

## 周波数シフト帰還型レーザを用いた長距離・非接触による高精度計測の検証報告

(株)計測リサーチコンサルタント 正会員 ○藤井真人 正会員 久保田 慶太 正会員 宮本則幸  
 東北大学大学院 非会員 原 武文 非会員 伊藤弘昌  
 東京大学大学院 フェロー会員 藤野 陽三

### 1. はじめに

建設分野の計測技術に求められる要求性能は、他産業のそれと比べて決して容易なものではない。その例として、図1に変位計測の場合に要求される精度と対象物までの距離の関係を示す。対象物までの距離  $L$  が 100m で必要とする精度  $S$  が 0.1mm などという要求性能は稀な話ではなく、要求される性能は  $S/L=10^{-6}$  である。また、建設分野の計測技術に求められるのは精度だけではない。非接触で、より高密度な情報の獲得が要求されており、その方法の一つとして光学的全視野計測技術が期待されている。光学的全視野計測とは、「光の性質を利用して、対象物の情報を2次元、3次元的に把握する手法」である。光学的全視野計測は、対象物にセンサを取り付けて計測する方法などと比べると、次のような特長がある。

- ① 遠隔・非接触な計測が可能  
足場等の仮設が不要で、また、設置型のセンサに必要な信号線が不要である。
- ② 多点の情報を短時間で取得可能  
計測範囲の多点の情報が短時間で取得でき、1点当たりの計測コストが安価となる。
- ③ 高密度な可視化情報として表現可能  
2次元、3次元の高密度な計測結果から、平面的・立体的な表現が可能となる。

これらの特長により、安全かつ安価に高密度の可視化情報にして対象物の状態を視認しやすくなることから、光学的全視野計測技術が設置型のセンサ技術や非破壊検査技術と同等以上に計測できる独特の技術分野であるといえる。

光学的全視野計測技術の1つである東北大学が開発した周波数シフト帰還型レーザ(以下FSFL)は、その測定原理において、非接触で変位を測定することが可能で、その測定精度は距離に依存しないという特徴を有し、さらに動的な測定が可能である。また、装置は駆動機能も有しており、レーザの照射方向を制御することにより全視野計測が可能となる。今回、橋梁や構造物のモニタリングにおけるFSFLの適用性を評価するため、フィールドにおける長距離区間の変位測定性能の検証、供用中の橋梁でのたわみ計測を実施した。本論文では、その検証結果について報告する。

### 2. 測定原理と計測装置の構成

FSFLは、レーザ共振器内部に光周波数シフターを持ち(図2)、光波は共振器を周回する度に一定の周波数シフトを繰り返す。その結果、光周波数コムと呼ばれる周波数チャープ出力が得られる(図3)。この周波数チャープ光をプローブ光と参照光の2つの光波に分割し、干渉計光路差を与えて再び合成することにより、その光路差に比例した複数のビート周波数を得ることができ、ビート周波数に含まれる距離情報を信号処理によって抽出することにより、高精度の長距離区間の変位測定が可能となる<sup>1)</sup>。FSFLの構成は、光源部、信号処理部、表示部から成り、信号処理部と表示部は一体型である。図4にFSFLの外観と構成を示す。

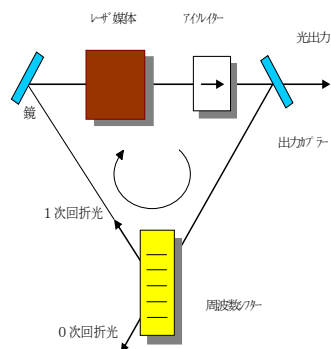


図2 FSF レーザの基本構成

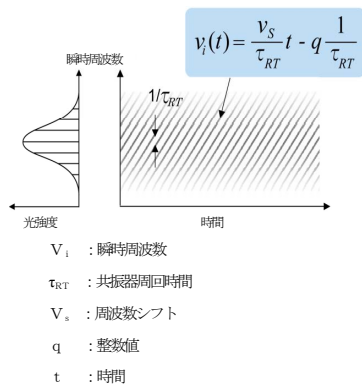


図3 チャープ周波数出力

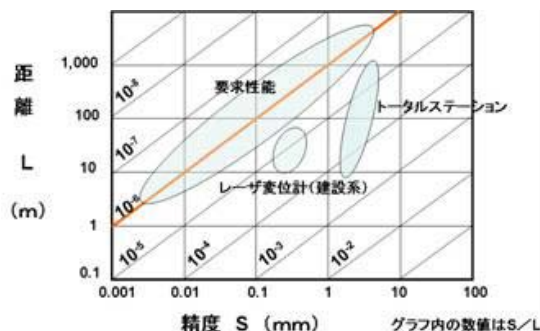


図1 建設分野で要求される計測距離と精度



図4 FSFLの外観と構成

キーワード：光学的全視野計測 周波数シフト帰還型レーザ ヘルスモニタリング 遠隔 非接触 動的計測

連絡先 〒732-0029 広島県広島市東区福田1丁目665-1 (株)計測リサーチコンサルタント Tel:082-899-5472

〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-11 東北大学大学院工学研究科 Tel:022-795-4270

〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1 東京大学大学院工学系研究科 Tel:03-5841-6095

### 3. 長距離区間の変位測定性能の検証

フィールドにおける長距離区間で、FSFLの基本性能である変位測定性能の検証を行った。検証方法は、光源部から50m、100m、200m、300m、500mの各地点に、コンピュータで10 $\mu$ m刻みの移動制御が可能なプリズム移動制御台を設置し、50mm間を2mmピッチでプリズムを光軸方向に移動させ、2mm移動ごとに測定した。図5に500m地点におけるプリズムの移動量と測定結果の関係を示す。FSFLの測定データは、プリズム移動量と1対1の関係を示している。また、図6に500m地点におけるプリズム移動量2mmに対するFSFLの測定データ(400データ/秒 $\times$ 10秒=4000データ)のヒストグラムを示す。測定データは正規分布を呈しており、500m地点においても平均値 $\mu=2.004$ mm、標準偏差 $\sigma=0.196$ mmが得られた。この結果から、FSFLは距離に依存せず、非常に高い精度で変位量を測定できることが検証できた。精度は、他のセンサと比較して群を抜いており、500mの地点においても $S/L=3.9\times 10^{-7}$ の測定性能を持ち、さらには400点/秒のデータ取得が可能である。したがって、FSFLは図1に示した建設分野における要求性能を十分満足する。

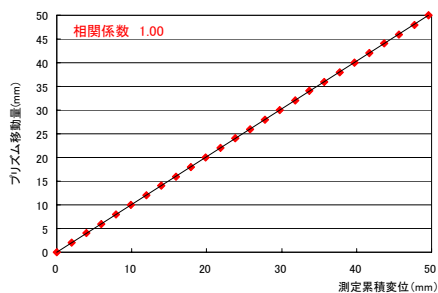


図5 プリズムの移動量と変位測定結果

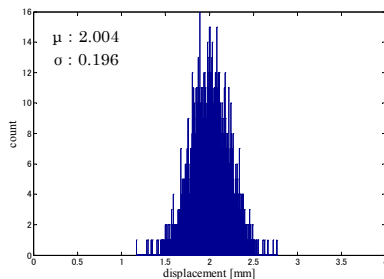


図6 FSFLの測定データ(500m地点)



図7 合成桁橋およびトラス橋全景

### 4. 橋梁のたわみ測定

橋梁のたわみの測定は、広島市内にある供用中の合成桁橋ならびにトラス橋を対象として行った(図7)。合成桁橋は、支間長23.0m、桁下5.7mであり、トラス橋は、支間長73.8m、桁下7.0mである。測定位置は、各支間の中央とし、FSFLのターゲットとして反射シートを用いた。また、比較対象のセンサは、高感度変位計を使用した。

測定は、スキャナユニットを桁直下の地盤に設置するとともに、桁下に足場を仮設して桁下面に接触型の高感度変位計を設置して行った。サンプリングピッチは200Hzとし、5分間の測定時間とした。車両通行時の橋桁のたわみ測定結果を図8に、FSFLおよび高感度変位計のたわみのピーク値を任意に抽出し、プロットした相関図を図9に示す。なお、橋桁のたわみ量は全測定データの平均値を基準としたものである。FSFLの測定結果は、合成桁橋およびトラス橋ともに、車両通過時の橋桁のたわみを1mm以下でも測定できており、また、FSFLと高感度変位計の測定データのピーク値に着目すると、両者は完全に一致している。これらの測定結果から、FSFLによって、非接触かつ高精度で車両通行時の橋梁のたわみを測定できることが検証できた。

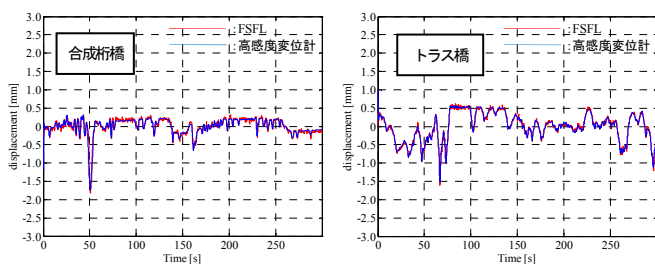


図8 車両通行時における橋桁(支間中央)のたわみ測定結果

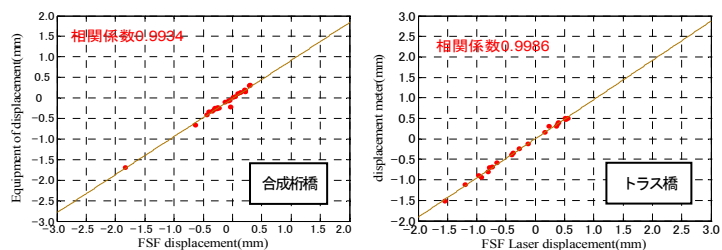


図9 たわみのピーク値の相関図

### 5. おわりに

FSFLは、これまでにない測定原理を用いて長距離・非接触による高精度な変位計測を可能にしている。本実験において、遠距離にある対象物の変位を非接触かつ高精度で測定できることを検証し、また、実橋梁において車両通行時の桁のたわみ測定も可能であることを確認した。これらの結果から、FSFLが橋梁や構造物の新しいモニタリング技術として十分に適用できる段階にあるといえる。FSFLが光学的全視野計測技術として確立することにより、さらに2次元・3次元的に高精度なモニタリングが可能となることから、今後の土木構造物のモニタリング技術に新しく展開できるものと期待される。

### 謝辞

FSFLの検証にあたり、フィールドを提供頂いた国土交通省太田川河川事務所、及び広島市安佐北区役所に対し、心より御礼申し上げます。

参考文献 1) 原 武文、Cheikh NDIAYE、伊藤弘昌：周波数シフト帰還型レーザーによる超高精度光計測技術 応用物理 第74巻 第6号 (2005年)