

しまなみ海道の建設と、今、そしてこれから —「海の難所」と瀬戸内海国立公園に架けた長大橋梁群—

はじめに

「しまなみ海道」の愛称で知られる西瀬戸自動車道の橋の技術的特徴と維持管理、「しまなみ海道」の魅力などを紹介する。

1. しまなみ海道の概要

広島県尾道市から愛媛県今治市までの芸予の島々を通り、7つの海峡を10の橋で跨ぐ、本州四国連絡橋3ルートの中で最後に完成したしまなみ海道は、1970年に設立された本州四国連絡橋公団により、国と関係地方公共団体の出資を受けた有料道路事業として建設された。ここには自転車歩行者道が併設され、海峡を自転車や歩いて渡れる唯一のルートである。

しまなみ海道は3ルート同時着工の政府方針により1973年に着工を予定していたが、オイルショックにより延期された。その後、大三島橋や因島大橋が地域開発橋として着工し、後に表-1に示す様に建設が順次、進められ1999年に全橋が完成した。2. 3.で紹介する多々羅大橋と来島海峡大橋を除く5橋の概要を紹介する。



図-1 しまなみ海道のルート

表-1 しまなみ海道の建設スケジュール

西暦年	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
新尾道大橋																									
因島大橋																									
生口橋																									
多々羅大橋																									
大三島橋																									
伯方・大島大橋																									
来島海峡大橋																									

(1)新尾道大橋 —尾道大橋と並列した斜張橋—

日本道路公団が建設した尾道大橋は、わが国の本格的な斜張橋の草分け的存在で周辺景観によく馴染み、地域のランドマークであった。そのため、並列橋となる新橋の計画にあたっては、旧橋と調和を重視し、一本塔柱・一面吊り斜張橋とし、中央支間長、中央部の高さ、主塔の高さ、上段ケーブルの位置を旧橋と同じとした（写真-1）。また、箱桁内を除湿し桁内の塗装を不要としている。



写真-1 新尾道大橋(手前)と尾道大橋(奥)

(2)因島大橋 —バランスの取れた美しい吊橋—

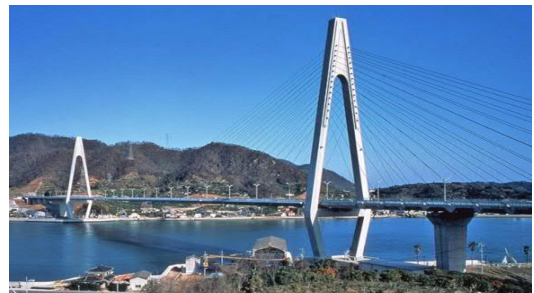
少し前に完成した関門橋と同規模で大きな課題はなかったが、剛性を確保した鋼床版の採用、ケーブルワイヤ径を $5\text{mm} + \alpha$ として1ストランド当たりの素線数を関門橋より増やし合理化を図るなど、技術的工夫を行った。また、黄金比を用いたバランスの取れた美しい吊橋になっている(写真 - 2)。



写真—2 因島大橋

(3)生口橋 —鋼コンクリート複合斜張橋—

海中に基礎を置く支間長 250m の P C ラーメン橋で計画していたが、調査の結果、基礎位置の地質が悪いため、海峡を一またぎする中央支間長 490m の鋼・コンクリート複合斜張橋(写真 - 3)に変更した。地形から側径間を短くせざるを得ず、負反力を避けて側径間は P C 桁とした。完成時、支間長世界の斜張橋であったが、11 日後に、スカルスンド橋(ノルウェー)にその座を譲った。



写真—3 生口橋

(4)大三島橋 —側タイ付き鋼アーチ橋—

架橋地点兩岸は切り立っており、地形、地質、道路線形、景観、経済性などを考慮して中路式単径間ソリッドリブ側タイつき2ヒンジ鋼アーチ橋(図 - 4)を採用した。兩岸の剛性の高い橋台に固定された側タイがアーチリブの変形を抑えるこの橋は、固定アーチ橋に比較して、鋼重が約2割低減された画期的なアーチ橋である。アーチ支間長は完成時では日本最大であった(写真 - 4)。



写真—4 大三島橋

(5)伯方・大島大橋 —我が国初の箱桁吊橋—

我が国初の箱桁形式補剛桁とラーメン形式主塔とするこの吊橋は、自然景観に調和したスマートな吊橋となった(写真 - 5)。航行船舶への影響を避けるため、国内の補剛桁の架設は主塔からの面材張り出し架設工法が一般的であった。箱桁にはその適用が難しく直下吊り工法とする必要があった。そのため、航行船舶への影響をできるだけ小さくするために、潮流の上流側にシンカーを沈め、箱桁ブロックを積んだ台船を下流側に配したタグボートにより引っ張る一点係留方式で実施した。この方法は、後の生口橋、多々羅大橋でも採用された。



写真—5 大島大橋(奥)と伯方橋

2. 海の難所に架ける—来島海峡大橋—

東水道、中水道、西水道に分かれた潮流の向きにより船舶航行できる水道が変わる「順中逆西」という特殊な航法が決められた国際航路になっている来島海峡は、最大潮流速が10ノットにも達し航行船舶も多い「海の難所」といわれている。



図－2 来島海峡の東・中・西水道と工事区域

(1) 来島海峡大橋の主な特徴

- ① 世界初・唯一の3連吊橋
- ② 翼型箱桁形式の補剛桁
- ③ 地形・海象により最適化した基礎
- ④ 景観に配慮した主塔
- ⑤ 耐久性を向上させたケーブル構造

(2) 補剛桁の形式と架設工法

補剛桁には、抗力が小さく、維持管理上有利で、景観にも優れるなどから箱桁形式が採用された。箱桁形式の補剛桁は主にヨーロッパで実績があったが、トラス形式が多かった我が国では、その多くは面材張り出し工法で架設されてきた。箱桁形式では架設位置直下に船で箱桁を運搬し、そのまま吊り上げる直下吊り工法が一般的に行われていた。大島大橋では一点係留方式を採用したが、航行船舶の多い来島海峡では適用できず、船舶の航行への影響を最小限にする方法が求められた。

(3) 自航台船の開発

直下吊り工法では、架設位置直下に桁運搬船を定点保持するため、航行船舶が格段に多い来島海峡では、係留を伴う方式は作業時間から不可能であった。そのために無アンカーで定点保持する方法を見出す必要があり、白鳥大橋で実施された複数の曳船の連携による定点保持を試みたが、潮流の変化に対応できず、目標の範囲内に留まることができたのは1分程度であった。

そこで現存していた唯一のスラスター付き自航起重機船「おきとり」を借り、現地



写真—6 3連吊橋の来島海峡大橋



写真—7 複数曳船による定点保持



写真—8 自航台船による補剛箱桁直下吊架設

で実験したところ、操船性は格段に向上した。こうしたことから、台船の四隅に360度回転可能な推進器を装備し、目標値とのズレを自動制御して定点保持を行う自航台船を開発した。その後、現地海域において、自航台船を用いた桁の吊り上げ模擬実験を行い、桁架設工法及び航行安全対策への理解をいただくよう努めた結果、多くの海面利用者の理解と協力を得ることができ、約1年間にわたる補剛桁現地架設作業も無事終了した。

3. 1km級斜張橋への道を切り開く ―多々羅大橋―

当初は、広島・愛媛県境を挟んだ約1.3kmの海峡をまたぐ吊橋で計画していた。

(1) 斜張橋案検討の背景

①地形地質

生口島の観音山の最下部に近い傾斜地は、風化した粗粒黒雲母花崗岩で表層はシルト化した非常に崩れやすい地層であった。このため、吊橋アンカレッジ設置による掘削が国立公園特別地域に指定されている観音山の中腹にまでに及び景観に大きく影響を与えた。一方、斜張橋案では地形改変を極力少なくすることができた。



写真―9 多々羅大橋

②斜張橋建設の実績

この時点で本四連絡橋でも櫃石島・岩黒島橋（支間長420m）や生口橋（490m）が建設され、名港中央大橋（590m）の建設が始まっており、海外ではノルマンディ橋が事業化されるなど、斜張橋の長支間化が動き出していた。

(2) 橋梁計画の再検討

設計を見直し、吊橋と斜張橋の比較検討を行った。検討項目を纏めると表―2の通りである。吊橋案は構造特性に問題はないが、観音山の大きな地形改変は残る。斜張橋は従来に比べ、規模が大きく、検討を要する事項があるが解決可能と考えられ、工期、工費に優れ、観音山の地形改変が少ないことから斜張橋を選定した。

表―2 吊橋と斜張橋の比較

項目		吊橋	斜張橋
構造特性	静的特性	水平・鉛直たわみは3m程度	剛性が高く、鉛直たわみは1.3m
	耐風性	発散振動の限界風速は80m/sec	発散振動の限界風速は130m/sec 斜ケーブルに対策が必要
	耐震性	地震力で断面が決定されない	地震力で断面が決定されない 未知の地震に対する余裕が少ない
施工性		実績が多く特に問題はない	約400mの張り出し架設
工期		7年	キャットウォークが不要で吊橋より短い
経済性	上部構造重量	約32,000ton	上部構造重量 約30,000ton(94%)
			総工費 約10%の工費低減

(3) 課題の検討

①耐風安定性

吊橋に比べて、斜張橋は曲げ剛性、捩じり剛性ともに大きく、フラッター発振風速は吊橋に比べて余裕がある。斜ケーブルの振動については、既往の斜張橋において多く観察され、様々な対策が講じられたが、以下の2種に分類できる。

A) ケーブルに構造減衰を付与する方法

B) ケーブルの表面形状を加工して風による渦の発生を抑える方法

櫃石・岩黒島橋では実績の多かった斜ケーブル相互をロープで連結して構造減衰を与える方を採用した。B)の事例では、図―3に示す並行突起をつけた東神戸大橋

などがあり、有効性は確認されていたが、抗力係数が増大し風荷重が増大する。一方、生口橋ではケーブルメーカーによるケーブル表面粗度の違いによってケーブルの発振に差異

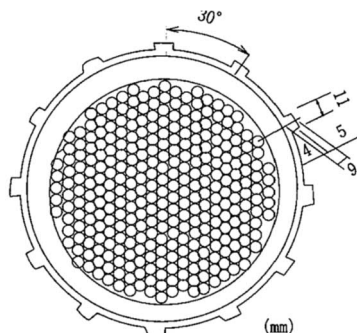


図-3 並行突起ケーブル

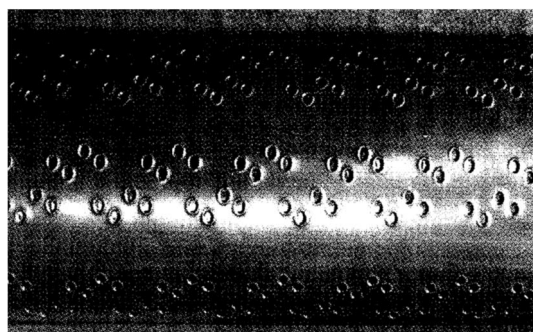


写真-10 インデントケーブル

が見られたことから、抗力係数に影響しない表面形状の存在が示唆された。そんな中、写真に示すようなインデントを表面につけたケーブルが検討の結果見いだされ、風洞試験により有効性が確認され採用した。

②耐震性

3次元モデルを用いた応答スペクトル法による振動解析の結果、全ての部材で断面力が暴風時を下回り、地震力によって断面決定されないことが判った。しかし、地震については不明な点も多く残っていることから、地震による残留変位や入力の変位相の影響などの点から心配する意見が多くの学識経験者から寄せられたが、これらは今後の検討課題として、1989年に斜張橋形式に変更、1992年着工した。その後、兵庫県南部地震、芸予地震、及び東北地方太平洋沖地震が起こり、そのたびに耐震基準は強化されたが、いずれの基準に対しても、最新技術を用いた耐震照査で安全性は確認されている。なお、芸予地震のレベル2地震動による耐震照査でも応力的な問題はなかったが、橋端部移動量が大きく大型伸縮装置を破壊し緊急輸送路としての機能が確保できない懸念があり、移動量を制限するための大型ダンパーを設置している。

(4)斜張橋のその後の展開

ノルマンディ橋が1995年に、多々羅大橋は1999年に完成した後、2000年代に世界では約20橋の支間長800mを超える斜張橋が建設されている。その半数は多々羅大橋を超える支間長である。2009年には香港のストーンカッター橋で初めて1000mを超え、2012年に建設された支間長1104mのルースキー島連絡橋(ロシア)

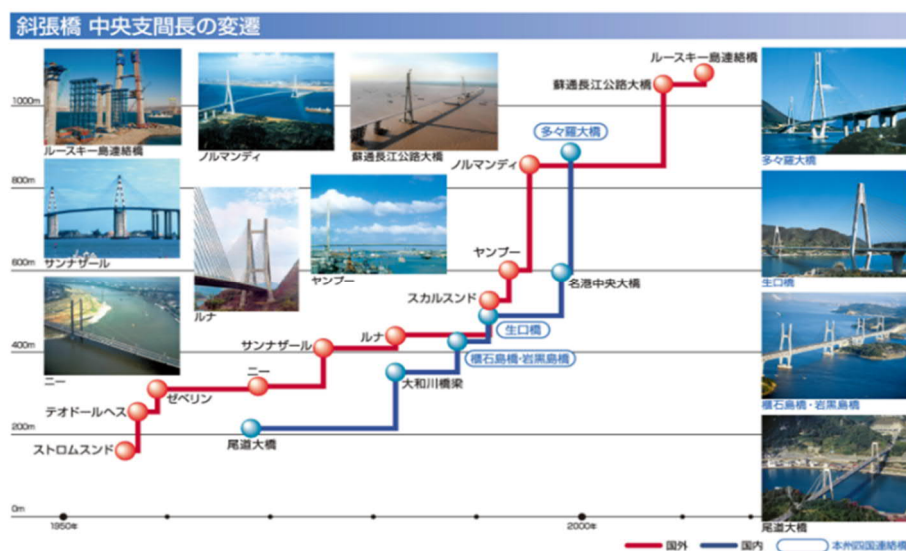


図-3 斜張橋の中央支間長の変遷

が最大支間長となっている。ノルマンディ橋や多々羅大橋の建設が、吊橋に限定されていた1000m級支間長に斜張橋という橋種を加え、建設地点に応じた橋種の選択肢を広げることになった。

4. しまなみ海道を今支える私たち

(1) 長大橋の保全と課題

しまなみ海道は、橋のかかる島しょ部の生活道路でもある中で、代替道路がないため、長時間の通行止めができない。また、海上部という厳しい腐食環境にあり、200年以上の長期にわたり利用していただくために健全に保っていくことを目指している。そのことを実現するために、大規模工事を行わずに長寿命化を図り、ライフサイクルコスト最小化を目指す予防保全を実施している。この保全管理は、図—4に示すとおり計画、点検、補修、評価・検証とこれらを一元的に管理するデータベースからなり、PDCAサイクルにより確実に実施している。

一方で、さらなる効率化を目指した新たな課題を解決するため、継続的に技術開発を進めている。ここでは、保全での技術開発について述べる。

(2) 保全段階での技術開発の例

ライフサイクルコスト低減を目指して、次に示す技術開発に取り組んでいる。

① 長期耐久性を有する塗料開発

A) 高耐久ふっ素塗料、省工程型塗料

② モニタリング支援手法の開発

A) 近赤外線を用いた遠隔非破壊測定による面的な塗膜厚評価方法

B) I o Tによる吊橋ケーブル内の温湿度モニタリングシステム

C) ケーブル類の表面画像取得機械

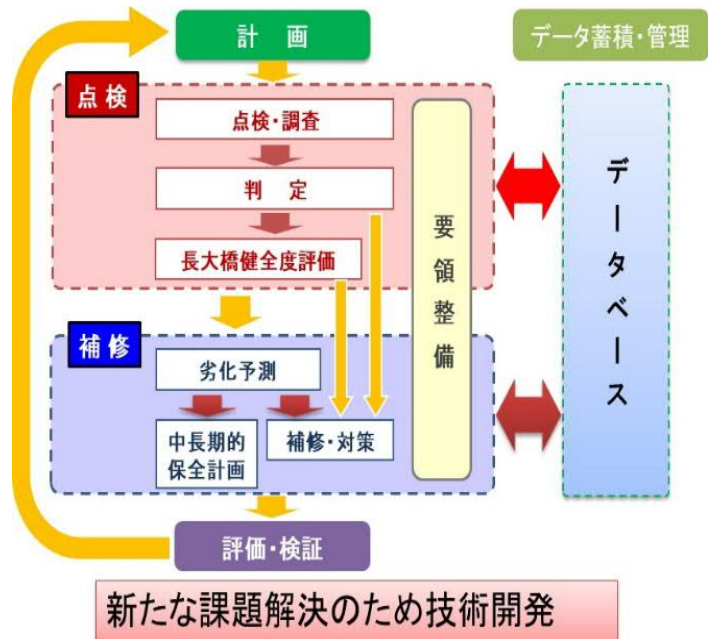
● 吊橋主ケーブル外装、吊橋ハンガーロープ表面、斜張橋ケーブル表面

③ スマートフォンを用いたロープ張力測定装置

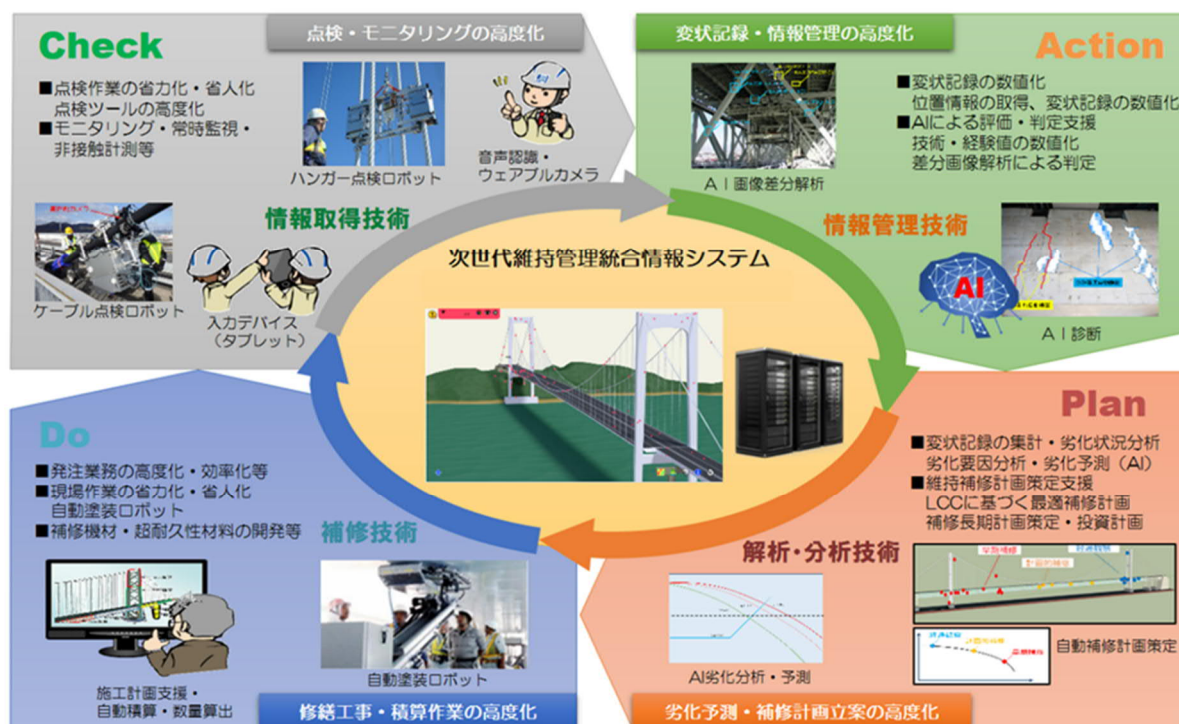
④ 次世代維持管理システムの開発

長大橋保全のさらなる高度化、効率化を目指し、3次元BIM/CIMモデルを情報プラットフォームとした次世代維持管理システムの開発を進めている。具体的には、情報プラットフォームと連携して、タブレット端末を活用した3次元モデルへの点検データの記録、記録された点検データと3次元位置座標を基にロボットによる補修塗装の自動化、AIによる変状記録や診断調書の自動生成などの開発・研究に取り組みつつ、将来的には各種モニタリングとも連携しながら劣化予測や補修計画策定支援に繋げるなど長大橋保全全体の高度化を目指している。(図—5)。

これらの技術開発を進めるために、様々な分野において開発された技術を本四連絡橋において実証し適用性を確認したうえで改良等を加え、次世代の長大橋管理技術を開発・実現することを目的に「自動点検・補修技術開発コンソーシアム」を設置し、建設業以外も含めた幅広い分野より参加企業、団体等の募集を行っている。



図—4 保全管理のフロー



図—5 次世代維持管理システムイメージ

5. 車だけじゃない、しまなみ海道

(1) しまなみ海道沿線の歴史・文化と産業

しまなみ海道が架かる芸予諸島は、室町時代から戦国時代にかけて村上海賊が活躍していた歴史がある。村上海賊は因島、能島、来島に本拠地を設けた三家に分かれ、時には衝突しながらも、瀬戸内海のほぼ全域を支配していた。ルート内の最大の島である大三島には、山の神、海の神、戦いの神である大山津見神が祀られた大山祇神社が鎮座しており、村上海賊も信仰を深めていたといわれている。

沿線地域では、みかんを代表とする柑橘類中心の農業、造船業などが営まれている。また、歴史や美しい多島景観を活かした観光産業も盛んである。しまなみ海道は、瀬戸内西部の交通・輸送条件の改善、関連地域の産業振興のほか、道路が通る島しょ部の生活改善などにも大きな役割を果たしている。

(2) 「サイクリストの聖地」

新尾道大橋を除く9橋には、原動機付自転車・自転車歩行者専用の道路が併設され、島々に住む人々にとっての生活道路としても大きな役割を果たしている。

また、デザインの違う橋が続く「橋の美術館」とも呼ばれ、全長約70kmの多島海美が織りなす絶景を楽しむしまなみ海道のサイクリングコースは、ナショナルサイクルルートにも認定され、海外からも高い評価を受けている年間来訪者が32万人を超える方が訪れる「サイクリス



図—6 レンタサイクル利用台数の推移

トの聖地」として世界中から注目を集める存在になっている。

また、サイクリストが地図を持たなくても目的地まで行けるように、路面にブルーラインや方向・距離ピクトを表示している。普段走れないしまなみ海道の自動車道部を通行規制して開催している「サイクリングしまなみ」により海外での知名度が一気に高まり、海外からの来訪者も増えている。とりわけ、欧州、北米、豪州からの比率が多くなっている。



写真-11 ブルーラインと方向・距離表示ピクト

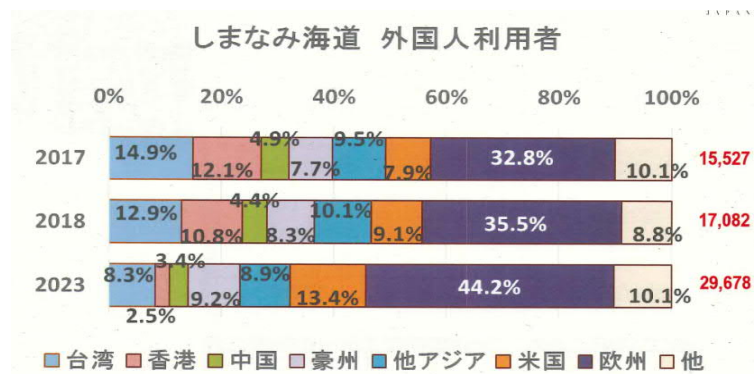


図-7 外国人サイクリストの地域別割合

6. 地域連携の取り組み

本州四国連絡高速道路(株)では、瀬戸内地域に必要不可欠な会社として長く愛されることを目的に、瀬戸内地域の多様な主体と連携し、瀬戸内地域の活性化に努めている。地域の皆様と一緒に文化や歴史、食の新たな発見や誰もが笑顔になれる企画を通じて、2028年度の本四間交流人口を6742万に増やすべく、次の取り組みを実施している。

(1) 地域と連携した交流促進

① インフラツーリズムの深化

- 来島海峡大橋（旅行会社と連携した塔頂体験ツアー、国と連携したモニターツアー他）

② 地域資源の活用

- 愛媛県と包括的相互協力協定を締結し、連携事業として、来島海峡を望む来島海峡SA内にロゴオブジェを設置。
- 潜在する瀬戸内地域の魅力掘り起し

③ サステナビリティ課題への対応

(2) 文化芸術振興による地域貢献

① せとうち美術館ネットワークの深化

② サイクリングによる地域振興

- Setouchi Velo 協議会

（一社）四国ツーリズム創造機構や瀬戸内DMOなどの関連団体とも連携して、地域への誘客、瀬戸内・四国地域のブランド価値向上にも取り組んでいる。



写真-12 インフラツアー



写真-13 しまなみロゴオブジェ

＜図表・写真の提供＞

図-1～5、表-1・2、写真-1～10、12・13 本州四国連絡高速道路(株)

図-6・7、写真-5 一般社団法人 しまなみジャパン