特殊歯形歯車の用途と課題*

Actual Situation and Prospection of Non-involute Gears / Yukinori ARIGA

Key words: non-involute gear, Wildhaber・Novikov gear, logix gear, tooth profile

1. はじめに

ここで取り上げる特殊歯形歯車は、動力伝達用歯車として現在用いられている円弧歯形系歯車に限定する。円弧歯形系歯車として現在実用化されているものに、ウィルドハーバー・ノビコフ (Wildhaber・Novikov) 歯形歯車 (以後 W・N 歯車と言う) とロジックス歯車と呼ばれている円弧歯形系線接触歯車とがある。これらの歯車に共通していることは、歯面のかみ合いが凹面と凸面の接触であることである。したがって、凸面と凸面の接触であるインボリュート歯車と比較して面圧強度が大きいことが特長とされている。しかし、この種の歯車は軸間距離の誤差が、敏感に歯車性能に影響を及ぼすこともわかっているため、インボリュート歯車に取って変わることはありえないが、どうしてもインボリュート歯車では不都合な場合に使われ、たいへん大きな成果を挙げている例などがある。

そこで、これらの歯車の特長を生かした応用例と、これからの課題について述べてみる。

2. W・N 歯車

2.1 歯形

W・N 歯車は軸直角断面内で、等速回転を伝達するための機構学上の必要条件を満足する点が一点しかないため、はすば歯車にしなければならない。図1にインボリュート歯車と W・N 歯車とのかみ合い状態の比較を示す。

歯形の種類としては、大別すると非対称形と対称形

とに分類される。日本で使われた実績のある歯形では、(株)日立製作所のシンマーク歯形¹⁾、(株)ハセックギアのハセックシンマーク歯形²⁾がある。外国では、かつて共産圏の国でたくさんの使用実績があり、歯形では ΓOCT に規定されている歯形³⁾が代表的である。以上の歯形はほぼ対称形の歯形である。その他で輝かしい実績としてはヘリコプタの歯車として使っているイギリスの Westland Helicopters 社の例⁴⁾がある。この歯形は非対称歯形を使っている。

2.2 軸間距離誤差の影響

軸間距離誤差はかみ合い圧力角の変化を引き起こし、面圧・曲げ共に強度の低下をまねく。対策としては歯形を軸間距離誤差の影響の少ない歯形にすることである。この方法としては、転位歯切りをする方法⁵⁾と歯形曲線を変える方法⁶⁾がある。なお、一般的には組立の段階で歯当たりの状態を検査し、歯当たりが最適な状態になるよう調整をしている。

2.3 強度計算

W・N 歯車は同材質のインボリュート歯車の約3倍の強度があるとされている。しかし、かみ合いが点接

図1 歯形による接触状態の対比

* 原稿受付 平成4年6月2日

** 正会員 日本工業大学 (埼玉県南埼玉郡宮代町学園台 4-1)

表1 圧延機用 W・N 歯車の諸元例

モジュール	32	歯数比	24/135
ねじれ角	22°37'12"	歯 幅	475×2
材 質	SCM 440	熱処理	調質
回転数	小 98.57, 大 17.52 (rpm)		
歯面硬度	小 270~310, 大 250~290 (HB)		
モータ定格	AC 3 000 kW		

触であり、その接触点が歯筋に沿って軸方向に移動するので、曲げ強さ・歯面強さ共にインボリュート歯車の計算式で単純に計算することはできない。

曲げ強さに関しては、小田ら⁷⁾⁸⁾が実用歯元実応力計算式を導き、FEM による計算値や実験結果とよく一致することを示している。

歯面強さに関しては、歯面の接触点近傍のすきま線図を求め接触応力の推定をするなどの方法⁹⁾が発表されているが、実用の段階に達していない。実用には従来からの経験値としてのロイドの K 値が使われている。

2.4 使用例

2.4.1 圧延機のピニオンスタンドの例

熱間圧延機の減速機には、従来より調質インボリュートはすば歯車が使用されてきた。圧延する際の温度が低くなるほど、ロールにかかる圧力は高くなり、これにつながる歯車にも当然負荷が増す。3t の材料を熱間圧延する場合、温度を 3°C 引き下げればコストは年間 2 億円程度節約できるとの試算がある¹⁰⁾。しかし、使用条件が苛酷であり、面圧強度不足からと考えられる歯面損傷が発生していた。

そこで、歯面強度が高い W・N 歯車の採用か浸炭インボリュート歯車かを検討した結果、調質材のままで強度がだせる W・N 歯車を選択した。なお、採用にあたりメタル軸受の摩耗と軸間距離誤差の許容値との検討をして、長期間の使用に耐えることがわかった¹¹⁾。

W・N 歯車は低速高負荷の用途には適している。以下に、実際に使用されている歯車の諸元例(表1)と写真(図2)を示す。

2.4.2 ヘリコプタの最終段の減速機の例¹²⁾

イギリスの AEI 社は“CirCarC”歯車の名で非対称の W・N 歯車を産業機械に多数実用化した。その開発メンバーは Westland Helicopters 社でヘリコプタの回転翼の最終減速歯車にこれを実用化した。浸炭焼入れ研削 W・N 歯車が、航空機用として採用された初めての例である。

W・N 歯車の使用状態は、まずヘリコプタ全体の高さを低くするため、最終段で大きい減速比の歯車が配

図2 圧延機用 W・N 歯車

図3 回転翼駆動歯車

置された。この歯車は回転翼駆動歯車として最低速の部分であり、小歯車の歯数を少なくして折損に対する強度を高め、しかも必要な重なりかみ合い率を保持することができるようにした。また、航空機用として、小歯車用と大歯車用に歯切りカッタを2種類備えることが、特別な障害にならなかった。図3にヘリコプタに使われている歯車の例を示す。

2.5 今後の課題

次の事柄を解決することで更により多くの用途が拡大する可能性がある。まず、現在の低速域での使用にとどまらず、中速、高速域でも使用できるようにすること。そのためには、歯面研削方法の開発をし、振動騒音の低減を実現させなければならない。ほかに必要なのは歯車の精度測定の簡易化、ならびに組立誤差の測定システムの実現である。

3. 円弧歯形系線接触歯車

W・N 歯車は正面かみ合い率がゼロのため、等速回転を伝達するためにはすばにしなければならないとい

図4 高歯数比歯車 (4:40) の例

う制約があった。そこで、なんとか $W \cdot N$ 歯車の特長である凹面と凸面のかみ合いで線接触をする歯車はできないものだろうかという要望にこたえたのがロジックス歯車と呼ばれている歯車である¹³⁾。以下にこの歯車について紹介をする。

3.1 歯形

基準ラック歯形がピッチ線に対して対称である歯形と非対称である歯形に分類される。対称の歯形の場合、歯切り工具が大・小歯車共に同一でよいため、汎用歯形と呼ぶ。非対称の歯形は特に高歯数比用の歯形として用いられるので、高歯数比用歯形と呼ぶ。この場合の歯切り工具は、大と小とで異なる工具を用いる。

3.1.1 汎用歯形

この基準ラック歯形は、ピッチ線との交点に対して点対称の形状であり、歯末部は凸面に、歯元部は凹面になる。歯形の特徴は最小圧力角、最小歯数で決まる。ラック歯形を設計する際の注意事項は、かみ合い率が1を下回らないようにすることと、歯車歯先が尖らないようにすると共に、最大かみ合い圧力角があまり大きくならないように考慮することである。

3.1.2 高歯数比歯形

ラック歯形の歯末と歯元の曲線が非対称の歯形で、高歯数比用に用いられる。図4に実際の設計例を示す。設計上注意することは大・小歯車の歯厚の割合を適切に選ぶ必要があることである。

3.2 特性

相対曲率、すべり率、軸間距離誤差の影響および強度について説明する。

3.2.1 相対曲率

基準ラック歯形上のある点における曲率中心がピッチ線上にある場合、歯車のその点に対応する点の曲率半径はラックと同じで、曲率中心もピッチ円上にくる。 $W \cdot N$ 歯車の場合はピッチ線上に歯形の曲率中心がある歯面上の点が歯末と歯元に一点ずつしかなかった。

表2 δ と相対曲率ゼロの点の数

δ	NP 数	δ	NP 数
1	34	0.001	27 000
0.1	270	0.000 5	54 000
0.01	2 700	0.000 3	100 000

図5 汎用歯形の基準ラックと曲率半径

たが、この歯形はパラメータ δ の大きさによって、ピッチ線上に曲率中心がある点の数を自由に選択することができる。かみ合う相手の歯形の曲率半径を同じにし、凹凸を逆にしてあるので、ピッチ線上に曲率中心がある点の相対曲率はゼロとなり、局所的にべた当たりになっていると見ることができる。

このような相対曲率ゼロの点（以下 NP 点と呼ぶ）の数をパラメータ δ により自由に選択できる。 δ と NP 点の数との関係を表2に示す。また図5に汎用歯形の NP 点の位置と曲率半径の例を示す。

3.2.2 すべり率

相対曲率ゼロの点のすべり率は計算上ゼロとなり、転がり接触と同じことになる。相対曲率がゼロの点と点の間はすべりがゼロから次第に大きくなり、またゼロになる。

3.2.3 軸間距離誤差の影響

この歯形の最大の欠点は軸間距離誤差の影響が大きいことである。幾何学的には誤差があった場合は等速回転をしなくなるが、実際には弾性変形が誤差を吸収するので、 $\pm 2.5\%$ モジュール程度は許容される。

3.2.4 強度

耐久試験の結果では、クロムモリブデン鋼の調質材で切りっぱなしの場合、同一条件のインポリュート歯車の約3倍の強度が得られた¹⁴⁾。

ポリアセタール材を歯切りして、グリース潤滑をした場合、しない場合の耐久試験結果は図6のようになり、同一条件のインポリュート歯車より時間強度で約2倍の強度が得られた。

3.3 使用例

現在のところ市販製品に採用された例はないが、協育歯車工業(株)が規格歯車として販売しており、多方面で試験的に使われているようである。また、この歯車は切削加工だけでなく、粉末成形、射出成形、そして打抜き加工等により製造された歯車についての用途

図6 プラスチック材ロジックス歯車の負荷応力

も模索している。

方向としては，次のような用途が考えられる．まず一つは，大歯車高負荷でW・N歯車より高速で使いたい場合，はすばにすることによりかみ合い率がW・N歯車より大きく取れ，線接触であるので振動騒音の点では有利になる．次は高歯数比用で，インポリユート歯車より小歯数の歯車が造りやすいので一段で高歯数比が得られ，さらに歯面強度が大きいことを利用すれば製品の小型化ができる．ただし，歯切りの場合は大・小歯車で工具を別々に造らなければならないので，成形歯車には適している．

3.4 今後の課題

この歯車を実用化するためには，まず実験データの蓄積により，歯車の信頼性の裏付けを作る必要がある．また用途の拡大を図るためには歯面研削方法の開発，精度測定方法の確立が必要と思われる．

4. お わ り に

円弧歯形系歯車の概略と実際の使用例を述べてきたが，紙数が限られているので，個々の歯車の詳細な特性が述べられなかった．特殊歯形歯車は，加工技術の進歩にともなって造りやすく，使いやすくなって行くので，インポリユート歯車では満足できない所で，より多くの新しい用途がひらけるものと期待する．

なお，資料を提供していただきました(株)ハセック

ギア及びWestland Helicopters社の関係者に謝意を表します．

参 考 文 献

- 1) 能上允男，糟谷勝彦：円弧歯形歯車，機械設計，26，3 (1982) 47.
- 2) 石川昌一，本間正士：高圧力角WN歯車に関する研究，日本機械学会講演論文集，No. 750-9，(1975) 227.
- 3) ГОСТ 15023-69 (1969).
- 4) B. A. Shoter: The Lynx Transmission and Conformal Gearing, S. A. E. Tech. Paper No. 781041, (1978).
- 5) K. Kasuya, M. Nogami, I. Mastunaga and M. Watanabe: Tooth Bearing Analysis and Surface Durability of Symmetrical Conformal Gears, Trans. ASME, 103, 3, (1981) 141.
- 6) 有賀幸則，長田重慶：歯形曲率から考えたW・N系歯車歯形について，精密工学会誌，55，11 (1989) 2051.
- 7) 小田 哲，小出隆夫：WN歯車の負荷かみあい時における歯元応力の計算，日本機械学会論文集C編，57，535 (1991) 886.
- 8) 小田 哲，小出隆夫，宮近幸逸：WN歯形を有する歯の実用歯元実応力計算式 (ハセックシンマーク歯車)，日本機械学会論文集C編，55，512 (1989) 993.
- 9) A. Dyson, H. P. Evans and R. W. Snidle: Wildhaber-Novikov Circular Arc Gears: Geometry and Kinematics, Proc. R. Soc. Lond. A, 403, (1986) 313.
- 10) 製鉄プラント用円弧歯車 長谷川歯車，日経産業新聞，1986. 4. 30.
- 11) 小沢 昇，仲田卓史，北原健一：粗圧延機ビニオンスタンドへの円弧歯車の適用，日本機械学会論文集C編，57，533 (1991) 253.
- 12) D. G. Astridge, A. Dyson, H. P. Evans and R. W. Snidle: W-N Gears to Turn to Wider Applications? CME, 34, 4, (1988) 30.
- 13) 長田重慶，有賀幸則，五十嵐文雄，小守 勉：ロジックスギヤの可能性，応用機械工学，337 (1988) 145.
- 14) T. Komori, Y. Ariga and S. Nagata: A New Gear Profile Having Zero Relative Curvature at Many Contact Points (Logix Tooth Profile), Trans. ASME, 112, 3, (1990) 430.

著者紹介

1975年工学院大学大学院修士課程修了．日本工業大学工学部助手，講師を経て1992年より助教授．工学博士（東京工大）．研究分野は特殊歯形歯車，歯切工具などの歯車関係およびメカトロニクス教育