

多点型レーザードップラー振動計

木村 広太 藤井 亮浩
村井 仁

近年、生産現場での稼働効率向上のためにプラント機器の突発的故障を未然に防ぐための予知保全技術への期待が高まっている¹⁾。著者らはこれらの期待への解決策の一つとして、複数点での振動監視が実現可能なレーザードップラー振動計（以下、多点型レーザードップラー振動計）の開発を進めている。本稿では、著者らが提案する多点型レーザードップラー振動計の基本構成と基本動作結果、実際にプラントで生じる振動の測定結果を述べる。

従来の予知保全の方式とその課題

現在、機器の温度や振動の時間的変動を検出して、変化の兆しを事前に通知するためのセンサーシステムが市場に出始めている^{2),3)}。突発的な故障が許容されない典型的なプラント機器の一つに、ポンプやコンプレッサーのような回転機器が挙げられる。一般に回転機械の状態同定に必要な振動の測定周波数帯域は10Hz～1kHzと規定され⁴⁾、現状、市場に存在する監視システムもほぼ1～3kHz程度が測定可能上限周波数となっている^{2),3)}。

しかし、産業用回転機器の早期予兆検出のためには10kHz～30kHzの測定周波数帯域が最適であるとの研究報告例がある⁵⁾。実際、工業用ポンプは従来の判定基準⁴⁾に比べ遥かに高周波で故障の予兆を示す卓越周波数が測定された例も報告され⁶⁾、従来よりも早期にプラント機器の状態変化を検出するためには、より高周波（著者らは上限を30kHz～50kHzとして検討している）までの振動周波数を監視することが望ましいと考えられる。

現在使用されている一般的な振動計は、センサー素子可動部と固定部間の静電容量変化から加速度を検出するMEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 加速度センサーが挙げられる。このような接触型の振動計は、測定対象部に恒久的にネジで固定された状態、或いは着脱可能なようにマグネットで装着された状態で用いられる。弊社で行った製造現場に対するヒアリングによると、プラント機器のメンテナンスのし易さから、着脱可能な後者の状態で用いるニーズが高いことが明らかとなっている。しかし振動計本体が固有振動数を持つため、後者の場合は正確に測定可

能な周波数の上限が5kHz程度であるとの報告がある⁷⁾。従って、30kHz～50kHzの振動を正確に測定するためには非接触で振動を測定することが望ましいと考えられる。

表1に、市場に流通している非接触振動計の一般的スベックをまとめた。このうち、渦電流式振動計、静電容量式振動計は電磁気的な作用により対象物の変位を検出し、その値から対象物の振動を検出する。ただし、対象部は金属に限定され、対象物との距離も小さい。レーザー変位計は数10cmまでの距離が許容されるが、測定可能周波数やはり10kHz以下と、著者らが検討している周波数帯域よりも小さい。レーザードップラー振動計は、距離、測定可能周波数とも十分であるが、数百万円と極めて高額であり、プラント機器の監視用途での利用は難しい。高価な理由は、コヒーレント検波で必須となる位相雑音特性が良好なレーザーが高価であるからと考えられる。

表1 非接触振動計の分類

	渦電流式 振動計	静電容量式 振動計	レーザー 変位計	レーザー ドップラー 振動計
測定 原理	磁界から 変位を算出	静電容量から 変位を算出	三角測量法 により変位 を算出	光位相から 変位または 速度を算出
測定 距離	< 数 10mm	< 10mm	< 数 10cm	< 5～10m
周波数 範囲	1Hz～10kHz	1Hz～10kHz	1Hz～10kHz	～数 MHz

日本経済新聞(2017)、“日本製紙、設備の温度と振動加速度を無線で常時監視するシステム「e-無線巡回」を開発”によれば、「多くの機械装置の振動を低価格で監視したい」というニーズが存在する⁸⁾。しかし、レーザードップラー振動計の場合非常に高価となるため、複数点での振動を測定するために複数台のレーザードップラー振動計を用いることはコスト面で現実的ではないと考えられる。

そこで、著者らは、高価なレーザー一つに対して複数のセンサーヘッドを付与し、複数点での振動監視が実現可能な多点型レーザードップラー振動計の開発を試みた。これにより、振動による予知保全技術の一端を担いたいと考えている。

一般的なレーザードップラー振動計の原理

レーザードップラー振動計は、光のドップラー効果を利用して非接触で振動を測定する装置である。ドップラー効果とは、波（光波や音波）の発生源と観測者の運動状態によって、散乱された波の周波数が変化して観測される現象である。図1に光のドップラー効果の様子を示す。物体に光を照射すると、散乱光が発生する。このとき物体が振動状態にあると、散乱光の波長はドップラー効果により変化する。従って、散乱光を受光し、波長の変化量を検知することによって、振動を測定することが可能となる。

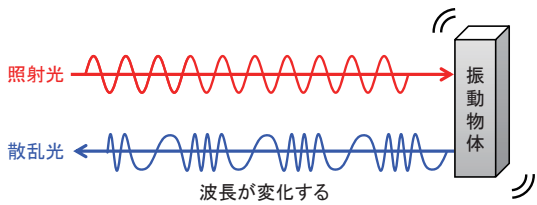


図1 光のドップラー効果の様子

一般的なレーザードップラー振動計の構成を図2に示す⁹⁾。レーザ光源から出力された連続光はビームスプリッターにより分岐され、一方は測定対象に照射するためのプローブ光、もう一方は散乱光と干渉させるための局発光として用いられる。プローブ光はもう一方のビームスプリッターを通過し、センサーヘッドから空間に出射され、測定対象に照射される。測定対象から生じた散乱光は一部が再びセンサーヘッドによって捕捉され、光位相検出回路に入射される。光位相検出回路では先ほど分岐した局発光と散乱光が干渉し、ドップラー効果由来の振動成分が得られる。その後受光器、アナログ・デジタル変換器を介して信号処理回路によって光の位相すなわち振動の情報が得られる。

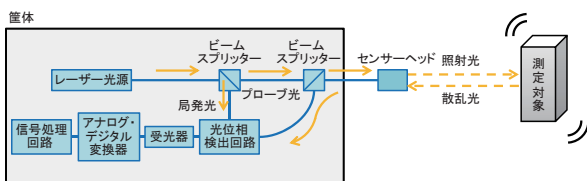


図2 一般的なレーザードップラー振動計の構成

多点型レーザードップラー振動計の概要と評価結果

次に著者らが提案・開発した多点型レーザードップラー振動計を説明する。一台のレーザに対して複数点の振動測定を可能にするためには、センサーヘッドを複数個用意し、各センサーヘッドへのプローブ光の入射を時分割的に切り替えれば良いと考えられる。そのような動作を実現

するデバイスとしては光スイッチが挙げられる。1×N光スイッチを用いてプローブ光をN個のポートに時分割的に切り替えセンサーヘッドから出射することで、多点(N点)の振動を測定することが可能となる。多点型レーザードップラー振動計の構成を図3に示す。

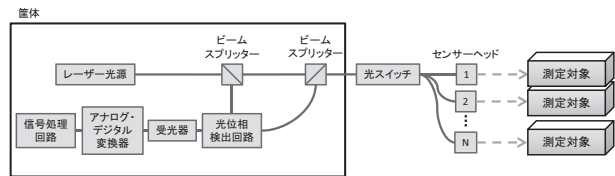
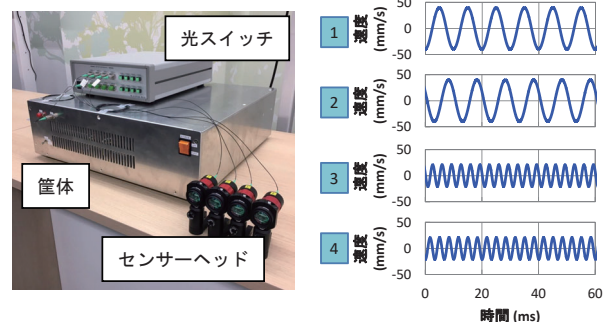


図3 多点型レーザードップラー振動計の構成

上記多点型レーザードップラー振動計を用いて基本動作を評価した結果を述べる。まず、多点測定を評価した。本評価では1×4光スイッチと4個のセンサーヘッドを用いて4点の振動を測定した。センサーヘッド1、2、3、4からの照射光はそれぞれ100Hz、100Hz、300Hz、300Hzの周波数で振動する測定対象に照射した。測定対象には反射率5%の拡散反射板を使用し、センサーヘッドから測定対象までの距離は50cmとした。実験系と評価結果を図4に示す。図4(b)の結果から全てのセンサーヘッドで所望の振動が測定でき、多点の振動測定が可能であることが見て取れる。次に検出可能な周波数範囲を調べるために、4個のセンサーヘッドのうちの1個を用いて測定した。一般的に振動は周波数と変位・速度・加速度を用いて表現され、図5に示した横軸：周波数、縦軸：速度のトリパタイトグラフ上の点で定義可能である。評価実験では、図5の網掛け部分の範囲の振動が測定可能であるという結果が得られた。ここで網掛け部分の外側の部分は、振動発生器などの動作制約により評価をすることができなかった領域である。以上の結果から、著者らが開発した多点型レーザードップラー振動計ではプラント機器の状態変化の検出に必要とされる高周波の振動(30kHz~50kHz)を多点で測定可能であることが示された。



(a) 実験系

(b) 結果

図4 多点測定の基本動作評価

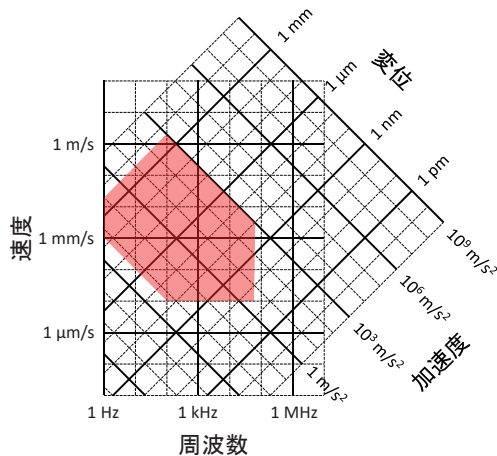


図5 測定可能領域

著者らが開発した多点型レーザードップラー振動計には三つの特長がある。一つ目は、本開発が光通信で培った光コヒーレント検波技術や信号処理技術を水平展開したものであるため、それらの技術を応用可能であり、また安価な光通信デバイスを使用することができる点である。例えば光通信にデジタル信号処理を応用することによって、受光部分を簡素化し小型化・低コスト化することが可能となる。二つ目は、可視光よりも目への悪影響が小さい通信波長帯の光源を使用するため、可視光に比べて高パワーに光増幅でき、その結果従来よりも100倍の高感度を実現することが可能な点である¹⁰⁾。従って、測定可能距離の長延化や反射率の小さい対象物の振動測定が可能となる。三つ目は安価な光スイッチを使用することによって安価に多点測定を可能にした点である。これにより、工場内に分散設置されているプラント装置を、一箇所に設置した振動計で一括して振動検知することが可能である。以上の特長をまとめると以下ようになる。

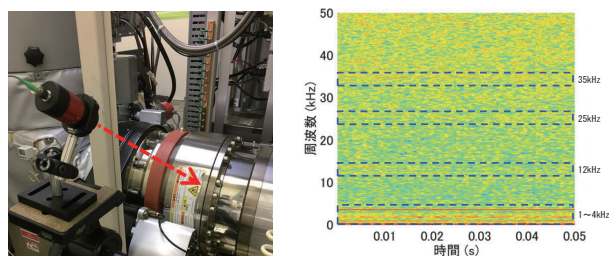
- ①光通信技術の応用:小型化・低コスト化が可能
- ②通信波長帯光源の使用:距離の長延化や対象物種の拡大
- ③光スイッチの使用:わずかなコストの増加で多点測定が可能

実証実験の例：真空ポンプの振動測定

半導体製造現場で多く使われている回転機器の一つにターボ分子ポンプがある。ターボ分子ポンプは真空ポンプの一種で、半導体生産現場では必須の機器であるが、ポンプの表面が高温かつ非磁性体のため、従来の接触型センサーを用いた振動測定が困難であった。そこで、著者らが開発したレーザードップラー振動計を用いてターボ分子ポンプの振動を測定した。

*1)e-無線巡回は、桜井株式会社の登録商標です。

実験風景と結果を図6に示す。図6(a)に示したように、ターボ分子ポンプの側面にセンサーヘッドからの出射光を照射した。そして、結果をスペクトログラム図に表示することで振動特性を可視化した。実験の結果、図6(b)に示すように、定常状態のときには複数の振動(1、2、4、12、25、35kHz)が観測された。中でも4kHzの振動は大きく、ターボ分子ポンプの状態を特徴づける振動であると考えられる。今後は多点型レーザードップラー振動計を用いてターボ分子ポンプのさまざまな箇所の振動を測定し、状態変化の検出に向けた特徴的な振動特性を見出すことを目指す。



(a) 実験風景

(b) 測定結果

図6 ターボ分子ポンプの振動測定実験

まとめと今後の展望

本稿では、著者らが独自に取り組んでいるレーザードップラー振動計について述べた。多点型レーザードップラー振動計は高周波の振動を非接触で安価かつ高感度で測定でき、新たな予知保全手法として期待できる。今後も実証実験を継続し、数十～百点の振動測定が可能となるように開発を進めていく。そして、OKIが開発する機械学習のアルゴリズム¹¹⁾と併合することでさまざまな工場やプラントの設備の予知保全の一端を担うことを目指す。 ◆◆

参考文献

- 1) 清水圭, 加部隆久:AIによる電子部品実装機の予兆検知, OKI テクニカルレビュー第231号, Vol.85, No.1, pp.20-23, 2018年5月
- 2) 桜井株式会社, 簡易設備監視システム e-無線巡回^{*1)}, <https://www.sakurai.co.jp/landing/e-musen/index.html>
- 3) 横河電機株式会社, Sushi Sensor, <https://www.yokogawa.co.jp/solutions/solutions/oprex/oprex-transformation/oprex-asset-management-and-integrity/sushi-sensor-j/>
- 4) 長田俊幸 (2002年), 稼働中ポンプの振動とISO10816-3, https://www.jstage.jst.go.jp/article/tsj1973/30/9/30_9_521/_pdf-char/ja

- 5) 迫孝司:軸受における異常兆候の早期検知と診断に関する研究、早稲田大学審査学位論文(博士)、2012年
- 6) 齋藤 稔:ポンプを極める～省エネ化のための選定法～、新電気2019年4月号
- 7) 旭化成エンジニアリング株式会社、振動診断基礎講座第4回<4月>、<https://www.asahi-kasei.co.jp/aec/pmseries/shindoshindan/4th.html>
- 8) 日本経済新聞(2017)、日本製紙、設備の温度と振動加速度を無線で常時監視するシステム「e-無線巡回」を開発、https://www.nikkei.com/article/DGXLRS450856_R10C17A700000/
- 9) 特開2001-159560、レーザードップラ振動計
- 10) Safety of laser products - Part 1: Equipment classification and requirements (2nd ed.), International Electrotechnical Commission, 2007.
- 11) 小林一樹、関根理敏:多様な動作パターンをもつ機器に適用可能な振動データを用いた故障予兆検知手法、OKIテクニカルレビュー第233号、Vol.86、No.1、pp.36-39、2019年5月

● 筆者紹介

木村広太:Kota Kimura. 経営基盤本部 研究開発センター
先端基盤技術研究開発部

藤井亮浩:Akihiro Fujii. 経営基盤本部 研究開発センター
先端基盤技術研究開発部

村井仁:Hitoshi Murai. 経営基盤本部 研究開発センター
先端基盤技術研究開発部

TiPo 【基本用語解説】

光スイッチ

光路の切り替えやオン・オフを行うためのデバイスを指す。入力ポート数がM、出力ポート数がNの光スイッチをM×N光スイッチと呼ぶ。

トリパタイトグラフ

振動における変位・速度・加速度の3要素と周波数の関係の一つの図で表現したもの。振動諸元換算表とも呼ばれる。