

道路付帯構造物傾斜センシングシステムの開発

矢尾 博信* 鈴木 健 鈴木 信也 北川 慎治 鮫島 友紀 柿沼 実
松井 伸二（富士電機(株)／NMEMS 技術研究機構）
藤田 友一郎（中日本高速道路(株)）

Development of Road Equipment Monitoring System with Tilt-multi-sensor
Hironobu Yao*, Takeshi Suzuki, Nobuya Suzuki, Shinji Kitagawa, Yuki Sameshima, Minoru Kakinuma,
Shinji Matui, (Fuji Electric Co., Ltd. / NMEMS Technology Research Organization)
Yuichirou Fujita, (Central Nippon Expressway Company Limited)

This paper addresses development of the MEMS sensor device, the tilt-multi-sensor terminal and the sensor system for monitoring of tilt and vibration of road information boards. In order to grasp an information board behavior, we have conducted a preceding field test and behavior analysis of the road information board.

キーワード：道路情報板, MEMS, 加速度, 振動, フーリエ変換, 固有振動数
(Road information board, MEMS, Acceleration, Vibration, Fourier transform, Eigenfrequency)

1. はじめに

高速道路には、安全・円滑な道路交通の確保を目的に、道路情報板や照明設備など様々な道路付帯設備が設置されている。従来、これらの付帯設備は目視を主流とした点検が道路管理者により実施されてきた。目視点検は、経験等により個人差があり評価を定量化できないという課題がある。また、老朽化構造物の増加と少子高齢化の進展によるメンテナンス技術者の不足により、点検業務の効率化が求められている。⁽¹⁾

センサによる常時モニタリングを行うことで、状態変化を定量的に把握することができ点検の優先順位付けや点検間隔の適正化などの点検の高度化が図られる。また、地震、台風、集中豪雨などの災害発生時における交通規制の一次判断や異常時点検の優先順位付等に資することが期待できる。

本稿では道路付帯構造物のうち情報板の傾斜と振動の常時モニタリングを目標に MEMS センサデバイス、傾斜マルチセンサ端末およびセンサシステムの開発を行ったので紹介する。また、情報板挙動を把握するため、先行フィールド試験と情報板の挙動解析を行ったので合わせて紹介する。

2. MEMS センサデバイスの開発

〈2・1〉開発目標 本研究開発では、道路付帯構造物の傾斜（構造物の変形や地盤変動）と振動（固有振動数や振幅の変化）を測定することで、道路付帯構造物の構造的な変化や劣化を早期に発見し、重大な事故の発生回避に寄与すること

を目的とする。そのため、高精度に傾斜（2軸、出力安定性： $\pm 0.05\text{deg}$ ）と振動（3軸、分解能： 0.1gal ）を同時に測定でき、設置性がよい小型のセンサ端末を構成可能な、MEMS 型センサデバイス及び信号処理回路の開発を行った。

〈2・2〉開発結果 図1に MEMS センサデバイスの構造図を示す。シリコンウエハに固定電極、可動電極とばねを形成し、上下をガラスで挟む構造とすることで、一つのデバイスにより 3 軸の加速度測定が可能な構造とした。また、ゼロ点の安定性を向上させるためにフロントエンド回路も含めた MEMS センサユニット構造とした。ユニットの概略構造と外観写真をそれぞれ図2、図3に示す。

開発した MEMS センサユニットの出力安定性について評価を行った。評価としては温度試験（温度範囲： $-30\sim 60\text{°C}$ ）による安定性評価を実施した。ここでは $-30\text{°C}\sim 60\text{°C}$ の温度範囲を 3 サイクル変化させ、1 サイクル目の出力に対する 2 サイクル目以降の同じ温度での出力変動量で評価を実施した。評価結果を図4に示す。目標の $\pm 0.05\text{deg}$ に対して $\pm 0.035\text{deg}$ を確認した。

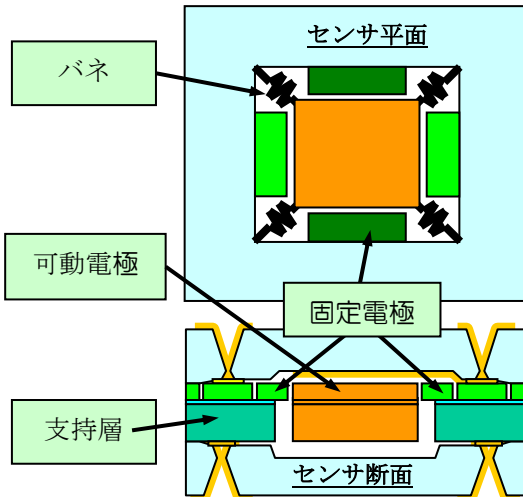


図1 センサデバイス構造図
Fig. 1. Structure drawing of sensor device.

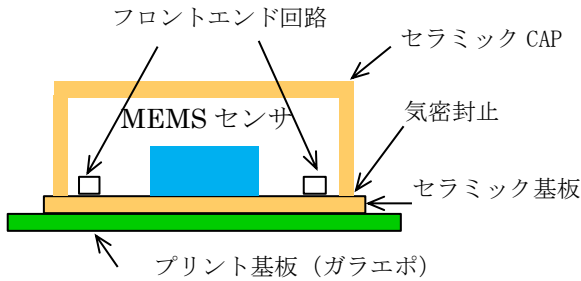


図2 MEMS センサユニット構造図
Fig. 2. Structure drawing of sensor unit.



図3 MEMS センサユニット外観写真
Fig.3. Photo of sensor unit.

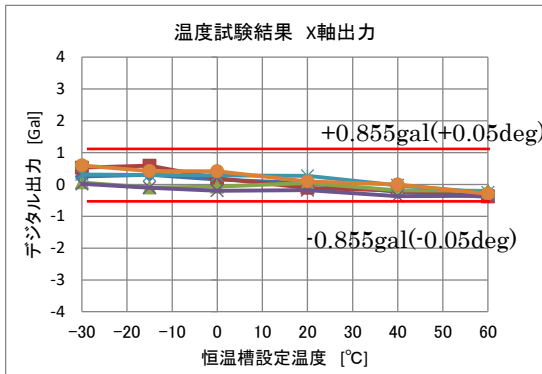


図4 ゼロ点安定性 Fig. 4. Zero stability.

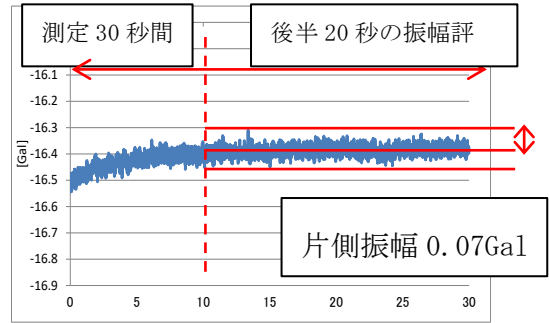


図5 分解能 (ノイズ) 評価結果
Fig. 5. Resolution (noise) evaluation result.

振動測定の分解能 (ノイズ) については、本 MEMS センサユニットを用いた傾斜マルチセンサ端末にて評価を実施した。評価は比較的常時微動の小さな環境である免振建屋の地下 (免振層) にて実施した。本評価環境の常時微動は深夜で水平方向 : 0.03~0.04gal, 垂直方向 : 0.06~0.07gal である。図 5 に評価時の波形例を示す。図 5 は X 軸の例であるが、3 軸とも目標の $\pm 0.1\text{gal}$ の達成を確認した。

3. 傾斜マルチセンサ端末の開発

〈3・1〉開発目標 傾斜マルチセンサ端末の開発は下記を目標とした。上記 2 で開発した MEMS センサデバイスを搭載し、傾斜 (2 軸) 振動 (3 軸) の測定に加えて温度測定機能も有する複合センサ端末とする。傾斜マルチセンサ端末の大きさは片手で持ち運び可能な $7\text{cm} \times 10\text{cm} \times 5\text{cm}$ 以下を目標とした。通信は無線で、通信免許が不要な周波数帯と出力強度 (920MHz, 実使用環境下で 30m 以上) とする。電源は太陽電池を装備するものとし、少なくとも 1 時間に 1 回の測定 (間欠測定) とデータの送信に必要な電力をまかなう構成とする。上位システムでの解析対応のため、端末間の時刻同期と振動等大容量データを送信可能とする高速通信 (1 Mbps) を目標とした。地震等の突発事象の測定に対応するため、低消費電力で動作する監視モードを設ける。表 1 に主な開発目標仕様を記載する。

表1 傾斜マルチセンサ端末の主な開発目標仕様
Table 1. Major development target specifications of tilt-multi-sensor terminals.

	傾斜測定	振動測定	温度
測定範囲	$\pm 45[\text{deg}]$	$\pm 2,000[\text{gal}]$	$-40 \sim 80[^\circ\text{C}]$
周波数範囲	DC~2[Hz]	0.1~50[Hz]	(DC~2[Hz])
安定性	0.05[deg]	0.86[gal]	
分解能	0.006[deg]	0.1[gal]	0.1[$^\circ\text{C}$]
無線通信	送信速度: 1Mbps, 通信距離: 30[m]以上, 時刻同期精度: $\pm 1[\text{msec}]$		
使用温度範囲	$-30 \sim 60[^\circ\text{C}]$		
電源	太陽電池 面積: $40 \times 60[\text{mm}]$ 発電量: 600[mW]		
大きさ	$70 \times 100 \times 50[\text{mm}]$		

〈3・2〉開発結果 開発した傾斜マルチセンサ端末のインナーユニットの写真を図6に示す。前記MEMSセンサユニットを含むアナログ回路、無線通信モジュールを含むデジタル回路、太陽電池および電力蓄電用のキャパシタが一体的なユニットとなっている。このインナーユニットを共通基盤Grで開発したセラミックパッケージに収納し透光性セラミックで封止する構造とした。セラミックパッケージに収納後の外観写真を図7に示す。表2に主な目標と評価結果を示す。概ね目標達成を確認した。

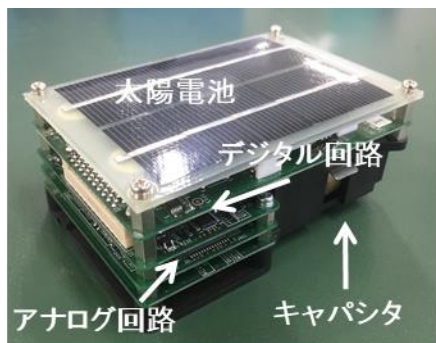


図6 インナーユニットの写真
Fig. 6. Photo of inner unit.



図7 傾斜マルチセンサ端末の外観写真
Fig. 7. Photo of tilt-multi-sensor terminal.

表2 傾斜マルチセンサ端末の目標仕様と評価結果

Table 2. Target specifications and evaluation results of tilt-multi-sensor terminals.

No	項目	目標仕様	結果
1	マルチ計測動作	傾斜、振動、温度のマルチ計測	傾斜、振動、温度のマルチ計測を確認 傾斜角±45degを確認
2	無線通信	通信速度:1Mbps 通信距離:30m以上	1Mbps、50mの通信を確認、3分間計測データの伝送を確認(集約器との組合せ評価)
3	時刻同期	時刻同期精度:±1[ms]	時刻差0.07ms以下を確認(集約器との組合せ評価)
4	間欠計測動作	3分間/1時間の間欠測定 センサ8台接続での間欠計測	3分間/1時間の間欠測定を確認 センサ3台での間欠計測を確認
5	自立電源動作	太陽電池による駆動 *太陽電池:600mW	室内ライトによる動作確認 太陽電池:612mW以上
6	監視モード	突発事象による計測 検出の閾値: 可変:-490~490gal(暫定) 計測:1~3分間(暫定)	突発事象による計測を確認 検出の閾値:50gal、計測 3分間欠計測中突発、突発計測中の間欠計測を確認

4. センサネットワークシステムの構成

図8に傾斜マルチセンサシステムの構成を示す。情報板の基部、頂部、内部の3か所にセンサ端末を設置し、センサ端末と集約器間を920MHzの無線通信で、①集約器から各センサ端末へ時刻データを送信し、各センサ端末間の時刻ずれを±1msec以内にする時刻同期と②各センサ端末から集約器へ1時間に1回センシングデータ送信を行っている。一旦集約器へ集められたデータはコンソレータへ送られ、携帯電話回線を用いてRIMSサーバーへ収集される。また、詳細は省略するが、比較のために傾斜マルチセンサ端末に隣接して既存の加速度センサを設置してデータ比較を行った。

本システムを用いて取得したデータ例を図9に示す。この図に示したように、開発した傾斜マルチセンサ端末と既存センサでは同等の信号が得られていることがわかる。また、開発した傾斜マルチセンサ端末の加速度分解能は0.1gal(約2mgal/√Hz)であるのに対して、情報板の振動は常時10gal程度の強度があるので、十分なSNが確保できている。

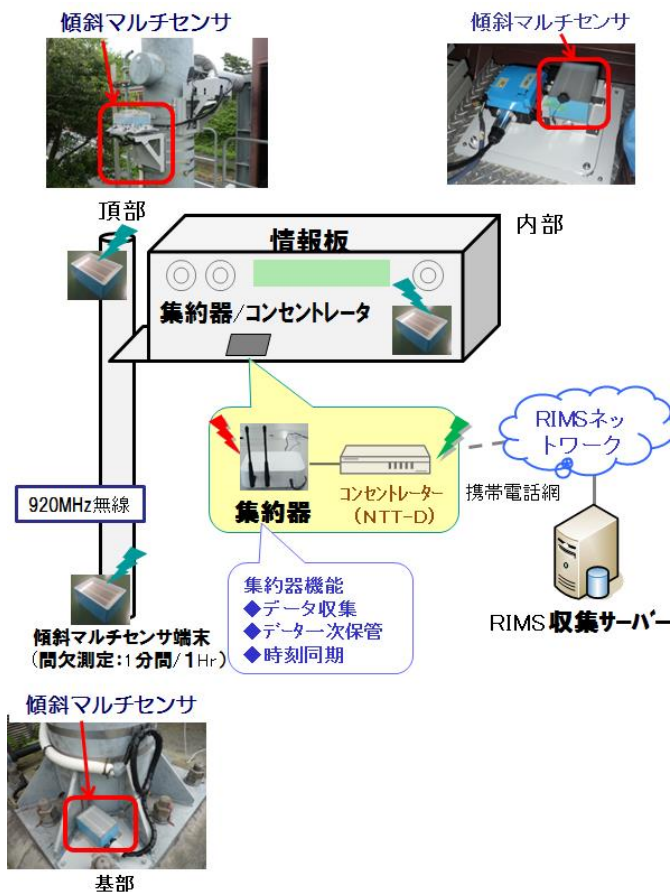


図8 傾斜マルチセンサシステム構成
Fig. 8. Tilt-multi-sensor system configuration.

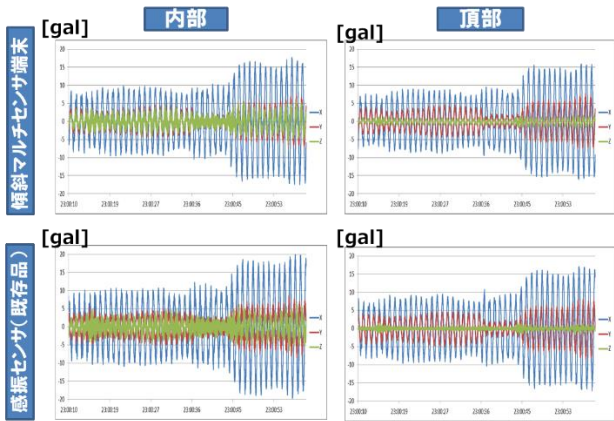
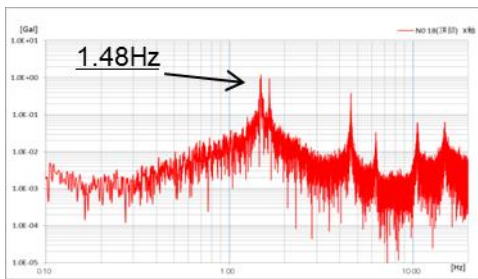
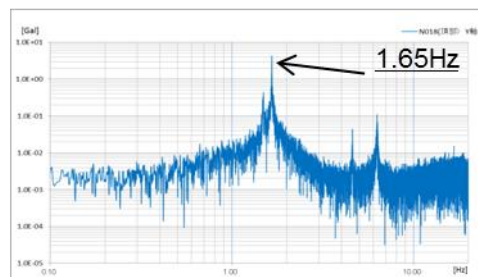


図9 傾斜マルチセンサと既存センサの加速度比較
Fig. 9. Acceleration Comparison of Tilt-multi-sensor and Existing Sensor.



a)頂部 道路方向



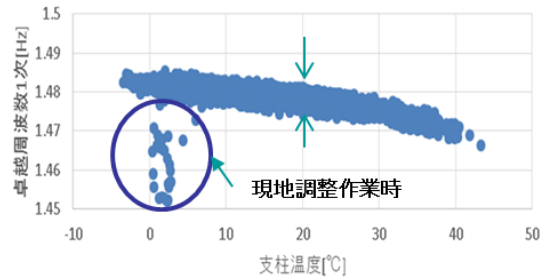
b)頂部 道路幅方向

図10 情報板頂部に設置した加速度計のフーリエ変換結果
Fig. 10. Result of Fourier transform of accelerometer installed at top of an information board.

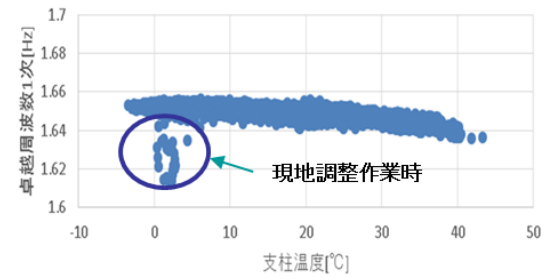
5. 先行フィールド試験による情報板の挙動計測

傾斜マルチセンサ端末による計測に先立ち、情報板の挙動を理解するために、既存センサによる先行試験を行った。計測場所は東名高速道路下り線吾妻山トンネル入り口手前の情報板で計測点は前出と同様に、基部、頂部、内部に既存の加速度センサを設置し、24時間の連続計測を行った。図10は振動をフーリエ変換した結果の代表値を示す。道路方向と道路幅方向で若干の相違が見られるが、1.48Hz、1.65Hz、4.63Hz、6.26Hzに固有振動数のピークが検出された。

図11に期間：2015/12/16～2017/2/23（435日間）で得られた振動から1時間毎の卓越周波数（1.48Hz、1.65Hz）を



a)頂部 道路方向



b)頂部 道路幅方向

図11 卓越周波数と支柱温度の関係
Fig. 11. Relationship between dominant frequency and strut temperature.

求め、横軸に支柱温度、縦軸にそれぞれの卓越周波数をプロットした結果を示す。図中の楕円で示した領域の周波数低下は現地作業時に情報板へ人が上ったことによる重量増加によって発生したものである。このように卓越周波数は質量増加やバネ定数の変化に敏感な定量値であり、情報板の状態を示す定量値に適していると考えられる。

共振周波数： f_0 とバネ定数： k_0 、質量： m_0 には、

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_0}{m_0}} \dots \dots \dots (1)$$

なる関係がある。周波数の逆数を τ と定義して、バネ定数が変化しない場合、(1)式を変換すると、以下の式を導くことができる。

$$\frac{\delta\tau}{\tau_0} = \frac{\delta m}{2m_0} \dots \dots \dots (2)$$

図11で見られた重量増加によって発生した周波数低下実測値から、情報板の質量を1tonとして(2)式で質量増加： δm を算出するとおよそ50kgが得られた。これは、作業中に増加した人の質量にほぼ等しい。

また支柱温度の上昇によって0.02～0.018%/℃の周波数低下が観測された。質量一定の条件で(1)式を変換すると、以下の式が導かれる。

$$\frac{\delta f}{f_0} = \frac{\delta k}{2k_0} \dots\dots\dots (3)$$

鋼のヤング率は温度上昇に伴い 0.03%/℃で低下するので、(3)式から導かれる周波数の温度変化は 0.015%/℃程度であり、実測値とほぼ一致している。

図 12 に 1 時間毎正時の振動データをフーリエ変換する際に、1 時間すべてのデータを使ってフーリエ変換した場合から順に 5 分、3 分、1 分と徐々に使用データ量を減らしてフーリエ変換したときの卓越周波数の標準偏差を示す。この値は図 11(a)の矢印で示した卓越周波数の幅の 1/6 程度に相当する。

傾斜マルチセンサでは低消費電力化のために、1 時間毎に 1~3 分の計測を行う設計とした。したがって、卓越周波数の分解能が 3~5.5mHz にて情報板の変状が観測可能かどうかの確認が必要となる。

6. シミュレーションによる情報板の挙動解析

先行フィールド試験は東名高速道路で実際に使用されている正常な情報板にセンサを設置して計測を行っている。この使用中の情報板に何らかの瑕疵・劣化を加えてどの程度計測値が変化するか実験することはできないので、シミュレーション上で瑕疵を与えて物理量の変化を計算した。

図 13 に示すような 3 次元モデルを構築し、動解析を行い、低周波側から 4 つの固有振動状態をシミュレートした結果を図 14 に示す。それぞれの固有振動数（実測値）は、1.48(1.48) Hz, 1.588(1.65) Hz, 4.529(4.63)Hz, 6.663(6.26) Hz であって、実測値と概略一致する値が得られた。この計算値を正常値と見なして、瑕疵として基部設置ボルトの欠損による周波数の変化を計算した結果、図 13 に示す 8 箇所の基部設置ボルトのうち、1 本を緩めると（完全なフリー状態）、1 次モードで 1~3% (0.02~0.06Hz) 周波数が低下することがわかった。

前項では 1 分の実測で標準偏差が 5.5mHz であることを示したが、シミュレーションした変状の周波数低下は標準偏差の約 4~11 倍であるので 1 本のボルトが緩む変状を問題なく計測できる。

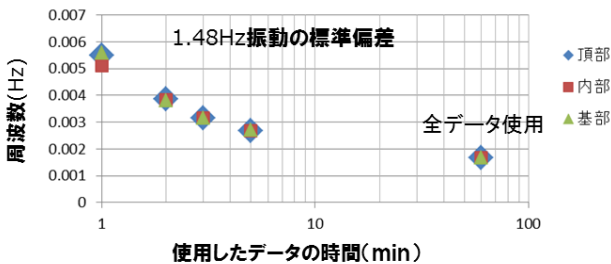
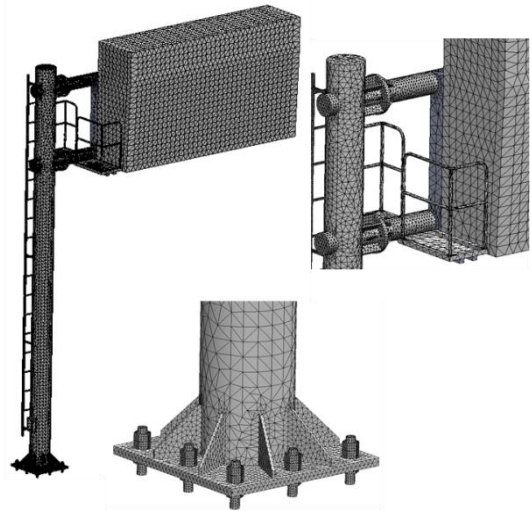


図 12 1 次振動 (1.48Hz) での卓越周波数の標準偏差
Fig. 12. Standard deviation of first order frequency (1.48 Hz).



自由度 : 917,844 節点数 : 306,436 要素数 : 165,008
図 13 情報板のシミュレーションモデル

Fig.13. A simulation model of the information board.

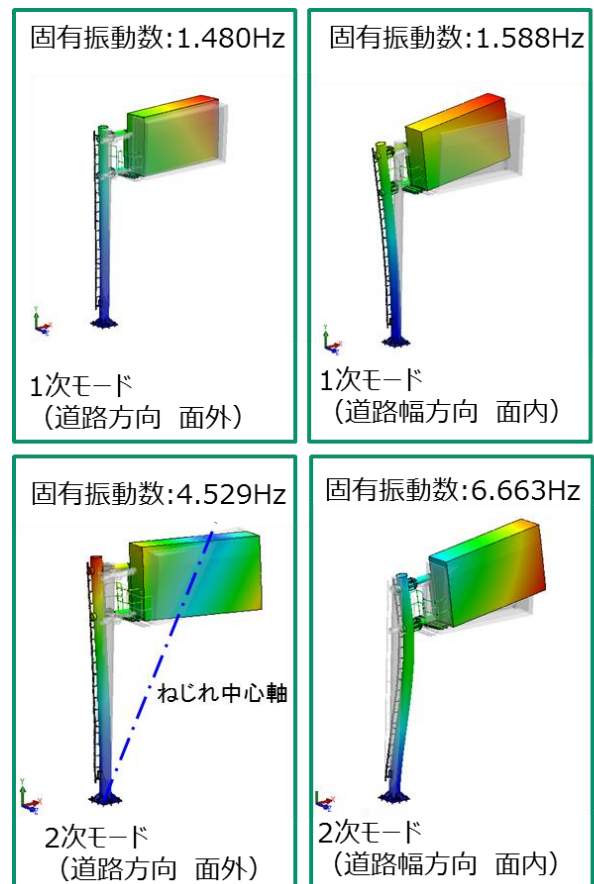


図 14 計算された 4 つの固有振動状態
Fig.14. States of four calculated natural vibrations.

7. まとめ

・本プロジェクトの前半の約3年間でMEMSセンサユニットおよび傾斜マルチセンサ端末のプロトタイプの開発と計測システムの開発を略目標通りに進めることができた。

・先行フィールド試験より下記が確認できた。

①現地調整作業に伴い、40mHz程度の1次モード周波数低下が観測された。この値は約50kgの重量増加と概算できるので人の体重増を計測したと考えられる。

②1分データ長にて情報板の卓越周波数を解析した場合の1次モードの標準偏差は5.5mHzであった。一方基部設置のボルトが1本緩んだ時の1次モードの固有振動数低下をシミュレーションで求めたところ、20~60mHzであった。これは実測の標準偏差より十分大きく、変状を観測可能であると考えられる。

<今後の展開>

H29年度からは実証実験を開始し、継続中である。センサ端末およびセンサシステムについてすでにいくつかの課題を抽出し、改良検討を実施している。さらに、施設管理者に向けた計測データ解析や表示方法についても研究を進めている。今後は実用化に向け、課題の整理と対策の検討を行う予定ある。

8. 謝辞

本開発はNEDOインフラ維持管理・更新等の社会課題対応システム開発プロジェクトのインフラ状態モニタリング用センサシステム開発にてNMEMS技術開発機構が受託した「道路インフラ状態モニタリング用センサシステムの研究開発」のサブテーマとして実施している。本研究開発の過程でリーダの下山先生をはじめ多くのプロジェクトメンバーの方から貴重なアドバイスをいただいた。現在実施中の実証実験では実際に道路付帯設備を管理されている中日本高速道路(株)御殿場保全サービスセンターおよび関係者の方々から多大な協力をいただいた、この場をかりてお礼を申し上げます。

文 献

-
- (1) 道路インフラモニタリングシステム (RIMS) の研究開発,2017年 MEMS センシング&ネットワーク展講演資料