

8.1 ウォームギヤの損傷例と強さ計算式

8.1.1 はじめに

ウォームギヤは、食違い軸歯車的一种で、ウォームとウォームホイールを組合せて小型で 1/10~1/100 の減速比が得られることや騒音の小さいことなどの特徴⁽¹⁾⁽²⁾がある。一方、ウォームギヤは、歯形に沿って滑るほかに歯すじに沿っても大きく滑りを伴うこと、歯面間の負荷状態が複雑なこと、境界潤滑領域や混合潤滑領域で運転される場合が多いことなど⁽³⁾が知られている。本節では、ウォームギヤの損傷とウォームホイール材の表面疲れ強さ値（ピッチング強さ）、並びに、ウォームギヤの強さ計算式などについて概説する。具体的には、まず、公表されているウォームギヤの損傷例^{(4)~(7)}・ウォームギヤの大きさと限界トルク・損傷に及ぼす影響因子⁽⁸⁾を述べる。次に、動力伝達用ウォームギヤで用いられる材料^{(9)~(13)}・実験等によるウォームホイール材の表面疲れ強さ値^{(14)~(16)}・基準ウォームギヤにおけるウォームホイール材の歯面疲れ強さ値・ウォームギヤの強さ計算式^{(8)(17)~(21)}の特徴・JGMA で 2017 年に制定されたウォームギヤの強さ計算式⁽²¹⁾の概要を述べる。

8.1.2 ウォームギヤの損傷例

表 8.1-1 に、これまでに公表されているウォームギヤの損傷例^{(4)~(7)}を示す。

表 8.1-1 から、ウォームギヤにおいては、ウォームに比べ、ウォームホイールの摩耗やピッチングなどの歯面損傷例が多いこと、長期間運転に伴いウォームホイールの歯が摩耗により尖った状態まで、摩滅により歯が完全に消失するまで、あるいは、全歯せん断折損するまで利用されていることがわかる。また、ウォームギヤの負荷能力実験から、ウォームホイールにおいて、外観上負荷の繰返しでピッチングが増加し途中から減少するとともに摩耗が増加する歯面損傷の推移状況がわかる。

したがって、ウォームギヤの強さを検討する際に、これらの損傷例を考慮しておく必要がある。

表 8.1-1 公表されているウォームギヤの損傷例

例	損傷名	損傷箇所	諸元等	状況等	出典
No.1	摩耗 (Wear)	ウォームホイール (銅系)	外径約 30mm	淡水中使用で、摩耗により 歯先が尖った状態	引用 ⁽⁴⁾ (図 41-5)
No.2	摩耗 (Wear)	ウォームホイール	モジュール 14	摩耗により歯厚がほとんど なくなり、歯先がかみそり 状に尖った状態	引用 ⁽⁴⁾ (図 43-2)
No.3	摩滅 (Destructive wear)	ウォームホイール (りん青銅鋳物 2 種 CAC502B)	モジュール 14, 回転数 7min ⁻¹	摩滅により歯が完全に消失	引用 ⁽⁴⁾ (図 43-3)
No.4	進行性ピッチング (Progressive pitting)	ウォームホイール (高力黄銅鋳物)	—	6 年間稼働で、少しずつピ ッチングは増加	引用 ⁽⁴⁾ (図 71-4)
No.5	せん断折損 (Tooth shear)	ウォームホイール	—	摩耗が進行し、歯厚が薄く なり、最終的に全歯がせん 断され歯の消失	引用 ⁽⁴⁾ (図 82-4)
No.6	歯元部のき裂 (Cracks at root)	ウォームホイール (青銅鋳物)	モジュール 65.1, 回転数 206min ⁻¹ , Z ₁ /Z ₂ =1/50	損傷確認は、約 9 年後、歯 元部にき裂	引用 ⁽⁵⁾ (写真 62)
No.7	溶融 (Fusion)	ウォーム (ニッケルクロム 鋼 SNC631・高周波 焼入れ)	—	溶融・変色、歯底部の熱に よるひび割れ	引用 ⁽⁴⁾ (図 66 -2・図 66-3)
No.8	ピッチング・摩耗・ 折損 (Pitting・Wear・ Tooth breakage)	ウォームホイール (Ni を含む青銅鋳 物-遠心鋳造品)	中心距離 100mm, Z ₁ /Z ₂ =1/10, 合成油	ピッチングの増加・減少、 摩耗の増加、1500 時間で折 損の損傷推移(実験)	引用 ⁽⁶⁾ (図 1)
No.9	ピッチング・摩耗 (Pitting・Wear)	ウォームホイール (りん青銅鋳物-遠 心鋳造品)	モジュール 6.345, 回転数 1400min ⁻¹ , 中心距離 125mm, Z ₁ /Z ₂ =3/31	ピッチングの増加・減少、 摩耗の増加の損傷推移(実 験)	引用 ⁽⁷⁾ (図 2~ 図 8)

8.1.3 ウォームギヤの大きさと限界トルク、並びに、損傷に及ぼす影響因子

(1) ウォームギヤの大きさと限界トルク

図 8.1-1 と図 8.1-2 に、中心間距離の小さい場合と大きい場合におけるウォームの回転数に対する限界トルク⁽⁸⁾を示す。ここで、図 8.1-1 と図 8.1-2 において、1~5 の曲線は、それぞれ摩耗・ピッチング・ウォーム軸のたわみ・スカuffィング (温度)・歯の折損に対して、それぞれ独立した計算によって得られたウォームホイールの出力トルク

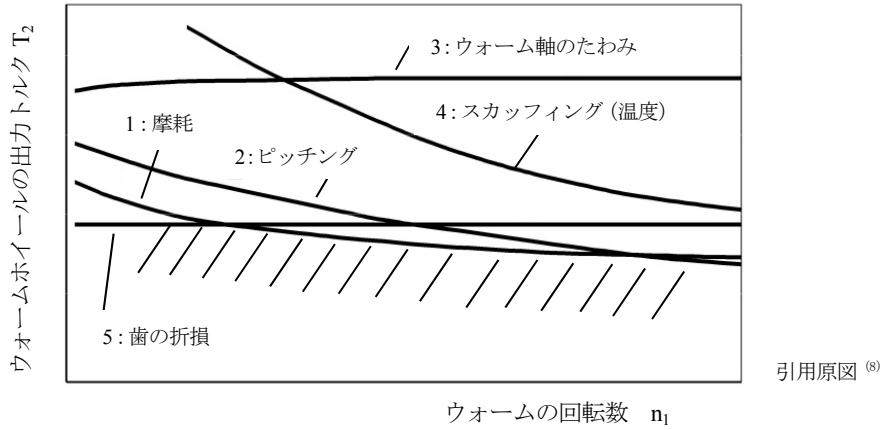


図 8.1-1 ウォームの回転数に対する限界トルク (中心間距離の小さい場合)

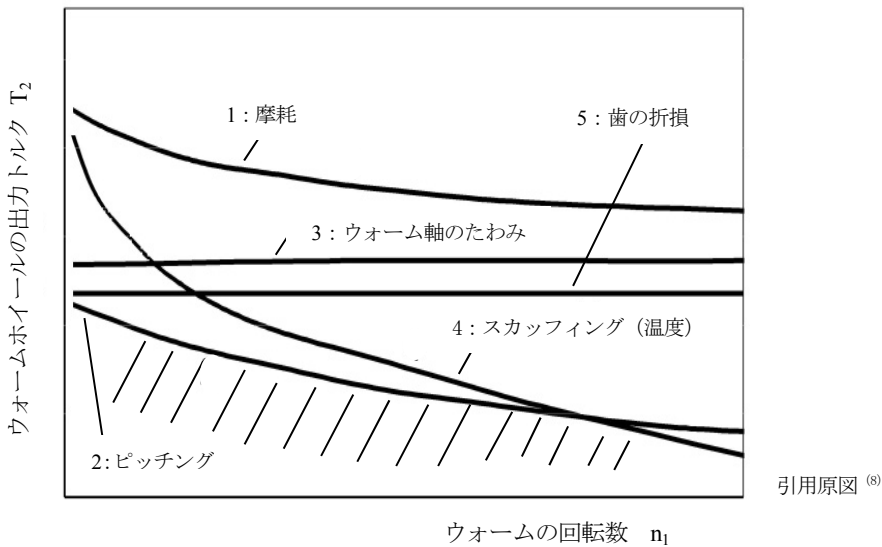


図 8.1-2 ウォームの回転数に対する限界トルク (中心間距離の大きい場合)

表 8.1-2 ウォームギヤの損傷に及ぼす影響因子⁽⁸⁾

影響因子	損傷形態					
	摩耗 Wear	ピッチング Pitting	歯の折損 Tooth breakage	ウォーム軸のたわみ Worm shaft deflection	スカuffィング Scuffing	低効率 Low efficiency
ヘルツの接触応力	X	X	X	X	X	X
ウォーム回転数	X	X			X	X
油膜厚さ	X	X			X	X
潤滑油	X	X			X	X
歯当たり	X	X	X		X	X
ウォーム歯面粗さ	X	X			X	X
せん断値			X			

ルクで、トラブルのない状態で運転できる領域は、ハッチング部分となる。

図 8.1-1 と図 8.1-2 から、各回転数に対する限界トルク、すなわち、ウォームギヤの負荷能力は、ハッチング部の曲線との交点となることがわかる。すなわち、小型ウォームギヤの場合、低速域で歯の折損、中速域の広い範囲で摩耗、高速域でピッチングが生じることで限界トルクとなり、中型・大型ウォームギヤの場合、低速から中速域の広い範囲でピッチングが生じることで限界トルク、高速域でスカuffing（温度）が生じることで限界トルクとなることがわかる。

(2) ウォームギヤの損傷に及ぼす影響因子

表 8.1-2 に、ウォームギヤの損傷に及ぼす影響因子⁽⁸⁾を示す。

表 8.1-2 から、ウォームギヤの摩耗・ピッチング・スカuffing・低効率に対しては、負荷・回転数・潤滑油膜厚さ・潤滑油・歯当たり・歯面粗さなどが影響していること、歯の折損に対しては、負荷・歯当たり・せん断値が影響していること、ウォーム軸のたわみに対しては、負荷が影響していることがわかる。これらのことから、それぞれの損傷に対応するウォームギヤの強さ計算式においては、これらの影響因子の考慮が必要である。

8.1.4 動力伝達用ウォームギヤで用いられる材料

ウォームには、機械構造用炭素鋼鋼材⁽⁹⁾・機械構造用合金鋼鋼材⁽¹⁰⁾・球状黒鉛鋳鉄品⁽¹¹⁾・ねずみ鋳鉄品⁽¹²⁾などが用いられている。なお、ウォームは、一般的にウォームホイールよりも硬くするために鋼材の場合、高周波焼入れ（表面硬さ 420HV~680HV）や浸炭焼入れ焼戻し（表面硬さ 580HV~800HV）の熱処理が施される。

一方、ウォームホイールには、なじみ性と耐焼付性などから、高力黄銅鋳物・りん青銅鋳物・アルミニウム青銅鋳物などの銅合金鋳物⁽¹³⁾・球状黒鉛鋳鉄⁽¹¹⁾・ねずみ鋳鉄⁽¹²⁾が用いられており、鑄造法は、砂型鑄造・金型鑄造・遠心鑄造・精密鑄造などがある。なお、JIS 規格では、銅合金鋳物⁽¹³⁾の場合、60HBW~220HBW 程度の硬さであり、球状黒鉛鋳鉄⁽¹¹⁾とねずみ鋳鉄⁽¹²⁾の場合、130HBW~330HBW と 280HBW 以下の硬さとなっている。

したがって、動力伝達用ウォームギヤ⁽⁸⁾^{(17)~(21)}のウォームとウォームホイールには、硬く熱処理された鋼と銅合金鋳物、あるいは、球状黒鉛鋳鉄やねずみ鋳鉄の組合せ、場合によって、球状黒鉛鋳鉄と球状黒鉛鋳鉄の組合せ、ねずみ鋳鉄とねずみ鋳鉄の組合せで用いられている。

表 8.1-3 円筒試験片・潤滑油と二円筒面圧実験の条件

二円筒面圧実験		A ⁽¹⁴⁾		B ⁽¹⁵⁾		C ⁽¹⁶⁾		
円筒試験片	直径 mm	68	68	68	68	65	65	
	有効接触幅 mm	10		10		10		
	回転数 min ⁻¹	1780	2150	2630	3190	~3100	3100	
	周速 m/s	6.3	7.7	9.4	11.4	~10.6	10.6	
	すべり率 %	-21	17	-21	17	摩擦駆動	駆動側	
	相対滑り速度 m/s	1.3		2.0		—		
	材種	銅合金鋳物：4種類	合金鋼 SCM415	球状黒鉛鋳鉄FCD700	球状黒鉛鋳鉄FCD700	銅合金鋳物：10種類	合金鋼 SCM440	
	熱処理		浸炭焼入れ	鑄放し	鑄放し		焼入れ	
	表面硬さ HBW	110~156	654	260~300	260~300	89~215	514	
	表面粗さ μmPz	1~2	1~2	2, 10	2, 10	2~3	1	
試験片数	14	14	5	5	30	30		
潤滑油	種類	ウォームギヤ専用ギヤ油 ISO VG380		基油 SAE30		油脂系10%添加シリンド油		
	粘度	40°C m ² /s	379 x 10 ⁻⁶		99.4 x 10 ⁻⁶		323 x 10 ⁻⁶	
		100°C m ² /s	28.7 x 10 ⁻⁶		11.1 x 10 ⁻⁶		26.1 x 10 ⁻⁶	
	粘度指数	104		96		-		
	供給油温 K(°C)	333 (60)		313 (40)		313~323(40~50)		
給油法	強制循環給油		強制循環給油		強制循環給油			
二円筒面圧実験	負荷 σ _H MPa	440 ~ 900		750 ~ 1230		~		
	繰返し数 N	~ 1 x 10 ⁷		~ 1 x 10 ⁷		~ 1 x 10 ⁷		
	D 値 (=ΣRmax / hmin)	1.1 ~ 1.2		1.5 ~ 7.1		0.6 ~ 0.8		
	求めるσ _H - N 曲線 (疲労曲線)	銅合金鋳物：4 曲線		球状黒鉛鋳鉄：2 曲線		銅合金鋳物：10 曲線		

8.1.5 実験等によるウォームホイール材の表面疲れ強さ値（ピッチング強さ）

(1) 二円筒面圧実験から求めた各種鋳物の表面疲れ強さ値（ピッチング強さ）

表 8.1-3 に、円筒試験片・潤滑油と二円筒面圧実験の条件を示す。ここで、表 8.1-3 において、二円筒面圧実験では、負荷から計算されるヘルツの最大接触応力 $\sigma_H^{(22)}$ とピット発生の判定基準を考慮した負荷の繰返し数 N の関係、すなわち、 $\sigma_H - N$ 曲線（疲労曲線）を得るために、歯車対の特定部の接触状態をシミュレートした実験条件を選択している。また、 D 値⁽²³⁾ ($= \Sigma R_{max} / h_{min}$, ΣR_{max} : 二つの接触面の最大高さ Pz ⁽²⁴⁾ ⁽²⁵⁾ の和, h_{min} : 線接触 EHL (弾性流体潤滑理論) における最小油膜厚さ⁽²⁶⁾) は、ピットの発生に大きく影響する表面粗さと潤滑油膜厚さとの関係を表す。

次に、表 8.1-4 に、各種鋳物の二円筒面圧実験の $\sigma_H - N$ 曲線から求めた表面疲れ強さ値（ピッチング強さ）を示す。ここで、表 8.1-4 において、表面疲れ強さ値 σ_{Hlim} は、表 8.1-3 の条件で得られた 16 種類の $\sigma_H - N$ 曲線から負荷の繰返し数 10^7 でピットの生じない寿命判定基準で求めた最大接触応力である。また、表 8.1-3 実験 C における転がり滑りの条件下の表面疲れ強さ値は、摩擦駆動の場合に比べ明らかに低下することを考慮して、摩擦駆動の実験条件で得られた表面疲れ強さ値の 70% の値としている。

表 8.1-3 と表 8.1-4 から、二円筒面圧実験から求めた硬い合金鋼と組合せた場合の 14 種類の銅合金鋳物の表面疲れ強さ値（ピッチング強さ）、並びに、表面粗さの異なる 2 種類の球状黒鉛鋳鉄と球状黒鉛鋳鉄を組合せた場合の表面疲れ強さ値（ピッチング強さ）がわかる。

(2) ウォームギヤの負荷実験から求めた歯面疲れ強さ値（ピッチング強さ）

表 8.1-5 に、ウォームギヤの負荷実験における試験歯車の条件と運転条件を示す。ここで、表 8.1-5 において、実験 AA は、ISO/TR 14521 で用いられている基準となる標準ウォームギヤの諸元・潤滑油などによる実機の歯車試験⁽⁸⁾ である。

次に、図 8.1-6 に、ウォームギヤの負荷能力実験から求めたウォームホイール材の歯面疲れ強さ値（ピッチング強さ）を示す。ここで、実験 AA におけるウォームホイール材の歯面疲れ強さ値（Pitting strength） σ_{Hlim} は、運転が 25000 時間で、ピッチング面積率約 50% を許容した限界接触応力（Pitting resistance for contact stress）であり、実験 BB におけるウォームホイール材の歯面疲れ強さ値 σ_{Hlim} は、繰返し数 1.7×10^5 毎の段階の負荷条件におけるピット発生から推定した接触応力である。

表 8.1-4 二円筒面圧実験の $\sigma_H - N$ 曲線（疲労曲線）から求めた表面疲れ強さ値

ウォームホイール材		硬さ HBW	D値	表面疲れ強 さ値 (*1) σ_{Hlim} MPa	ウォーム材・熱処理	実験条件 等
特殊アルミニウム青銅鋳物	FA381	126	1.2	500	合金鋼 SCM415・ 浸炭焼入れ焼戻し	表 8.1-3 実験 A ⁽¹⁴⁾
青銅鋳物	AGMA5C	120	1.2	600		
りん青銅鋳物	PBC3C	110	1.1	440		
特殊高力黄銅鋳物	CBT3C	156	1.2	680		
球状黒鉛鋳鉄	FCD700 (2 μ mPz)	280	1.5	780	球状黒鉛鋳鉄 FCD700・焼放し	表 8.1-3 実験 B ⁽¹⁵⁾
球状黒鉛鋳鉄	FCD700 (10 μ mPz)	280	7.1	570		
りん青銅遠心鋳造	PBC2-E	105	0.8	616	合金鋼 SCM440・焼 入れ	表 8.1-3 実験 C ⁽¹⁶⁾
りん青銅チル鋳造	PBC2-C	156	0.7	553		
りん青銅砂型（生）鋳造	PBC2-G	93	0.6	308		
りん青銅乾燥型鋳造	PBC2	89	0.6	343		
りん青銅鍛造（軟質）	PBB2 (1:軟質)	114	0.8	686		
りん青銅鍛造（硬質）	PBB2 (2:硬質)	139	0.8	686		
アルミニウム青銅鍛造（普通）	ABB3	194	0.8	756		
アルミニウム青銅鍛造（特殊）	ABBS	215	0.8	896		
アルミニウム青銅鋳造	ABC2	173	0.7	448		
ニッケル青銅鋳造	NBC	122	0.8	686		

*1: $\sigma_H - N$ 曲線における表面疲れ強さ値は、負荷の繰返し数 10^7 でピットの生じない寿命判定基準で得られた最大接触応力である。なお、表 8.1-3 実験 C の場合、転がり滑りの条件下の表面疲れ強さ値は、摩擦駆動の実験条件で得られた表面疲れ強さ値の 70% の値とした。

表 8.1-5 と表 8.1-6 から、実機のウォームギヤについて、ウォーム材に硬い合金鋼を用いた場合の 9 種類のウォームホイール材の歯面疲れ強さ値（ピッチング強さ）がわかる。なお、ウォームホイール材の歯面疲れ強さ値は、ある程度のピット発生（ピッチング面積率 約 50%）を許容した限界接触応力（Pitting resistance for contact stress）であることに注意が必要である。

表 8.1-5 ウォームギヤの負荷実験における試験歯車の条件と運転条件

歯車負荷実験		AA ⁽⁸⁾		BB ⁽¹⁶⁾		
試験歯車	ウォームの軸方向モジュール mm	4		9.728		
	ウォームの条数 条	2		2		
	ウォームホイールの歯数 枚	41		25		
	進み角 °	12.53		18.433		
	圧力角 °	歯直角20		軸断面22		
	中心距離 mm	100		150.79		
	ウォームホイールの歯幅 mm	30		44.45		
	歯形	I 形（インボリュートねじ面）		I 形（インボリュートねじ面）		
	組合せ	ウォームホイール	ウォーム	ウォームホイール	ウォーム	
	材料：種類	銅合金鋳物：4	合金鋼：1	銅合金鋳物：3	合金鋼：1	
	熱処理	球状黒鉛鋳鉄：1 片状黒鉛鋳鉄：1	浸炭焼入れ焼戻し		焼入れ	
	歯面硬さ HBW	銅合金鋳物： 95 ~ 160 球状黒鉛鋳鉄：180 片状黒鉛鋳鉄：240		銅合金鋳物： 89 ~ 114	514	
	歯面粗さ μm		0.5μm Ra	~4μmPz	~1.5μmPz	
回転数 min ⁻¹	73	1500	144	1800		
潤滑油	種類	ポリグリコール		(油脂系10%添加シリンダ油)		
	粘度	40°C m ² /s	220 × 10 ⁻⁶		(323 × 10 ⁻⁶)	
		100°C m ² /s	37 × 10 ⁻⁶		(26.1 × 10 ⁻⁶)	
	供給油温 °C	73.2 (油槽温度)		約80 (油槽温度)		
給油法	飛沫潤滑 (ウォームホイール浸漬)		(油浴潤滑と循環装置)			
歯面疲れ強さ値（許容最大接触応力）の求め方		25000時間でピッチング面積率約50%を許容した歯面疲れ強さ値(なお、平均ヘルツ応力の導入、繰返し数3 × 10 ⁶ で寿命係数Y=1.0)		繰返し数1.7 × 10 ⁵ 毎の段階負荷条件でピット発生から歯面疲れ強さ値を推定 (なお、ラックとピニオンのかみ合いと見なしてヘルツの最大接触応力を算定)		

表 8.1-6 ウォームギヤの負荷実験から求めたウォームホイール材の歯面疲れ強さ値（ピッチング強さ）

ウォームホイール材	硬さ HBW	歯面疲れ強さ値 σ _{Hlim} MPa (*1)	ウォーム材・熱処理	運転条件等
りん青銅遠心鋳造品 (りん青銅鍛造品：同等品)	GZ-CuSn12	95	合金鋼 16MnCr5・ 浸炭焼入れ焼戻し	表 8.1-5 実験 AA ⁽⁸⁾
ニッケル青銅遠心鋳造品	GZ-CuSn12Ni2	95		
ニッケル青銅連続鋳造品	GC-CuSn12Ni2	95		
アルミニウム青銅遠心鋳造品 (アルミニウム青銅鍛造品：同等品)	GZ-CuAl10Ni	160		
球状黒鉛鋳鉄	GGG-40	180		
ねずみ鋳鉄	GG-25	240		
りん青銅乾燥型鋳造	PBC2	89	合金鋼 SCM440・ 焼入れ	表 8.1-5 実験 BB ⁽¹⁶⁾
りん青銅鍛造（軟質）	PBB2 (1：軟質)	114		
りん青銅遠心鋳造	PBC2-E	105		

*1：歯面疲れ強さ値は、ある程度のピット発生（ピッチング面積率 約 50%）を許容した限界接触応力である。なお、表 8.1-5 実験 BB の場合、20h(15h)毎の段階の負荷実験（総繰返し数 7~8 × 10⁵ ピット有無判定）から推定した歯面疲れ強さ値である。

(3) 規格書を利用した球状黒鉛鋳鉄, 並びに, ねずみ鋳鉄の表面疲れ強さ値 (ピッチング強さ)

図8.1-3に, 球状黒鉛鋳鉄, 並びに, ねずみ鋳鉄の許容応力値 (接触) σ_{Hlim} と Allowable stress numbers (contact) σ_{Hlim} を示す. ここで, 図8.1-3において, 許容応力値 (接触) σ_{Hlim} と Allowable stress numbers (contact) σ_{Hlim} は, 平歯車及びはすば歯車の歯面強さ計算式 JGMA 6102-02 (2009) ⁽²⁷⁾ の「表9 鋳鉄, 鋳鋼及びステンレス鋼歯車 σ_{Hlim} 」(以下, JGMA 6102-02の値 σ_{Hlim}) と ISO 6336-5 (2016) (E) ⁽²⁸⁾ の「Table 1 Calculation of σ_{Hlim} and σ_{Flim} 」 「Figure 3 Cast iron materials-Allowable stress numbers (contact) for cast iron materials」(以下, ISO 6336-5の値 σ_{Hlim}) に基づくものである. なお, JGMA 6102-02の値 σ_{Hlim} は, 鋼の場合にならって求めた値で, 硬さは, 日本工業規格の球状黒鉛鋳鉄品 ⁽¹¹⁾, 並びに, ねずみ鋳鉄品 ⁽¹²⁾ の材種と硬さとの関係を利用している. また, ISO 6336-5の値 σ_{Hlim} は, 基準運転条件及び諸元をもつ基準試験歯車 (中心距離 $a = 100\text{mm}$ ・モジュール $m = 3 \sim 5$ ・同一材料の平歯車対) の耐久試験から求めた値である.

図8.1-3から, 球状黒鉛鋳鉄の場合, 各材種の下限硬さと上限硬さを用いて整理したJGMA 6102-02の値 σ_{Hlim} は, 材料の品質等級のML=MQとMEで区分される ISO 6336-5の値 σ_{Hlim} を含むことがわかる. 次に, ねずみ鋳鉄の場合, 各材種の上限硬さを用いて整理した JGMA 6102-02の値 σ_{Hlim} は, 材料の品質等級のML=MQとMEで区分される ISO 6336-5の値 σ_{Hlim} のいずれよりも低いことがわかる.

(4) ウォームホイール材における表面 (歯面) 硬さと表面 (歯面) 疲れ強さ値 (ピッチング強さ)

図8.1-4に, ウォームホイール材の銅合金鋳物における表面 (歯面) 硬さ HBW と表面 (歯面) 疲れ強さ値 σ_{Hlim} との関係を示す. ここで, 図8.1-4において, プロット点の●印・○印は, 二円筒面圧実験から求めた銅合金鋳物の表面硬さと表面疲れ強さ値 (表8.1-4の実験Aと実験C (良好な潤滑領域 (D 値 ≈ 1)) のデータ) を表し, 実線は, データの関係式を表す. また, ▼印・◎印は, ウォームギヤの負荷実験から求めた銅合金鋳物の歯面硬さと歯面疲れ強さ値 (表8.1-5の実験AAと実験BB) を表す.

次に, 図8.1-5に, ウォームホイール材の球状黒鉛鋳物, 並びに, ねずみ鋳鉄における表面 (歯面) 硬さ HBW と表面 (歯面) 疲れ強さ値 σ_{Hlim} との関係を示す. ここで, 図8.1-5において, プロット点の●印は, 二円筒面圧実験から求めた球状黒鉛鋳鉄の表面硬さと表面疲れ強さ値 (表8.1-4の実験B (良好な潤滑領域 (D 値 ≈ 1)) のデータ) を表す. また, 一点鎖線は, 規格書を利用した球状黒鉛鋳鉄の下限硬さと上限硬さ, 並びに, ねずみ鋳鉄の上限硬さを用いて整理した JGMA 6102-02の値を表し, 破線は, 規格書を利用したISO 6336-5の値 (図8.1-3) を表し, 実線は, 球状黒鉛鋳鉄, 並びに, ねずみ鋳鉄におけるデータの関係式を表す. さらに, ▼印・◆印は, ウォ

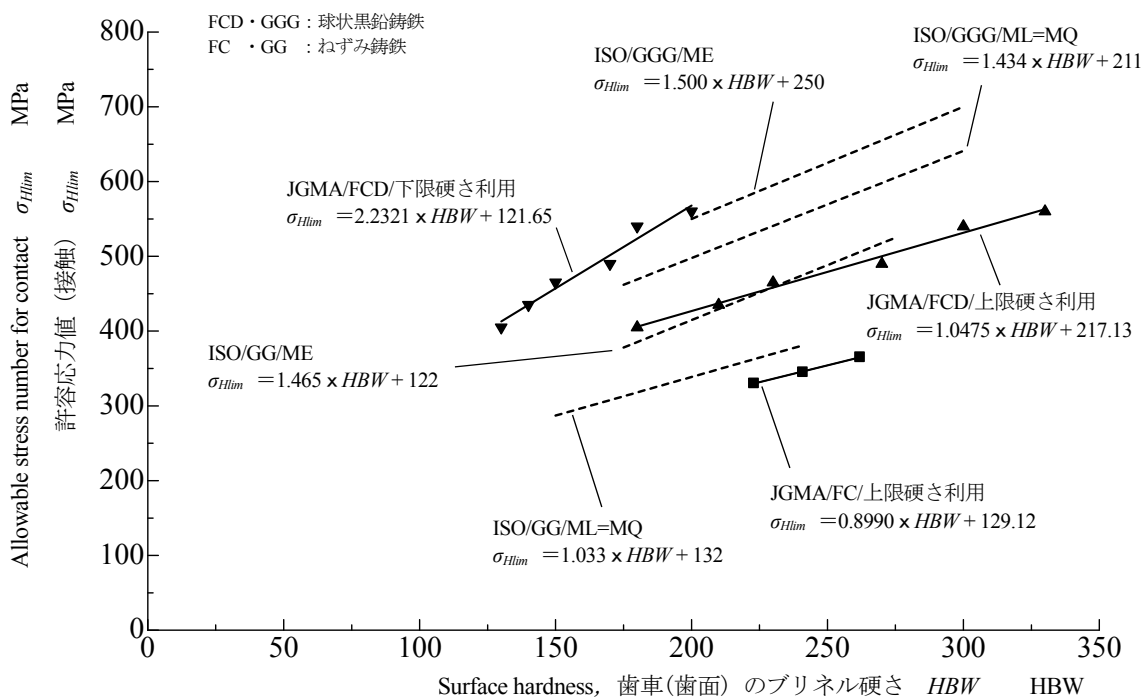


図 8.1-3 球状黒鉛鋳鉄, 並びに, ねずみ鋳鉄の許容応力値 (接触) と Allowable stress numbers (contact)

ームギヤの負荷実験から得られた球状黒鉛鋳鉄，並びに，ねずみ鋳鉄の歯面硬さと歯面疲れ強さ値（表8.1-5の実験AA）を表す。

図8.1-4と図8.1-5から，銅合金鋳物・球状黒鉛鋳鉄・ねずみ鋳鉄の表面（歯面）疲れ強さ値 σ_{Hlim} は，いずれも表面（歯面）硬さ HBW が硬くなるほど増加することがわかる。また，ウォームギヤの負荷実験から求めた各種鋳物の歯面硬さと歯面疲れ強さ値との関係（図8.1-4の▼印・◎印と図8.1-5の▼印・◆印）は，歯面疲れ強さ値を求める際の最大接触応力の仮定・寿命係数の定義・表面（歯面）粗さ係数の定義・ピッチング寿命の判定基準などが異なるものの，二円筒面圧実験から求めた表面硬さと表面疲れ強さとの関係（図8.1-4の実線），並びに，規格書を利用した表面硬さと表面疲れ強さとの関係（図8.1-5の実線）とほぼ一致していることがわかる。なお，このことは，ウォームギヤの場合，円筒歯車にくらべ歯面間の接触条件が複雑なことなど⁽³⁾や歯面疲れ強さ値（ピッチング強さ）を求める際にある程度のピット発生（ピッチング面積率 約50%）を許容した限界の接触応力としてしていることなどが考えられる。

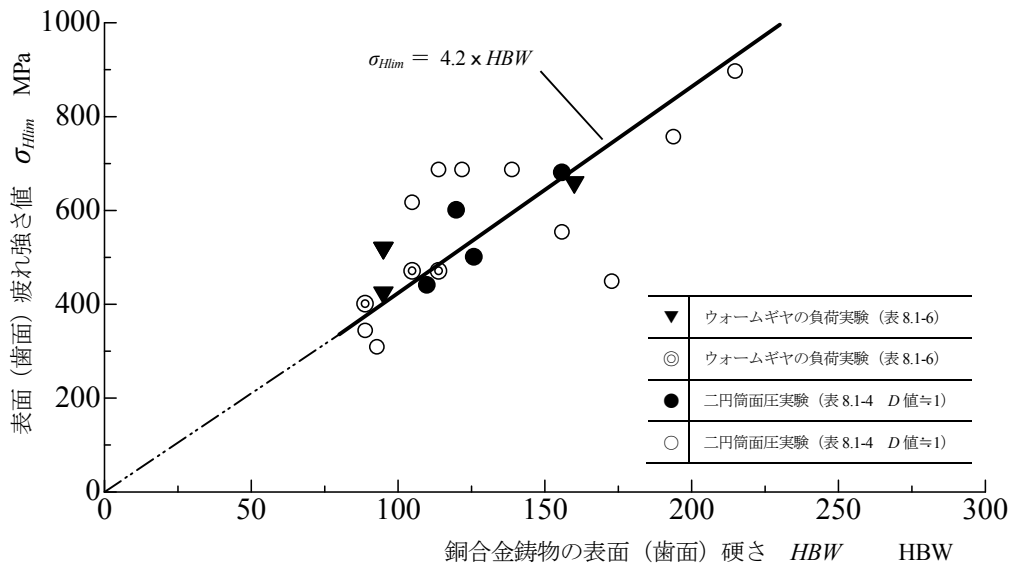


図 8.1-4 銅合金鋳物における表面（歯面）硬さと表面（歯面）疲れ強さ値との関係

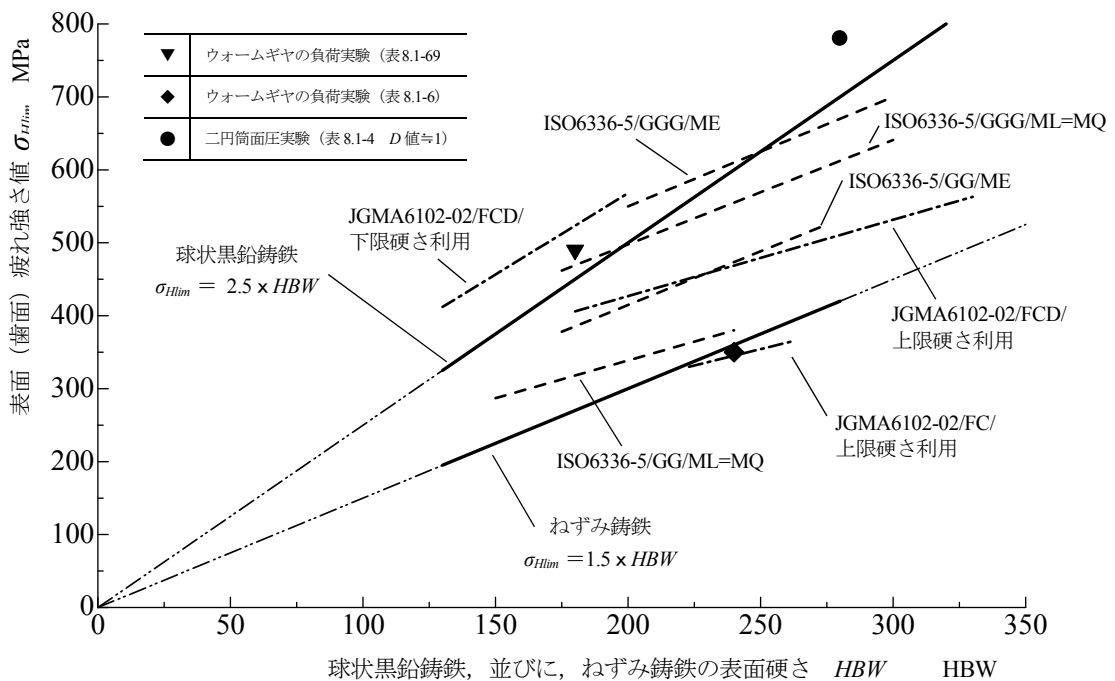


図 8.1-5 球状黒鉛鋳鉄，並びに，ねずみ鋳鉄における表面硬さと表面疲れ強さ値との関係

8.1.6 基準ウォームギヤにおけるウォームホイール材の歯面疲れ強さ値（ピッチング強さ）

基準ウォームギヤにおけるウォームホイール材の歯面疲れ強さ値（ピッチング強さ） σ_{Hlim} は、これまで考察した以上の結果から、次項の歯面（表面）硬さ HBW との関係式で推算できる。

銅合金鋳物（60～230 HBW）の場合、ウォームに歯面を硬く滑らかにした合金鋼等の鋼を用いて

$$\sigma_{Hlim} = 4.2 \times HBW \quad [\text{MPa (N/mm}^2)] \quad (8.1-1) \text{ 式}$$

球状黒鉛鋳鉄（130～330HBW）の場合、ウォームに歯面を硬く滑らかにした合金鋼等の鋼、あるいは、球状黒鉛鋳鉄を用いて

$$\sigma_{Hlim} = 2.5 \times HBW \quad [\text{MPa (N/mm}^2)] \quad (8.1-2) \text{ 式}$$

ねずみ鋳鉄（130～280HBW）の場合、ウォームに歯面を硬く滑らかにした合金鋼等の鋼、あるいは、ねずみ鋳鉄を用いて

$$\sigma_{Hlim} = 1.5 \times HBW \quad [\text{MPa (N/mm}^2)] \quad (8.1-3) \text{ 式}$$

ここで、ウォームホイール材の歯面疲れ強さ値（ピッチング強さ）は、25000 時間でウォームホイール歯面のピッチング面積率 約 50%を許容する限界の接触応力で、正確な値は、基準ウォームギヤを用いた実機の負荷実験が必要であり、硬さのみでなく材料成分・加工硬化性・なじみなども影響すること、ウォーム材との組合せによってピットの発生前に摩耗や焼付きの生じる場合のあること、歯面間に油膜が良好に形成されるように用いる潤滑油の種類と油温を決めることなど⁽³⁾の注意が必要である。なお、ここで(8.1-1)式～(8.1-3)式で推算される各種鋳物の歯面疲れ強さ値 σ_{Hlim} は、定義がISO/TR 14521 (2010)におけるピッチング強さ（Pitting strength） σ_{HlimT} 、並びに、JGMA 4301-01 (2017)における基準限界接触応力 σ_{HlimT} と同一であり、これらの規格で利用できる。

8.1.7 ウォームギヤの強さ計算式における特徴

表8.1-7に、これまでに公表されているウォームギヤの強さ計算式^{(8) (17)～(21)}における特徴を示す。ここで、表8.1-7において、○部分は、取扱われている項目で、空欄部分は、確認が必要である。

表 8.1-7 ウォームギヤの強さ計算式における特徴

強さ計算式		歯の折損	歯面損傷			ウォーム軸のたわみ	温度限界
			摩耗	ピッチング	スカuffing		
規格式等	対象歯車	曲げ強さ， 歯元のせん断強さ	歯面強さ		スコ어링強さ		
			耐摩耗	耐ピッチング	耐スコ어링		
JGMA 405-01 (1978) ⁽¹⁷⁾	ウォーム				○(焼付限界滑り速度)		
	ウォームホイール		○(歯面強さに対する許容応力係数)				
BS721:Part2: (1983:1983) ⁽¹⁸⁾	ウォーム	○(材料の曲げ応力係数)	○(材料の表面応力係数)				○(一部)
	ウォームホイール	○(材料の曲げ応力係数)	○(材料の表面応力係数)				
JSME (1994) ⁽¹⁹⁾	ウォーム				○(コメントあり)		○(一部)
	ウォームホイール	○(材料の曲げ応力係数)	○(材料の耐摩耗係数)				
ANSI/AGMA 6135-A02 (2008) ⁽²⁰⁾	ウォーム	○		○(コメントあり)			○(一部)
	ウォームホイール						
ISO/TR 14521 (2010) ⁽⁸⁾	ウォーム					○	○
	ウォームホイール	○(材料のせん断疲労限)	○	○(材料のピッチング強さ)			
JGMA 4301-01 (2017) ⁽²¹⁾	ウォーム				○(焼付限界滑り速度)	○(解説)	
	ウォームホイール	○(材料のせん断疲労限)	○	○(材料の基準限界接触応力)			

表8.1-7から、ウォームギヤの強さ計算式の場合、JGMA 405- 01（1978）では、歯面損傷に対して歯面の摩耗強さを取り扱っていること、BS721:Part2（1983）とJSME（1994）では、歯の折損に対して歯の曲げ強さを歯面損傷に対して歯面の摩耗強さを取り扱っていること、ISO/TR 14521（2010）とJGMA 4301- 01（2017）では、歯の折損に対して歯元のせん断強さを歯面損傷に対して歯面の摩耗強さとピッチング強さを取り扱っていることなどの特徴がわかる。なお、これらの特徴は、円筒歯車やかさ歯車の強さ計算式の場合、一般的に歯の疲れ折損に対して歯の曲げ強さ⁽²⁹⁾を、歯面疲れ（ピッチング）に対して歯面強さ⁽²⁷⁾を取り扱っていることと異なっている。

8.1.8 JGMA 4301- 01（2017）円筒ウォームギヤの強さ計算式の概要

(1) 適用範囲

表8.1-8に、円筒ウォームギヤの強さ計算式（JGMA 4301- 01（2017））⁽²¹⁾の適用範囲を示す。なお、本規格は、一般産業機械において動力伝達に使用する円筒ウォームギヤの強さ評価に適用される。

表8.1-8から、JGMA 405- 01（1978）⁽¹⁷⁾に比べて、すべり速度が25m/sで、ウォームの歯形がC形を含めて5種類になっていることなどがわかる。

(2) 強さの判定

表8.1-9に、ウォームホイールの損傷区分と安全率（設計の判断指標）を示す。なお、ウォーム軸のたわみと潤滑油の温度については、規格書の解説で取扱われている。

表8.1-9から、JGMA 405- 01（1978）におけるウォームギヤの寸法から歯面強さに対する許容負荷トルクを計算する方法、または、与えられた負荷トルクからそれに適するウォームギヤの寸法を決める方法と異なり、歯面のピッチング・歯面の摩耗・歯元のせん断折損の三つの損傷区分に対して、安全率を算出する方法を規定していることがわかる。

(3) 計算シート

JGMA 4301- 01（2017）では、ウォームギヤピッチング強さ計算シート・摩耗計算シート・歯元せん断折損計算シートが与えられ、必要なデータを入力すると設計の判断指標となるピッチング安全率 S_H ・歯面摩耗安全率 S_W ・歯元せん断折損安全率 S_{Fmin} をそれぞれ求めることができる（その他詳細については、規格書⁽²¹⁾参照）。

表 8.1-8 円筒ウォームギヤの強さ計算式（JGMA4301-01（2017））の適用範囲

項目	記号・単位	範囲
軸交差角	Σ °	90
歯数比	u	5~100
中心距離	a mm	50~500
軸方向モジュール	m_{x1} mm	1~25
滑り速度	v_g m/s	25 以下
ウォームの回転速度	n_1 min ⁻¹	5000 以下
ウォームの歯形		A 形, N 形, K 形, I 形, および C 形
ウォームホイールの歯形		ウォーム歯形に共役な歯形

表 8.1-9 ウォームホイールの損傷区分と安全率（設計の判断指標）

対象損傷	歯面のピッチング	歯面の摩耗	歯元のせん断折損
安全率 S (設計の判断指標)	安全率 $S = \frac{\text{設計対象歯車の強さ指標の限界値}}{\text{運転時の強さ評価指標の計算値}}$		
	$S_H = \frac{\sigma_{HG}}{\sigma_{Hm}} \geq S_{Hmin}$	$S_W = \frac{\delta_{Wlimn}}{\delta_{Wn}} \geq S_{Wmin}$	$S_F = \frac{\tau_{FG}}{\tau_F} \geq S_{Fmin}$
項目	σ_{Hm} : 歯面平均接触応力 σ_{HG} : 限界接触応力 S_{Hmin} : 最小ピッチング安全率	δ_{Wn} : 摩耗による歯厚減少量 δ_{Wlimn} : 限界歯厚減少量 S_{Wmin} : 最小歯面摩耗安全率	τ_F : 歯元せん断応力 τ_{FG} : 限界歯元せん断応力 S_{Fmin} : 最小歯元せん断折損安全率
最小安全率	購入・使用者と製造者の合意により決定	I, N, K, A 形の場合 1.1, C 形の場合 1.1 より高めの値)	1.1 以上
判定に必要な限界値	σ_{HlimT} : 基準限界接触応力 (標準実験などに基づく基準歯車における限界値)	δ_{Wlimn} : 限界歯厚減少量 (幾何学的に定める限界値)	τ_{FlimT} : 基準限界歯元せん断応力 (標準実験などに基づく基準歯車における限界値)

8.1.9 まとめ

ウォームギヤの損傷例・ウォームギヤの大きさと限界トルク・損傷に及ぼす影響因子などを調べるとともに、動力伝達用ウォームギヤで用いられる材料を紹介した。次に、実験等によるウォームホイール材の表面疲れ強さ値（ピッチング強さ）を考察・検討し、基準ウォームギヤにおけるウォームホイール材の歯面疲れ強さ値（ピッチング強さ）を歯面硬さから推算できる関係式を提案した。さらに、これまでのウォームギヤの強さ計算式における特徴を紹介し、三つの損傷区分に対して安全率を算出する方法の円筒ウォームギヤの強さ計算式を概説した。これらの調査研究の結果が、今後のウォームギヤの損傷対策と設計に対して何らかの指針になれば幸いである。

文献

- (1) たとえば、上野 拓 編著，“歯車工学”，（1977）， pp.2-5, pp.81-88, 共立出版。
- (2) たとえば、會田俊夫 監修，“< 歯車の設計・製作③ > 近畿歯車懇話会編 かさ歯車とウォームギヤ”，（1981）， pp.150-163, 大河出版。
- (3) たとえば、上野 拓，“ウォームギヤの潤滑と損傷”，潤滑，第20巻，第4号，（1975）， pp.234-241。
- (4) 日本機械学会，“歯車損傷図鑑”，（2006）， p.93, pp.110-111, p.169, p.145, pp.223-224, 丸善。
- (5) 日本機械学会，“技術資料 歯車強さの設計資料”，（1979）， p.(16), p.203, 日本機械学会。
- (6) B.R.HÖHN, K.MICHAELIS, B.RANK, K.STEINGRÖVER, “Investigation of The Pitting Resistance of Worm Gears”, Proceedings of The JSME International Conference on Motion and Power Transmissions (MPT 2001-Fukuoka), Vol. I, Across Fukuoka, JAPAN, (2001), pp. 156-161, (発行所日本機械学会)。
- (7) M. OCTRUE, “Load Capacity Calculation of Worm Gear” : At The Moment and for THE Future, Proceedings of The JSME International Conference on Motion and Power Transmissions (MPT 2009-Sendai), Matsushima Isles Resort, JAPAN, (2009), pp. 22-25, (発行所日本機械学会)。
- (8) ISO, ISO/TR 14521, “Gears — Calculation of Load Capacity of Worm Gears”, (2010), pp.1-90, ISO。
- (9) 日本工業規格，“機械構造用炭素鋼鋼材 JIS G4051-2009”，（2009）， pp.1-9, 日本規格協会。
- (10) 日本工業規格，“機械構造用合金鋼鋼材 JIS G4053-2008”，（2008）， pp.1-8, 日本規格協会。
- (11) 日本工業規格，“球状黒鉛鋳鉄品 JIS G5502-2001”，（2001）， pp.1-13, 日本規格協会。
- (12) 日本工業規格，“ねずみ鋳鉄品 JIS G5501-1995”，（1995）， pp.1-7, 日本規格協会。
- (13) 日本工業規格，“銅及び銅合金鋳物 JIS H5120-2016”，（2016）， pp.1-14, 日本規格協会。
- (14) 岩本吉造，中西 勉，星野道男，小林研一，“ウォームホイール用新材料の開発に関する研究（面圧強さに及ぼす材料の組み合わせの影響）”，日本機械学会講演論文集，No.918-2, (1991)， pp.232-235。
- (15) 上野 拓，有浦泰常，中西 勉，梅崎洋二，高橋良治，“球状黒鉛鋳鉄歯車に関する研究（第1報 中硬度歯車への適用）”，日本機械学会論文集（C 編），第51巻，第465号，（1985）， pp.985-991。
- (16) 山田高祐，上野 拓，“ウォームホイール材の歯面強さに関する研究—ピッチング強さについて—”，潤滑，第25巻，第10号，（1980）， pp.705-712。
- (17) 日本歯車工業会歯車規格委員会編，“JGMA 405-01 円筒ウォームギヤの強さ計算式”，（1978）， pp.1-30, 日本歯車工業会。
- (18) BS, BS 721:Part2, “British Standard Specification for Worm Gearing Part 2. Metric Units”，（1983）， pp.1-24, BS。
- (19) 日本機械学会，“e. ウォームギヤ”，機械工学便覧 応用編 B1 機械要素設計・トライボロジー”，（1994）， pp.B1-123-B1-126, 日本機械学会。
- (20) AGMA, ANSI/AGMA6135-A02, “American National Standard Design, Rating and Application of Industrial Globoidal Wormgearing (Metric Edition)”，（2008）， pp.1-45, AGMA。
- (21) 日本歯車工業会歯車規格委員会編，“JGMA 4301-01 円筒ウォームギヤの強さ計算式”，（2017）， pp.1-82, 日本歯車工業会。
- (22) For example, C. Lipson and C. J. Robert, “Chapter 7 Contact Stress, Handbook of Stress and Strength: Design and Materials Applications”, MacMillan (1963), pp. 43-67.
- (23) P. H. Dawson, “Effect of Metallic Contact on the Pitting of Lubricated Rolling Surfaces”, Journal of Mechanical Engineering Science, Vol.4, No.1, (1962), pp.16-21, Plates 1-4.
- (24) 日本工業規格，“製品の幾何特性仕様(GPS)—表面性状: 輪郭曲線方式—用語, 定義及び表面性状パラメータ”, JIS B0601-2013, (2013), pp.1-13, 日本規格協会。
- (25) 日本工業規格，“製品の幾何特性仕様(GPS)—表面性状: 輪郭曲線方式—表面性状評価の方法および手順”, JIS B0633-2001, (2001), pp.1-11, 日本規格協会。
- (26) D. Dowson, “Session3: Hertzian conditions, Paper 10, Elastohydrodynamics”, International Conference on Lubrication and Wear: Fundamentals and Application to Design, Proceedings of Institution of Mechanical Engineers, Vol.182, Pt3A (1967-68), pp.151-167.
- (27) 日本歯車工業会歯車規格委員会編，“JGMA 6102-02 (2009), 平歯車及びはすば歯車の歯面強さ計算式”, (2009), pp.1-29, pp.参1-4, pp.解1-42, 日本歯車工業会。
- (28) ISO, “ISO 6336-5 :Third edition 2016 (E), Calculation of Load Capacity of Spur and Helical Gears—Part5 : Strength and Quality of Materials”, (2016), pp.1-47, ISO。
- (29) 日本歯車工業会歯車規格委員会編，“JGMA 6101-02 (2007), 平歯車及びはすば歯車の曲げ強さ計算式”, (2007), pp.1-20, pp.参1-4, pp.解1-32, 日本歯車工業会。