伝動装置の研究動向と今後の課題*

日本機械学会論文集(C編)
61巻582号(1995-2)

寺 内 喜 男^{*1}

Research Trends and Future Subjects on Gears and Power Transmissions

Yoshio TERAUCHI

Key Words: Machine Element, Gear, Coupling, Belt, Tribology, Machine Tool, Cutting, Grinding, Wear, Lubrication

1. はじめに

機械工学はその歴史も古く、特に機械設計の体系は19世紀にすでにその源泉が確立されている。したがって伝動装置などの技術もすでに完成されたような錯覚に落ち入りやすい。しかし産業技術は絶えず基盤となる学問と極めて密接につながっているので、学問の進歩に応じて技術そのものも発展していくものである。このように発展した新技術を絶えず導入することによって基礎的な研究手段も高度、斬新、かつ多様になって、その結果育成される学問も進歩を遂げていくのである。

伝動装置の技術的水準や学問分野も最近特に向上し、歯車伝動装置、ベルト伝動装置、チェーン伝動装置、トラクションドライブなど個々の分野では新しい学問的分野や新技術などが発表されている。従来より使用されている方面では技術的な改善や、新技術の導入が図られているのは当然であるが、さらに新しい分野では従来の伝動装置が適合するように設計されて使用されるのみでなく、本質的な設計、製作方法の見直しも図られている。例えば最近の新材料の開発に伴って、過酷な使用条件を満たし、また加工性を含めて経済効果を満足させるような伝動装置の材料の見直しも図られている。プラスチックの材料も小さな歯車に使用されているが、新しいプラスチック材料の開発、型成形の精密予測法、特に高温、高圧の密閉形内の溶融樹脂の流動と成形収縮の予測手法の開発などの課題解決が望まれている。

伝動装置の最近の研究動向を展望するにあたって

内外の論文を調べたところ、ここ2、3年に限定しても実に多くの数に達するので到底すべてを紹介することはできないので、技術的、学問的に重要と考えられるものを私見をまじえて展望することとした。

2. 伝動装置の最近の研究動向

2・1 歯車装置について

(a) 強度の研究

歯車の研究のうち、歯車の強度に関する研究が多い。そのうち破壊力学的なアプローチが注目される。接触荷重下のピッチング発生機構に関して破壊力学的アプローチの論文が発表されている⁽¹⁾。すなわち矢じり形の表面微小き裂が存在する半無限体表面上を潤滑下で、ヘルツの接触応力が移動する際の応力拡大係数を計算し、き裂の伝ば解析を行っている。き裂の伝ばには、き裂が微小な間は、き裂はもとのき裂面に沿って進展するが、き裂がある程度成長して油圧作用によって進展する場合には、せん断形のき裂伝ばから、引張形のき裂伝ばに移る。このようにしてこれまであまり力学的考察がなされなかったこの種の問題に具体的な解答が与えられたように思う。なお接触応力による疲労の場合のき裂発生についての微小部分の力学的モデリングも発表されている⁽²⁾。

一方歯車の歯の曲げ強度に関しても、破壊力学的な考慮のもとに、疲労き裂の進展⁽³⁾⁽⁴⁾、破壊力学に基づく曲げ強度設計法の提案⁽⁵⁾、さらに破壊力学的な考慮と信頼性工学的立場よりのアプローチ⁽⁶⁾も見られる。

歯面強さに及ぼす歯面粗さの影響についても研究されているが、粗さのうねの方向と接触の進行方向との関係があり、それらが互いに直交するときと平行のときとでは摩耗やピッチング発生の傾向が大きく異なる

* 原稿受付 平成6年9月29日。

*¹ 正員、福山大学工学部 (〒729-02 福山市東村町三蔵985)。

ようである⁽⁷⁾。このように歯面強さは、粗さの組合せ、硬度の関係、粗さの方向性、粗さの程度や形状によって微妙に影響され、これらの関係を今後明確にすることが必要である。

歯の曲げ強度を計算するのに有限要素法が従来より使用されている。そこで負荷は集中荷重として扱われているが、実際はヘルツの分布荷重になる。これを有限要素法で計算しようとする、負荷点付近を細かく分割しなければならない。負荷点が移動することを考えると全体を細かく分割しなければならない、分割や計算が大変である。そこで解析領域を応力特異点を含む領域とそれ以外の領域に分けて解析を行う Global Local 領域と Local 領域に分けて解析する方法が有用であり、この方法によって解析された結果が示されている⁽⁸⁾。また浸炭窒化歯車は浸炭に比べて熱処理変形が小さく、表面の焼入れ性が向上するので実用されているが、歯面強さが十分あっても歯元曲げ疲労による損傷が起こる場合がある。運転試験の結果、スポーリングが発生し、これに起因するかみあいピッチ点付近からの歯の折損、あるいは歯元最弱断面位置付近からの曲げによる歯の折損が起こるが、最適の硬化層深さが存在するようで必ずしも硬化層深さが大なるほど強度が強いといえない⁽⁹⁾。そのほか、材料、形状などが特殊な歯車について多くの曲げ強度の論文が発表されている。

またアコースティックエミッション(AE)を歯車の曲げ疲労損傷の発見などに利用しようとする論文⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾もある。浸炭焼入れ歯車では、き裂発生直前に AE 事象計数総数や AE 事象計数率は増加する。しかし調質歯車ではほとんど増加しないので予知は困難である。

歯車のスコーリングや潤滑に関する論文も多く見受けられる。基礎的な問題として弾性流体潤滑(EHL)の解法であるが、内外の学会誌に解析結果が多数発表されている。通常は圧力方程式として、一般レイノルズ方程式を用い、エネルギー方程式は流体力学におけるコントロールボリュームの手法を用いている。

Dowson の方法はこの手法であるが油膜内の温度分布も計算している。一般に EHL 解析は数値計算上の困難を伴うことが多く、誤差を小さくするためいくつかの手法が必要である。著者らも定常状態にある回転円筒の弾性流体潤滑、すなわちくさび効果による油膜の形成と二円筒の接近による油膜圧力の発生、すなわちスクイーズ膜効果による EHL が同時に働く場合について解析した⁽¹²⁾。この場合高荷重域における解を求めるのは多少やつ介である。線接触熱弾性流体潤滑の

場合の基礎式の誘導⁽¹³⁾、具体的にその計算法⁽¹⁴⁾を示す論文が発表されているが、比較的簡明な解法であり、今後等温問題でない現象に利用されるものと思う。また Bair-Winer 式を適用した非ニュートニアン公式を使った熱弾性流体潤滑解析の論文⁽¹⁵⁾も報告されている。

潤滑問題において潤滑油の力学特性を正確に知ることが必要である。特に粘度、密度、弾性率は歯車潤滑やトラクションドライブに直接影響する。このためダイヤモンドアンビルセル装置とファブリ・ペロー干渉分光器を中心とした光学装置を考案、製作して、レーザ光散乱測定によって、ベンゼン、エタノール、ひまし油など常圧で単純な分子構造液体について測定している⁽¹⁶⁾。その結果は常圧では屈折率、密度、音速はすでに測定されている標準値とよく一致するし、高圧下でも音速は文献値とよく一致した値がえられている。さらに Feng らは高圧における潤滑油の圧縮率について多くの研究者の説を要約している⁽¹⁷⁾。すなわち、一般によく使用される

$$\frac{\rho}{\rho_0} = 1 + \frac{0.6P}{1 + 1.7P}$$

[ここで P は圧力(GPa)、 ρ は油の密度(kg/m³)、 ρ_0 は大気圧における油の密度(kg/m³)] の式について、実際にはヘルツ応力の通過は極めて短時間であり、例えば 10^{-4} sec の間に圧縮されるので、この影響を考慮する必要がある。これに対して Ramesh の実験結果などが示されている。

最近の潤滑問題の解析に粗面の潤滑に関する解析が多い。そこでは比較的簡単な仮定が設けられ、またニュートン流体や非ニュートン流体(アイリングモデル)などが採用されている。このように今のところ十分な解析といいがたい。またトラクションドライブに関する論文も見受けられる。

(b) 運転性能の研究

歯車の運転性能を支配する因子に歯車の精度がある。計測技術は最近特に進歩したものであるが、斜入射ホログラフィ干渉法によって種々の歯車誤差をもつ歯車について測定し⁽¹⁸⁾、従来の測定法との比較、一度に歯面全体測定の問題点⁽¹⁹⁾、形状誤差の算出の仕方など⁽²⁰⁾を述べた論文がある。歯面粗さや形状誤差の測定のために広く使用されるだろう。

最近カオスの記事も増え、機械工学でも乱流、熱対流、非線形振動などについてカオスとの関連付けが検討されている。かなり以前になるが、著者らは平歯車の振動で、速度増大とともに振幅が不規則になり、歯面分離を起こし、接触していた歯面がバックラッシュに

入ると、ばね常数が零になり、非線形振動を起し、動荷重比が跳躍的に大きくなることを明らかにした⁽²¹⁾。このとき、歯車の周速度上昇のときに比べて下降のときは急変する周波数は低下し、履歴現象を示す。最近バックラッシュをもつ平歯車の振動⁽²²⁾⁽²³⁾、あるいは歯車軸を支える軸受⁽²⁴⁾に非線形ばね要素をもつ場合には、カオス的であり、ポアンカレ写像図が示され、理論計算値も報告されている。そのほか多くのカオスを扱った論文が最近発表されている。

はずば歯車の回転方向振動解析は従来より近似的に二次元的に取扱われている。しかし平歯車でも歯すじ方向に誤差があるときは二次元的には取扱えないわけで、はずば歯車では歯面の接触線上で荷重分布が一定でなく、また歯形誤差、歯すじ方向の誤差をもつ場合、特に軽負荷の場合には各瞬間の幾何学的接触線上で歯面は部分的にしか接触しないため、歯のばねこわさは歯車間の相対変位に対して非線形になる。この場合の変位を求めて荷重分布を解析し⁽²⁵⁾、回転方向振動シミュレーションを開発し、これで解析し実験結果と比較した論文が発表されている⁽²⁶⁾。また動荷重や動的応力を最小にするようなかみあい率歯車の設計について報告されている⁽²⁷⁾。ここで絶えず2以上のかみあい率をもつ場合は歯形修整により敏感であると結論されているのは少し疑問である。平歯車の線形近似振動方程式の論文も発表され⁽²⁸⁾、理論、実験が発表されているが、かみあい誤差が小さい場合は線形近似できる。

歯車騒音に関する論文も発表されているが、実際の歯車減速機の実測に関係するものが多い。また歯車騒音の放射パワーの推定に関するもので⁽²⁹⁾、内容は軸一体円板の三次元方向加振状態への音響放射パワーの推定理論を、三次元方向から加振力が作用する場合にも適用できるよう拡張を試みた結果である。

運転性能といえば効率の問題もあるが、内歯車の歯面摩擦損失に及ぼす潤滑油⁽³⁰⁾、かみあい率⁽³¹⁾の影響などが発表されている。

(c) 歯車の加工の研究

ホブ切りのように外周部、円弧部、直線部の連なった部分が、同時に切れ刃として作用するとき、切りくずは複雑に連なっている。このように連なった二つの対称の切れ刃による切削理論を導き、そのような真剣バイトによってV形溝を切り込むときの切削を考える⁽³²⁾。刃先角が小さいときには切りくずの干渉が起こり、切削力が大きくなることが解析からも立証される。またホブ切りはフライス削りの一種と考えられ、食付角は小さく、断続切削をする。切削条件によっては、高速度鋼ホブでも食付角の小さい切れ刃に欠けが

発生する。種々の条件で欠けの起こる食付角を求め、実験による欠けと比較している⁽³³⁾。またCNCホブ盤でJIS 1級の高精度歯車が加工できることの報告もある⁽³⁴⁾。

次に歯車の研削について、歯車成形研削盤の研究が活発で、数企業で試作から実用段階に移りつつあるのが目立つ。これもCBN砥石の開発、割出し精度の向上、コンピュータ技術の進歩など裏づける要因があり、またインポリュート歯車だけでなく、非インポリュート歯車あるいは歯車類似品などへの適用が大きな利点としてとり上げられているためである^{(35)~(38)}。そのほか、通常の創成形歯車研削盤では砥石面と加工歯面の接触は線接触であるため、歯面誤差によって三次元の面接触状態は複雑である。むしろねじ歯車のかみあいのように歯車形工具と加工歯車の点接触で加工するシステムを考えて、これらの工具、加工歯面と線接触する二つのはずばラックを媒介として加工条件を決定しようとする研究がある⁽³⁹⁾⁽⁴⁰⁾。このようにして制御しやすい条件によって歯車仕上げ研削シミュレーションプログラムを作成し、目的の歯面形状を得るための設定条件などを決定している。またシェービングカット歯面の研削は従来高度の熟練と経験を要する作業であったが、全CNC化された研削盤についての開発に関する論文も見られる⁽⁴¹⁾⁽⁴²⁾。

(d) ねじ歯車、波動歯車装置の研究

工具の半径方向の転位のほかに、接線方向の転位(横転位)も行う、いわゆる一般転位したねじ歯車の設計、試作に関する論文⁽⁴³⁾がある。また平歯車、はずば歯車を一方の歯車とする一对の線接触食違い軸歯車はフェースギヤであるが、任意の軸角の場合について検討した論文⁽⁴⁴⁾がある。

波動歯車装置のかみあいシミュレーション⁽⁴⁵⁾、ねじり剛性の測定⁽⁴⁶⁾、強度評価⁽⁴⁷⁾などの研究成果が報告されている。

(e) 非金属歯車の研究

各種のプラスチックを対象にした強度に関する研究成果が報告されている。そのうちでポリアセタールに低分子量ポリオレフィン为数%充てんした歯車材⁽⁴⁸⁾、さらにその歯車材に合成油を充てんした歯車材⁽⁴⁹⁾が騒音も低く、摩耗も少く有用のようである。

(f) 歯車装置の設計・製作に関する総合的判断

日本機械学会研究協力部会 RC-81 研究分科会において歯車装置の設計や製作に関するエキスパートシステムについて研究討議された⁽⁵⁰⁾。自社の工作能力、コスト、生産期限など総合的判断まで含めると難しい問題である。この方面の論文として、柔軟な設計手順に

よる機械設計を支援するエキスパートシステムが提案され、歯車減速機設計に適用されている⁽⁵¹⁾。

2・2 継手について

歯車形軸継手のピッチ誤差と接触歯数、負荷容量の関係について、ピッチ誤差の確率分布を考慮して理論的に解析した論文⁽⁵²⁾、この場合の破壊に対する信頼度を解析し、負荷容量設計式を提案している⁽⁵³⁾。

自動車用につェツパ形等速継手がよく使用されるが、その運動モデルを構築し、運動特性、出力角誤差について理論的ならびに実験的に検討し、シミュレーションを行った結果の報告⁽⁵⁴⁾がある。さらにクロスグループジョイントの内部乾燥摩擦による自励振動が発生した場合、動吸振器を軸系に装着して振動振幅の低減、安定化を図った論文⁽⁵⁵⁾がある。

2・3 ベルト伝動について

歯付きベルトのかみあい衝撃はプーリの歯先部とベルトの歯底部とが衝撃した瞬間に生じるものであるが、騒音の発生機構⁽⁵⁶⁾などが明らかにされている。また製造時の誤差に基づく伝動誤差を準静的問題として解析し、実験結果と比較している⁽⁵⁷⁾。また歯付ベルトはプーリの偏心による張力の変化がないときは非線形強制振動になるが、比較的非線形の影響は小さい。しかし周期的衝撃力と変動張力を同時に受けると、強制パラメトリック結合励振系になり、振動モードが増大しても応答振幅はさまざまに増減して、一定の傾向を示さない⁽⁵⁸⁾。

また自動車用自動変速装置に鋼製ベルトを使用する機構がある。この場合のトルク損失、伝達効率について種々の変速比について、プーリ圧力をかえて実測し測定値と計算値を比較している⁽⁵⁹⁾⁽⁶⁰⁾。

3. 今後の課題

最近わが国の企業は国内人件費の高騰や輸出超過額の対策などの問題もあって、海外に工場を設ける傾向が増加している。このようなことが進むとわが国における技術の空洞化が進んで、技術の低下を招かざるをえないと憂える声がある。しかし一方では発展途上にある国々にわが国が今日の経済的発展のよりどころとしていた産業技術の移転を行う活動が求められている。この解決策として国内的にも人的、財政的に技術改善のための投資を行って、新技術の展開や技術の飛躍的発展に導くための活動が重要である。

伝動装置に関しても、最近の研究動向に示されるように、研究者の方々の努力によって活発な技術の発展を遂げてきたが、今後の問題として、さらにこれらの研究を進展させ、また新技術へと展開していく活動が

強く望まれるのである。

伝動装置の技術は、すでに研究動向で述べた内容より明らかなように、材料、設計、製造、検査、運用、撤去を含んだ総合技術の典型のようなものである。ややもすると最近では情報技術に重点がおかれているように思われる節があるが、生産や現物に密着した力の技術も大事であって、情報技術と力の技術がバランスしなくなったら機械技術そのものが衰退していく。しかし力の技術は、あるいは失われつつあるのではなかろうかと懸念されるのは、私の危ぐにすぎないのであろうか。

最後に今回展望記事を書く機会を与えていただいた関係各位、特にお世話になった京都大学久保愛三教授に対して謝意を表す。

文 献

- (1) 村上・栄, 第217回日本材料学会疲労部門委員会研究討論会資料, (1993), 29.
- (2) Cheng, W., Cheng, H. S., Mura, T. and Keer, L. M., *Trans. ASME, J. Tribology*, **116**-1(1994), 2.
- (3) 鄧・井上・高津・加藤, 機論, **57**-535, C(1991), 903.
- (4) 鄧・井上・高津・加藤, 機論, **57**-535, C(1991), 909.
- (5) 加藤・鄧・井上・高津, 機論, **57**-541, C(1991), 2996.
- (6) 永村・寺内・シギット, 広島大学工学部研究報告, **42**-2(1994), 75.
- (7) 中島・馬渡, 機論, **59**-561, C(1993), 1527.
- (8) 森脇・福田・渡辺・斉藤, 機論, **60**-570, C(1994), 662.
- (9) 吉田・宮西・大上・山本・佐藤・藤田, 機論, **59**-557, C(1993), 264.
- (10) 小田・宮近・小出・会見, 機論, **58**-551, C(1992), 2219.
- (11) 増山・井上・加藤, 機論, **60**-575, C(1994), 2456.
- (12) 寺内・野西, 機論, **57**-537, C(1991), 1715.
- (13) 岡村・藤原, 機論, **58**-550, C(1992), 1897.
- (14) 岡村・藤原, 機論, **58**-550, C(1992), 1903.
- (15) Khonsari, M. M. and Hua, D. Y., *Trans. ASME, J. Tribology*, **116**-1(1994), 37.
- (16) 藤城・中村・田中・俣, 機論, **58**-552, C(1992), 2527.
- (17) Feng, R. and Ramesh, K. T., *Trans. ASME, J. Tribology*, **115**-3(1993), 557.
- (18) 久保・藤尾・栃本・本田・斉藤・鈴木, 機論, **58**-545, C(1992), 295.
- (19) 藤尾・久保・栃本・花木・斉藤・鈴木, 機論, **58**-548, C(1992), 1209.
- (20) 久保・藤尾・栃本・本田・斉藤・鈴木, 機論, **58**-548, C(1992), 1226.
- (21) 寺内・日高・長嶋, 機論, **33**-247(1967), 465.
- (22) Kahraman, A. and Singh, R., *J. Sound Vib.*, **142**-1(1990), 49.
- (23) 佐藤・山本・三田・高津・大森, 機論, **58**-555, C(1992), 3386.
- (24) Kahraman, A. and Singh, R., *J. Sound Vib.*, **144**-3(1991), 469.
- (25) 梅沢・松村・北条・市川, 機論, **60**-575, C(1994), 2429.
- (26) 梅沢・松村・北条・市川, 機論, **60**-575, C(1994), 2436.
- (27) Lin, H. H., Lee, C., Oswald, F. B. and Townsend, D. P., *Trans. ASME, J. Appl. Mech.*, **115**-1(1993), 171.
- (28) Cai, Y. and Hayashi, T., *Trans. ASME, J. Appl. Mech.*, **116**-2(1994), 558.
- (29) 林(巖)・岩附・隼田, 機論, **58**-552, C(1992), 2549.

- (30) 寺内・永村・池条・矢田, 機論, 58-545, C(1992), 245.
(31) 寺内・永村・池条・矢田, 機論, 58-555, C(1992), 3377.
(32) 鈴木・有浦・梅崎, 機論, 58-547, C(1992), 918.
(33) 永野・米倉・桜木, 機論, 59-557, C(1993), 277.
(34) 上野・鹿毛・橋谷・丘, 機論, 60-573, C(1994), 1804.
(35) 石橋・吉野, 機論, 53-487, C(1987), 887.
(36) 石橋・吉野, 機論, 53-487, C(1987), 894.
(37) 吉野・池野, 機論, 57-543, C(1991), 246.
(38) 吉野・池野・江副, 機論, 60-571, C(1994), 1053.
(39) 久保・藤本・吉田, 機論, 60-569, C(1994), 274.
(40) 久保・藤本・吉田, 機論, 60-569, C(1994), 283.
(41) 久保・水野, 機論, 59-560, C(1993), 1223.
(42) 水野・久保・垣野・浅野, 機論, 59-560, C(1993), 1230.
(43) 八重島, 機論, 58-547, C(1992), 858.
(44) 大竹, 機論, 59-561, C(1993), 1533.
(45) 杉本・石田・日高・笹原・谷岡, 機論, 58-551, C(1992), 2232.
(46) 杉本・石田・日高・笹原・谷岡, 機論, 59-563, C(1993), 2239.
(47) 石田・日高・張・中根・笹原・谷岡, 機論, 59-567, C(1993), 3526.
(48) 塚本・丸山・三村, 機論, 59-558, C(1993), 548.
(49) 塚本・丸山・三村, 機論, 59-568, C(1993), 3874.
(50) RC-81, 歯車装置の性能の予測と把握に関する調査研究
分科会研究成果報告書, (1989), 日本機械学会.
(51) 大町・井上・加藤, 機論, 59-563, C(1993), 1987.
(52) 縄手・寺内, 機論, 59-557, C(1993), 252.
(53) 縄手・寺内, 機論, 59-564, C(1993), 2539.
(54) 渡辺・市川・浅野, 機論, 59-560, C(1993), 1166.
(55) 西郷・岡田・小野・信田, 機論, 59-565, C(1993), 2629.
(56) 簗谷・会田・小山・佐藤・保城, 機論, 46-408, C(1980), 942.
(57) Kagotani, M., Koyama, T. and Ueda, H., *Trans. ASME, J. Mech. Design*, 115-4(1993), 1038.
(58) 李・大滝・綿貫, 機論, 60-575, C(1994), 2415.
(59) Micklem, J. D., Longmore, D. K. and Burrows, C. R., *Proc. Inst. Mech. Eng.*, 208-D 2, D(1994), 91.
(60) Guebeli, M., Micklem, J. D. and Burrows, C. R., *Trans. ASME, J. Mech. Design*, 115-4(1993), 1044.