

歯形形状と切りくずかみ込み状態

安部 達朗¹ ・ 福永 圭悟²

¹大分高専機械・環境システム工学専攻, ²機械工学科

ドライホブ切りは生産コスト低減や環境保護などの面から注目されている加工方法である。しかし、切粉のワークへのかみこみによる歯車精度悪化の品質低下が課題とされている。そこで、歯車歯形形状を数値的に解析し、ホブ切り時の理論的な切粉生成状況を明らかにした。次に、モジュール $m_n=1.75$ のホブを用いてドライホブ切りし、切りくず生成、飛散およびかみこみ状況を高速度カメラで確認した。この時、ドライホブ切り時のどの段階でワーク溝またはホブ溝に切りくずが詰まるかを明らかにした。さらに、ホブ盤メーカーである(株)カシフジ殿の話によると、ウェットカットよりもドライカットの方がスムーズに加工でき、切削抵抗が小さいように感じるということから、ドライカットおよびウェットカット時の切削抵抗を測定比較し、その関係を明らかにした。

キーワード：ドライカット，ウェットカット，切削抵抗，切粉挙動

1. 研究背景

自然環境保護とコスト削減のために切削油を使用しないドライホブ切りが注目を浴びている。一方、ドライカットにおける切粉かみこみによる歯車品質悪化が課題とされている。そのため、切粉挙動を確認することが切粉かみこみの問題解決において重要となる。また、切削抵抗を測定することで、ドライカットにおける最適切削条件を求めることができる。

2. 実験装置及び切削条件

本研究では、歯車のホブ切り加工状況を高速度カメラで撮影し、ドライカットにおける切粉飛散状況を観察すると共に、切粉のかみ込み状態を確認した。また、ウェットカットとドライカット時切削抵抗を測定した。実験にはカシフジ社製ホブ盤 KR-600 を使用した。KR-600 の概観を図 2.1 に、仕様を表 2.1 に示す。

高速度カメラでの切粉挙動撮影時に用いたホブ主要寸法はモジュール $m_n=1.75$ ，圧力角 $\alpha=20^\circ$ ，切り込み深さ $D+F=3.938\text{mm}$ ，進み角 $\beta=2^\circ 12'$ ， $TiAlN$ コーティングを施した超硬一口ホブである。また、切削力測定時に使用したホブの主要寸法はモジュール $m_n=1.75$ ，圧力角 $\alpha=20^\circ$ ，切り込み量 $D+F=3.938\text{mm}$ ，進み角 $\beta=3^\circ 19'$ ， $TiAlN$ コーティングを施した高速度鋼二口ホブを使用した。

切粉挙動確認に用いた被削材は直径 96mm，厚さ 30mm の JIS G4102 クロムモリブデン鋼鋼材 SCM420，切削抵抗測定に用いた被削材は直径 104mm，厚さ 40mm の JIS G4051 機械構造用炭素鋼鋼材 S45C であった。



図 2.1 KR-600 概観

表 2.1 KR-600 仕様

切削可能最大直径 [mm]	600
テーブル最大移動距離(左右)[mm]	340
ホブサドル最大移動距離(上下)[mm]	300
ホブ回転速度範囲[rpm]	64~200
ホブ回転速度変換数	6
垂直送り速度範囲(左右)[mm/rev]	0.25~3.0
送り速度変換数	9
主電動機[kW]	5.5

切削条件を表 2.2 に示す。各実験条件において、切り込み深さ $c=(2.25m_n)=3.938\text{mm}$ ，ワークねじれ角 10° は共通とし、切削抵抗測定はホブアーバに 2 軸法によって歪ゲージを貼り付けることにより行った。図 2.2 に切削抵抗測定の仕組みを、図 2.3 にひずみゲージ貼り付け図を示す。

表 2.2 切削条件

切削条件	(1)切粉挙動撮影	(2)切削抵抗測定
ホブ諸元	超硬合金 (刃数 $z=15$, モジュール $m=1.75$, 外形 $D=49\text{mm}$, 進み角 $2^\circ 12'$, 圧力角 $\alpha=20^\circ$)	高速度鋼(刃数 $z=12$, モジュール $m=1.75$, 外形 $D=65\text{mm}$, 進み角 $3^\circ 19'$, 圧力角 $\alpha=20^\circ$)
切削方法	コンベンショナルカット クライムカット	コンベンショナルカット
切削速度 $v(\text{m}/\text{min})$	15~35	32
回転速度 $N(\text{rev}/\text{min})$	100~200	160
垂直送り速度 $f(\text{mm}/\text{min})$	1.0, 2.0	1.0, 1.5, 2.0

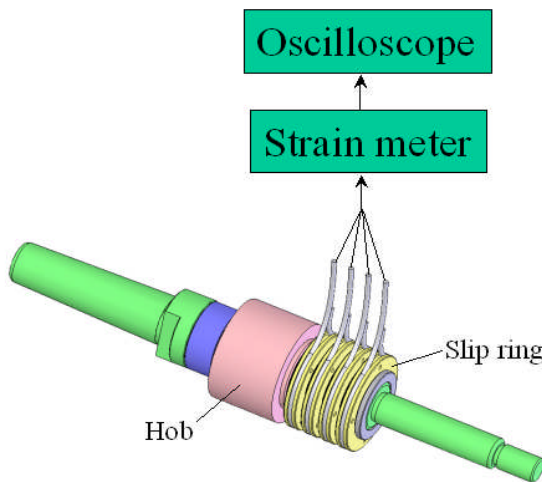


図 2.2 切削抵抗測定

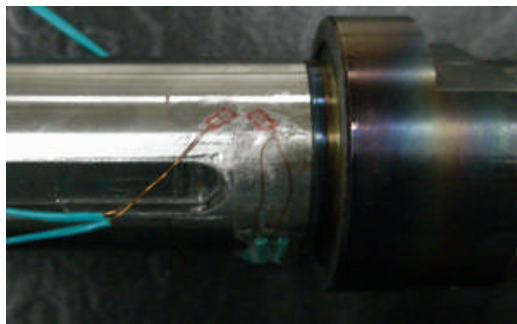


図 2.3 ひずみゲージ貼り付け図

よって座標点は次式で表される.

$$\begin{cases} x = OC \cdot \sin\theta = \frac{mz}{2} \cdot \frac{\cos\alpha_0}{\cos\alpha} \cdot \sin\theta \\ y = OC \cdot \cos\theta = \frac{mz}{2} \cdot \frac{\cos\alpha_0}{\cos\alpha} \cdot \cos\theta \end{cases}$$

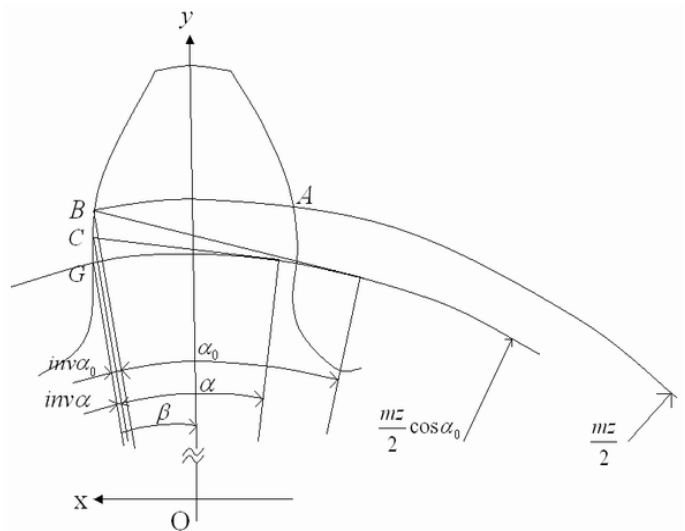


図 3.1 インボリュート曲線

3. 歯形数値解析

ホブ切り時の理論的な切粉生成状況を明らかにするために数値解析による歯形の作成を行った。

プログラムは歯先部, インボリュート曲線部さらに歯底すみ肉曲線(トロコイド曲線)部の 3 領域に分けて座標点として表すことで描かれるように作成した。

3.1 インボリュート曲線部

図 3.1 において

$$OC \cdot \cos\alpha = OB \cdot \cos\alpha_0$$

$$\therefore OC = \frac{mz}{2} \cdot \frac{\cos\alpha_0}{\cos\alpha}$$

3.2 歯底隅肉曲線部

図 3.3 における基準ラック刃先丸み中心 B は図 3.2 の破線のように ξ 軸について対称なトロコイド曲線を描く。

ξ 軸は基準ラック刃先丸み中心 B が歯車の中心に最も近づいた点 B_0 と歯車の中心 O を結んだ線である。 η 軸は ξ 軸に直交している。

ここで点 $B(\xi, \eta)$ の座標は

$$\begin{aligned} \xi &= OQ + CR - CT && \dots\dots(1) \\ &= OS \cos\varphi + CS \sin\varphi - CB \cos\varphi \\ &= \frac{mz}{2} \cos\varphi + \varphi \frac{mz}{2} \sin\varphi - (1 + k - e - x)m \cos\varphi \end{aligned}$$

$$\eta = SQ - SR - BT \quad \dots\dots(2)$$

$$= OS \sin \phi - CS \cos \phi - CB \sin \phi$$

$$= \frac{mz}{2} \sin \phi - \phi \frac{mz}{2} \cos \phi - (1+k-e-x)m \sin \phi$$

座標系 $\xi - \eta$ と歯の中心線 y 軸との角度 γ_0 の関係は $NA=ml'/2$ で計算できる. 図 3.3 の歯切りピッチ線は図 3.2 の半径 $d/2$ の円上をすべりなく転がるので

$$ml' = JK + 2KM \cdot \tan \alpha_0 + 2em \cdot \sec \alpha_0$$

$$= \frac{1}{2} \pi m + 2(1+k-e)m \cdot \tan \alpha_0 + 2em \cdot \sec \alpha_0$$

$$\gamma_0 = \frac{ml'}{2(d/2)} = \frac{l'}{z}$$

$$= \left\{ \frac{1}{2} \pi + 2(1+k-e) \tan \alpha_0 + 2e \sec \alpha_0 \right\} / z$$

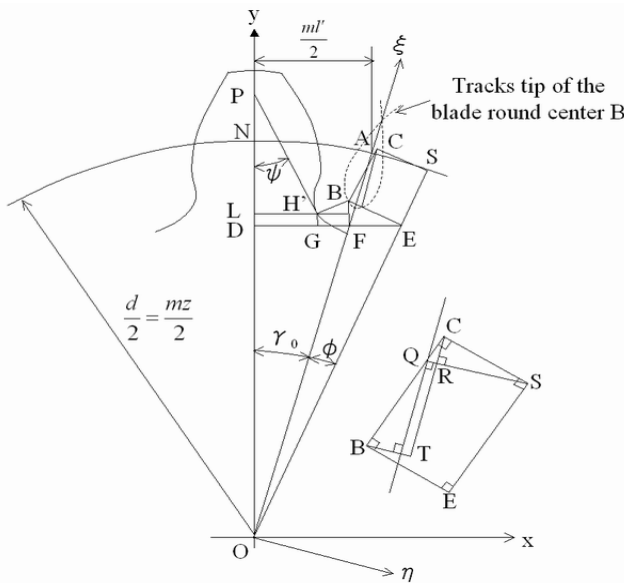


図 3.2 歯底隅肉曲線

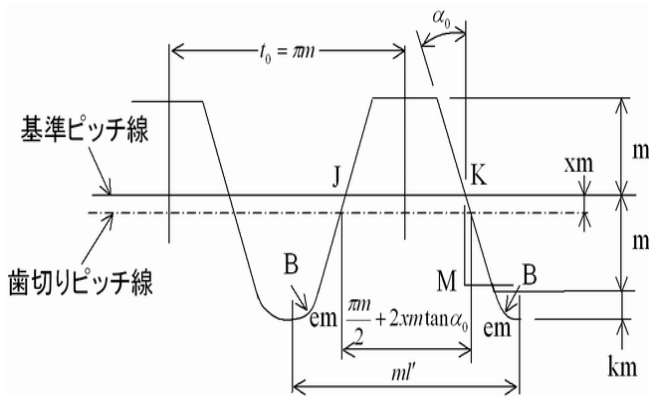


図 3.3 基準ラック

工具歯先円が歯車の隅肉曲線と接する点を H' とする. 点 H' での接線が y 軸となす角を ϕ とする.

点 B でのトロコイド曲線の接線は, 接線 PH' に平行でなければならない.

トロコイド曲線の接線は式(1), (2)を ϕ について微分して求められる.

$$\frac{d\xi}{d\phi} = \phi \frac{mz}{2} \cdot \cos \phi + (1+k-e-x)m \cdot \sin \phi$$

$$\frac{d\eta}{d\phi} = \phi \frac{mz}{2} \cdot \sin \phi - (1+k-e-x)m \cdot \cos \phi$$

トロコイド曲線の勾配 η' は

$$\eta' = \frac{d\eta}{d\phi} \cdot \frac{d\phi}{d\xi} = \frac{z \cdot \phi \tan \phi - 2(1+k-e-x)}{z \cdot \phi + 2(1+k-e-x) \tan \phi}$$

接線 PH' の勾配は

$$\eta'_\phi = -\tan(\phi + \gamma_0)$$

従って

$$\frac{z\phi \tan \phi - 2(1+k-e-x)}{z\phi + 2(1+k-e-x) \tan \phi} = -\tan(\phi + \gamma_0)$$

これを書き換えると

$$1+k-e-x = \frac{z\phi}{2} \cdot \frac{\tan \phi + \tan(\phi + \gamma_0)}{1 - \tan \phi \cdot \tan(\phi + \gamma_0)}$$

$$= \phi \frac{z}{2} \tan(\phi + \gamma_0 + \phi)$$

よって

$$\phi = -\left(\frac{1}{2} + \frac{1+k-e-x}{z} \right) \cdot \tan(\phi + \gamma_0)$$

$$+ \sqrt{\left(\frac{1}{2} + \frac{1+k-e-x}{z} \right)^2 \tan^2(\phi + \gamma_0) + 2 \frac{1+k-e-x}{z}}$$

したがって点 $H(x, y)$ の座標は次のようになる.

$$x = ED - EF - FG$$

$$= \left\{ \frac{d}{2} - (1+k-e-x)m \right\} \sin(\gamma_0 + \phi)$$

$$- \frac{d}{2} \phi \cdot \cos(\gamma_0 + \phi) - em \cos \phi$$

$$y = OA - BF - BH' \sin \phi$$

$$= \left\{ \frac{d}{2} - (1+k-e-x)m \right\} \cos(\gamma_0 + \phi)$$

$$+ \frac{d}{2} \phi \cdot \sin(\gamma_0 + \phi) - em \sin \phi$$

歯車諸元を入力することで歯形が作成されるプログラムを作成した。図3.4に数値解析によって描かれた歯形を示す。(歯車諸元はモジュール $m=6$ 、歯数 $z=26$ 枚、工具刃先丸み半径 $e=3.75\text{mm}$ 、転位なし、頂げき係数 $k=0.25$ 、工具圧力角 $\alpha=20^\circ$ であった。)

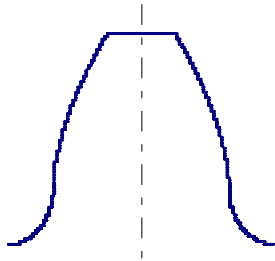


図3.4 数値解析による歯形

4. 切粉挙動確認

4.1 切粉溶着およびかみ込み頻度

高速度カメラで撮影した映像から切粉の溶着および、かみこみ頻度を調べた。表4.1に切粉溶着および、かみこみ頻度を示す。コンベンショナルカットは回転速度(切削速度)が速くなると溶着した切粉のかみ込む確率が10~20%高くなっており、垂直送り速度が速くなると、かみ込む確率が約20%低くなっていることが分かる。また、切粉溶着は回転速度や送り速度に関係なく発生していることが分かる。

表4.1 切粉かみこみと溶着頻度

回転速度・ 送り速度	コンベンショナルカット	
	切粉溶着	切粉かみこみ
100r/min・1mm	8	4 (50.0%)
100r/min・2mm	13	4 (30.8%)
200r/min・1mm	13	9 (69.2%)
200r/min・2mm	10	4 (40.0%)

4.2 切粉かみ込み過程

切粉かみ込み発生までの過程を調べた。コンベンショナルホブ切り時の切粉かみ込みは、ホブ切り刃すくい面に溶着した切粉が回転して再びワークを切削するときにワーク溝側に巻き込まれることで発生することが分かった。図4.1, 4.2にコンベンショナルカットにおけるホブ・ワーク間隙間を示す。図4.1から分かるように、一定時間切削すると切り粉が入り込む隙間(歯溝)が発生し、切粉がかみこみ、歯面を傷つけると考えられる。

図4.3, 4.4にクライムカットの切粉挙動の様子を示す。図4.3より、クライムカットでは、切粉がホブとワーク間に巻き込まれるとき、ワーク溝側に切り粉が入り込む隙間がないため、ワーク溝に巻き込まれず、ホブ溝側に巻き込まれることが分かった。

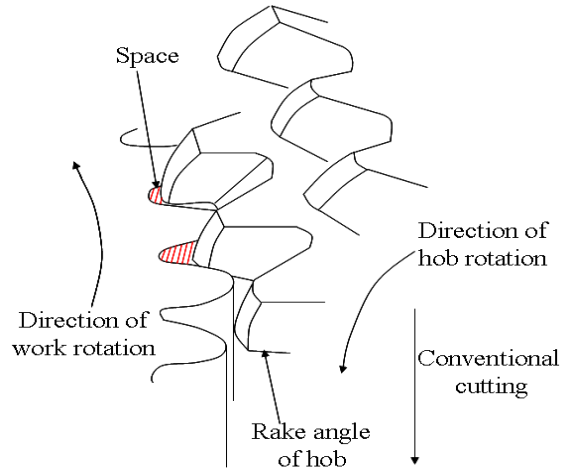


図4.1 コンベンショナルカットにおける切粉挙動



図4.2 コンベンショナルカットによる切粉挙動(写真)

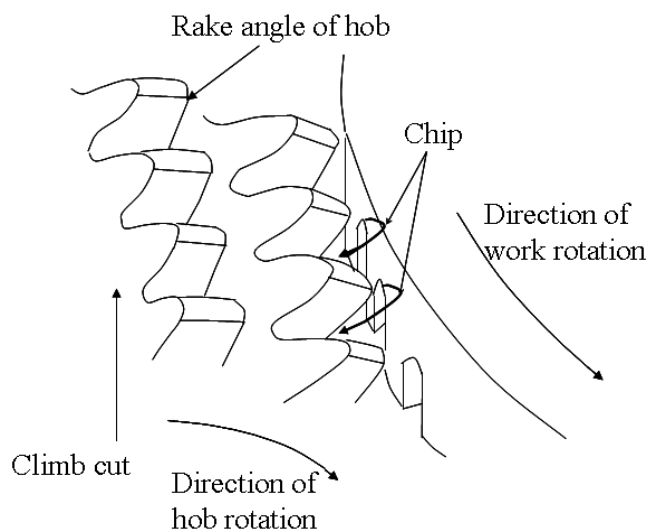


図4.3 クライムカットにおける切粉挙動



図4.4 クライムカットによる切粉挙動

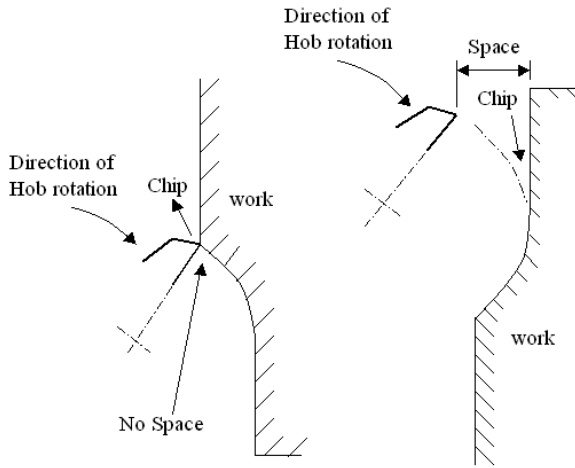


図4.5 切粉挙動

(左：クライムカット，右：コンベンショナルカット)

4.3 切粉かみこみの影響

図4.6と4.7はコンベンショナルカット時とクライムカット時の歯車への傷を示したものである。切粉がワーク溝側に入り込むすき間が発生するコンベンショナルカットは図4.5左図から分かるように切粉かみこみによる傷の影響が歯面に現れ、また、ワーク溝側にすき間の発生しないクライムカットでは弾かれた切粉がホブ溝側(ワーク外径部)に巻き込まれるため図4.7右図のようにワーク外径部に傷が現れることが分かった。



図4.6 歯車歯面損傷

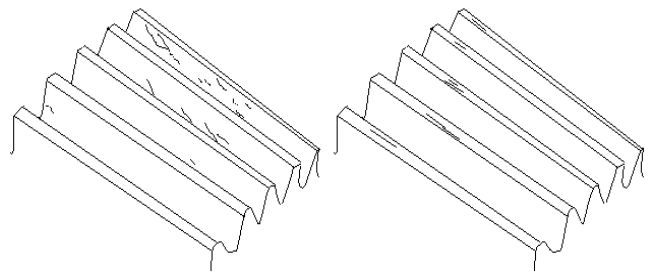


図4.7 切粉かみこみによる歯車への影響

5. 切削抵抗

ウェットカットとドライカットの切削抵抗を図5.1, 図5.2, 図5.3に示す。予想と反してドライカット時の方がウェットカット時と比べて切削抵抗が大きくなる傾向がみられた。また、送りが大きくなるにつれてドライカットとウェットカットの切削力の差は大きくなる。このことから送りが大きくなるほど切削油の効果が大きくなっていると考えられる。

ドライカット時の方がスムーズにホブ切りができるように感じる理由としては、コーティングと切削条件の組み合わせによってできる構成刃先であると考えられる。コーティングを施したホブでは、ドライカット時は構成刃先が構成され、ホブ切れ刃を保護する。しかし、ウェットカット時にはコーティングが施されていると切粉が流れていくことで構成刃先が生成されずにホブ刃で直接切削することになる。構成刃先に保護されたホブは寿命も長くなるため、長時間にわたってその性能を発揮するが、直接ホブ刃で切削したホブ刃は、ホブ切れ刃すくい面にクレータ磨耗が発生し、切削能力が低下してしまう。このことによりドライカットの方がスムーズに加工できるように感じたのではないかと推定する。

切削力はドライカット時に最大約200kgfの荷重がかかり、ウェットカット時に約130kgfの荷重がかかっていることが分かった。ところどころに見られる大きい電圧はスリップリングの接触面の振動によるノイズであると考えられるので考慮しなかった。

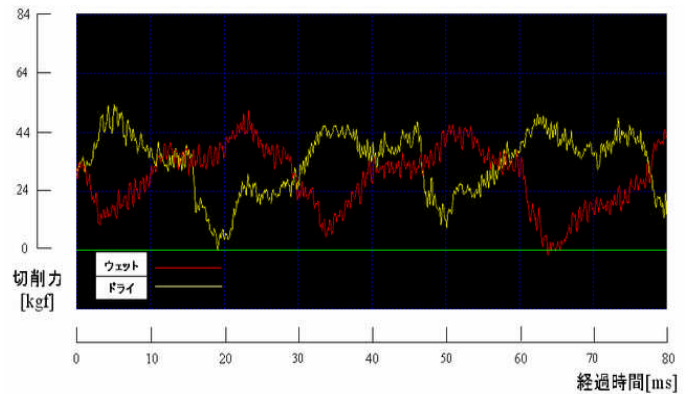


図5.1 切削抵抗比較(垂直送り 1.0 mm)

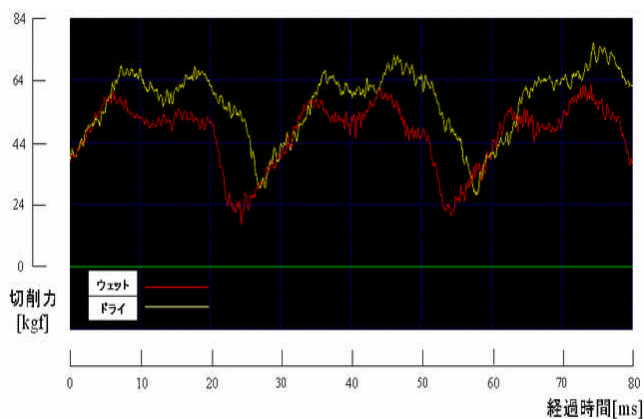


図 5.2 切削抵抗比較(垂直送り 1.5 mm)

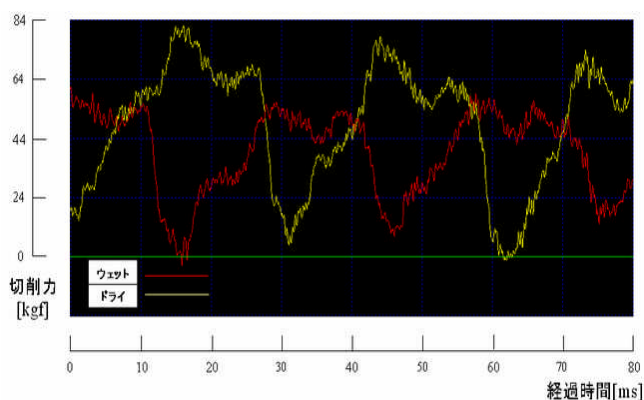


図 5.3 切削抵抗比較(垂直送り 2.0 mm)

6. 結論

本研究では、ホブ盤によるドライホブ切りの高速度カメラによる撮影を行い、切削時の切粉かみこみ状況を確認すること、ドライカットとウェットカットの切削抵抗の比較を目的とした。切粉挙動を撮影する実験では、刃数 $z=15$ 枚、モジュール $m_n=1.75$ 、外径 $D=49\text{mm}$ 、進み角 $2^\circ 12'$ の TiAlN コーティング超硬ホブを用いてホブ切りを行った。被削材は SCM420 である。切削条件はコンベンショナルカット又はクライムカット、切削速度 $v=16\text{--}32\text{m/min}$ (回転速度 $N=100\text{--}200\text{r/min}$)、垂直送り速度 $f=1\text{--}2\text{mm/rev}$ とした。

切削抵抗測定実験では、刃数 $z=12$ 枚、モジュール $m_n=1.75$ 、外径 $D=65\text{mm}$ 、進み角 $3^\circ 19'$ の TiAlN コーティング高速度鋼ホブを用いてホブ切りを行った。被削材は S45C である。切削条件はコンベンショナルカット、切削速度 $v=32\text{m/min}$ (回転数 160rev/min)、垂直送り速度 $f=1.5\text{mm/rev}$ であった。

本研究で得られた主な結果を以下に示す。

(1) 切粉かみ込みによる傷は、コンベンショナルカットでは、切粉がワーク溝側に巻き込まれるため歯面に現れ、ク

ライムカットでは、ホブ溝側に切粉が巻き込まれるため歯車外径部に現れる。

(2) コンベンショナルカットでは回転速度または、送り速度の変化による切粉溶着・かみこみ頻度の変化が確認できた。回転速度が速くなると、溶着した切粉のかみ込む確率は $10\text{--}20\%$ 程度高くなる。また、送り速度が速くなると、切粉のかみ込む確率が約 20% 低くなる。これは、回転速度が速くなると切削時に発生する熱が大きくなるためであると考えられ、送り速度が速くなると一度にホブ刃が削る切粉が大きくなるため、大きい切粉はかみこまれずに弾かれるためであると思われる。

(3) ドライカットの切削抵抗はウェットカットに対して大きくなる。また、送り速度が速くなるにつれてウェットカットとドライカットの切削抵抗の差は大きくなる。これより、送り速度が速くなる程切削油の効果が大きくなることが分かる。送り 2.0mm 時の切削抵抗はドライカット時に最大約 80kgf であり、ウェットカット時に最大約 65kgf であった。

(4) ホブコーティングの種類と潤滑状況との組み合わせによってできる構成刃先によりホブ刃すくい面が保護される。ホブ切れ刃を保護することでクレータ磨耗を防ぎ、長期間にわたりホブの性能が低下することなく切削加工できる。

謝辞：本紀要は、著者の一人が大分高専機械工学科卒業研究において行った「ドライカットによる切粉挙動」についてまとめたものである。工具および材料供給をいただいた九州精密工業株式会社ならびに鈴木工機株式会社の方々、また、2週間にわたりホブ切り技術を教えていただいたカシフジ株式会社の皆様、さらに、本研究を進めるにあたり、貴重な実験装置を提供して下さった井上俊様には大変感謝しております。機械工学科での生活を共にした学生の皆様、全ての方に心より感謝の意を表します。本当にありがとうございました。

参考文献

- 1) 藪・伊藤：数値計算法，コロナ社(2002)， p.16
- 2) 塚本・金丸：平歯車の曲げ強度計算式における歯形係数
- 3) 米倉将隆，ホブの変遷を見つめて，歯車の次世代加工技術と運転性能に関する調査研究分科会研究成果報告書，(社)日本機械学会(2007)PP.17-18.
- 4) <http://www.asahi-nets.com/technology/etc.html>：朝日熱処理工業株式会社