

(研削歯車とホブ切り歯車を組合せた場合の負荷能力)

Manufacture and Performance of Cylindrical Gears

(Load-Carrying Capacity of Gear Pairs with a Combination of Ground Gear and Hobbed Gear)

○正 中西 勉 (宮崎大) 正 有浦 泰常 (九州大)

Tsutomu NAKANISHI, Miyazaki University, 1-1 Gakuenkibanadai-nishi, Miyazaki.
Yasutsune ARIURA, Kyushu University, 6-10-1 Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka.

The load-carrying capacity of medium-hardness gears was investigated from the viewpoint of gear-manufacturing methods (hardness, gear accuracy and tooth surface roughness). First, the gear accuracies and tooth surface roughnesses of ground gears, hobbed gears and finish-hobbed gears were examined in detail. From the test results, it is found that the new finish-hob, which has many gashes and a positive rake angle, is useful for the improvement of gear accuracy and tooth surface roughness. Secondly, the surface durability of gear pairs with a combination of ground gear and hobbed gear (or finish-hobbed gear) was investigated by using a power circulating-type gear testing machine. The test results reveal that the pinion (ground gear) should be substantially harder than the gear (mating hobbed gear or finish-hobbed gear) in order to obtain higher load-carrying capacity of medium-hardness gears. And, it is clear that the finish-hobbed gears have many advantages in manufacturing and performance of hardened and tempered gears.

Key Words : Gear, Medium-Hardness Gear, Manufacture, Accuracy, Load-Carrying Capacity, Ground Gear, Hobbed Gear, Finish-Hobbed Gear, Hardness, Surface Roughness

1. まえがき

中・大形円筒歯車を対象に、著者らは中硬度(HB \approx 340)歯車の負荷能力に及ぼす影響因子および歯面仕上げ法などを検討してきた⁽¹⁾⁽²⁾。その結果、中硬度調質歯車については、歯面強さに歯面粗さが予想以上に影響を及ぼしていること、新しく開発した仕上げ専用ホブの適用が歯面強さの向上に寄与することなどを見出した。本報では、これらのことから中硬度調質歯車の加工と運転性能に関連させて、小歯車をホブ切り後研削仕上げ、大歯車をホブ切りの状態あるいは開発した仕上げ専用ホブによる仕上げホブ切りの状態で用いる場合を想定し、さらに小歯車と大歯車の歯面硬さの組合せも考慮の上それらの加工法と組合せた歯車対の負荷能力について、生産型ホブ盤・動力循環式歯車試験機などを用い考察・検討した。

2. 歯車対の加工法と精度・歯面粗さ

2.1 歯車諸元および材種 試験歯車対は平歯車でその諸元は、モジュール 6・歯数 21と31・圧力角 20°・歯幅15mm(24mm)と15mmである。また、歯車材には合金鋼のJIS SCM435を用い、各歯車は小歯車と大歯車の硬さの組合せを考慮して小歯車のほうをHB330~HB470、大歯車のほうをHB330程度になるように焼入れ焼もどしの熱処理を施した。

2.2 歯車の加工法 表1に普通ホブと開発した仕上げ専用ホブの諸元および切削条件を示す。小歯車・大歯車

ともにブランク加工後普通ホブを用いて半径方向の切込み量 9mm・4mm・0.8mmの3度切りを行った。次に、小歯車はすべて歯面粗さをできるだけ小さくする目的でインポリュートカッターグラインダーにより歯面研削仕上げを行い、

Table 1 Specifications of hobs and cutting conditions

	Hob	
	HSS hob	HSS finish-hob
Module	6	
Pressure angle	20°	
Number of threads	1 (Right hand)	
Outside diameter	115	
Rake angle	0°	15°
Number of gashes	12(straight)	18(straight)
Material	SKH 55	
Final-stage cutting condition		
	Hobbing	Finish-hobbing
Cutting speed	23 m/min	
Feed	0.83 mm/rev	
Hobbing method	Conventional	
Cutting stock *	0.3 mm	0.15 mm
Cutting oil	Inactive chlorinated fatty oil	
Hobbing machine	KASHIFUJI KS-600	

* : Stock to be removed in final-stage cutting.

大歯車のいくつかは構成刃先を小さくする目的で切れ刃みぞ数を増しすくい角をつけた仕上げ専用ホブにより仕上げホブ切り(仕上げ代を小さくしてさらえ切り)を行った。

2.3 歯車の精度・歯面粗さ 研削小歯車とホブ切り大歯車および仕上げホブ切り大歯車の精度は、歯形誤差がほぼ JIS 0級と 4級および 2級、その他の誤差がいずれも 0~2級程度であった。また、歯面粗さについては、歯形方向最大高さで研削小歯車が $1\mu\text{mRmax}$ 程度、ホブ切り大歯車が $9\sim 13\mu\text{mRmax}$ 、仕上げホブ切り大歯車が $4\sim 5\mu\text{mRmax}$ であった。したがって、本実験でも仕上げホブ切り歯車はホブ切り歯車にくらべ、歯形精度が向上するとともに歯面粗さが約 $1/2\sim 1/3$ 程度となり、歯面が滑らかに仕上げられること⁽²⁾が再確認できた。

3. 歯車対の運転試験と負荷能力

3.1 歯車の組合せ 歯車の硬さの組合せは、大歯車 $\text{HB} \approx 320\sim 330$ に対し小歯車のほうを $\text{HB} \approx 330$ (硬さ差 $\Delta\text{HB} \approx 0$)、 $\text{HB} \approx 380$ ($\Delta\text{HB} \approx 50$)、 $\text{HB} \approx 410$ ($\Delta\text{HB} \approx 80$)、 $\text{HB} \approx 470$ ($\Delta\text{HB} \approx 150$) の 4種類とし、歯面仕上げの組合せは、研削小歯車とホブ切り大歯車および研削小歯車と仕上げホブ切り大歯車の 2種類とした。

3.2 試験機・潤滑油および実験方法 試験機には動力循環式歯車試験機(中心間距離 156mm ・歯数比 $31/21$ ・小

歯車回転数 1800rpm)を用いた。また、潤滑油には極圧添加剤の含まれていない ISO VG150 (比重 $288/277\text{k}$ 0.888 ・粘度 $153.9 \times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ (313k)、 $15.0 \times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ (373k))を用い、噴射潤滑 ($33 \times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ 、ノズル出口油温 313k)とした。なお、本実験条件における EHL 理論に基づくピッチ点での最小油膜厚さ $h_{\text{min}}^{(3)}$ は、ピッチ点での最大接触応力 $\sigma_H = 0.49\sim 0.98\text{GPa}$ のとき、 $2.0\sim 1.7\mu\text{m}$ (油温 313k)、 $0.4\sim 0.3\mu\text{m}$ (343k)程度となる。

実験では、それぞれの試験歯車対の運転試験を $\sigma_H = 0.49\sim 0.98\text{GPa}$ (最大接触応力と歯車の硬さとの比で ($0.15\sim 0.31$) HB kgf/mm^2) の範囲の設定荷重条件で行い、適時に歯車精度・歯面粗さ・ピットの大きさと数・歯面状態を測定・観察した。また、歯面状態については、微小硬度計・走査型電子顕微鏡などを用い詳細な検討を加えた。

3.3 実験結果 表2に実験条件および結果の概要を示す。また、図1と図2に運転後の代表的な歯面状態と繰返し数に対するピッチング面積率(全ピットの総面積を全作用歯面積で除した値)の変化を示す。これらの結果から、いずれの試験歯車対においても損傷形態としてはピッチング(歯面の疲労)で、その状況が実験条件で大きく異なっていることがわかる。すなわち、

(1) 研削小歯車とホブ切り大歯車の場合、硬さ差 $\Delta\text{HB} \approx 0$ (実験番号 [T-1] と [T-3]) のとき荷重条件 $\sigma_H = 0.49\sim 0.69$

Table 2 Experimental conditions and results

Test No.	T-1		T-2		T-3		T-4		T-5		T-6		T-7		T-8		
Pinion(P), Gear(G)	P	G	P	G	P	G	P	G	P	G	P	G	P	G	P	G	
Brinell hardness number HB	326	325	413	330	326	325	377	330	471	321	330	330	330	330	471	318	
Difference in hardness ΔHB	≈ 0		≈ 80		≈ 0		≈ 50		≈ 150		≈ 0		≈ 0		≈ 150		
Tooth surface-finishing method	(P):Grinding, (G):Hobbing										(P):Grinding, (G):Finish-hobbing						
Tooth surface roughness μmRmax	1	9	1	11	1	13	1	9	1	9	1	5	1	5	1	4	
Tooth profile error μm	4	17	5	16	4	22	8	16	5	21	4	11	4	10	5	10	
Max. Hertzian stress σ_H	GPa		0.49				0.69				0.98						
	kgf/mm^2		50				70				100						
	σ_H/HB		0.15	0.15	0.12	0.15	0.21	0.22	0.19	0.21	0.15	0.22	0.21	0.21	0.30	0.30	0.21
Cycles run in pinion N_1	10^7				2×10^6		10^7				10^8				10^7		
Pitting area ratio P_1, P_2 %	0.27	0.06	0.02	0.02	2.41	0.27	0.78	0.70	0.01	0.07	0.08	0.04	7.02	0.39	0.01	0.02	

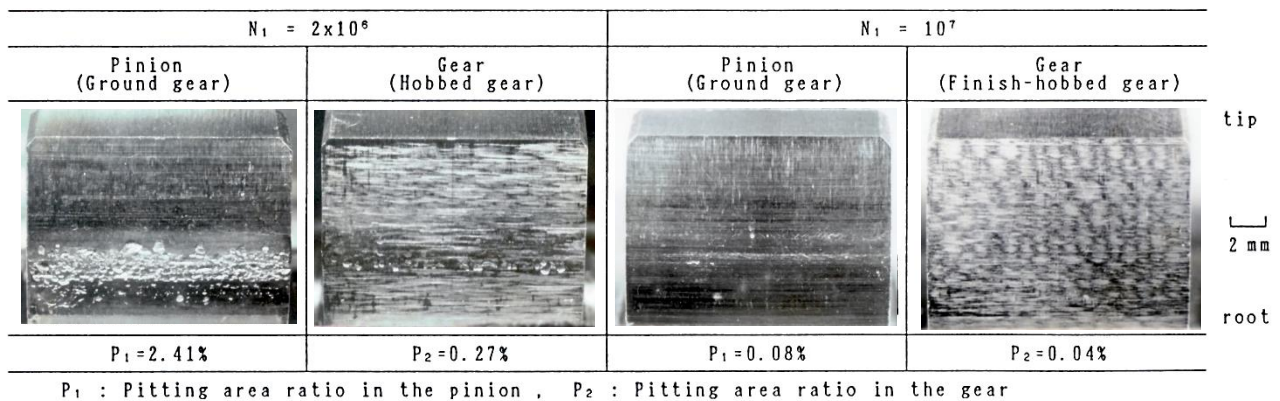
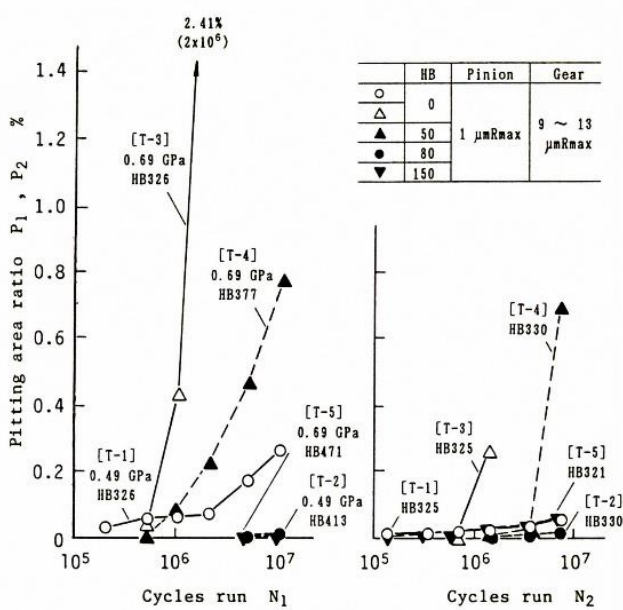
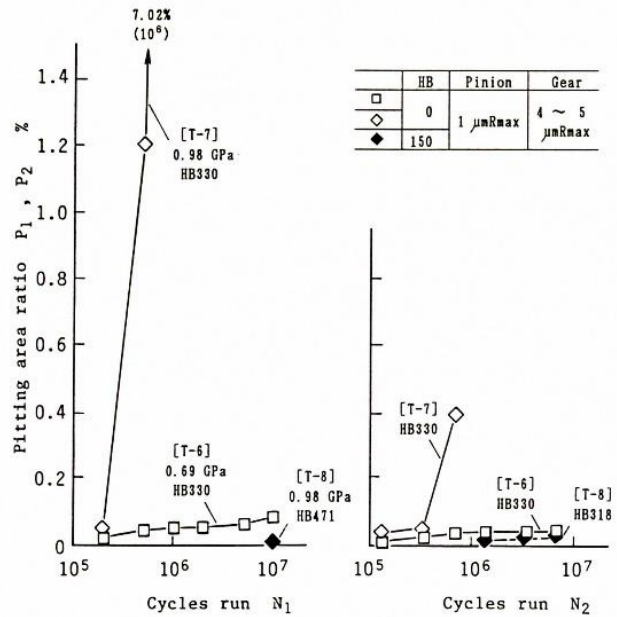


Fig. 1 Appearances of tooth surface after running ($\sigma_H = 0.69\text{GPa}$, $\Delta\text{HB} \approx 0$ [T-3] & $\Delta\text{HB} \approx 0$ [T-6])



(a) Pinion (Ground gear) (b) Gear (Hobbed gear)
Combination of ground gear and hobbed gear



(a) Pinion (Ground gear) (b) Gear (Finish-hobbed gear)
Combination of ground gear and finished-hobbed gear

Fig. 2 Changes of pitting area ratio with the number of stress cycles

GPaにおいて研削小歯車のほうがホブ切り大歯車にくらべピットの増加割合が著しいこと、一方、小歯車を硬くして組合せた $\Delta HB \approx 80$ ([T-2])のとき $\sigma_H = 0.49$ GPaにおいて小歯車・大歯車ともに(小歯車の)繰返し数 $N_1 = 10^7$ までピットはほとんど生じていないこと、また、 $\Delta HB \approx 50$ ([T-4])のとき $\sigma_H = 0.69$ GPaにおいて小歯車と大歯車のピットはほぼ同程度に生じ、 $\Delta HB \approx 150$ ([T-5])のとき同一荷重条件の $\sigma_H = 0.69$ GPaにもかかわらず小歯車・大歯車ともに繰返し数 $N_1 = 10^7$ までピットはほとんど生じていないこと、

(2) 研削小歯車と仕上げホブ切り大歯車の場合、 $\Delta HB \approx 0$ ([T-6]と[T-7])のとき $\sigma_H = 0.69$ GPaにくらべ荷重条件の高い $\sigma_H = 0.98$ GPaにおいて研削小歯車のピットが急増していること、一方、 $\Delta HB \approx 150$ ([T-8])のとき同一荷重条件の $\sigma_H = 0.98$ GPaにおいて小歯車・大歯車ともに繰返し数 $N_1 = 10^7$ までピットはほとんど生じていないこと、
がわかる。したがって、以上の結果から、研削小歯車とホブ切り大歯車あるいは研削小歯車と仕上げホブ切り大歯車を組合せて用いる場合、同一仕上げ歯車対の負荷能力の結果⁽⁴⁾と異なり、歯車対の負荷能力向上のために研削小歯車のほうを硬くしておく必要があることがわかった。

3.4 ピットの発生状況と歯面硬さの変化との関連

図3に研削小歯車とホブ切り大歯車の場合について、運転後のピッチ点付近の歯面(表面)近傍硬さ分布を示す。この結果から、同一荷重条件の $\sigma_H = 0.69$ GPaにおいて歯面近傍硬さの変化が歯車対の硬さの組合せ条件によって異なっているのがわかる。すなわち、

(1) 硬さ差 $\Delta HB \approx 0$ (実験番号[T-3])のとき研削小歯車においては負荷の少ない繰返し $N_1 = 2 \times 10^6$ でも歯面のごく近傍に著しい加工硬化が認められ、このことから滑らかな歯面のごく表面近傍が負荷の繰返しにより多大の被害を蓄積

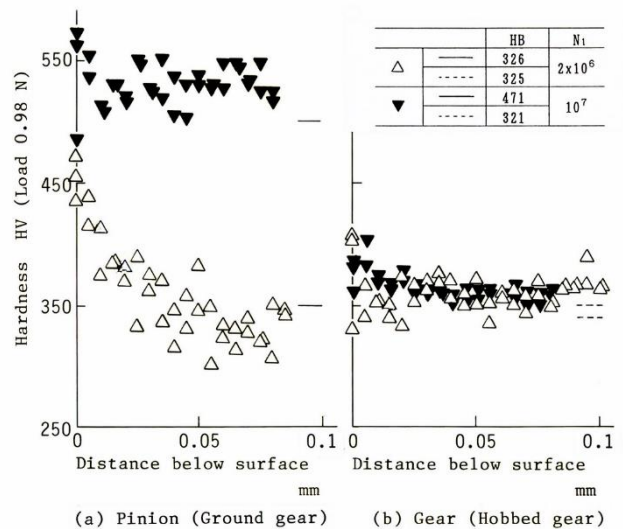


Fig. 3 Sectional hardness distribution after running (near the surface, $\sigma_H = 0.69$ GPa, $\Delta HB \approx 0$ [T-3] & $\Delta HB \approx 150$ [T-5])

しき裂発生の原因となりピットが多数生じたものと考えられること⁽⁵⁾、一方、ホブ切り大歯車においては、歯面近傍硬さの大きな変化は認められず小歯車にくらべピットも少ないこと、

(2) $\Delta HB \approx 150$ ([T-5])のとき繰返し数 $N_1 = 10^7$ まで研削小歯車・ホブ切り大歯車のいずれも歯面近傍硬さの大きな変化は認められず、このことから小歯車において歯面が初めから硬いため、表面の受ける被害の蓄積が少なくピット

HB		ΔHB	Method		$\mu m R_{max}$		N_1	%		Maximum Hertzian stress σ_H GPa					
(P)	(G)		(P)	(G)	(P)	(G)		P_1	P_2	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2
321	320	0	H	H	10	10	10 ⁷	0.02	0.06	[Bar chart showing stress distribution for 321/320]					
413	330	80	G	H	1	11		0.02	0.02	[Bar chart showing stress distribution for 413/330]					
471	321	150	G	H	1	9		0.01	0.07	[Bar chart showing stress distribution for 471/321]					
338	337	0	F.H	F.H	6	6		0.07	0.08	[Bar chart showing stress distribution for 338/337]					
330	330	0	G	F.H	1	5		0.08	0.04	[Bar chart showing stress distribution for 330/330]					
471	318	150	G	F.H	1	4		0.01	0.02	[Bar chart showing stress distribution for 471/318]					
331	332	0	G	G	1	1		0.04	0.09	[Bar chart showing stress distribution for 331/332]					

HB : Brinell hardness number , ΔHB : Difference in hardness , Method : Tooth surface-finishing method , $\mu m R_{max}$: Tooth surface roughness , N_1 : Cycles run in pinion , % : Pitting area ratio , (P) : Pinion , (G) : Gear , H : Hobbing , G : Grinding , F.H : Finish-hobbing , Suffix 1 & 2 : Pinion & gear .

Fig. 4 Influences of hardness and roughness on surface durability of medium-hardness gears

ほとんど生じなかったものと考えられること、
 がわかる。なお、研削小歯車と仕上げホブ切り大歯車について同一荷重条件 $\sigma_H = 0.98$ GPa の実験 $\Delta HB \approx 0$ ([T-7]) と $\Delta HB \approx 150$ ([T-8]) を同様に比較した結果でも歯面近傍硬さ分布の傾向は同じであった。また、これらの現象は筆者らの二円筒を用いた面圧基礎試験の結果⁽⁶⁾ や走査型電子顕微鏡を用いた歯面損傷の観測結果からも裏づけられることである。したがって、以上の結果から滑らかな歯面をもつ小歯車と粗い歯面をもつ大歯車を組合せて用いる場合、硬さの組合せおよび荷重条件によってはお互いの歯面で負荷の繰返しによる表面の受ける被害が異なり、特に同じ硬さの組合せの場合では滑らかな歯面のほうにピットが多数生じるためこの小歯車を硬くして耐ピッチング性能を増しておく必要があることがわかった。

4. 歯車対の組合せ条件による歯面強さの向上

図4に、これまでの結果^{(1) (7)}を含めて、歯車対における硬さおよび歯面仕上げの組合せ条件と繰返し数 $N_1 = 10^7$ までにピットのほとんど生じない状態 (ピッチング面積率では $P < 0.1\%$) の荷重条件との関係を示す。この結果から、中硬度調質歯車の領域で小歯車と大歯車の組合せ条件における歯面強さ (繰返し数 10^7 でピッチング面積率が 0.1% 以下となる許容最大接触応力 σ_{Hlim}) について、

(1) 硬さ差 $\Delta HB \approx 0$ のホブ切り小歯車とホブ切り大歯車の場合は $\sigma_{Hlim} = 0.34$ GPa になるのに対して、 $\Delta HB \approx 80$ と $\Delta HB \approx 150$ の研削小歯車とホブ切り大歯車の場合はそれぞれ $\sigma_{Hlim} = 0.49$ GPa と $\sigma_{Hlim} = 0.69$ GPa 付近と予想され接線荷重で約 2~4倍向上すること、

(2) $\Delta HB \approx 0$ の仕上げホブ切り小歯車と仕上げホブ切り大歯車の場合は $\sigma_{Hlim} = 0.49$ GPa に対して、研削小歯車と仕上げホブ切り大歯車の場合は $\Delta HB \approx 0$ のとき $\sigma_{Hlim} = 0.69$ GPa、 $\Delta HB \approx 150$ のとき $\sigma_{Hlim} = 0.98$ GPa 付近と予想され接線荷重で約 2~4倍向上し、 $\Delta HB \approx 0$ の最も歯面を滑らかに仕上げた研削歯車対の歯面強さに近づき、 $\Delta HB \approx 0$ のホブ切り歯車対とくらべると接線荷重で約 8倍向上すること、
 がわかる。したがって、中硬度調質歯車の加工と運転性能に関連させて小歯車を歯面研削仕上げ、大歯車をホブ切り加工のまま用いる際には、硬い研削小歯車と仕上げ専用ホ

ブにより仕上げホブ切りされた大歯車を組合せることで歯車対の歯面強さの向上が期待できると考える。

5. まとめ

中硬度調質歯車の生産性と負荷能力の向上の点から小歯車をホブ切り後研削仕上げ、大歯車をホブ切り状態あるいは仕上げホブ切り状態で用いる場合について、それらの加工法と精度・歯面粗さおよび運転試験と負荷能力を考察・検討した。その結果、

(1) 仕上げ専用ホブを用いた仕上げホブ切り歯車は、ホブ切り歯車にくらべ歯形精度が向上し特に歯面が滑らかなこと、

(2) 滑らかな歯面をもつ小歯車と粗い歯面をもつ大歯車を組合せて用いる場合、歯車対の負荷能力向上のためには滑らかな小歯車のほうを硬くして耐ピッチング性能を増しておく必要のあること、

(3) 適正な硬さ差を与えて組合せた研削小歯車とホブ切り大歯車あるいは研削小歯車と仕上げホブ切り大歯車の場合は歯面強さは、同じ硬さのホブ切り歯車対の歯面強さにくらべ接線荷重で 2倍以上に増加すること、
 がわかった。なお、特に大歯車の歯面を仕上げ専用ホブで仕上げホブ切りし、滑らかな歯面をもつ硬い小歯車と組合せた場合、その歯面強さの向上に対する効果はきわめて著しく、中硬度領域の歯車加工と運転性能に関連して注目できるものであると考える。

終わりにご協力・ご援助を賜った住友金属工業株式会社・三菱石油株式会社・アヅミ株式会社ならびに九州大学工学部機械系学科・宮崎大学分析センターおよび工学部機械系学科の各位に対し深く感謝の意を表す。

文 献

- (1)たとえば中西・有浦・上野, 機論, 52-483, C(1986), 2892.
- (2)有浦・中西・上野・奈良, 機論, 52-483, C(1986), 2899.
- (3)Dowson, D., Proc. Conf. Lubr. Wear, IME, (1967), 151.
- (4)中西・有浦・上野, 機論, 53-492, C(1987), 1829.
- (5)曾田・山本, 潤滑, 20-6(1974), 33.
- (6)扇谷・有浦・中西, 機論, 57-539, C(1991), 2390.
- (7)中西・有浦・上野, 機械の研究, 40-9(1988), 1013.