

# ひずみ計測に光学ストランドを用いた国道37号 白鳥大橋のヘルスマニタリングへの適用性検討 —固有振動特性評価—

安藤ハザマ 技術研究所  
室蘭工業大学  
室蘭開発建設部 室蘭道路事務所

○澤田 純之  
瓦井 智貴  
対馬 一成

室蘭工業大学が取り組んでいるひずみ計測に光学ストランドを用い、データ取得にIoT技術を用いた計測システムの長大橋に関するヘルスマニタリングへの適用性について、計測フィールドとして室蘭開発建設部が管理する国道37号白鳥大橋にて検討を行った。本報告では、通常走行時における応答ひずみを計測して白鳥大橋の現状における固有振動特性評価を試み、本橋の健全性と共に提案システムの適用性を確認したので報告する。

キーワード：長大橋、構造健全性、維持管理、固有振動、光学ストランド、IoT技術

## 1. はじめに

我が国では、道路交通網の安全性を確保するため、供用されている全ての橋梁に関して5年に1回の目視点検が義務付けられている。このような目視点検を実施する場合には、中小橋梁に関しては、比較的容易に実施可能であるものの、川幅が大きくスパンが長い長大橋梁に関しては安全な状況下において点検を実施するのは容易ではない。そのため、このような橋梁に対する効率的かつ安全に目視点検を行うための技術開発が求められている。

デンマークとスウェーデン間のOresund海峡を跨ぐOresund橋<sup>1)</sup>では、効率的な維持管理や補修・補強のために予め桁内にアクセス用の移動可能な架台を設置している。また、本州四国連絡高速道路<sup>2)</sup>では、吊橋の主塔を効率的に点検するために、小型点検ロボットの開発も行っている。一方で、長大橋梁の場合には、目視点検のみでは耐荷性能や劣化度を精度よく評価することが難しいことから、主要部材の応力度や橋梁全体の固有振動特性を把握することも重要であるものと判断される。

通常、構造部材に作用する応力を計測するためには、ひずみゲージが使用される。しかしながら、ひずみゲージを用いて長期計測を行う場合には、ひずみゲージの劣化や延長ケーブルの絶縁性確保等の課題もあり、精度の高いデータを取得するためには専門的な知識と共に多大な労力と費用が必要となる。従って、簡易にセンサの設置や計測、及びデータの取得が可能な計測・モニタリング技術の確立が喫緊の課題であるものと判断される。

このような観点から、本研究では、設置が比較的容易な検長が1,000 mmの光学ストランドとIoT技術を併用し

た計測システム<sup>3)</sup>を長大吊橋である白鳥大橋の維持管理に適用することを目的に、本システムを白鳥大橋に試行的に設置してその適用性に関する検討を行った。提案のシステムは、IoT技術を用いることによって、時々刻々の計測データを遠隔で管理者や技術者が共有できることや、双方向アクセスが可能なことによって、静的計測時においても緊急時の波形取得を効率的に行うことができる。

ここでは、白鳥大橋の中央径間スパン中央点における最外縁補剛桁の上下縁に光学ストランドを設置することとし、一般車両走行時の比較的強風時における波形を計測した。また、その波形を用いることによって固有振動特性を特定し、新設時における固有振動数<sup>4)</sup>と比較することによって、健全性を確認したので報告する。

## 2. 計測システムの概要

### (1) ひずみ計測部

図-1には、本研究で用いている光学ストランドを示し

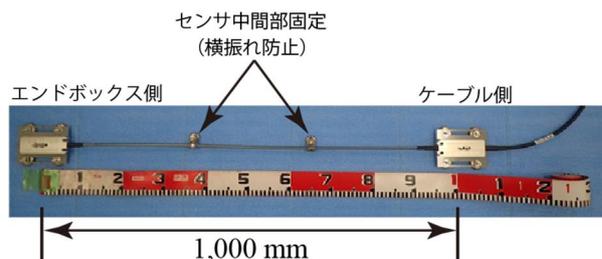


図-1 ひずみ計測用光学ストランド



図-2 白鳥大橋

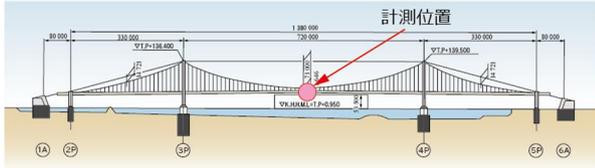


図-3 白鳥大橋の概要図とセンサー設置断面

ている。光学ストランドの全長は1,000 mmである。そのため、部材の1,000 mm間の平均ひずみを評価することとなる。計測範囲は最大3 mmであり、初期伸びを与えることによって正・負のひずみが計測可能となる。

ストランドの設置は、強力磁石あるいは接着剤を用いて両端を固定するのみである。そのため、ひずみゲージのような劣化やケーブルの絶縁性確保の必要性はなく、1度の設置作業のみで、数年間の連続的な長期モニタリングが可能となる。

## (2) モニタリング制御部

本システムの仕様は、以下の通りである。

- 1) 3Gまたは4Gネットワークを介してインターネット通信が可能である；
- 2) 計測後、平常時や緊急時において橋梁管理責任者を含む関係者間で、インターネットを介してデータを迅速に共有することが可能である；
- 3) ひずみ計測用光学センサーのみならず、温度や加速度を計測するセンサーも併用した計測が可能である；
- 4) 動的計測下においてはサンプリング周波数 100 Hz、静的計測下においてはサンプリング時間1秒から 24 時間での計測が可能である；
- 5) 静的計測中に閾値を超過した場合には、その前後の動的データが自動で計測され、かつ関係者には E-mail や SMS で緊急アラートが配信される；
- 6) 緊急アラートに関するサンプリング時間や閾値を E-mail や SMS で制御できる；
- 7) 取得されたデータは、測定後クラウドベースのストレージシステムに自動的に長期間保存される。

## 3. センサー設置位置

図-2には、室蘭市陣屋と祝津を結ぶ白鳥大橋を示して

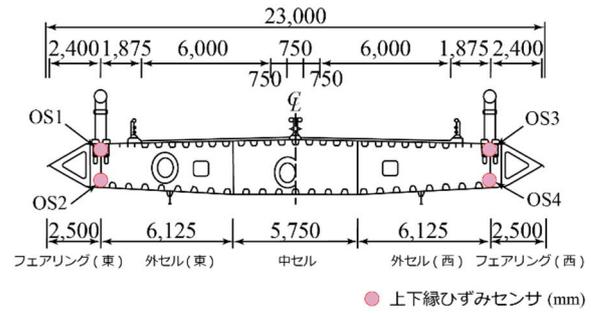


図-4 中央断面におけるセンサーの設置位置



図-5 センサーの設置状況

いる。本橋梁は、1998年に供用が開始され、東京以北で最長の吊橋であり、図-3に示すように3径間、2ヒンジの補剛箱桁式となっており、全長1,380 m、主スパン720 mである。センサーは、図示の通りスパン中央断面に取り付けることとした。図-4および図-5には、断面におけるセンサーの取り付け位置を示しており、補剛桁ウェブの最外縁上下近傍に片側2ch、計4chのひずみセンサを設置することとした。

## 4. 計測結果および考察

### (1) 平常時における応答ひずみ波形の一例

図-6には、2021年6月4日午前10時から約1時間記録されたひずみの時刻歴波形を示している。当時の気象条件は、気温14度、風速10.9 m/sの南東の風であった。図より、最大振幅は約30μであることが分かる。ここで、2,300秒から2,500秒までの比較的振幅が大きい200秒間の時刻歴波形を対象に、各桁の鉛直曲げひずみ成分、軸ひずみ成分、および補剛桁全体の水平曲げひずみ成分を算出して評価するとともに、これらの周波数特性について検討を行うこととした。

### (2) 各桁の鉛直曲げひずみ波形成分

図-7には、東側と西側端桁に関する鉛直曲げひずみ成分の時刻歴波形を示している。これらの波形は、簡略化して各桁の中立軸を高さ方向中央点の位置と仮定し、(下

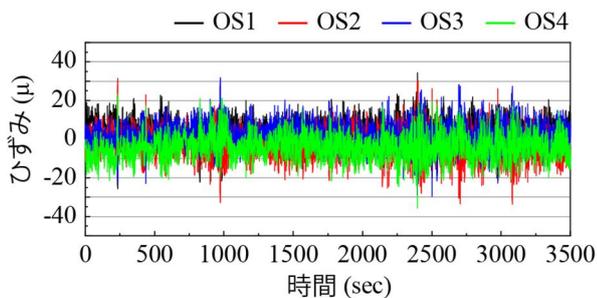


図-6 2021年6月4日午前10時における各時刻歴ひずみ波形

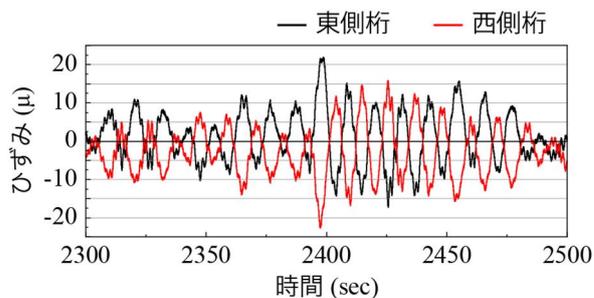


図-9 東西端桁に関する軸ひずみ成分波形

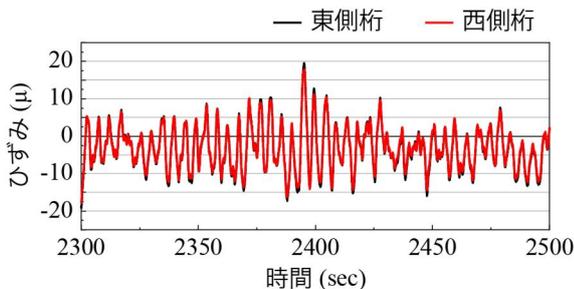


図-7 東西端桁に関する鉛直曲げひずみ成分波形

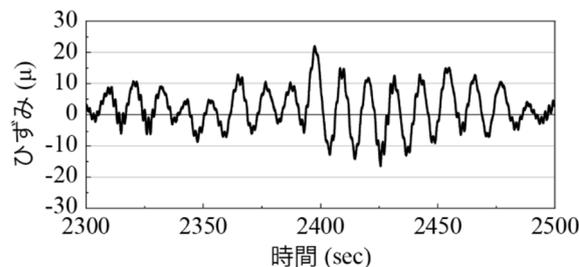


図-10 補剛桁中央断面に関する水平曲げひずみ成分波形

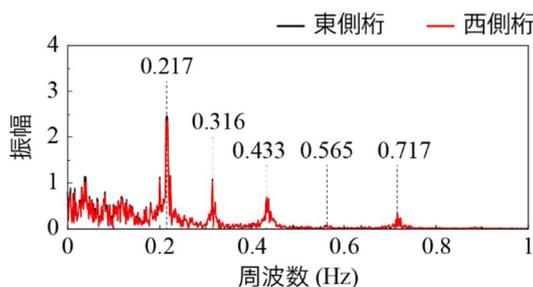


図-8 鉛直曲げひずみ成分のフーリエスペクトル図

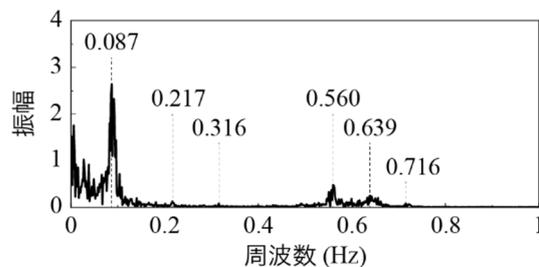


図-11 補剛桁中央断面における水平曲げひずみ成分のフーリエスペクトル図

表-1 鉛直曲げひずみ成分から得られた各固有振動数と既往の研究結果との比較

振動モード	起振実験結果 <sup>④</sup> (Hz)	常時微動観測結果 <sup>⑤</sup> (Hz)	数値解析結果 <sup>⑥</sup> (Hz)	本研究結果 (Hz)
1次対称振動	0.13	0.12	0.12	-
2次対称振動	0.22	0.22	0.22	0.22
3次対称振動	0.44	0.44	0.44	0.43
1次逆対称振動	0.15	0.15	0.13	-
2次逆対称振動	0.32	0.32	0.32	0.32
3次逆対称振動	0.57	0.54	0.57	0.57

縁ひずみー上縁ひずみ)2 の式に基づいて処理して得られたものである。図より、両波形は共に振幅や位相が類似しており、補剛桁にはねじり振動が励起されていないことが見て取れる。これらの波形成分は、一般車両の走行によって励起されたものと推察される。

図-8には、図-7に示した波形に高速フーリエ変換(FFT)処理を施して得られたフーリエスペクトル図を示している。図より、両者ともに類似の傾向を示しており、0.217 Hzの振動成分が卓越していることが確認できる。

表-2 補剛桁中央断面における水平曲げひずみ成分から得られた各固有振動数と既往の研究結果との比較

振動モード	起振実験結果 <sup>④</sup> (Hz)	常時微動観測結果 <sup>⑤</sup> (Hz)	数値解析結果 <sup>⑥</sup> (Hz)	本研究結果 (Hz)	
水平曲げ	1次対称振動	0.1	0.1	0.08	0.09
	2次対称振動	0.56	0.57	0.52	0.56
鉛直曲げ	1次対称振動	0.13	0.12	0.12	-
	2次対称振動	0.22	0.22	0.22	0.22
	3次対称振動	0.44	0.44	0.44	-
鉛直曲げ	1次逆対称振動	0.15	0.15	0.13	-
	2次逆対称振動	0.32	0.32	0.32	0.32
	3次逆対称振動	0.57	0.54	0.57	0.56

表-1 には、本計測によって得られた各固有振動に対する振動数を、供用開始前に実施して得られている起振機を用いた実測結果<sup>④</sup>、常時微動観測結果および数値解析結果<sup>⑥</sup>と比較する形で示している。表より、本計測結果は、供用開始前に行われた実験結果とよく対応していることが見て取れる。すなわち、現状の白鳥大橋に関する補剛桁の鉛直曲げ剛性に関しては、経年劣化等による低

下は見られず、構造的に健全であることが確認された。

### (3) 各桁の軸ひずみおよび桁全体の水平ひずみ波形成分

図-9には、補剛桁の東西端桁に関する軸ひずみ成分の時刻歴波形を示している。軸ひずみ成分は、(上縁ひずみ+下縁ひずみ)/2 の式に基づいて処理して得られたものである。図より、両波形は共に振幅は類似しているもの、位相が半周期ずれていることが分かる。これより、補剛桁全体の水平振動の中立軸は、断面幅方向の中心にあることが確認できる。

図-10には、補剛桁中央断面における水平曲げひずみ成分に関する時刻歴波形を示している。この成分波形は、図-9に示されている各桁の軸方向ひずみ波形を用い、(西側桁の軸方向ひずみ-東側桁の軸方向ひずみ)/2 の式に基づいて処理して得られたものである。図より、最大水平曲げひずみは約 22 $\mu$ であることが分かる。この補剛桁全体の水平振動は、前述のように風速 10.9 m/s の南東方向からの風によって励起されたものと考えられる。

図-11には、図-10の補剛桁に関する水平曲げひずみ成分波形にFFT処理を施して求められたフーリエスペクトル図を示している。また、表-2には、図-11より得られた主な固有振動数を、表-1に示したと同様に供用開始前に実施して得られている起振機を用いた実測結果<sup>4)</sup>、常時微動観測結果および数値解析結果<sup>5)</sup>と比較する形で示している。表より、供用開始前に実施された起振実験結果の固有振動数と類似の傾向を示しており、前述の鉛直曲げ振動の場合と同様に、白鳥大橋の補剛桁全体の水平曲げ剛性に関しても健全な状態であることが確認された。

以上の結果より、本モニタリングシステムを適用することによって、現状の固有振動特性を即座に分析・評価することができ、さらに本橋の健全度評価も可能であることが明らかになった。

## 5. まとめ

本報告では、長大橋の応力状態およびその固有振動特性を効率的に維持管理することを目的に、ひずみセンサの設置が容易で、安定した長期計測が可能である光学ストランドとIoT技術を併用したモニタリングシステムの設置を提案し、本システムを白鳥大橋に適用してその妥当性について検討を行った。ひずみセンサは白鳥大橋のスパン中央部に4chのみ設置することとし、風速が 10 m/s 程度の状況下における通常の車両走行時の応答ひずみ計測を実施した。本研究で得られた結果は、以下の通りである。

- (1) 本システムを用いることによって、補剛桁各桁の最大上下縁ひずみを計測することができ、即座に各桁の車両走行による鉛直曲げ成分波形や、風による補剛桁全体の水平曲げ成分波形、さらにそれらの固有振動特性も評価可能である。
- (2) 本システムを長大橋に適用することによって、力学的な観点から、効率的な維持管理が可能となる。すなわち、通常時のみならず、大地震や積雪強風発生時においても、即座に橋全体の耐荷性能やその振動特性、健全度評価を行うことが可能である。特に、白鳥大橋の場合には、冬期に積雪強風による車両通行止めの措置を行うこともあることから、効率的な運用にも貢献が期待される。

なお、本報告では、白鳥大橋の固有振動特性に限定して検討を行っているが、別途T20積載車両を走行させることによって、白鳥大橋の車両走行時における車両の積載荷重評価 (Bridge Weigh in Motion) の可能性に関する検討も行っている。

その結果、T20積載車両の 60 km/h 走行によって、下縁ひずみは走行側桁で 15 $\mu$ 、非走行桁で12 $\mu$  程度であることを確認している。これより、このひずみ値を基準にすることによって、B-WIM システムとしても適用可能であり、白鳥大橋を走行する大型車両の総重量の推定にも応用可能であることが明らかになっている。

## 謝辞：

日揮株式会社には、本報告で使用した計測業務のご支援を頂いた。ここに記して感謝の意を表する。

## 参考文献

- 1) Arland, T. The Oresund bridge access gantry, Proceedings of ICSBOC, Kobe, Japan, Nov. 13-16, 2022.
- 2) Nagase, S., Kagawa, A., Usuda, Y., and Sugimachi, N., Development of inspection robot for main towers of long span, bridges, Proceedings of ICSBOC, Kobe, Japan, Nov. 13-16, 2022.
- 3) OSMOS Group, EDAS technical datasheet, <https://www.osmos-group.com>, 2024.
- 4) 高田敦, 渋谷元, 藤野陽三, 坂本良文, 菅原登志也: 補剛桁に鋼床版箱桁を有する長大吊橋 (白鳥大橋) の起振実験に関する報告, 土木学会第 54 回年次学術講演概要集, I-B252, pp.502-503, 1999.
- 5) 新山淳, 佐藤昌志, 池田憲二, 菅原登志也, 佐藤浩一: 白鳥大橋の固有振動数評価に関する常時微動観測法の適用性, 構造工学論文集, Vol.47A, pp.469-477, 2001.