

CBNホイールによるハイポイドギヤの仕上研削法

桜谷 興道・佐藤 一夫

1. はじめに

自動車の最終減速機構に使用されるハイポイドギヤは、騒音や振動が少なく滑らかなかみあい状態で動力を伝達することが要求される。自動車産業を中心とするハイポイドギヤの生産加工技術は、米国のグリーンソン社のシステムが広く採用されており、その用途、生産規模に応じて同社の機械が使用されている。ハイポイドギヤは歯切後に表面硬化熱処理が施されるが、この時発生する熱処理ひずみを修正するために焼入れ後の歯車仕上げが必要とされる。現在は、一對の歯車の歯当たりの改善を目的とするラッピング加工が主流となっているが、今後は歯当たり修正と同時にピッチ精度の向上をも実現できる高能率な仕上げ法の開発が切望される。

近年、高硬度の鉄系材料の精密加工にCBNホイールによる高精度、高能率研削が多大な実績を示しており、歯車についても研究開発が行われ、円筒歯車のCBN研削盤の発表事例はあるものの¹⁾、ハイポイドギヤのCBN研削盤は実用化に至っていない状況である。

今回、グリーンソン社の歯切盤をベース機として改造を加え、CBNホイールを使用したハイポイドギヤ研削盤が開発されたので、その研削性能と生産工程改革について概説する。

2. CBNホイールの研削性能

2-1 CBN砥粒の特性

立方晶窒化ほう素CBN (Cubic Boron Nitride) 砥粒は米国のGE社によって開発され、ダイヤモンドに次ぐ硬さを有し、物性も似ていることからダイヤモンドと共に超砥粒 (Superabrasive) と呼ばれている。表1に各種砥粒の基本的性質を示し、CBN砥粒の特性を述べる。

- (1) 耐摩耗性が高い。
- (2) 熱的に安定している。ダイヤモンドは700℃以上で酸化摩耗するに対して、CBNは1300℃までは軟化せず安定である。
- (3) 化学的に安定している。炭

表1 各種砥粒の物理的性質

	ヌーブ硬さ Kgf/mm ²	密度 g/cm ³	熱伝導率 W/m・K	圧縮強さ KN/mm ²
C B N 砥 粒	4700	3.48	1300	5
ダイヤモンド砥粒	7000	3.515	2000	9
アルミナ砥粒	2100	3.80	20	3

化物生成元素を含まないので鉄系材料に対して化学反応しない。

(4) 適度の破碎性を有し、砥粒の目つぶれがない。

これらの特性により、構造用鋼、高速度鋼、型鋼、鋳鉄などの鉄鋼材料の研削に有効である。

2-2 CBNホイールの研削性能

CBNホイールは、台金の周辺に数ミリのCBN砥粒層を持つ構造で、アルミナ系砥石などの一般砥石のように全体が砥粒で構成されるものとは構造的に異なる²⁾。図1はCBNホイールの研削性能と研削結果(目標)との相関関係を示す。CBNホイールの構成因子の適正な選択と使用法、そして研削盤周辺装置の組み合わせによって優秀な研削性能が得られる。

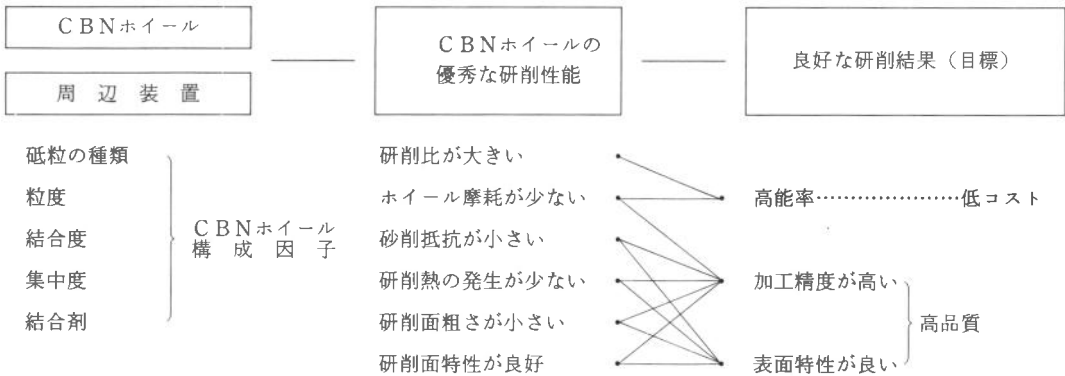


図1 CBNホイールの構成因子, 研削性能, 研削結果の関係

CBNホイールの研削性能は、高能率、高精度加工という観点で高い評価が与えられるが、更に大きな注目点は、表面特性(研削加工層の残留応力)に関するものである。最近の研究報告を要約すると次のようである³⁾⁴⁾。

- (1) 残留応力の生成は、研削抵抗によって表面では圧縮、内部では引張り、研削温度によっては、引張残留応力が支配的となる。また研削液によって研削加工層が熱衝撃的に冷却されると表面に圧縮、内部に引張残留応力を生成する。
- (2) 引張残留応力が增大するほど、耐摩耗性、疲労強度、き裂感受性、摩擦特性、時効ひずみなどに対して悪影響する。
- (3) 一般砥石で研削したときの表面残留応力は、一般に引張応力であるに対して、CBNホイールによる研削では圧縮応力となる。
- (4) 一般砥石で研削した場合は、表面付近で硬度が低下し、耐摩耗性は減少する。これに対して、CBNホイールで研削した場合は、表面硬度は低下しない。
- (5) 工作物の疲労強度は、一般砥石で研削したものよりも、CBNホイールで研削した場合の方が高くなる。

CBNホイールの研削性能の具体例として、図2は各種材料での研削比を、図3はクロム鋼カ

ムシャフトの研削性能を一般砥石の場合と比較したものである⁵⁾。

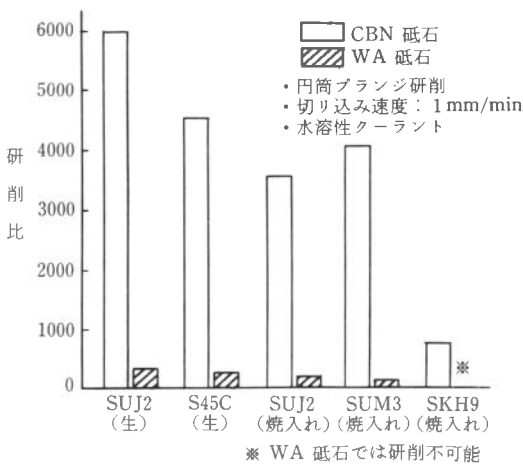


図2 各種工作材料に対する研削比

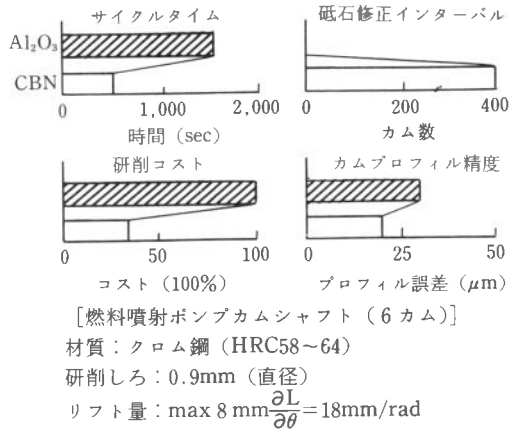


図3 クロム鋼カムシャフト研削におけるCBN砥石の研削性能

3. ハイポイドギヤの生産工程改革

ハイポイドギヤが、最終負荷時において最良の歯当たりとなるように、歯車生産の過程において常に作業管理することをグリーンソン社ではティペロップメント (Development) と称している。この技法を前提とするハイポイドギヤの生産工程の1例を図4に示し、CBNホイール歯車仕上研削法の生産工程と比較する。

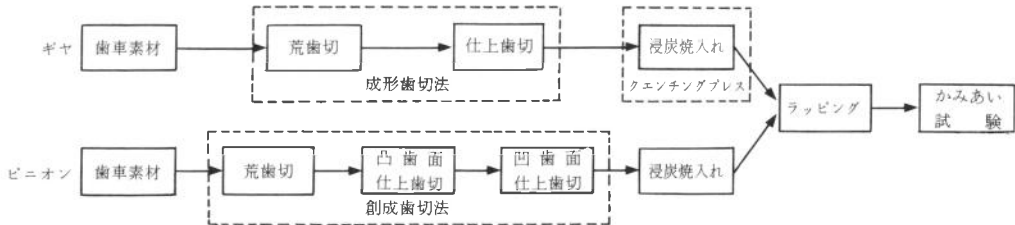


図4 ハイポイドギヤの生産工程例

このグリーンソンシステムの特徴は次の点にある。

- (1) ギヤを基準セッティングとして成形歯切りし、次にその歯面を基準にしてピニオンの歯面を熱処理ひずみ等を見込んで、創成法により片歯面ずつ歯切りする。
- (2) ギヤの焼入れひずみ量をできるだけ小さくするためにクエンチングプレスを使用する。
- (3) 焼入れ後、ラッピングにより一对の歯車の歯当たりを修正する。
- (4) かみあい試験機により、一对の歯車の歯当たりとバックラッシュを調べ、かみあい性能を確認すると同時に、最適かみあい位置を決定する。かみあい状態を変化させないために、ギヤとピニオンは必ず一对の組み合わせとして扱い、これを別別にして他の歯車と組み合わせる

ことはしない。

ハイポイドギヤを含めて、スパイラルベベルギヤを高精度に仕上げるためには、歯車研削法が有効と考えられ、これまでに研究開発が行われてはきたが、加工技術、砥石寿命、加工能率、経済性などの点で実用的でなかったため、航空機用歯車などの特例はあるものの、一般的には使用されず、ラッピング仕上げを主流としてきた。

CBNホイールの優秀な研削性能が、ハイポイドギヤの仕上げに効果的に発揮されるならば、図5に示すような工程改革が可能となり、比較上、多くの利点を期待できる。

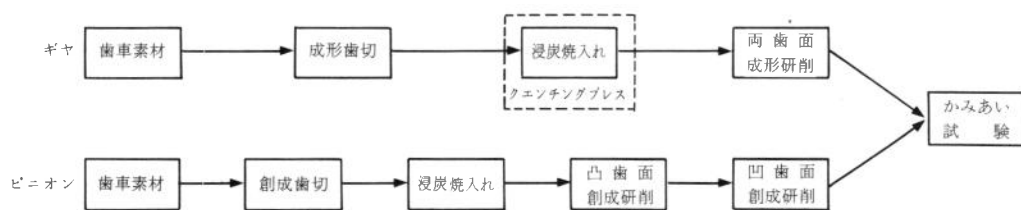


図5 ハイポイドギヤの生産工程改革

工程改革による利点

- (1) 工程短縮及び設備削減によるコスト低減
 仕上歯切盤，ラップ盤の廃止による加工時間の短縮と設備削減によりコストの低減が可能となる。
- (2) 精度向上
 熱処理後のひずみ除去修正が可能であるため，所定の歯面形状に仕上げ，安定した歯当たりと高精度ピッチの歯車を得る。
- (3) 部品の互換性
 ギヤとピニオンの精度が向上することにより，これらを必ずしも常に一對の組み合わせとして使用する必要性がなくなる。
- (4) 品位向上
 CBNホイールによる研削加工後の表面特性として，疲労強度，耐摩耗性が向上し，耐久性のある歯車となる。

4. CBNハイポイドギヤ研削盤の研削性能

4-1 CBNハイポイドギヤ研削盤の概要

本機の開発にあたり、ギヤは成形法(フォーマット)、ピニオンは創成法による歯車研削を前提とし、1台でいずれの加工も実現できる仕様とした。実際にはグリーンソン NO. 116型創成歯切盤をカタ軸と送り機構を各々独立したインバータモータに分割し、主軸構造を高速回転用に改

表2 CBNハイポイドギヤ研削盤の主仕様

最大加工歯車直径		324mm
最大歯車モジュール		12.7
研削代		0.2~0.5mm/回
主軸モータ	主力	5.5kW定出力型
	回転	1500~4500rpm
送りモータ		3.7kWギヤードモータ
クーラント	最高圧力	100kg/cm ²
	吐出量	30 l/min

造し、所要の研削速度を得るようにした。表2は本機の仕様を示し、ギヤはCBNホイールの内外円すい面が同時に両歯面をプランジ研削(成形)し、ピニオンはCBNホイールが仮想歯車を構成し、相手歯車とかみあうように片歯面ずつ研削(創成)する。図6はCBNホイールと加工

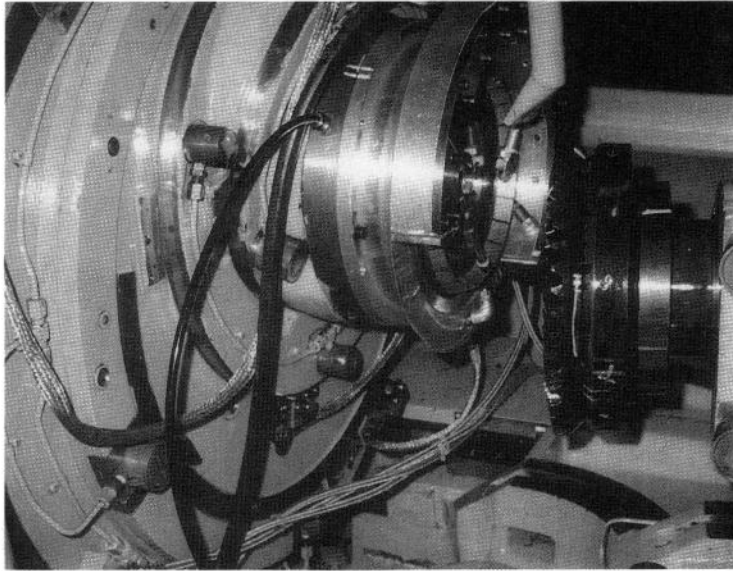


図6 CBNホイールと加工歯車

歯車の関係写真を示す。本機の歯車研削において、グリーンソン社の加工サマリーをそのまま利用できるので、機械のセッティングは従来の歯切盤と同じ要領で行える。

ハイポイドギヤの研削において、ホイール面と歯面とは互いに包みあうように接触するので接触弧が長くなり、研削点における研削抵抗や研削熱の増大を抑制する必要がある。

本機は高圧クーラントを採用し、研削液の冷却、洗浄、潤滑作用が充分発揮され、良好な仕上面精度と長いホイール寿命が得られるようになっている。図7は高圧クーラントの基本フローチャートを示す。ハイポイドギヤの歯面形状と仕上面精度の要求に応じて、適正なCBNホイールが選択されるが、本機においては電着CBNホイールがその強い砥粒保持力、大きな砥粒突出し量、形状のつくり易さという特徴によって採用された。しかし、電着CBNホイールは、ツルーイングやドレッシングによるホイール表面の修正が全く行われずに使用されるので、適正な砥粒突出し量と寸法形状をできる限り永く維持しなければならない。そのために常用圧力50~70kg/cm²の研削液をCBNホイールの回転方向と逆方法に噴射して、その表面を常時洗浄することにより目つまりを防止すると共に冷却作用により切れ味を安定させるのである。

4-2 加工精度

モジュール約8、歯数比11×43の浸炭焼入れされたハイポイドギヤとピニオン30個ずつを研削

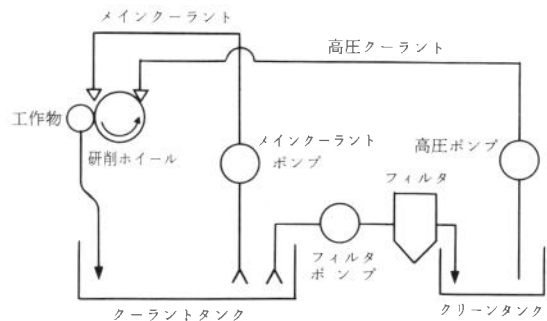


図7 高圧クーラントの基本フローチャート

速度1900~2100m/min, 不水溶性研削油を使用の条件下で加工し, 歯車ピッチ精度を JIS の分類に従い, 度数分布にした結果を表3に示す。ギヤ, ピニオン共単一ピッチ, 隣接ピッチが JIS 2 級に分布するものがあるが, 累積ピッチは JIS 0 ~ 1 級に分布しており, 任意のギヤとピニオンの組み合わせによるかみあい上の歯当りは JIS A 級に相当し, 本機によってピッチ精度と歯当たりの改善を同時に実現することができたといえる。

加工時間はギヤが13秒/歯, ピニオンが25秒/歯であり, カッタと工作物の位置関係に必要な割出し, 移動の時間を除く実研削時間は3~4秒/歯である。図8は本機によって加工されたハイポイドギヤ1組を示す写真である。

4-3 今後の課題

(1) 加工精度

ピッチ精度の度数分布が JIS 2 級に相当するものについては, 電着 CBN ホイールの選定, 研削条件の検討不足によるものと考えられるが, 最近開発されたウインドミル型 CBN ホイールが内面研削や輪郭形状研削に好評を得て普及し始めているので, ハイポイドギヤの研削にも応用できる可能性は高いと考えられ, 試作実験が望まれる。

(2) 加工能率

本機は1台で, ハイポイドギヤを創成研削と成形研削のいずれをも加工できる構造として汎用性を持たせたが, ある程度以上の量産ラインにおいては, 図5に示したようにギヤ専用とピニオン専用に分離する方が適切であると考えられる。また研削条件面では, 研削速度3600m/min 以上の高速研削⁶⁾⁷⁾によって CBN ホイールの寿命の増大, すなわち加工能率の向上と共に仕上面粗さの向上が同時に期待できる⁸⁾。そのためには主軸回転精度, 送り精度を高く維持できるための機械構造の検討や機械各部の剛性, 吸振性, 熱変位等についての検討が必要とされる。

5. おわりに

本機によって, 量産を目的とするハイポイドギヤの研削加工は, 改善すべき課題はあるものの実用化の段階に到達したと考える。本機の開発に続き, ハイポイドギヤのピッチ精度 JIS 0 級と

表3 加工歯車のピッチ精度度数分布

JIS 等級	歯面	ギヤ			ピニオン		
		単一	隣接	累積	単一	隣接	累積
2	凸	13	4	0	5	7	0
	凹	12	7	1	12	20	0
1	凸	16	20	23	17	17	1
	凹	17	20	24	15	8	5
0	凸	1	6	7	8	6	29
	凹	1	3	5	3	2	25

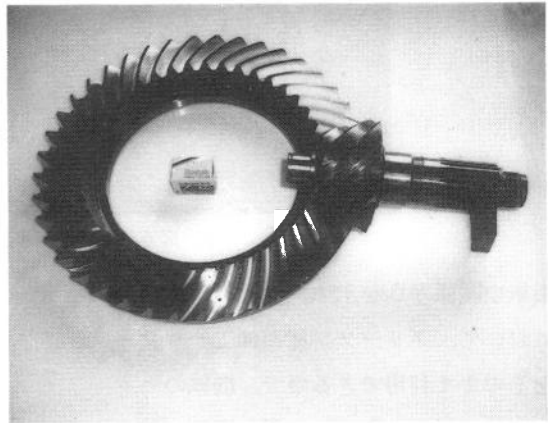


図8 研削加工されたハイポイドギヤとピニオン

仕上面粗さ $3\mu\text{m Rz}$ の達成と共にさらに加工時間の短縮を実現できる高性能な研削盤の開発はすでに着手され、その成果が大いに期待される。CBNホイールの研削性能に関する歯車の表面粗さと加工変質層についての調査は今回は行わなかったが、新しいCBNハイポイドギヤ研削盤の研削性能を紹介する機会があれば、そのときは発表したいと思っている。

参 考 文 献

- 1) 例えば横川和彦 最新研削盤情報, 機械と工具, 30, 12 (1986) 110.
- 2) JIS B 4131 ダイヤモンド及び立方晶窒化ほう素ホイール
- 3) 例えば江田弘 研削加工の変質層 先端研削技術 大河出版 (1985) 145.
- 4) 例えば江間秀隆, 秀竜郎, 吉見隆行, 横川和彦 CBNホイールの研削性能 (第21報) 昭和61年度精密工学会秋季大会学術講演論文集 (1986) 11.
- 5) 辻内敏雄 難削材の研削加工 昭和61年度精密工学会秋季大会シンポジウム資料 (1986) 49.
- 6) 佐々木外喜雄, 岡村健二郎, 北村繁信, 西村充 日本機械学会前刷集 (1963) 101.
岡村健二郎 超高速研削法について 超高速切削に関するシンポジウムテキスト (1962)
II-1 ~ III-18
- 7) H. Opitz, W. Ernst and K. F. Meyer Grinding at High Cutting Speeds, Proceeding of the 6th International M. T. D. R Conference (1965) 581~595.
- 8) 横川宗彦 横川和彦 最適研削条件の求め方 機械技術 34 12 (1986) 38.