

天橋立におけるサンドバイパス工法の適用

矢島道夫*・上 蘭 晃**・矢内常夫***・山田文雄****

1. はじめに

海岸事業は、高潮・津波対策による生活基盤の安全性の確保、海岸侵食の防止による国土の保全、海岸環境の保全と向上を主要な目標として、全国各地でその進捗が図られている。一方、全国的に進行している海岸侵食による海浜喪失を防止するとともに、増大する海浜レクリエーション需要等に対応した海岸環境の整備が新たな課題となっている。このため、従来のような突堤、離岸堤等を設置したハードな海岸を、養浜によるソフトな海岸に転化させることが、海岸事業に要請されている。このような要請に答える対策の一つとしてサンドバイパス工法が考えられる。

サンドバイパス工法とは、養浜工の一種であり、人工構造物等によって遮断され、その移動を阻止されて構造物の上手側に堆積した土砂を、下手側海岸に人工的に移動させるものであり、自然現象の代替方式として考えられた工法である。この工法は、外国では多くの事例があるが、わが国においてはまだ本格的に事業化された例はない。しかし、漂砂と海浜変形の観点から極めて理にかなった方法であり、その実施可能性を有する海岸も数多い。サンドバイパス工法を実施するために解決すべき技術的諸課題を検討するため、運輸省第三港湾建設局と京都府は、天橋立海岸において共同して一貫した体系の調査・研究を実施した。本論文は、54年度から56年度の3年間にわたって実施したこれら調査の成果をとりまとめたものである。

2. 天橋立の概要

天橋立は、京都府北部の宮津湾内に位置し、古来日本三景の一つとして有名である。天橋立は、海

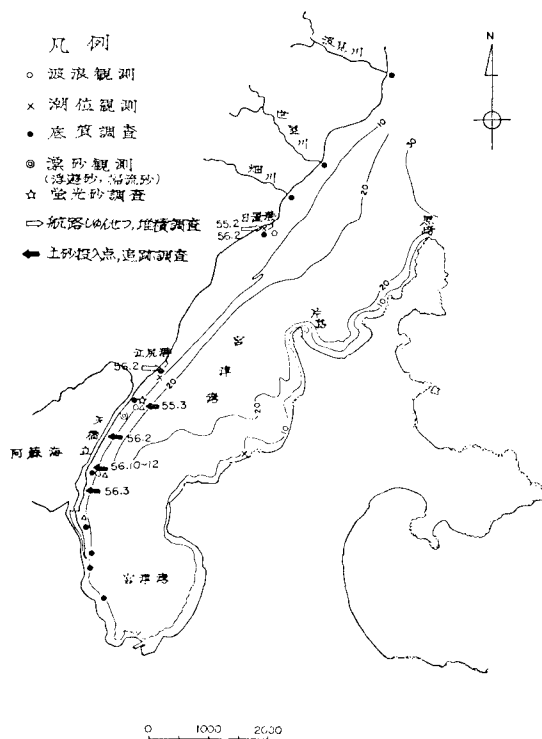


図-1 天橋立海岸周辺図

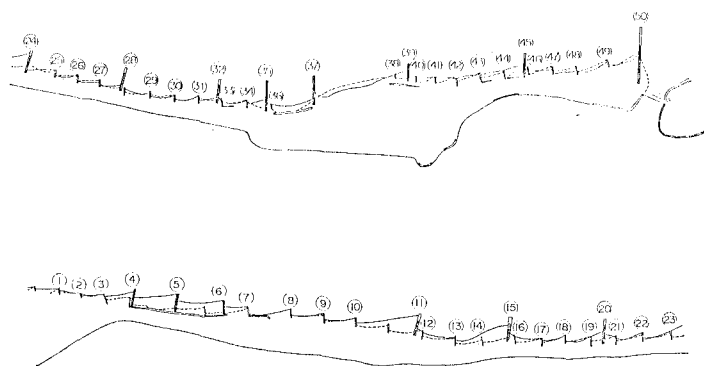


図-2 天橋立汀線変化図

* 正会員 工務 運輸省第三港湾建設局神戸調査設計事務所次長
 ** 正会員 運輸省第三港湾建設局企画課補佐官
 *** 正会員 (前)運輸省第三港湾建設局舞鶴港工事事務所長
 **** 正会員 京都府土木建築部港湾課課長補佐

岸工学用語でサンドスピット(砂し)と呼ばれるもので、日本海から侵入する波浪による漂砂が堆積して形成されたものであり、江尻より南西に長さ約 3.6 km、幅約 20 ~ 170 m で延びている。(図-1 参照)

当海岸では、侵食を防止するため、昭和 26 年以降長さ 15m 程度の突堤が約 50m 間隔で築造された。しかしこの小突堤では漂砂を完全に止めることができず、その後 46 年以降長さ 30m 程度の大突堤が約 200m 間隔で設置された。現在の天橋立は、これらの突堤群によってかろうじて現汀線を確保しており、一方突堤群によって串刺しのような海岸は、白砂青松の景観を損うとして世論の非難にさらされている。一方従来天橋立の砂浜を涵養してきた土砂は、そのほとんどが漂砂の上手側にある日置・江尻両港の泊地に堆積し、定期的に港内の維持浚渫を実施している。図-2 に天橋立の全体図と、45 年以降の汀線の変化の状態を示す。

3. 既往調査研究の成果

天橋立における既往の調査研究の代表的なものとして、末尾に掲げた 1)~4) がある。1) の文献では、天橋立の成因として、3000~4400 年前に海水位が下降し、橋立の原形が海上に浮んだと推測している。2) の調査では、江尻防波堤設置が沿岸漂砂に及ぼす影響と対策を解析し、漂砂方向が北東から南西であること、漂砂の移動が激しいのは水深 2.0 m 程度までであること、港内に土砂が堆積し、橋立側は侵食されること、将来は養浜あるいはサンドバイパス工法が必要であるとの結論を得

ている。3) の調査では、侵食の実態を把握しこの結果に基づき、対策として大突堤が設けられた。4) では、突堤群設置後も侵食が十分防止されておらず、改めて養浜あるいはサンドバイパス工法が提案されている。

4. 社会的要請

京都府北部が三全総の定住構想のモデル定住圏の1つに設定されていることを受けて、定住圏域内のレクリエーション拠点として宮津地区の将来構想を検討している(参考文献5)。ここでは、余暇観光活動の将来性、観光・レクリエーション開発の可能性、地元の要請等を検討し、天橋立の将来を次のように位置付けている。すなわち、天橋立は、従来美しく、珍しい自然景観を有する観光資源として地域に役立ってきた。今後は、余暇時間の増大、余暇活動の質的变化に対応して、海水浴場等のレクリエーションの場として、また定住圏内の自然公園として定住性を高めるために地域住民の憩いの場としての機能を付加する必要がある。

このような将来の方向付けから、天橋立の海岸整備方式は次のような要請を考慮しなければならない。

- ① 侵食を防止し、海浜を拡幅する。
- ② 白砂青松の自然景観を保全する。
- ③ 海水浴、観光漁業（網引き）として海浜利用する。

5. 現地調査結果

(1) 調査の全体フロー

本調査は、**図-3**のフローに示すように、①天橋立

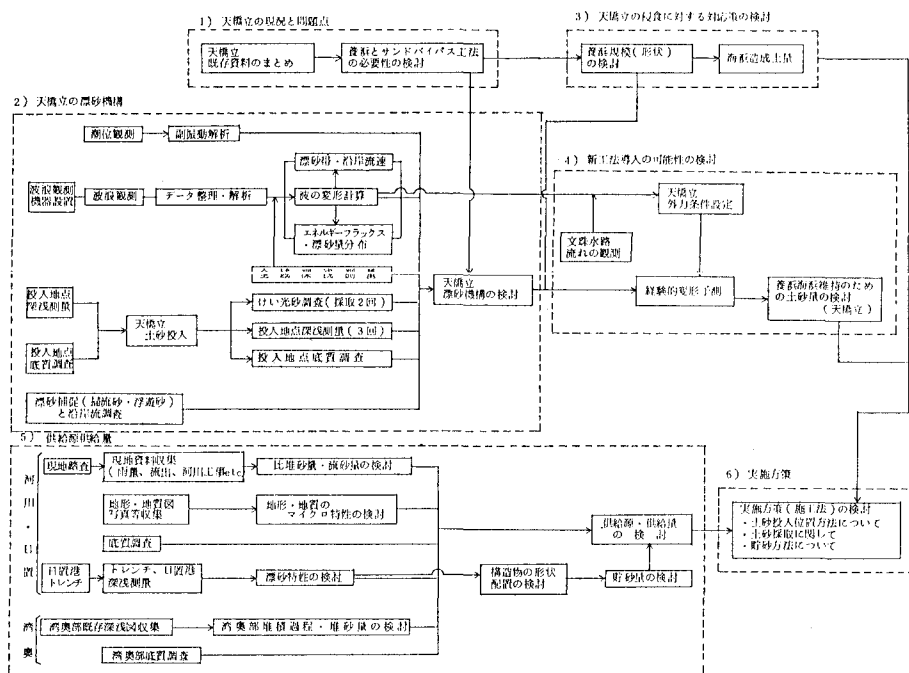


図-3 調査検討フロー

の現況と問題点の把握, ② 天橋立の漂砂機構の解析, ③ 天橋立の侵食に対する対応策の検討, ④ 新工法=サンドバイパス工法の可能性の検討, ⑤ サンドバイパスに利用する土砂の供給源と供給量の検討, ⑥ 具体的実施方策の検討, の6つが主要な検討項目である。

本論は, これらの項目を検討するために実施した現地調査の結果について述べるものである。

(2) 地 形

宮津湾はちょうどすり鉢のような形をしており, 中央部の水深は 20 m 程度である。天橋立の横断をみると, 図-4 に示すように汀線近傍で勾配 1/10 程度で, 水深 4~6 m までは 1/20~1/30 となっている。そしてこの付近に勾配の変化点があり, 水深 4~6 m 以深では 1/5~1/10 の勾配が海底まで続いている。

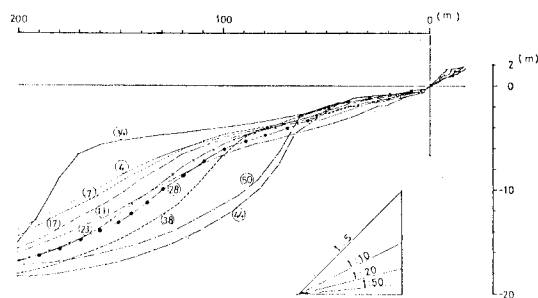


図-4 天橋立海岸横断図

(3) 底 質

汀線に直角の測線に沿って, 水深 1 m ごとに 10 m までの土砂を採取し, 粒度分析と比重試験と実施した。結果は, 表-1 に示すように中央粒径 (d_{50}) は 0.1~0.2

表-1 底質調査結果

水深 (m)	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0
中央粒径 (mm)	0.36	0.11	0.17	0.15	0.12	0.10	0.18	0.11	0.12	0.089	0.095
比重	2.670	2.686				2.662					

mm にあり, 水深が大きくなるにともなって小さくなっている。

(4) 波 浪

日置 (超音波式, 水深 8.0 m) と天橋立 (圧力式, 水深 9.0 m) で波浪観測を実施した。大きな波浪が発生するのは, 大部分冬季であるが, その最大波高は 1.0 m 前後である。

(5) 螢光砂調査

投入地点付近の汀線から採取した砂 (d_{50} : 0.23 mm) から螢光砂を作成し, これを突堤 No. 4 と 5 の間 (図-2 参照) の, 水深 0.4~1.0 m に長さ 10 m, 幅 2 m, 平均敷厚 5 cm で, 55 年 3 月 20 日に投入した。そして 1 週間後と 4 週間後に採取して, 砂の移動状況を調べた。

図-5 は 4 週間後の採取結果 (図中の数字は, 1,000 cc 中に含まれていた螢光砂の数を示す。) であるが, これによれば螢光砂は投入地点のあらゆる方向へ移動しているが, その卓越方向は南方であり, 水深も 2 m 以浅に限られている。特に汀線付近の検出量が多く, 汀線付近での移動が著しいことを示している。この期間内の日置における $H_{1/3}$ の最大値は, 0.80 m 程度である。

昭和55年4月17日18日 (昭和55年3月20日投入)

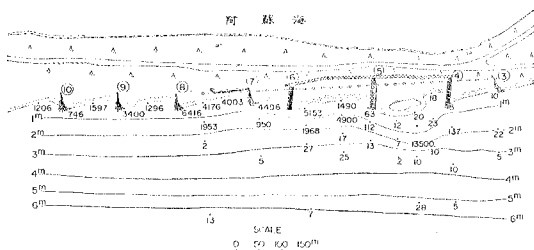


図-5 螢光砂追跡調査結果

(6) 掃流砂・浮遊砂調査

55 年 12 月に, 突堤 No. 10 と 11 の間に測線を設定し, 掃流砂調査を実施した。水深別に 10 点に円筒型の捕捉容器を埋めこみ, 随時引上げて捕捉した砂の容量を計測した。水深 0.75 m 以深では, 掃流砂量はゼロであり, 汀線に平行方向の掃流砂量は 0.9~2.1 m³/day と推定される。

また同時期に, 竹竿式浮遊砂捕捉装置とポンプ採水によって, 岸沖方向, 及び水深ごとの浮遊砂の分布を調査した。図-6 に結果を示す。両調査期間中における波浪は, 調査地点の水深 1.0 m のところで $H_{1/3}=0.1\sim0.4$ m, $T_{1/3}=7\sim11$ sec であった。

(7) 流出土砂量の推定

天橋立に土砂を供給する河川としては, 漂砂の上手側に位置する畑川 (流域面積 6.2 km²), 世屋川 (同 16.3 km²), 波見川 (同 10.4 km²)

の3つがある。これらの3つのうち流域面積が最大である世屋川について, 流域の地形, 地質, 植生, 及び河道の状況等について調査した。

世屋川は日置港の北約 1 km に位置し, 河床勾配は上流部で約 1/10, 中流部で 1/15~1/25 であり, かなり砂

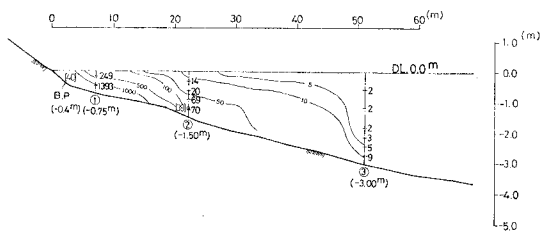


図-6 浮遊砂の分布

防工事が進んでいる。幾つか提案されている式から流出土砂量を推定すると、年間 $2,000 \sim 5,000 \text{ m}^3$ と考えられ、次に述べる日置港等における年間泊地浚渫土砂量にほぼ一致する。

(8) 日置港土砂堆積調査

日置・江尻両港では、冬季の気象じょう乱後に泊地が埋没し、昭和 44 年頃から毎年維持浚渫を実施している。表-2 は、両港の浚渫土砂量の経年変化を示したものである。この実績からすると年ごとの変動はあるが、年平均日置港で $3,500 \text{ m}^3$ 、江尻港で $1,000 \text{ m}^3$ 程度の土砂が堆積している。これらの土砂は、両港がなければ本来天橋立海岸に供給されていたと考えられる。

(9) 投入土砂追跡調査

養浜した土砂の移動状況、及び漂砂量と波浪等外力との関係を解析するため、日置港の浚渫土砂等を天橋立海岸の現汀線付近に投入し、汀線・深浅測量を実施し、砂の移動を追跡した。本調査は、表-3 に示すように、55, 56 年において計 4 回実施している。55 年 2 月

表-2 日置・江尻港における浚渫土砂量

年	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56
日置港	1.6	0.6	1.3	1.3	2.4	3	1	4.3	3.2	12.8	5	3.0	5.6
江尻港		2.6		1.9			0.7		2.9	1.2	0.6		1.1

(単位: 千 m^3)

表-3 土砂投入実績

	①	②	③	④
投入土砂量 (m^3)	3,000	4,000	6,700	19,000
投入時期	55 年 2・3 月	56 年 1・2 月	56 年 3 月	56 年 10~12 月
投入地点 (突堤番号)	No. 4~5	No. 20~24	No. 39~45	No. 32~37

に投入した土砂については、57 年 2 月までの 2 年間に投入前を含めて 8 回の深浅測量を行っている。

一例として第 2 回目として 56 年 2 月に投入した土砂の追跡調査の結果を図-7 と図-8 に示す。図-7 の等深線の変化図から、砂が徐々に下手側に移動する状況と、

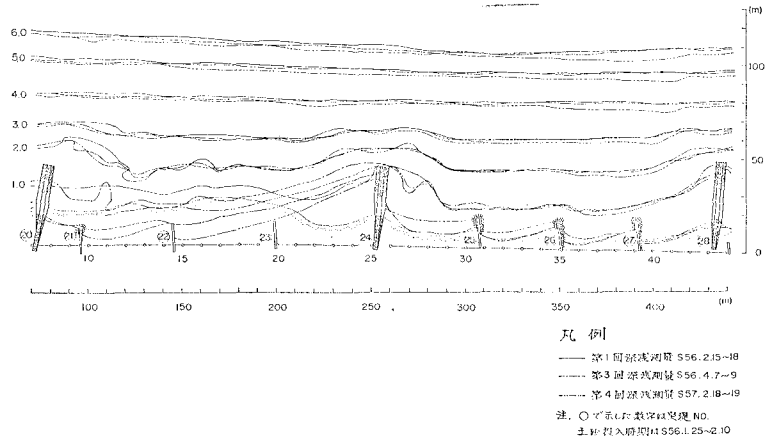


図-7 土砂投入地点等深線変化

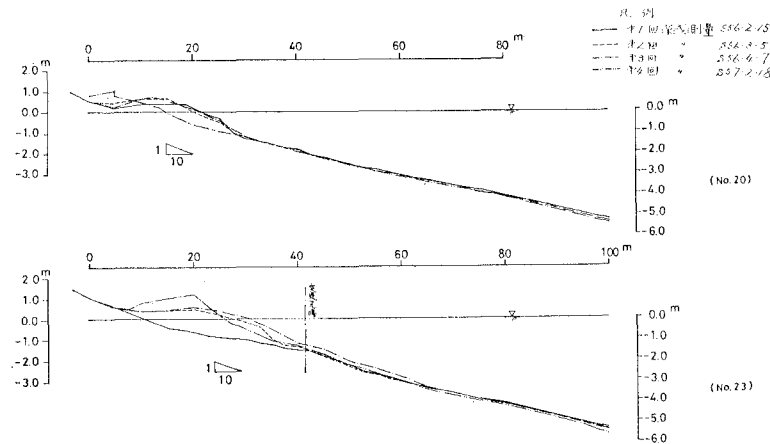


図-8 土砂投入地点横断変化

砂が移動後、汀線が波向に直角に安定する推移を読みとることができる。また、横断面図の変化からは、地形変化が顕著なのは水深 2.5 m 付近までであること、投入土砂は、ほぼ勾配 1/10 で安定していることがわかる。他の投入土砂範囲における追跡調査の結果もほぼ同様である。

6. 波浪外力と洗掘土砂量の関係

投入土砂追跡調査の結果から得られる洗掘土砂量と波浪外力を関係付けるため、土砂投入地点における波浪の輸送エネルギーの沿岸方向成分を以下の方法で求めた。

- ① 日置における波浪観測データを、周期 $T_{1/3} = 5 \sim 8 \text{ sec}$ を 7 sec, 8~12 sec を 9 sec で、波高 $H_{1/3} = 0.4 \text{ m}$ 以下を 0.3 m, 0.4 m 以上を 0.5 m で代表させる。 $T_{1/3}$ が 5 sec 以下の波は、湾内発生波が主であり、波向が一定でないため無視した。そして、次式によって日置地点の波浪エネルギーを次式より求めた。式中 Δt は観測間隔の 2 時間を表わし、 Σ は、その累加を意味する。

$$E_h = \sum \frac{1}{8} \rho g H_{1/3} L_0 \times 3600 \frac{dt}{T_{1/3}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

- ② 宮津湾口から日置の観測地点への屈折係数 $K_r = 0.45$ として、次式によって湾口の波浪エネルギーを求める。

$$E_e = E_h \left(\frac{1}{K_r} \right)^2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

- ③ 土砂投入地点での周期別の屈折係数 K_{rb} と入射角度 α_b を求め、次式によって、当地点での沿岸方向の波の輸送エネルギー E_x を算出する。

$$E_x = \frac{1}{2} E_e \sin \alpha_b \cdot \cos \alpha_b (K_{rb})^2 \quad \dots\dots\dots (3)$$

洗掘土砂量については、2地点での深浅測量の結果を比較し、減少分を沿岸方向の漂砂量とした。55年2～3月の土砂投入地点においては、第1回の3月下旬から、4月中旬、10月下旬、12月下旬、及び56年3月上旬の計5回の深浅測量を実施しており、各測量時点間の洗掘土砂量は、各々412, 259, 211, 228, 601 m³である。同様の期間の沿岸方向の波浪エネルギーを上記の方法で求め、両者の関係を示したのが図-9である。図では、5期間毎の関係を示すとともに、例えば1回目と3回目の測量の間の関係を累計として表示している。以上の関係から沿岸方向の波浪エネルギーから沿岸漂砂量の上限 Q_u を求める式として、次式が得られた。

$$Q_u = 3.06 \times 10^{-3} E_x^{1.42}$$

単位: Q (m³/day), E (t·m/m/day)

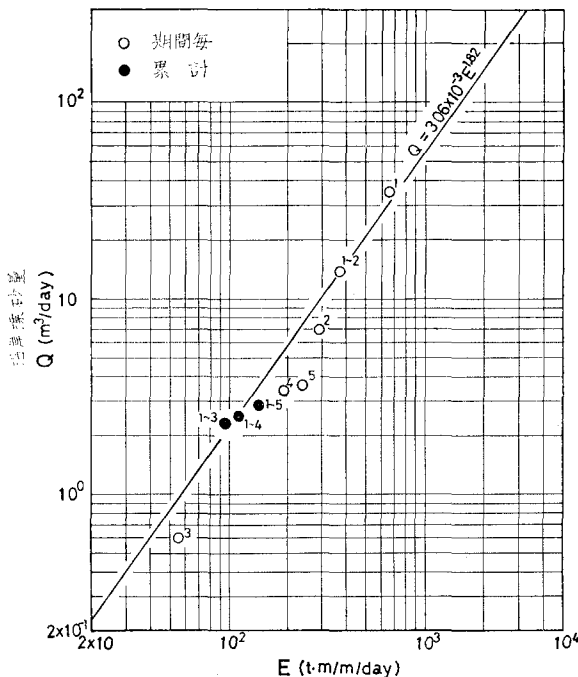


図-9 外力と洗掘土砂量の関係

7. 実施方策について

以上の調査結果から、当海岸における次のようなサンドバイパス工法の適用の可能性が確認された。

すなわち、天橋立海岸を維持する土砂の供給源として、日置・江尻両港が考えられる。両地点から年一回程度砂をバイパスし、当海岸の北端に供給する。養浜された土砂は南方向へ移動しながら、各突堤間の汀線を維持する。天橋立の南端にも何らかの貯砂施設を設置し、ここに貯まった土砂も北端へ投入し再利用する。以上のサンドバイパス工法の概念は図-10のようになる。

当面、4.の社会的要請に答えるべく、汀線が大突堤の先端にくるように海岸全体を養浜することが必要である。当海岸の漂砂機構を利用しながら、① 侵食の著しい、② 海水浴等の利用が高い、③ 北端に近い箇所順に、57年度を初年度として4～5年間で養浜事業を行なう計画である。同時に、投入した土砂の追跡調査等を実施し、日置港と天橋立南端の効果的な貯砂施設の構造、及び水深1.5m付近から急勾配となっている突堤 No. 45 付近(図-4参照)の法止め工法を検討し、同期間内に施工することとしている。

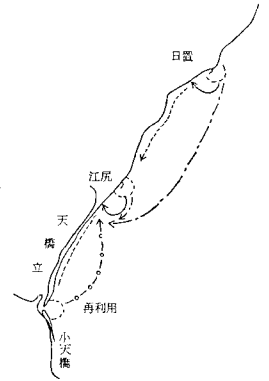


図-10 サンドバイパス工法の概念図

8. おわりに

本調査は、54年度から3カ年にわたって、京都大学岩垣雄一工学部教授、港湾技術研究所田中則男海洋水理部長、港湾局防災課片岡真二補佐官、及び第三港湾建設局と京都府の関係者からなる委員会を設置し、その指導のもとに実施したものである。また、現地での調査とその解析については、(株)新日本技術コンサルタントに委託した。本調査の実施にあたり、御指導を賜わり、また御協力をいただいた関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 地学団体研究会京都支部: 京都5億年の旅, 法律文化社, 1976.
- 2) 石原藤次郎・岩垣雄一: 宮津海岸の漂砂に関する調査, 京都府土木部河港課, 1952.
- 3) 京都府: 天橋立海岸侵食対策工事に関する調査, 1970.
- 4) 京都府: 天橋立海岸侵食調査, 1976.
- 5) 運輸省港湾局・第三港湾建設局: 海岸整備モデル計画調査報告書, 1980年.