ADI歯車の振動・騒音特性*

小田 哲^{*1}, 小出 隆夫^{*1}
五家政人^{*2}, 矢野 満^{*3}

Vibration and Noise Characteristics of ADI Gears

Satoshi ODA, Takao KOIDE,
Masato GOKA and Mitsuru YANO

This paper presents a study on the vibration and noise characteristics of austempered ductile iron (ADI) gears. Running tests for ADI, SCM 415 case-hardened, and SCM 435 normalized gears were carried out under different running conditions by means of a power-absorbing-type gear testing machine, and the circumferential, radial and axial vibration accelerations of the gears, the gear noise, and the root stress were measured. The vibration and noise of the ADI gear were found to be much lower than those of the SCM 435 normalized gear due to the larger damping ratio of the ADI. Furthermore, the effects of the finishing method of a gear tooth and the isothermal transformation temperature on the vibration and noise characteristics of ADI gears were determined to a considerable extent.

Key Words: Gear, Noise, Damping Material, Vibration, ADI, Damping Ratio, Root Stress, Case-Hardening, Normalizing

1. 緒 言

オーステンパ球状黒鉛鋳鉄(ADI)歯車の曲げ疲労および面圧強度についてはかなり明らかにされてきている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。

適当なオーステンパ処理を施したADI歯車は、浸炭焼入れ歯車に近い曲げ疲労強度を有し、この上にショットピーニングを施すことにより曲げ疲労強度がさらに増加⁽¹⁾し、また高周波焼入れ歯車に匹敵する面圧強度を有する⁽³⁾ため、動力伝達用歯車として十分実用可能であることが明らかにされている。

本報では、処理条件および仕上げ方法の異なる4種類のADI歯車に対して、動力吸収式歯車運転試験機を用いて種々の運転条件下で運転試験を行い、歯車本体の円周、半径および軸方向振動加速度、騒音および歯元応力を測定し、これらの歯車の動的挙動について明らかにしている。また、一般によく用いられるSCM 415 浸炭焼入れ歯車とSCM 435 調質歯車に対しても実験を行い、ADI歯車に対する結果との比較検討

を行っている。さらに、ADIとSCM 435 調質鋼製の片持ばり試験片に対して、衝撃を加えた場合のはりのひずみ波形を測定し、これらの材料の振動減衰性についても検討を加えている。

2. 実験方法および実験装置

2・1 試験歯車 本実験に用いた試験歯車の諸元を表1に示す。各歯車の記号、材料、処理条件を表2に、ADIの化学成分を表3に示す。ADI歯車のオーステンパ処理のオーステナイト化温度 T_A は875°C(処理時間2h)、恒温変態温度 T_I は歯車AU1~AU3が375°C(2h)、AL3が235°C(2h)である。各歯車の歯形、合成歯形、歯すじ、合成歯すじ曲線を図1, 2に示す。

2・2 歯車運転試験機 本実験に使用した動力吸

表1 歯車諸元

Tooth profile	Standard
Normal module m_n	3
Normal pressure angle α_n	20°
Helix angle β_0	20°
Number of teeth z_2/z_1	36/36
Face width b	20 mm

* 原稿受付 平成5年2月15日。

^{*1} 正員, 鳥取大学工学部 (〒680 鳥取市湖山町南4-101)。^{*2} 正員, 日立金属(株) (〒321-43 真岡市鬼怒ヶ丘11)。^{*3} 正員, 大分大学工学部 (〒870-11 大分市大字旦野原700)。

収式歯車運転試験機⁽⁴⁾を図3に示す。試験歯車と歯車支持部のみが測定室(無響室)内に設定され、原動部と動力吸収部とから音響的に遮断されている。原動機としては出力15 kWのVSモータを、動力吸収機としては電気動力計(最大負荷トルク $T=98$ Nm)を用いた。試験歯車の潤滑には油ポンプによる強制潤滑方式を用い、歯車のかみ込み側に給油して潤滑を行った。

2・3 実験方法 被動歯車(軸穴直径 $\phi 30$)の歯車側面の歯車中心から半径45 mmの位置に振動ピックアップを取付けて、種々の運転条件下で運転試験を行い、歯車の円周、半径および軸方向の振動加速度を測

定した。振動ピックアップは歯車中心に対して 180° の位置に2個取付け、2方向の振動加速度を同時測定した。また、各振動加速度とともに被動歯車の圧縮側歯元にひずみゲージを接着して歯元応力も同時に測定している。ひずみゲージ接着位置は被動歯車の歯幅中央における歯直角断面の圧縮側歯元すみ肉部のHoferの 30° 危険断面位置である。音圧測定方向は歯車騒音の無響室内の音圧分布の測定結果に基づいて音圧が最大となる方向にとり、測定位置は、図4に示すP点に定めた。なお、無響室内の暗騒音はリニアスケールで60 dB, Aスケールで50 dB以下である。

表 2 歯車記号

Gear signs	Material	Treatment conditions	Hardness
AU1	ADI($T_1^* = 375^\circ\text{C}$)	Hobbed after austempering	H_B 300
AU2		Ground after austempering	
AU3		Hobbed before austempering	
AL3	ADI($T_1^* = 235^\circ\text{C}$)	Hobbed before austempering	H_B 450
C1	SCM415	Hobbed before case-hardening	H_B 650**
N1	SCM435	Hobbed after normalizing	H_B 300
N2		Ground after normalizing	

*: Isothermal transformation temperature, **: Surface hardness

表 3 ADIの化学成分(%)

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Mo	Mg
ADI	3.60	2.20	0.40	0.03	0.01	0.50	0.30	0.04

図 1 歯形, 合成歯形曲線

図2 歯すじ, 合成歯すじ曲線

図3 動力吸収式歯車運転試験機

図4 音圧測定位置

振動ピックアップおよびひずみゲージからの出力信号はスリップリングを通して取出し、振動加速度に対しては増幅器からの出力を、歯元応力に対してはブリッジ回路、動ひずみ計を経て得られる出力を同期回路を用いていったんトランジェントレコーダに記憶させた後、シンクロスコープ上に掃引させて観測した。振動加速度(rms値)は増幅器付属のメータで、歯元応力はシンクロスコープ上で測定した。音圧レベル(Aス

図5 測定ブロック線図

ケール)の測定および周波数分析(リニアスケール)はコンデンサマイクロホン、マイクロホン増幅器とFFTを用いて行った。図5にこれらの測定方法のプロ

ック線図を示す。

振動加速度、音圧および歯元応力の測定は、負荷トルク $T=98\text{ Nm}$ に対しては回転速度を $n=400\sim 1400\text{ rpm}$ の範囲で 50 rpm ごとに変化させて行い、 $T=39.2, 68.6\text{ Nm}$ に対しては $n=500, 700, 1000, 1400\text{ rpm}$ の場合に対して行った。

また、ADI ($T_f=235, 375^\circ\text{C}$) と SCM 435 調質鋼を用いて、幅 23 mm 、厚さ 13 mm 、張出長さ 220 mm の片持ばり試験片を作成し、はり先端から 15 mm の位置に $\phi 20$ の鋼球を高さ 100 mm の位置から落下させた場合のひずみ波形を測定し、これらの材料の減衰比を求めた。ひずみゲージの接着位置は固定端から 20 mm の位置である。

3. 実験結果および考察

3・1 振動加速度と音圧に及ぼす回転速度、負荷トルクの影響 図6は研削を行ったADI歯車AU2および調質歯車N2に負荷トルク $T=98\text{ Nm}$ が作用する場合の3方向振動加速度レベル VAL および音圧レベル SPL と回転速度 n の関係を示す。 VAL は $20 \log(a_1/a_0)$ (a_1 : 各方向の振動加速度 mm/s^2 , 基準加速度 $a_0=10^2\text{ mm/s}^2$) で表される dB 値で示す。 VAL と SPL はオーバオール値で、各条件で測定された結果の平均値(変動幅は最大 $\pm 3\text{ dB}$ 程度)を示す。図より、ADI歯車の VAL と SPL は調質歯車の場合よりも全般的に小さいこと、 VAL と SPL はADI, 調質歯車のいずれにおいても回転速度の増加につれて増大する傾向を示すことおよび VAL は円周方向が最も大きく、ついで半径、軸方向の順に小さくなることわかる。 SPL の回転速度の増加に伴う増大傾向は VAL の場合とほぼ同様であるが、ピークの生じる回転速度が異なる場合もある。これは、主として測定音圧には歯車から放射される音圧のみでなく試験機の軸受、軸受支持台およびベッドなどからの放射音も含まれていることによると思われる。他の歯車に対しても同傾向の結果が得られた。

図7は歯車AU2, N2に対する負荷トルク $T=98\text{ Nm}$ 、回転速度 $n=700\text{ rpm}$ における3方向振動加速度と音圧の周波数分析結果を示す。図の最下段には歯車に衝撃を加えた場合の軸方向振動加速度の周波数分析結果(軸方向固有振動数測定結果)も示している。図6の VAL , SPL のオーバオール値はAU2のほうがN2よりも小さいのに対し、図7の最大ピーク値が逆になっているのは、図6の結果が平均値(変動幅 $\pm 3\text{ dB}$ 程度)で、図6, 7の結果は同時測定したものではないことによるものと考えられる。これらの図より、3

方向振動加速度と音圧のピーク周波数はかみあい周波数 $f_z(f_z=420\text{ Hz})$ とその整数倍および軸方向の固有振動数に一致していることがわかる。また、これらの周波数分布がよく似ていることから3方向の振動が互いに連成しているものと考えられる。なお、負荷トルクを変えてもこれらの周波数分布はほとんど変わらなかった。

図8は $n=500, 1400\text{ rpm}$ における歯車AU2およ

(a) AU2

(b) N2

図6 振動加速度、音圧と回転速度の関係

び N 2 の VAL, SPL と負荷トルク T の関係を示す。図より, VAL と SPL は ADI, 調質歯車のいずれにおいても本実験の負荷トルクの範囲ではあまり変わらないことがわかる。

3・2 振動加速度と音圧に及ぼす材料, 仕上げ方法の影響 図 9, 10 は, $T=98 \text{ Nm}$ が作用する場合の

各歯車の円周, 半径, 軸方向の VAL, SPL と n の関係を示す。これらの図より, オーステンパ処理後に研削を行った ADI 歯車 AU 2 の VAL と SPL は, 研削調質歯車 N 2 よりも全般的に小さいことが認められる。これは, AU 2 と N 2 の歯形, 歯すじ形状はほぼ等しいので, ADI のほうが鋼よりも振動減衰性が高いこ

図 7 周波数分析結果 ($T=98 \text{ Nm}$, $n=700 \text{ rpm}$)

図 8 振動加速度, 音圧と負荷トルクの関係

図9 各歯車の振動加速度に及ぼす回転速度の影響

図10 各歯車の音圧に及ぼす回転速度の影響

図11 片持ばり試験片の振動減衰波形

とによるものと考えられる。

図11は、ADI ($T_i=375^\circ\text{C}$) および SCM 435 調質鋼製の片持ばり試験片に衝撃を加えた場合の、固定端から 20 mm の位置におけるひずみ波形を示す。これらの波形より、ADI、SCM 435 調質鋼の減衰比 ζ を求めるとそれぞれ $\zeta=0.0043$, 0.0027 となり、振動減衰性は ADI のほうがかなり高いことがわかる。なお、ADI の ζ は $T_i=235^\circ\text{C}$ と 375°C の場合でほとんど差が認められない。

オーステンパ処理後に研削を行った ADI 歯車 AU 2 の VAL と SPL は、ホブ切りを行った歯車 AUI の場合と同程度である。これは、AU 2 の合成歯形形状はほぼ平坦であるが、AU 1 の場合は振動低減に有利な中凸形⁽⁵⁾に近いことによるものと思われる。研削調質歯車 N 2 の VAL と SPL は、ホブ切り調質歯車 N 1 よりもかなり小さい。これは、N 2 は歯形誤差が小さく合成歯形形状もほぼ平坦であるのに対し、N 1 の歯形誤差がかなり大きく、合成歯形形状も振動低減に有利な形ではないことによると思われる。また、歯車 AU 3 ($T_i=375^\circ\text{C}$) と AL 3 ($T_i=235^\circ\text{C}$) の VAL, SPL はいずれもほぼ等しい。これらの歯車の合成歯形、歯すじ形状はあまり変わらないので、VAL と SPL に

図 12 最大歯元応力と回転速度の関係

及ぼす恒温変態温度の影響は小さいものと思われる。オーステンパ処理後にホブ切りを行った歯車 AU1 の VAL と SPL は、いずれもオーステンパ処理前にホブ切りを行った歯車 AU3 の場合よりも小さい。これは、AU1 の合成歯形形状が振動低減に有利な中凸形であることおよび AU3 ではホブ切り後のオーステンパ処理による熱処理ひずみが大きいため歯形誤差が大きくなったことによるとと思われる。

3・3 歯元応力測定結果 図 12 は負荷トルク $T = 98 \text{ Nm}$ が作用する場合の各歯車の最大歯元応力 σ_t と回転速度 n の関係を、静的最大歯元応力 σ_s を基準にして示す。最大歯元応力は本実験の回転速度 ($400 \leq n \leq 1400 \text{ rpm}$) の範囲ではいずれの歯車においてもあまり変化しないことがわかる。また、負荷トルクを変えても、最大歯元応力の回転速度による変化は小さい。

4. 結 言

本報において明らかになったおもな点を要約すると

次のとおりである。

(1) ADI の振動減衰性は、鋼よりもかなり高いため、ADI 歯車の振動加速度と音圧は、鋼歯車よりも小さい。

(2) ADI 歯車の場合も鋼歯車の場合と同様に振動加速度と音圧に及ぼす歯形形状の影響が大きいため、歯形誤差形状がほぼ平坦な研削歯車の振動加速度と音圧は、振動低減に有利な中凸形のホブ切り歯車の場合とあまり変わらない。

(3) 恒温変態温度が変化しても ADI の振動減衰性があまり変わらないため、ADI 歯車の振動加速度と音圧もほとんど変わらない。

(4) 本実験に用いた、オーステンパ処理後にホブ切りを行った ADI 歯車の振動加速度と音圧は、オーステンパ処理前にホブ切りを行った歯車の場合よりも小さい。

(5) ADI 歯車の最大歯元応力は、鋼歯車の場合と同様に、本実験の回転速度 ($400 \leq n \leq 1400 \text{ rpm}$) の範囲ではあまり変化しない。

終わりに、本研究を行うにあたって熱心にご協力いただいた鳥取大学文部技官・難波千秋氏に厚くお礼申し上げます。

文 献

- (1) 小田・矢野・五家・小出, 機論, 56-532, C(1990), 3416.
- (2) 井上・加藤・鈴木・川原, 機論, 55-512, C(1989), 999.
- (3) 有浦・尾崎・小田・中西・矢野・梅崎・井上・五家, 平成 3 年度科学研究補助金 [試験研究(B)(1)] 研究成果報告書(研究課題番号 02555035), (1992).
- (4) 小田・宮近・小出・藤井, 機論, 51-465, C(1985), 1008.
- (5) 梅澤・鈴木・北條, 機論, 54-498, C(1988), 458.