

動力吸収式歯車試験機を用いた一對の平歯車の振動解析

Vibration analysis of a pair of spur gears using a power-absorbing gear testing equipment

Dr. Shuting Li

1. 概要

歯車の振動・騒音を減らすために、歯車の振動を理論上で精確に解析できるようにする必要があるが、歯車振動は歯車の加工精度、組立精度、歯面修整、歯面摩擦力などの多くの要因を受けるとともに、歯のかみあい枚数や歯のかみあい位置の影響も受けるので、歯車の振動解析は容易ではないことがよく知られている。筆者も歯車振動解析に関する研究を行ってきた多くの研究者の中の一人であり、1987 年ごろから独自の研究で歯車振動の解析方法を探ってきたとともに、専用ソフトの開発にも取り込んできたが、20 年間以上が掛かって研究があまり進まなかった。近年、歯車振動解析に大きな進展があったので、その解析結果をここで簡単に紹介します。

2. 動力吸収式歯車試験機

歯車振動の解析結果の妥当性を検証するために、歯車振動を実測する必要があるが、まず図 1 に示す動力吸収式歯車試験機が利用できる。しかし、この試験機を利用して、一對の歯車の振動を測定する場合には、一對の歯車の減速比が小さければ、歯車の出力軸側に大きなトルクが掛けられない問題があるので、測定の際には要注意である。図 1 と図 2 に筆者が設計・製作した動力吸収式歯車試験機である。

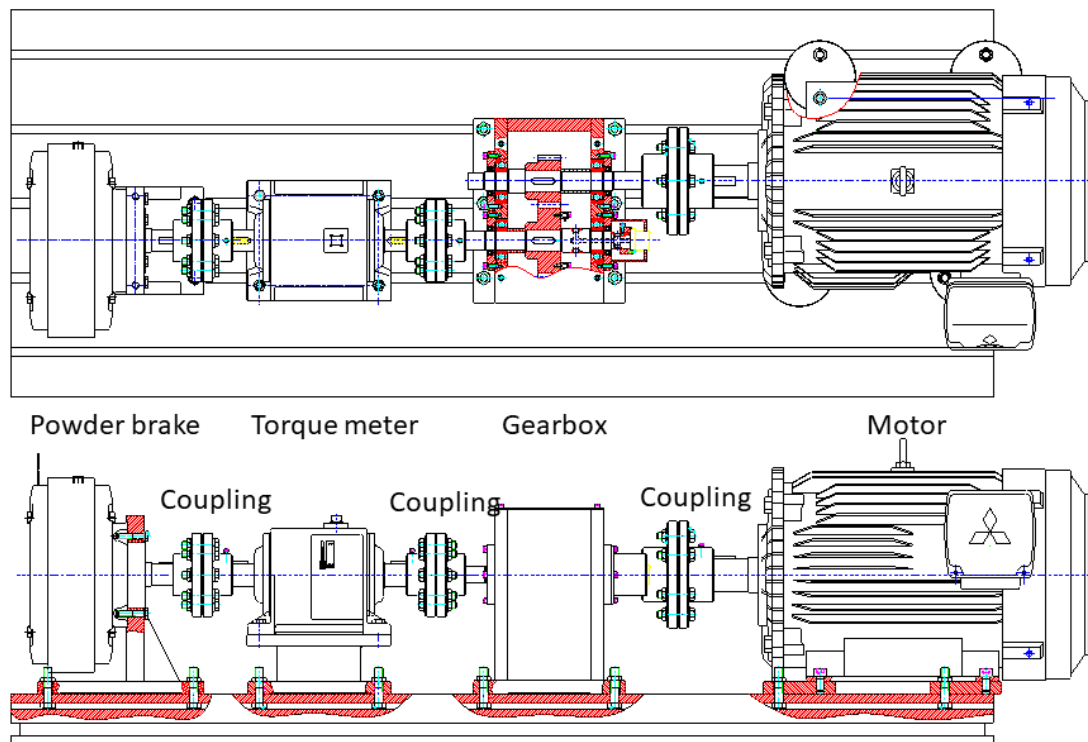


図 1 動力吸収式歯車試験機の設計図

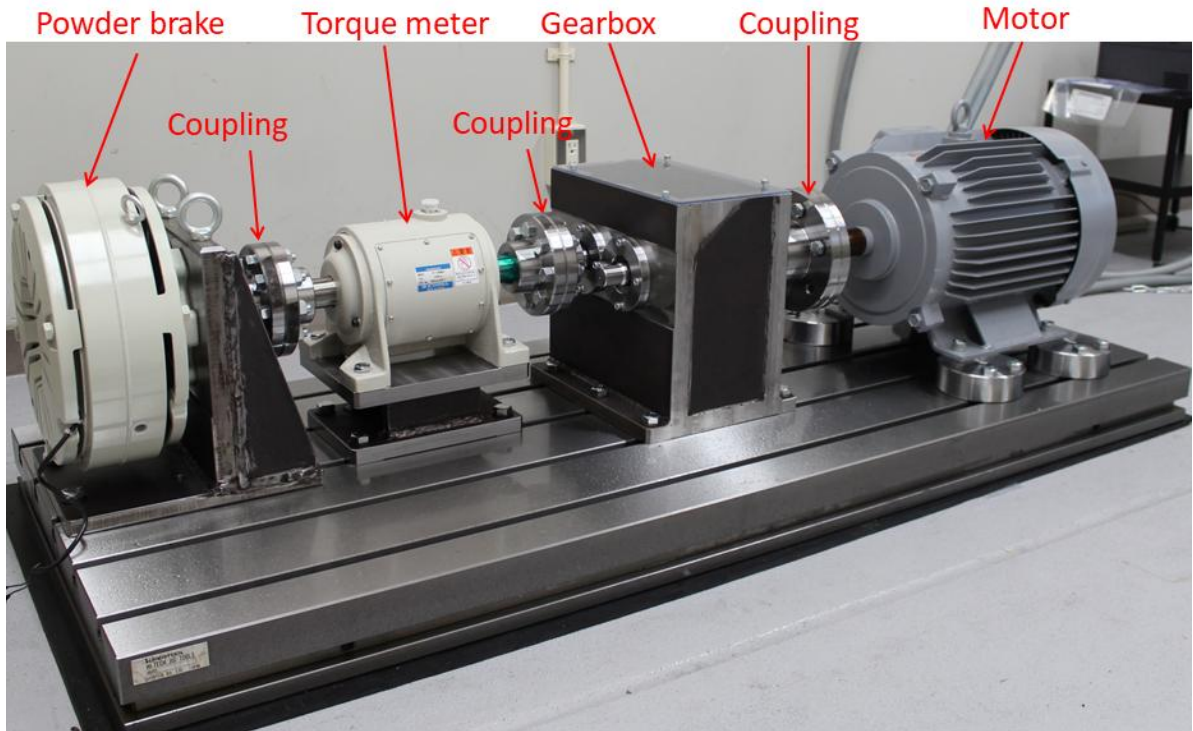


図2 試作した動力吸収式歯車試験機

3. 振動解析モデリング

一对の平歯車の回転方向のねじり振動を解析するために、図1と図2に示す動力吸収式歯車試験機に対して、振動解析モデリングを行った。まず図3に提案した7自由度（7-DOF）の並進振動解析モデルを示す。このモデルはこの装置の回転方向のねじり振動を一对の歯車の作用線方向へ変換し、作用線方向の並進振動を求めることにより、歯車のねじり振動を研究する手法である。このモデルで歯車軸を支える軸受の支持剛性を考慮できるようになる。

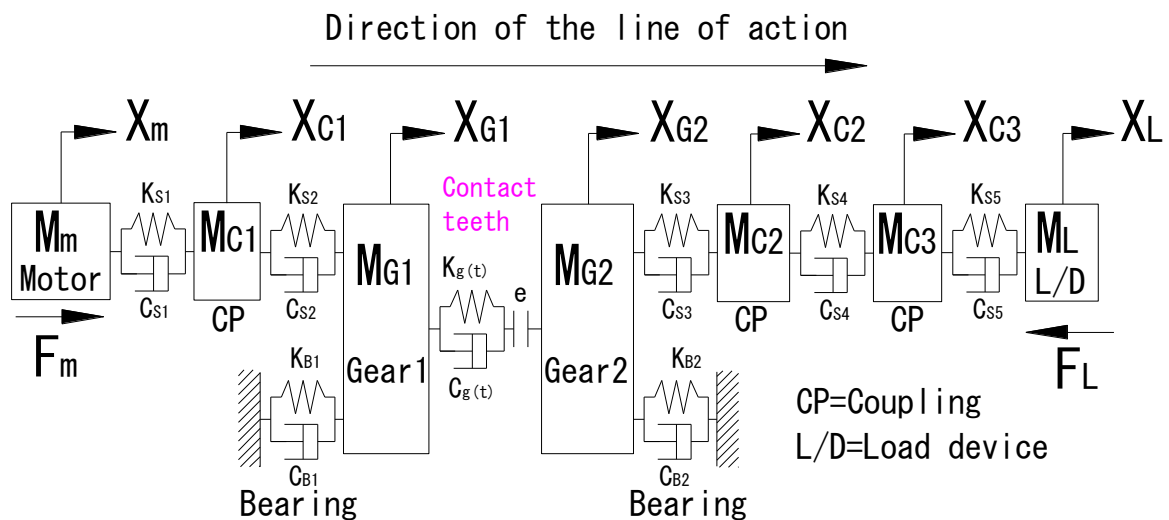


図3 七自由度（7-DOF）並進振動解析モデル

ここで、

$X_M, X_{C1}, X_{G1}, X_{G2}, X_{C2}, X_{C3}, X_L$: それぞれモータ, 継手 1, 小歯車, 大歯車, 継手 2, 継手 3, パウダーブレーキのねじり角度変位を歯車の作用線上に換算した直線変位

$M_M, M_{C1}, M_{G1}, M_{G2}, M_{C2}, M_{C3}, M_L$: それぞれモータ, 継手 1, 小歯車, 大歯車, 継手 2, 継手 3, パウダーブレーキのイナーシャを歯車の作用線上に換算した等価質量

$K_{S1}, K_{S2}, K_{S3}, K_{S4}, K_{S5}$: モータ軸, 歯車の入力軸, 歯車の出力軸, トルク変換機軸, パウダーブレーキ軸のねじり剛性を歯車の作用線上に換算した等価剛性

$C_{S1}, C_{S2}, C_{S3}, C_{S4}, C_{S5}$: モータ軸, 歯車の入力軸, 歯車の出力軸, トルク変換機軸, パウダーブレーキ軸のねじり減衰係数を歯車の作用線上に換算した等価減衰係数

K_{B1}, K_{B2} : 小歯車軸と大歯車軸を支える軸受のラジアル支持剛性

C_{B1}, C_{B2} : 小歯車軸と大歯車軸を支える軸受の減衰係数

$K_{g1(t)}, K_{g2(t)}$: 1 対目と 2 対目の歯のかみあいばねこわさ、 $K_{g(t)}$ は歯の合成かみあいばねこわさ

$C_{g1(t)}, C_{g2(t)}$: 1 対目と 2 対目の歯のかみあい減衰係数、 $C_{g(t)}$ は歯の合成減衰係数

F_m, F_L : モータと負荷装置に作用するトルクを歯車の作用線上に換算した等価荷重

図 4 に動力吸収式歯車試験機の 7 自由度 (7-DOF) ねじり振動解析モデルを示している。このモデルは歯車装置の回転方向のねじり振動が直接に解析できる。

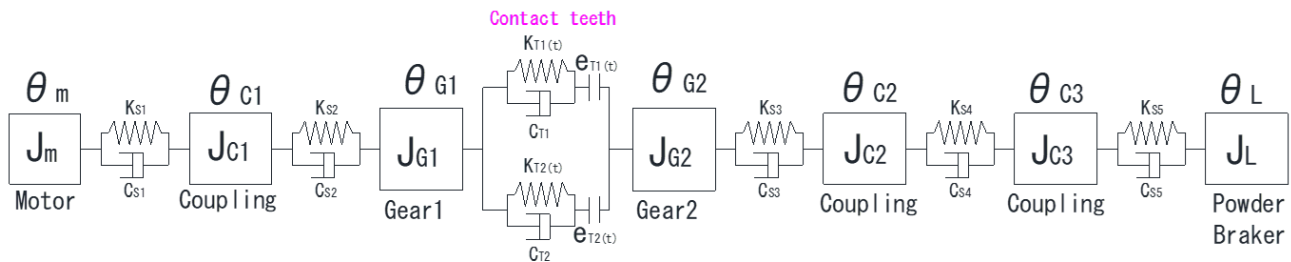


図 4 七自由度 (7-DOF) ねじり振動解析モデル

ここで、

- $J_m, J_{C1}, J_{G1}, J_{G2}, J_{C2}, J_{C3}, J_L$: それぞれモータ, カップリング C1, 小歯車, 大歯車, カップリング C2, カップリング C3, パウダーブレーキのイナーシャ (慣性モーメント)
- $K_{S1}, K_{S2}, K_{S3}, K_{S4}, K_{S5}$: それぞれモータ軸, 歯車の入力軸, 歯車の出力軸, トルク変換機軸, パウダーブレーキ軸のねじり剛性
- $C_{S1}, C_{S2}, C_{S3}, C_{S4}, C_{S5}$: モータ軸, 歯車の入力軸, 歯車の出力軸, トルク変換機軸, パウダーブレーキ軸のねじり減衰係数
- $\theta_m, \theta_{C1}, \theta_{G1}, \theta_{G2}, \theta_{C2}, \theta_{C3}, \theta_L$: それぞれモータ, カップリング C1, 小歯車, 大歯車, カップリング C2, カップリング C3, パウダーブレーキの角度変位
- $K_{T1(t)}, K_{T2(t)}$: 一对の歯車の一对目と二対目の歯のばねこわさ
- C_{T1}, C_{T2} : 一对の歯車の一对目と二対目の歯の間の減衰係数
- $e_{T1(t)}, e_{T2(t)}$: 一对の歯車の一对目と二対目の歯の間の隙間

4. 振動解析方法及び解析ソフト

図 3 と図 4 に示す二つのモデルを用いて、動力吸収式歯車試験機に対する振動解析を行い、その結果を次に比較する。

歯車振動解析方法と解析ソフトは筆者が長年の研究で開発したものである。詳細について、文献⁽¹⁻²⁾をご参照ください。解析の前に一对の歯車の歯のかみあいばねこわさや軸受の支持剛性を解析する必要があるため、これらの解析にも筆者が開発した専用三次元有限要素法ソフトを用いた⁽³⁻⁵⁾。

5. 振動解析結果

図 3 に示すモデルで解析した大歯車の振動加速度の Campbell 線図を図 5 に、また図 4 に示すモデルで解析した大歯車の振動加速度の Campbell 線図を図 6 に示している。図 5 を図 6 に比べると、ほぼ同じ結果が得られたことが分かる。

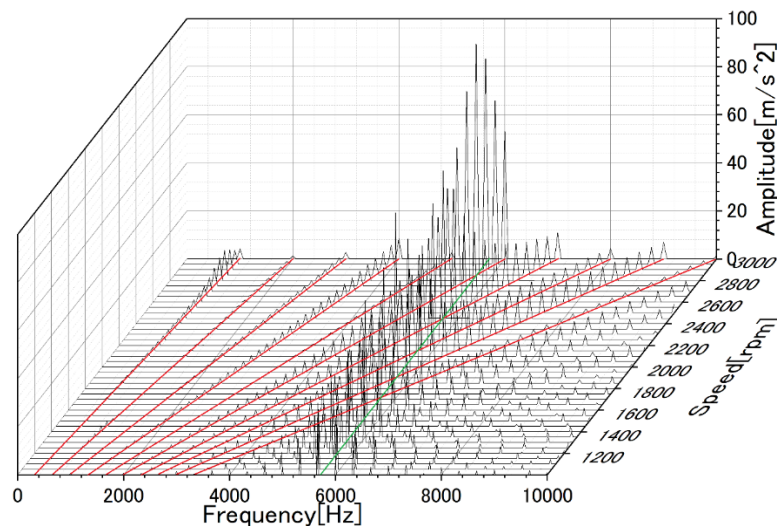


図 5 並進振動モデルで解析した大歯車の振動加速度の Campbell 線図

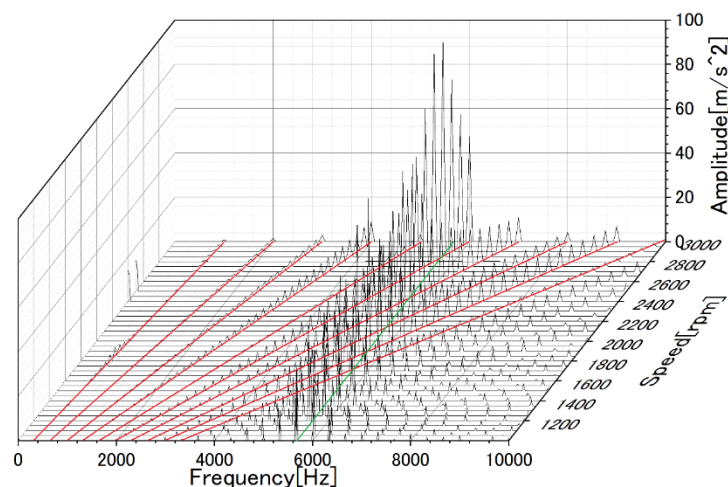


図 6 ねじり振動モデルで解析した大歯車の振動加速度の Campbell 線図

図 7 に大歯車の振動加速度測定値の Campbell 線図を示している。図 7 を図 5 と図 6 に比べると、共振周波数はほぼ同じであるが、測定値の共振周波数のピークは計算値よりかなり大きいことが分かる。これは振動解析に歯車の加工誤差や組立精度などを考慮していなかったため、振動値が小さくなった原因だと考えられる。今後、歯車の加工誤差や組立精度などを考慮して、振動解析を行っていく必要がある。

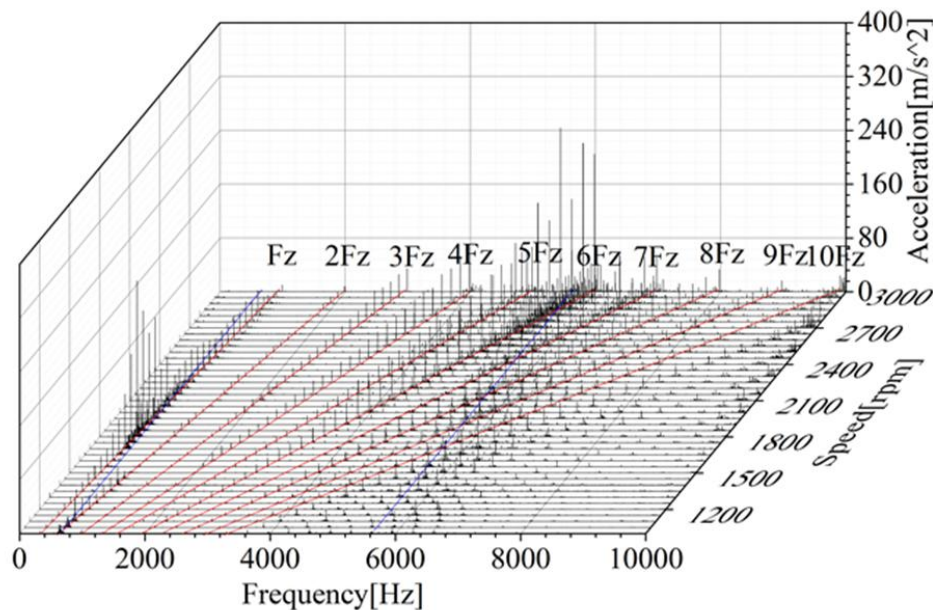


図 7 大歯車の振動加速度測定値の Campbell 線図

参考文献：

- (1) Shuting Li and Ryuichi SONEZAKI, “Effect of Machining Errors on Vibration Level of Spur Gears”, 10th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics, Nov., 2015, Japan
- (2) Shuting Li and A. Nishimura, “Dynamic Behavior Analysis of a Pair of Ground Spur Gears”, The 6th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology (ICMDT2015), Japan, (4/2015)
- (3) Shuting Li, “Finite element analyses for contact strength and bending strength of a pair of spur gear with machining errors, assembly errors and tooth modifications”, Mechanism and Machine Theory, Vol.42, Issue 1, pp.88-114, 2007
- (4) Shuting Li, “Strength analysis of the roller bearing with a crowning and misalignment error”, Engineering Failure Analysis, Vol. 123, May 2021, 105311, pp.1-15
- (5) Shuting Li, “A mathematical model and numeric method for contact analysis of rolling bearings”, Mechanism and Machine Theory, Vol. 119, 2018, pp.61-73