

ラック型工具による歯車の冷間転造

(しめつけ係数と工具押し込み部の形)

久野 精市郎

Cold-Rolling of Gears by Forming Racks (Tight Factor and Tapered Design of Tool Racks)

Seiichiro KUNO

転造工具の歯先はその押し込み位置に応じて素材の円ピッチとの差による力を受ける。この関係をしめつけ係数と定義した。つぎに工具片の破損実験により、一歯当りの押し込み量としめつけ係数に関する安全領域を求めた。また各押し込み位置で工具歯先に等しい力が加わるような、すなわちこの限界領域を満足するラック工具の押し込み部分(テーパ部の歯先曲線)の形を求めた。

1. まえがき

ラック型工具で歯車を転造する場合の工具押し込み部の形については、詳細は明らかでない。まず、ラック型工具で転造する場合のしめつけ係数の関係を求めた。つぎにこれと一歯当りの押し込み量を変数とし、ラック工具片による破損実験を試み、しめつけ係数と押し込み量の関係を求め、その安全な領域を示した。

また、この関係を満足する、すなわちしめつけ係数が大きくなるほど一歯当りの押し込み量が小さくなるようなラックの押し込み部分の歯先曲線の式を求め、その計算例を示した。

2. しめつけ係数

ラック型工具による転造の際のくい込みに作用するラックの歯先の部分は、相手の歯底ピッチの大きさに応じて、ピッチ線方向のしめつけ力を受ける。この力はラックの歯先の位置が素材のピッチ円付近では0になるが、それより歯底に近い部分ではピニオンの創成に伴って次第に大きくなる。

転造歯車の素材外径は製品外径より一般に小さく、またラックの押し込み部分で転造する場合は、すでに割り切りされているので、歯底の径が素材外径よりピッチ円になるまでのしめつけ量はさして問題にならない。またこの部分ではラックの歯丈も正規の部分より低く、丈夫である。

図1でラックのテーパ部分(押し込み部分)で転造する場合の歯底円半径を $r_r = 0q$ とすれば

$$\begin{aligned} \gamma_r &= \gamma_2 \cos \theta (1 + \tan \theta \tan \beta) = \gamma_3 \cos \theta (1 - \tan \theta \tan \beta) \\ \frac{\gamma_r}{\cos \theta} - \frac{2}{\pi} S &= (\gamma_3 - \gamma_2) \sin \theta \tan \beta \\ &= \frac{\gamma_r}{\cos \theta} \left\{ \frac{2 \tan \theta \tan \beta}{1 - \tan^2 \theta \tan^2 \beta} \right\} \sin \theta \tan \beta \\ &\doteq 2\gamma_r \tan^2 \theta \tan^2 \beta \\ \frac{PS + tr}{PS + tr} &= (2\gamma_r + \frac{2}{\pi} S - \frac{2}{\pi} S) \tan \theta \\ &\doteq 2\gamma_r (\tan \theta + \tan^3 \theta \tan^2 \beta) \doteq 2\gamma_r \tan \theta \end{aligned}$$

ただし $\theta = \pi/Z$

Z: ピニオンの歯数

β : ラックのテーパ角

したがって

$$\pi m = 2\gamma_r \tan \theta + R_e \quad \dots\dots\dots(1)$$

とし、この R_e をラック型工具で転造する場合の工具の“しめつけ量” Tight Value と名づける。また単位ピッチ当りのしめつけ量を

$$R_e / \pi m = R \quad \dots\dots\dots(2)$$

とし、この R をラック型工具で転造する場合の工具の“しめつけ係数” Tight Factor と名づける。

R_e または R が大きいほど、ラック工具の歯先には無理な力が加わる。

(1)より

$$R_e = \pi m \left\{ 1 - \frac{2\gamma_r}{\pi m} \tan \frac{\pi}{Z} \right\} \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$R = 1 - \frac{2\gamma_r}{\pi m} \tan \frac{\pi}{Z} \quad \dots\dots\dots(4)$$

3. 実験方法

素材は SNC21 の焼ならし材で、硬度は Hv260~270 である。その組成は表1に示す。

表1 素材の組成 %

素材径	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
46φ	0.13	0.21	0.43	0.023	0.019	0.21	2.30	0.34
55φ	0.16	0.35	0.53	0.024	0.020	0.15	2.12	0.33

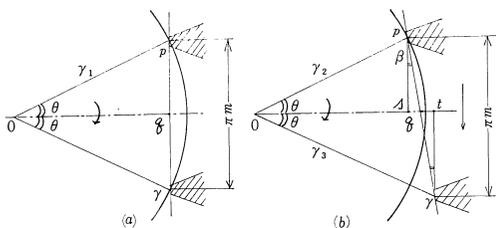


図1 ラック工具と素材

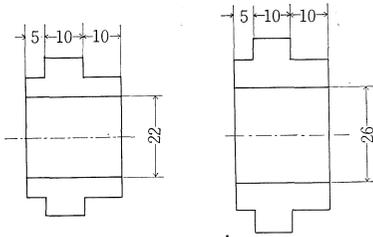


図2 素材の形

モジュールは 1, 1.25, 1.5, 2 ; 歯数は各2種とし、歯巾を10とした。これを図2に示す形に、計算外径⁽¹⁾の値に旋削した。

ラック工具の材質は SKD11とし、この形は図3に、組成は表2に示す。

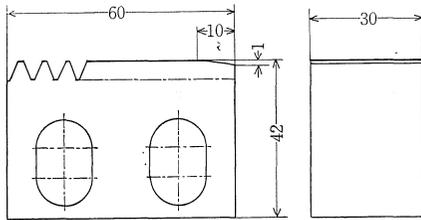


図3 ラック工具

表2 工具の組成 %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
1.47	0.06	0.34	0.019	0.004	11.70	1.00	0.26

これを歯切り後95°より油焼入れし、150°焼戻して硬度を HRC58~80 とした。全歯丈は2.25mで、歯末の丈を1.25m、歯元のたけを1mとした。

素材の各歯底円直径はつぎのようにした。基準の歯底円直径を $r_{r0} = (Z/2 - 1.25)m$ とすると最大しめつけ係数は

$$R_{max} = 1 - \frac{Z-2.5}{\pi} \tan \frac{\pi}{Z} \dots\dots(5)$$

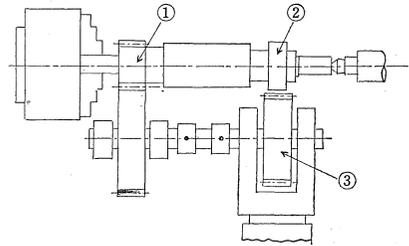
である。 $R_n = R_{max} \cdot n/4$ とし、 $n=1, 2, 3, 4$ とする。この場合の各 R_n に対する転造途中の各歯底円半径を r_{rn} とすれば(2), (4)より

$$2\gamma_{rn} = m \left\{ \pi \left(1 - \frac{n}{4} \right) \cot \frac{\pi}{Z} + \frac{n}{4} (Z-2.5) \right\} \dots\dots(6)$$

となる。この場合の各転造代は $\delta_1=0.2, \delta_2=0.4, \delta_3=0.6, \delta_4=0.8, \delta_5=1.0$ とした。

表3 歯底円直径 $2r_{rn}$ の値

n		1	2	3	4
	R/R_{max}	0.25	0.5	0.75	1.0
1m	40Z	39.31	38.71	38.10	37.50
	50Z	49.33	48.72	48.11	47.50
1.25m	32Z	39.12	38.37	37.62	36.88
	40Z	49.14	48.39	47.63	46.88
1.5m	27Z	39.43	38.53	37.64	36.75
	33Z	48.45	47.55	46.65	45.75
2m	21Z	40.51	39.34	38.17	37.00
	25Z	48.55	47.37	46.18	45.00



1.駆動歯車 2.素材 3.工具

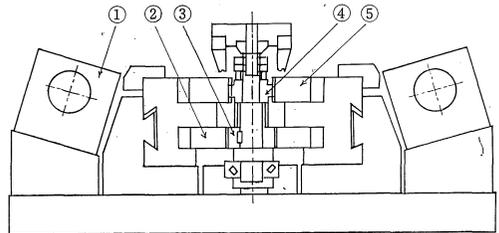
図4 ピニオン型転造装置

旋削後の素材を図4のピニオン型転造装置で予転造し、この歯みぞの両側に高さhのプリズムを入れ、その両端をマイクロメータで測定して歯底の直径を

$$\text{偶数歯 } 2\gamma_{rn} + 2\delta_n = \text{測定値} - 2h$$

$$\text{奇数歯 } 2\gamma_{rn} + 2\delta_n = (\text{測定値} - 2h) / \cos \frac{\pi}{2Z}$$

になるようにした。

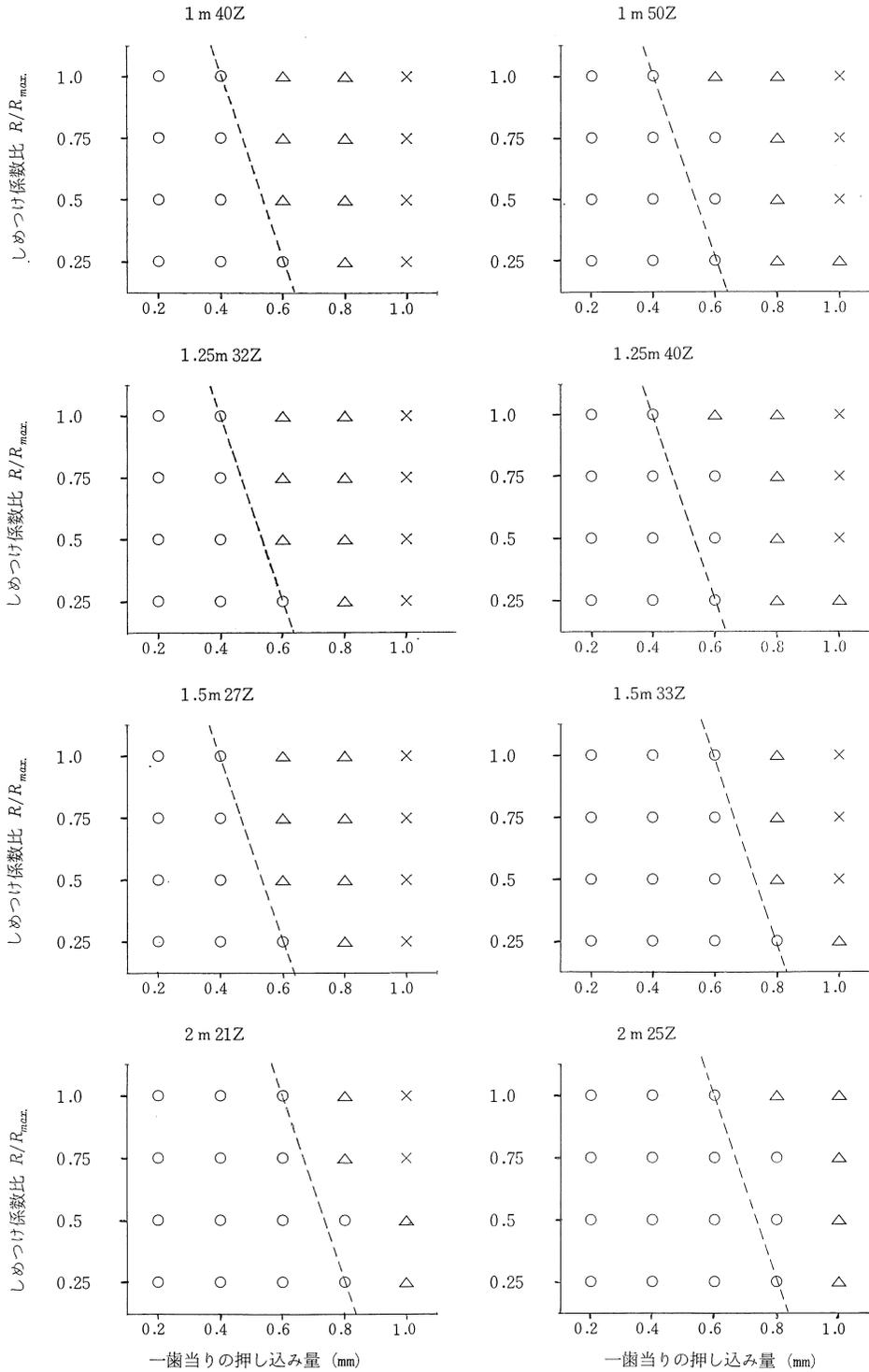


1.油圧シリンダ 2.連動ラック 3.ピニオン 4.転造素材 5.工具

図5 ラック型転造装置

これらの素材を図5のラック型転造装置に取り付け、両側に2個の工具片を付け、これを各々逆向きに油圧で送り、それぞれ δ_n の部分転造して転造後の歯底円直径を $2r_{rn}$ とした。転造には切削油は使用しなく、またその線速度は $0.8m/min$ に、最大転造推力は $2.5t$ に調整した。

4. 実験結果



○：円滑に転造可能 △：工具の一部に損傷 ×：工具に非常な破損
 R ：転造途中のしめつけ係数， R_{max} ：最大しめつけ係数

図6 ラック工具の破損状況

結果を図6に示す。実験は各項目について数回行い、そのうちで全て円滑に転造できたものを○、工具の一部に損傷のみられたものを△、非常に破損の激しいものは×印で示した。すなわち工具に異常がなく、転造が可能な範囲は図の○印の部分で、安全範囲は斜線より下の領域である。

これは 1m40, 50Z ; 1.25m32, 40Z ; 1.5m27Z ではしめつけ係数Rに対して

$$R = -3.75 \delta \cdot R_{max.} + 2.5R_{max.}$$

したがって

$$\delta \leq 0.66 - 0.267 \frac{R}{R_{max.}} \quad \text{-----(7)}$$

1.5m 33Z ; 2m21, 25Zでは

$$R = -3.75\delta \cdot R_{max.} + 3.25R_{max.}$$

$$\delta \leq 0.86 - 0.267 \frac{R}{R_{max.}} \quad \text{-----(8)}$$

となる。

転造の際にしめつけ係数が影響を及ぼすのはテーパの部分の歯がピッチ線より先に出る部分、すなわち歯末の部分である。ピッチ点付近では $R=0$ 、歯底では $R=R_{max.}$ であるから工具の歯先の部分の一歯当たりの押し込み量 δ は一般に

$$\delta \leq a - b \frac{R}{R_{max.}} \quad \text{-----(9)}$$

と表せる。ただし、 a : ラックの歯先がピッチ点に達したときの押し込み量; $a-b$: ラックのテーパ部終了部分の一歯当たりの押し込み量

5. テーパ部の形について

ラックのピッチ線とテーパ線（押し込み部の歯先線）の交点を原点として図7のように座標をとると、しめつけ係数Rはつぎのように表せる、

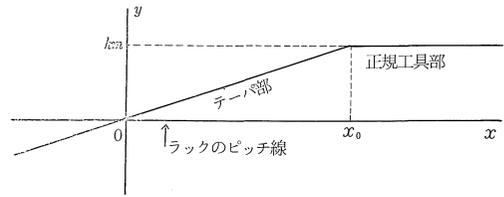


図7 テーパ部と座標

$$R = 1 - \frac{mZ - 2y}{\pi m} \tan \frac{\pi}{Z} \quad \text{-----(10)}$$

テーパ型のラック工具を2個使用する場合のラックの単位長さ当たりの高さは $2\delta/\pi mZ$ である。したがって

$$\frac{dy}{dx} = \frac{2C_1}{\pi mZ} \left(a - b \frac{R}{R_{max.}} \right) = C_1 (A - By) \quad \text{-----(11)}$$

ただし

$$A = \frac{2}{\pi mZ} \left\{ a - \frac{b}{R_{max.}} \left(1 - \frac{Z}{\pi} \tan \frac{\pi}{Z} \right) \right\} \quad \text{-----(12)}$$

$$B = \frac{2}{\pi mZ} \cdot \frac{2b}{\pi m R_{max.}} \tan \frac{\pi}{Z}$$

$$-\frac{1}{B} \log (A - By) = C_1 x + C_2$$

条件 $(0, 0)$, (x_0, km) より

$$y = \frac{A}{B} \left\{ 1 - \left(\frac{A}{A - kmB} \right)^{-\frac{x}{x_0}} \right\} \quad \text{-----(13)}$$

ただし、 x_0 : ラックのピッチ線と歯先線との交点よりテーパ終了部までの長さ、 km : ラックの歯末のたけ

各係数の値は

$$\frac{A}{B} = \left[\left(1 - \frac{a}{b} \right) \left\{ \frac{Z}{2} - \frac{\pi}{2 \tan \frac{\pi}{Z}} \right\} + k \cdot \frac{a}{b} \right] m$$

$$\frac{A}{A - kmB} = 1 + \frac{2kb}{\pi(a-b)} \times \frac{\tan \frac{\pi}{Z}}{R_{max.}} \quad \text{-----(14)}$$

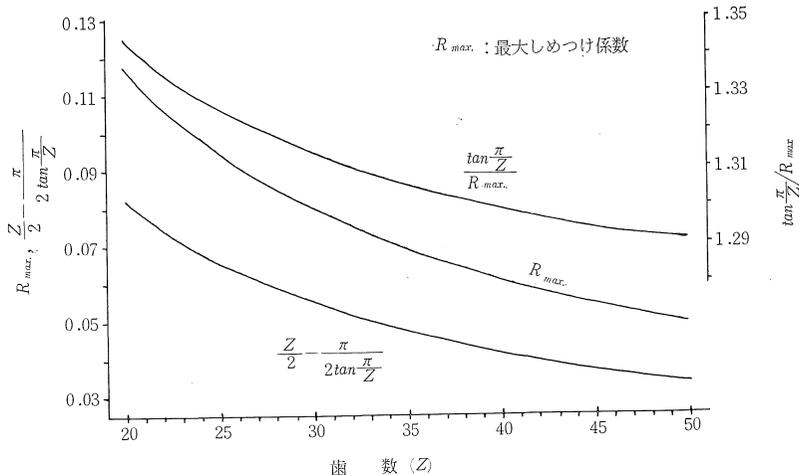
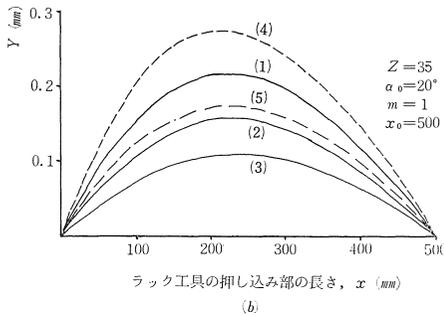
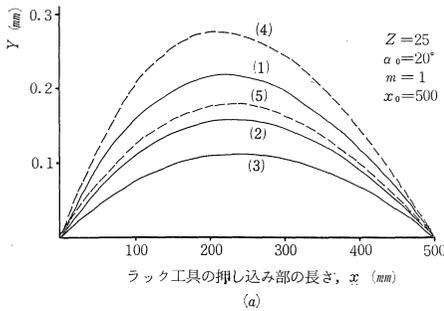


図8 各係数の値

(13), (14)の計算に使用する各係数の値を図8に示す。



Y : (0,0), (x₀,1.25m)を通る直線からの高さ
 (1) : C=0.4, d=0.1 (2) : C=0.4, d=0.15
 (3) : C=0.4, d=0.2 (4) : C=0.3, d=0.05
 (5) : C=0.3, d=0.1

c : 点(0,0)での一歯当りの押し込み量
 d : 点(x₀,1.25m)での一歯当りの押し込み量

図9 ラック工具の押し込み部の形 (計算例)

6. 計算例

図7において原点からx方向の最大長さをx₀=500とし、(13)式のyの値より点(0,0)、(x₀,1.25m)を通る直線の高さ(y座標の値)を引いた値をYとすれば

$$Y = y - 1.25mx/x_0 \quad \text{-----(15)}$$

と表せる、このxとYの関係を求めて図9に示した。

7. 結論

(1) ラック型工具で転造する場合の工具歯先にかかる力の関係を歯数Z、転造途中の歯底円半径r_rに対して

$$R = 1 - \frac{2\gamma_r}{\pi m} \tan \frac{\pi}{Z}, \quad R_e = \pi m R$$

として表し、Rをしめつけ係数、R_eをしめつけ量と名づけた。

(2) Rと一歯当りの押し込み量での工具に及ぼす各モジュール、歯数別の破損関係を求め、その安全範囲を示した。

最大のしめつけ係数R_{max}に対し、素材の各歯底位

置での一歯当たりの押し込み量δは

$$\delta \leq 0.66 - 0.27 \frac{R}{R_{max}}$$

である。

(3) 一般に素材のピッチ線の部分(R≐0)の部分の押し込み量a、基準歯底部分(R_{max}の部分)の押し込み量a-bに対して、転造途中の一歯当たりの押し込み量は

$$\delta \leq a - b \frac{R}{R_{max}}$$

である。

(4) ラックのピッチ線と歯先線との交点を原点とし、そこからの長さをx、歯の高さをyとすれば、ラックの押し込み部分の歯先曲線は

$$y = \alpha (1 - \beta^{-\gamma x})$$

の形で表される。

また、この式による計算例よりテーパ部分の形が明らかになった。

おわりに、この実験に際して工具の製作等で本学技術員春日井一男氏のお世話になった。厚くお礼申し上げます。

また、この論文をまとめるにあたり、詳細な御検討を頂き、貴重な御意見と御支援を賜れた東北大学の樋川武男教授に心からお礼申し上げます。

参考文献

- (1) 成瀬政男：歯車の塑性加工，養賢堂，1963。