

京都府中小企業特別技術指導員の京都工芸繊維大学 射場教授から、上記テーマで寄稿いただきました。

●はじめに

著者が2009年まで所属していた京都工芸繊維大学の防振システム工学研究室では、主に高層ビルなどの構造物の振動制御に関する研究を行っていたが、2010年より精密加工研究室に移動となつたことから、研究対象が構造物から歯車に変更となった。それまでになつてゐた振動の研究に似た内容のテーマを考え、歯車のかみ合い振動解析による損傷検知に関する研究を、この分野への入り口として選んだ。その後、ネットワーク科学の理論やRFIDタグの技術などに興味を持ち、歯車の形状評価と歯車のヘルスモニタリングにそれらの解析手法及び技術を取り入れた研究を行なつてゐる。以下、これらの研究内容について簡単に説明する。

●ネットワーク理論を利用した歯車の形状評価

様々な手法によって製作された円筒歯車は、その加工方法に依存した偏差が歯面に現れる。理想的なインボリュート曲線に対してどれくらいの形状偏差が残されているのか歯車測定機で計測し、ISO 1328-1:2013やJIS B 1702-1:2016などの規格で定義された歯形偏差や歯すじ偏差等の大きさに従つて歯車の精度等級が評価される。こうした歯面の形状偏差は、単一の歯面毎にその大きさが様々な指標で評価されるが、歯面の偏差は製作方法によつては、円周方向に周期性が現れることがある。

例えば、コストを抑えて精度良く円筒歯車を切削する創成加工法の一つにホブ加工がある。ねじ形状に溝を与えて切れ刃を構成するホブカッターを、ワークの周りに創成運動させて歯車を製作するこの加工方法では、さらに生産効率を上げるために多条の切れ歯を有するホブカッターを使用することがある。3条のホブカッターによって創成加工された歯車は、1歯目と4歯目、2歯目と5歯目、3歯目と6歯目がそれぞれ同じ切れ刃で加工されるため、どれかの刃に誤差があれば、その歯によって創成される歯面が円筒歯車の円周方向に周期的に配置されることになる。また、射出成形で製作されるプラスチック歯車は、溶融した材料を金型に流し込むためのゲートが円周方向に周期的に複数個配置されることによって、流れてきた材料同士が合流することで形成されるウェルドラインも円周方向に周期的に配置される。一般的に、

ウェルドライン近傍は温度分布や分子配向が他の部分と異なり、成形後の力学的特性や強度、形状にも違いが生じる。そのため、成形された円筒樹脂歯車は、ゲートの数に依存して円周方向に周期的な歯面偏差が現れる。

従来の歯車の精度等級を定義する規格では、こうした周期的に記録されている歯面の形状偏差を相互に比較して評価することはできない。そこで、歯面の形状偏差同士の相関係数を導出し、各歯を一つのノードと見做し、ノード間を接続するエッジとして相関係数を用いる歯車の形状偏差ネットワークを提案した(図1)。

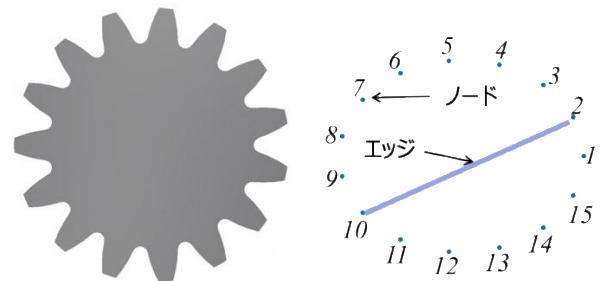


図1 形状偏差情報のネットワーク化

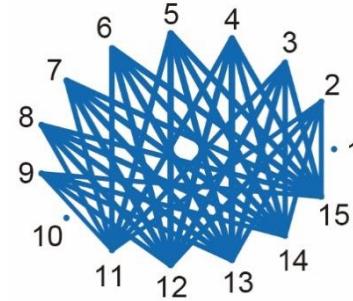


図2 歯すじ偏差ネットワークの一例 [出典:文献1)]

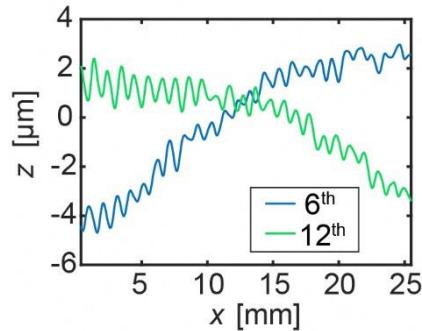


図3 6番目と12番目の歯すじ偏差[出典:文献1)]

図2は歯研加工された鋼製歯車の歯すじ偏差をネットワーク化した例である。この図では、相関係数が低い、すなわち図3のように歯すじ偏差同士の位相が大きく異なる歯同士をエッジで接続しており、2番から9番までのグループと11番から15番までのグループが逆位相の歯すじ偏差を有していることが可視化できている。

●スマートギヤシステムの開発

動力伝達装置として用いられる歯車は、運転中にその状態を観察することが困難な機械要素である。複雑な形状を有している歯車にセンサを取り付けることが難しいことから、通常は、かみ合いによって発生する振動を計測し、様々な信号処理の手法を利用して振動データを解析し、損傷の有無を判断することが行われている。歯車の歯元にひずみゲージを取り付け、スリップリングを介して歯元応力を測定する試みは行われているものの、実験室レベルでの適用に留まっている。そこで、歯車のような複雑な形状を有する機械要素の表面に直接、導電性インクをレーザー焼結することによって電気回路を構成する方法を開発した（図4）。

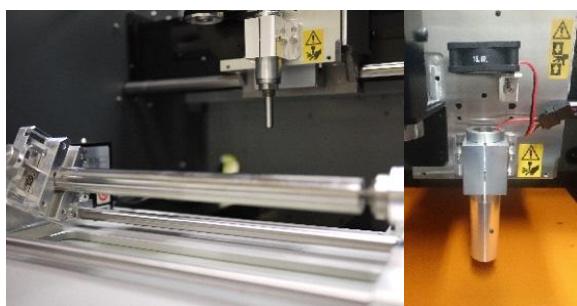


図4 4軸加工機を改造した導電性インク用レーザープリント
[出典：文献2]

開発した手法を用いて、ナイロン製(PA6)の歯車側面に、き裂検知センサとオープンスパイラルアンテナを印刷し、歯車の健全性を運転中に分析、評価できるスマートギヤシステムを開発した。このシステムは、センサとアンテナを搭載した歯車であるスマートギヤと、スマートギヤのアンテナと同形状のアンテナをベクトルネットワークアナライザーに接続した観測器から構成されている（図5）。観測用アンテナにアナライザーを接続することによって電力が供給される。このとき、観測用アンテナの側にスマートギヤを配置すると、同形状のアンテナを有するスマートギヤと観測用アンテナ間で磁界結合が生じ、スマートギヤ側にも電力が供給される。この状態にすることで、スマートギヤ側に印刷した電気回路の特性を、観測用アンテナの回路特性を介して観察することが可能になる。そこで、観測用アンテナの周波数特性をネットワークアナライザーで観測すると、き裂検知センサ部の電気回路の断線の有無によって観測用アンテナの特性に差異が生じる。図6は実際に歯車運転試験機にスマートギヤを取り付け、トルク

8Nm、回転速度1000rpmの運転条件で、歯元にき裂が生じるまで運転を続けた時に得られた観測用アンテナの周波数特性（リターンロス）である。



図5 観測用アンテナとスマートギヤ [出典：文献3]

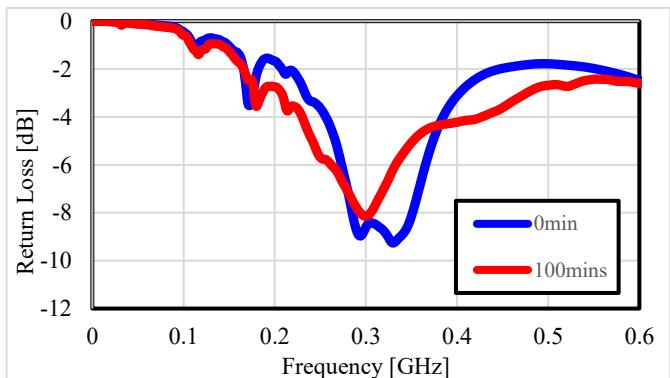


図6 スマートギヤシステムのリターンロス

この図より、歯元に発生したき裂によって断線したセンサの影響が、観測用アンテナの周波数特性に大きな影響を与えていていることが確認できる。このシステムは、歯車側には電池等の電源を用意する必要がなく、また、非接触で歯車に印刷したセンサの状態をアナログで観測できることから、かみ合い周波数が高くなる高速運転時にも対応可能である。こうしたシステムは歯車のみならず、回転している機械の状態を観測するために有効に利用できるものである。人工知能を利用したシステムの開発が進んでいるが、今後、こうした機械要素から人工知能に与える情報を所得するためにも有用であると考えている。

●参考文献

- (1) Iba, D., Noda, H., Inoue, H. et al. Visualization of phase differences between tooth helix deviations using graph theory, *Forsch Ingenieurwes* 83, 529–535 (2019). <https://doi.org/10.1007/s10010-019-00358-1>.
- (2) Iba D., Futagawa S., Miura N., Iizuka T., Masuda A., Sone A., Moriwaki I., Development of smart gear system by conductive-ink print (Impedance variation of a gear sensor with loads and data transmission from an antenna), In: Proc. SPIE 10973, Smart Structures and NDE for Energy Systems and Industry 4.0 1097309 (2019).
- (3) Mac, T.T., Iba, D., Matsushita, Y. et al. Application of genetic algorithms for parameters identification in a developing smart gear system, *Forsch Ingenieurwes* 86, 433–450 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10010-021-00574-8>.