

宮津港海岸『天橋立』における 侵食対策事業について

森 宣和¹・山口 睦雅²

^{1,2}京都府 建設交通部 港湾課 (〒602-8570京都府京都市上京区下立売通新町西入藪ノ内町)

天橋立海岸では、これまでに、侵食対策として突堤や潜堤の設置、サンドバイパス・サンドリサイクルの実施などを行ってきた。本論文では、それら対策の現状・課題や効果について整理するとともに、今後の海岸整備の方針について検討を行った。結果として、まず、サンドバイパス開始以降、汀線は前進傾向にあるが、近年では変化量が小さく平衡状態にあること、潜堤により設置箇所付近で土砂が捕捉され汀線形状が滑らかとなる効果があることを確認した。また、これらを踏まえて、汀線変化モデルによる再現・予測検討を実施し、今後汀線を維持していくのに適切なサンドバイパス・リサイクル量や海岸保全施設の整備方針を明らかにした。

キーワード 天橋立, 侵食対策, サンドバイパス, サンドリサイクル, 潜堤

1. はじめに

天橋立海岸は、京都府北部の宮津湾内に位置し、宮津湾と阿蘇海を区分して江尻から南西方向に約3,600m延びた典型的な砂嘴地形海岸である。砂嘴には数千本におよぶ松が成育し、その松並木と白砂の海の景観は松島、宮島と並び日本三景の1つに挙げられ、1922年には名勝地、1952年には特別名勝地に指定されている。また、我が国で最初にサンドバイパス工法が施工されたことでも知られている¹⁾。

本海岸は、一方向の卓越した沿岸漂砂の堆積作用により形成されたものであるが^{2) 3) 4)}、河川からの流出土砂量の減少や防波堤などの構造物設置に伴い、全国の他の海岸と同様、昭和20年(1945年)代頃から砂浜の侵食が顕著になり、一時はその存在そのものが危ぶまれる状態であった。

このため、1951年頃から調査を開始し、これまでに突堤、養浜、サンドバイパス・サンドリサイクル、潜堤による侵食対策を実施してきた。当初、京都府では大小の突堤群を設置してきたが、漂砂供給が不足していることから抜本的な解決には至らなかった。そこで、1979年に旧運輸省と京都府が共同で学識者を含めた研究会を設立し、より詳細な調査・試験施工を重ね、緊急養浜事業やサンドバイパス工法の事業化を進めてきた。その結果、汀線は平均して約20m前進し、突堤の上手ではその先端まで砂が堆積するなど一応の漂砂の連続性が確保されるようになった⁵⁾ (図-1)。一方、突堤の下手側では砂が堆積せず突堤群によって形成された汀線形状はノコギリ状



図-1 天橋立海岸の現状(2011年12月撮影)

となり、景観面や砂浜の利用制限などの新たな課題が生じるようになった。このため、模型実験・試験施工^{6) 7)}を経て、突堤先端の下手側に潜堤を設置し漂砂を捕捉することで汀線を滑らかにする工法を採用し、1992年以降順次対策を行ってきた。また、2006年の研究会では、潜堤の効果検証や海岸整備方針の検討を行い、効果的・効率的な潜堤形状とその配置計画および施設配置を踏まえたサンドバイパス(リサイクル)の運用方針を決定した⁸⁾。この方針に基づき、今日までに改良を含む全11基の潜堤施工を完了するとともに、サンドバイパス(リサイクル)事業を継続している。

本論文では、これまでに実施したサンドバイパス(リサイクル)および潜堤による侵食対策の現状と課題についてとりまとめるとともに、天橋立の景観保全や利用促進を今後も引き続き行うために必要な今後の整備方針についての考察を報告する。

2. 天橋立海岸の地形的変遷

典型的な砂嘴地形海岸である天橋立は、日本海から侵入する波浪およびこれに伴う沿岸流による漂砂の輸送と堆積によって形成されたものであるが^{2) 3) 4)}、海岸整備を考える上では、その形成過程を含むこれまでの地形的変遷を把握することが重要である。

本節では、検討の基礎的な条件となる天橋立海岸の地形的変遷の概要について、既往文献や空中写真に基づく整理を行った。

(1) 形成過程

天橋立は細長い宮津湾の湾奥付近西側に位置しており、漂砂源となる流入河川は、湾の東岸にはないが、西岸には北から波見川(同10.4km²)、世屋川(同16.3km²)、畑川(流域面積6.2km²)がある(図-2)。

天橋立の成因は、これらの河川からの流出土砂が沿岸流によって南へ運ばれ、縄文海進時に堆積が進行し、約4000年前に海面が現在の海水面と同程度まで下降したときに姿を現したものと推定されている^{2) 3) 4)}。その後も沿岸漂砂によって成長を続け、江戸時代中期頃に現在の原型ともいべき姿となり、明治期における埋立や内海への航路開設、さらには大正後期の架橋が行われ、今日の姿が形成された⁹⁾。

一方、昭和期に入ると、世屋川および畑川の砂防・河川改修工事による河川からの流出土砂の減少や日置港および江尻港の防波堤建設などによる漂砂の連続性の遮断により、昭和20年(1945年)代頃から砂浜の侵食が顕著となった⁹⁾。最も侵食が進行した時期では部分的に松林の基部あたりまで砂浜が減少し存在の危機に晒されたが、その後、サンドバイパス(リサイクル)による侵食防止対策や潜堤による汀線改良(景観改善)対策が継続的に行われ現在に至っている。



図-2 天橋立海岸の位置図

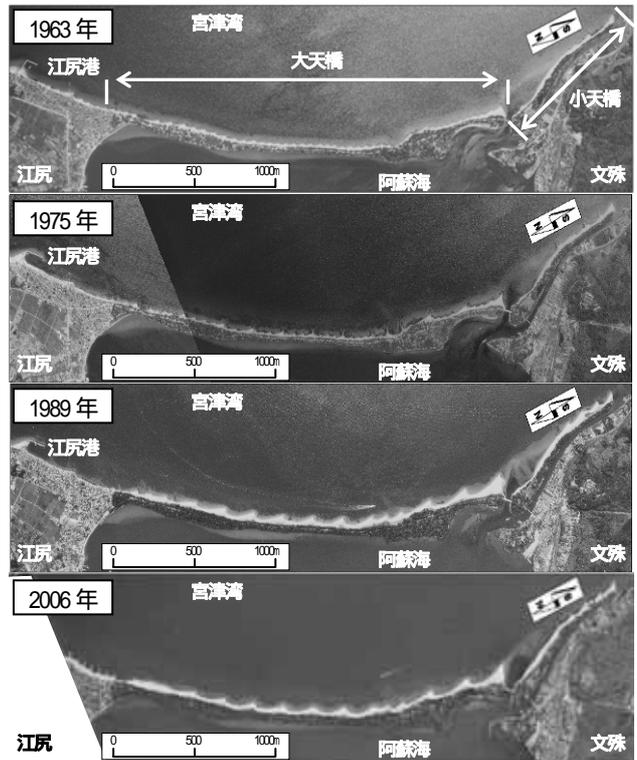


図-3 天橋立海岸を撮影した空中写真

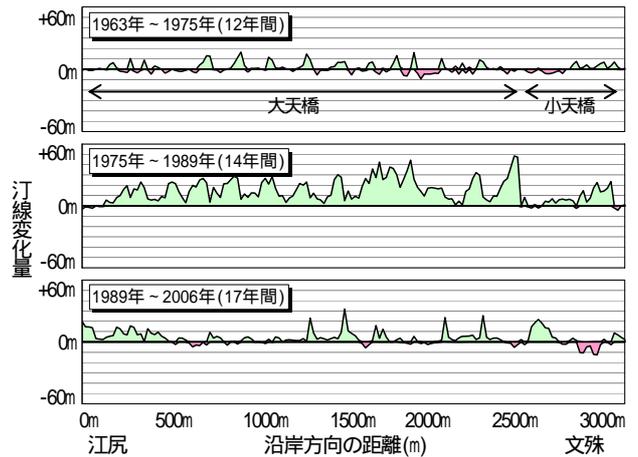


図-4 汀線変化量図(各撮影年間の変化量)

(2) 空中写真による汀線の変化傾向

図-3は天橋立付近の海岸地形を各年代毎に撮影した空中写真を示している。1963年および1975年の空中写真では、砂嘴の幅が狭く砂浜が侵食されている状況が確認できる。また、江尻港防波堤の上手側(北側)には砂が堆積している状況も確認できる。この時期には侵食対策として大小の突堤群を設置しているが、汀線はほとんど変化しておらず、上手側の構造物により漂砂移動が遮断され抜本的な侵食防止に至っていないことが分かる。次に、1989年の空中写真では、1963年および1975年に比べ、突堤の上手側で砂が堆積しており、全体的に砂嘴の幅は広くなり、汀線は前進している状況が確認できる。先に述べたとおり、1979年には研究会を設立しその後サンドバイパス事業を開始しており、開始10年後の1989年には天

橋立全体で砂浜が回復したことが分かる。また、2006年の空中写真では、1989年と比較して、全体に汀線の大きな変化はなく、比較的安定した砂浜が形成されていることが分かる。

図-4は図-3に示す空中写真より汀線位置を判読し数値化した上で各撮影年間(1963-1975,1975-1989,1989-2006)における汀線の変化量を示したものである。図より、1963年から1975年および1989年から2006年にかけては、局所的な変化は生じているものの、汀線が大きく変化している傾向は見られない。一方、1975年から1989年にかけては、期間中にサンドバイパスを開始していることから、全体的に汀線は前進しており、その前進量は最大で50m程度となっている。

3. 侵食対策の現状と課題

天橋立では、これまでに突堤、養浜、サンドバイパス(リサイクル)、潜堤による侵食対策を実施してきた。

本節では、これら対策の中から、1971年以降の研究會を踏まえ実施してきた、わが国で初めて本格的に事業を開始したサンドバイパス(リサイクル)と景観改善を目的として新たに設置してきた潜堤について、その実施状況や効果などの現状と今後の海岸整備に向けて抱える課題について整理を行った。

(1) サンドバイパス(リサイクル)による対策

サンドバイパス工法とは養浜工の一種であり、天橋立では、漂砂の上手側にあたる日置港および尻尻港において砂を浚渫し(バイパス砂)、下手側に位置する天橋立の砂州部分の最上手に砂の供給を行っている⁵⁾。さらに、漂砂移動により、天橋立の先端部(小天橋)において堆砂が生じることから、これを上手側へ輸送し再度供給する(リサイクル砂)手法を実施している⁷⁾。1971年の開始から現在まで約40年間継続しており、近年は、2006年の研究會における方針を踏まえ、年間4,500m³程度を目安とした土砂投入(養浜)を年1回行っている。

図-5は空中写真(1963-2006)および汀線測量結果(2004-2011)から算出した天橋立大天橋における汀線変化量(1963年の汀線を基準とした変化量)の平均値と土砂投入量(各年値および累積値)の経年変化を示している。図より、平均的な汀線は、1979年以降のサンドバイパス(リサイクル)によって開始から5年後の1984年時点で15m程度前進し、その後も緩やかに前進(約30年で10m程度)しており、汀線変化は累積土砂投入量の変化に呼応していることが分かる。図-6には図-5に示す汀線変化量と累積土砂投入量の関係を示しているが、両者の相関性は高い(相関係数=0.92)。また、図-7は各年間の汀線変化量と累積土砂投入量の関係を示しているが、累積土砂投入量が大きくなると汀線変化量は徐々に小さくなり、近年では平衡状態にあるといえる。

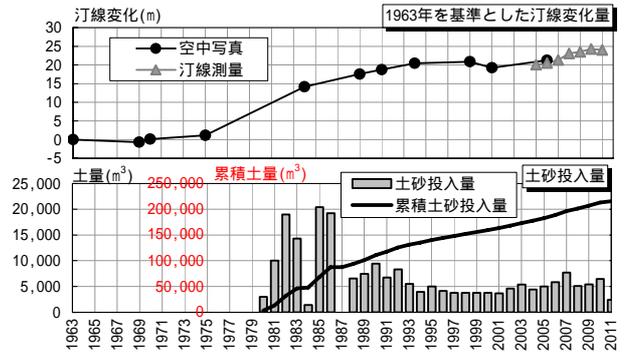


図-5 汀線変化量と土砂投入量の経年変化

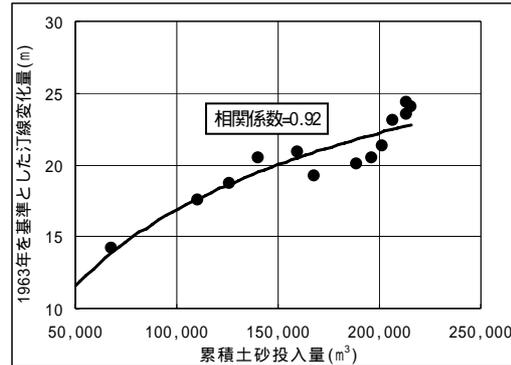


図-6 1963年を基準とした汀線変化量と累積土砂投入量の関係

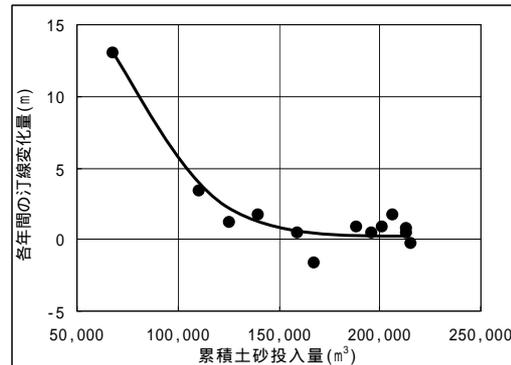


図-7 各年間の汀線変化量と累積土砂投入量の関係

以上の整理から、天橋立の侵食対策におけるサンドバイパス(リサイクル)の効果は顕著であり、今後も砂浜を維持していくためには基本的な考え方を踏襲する必要があるといえる。一方、近年では効果が平衡状態にあることが確認できたため、今後の海岸整備を考える上では、後述する潜堤の整備効果も踏まえ、適切なサンドバイパス(リサイクル)量の設定が重要になると考えられる。

(2) 潜堤による対策

突堤群によってノコギリ状となった汀線形状を改良し、景観上優れた滑らかな汀線とすることを目的として(図-8)、突堤先端の下手側に潜堤を設置する工法を実施している。この工法は、潜堤設置箇所において、入射する波の波高を減衰させるとともに、入射波を屈折させ汀線に直角に入射するようにして沿岸方向の漂砂移動を抑え

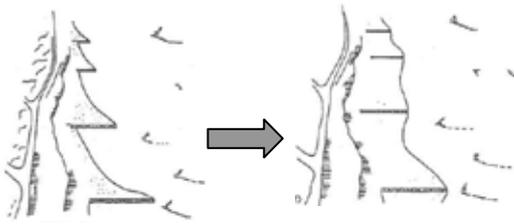


図-8 ノコギリ状汀線の改良イメージ

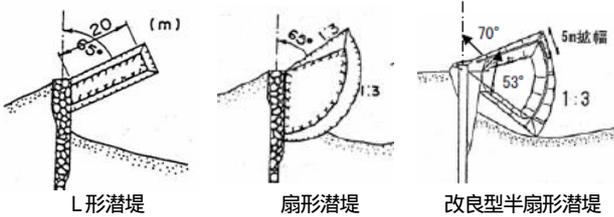


図-9 潜堤の構造イメージ

ることで、砂を堆積させるものである。この事業は、1991年から試験施工を開始しており、図-9に示すような形状の異なる潜堤を現地施工した結果、扇形状の潜堤の機能がより高いことが分かった⁶⁾⁷⁾。その後も試験施工を重ね、2006年の研究会において効果的・効率的な潜堤形状として「改良型半扇形潜堤」を採用し、以降これまでに改良を含む全11基の潜堤を設置している。

図-10は2010年に設置した改良型半扇形潜堤周辺における汀線の経年変化を、図-11は図-10に示す測線NO毎の汀線位置を2005年を基準とした変化量でそれぞれ示したものである。これらより、潜堤設置前後の2009年と2010年および2011年とを比較すると、潜堤下手側の汀線は最大で20m程度前進しており、潜堤背後には漂砂が捕捉され設置前に比べ滑らかな連続的な汀線形状が形成されていることが分かる。また、図-12は潜堤から下手側への距離と潜堤設置前後における汀線の変化量を示している。図より、潜堤下手側では設置箇所に近いほど汀線の変化(前進)量は大きく、潜堤による汀線改良効果は、潜堤から約40m程度まで確認できる。

以上の整理から、潜堤による汀線改良効果を確認することができたが、設置後の経過年数が短いものも多いため、今後もモニタリングを継続しながら、その経過を観察していく必要がある。

4. 今後の海岸整備について

天橋立の景観保全や利用促進を今後も引き続き行うためには、概ね安定した砂浜形状と滑らかな汀線形状を実現させたこれまでの侵食対策を踏襲しつつも、維持管理費用の縮減に配慮した持続可能な整備を考えていく必要があるといえる。

本節では、その一環として、現状を踏まえた適切なサンドバイパス(リサイクル)量について検討を実施し、今後の海岸整備の方針について考察を行った。

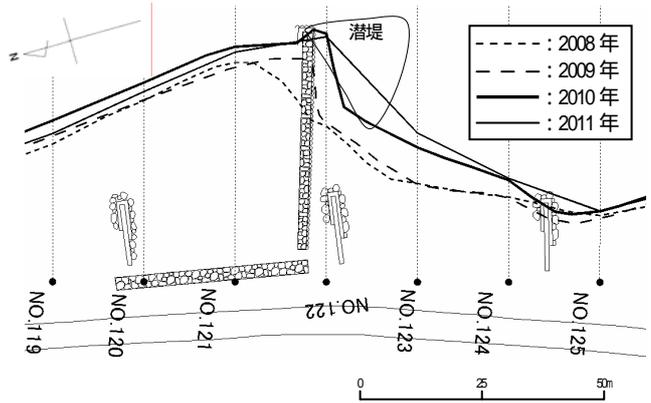


図-10 潜堤周辺における汀線の経年変化

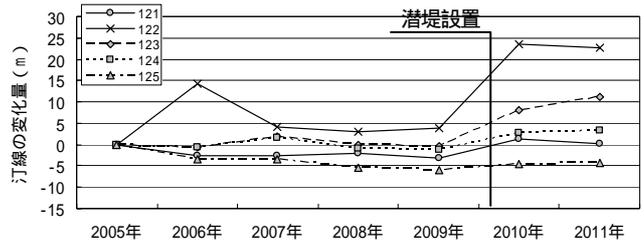


図-11 2005年を基準とした汀線の変化量

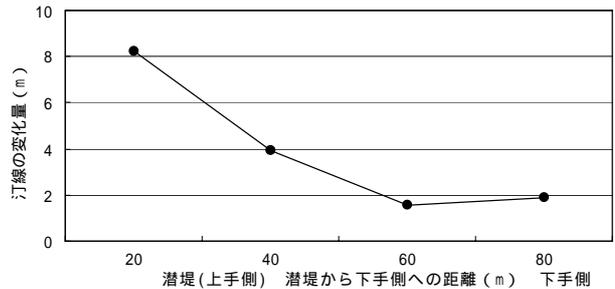


図-12 潜堤からの距離と潜堤設置前後における汀線変化量

(1) 汀線変化モデルを用いたサンドバイパス(リサイクル)量の検討

潜堤設置完了後の現状汀線が安定する適切なサンドバイパス(リサイクル)量について、汀線変化モデル(1-Lineモデル)を用いて検討を実施した。

汀線変化モデルは、波浪と海岸線形状のデータにより、沿岸方向の各点において沿岸漂砂量を算定し、汀線変化を一本の線の変化(前進、後退)で評価するもので、長期的な海浜変形予測の手法として現地適用性が高いモデルである。また、汀線変化計算に与える入射波は、多方向不規則波の屈折および浅水変形を同時に解くことができるエネルギー平衡方程式による方法を採用し、沖波(柴山波浪観測所の実績データから季節毎のエネルギー平均波を設定)から算出した。

サンドバイパス(リサイクル)量の検討では、潜堤設置完了後の現状汀線(2011年11月)を初期地形でもあり目標地形(すなわち、現状と大きく変わらないことを目標)とし、同じ外力条件の下、年間土砂投入量が異なるケース(2,000m³, 3,000m³, 4,000m³, 5,500m³)を設定し、予測計算

を実施した。図-13は各ケースにおける現状から5年後の汀線変化量について比較したものを示している。いずれのケースでも、江尻港下手の土砂投入箇所付近(潜堤未整備区間)および大天橋下手の突堤間距離が長い区間では、汀線は現状よりも後退すると予測される。また、土砂投入量が少なくなるほど江尻港下手側の汀線後退範囲がより下手側へ広がる傾向となり、特に、土砂投入量が4,000m³よりも少ない場合は、汀線の後退範囲が現状の潜堤設置区間にまで広がると予測される。一方、土砂投入量が4,000m³よりも多い場合は、現状の潜堤設置区間上手側に土砂が堆積すると予測される。

以上の予測計算結果から、特に、江尻港下手の潜堤整備区間上手側に着目すると、この区間の現状汀線が安定するためには、4,000m³以上のサンドバイパス(リサイクル)量が必要であり、効率的な土砂投入量は4,000m³程度であると考えられる。

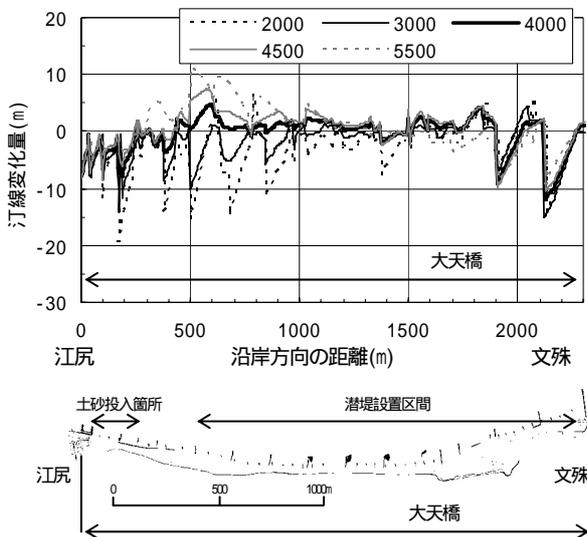


図-13 汀線変化の予測計算結果

(2) 今後の海岸整備方針について

これまでに実施してきた侵食対策や景観改善対策によって、現在では全体的に概ね安定した砂浜形状が維持されている。このため、今後の海岸整備では、モニタリングによる経過観察を行いながら、より効率的なサンドバイパス(リサイクル)を実施していく必要があるとともに、海水浴などの利用が活発な箇所への局所的な対策を合わせて行っていく必要があると考える。

実績データに基づく現状の汀線変化状況の整理や汀線

変化予測計算の結果を踏まえると、効率的なサンドバイパス(リサイクル)の実施については、先に述べたとおり年間4,000m³程度を目安とした運用を実施していく必要があると考えられる。また、海水浴などの利用がある江尻港下手の土砂投入箇所付近(潜堤未整備区間)では、局所的な侵食を防止するため、潜堤を新たに設置するなどの対策が必要と考えられる。さらに、海岸利用が活発な大天橋下手の突堤間距離が長い区間では、夏季の海水浴利用前に養浜するなど局所的な対策を行っていく必要があると考えられる。

5. おわりに

本論文では、天橋立海岸においてこれまでに実施したサンドバイパス(リサイクル)および潜堤による侵食対策の現状と課題についてとりまとめるとともに、適切なサンドバイパス(リサイクル)量の検討を行うなど、今後の整備方針について考察を行った。

今後は、これまでの侵食対策により海岸侵食は防止され現在では概ね安定した砂浜形状が形成されていることに加え、潜堤による汀線改良(景観改善)効果が発現している現状を踏まえ、モニタリングによる経過観察を行いながら、維持管理費用の縮減にも配慮した効率的な整備を実施していく必要がある。

参考文献

- 1) 矢島道夫・上園晃・矢内常夫・山田文雄：天橋立におけるサンドバイパス工法の適用，海岸工学論文集，第 29 巻，pp.304-308，1982.
- 2) 岩垣雄一・陳活雄：天橋立海岸の生成過程に関する研究，第 44 回土木学会年次学術講演会，1989.
- 3) 岩垣雄一・陳活雄：日本三景天橋立の生成とその発達過程の研究，第 46 回土木学会年次学術講演会，1991.
- 4) 陳活雄・岩垣雄一：砂嘴の形成と侵食に関する研究 - 天橋立海岸について - ，海岸工学論文集，第 39 巻，pp.371-375，1992.
- 5) 京都府：宮津港天橋立海岸侵食対策調査報告書，pp.1-70，1987.
- 6) 鈴木康正・平石哲也・富樫宏次・高羽泰久・南将人・岩垣雄一：潜堤を用いた海浜安定工法に関する現地観測と模型実験，海岸工学論文集，第 42 巻，pp.696-700，1995.
- 7) 平石哲也：小型潜堤を用いた海浜安定工法に関する模型実験，港湾空港技術研究所資料 0896，1998.
- 8) 京都府：第 9 回天橋立海岸整備技術研究会資料，2006.
- 9) 京都府：宮津港天橋立～日置海岸環境整備技術研究調査報告書，1999.