歯車材料としての鋳鉄の耐ピッチング強度の評価*

塚本 尚久^{*1}, 滝 晨彦^{*2}, 加藤 正博^{*3}

Pitting Strength with Cast Iron Used as the Gear Material

Naohisa TSUKAMOTO, Tokihiko TAKI, and Masahiro KATOO

Recently, techniques to strengthen the texture of the cast iron matrix have been studied, which has certainly resulted in an improvement of its mechanical properties. For example, the flexural fatigue strength, impact fatigue strength, etc., are markedly improved by austempering, that practically allows cast iron to be used as a functional material. In this paper, using gears manufactured from austempered ductile iron, their pitting strength was experimentally studied, and at the same time their practical serviceability was compared with that of conventional carbon steel (S 45 C) gears.

Key Words: Gear, Cast Iron Gear, Steel Gear, Fatigue Breakage of Tooth, Cracking of Tooth, Surface Fatigue of Tooth

1. 緒 言

ダクタイル鋳鉄はその化学成分や鑄造条件および熱処理により各種の特長を有する幅広い性質をもつため工業材料として広範囲にわたって使用されている。この材料は歯車にも古くから採用されているが、歯車材としては鋼に比べると曲げ強度などが低いことや衝撃力に弱いことが欠点であった。しかし近年鋳鉄の生地組織の強化方法が研究され、これらの欠点もかなり改善されてきている。例えばオーステンパ処理を行えば曲げ疲労強度、衝撃疲れなどが著しく向上し機能材としての実用領域に至る鋳鉄もできるようになってきている。

本研究はこのように機能性に優れているオーステンパダクタイル鋳鉄を用いて歯車を製作し、そのピッチング強度を実験によって調べると同時に炭素鋼(S 45 C)と対比させてその実用性を検討したものである。この実験結果からオーステンパダクタイル鋳鉄は S 45

C に劣らない耐ピッチング強度をもつことがわかった。

2. 実験装置および方法

2.1 歯車試験機 実験には IAE (Institute of Automobile Engineers) 歯車潤滑油試験機⁽¹⁾を用いた。

2.2 試験歯車の諸元 試験歯車は表 1 に示す諸元のインボリュート平歯車である。

2.3 試験歯車の材料 試験歯車の材料にはオーステンパダクタイル鋳鉄 (以下これを鋳鉄と呼ぶ) と JIS G 4051 の S 45 C を用いた。表 2 は鋳鉄の成分である⁽²⁾。この鋳鉄はほぼ 900°C でオーステナイト化し、その後 280°C 程度で塩浴熱処理を行っている。なお図 1 はこの鋳鉄の熱処理時間と引張強さ、伸び、硬さの関係を示したものである⁽²⁾。

2.4 試験歯車の精度および歯面粗さ 鋳鉄歯車および S 45 C 歯車とも JIS 歯車精度の 2 級に仕上がっている。各歯車の歯面粗さは表 3 の⑥欄に示す。この粗さは各歯車において 6 点の測定値を平均したものである。

2.5 潤滑油 潤滑油にはタービン油 ISOVG 68 を用い、1 L/min の油量を歯車のかみあい部にかみ込

* 昭和 63 年 7 月 13 日 九州支部鹿児島地方講演会において講演、原稿受付 昭和 62 年 12 月 11 日。

^{*1} 正員、千葉工業大学 (〒275 習志野市津田沼 2-17-1)。

^{*2} 正員、石川島播磨重工業(株) (〒190-12 東京都西多摩郡瑞穂町殿ヶ谷 229)。

^{*3} 日本鋳鉄管(株) (〒101 東京都千代田区内神田 3-16-9)。

み側から 3 kPa の給油圧で吹きつけた。給油温度は制御していないが、表 3 の㊤欄に示す各値において $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 程度の変動幅である。

2・6 実験条件 表 3 の㊤欄に歯車試験機の負荷でこの先端にかけた荷重を示す。このときのヘルツ応力は表 3 の㊤欄に示すような値になる。各実験の回転数はすべて 4 000 rpm (駆動側) である。

3. 実験結果

3・1 実験経過 表 3 に示すような鋳鉄歯車 5 組、S 45 C 歯車 5 組について実験を行った。これらの歯車

のピッチング発生量は歯面観察時にピッチングをセロテープでカーボン転写する方法を用いて、全歯の歯面に発生したピッチングを記録し、転写したピッチングを投影機によって拡大しその面積を読取った。試験歯車部の振動が増加したり、ピッチングの発生量が負荷の繰返し数とともに増加することを確認し、その場合を歯車が破損したとして実験を打ち切った。

本実験においては鋳鉄歯車ではいずれの荷重においてもピッチングが発生することはなかった。しかしながら高荷重の場合にはピッチ点近傍からき裂が入り、振動を生じた。その一例を W 2-1×P 2-1 の組合せの場合について図 2 に示す。図 2 中の振動加速度は運転

表 1 試験歯車の主な諸元

	Driven gear	Driving gear
Number of teeth	16	15
Tooth profile of cutter	Full depth tooth	
Cutter pressure angle	20°	
Cutter DP	5	
Center distance	82.55	
Backlash	0.04	
Diameter of base circle	76.375	71.605
Diameter of intermeshing pitch circle	85.212	79.888
Diameter of standard pitch circle	81.28	76.20
Addendum modification coefficient	0.400	0.457
Diameter of tip circle	94.417	89.917
Radius of root circle	36.78	34.52
Face width	10	

N.B.) A unit of length is mm.

表 2 使用鋳鉄の成分

Ingredient	C	Si	Mn	P	S	Mg	Fe
% (wt)	3.81	2.60	0.26	0.027	0.009	0.044	Remain

図 1 使用鋳鉄の熱処理温度と主な機械的性質

表 3 実験条件および実験結果

	Cast iron gear										S45C gear									
	W1-1	P1-1	W2-1	P2-1	W3-1	P3-1	W4-1	P4-1	W5-1	P5-1	A1-1	B1-1	A1-2	B1-2	A2-1	B2-1	A2-2	B2-2	A3-1	B3-1
㊤ Number of gear																				
㊦ Tooth surface Rmax, μm	2.47	1.78	2.36	2.73	2.20	2.72	2.61	2.71	2.40	1.82	1.56	1.98	1.52	2.00	1.43	1.79	1.55	2.08	1.61	1.70
㊧ Load of leverage, N(kgf)	133.38 (13.61)		177.78 (18.14)		222.26 (22.68)		111.13 (11.34)		88.89 (9.07)		133.38 (13.61)		66.69 (6.80)		222.26 (22.68)		111.13 (11.34)		88.89 (9.07)	
㊨ Hertzian stress S, MPa(kgf/mm ²)	793.8 (81.0)		916.3 (93.5)		1019.2 (104.6)		724.2 (73.9)		684 (69.8)		793.8 (81.0)		592.9 (60.5)		1019.2 (104.6)		724.2 (73.9)		684 (69.8)	
㊩ Temperature of lubricating oil $^{\circ}\text{C}$	56		62		68		53		49		59		49		67		53		51	
㊪ Viscosity of lubricating oil Pa·s (kgf/m ²)	0.0412 (0.0042)		0.0314 (0.0032)		0.0255 (0.0026)		0.0470 (0.0048)		0.0539 (0.0055)		0.0363 (0.0037)		0.0539 (0.0055)		0.0265 (0.0027)		0.0470 (0.0048)		0.0510 (9.0052)	
㊫ Film thickness μm	1.006		0.795		0.669		1.123		1.283		0.916		1.332		0.699		1.123		1.225	
㊬ D-value	4.22		6.40		7.35		4.74		3.29		3.86		2.64		4.61		3.23		2.70	
㊭ Modification Hertzian stress S ₁ , MPa	1081		1355		1559		1009		886		1067		735		1420		934		852	
㊮ Life of gear ($\times 10^6$)	51.3		31.8		18.5		>184		>20		31.0		>40.3		2.9		10.0		>40.6	
㊯ Fatigue limit MPa (kgf/mm ²)	1024.1 (104.5)										875.1 (89.3)									

N.B) Symbols of W and A is driven gears.

開始 131 h 後に上昇し始め 1 h ぐらいの間に 5.5G から 25G へと上昇し、歯車試験機は自動停止した。総運転時間は約 132 h であった。

S 45 C 歯車ではピッチングが発生するもののき裂が生じることはなかった。ピッチングが多量に発生すると振動も増大する。図 3 はその一例で A 1-1×B 1-1 の組合せの場合である。振動の増大状況は、鋳鉄歯車においてき裂が生じたときに比べるとかなりゆっくりである。図 3 の例では運転開始後 160 h で振動が上昇し始め、5.4G であった振動加速度は 6 h 後の 166 h には 8.7G となって実験を打ち切った。いま歯車に生じたピッチングの総面積がその歯車の有効な作用歯面の面積に占める割合をピッチング面積率 (%) とすると、この時点でのピッチング面積率は 2.56 % であった。なお、このように振動が増大する場合にはピッチングが発生し続けることがわかっている⁽³⁾、振動が増大傾向にあることを確認した時点でその実験を打ち切った。

S 45 C 歯車におけるピッチングの増加傾向を図 4 に示す。図 4 中の実線は被動歯車(大歯車)で、破線は駆動歯車である。

駆動歯車あるいは被動歯車のピッチング面積率が 1 % に達したものは上述したような振動の増大がなくなってもその時点を経る歯車の寿命とした。

図 2 歯にき裂が生じたことにより振動が増大したときの運転記録

図 3 歯面にピッチングが生じたことにより振動が増大したときの運転記録

上記のようにして得られた寿命を表 3 の①欄に示す。この欄中の記号“>”で示された値は、その繰返し数で実験を打ち切り、かつそれ以上運転を継続してもその歯車が破損するとは考えられないことを示すものである。

3.2 歯車の強度 実験したヘルツ応力 S とその歯車の寿命(負荷繰返し数) N との関係を求めると図 5 となる。図 5 において鋳鉄歯車(○印)と S 45 C 歯車(△印)を比較すると、図 5 中に実線で示すように鋳鉄歯車のほうが長寿命であることがわかる。歯車が損傷しない耐久限(歯車が損傷した応力の最小値と損傷しなかった応力の最大値の中間の値)を比較すると、鋳鉄歯車が 759.5 MPa (77.5 kgf/mm²)、S 45 C 歯車が 703.6 MPa (71.8 kgf/mm²) となり、鋳鉄歯車のほうが 8 % 高い強度を示している。

歯車の面圧強度を比較する場合、歯面粗さや潤滑油の粘度を一定に行わねばならないことがわかっている。そこで、歯面粗さや潤滑油の粘度を加味し、 D 値で補正した修正ヘルツ応力 S_i で両者を比較してみる。

表 3 において⑥欄は潤滑油の給油温度で、歯の温度(歯の側面の歯丈 1/2 の位置に熱電対を接触させて測定したものを呼ぶ)より 5~7°C 低い。この温度による潤滑油の粘度は⑦欄に示してある。⑧欄の油膜厚さは①欄の粘度を用いてピッチ点に形成される最小油膜厚さを Dowson-Higginson の理論式⁽⁴⁾に従って算出した値である。また⑨欄の D 値は Dawson が提唱したもの⁽⁵⁾で、駆動および被動各歯車の歯面粗さの和を油

図 4 S 45 C 歯車におけるピッチングの増加状況

膜厚さで除した値である。①欄の修正ヘルツ応力 S_1 はヘルツ応力 S を下記の式(1)のように D 値で修正したものである。

$$S_1 = SD^{0.2} \dots\dots\dots (1)$$

①欄は修正ヘルツ応力 S_1 を用いたときの歯車の耐久限である。

図6は縦軸に修正ヘルツ応力 S_1 、横軸に繰返し数 N を取って整理したものである。図6では粗さや潤滑油の状態を同じになるように補正しているもので、図5よりは正確に対比することができ、かつ、過去のデータと比較することもできる。図6のように鋳鉄歯車はS45C歯車より寿命が長く、耐久限は17%高い。この値は歯車の許容伝達トルクにして37%の増加に相当する。図6には、鋳鉄歯車の強度の位置づけを明確にするために、同じ実験をSCM430 (JIS G 4105) 歯車で行ったときに得られると推定される S_1 - N 線図⁽⁶⁾を破線で示した。すなわち、鋳鉄歯車の許容伝達トルクはSCM430歯車とほぼ同じであると考えられる。

3.3 破壊の形態 鋳鉄歯車とS45C歯車とでは著しく異なった破壊形態を示した。鋳鉄歯車ではまずピッチ点付近に歯面と直角方向にき裂が入る。その方向はいったん歯面に直角方向に向かった後反作用面の歯元の方に向かう場合(図7)と、最初から反作用面の歯元に向かう場合(図8)とがある。図7, 8はすでにき裂が大きく成長しているが、微小なき裂がピッチ点近傍にいくつか確認されているので、き裂の起点がピッチ点近傍であることは確かであると考えられる。

鋳鉄歯車の歯面には大きなピッチングは生じなかった。しかし、図9の歯面をよく観察すると、歯当たりの強い位置の歯先側、歯元側ともに微細なピッチングが発生していることがわかる。この微細なピッチングはその大きさのみならず、歯先側にも多発している点で一般の鋼歯車に発生するピッチング(図10)と異なっている。このようなピッチングは、表面にピッチングとなるべきき裂が発生しても、そのき裂が黒鉛状の組織に阻まれて進展しなかったものと考えられる。なお、形態的には浸炭などの表面硬化処理した歯車に発生する“くもり”と同じものであろう。

S45C歯車では通常みられるピッチングが発生した。ピッチングが増加して歯幅全体を占め、図10の状態となると振動が発生するようになる。

4. 考 察

S45C歯車の耐ピッチング強度は過去に実施されたデータの818.3 MPa(83.5 kgf/mm²)より7%高い値を示しているが、このばらつきは一般的に予想され

る範囲用のものである。ピッチングの発生状態も過去のデータと異なる点は見受けられなかった。

一方鋳鉄歯車ではピッチングがまったく発生していない。これは、鋳鉄の場合には表面にき裂の芽が生じても、材料の組織上き裂が進展せず、ピッチングに至らないことが考えられる。すなわち、接触面において突起間の激しい干渉によってき裂が発生したとしても、その後このき裂を成長させる潤滑油の封じ込め作用が鋳鉄のグラフアイトの変形により妨げられてしまうことが考えられる。この点については今後さらに検討していかなばならない事項である。

鋳鉄歯車では破壊の形態はいずれも折損(実験では折損に至る前のき裂の段階で終了させているが、このまま継続して運転すればき裂が進展し、折損に至ることは明りょうである)であり、しかもき裂の発生位置が一般の鋼歯車にみられるような歯元ではなく、ピッチ点近傍である。このことは歯に作用する曲げ応力による破壊ではなく、せん断による破壊であることを意味する。したがって、材料の機械的性質として曲げ強さよりも衝撃値やせん断強さを重視する必要があるう

図5 S-N曲線

図6 歯車の強度における材料の比較

図 7 鋳鉄歯車のピッチ点に入ったき裂

図 8 鋳鉄歯車のピッチ点を起点としたき裂

図 9 鋳鉄歯車に発生した微小ピット

図 10 S45C 歯車の歯幅全体に生じたピッチング

かと思われる。

上記のように鋼歯車と比較して鋳鉄歯車の特徴を示したが本研究で得られた鋳鉄歯車の強度に対する位置づけはすでに報告したいくつかの実験結果⁽⁷⁾⁽⁸⁾から推測して一般的な運転条件で成立するものと思われる。

5. 結 言

最近のオーステンパダクタイト鋳鉄を歯車に応用しその強さの評価を行い次のことがわかった。

- (1) 鋳鉄歯車の伝達トルクは S45C 歯車より 37% 高く、ほぼ SCM430 歯車に匹敵する。
- (2) 鋳鉄歯車にはピッチングが発生しなかった。
- (3) 鋳鉄歯車ではピッチ点にき裂が発生し、破壊

に至る。

- (4) 本鋳鉄材では衝撃値やせん断強さがさらに向上することが重要である。

文 献

- (1) 日本潤滑学会編, 潤滑用語集, (昭 61), 106, 養賢堂。
- (2) 日本鋳鉄管(株)技術資料, (昭 60), 52。
- (3) 滝, 機論, 47-416, C (昭 61), 493。
- (4) Dowson, D., *Proc. Inst. Mech. Eng.*, 182-Pt 3 A (1967), 151。
- (5) Dawson, P. H., *J. Mech. Eng. Sci.*, 4-1 (1962), 16。
- (6) 滝, 機論, 52-474, C (昭 61), 542。
- (7) 滝, 潤滑, 28-8 (昭 58), 603。
- (8) 滝, 石橋技報, 26-3 (昭 61), 1。

討 論

〔質問〕 田 中 秀 穂 (鹿児島大学工学部)

鋳鉄歯車におけるピッチ点近傍のき裂の発生は、いったん歯面に直角に入りその後、歯元に向かう場合と、最初から歯元に向かう場合の 2 とおりがあるとされているが、この点について伺いたい。

(1) まず、このき裂の発生原因はせん断力によるものとされているが、このせん断力の方向は歯面に沿うものか、歯面に直角方向のものなのか。

(2) かみあいピッチ点の正確な位置との関係で、2 とおりのき裂発生の様相が異なるのではないかと

し、この点について明白な相違点があればご教示いただきたい。

〔回答〕 (1) せん断力の方向は作用線方向すなわち歯面に垂直方向である。この現象はセラミックス歯車のように、より脆性度が増すほど顕著に現れる。

(2) 鋳鉄歯車の場合はいずれの実験条件の場合も歯にき裂が発生する位置は一对かみあい領域だが、現段階では図 7 と図 8 は基本的には相違しないのではないかと考えている。ただし、この材料についてはさらに研究を進めたいと結論を出したいと思っている。