

状態監視振動診断技術者コミュニティ 第6回ミーティング 「非接触変位センサの原理と特徴」

2014年10月3日
新川電機株式会社
センサテクノロジー営業統括本部
技術部 瀧本 孝治

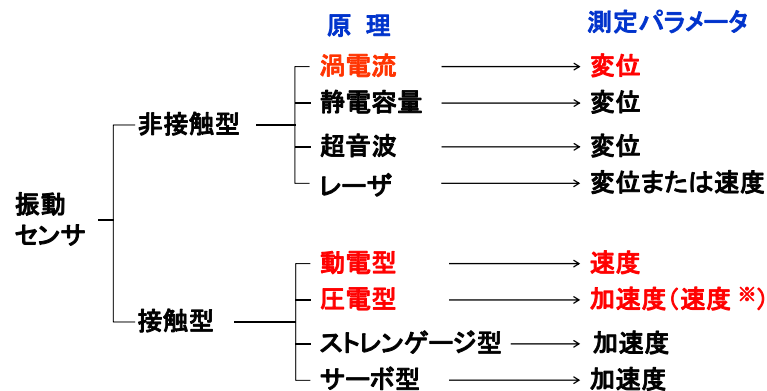


非接触変位センサの原理と特徴

- 高速回転機械の状態監視において、軸振動計測は重要な監視項目の1つである。
- 高速回転機械の軸振動計測には、一般的に渦電流方式の非接触変位センサが適用される。
- 渦電流式非接触変位センサに関する原理と特徴、取り扱い上の注意、関連規格の説明。
- 渦電流式非接触変位センサの軸振動計測以外のアプリケーションの紹介。



振動センサの種類



※ 積分回路内蔵の圧電型速度センサの場合



渦電流式変位センサ

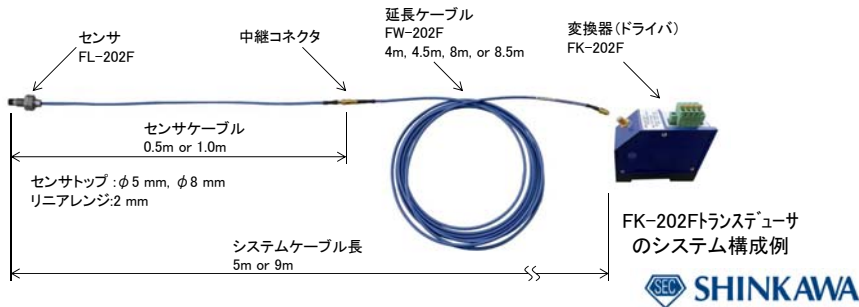
- すべり軸受で支持された大型回転機械の状態監視や振動解析には、軸振動の測定が不可欠。
- 回転している軸の挙動を測定するために、非接触振動センサとして渦電流式変位センサを適用。
- 軸振動計測用の渦電流変位センサは通常 API 670 規格に準拠したセンサを適用。



渦電流式変位センサ

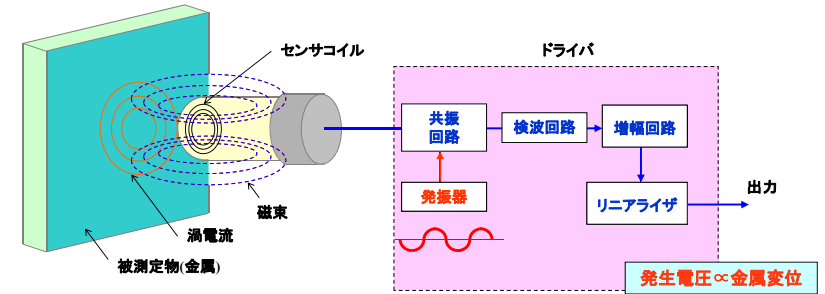
渦電流式変位計の構成要素:

- ・センサ(内部先端部にコイルを持つ)
- ・ドライバ(発振・検波等の電子回路からなる変換器)
- ・延長ケーブル(センサと変換器をつなぐ専用の同軸ケーブル)



5

渦電流式変位センサの原理

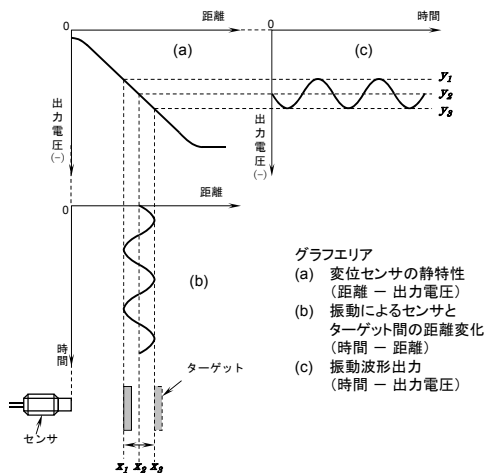


1. 発振回路からセンサコイルに高周波(数MHz)信号を供給
2. センサコイルから高周波磁束を発生
3. 金属の表面に渦電流が発生
渦電流の大きさはセンサコイルと金属との距離により変化
ターゲット金属を含むセンサコイルのインピーダンスが変化
4. 共振回路出力の電圧変化として取り出す
5. 検波回路・リニアライザ回路により距離に比例した電圧を出力

SHINKAWA

6

振動による距離の変化と出力電圧の変化



- 渦電流式変位センサは距離(ギャップ)を測定する変位計
- 周波数応答はDC~10kHz程度
- 距離(センサ入力)の変化に対する変換器の出力は一對一で追従
- 出力電圧 y_1, y_2, y_3 に対する距離 x_1, x_2, x_3 は既知の値で比例関係
- y_1 と y_3 の偏差 ($y_1 - y_3$) を演算処理することにより振動振幅を測定
- 計測精度にスケールファクタ ($\Delta y / \Delta x$) が重要

SHINKAWA

7

渦電流式変位センサの原理的特性

1) 非接触で変位振動を測定できる

ターゲットとの距離(ギャップ)に比例した電圧を出力し、直流(静止した状態の距離)から高い周波数まで応答するため、振動だけでなく軸位位置計のような変位測定にも使用可能である。

2) ターゲットは導体(通常は金属)に限られる

ターゲット表面に渦電流を発生させることで測定が可能となるため、通常ターゲットは良導体である金属に限られる。また、その原理よりターゲットの固有抵抗と透磁率の違い、つまり材質の違いにより特性が変わる。

3) ターゲットは磁性材に限らない

上記とは逆に、電流が流れる材質であれば測定ができるためターゲットは鉄鋼材などの磁性体である必要はなくSUS304、アルミや銅など非磁性の金属でもターゲットとすることができる。

4) センサは耐環境性に優れている

原理的に電流の流れない絶縁物は感知しないので、油や水がかかっても影響を受けないで測定が可能である。

SHINKAWA

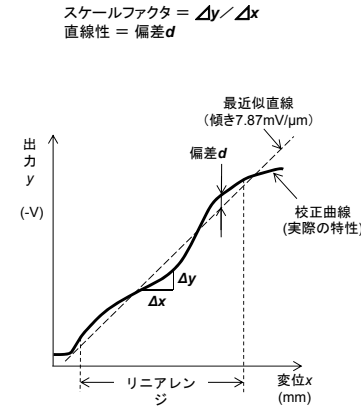
8

非接触変位センサに関する規格 API 670

項目	API Standard 670, 4th Edition, 2000 Specifications	
	スケールファクタ (ISF: Incremental Scale Factor)	7.87mV/μm ±5% (試験温度) 7.87mV/μm ±10% (使用温度範囲)
直線性 (DSL: Deviation from Straight Line)	傾き7.87mV/μmの最近似直線からの偏差 ±25.4μm 以内 (試験温度) ±76μm 以内 (使用温度範囲)	
リニアレンジ (Linear range)	2mm 以上	
使用温度範囲	センサ (Sensor) : -35°C ~ +120°C 延長ケーブル (Extension cable) : -35°C ~ +65°C ドライバ (Oscillator-Demodulator) : -35°C ~ +65°C	
湿度	100% RH (ただし非浸漬、コネクタ保護時)	
校正ターゲット材質	AISI 4140 steel (JIS SCM440相当)	
センサトップ径	標準 : φ7.6mm ~ φ8.3mm オプション : φ4.8mm ~ φ5.3mm	
センサネジ部	標準 : 3/8-24UNF リバース・マウント オプション : 3/8-24UNF, 1/4-28UNF, M10 × 1, M8 × 1	
フレキシブルアーマオプション	標準 : フレキシブルアーマなし オプション : ステンレスフレキシブルアーマ付	
センサケーブル長	1m (0.8m ~ 1.3m)	
延長ケーブル長	4m (3.6m以上)	
電源	-24VDC	

9

非接触変位センサに関する規格 API 670



- **スケールファクタ**
基準単位長さ当たりの出力変化($\Delta y / \Delta x$)であり、API 670 規格では基準単位長さを通常 250μm としてスケールファクタ基準値を 7.87mV/μm と規定。
- **スケールファクタ誤差**
実測スケールファクタの規定値に対する差。振動計測時の精度に関与する値であり、[振動の読み値] × [スケールファクタ誤差]が測定誤差に対応。
- **直線性**
傾き 7.87mV/μm の最近似直線に対する実測データ(校正曲線)の偏差。軸位置計のような変位測定に対する精度に対応。
- **リニアレンジ**
スケールファクタと直線性がAPI 670規格の規定値を満足する変位 x の範囲。

10

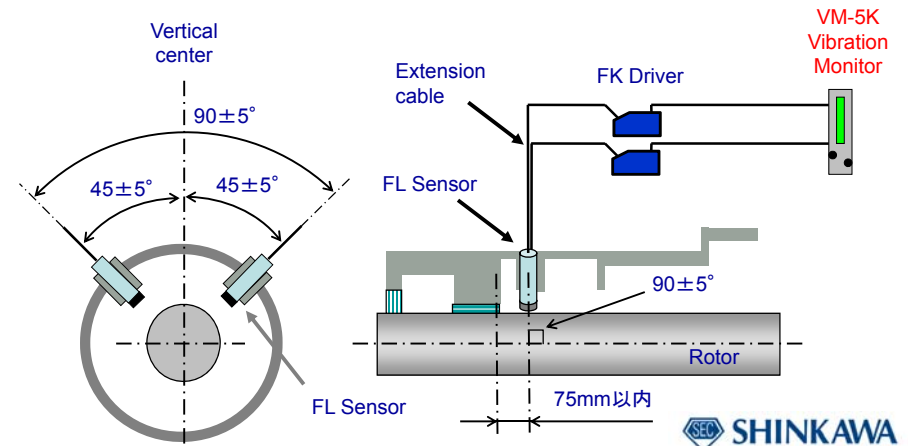
軸振動センサの取付に関する規定

項目	API 670 4th	ISO 7919-1, JIS B 0910
センサ数量/測定点	2個のセンサを取付けなければならない	2個1組のセンサを設置する ただし、軸振動についての情報が十分にあれば、1つのセンサを採用してもよい
センサ間の取付角度	90° ±5°	90° ±5°
回転軸とセンサの直角度	±5°	規定なし
垂線に対するセンサ取付角度	45° ±5°	規定なし
ベアリングとセンサ間距離	75mm以内	各軸受又はその近く

11

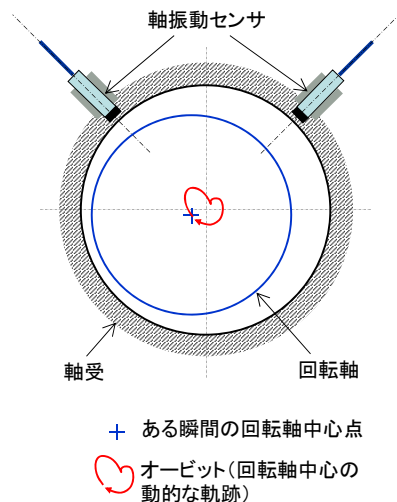
軸振動センサの取付に関する規定

API 670 4th Ed.の軸振動センサ取付規定を図示



12

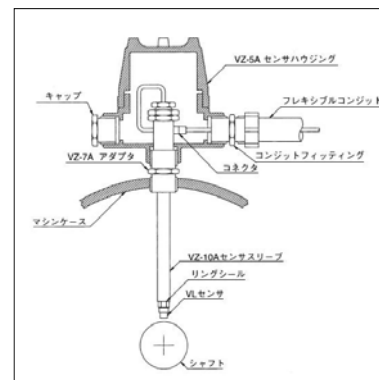
軸振動センサのX-Y取付の目的



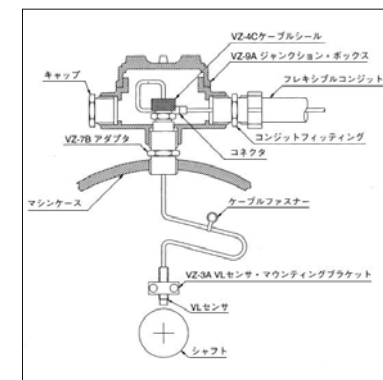
軸振動をより正確に計測して、一方方向取付けによる振幅値の過小評価の可能性というリスクを避ける。オービットやフルスペクトルなどの振動解析適用にも必要である。

オービットが円形であれば、どの方向から測定しても振幅値は同じ値となるが、楕円だと、測定する方向(センサの取付け方向)によってその振幅値が変わる。実際の機械の軸の挙動は、更に複雑な動きをすることがあり、一方方向にだけセンサを取付けていた場合、実際の振動の最大振幅を捉えることができず、振動振幅を過小評価してしまう可能性がある。

軸振動センサのマウンティング・キットの例



エクスターナル・マウンティング・キット



インターナル・マウンティング・キット

渦電流式変位センサの取扱上の注意

延長ケーブルの変更

- センサからドライバ(変換器)までの同軸ケーブルはセンサ回路の共振系の一部を構成しています。
- ケーブル種類やケーブル長の変更不可となります。

FK-202Fトランスデューサの組合せ例:

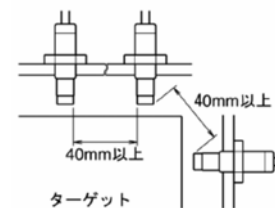
システムケーブル長を変更する場合は、ドライバの型番も変更する必要がある。校正ではシステムケーブル長の変更に対応できない。

FL-202Fセンサ	FW-202F延長ケーブル	システムケーブル長	FK-202Fドライバ			
0.5m	+	4.5m	==	5m	--	FK-202F1
1.0m	+	4.0m	==	5m	--	FK-202F1
5.0m	---	---	==	5m	--	FK-202F1
0.5m	+	8.5m	==	9m	--	FK-202F2
1.0m	+	8.0m	==	9m	--	FK-202F2
9.0m	---	---	==	9m	--	FK-202F2

渦電流式変位センサの取扱上の注意

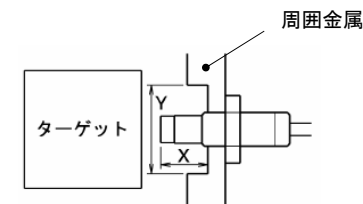
■ センサ近接による相互干渉

センサ同士が近接した場合、相互干渉によりビートノイズが発生する



■ センサ周囲金属の影響(ブラケット)

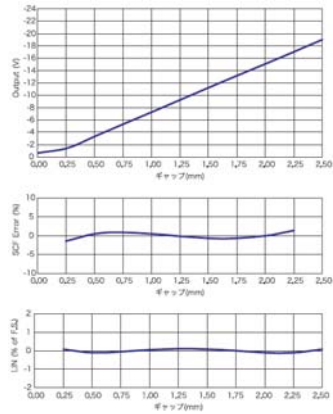
下記寸法があれば影響しない
 $X \geq 9mm$ $Y \geq 15mm$



※ FK-202Fトランスデューサの場合の条件を示す。

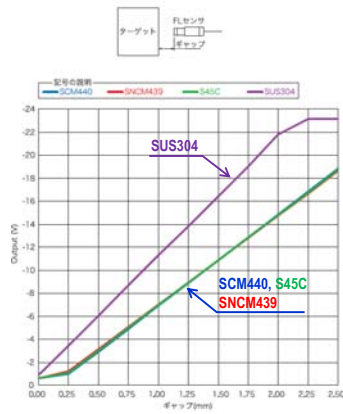
渦電流式変位センサの取扱上の注意

■ 標準静特性 (ターゲットSCM440)



※ FK-202Fトランスデューサの特性を示す。

■ ターゲット材質の影響



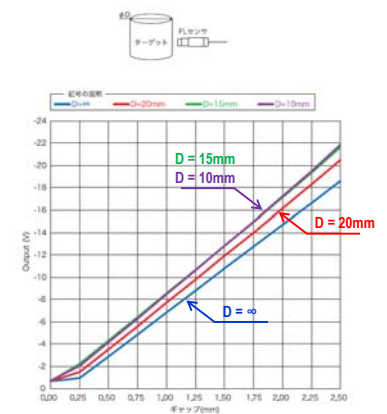
渦電流式変位センサの取扱上の注意

■ ターゲットの大きさの影響 (平面)



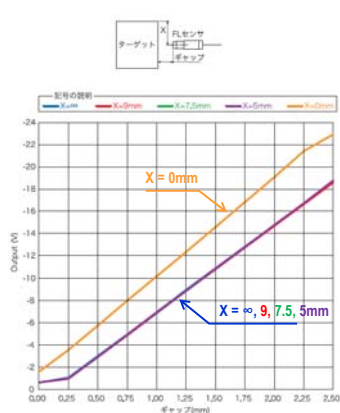
※ FK-202Fトランスデューサの特性を示す。

■ ターゲットの大きさの影響 (円柱)



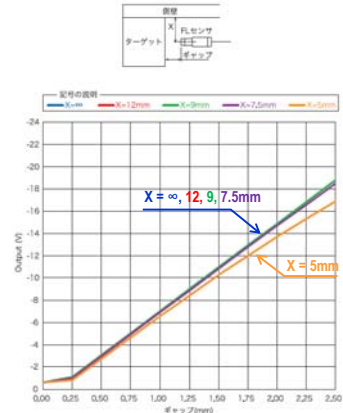
渦電流式変位センサの取扱上の注意

■ ターゲット端面による影響



※ FK-202Fトランスデューサの特性を示す。

■ センサ側壁による影響



軸振動計測におけるランナウト

ランナウト: 振動以外の原因で現れる振動に類似した信号

JIS B 0910 の 3.3.2項 (ISO 7919-1と同等規格)

「電氣的及び機械的なランナウトの合成和は、許容振動変位の25%又は6 μ mのどちらか大きいほうを超えないのが望ましい。」

API 670 の6.1.1.3 項

These probe areas shall be properly demagnetized or otherwise treated so that the combined total electrical and mechanical runout does not exceed 25 percent of the maximum allowed peak-to-peak vibration amplitude or 6 micrometers (0.25 mil), whichever is greater (see note).

軸振動計測におけるランナウト

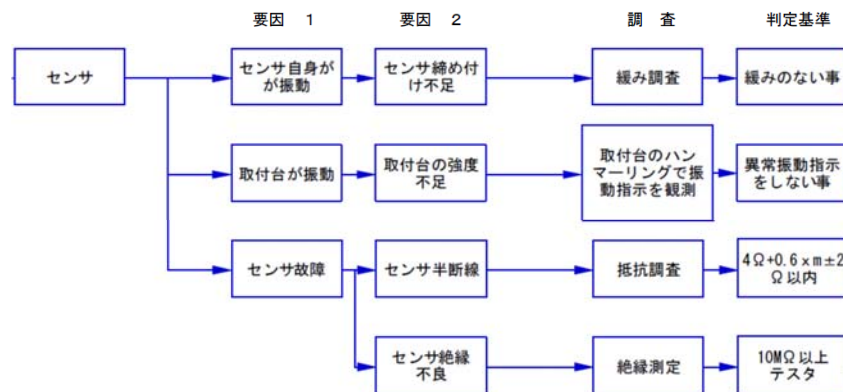
API 670 の6.1.1.3 項 Note

Note: Diamond burnishing with a tool-post-held, spring-mounted diamond is common. Final finishing or light surface-removal finishing by grinding will normally require follow-up demagnetization.

The proximity probe area should be demagnetized. The gauss level of the proximity probe area should not exceed ± 2 gauss. The variation of gauss level around the circumference of the proximity probe area should not exceed 1 gauss.

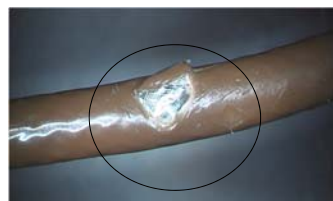
トラブルシューティング (センサ不具合に起因する要因)

VK-202A用センサVL-202Aの場合



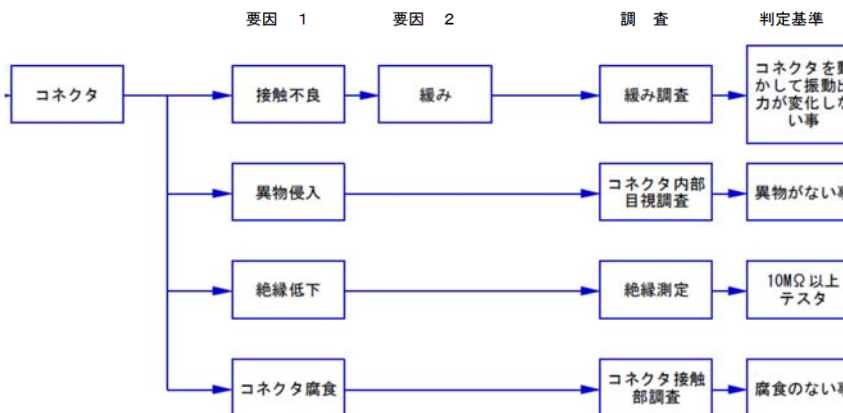
トラブルシューティング (延長ケーブル不具合に起因する要因)

VK-202A用延長ケーブルVW-202Aの場合

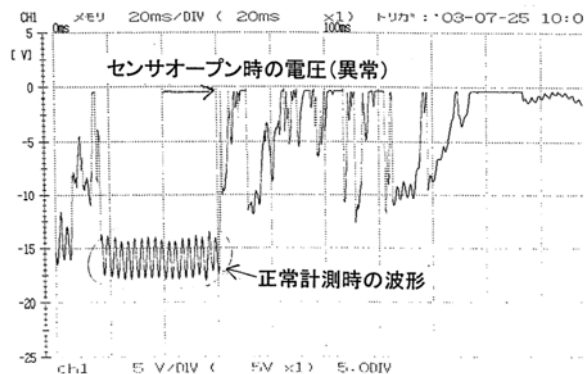


金属のバリで被覆破れが発生し、装置に信号線が接触し振動異常が発生した

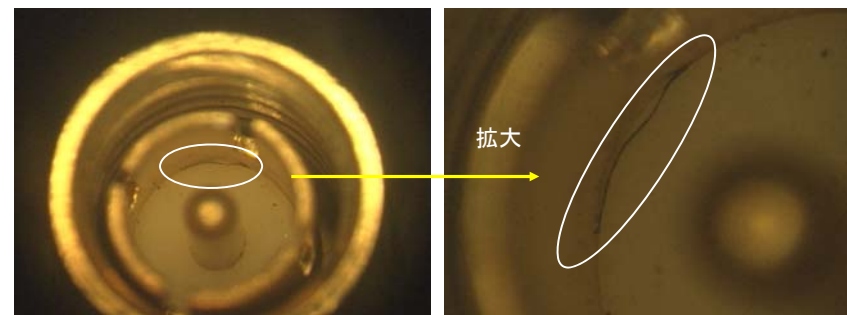
トラブルシューティング (コネクタ不具合に起因する要因)



コネクタ接触不良(コネクタ緩み)による異常

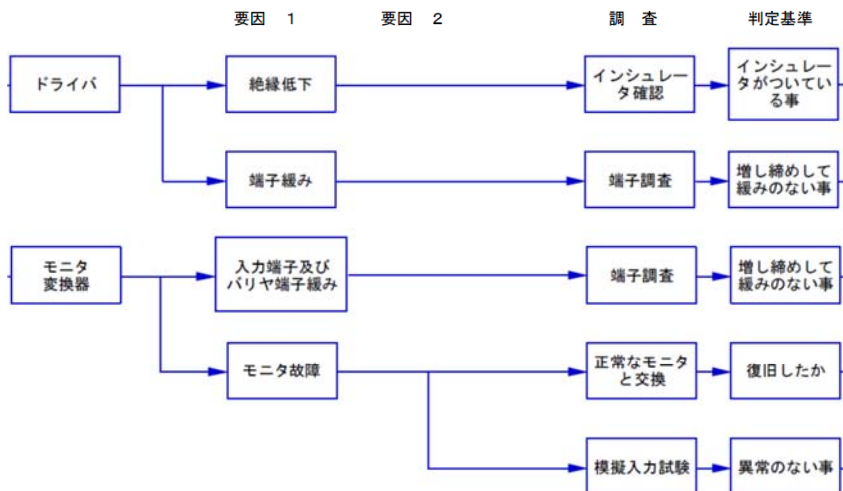


コネクタ内異物侵入



導電性の異物が、ピンとハウジング間に移動しショートした

トラブルシューティング (ドライバ又はモニタ不具合に起因する要因)

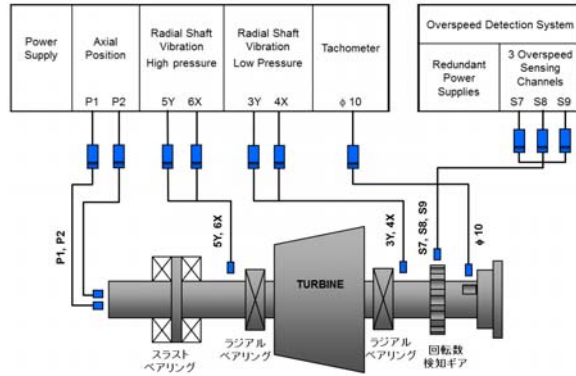


軸振動計測以外のアプリケーション

API 670規格が取り扱う状態監視パラメータと適用センサ

監視パラメータ	適用センサ
軸振動 (radial shaft vibration)	●非接触変位センサ
ケーシング振動 (casing vibration)	加速度センサ
軸位置 (shaft axial position)	●非接触変位センサ
回転数 (shaft rotational speed)	●非接触変位センサ、電磁ピックアップ
ピストンロッドトロップ (piston rod drop)	●非接触変位センサ
位相基準 (phase reference)	●非接触変位センサ
オーバースピード (overspeed)	●非接触変位センサ、電磁ピックアップ
温度 (temperature)	熱電対、測温抵抗体

すべり軸受で支持されたタービンへのAPI 670システム構成例



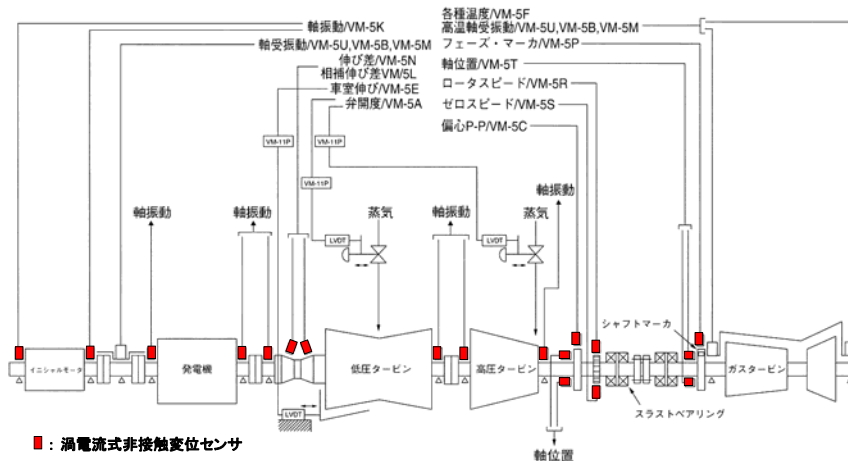
※ 図は、API Standard 670 Fourth Edition, December 2000 の "Figure H-1 – Typical System Arrangement for a Turbine With Hydrodynamic Bearings" を基にして、各センサの配置はそのままとして、図のイメージと方向を変更して作成しています。

軸振動計測以外のアプリケーション

TSI(タービン監視計器)特有の変位センサによるアプリケーション

監視パラメータ	内容
偏心	軸の偏り(曲がり具合)を測定。タービン起動可否判断の重要な測定項目。 起動前の低速回転運転「ターニング」の状態における軸の偏りを計測、ターニング時の偏心量が許容値以下になってから起動を開始する。
伸び差	タービンケーシングとタービンロータの相対的な熱膨張差を伸び差として測定。ロータとケーシングの接触事故防止のための重要な測定項目。 タービンロータとケーシングの熱容量の差により、起動後の温度上昇とともにロータとケーシングの伸び量に差が生じ、その差は時間とともに変化する。

TSI測定パラメータの例



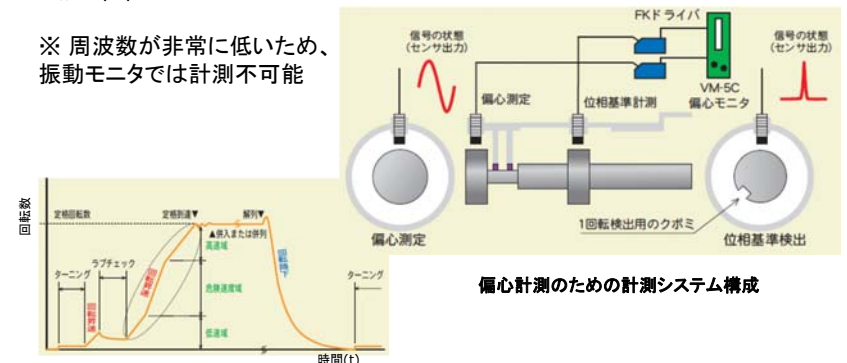
■ : 渦電流式非接触変位センサ

※ 本図は一軸型コンバインドサイクル発電システムをモデル化し、その図上にTSI測定パラメータを示したものです。

偏心計測

偏心モニタは変位信号と車軸の回転信号(位相基準信号)を用いて、1回転あたりの偏心p-p値を計測する

※ 周波数が非常に低いため、振動モニタでは計測不可能



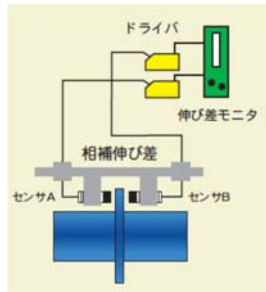
偏心計測のための計測システム構成

発電タービンの一般的な起動・停止パターン

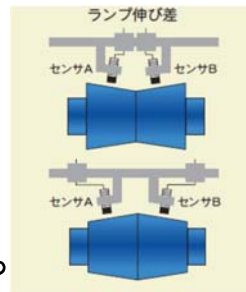
伸び差計測

相補伸び差方式：
センサ間の中央より左側をセンサAで、右側をセンサBで測定する方式

ランプ伸び差方式：
計測面をテーパにすることで、ロータ軸方向の動き(伸び差)を小さなギャップ変化に変え、差動演算を行ない、ラジアル方向の変位も補正する方式

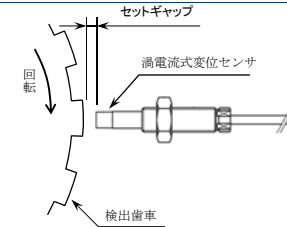


伸び差計測のための計測システム構成

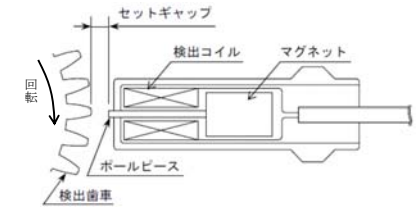


回転パルス検出センサ(参考)

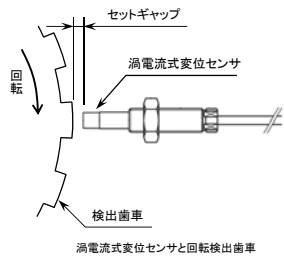
渦電流式変位センサの適用



電磁ピックアップの適用

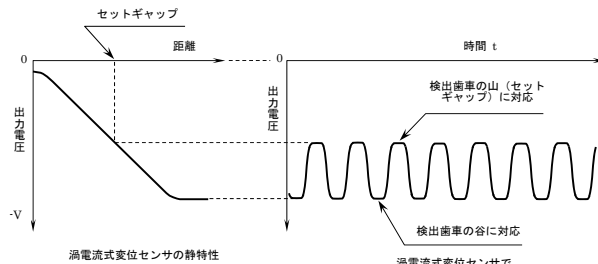


渦電流式変位センサによる回転パルス検知



渦電流式変位センサと回転検出歯車

基本的にDC~10kHz程度まで応答する変位計であり、検出歯車の形状、寸法が適正であれば、極低速回転のゼロスピード検知から高速回転のオーバースピード検知まで幅広く適用できる。
センサ+延長ケーブル+ドライバという専用のトランスデューサシステムを構成する必要があり、電磁ピックアップに比べて複雑。



渦電流式変位センサの特性

渦電流式変位センサで検出した回転パルス

電磁ピックアップによる回転パルス検知

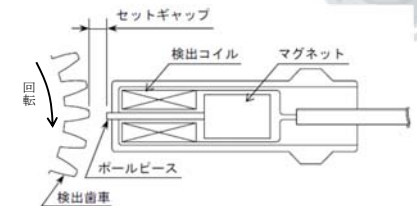
ファラデーの電磁誘導の法則で示される誘導起電力を発生

$$V = -N(d\phi/dt)$$

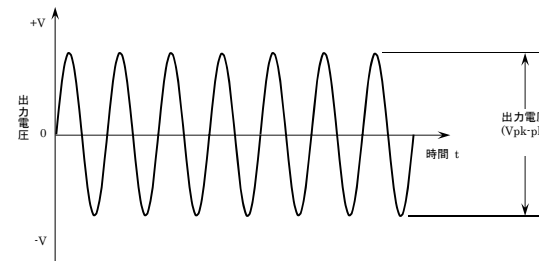
N : コイルの巻き数

ϕ : 磁束

V : 誘導起電力



電磁ピックアップと回転検出歯車



電源不要で単体で動作し、構造も単純。位相基準用やゼロスピード用センサとしては適用できない。

電磁ピックアップで検出した回転パルス

渦電流式変位センサと電磁ピックアップの比較

機種	渦電流センサ (FK-202F, RD-05A)	電磁ピックアップ (MSシリーズ)
原理	センサは空芯のコイルから成る。ドライバからMHzオーダーの高周波電流をセンサに供給、センサより高周波磁界を発生する。この磁束によりターゲットの金属表面に渦電流を発生するが、その距離(ギャップ)によりセンサのインピーダンスが変化することを利用して、距離(ギャップ)に比例した電圧を出力する。	ピックアップは検出コイルとポールピースとマグネットから構成される。検出歯車の回転に対応してピックアップと歯車との距離(ギャップ)が連続的に繰り返し変化し、検出コイルを貫通する磁束が繰り返し変化する。これにより検出コイルに誘導起電力が発生する。
ターゲット	金属製の矩形歯車	鉄製(磁性体)のインポリュート歯車
特徴	<ul style="list-style-type: none"> 低速から高速回転まで安定して検知 回転数が変化しても振幅が一定 	<ul style="list-style-type: none"> 電源が不要 構造が単純



渦電流式変位センサと電磁ピックアップの比較

機種	渦電流センサ (FK-202F, RD-05A)	電磁ピックアップ (MSシリーズ)
注意点	<ul style="list-style-type: none"> インポリュート歯車は渦電流センサ用の回転パルス検出歯車としては不適当。 インポリュート歯車でもモジュール数にもよりある程度出力電圧(振幅)は得られるが、安定した回転パルス検知用としては推奨されない。 	<ul style="list-style-type: none"> インポリュート以外の歯形では注意が必要。特に矩形歯車では出力波形が減衰振動を生じ、モニタでの回転数誤検知の原因となる。 1回転に1箇所だけの突起やキー溝状ターゲットを検知する位相基準センサとしては不適当。 出力電圧(振幅値)はセットギャップと回転数の影響を受け。 低速回転になると十分な出力電圧(振幅)が得られなくなるため、低速回転数計測やゼロスピード検知用センサとしては不適当。
用途	<ul style="list-style-type: none"> オーバースピード検知用 一般の回転数計測用(低速回転から高速回転まで可能) ゼロスピード検知用 位相基準検知用(フェーズマーカ) 	<ul style="list-style-type: none"> オーバースピード検知用 一般の回転数計測用(低速回転不可)

新川電機 センサ&CMS専用サイト

<http://www.shinkawaelectric.com/>



渦電流式変位センサに関する技術コラム

- 2010年01月: 回転機械の状態監視 vol.2 渦電流式変位センサの原理
- 2010年04月: API 670規格 - Machinery Protection Systems - 概要 vol.1 システム構成要素と非接触変位センサに対する要求事項
- 2010年07月: 軸振動センサの取付け~ISO規格及びAPI規格による規定
- 2010年10月: 渦電流変位センサの原理と特徴 vol.1 ~原理と特徴(概要)~
- 2010年11月: 渦電流変位センサの原理と特徴 vol.2 ~励磁方式・取扱い上の注意~
- 2010年12月: 渦電流変位センサの原理と特徴 vol.3 ~取扱い上の注意~
- 2011年01月: 渦電流変位センサの原理と特徴 vol.4 ~エレクトリカルランナウト~
- 2011年02月: 回転パルス検出センサと位相基準センサ vol.1 ~渦電流式変位センサの適用~
- 2011年03月: 回転パルス検出センサと位相基準センサ vol.2 ~渦電流センサと電磁ピックアップの比較~
- 2013年07月: 分かりにくい用語とその意味(1) 非接触変位センサの精度に関する用語の意味
- 2013年08月: 分かりにくい用語とその意味(2) ターゲット、システムケーブル長
- 2013年09月: 分かりにくい用語とその意味(3) 軸振動センサのX-Y取付け
- 2013年10月: 分かりにくい用語とその意味(4) 軸振動センサのX-Y取付けでできること

ご清聴ありがとうございました

2014年10月3日
新川電機株式会社
センサテクノロジー営業統括本部
技術部 瀧本 孝治