39	三重県七里御浜海岸	0.15	71	7(No.2)
48	島根県釜谷川河口部	0.2	0.48	8
55	高知県高知海岸 (仁淀川河口～桂浜)	0.4	30	10
全平均0.27(全16データ)				

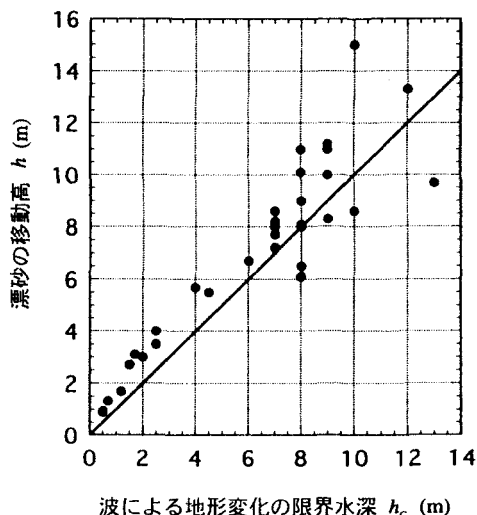


図-4 漂砂の移動高と波による地形変化の限界水深の関係

表-7 漂砂の移動高の一覧

番号	名 称	漂砂の移動高(m)	番号	名 称	漂砂の移動高(m)
1	北海道野付崎標準海岸	5.7	31	静岡県静岡・清水海岸	7.7(静岡)
2	北海道日高海岸	6.7			7.2(清水)
3	青森県青森海岸	3.0	32	静岡県駿河海岸	8.0
4	青森県三沢海岸	11	35	静岡県浜名湖今切口周辺	9.7
5	宮城県石巻湾沿岸	6.1	37	三重県鈴鹿川河口部	3.5
6	福島県北部～宮城県南部沿岸	11	38	三重県御座海岸	3.1
11	茨城県神岡上海岸	8.3	42	兵庫県東播海岸	2.7(江井ヶ島)
13	茨城県鹿島灘沿岸	6.5			2.7(谷八木)
15	千葉県富津岬	4	43	兵庫県淡路島内田海岸	5.5
16	神奈川県湘南・西湘海岸	8.2	52	徳島県沿岸(吉野川河口～栗津港)	8.0
17	新潟県神林海岸(岩船港周辺)	8.6	55	高知県高知海岸(仁淀川河口～桂浜)	8.6
21	新潟県直江津海岸	9			(期間限定)
23	新潟県親不知海岸	10.7	57	宮崎県宮崎海岸	15
24	新潟県市振海岸	11.2	58	茨城県溜沼親沢鼻	1.34
25	富山県境海岸	10.1	59	茨城県霞ヶ浦浮島地区	0.95(浮島1号)
29	静岡県富士川河口部	8.1			0.89(浮島2号)
30	静岡県富士海岸	13.3	60	滋賀県琵琶湖旧野洲川河口部	1.7

なる関係が成立するとすれば、漂砂の移動高 h は h_R と h_c により次式のように表される¹⁾。

$$h = h_R + 1/2 h_c - h_R \cdot (h_R/h_c)^2 - 1/2 h_R \cdot (h_R/h_c)^3 \quad (5)$$

しかし、実際には沿岸漂砂量の水深方向分布は急勾配の場合は式(4)が成立するとしても、勾配が緩くなれば分布形が変化すること、また、現地海岸の海浜縦断面形の変化からの計算では、浜崖が形成された場合、汀線変化量は小さくても海浜断面積が大きくなるので、この場合漂砂の移動高が見かけ上大きく評価されることなどから、式(5)よりも大きめとなると考えられる。

5. バーム高と波による地形変化の限界水深の関係

海(湖)浜縦断面形の変化において、前浜上に土砂が堆積する場合バームが形成される。そこで縦断面形の変化からバーム高 h_R を読みとった。バームは何段も形成されることがあるが、最も陸側のものとして、高さを読み取ったのが表-8である。また図-5には、 h_R と波による地形変化の限界水深の関係を示す。両者の間には、ほぼ次式が成立する。

$$h_R = 0.32 h_c \quad (6)$$

すなわち、 h_R は h_c の約1/3である。このことは、波に

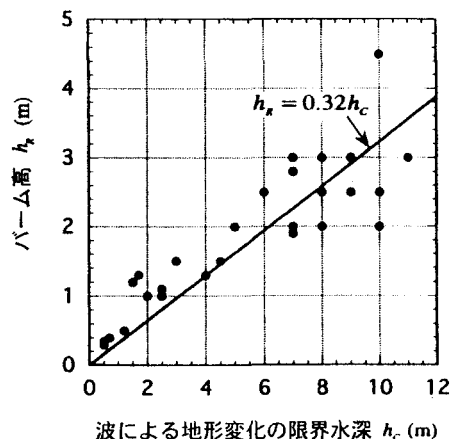


図-5 バーム高と波による地形変化の限界水深の関係

表-8 バーム高の一覧

番号	名 称	バーム高： h_R (m)	番号	名 称	バーム高： h_R (m)
1	北海道野付崎標津海岸	1.3	33	静岡県相良片浜海岸	1.5
2	北海道日高海岸	2.5	34	静岡県竜洋海岸	2～3
3	青森県青森海岸	1	37	三重県鈴鹿川河口部	1.1
4	青森県三沢海岸	2.5	38	三重県御座海岸	1.3
5	宮城県石巻湾沿岸	2	40	京都府浅茂川海岸	2
6	福島県北部～ 宮城県南部沿岸	3	42	兵庫県東播海岸	1.2
11	茨城県神岡上海岸	2.5	43	兵庫県淡路島内田海岸	1.5
13	茨城県鹿島灘沿岸	2.5	45	鳥取県岩美海岸	2
15	千葉県富津岬	1	53	徳島県今津坂野海岸	2
16	神奈川県湘南・ 西湘海岸	1.9	54	高知県高知海岸 (物部川河口～浦戸湾)	3
17	新潟県神林海岸	2.8	55	高知県高知海岸 (仁淀川河口～桂浜)	4～5 ($h_c=10\text{m}$)
24	新潟県市振海岸	3	57	宮崎県宮崎海岸	2
25	富山県境海岸	3	58	茨城県漕沼親沢鼻	0.4
26	富山県下新川海岸	3	59	茨城県霞ヶ浦浮島地区	0.35
29	静岡県富士川河口部	3	60	滋賀県琵琶湖旧野洲川 河口部	0.5
31	静岡県静岡・清水海岸	3	61	島根県六道湖島ヶ崎砂州	0.3
32	静岡県駿河海岸	3			

よる地形変化の限界水深（そこはまた粒径変化の限界水深でもある）は、およそバーム高の3倍付近にあることを意味している。このことは、逆に、波による地形変化の限界水深や、その海岸において生じ得る沿岸漂砂量のオーダーがバーム高から推定されることになる。正確には、バーム高は前浜材料の粒径や入射波の周期にも依存するが、上述の結果は実用的にはかなり有効な情報と言える。

6. 具体的応用法

海岸侵食の対策や、海岸利用の促進のための養浜工などの設計において上述の現地データを利用する方法について考えてみたい。例えば、海岸侵食が進んでいる海岸で、侵食対策案について検討することとする。しかも過去から深浅測量データなどが十分集積されていない海岸で設計をしなければならないとする。この場合、まず底質調査を行い、 d_{50} の水深方向分布を求めることがすすめられる。この場合、底質のサンプリングは水深方向に厳密に一定間隔であったり、あるいは一直線上で行う必要はない。例えば、水深方向に0.5mピッチでサンプリングを行うこと、という仕様ではなく、多少観測測線は曲がっていてもよい。重要なのは、水深方向には、想定される波による地形変化の限界水深より十分深いところまで、十分密な間隔で測定し、測定時の水深を記録すればよいことである。 d_{50} の水深方向分布が得られれば、粒径変化の限界水深が求められる。この値は、波による地形変化の限界水深とほぼ等しい。したがって、このデータのみから波による地形変化の限界水深の推定ができる。

また、多少精度は落ちるが、バーム高を測れば、それから波による地形変化の限界水深の推定が可能である。さらに重要と考えられるのは、すでに日本の沿岸（湖岸含む）をほぼ網羅した形で、波による地形変化の限界水深が明らかにされているので、ある海岸で設計を行うとき、その海岸でデータがなくとも、その海岸の両隣りの海岸での値から概略の数値が想定されることがあげられる。

このような方法は、例えば発展途上国における技術援助を行う際にも利用可能であろう。すなわち、ある海岸、そこでは例えば地形図と空中写真が一枚だけしかないとする。そのような海岸であっても、上述の方法を適用すれば経費をかけずに重要な情報が得られるし、地形図と空中写真から海岸線形状を判読すれば卓越波の方向や沿岸漂砂の卓越方向の判断が可能である。

7. 今後の侵食対策のあり方

従来より海岸保全対策として多く用いられてきた突堤、離岸堤、ヘッドランドなどの施設の設置水深は、高々数mであって、内湾や内海の波浪条件が比較的静穏な海岸を除けば、波による地形変化の限界水深（外海にあっては10m程度の値を持つ）と比較して浅い。このことは、両端に沿岸漂砂を阻止する施設の設置されたある区間からの沿岸漂砂の流出を完全に防止して静的に安定な海浜を造ることは、原理上は可能であっても、実際にはそれは困難なことを示している。すなわち、例えば h_c が-8mの海岸に先端水深が3~4mのヘッドランドを建設した場合、その先端を越えて沿岸漂砂の流出はその後も続くことになる。このような場合、沿岸漂砂の上手側からの土砂供給が存在しなければ当該海岸では次第に侵食が進んで行かざるを得ない。したがって多くの海岸では養浜による土砂投入を同時に考えなければならない事態に必ず至る。しかも養浜砂は次第に流出するので、消耗的と言われるが、それでもそれをし続けなければ、海浜の侵食は止まらないことになる。それでも養浜を行わなければ状況は悪くなるから、従来のように構造物を造るだけでなく、養浜を組み合わせた方法が取り得るように仕組みを変えて行かなければならない。

また、沿岸に大規模な防波堤や人工島が建設される場合、そのスケールを考えれば各種構造物の先端水深は少なくとも約10mに達するはずである。この場合、例えば波の遮蔽域が形成されて波の遮蔽域外から遮蔽域内へと沿岸漂砂の移動が起こる。そのとき、沿岸漂砂は外海に面した海岸ではほぼ-10m付近までの範囲で起こる。したがって、小規模な構造物を設置して土砂の流出を防止しようとしても、結局は土砂の流出が続くことを意味する。これを構造物により防ぎ、前浜の消失を防ぐには究極的には利便施設と同じ規模である-10m付近まで延びた施設を作らない限り土砂流出は止められないことになる。その場合には侵食を防止する施設が新たに建設されたことによって、その隣接海岸で再び侵食が繰り返され、沿岸域が大規模な施設だらけになるであろう。したがってこの点から見ても、たとえコストはかかったとしても、養浜との組み合わせを行う必要がある。その場合、養浜した砂がすぐには遮蔽域内へ運ばれないよう、各種施設との組み合わせで養浜を行う方法について技術的な面から検討すべきであろう。

従来、防波堤など波の遮蔽構造物の背後に土砂が堆積した場合、その堆積土砂は多くの場合埋め立て地に取り込まれることがほとんどであった。その場合波の作用で移動し得る沿岸漂砂であったものが、再び波の作用では移動することのない土砂となることは明白であって、海浜にある移動可能な土砂の純損につながることはまちがいない。その量は上述のように大量であって、しかもそのうち汀線付近にある粒径の大きい成分が集中的になることから、一連海岸での侵食を考えれば重大な結果をもたらすことは間違いない。これを防止するには、海岸全体を広い視野で眺め、「海のものは海へ返す」という方針で対策を進める必要がある。すなわち、浚渫土砂は他の用途に使うのではなく、再び養浜材として用いることである。

8. 結 論

ここで明らかになった主要な項目について整理すると以下のようである。

- ①全国29海岸および3湖岸で沿岸漂砂量を算定したところ、外海・外洋に面した海岸での沿岸漂砂量は $10^5 \text{ m}^3/\text{yr}$ のオーダーに、半島などにより波が遮蔽されている海岸では $10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ のオーダーに、さらに著しく遮蔽された海岸では $10^3 \text{ m}^3/\text{yr}$ のオーダーにあり規模の大きな湖である琵琶湖での値と同じオーダーである。さらに規模の小さな湖では $10^2 \text{ m}^3/\text{yr}$ の沿岸漂砂量をもつことが明らかになった。
- ②波の遮蔽構造物の建設にともなう最大沿岸漂砂量をまとめたところ、全国9海岸の事例では沿岸漂砂量は

$3.0 \times 10^4 \sim 2.5 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{yr}$ の範囲で変化しており、全平均値は $1.36 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{yr}$ である。また平均計測期間は約7年であるから、この間での隣接海岸での平均侵食量は $9.5 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{yr}$ すなわち約100万 m^3 の土砂量の欠損が生じたことになる。

③外海・外洋に面した海岸における、波による地形変化の限界水深は-10m程度であり、内海では-2~-3m、さらに湖では-1m程度となる。しかし秋田県能代沿岸、山形県沿岸ではそれぞれ-14,-15m以上と非常に深い所まで地形変化がみられるし、また鳥取県鳥取海岸でも-14mと非常に深い。上述の3海岸はいずれも日本海側に位置しているのが特徴である。そして、同じ日本海に面していても、新潟海岸のように佐渡島による波の遮蔽効果や、富山県の下新川海岸のように能登半島などの遮蔽効果も受けない海岸であることが特徴であって、いずれの海岸も冬季風浪の作用を直接的に受ける海岸である。

④ $|Q|$ は h_c の5/2乗に比例することが見いだされた。このことは、波による地形変化の限界水深の大きい場所ではその限界水深の5/2乗に比例して沿岸漂砂量が増大することを意味しているから、ある地点での波による地形変化の限界水深が推定されれば、これから沿岸漂砂量のオーダーの推定が可能であることを示す。

⑤漂砂の移動高 h は $(1.0 \sim 1.3)h_c$ の範囲にある。

⑥底質中央粒径の水深方向分布の測定されている16事例を整理したところ、中央粒径が、汀線～浅い海域での粗な粒径から水深とともに減少し、ほぼ水深によらず0.2~0.15mm程度でほぼ一定となる限界水深（粒径変化の限界水深と定義）が見出された。この限界水深は、波による地形変化の限界水深とほぼ一致する。

⑦バーム高と波による地形変化の限界水深との間には $h_R = 0.32 h_c$ なる関係が成立する。このことは、バーム高から地形変化の限界水深や粒径変化の限界水深の推定が可能なること、さらにはその海岸で生じ得る沿岸漂砂量の絶対値のオーダーも推定可能なことを示している。

⑧現地海岸における沿岸漂砂量や波による地形変化の限界水深などを簡単に推定できる方法を示した。この方法は、データがない海岸において各種構造物の設計を行う際役立つと考えられる。

参考文献

- 1) 宇多高明 (1997) : 日本の海岸侵食、山海堂、p.442.
- 2) 三村信男・加藤 始 (1987) : 大洗海岸における近年の地形変化と沿岸漂砂量、第34回海岸工学講演会論文集、pp.362-366.
- 3) 土屋義人・芝野照夫 (1973) : 下新川海岸の海浜過程について、第20回海岸工学講演会論文集、pp.483-488.
- 4) 橋本 宏 (1976) : 海浜変形モデルの富士海岸への応用、第23回海岸工学講演会論文集、pp.218-220.
- 5) 井島武士・佐藤昭二・早瀬幸一 (1958) : 伊良湖港の漂砂について、第5回海岸工学講演会講演集、pp.97-106.
- 6) 矢島道夫・上藺 晃・矢内常夫・山田文雄 (1982) : 天橋立におけるサンドバイパス工法の適用、第29回海岸工学講演会論文集、pp.304-308.
- 7) 尾崎 晃 (1974) : 日高静内海岸の海浜過程について、第31回海岸工学講演会論文集、pp.135-139.
- 8) 佐藤昭二・河西輝夫・田中則男・入江 功 (1972) : 小川原湖海岸の漂砂について、第19回海岸工学講演会論文集、pp.7-11.
- 9) 松富英夫・工藤 崇・池田正人 (1992) : 秋田県南部海岸での漂砂動向、海岸工学論文集、第39巻、pp.341-345.
- 10) 三村信男・加藤 始・永井紀彦・堀井昭宏 (1990) : 常陸那珂海岸における海岸地形変化の特性、海岸工学論文集、第37巻、pp.354-358.
- 11) 合田良実・佐藤昭二 (1972) : 海岸・港湾、土木学会編、彰国社、p.396.