



ころがり接触に関する研究分科会報告*

ころがり接触に関する研究分科会**

1. 緒 言

1-1 本分科会の目的 ころがり接触に関する問題は、表1に示すように機械要素の損傷の防止や摩擦の軽減・制御のみならず、圧延加工のさいのロールの損耗や加工物の表面品質の向上など、工学上・技術上広範囲にわたっている。またこれに関連する因子も表2のようにきわめて多様であって、現今なお多数の研究者や技術者がこれらの問題の解決に当たっていると

ころである。本研究分科会は、ころがり接触を作動原理とするもののうちとくに歯車・軸受・圧延ロールのような工業上重要な対象物について、表面疲れ、スコアリング、摩耗に関する研究成果と現場の経験とを持ち寄り、研究発表、情報交換を主体とする座談会や調査研究を行なうことを目的として設立されたものである。

本研究分科会の委員は、西日本地区における代表的な工業たとえば製鉄、造船、電気機械工業に従事し、ころがり接触に経験深い専門技術者と幅広い研究者を有する大学側とから選ばれ、過去多年にわたり、この分野での研究を推進してきた九州大学側が主として取りまとめに当たった。

1-2 本分科会の活動の経過概要 本分科会は以上の目的をもって昭和42年5月設立され、2箇年経過ののちさらに1年の延長を認められ、昭和45年4月に任務を終了した。その間報告会・座談会を各8回開催したが、そのうち第6回はとくにオランダ・デルフト工科大学の Blok 教授を迎えて歯車潤滑に関する特別講演にあて、また第8回は昭和45年1月、日本潤

* 原稿受付 昭和47年2月8日。

** 主査 平野富士夫 (九州大学), 幹事 上野 拓 (九州大学), 委員 安東禎次郎 (唐津鉄工所), 相浦正人 (久留米工業高等専門学校), 石橋 彰 (佐賀大学), 宇野九十九 (三菱重工業会社), 大島五朗 (安川電機製作所), 河原英麿 (日立金属工業会社), 小路 博 (三菱重工業会社), 久能一郎 (東洋鋼板会社), 後藤治平 (熊本大学), 竹内登一 (九州共立大学), 寺内喜男 (広島大学), 中尾伊三郎 (三菱電機会社), 西谷弘信 (九州大学), 百武 秀 (福岡大学), 深田健二 (新日本製鉄会社), 村松茂樹 (新日本製鉄会社), 和栗雄太郎 (九州大学)。

(注1) なお、このほかにカナダより訪日の Tordion 教授による歯車の振動に関する講演を中心に座談会を臨時の分科会で行なった。

滑学会との共催にて本分科会における最終回の報告会をかね、本会会員のみならず、化学の専門研究者の立場からの総合報告とともに8題目を取上げ、座談会も2主題について行なった。また九州大学におけるころがり接触についての研究状況の見学会も行ない、実験研究現場において討論や意見・情報の交換も行なった(注1)。

ころがり接触を主体とする機械要素の諸問題について本分科会で取上げた研究報告主題を項目別にあげるとつぎのようになっている。

- a) 歯車関係 11 題目
- b) 潤滑油関係 4 題目
- c) 圧延ロール 2 題目
- d) ころがり軸受 1 題目
- e) その他一般的事項 1 題目 (潤滑用語について)

座談会も以上の主題に即して実際の経験と研究成果との間のすきまを埋めるべく活発に行なわれた。これらの内容の概要を項目別に以下に要約して述べる。

2. 歯車関係

2-1 一般的事項 寺内委員および上野幹事により

表1 ころがり(一すべり)接触の研究対象

	対 象	例	日 的
機械要素	強制ころがり(一すべり)*	歯 車 球 面 継 手	摩擦減少 (機械効率向上) 損傷防止
	自由ころがり(一すべり) 法線方向荷重支持**	ころがり軸受 カ ム ボールねじ	摩擦減少 (機械効率向上) 損傷防止、とくに寿命延長
	自由ころがり(一すべり) 法線方向荷重支持** 接線力伝達	摩擦伝導装置 車輪・タイヤ	摩擦(接線力)保持, すべり防止, 損傷防止
加工	圧 延 加 工	冷 間 圧 延 熱 間 圧 延	加工面表面品質向上 加工能率向上 ロール, 工具の損傷防止
	回 転 成 形	回 転 成 形 スピニング	
	転 造 加 工	ね じ 転 造 歯 車 転 造 ローラ仕上	

(備考) * すべりが機構学的に確定。
** すべりが機構学的に不確定。

それぞれ欧米の歯車研究および技術の現況に関する視察報告がなされた。前者は主として西ドイツのミュンヘン、アーヘンなどの工科大学や企業における歯車に関する研究状況の調査報告で、歯車の曲げ疲れ強さ、動荷重、歯の動的たわみ、騒音、弾性流体潤滑膜形成、潤滑法、スコーリング・ピッチング・摩耗などの表面損傷および歯車材に関する研究の紹介と、歯切盤・ホブ盤・研削盤など工作機械、検査器、試験装置および試験法、各種の形式の動力伝達装置などについての説明があった。

後者は主として英、米における企業の歯車関係部門

表 2 ころがり（一すべり）接触条件の解析

条 件	項 目	具体的因子および記号
幾何学的	接触面マクロ形状	内接的 (conformal) $1/R=(1/R_1)-(1/R_2)$ 外接的 (counterformal) $1/R=(1/R_1)+(1/R_2)$ 主曲率半径および方向, $a \times b$
	マイクロ形状	あらさ ($h_{max}, h_{rms}, h_{cla}$), うねり, 片当たり
運動学的	ころがり速度	$U=(U_1+U_2)/2$
	すべり速度	$\Delta U= U_1-U_2 , V$ (直角方向)
	スピン角速度	
	接触継続時間	
応力条件	法線荷重, 接線力	P, T
	応力成分	ヘルツ最大圧力 p_H 最大片振せん断応力 $\tau_{xy, max}$ 最大両振せん断応力 $\tau_{xz, max}$
	応力サイクル	N
	応力集中	表面欠陥, 内部欠陥, あらさ
潤滑条件	乾燥状態 部分的 EHL 完全 EHL 塑性流体潤滑	摩擦係数 μ , 最小膜厚 h_0
潤滑剤条件	粘 度	圧力による変化 $\eta=\eta_0 e^{\alpha P}$ 温度による変化
	物 性 値	密度, 圧縮性
	粘 弾 性	非ニュートン挙動, 降伏応力
	反 応 性	化学反応 物理吸着, 化学吸着
熱的条件	温度上昇 θ	全体的温度 (bulk temp.), せん光温度 (temp. flash)
	熱伝達条件 熱膨張	冷却法, 油量
材料条件 (全体的 条件)	弾 性	弾性係数 E , ポアソン比 ν
	塑 性	加工硬化指数
	強 度	極限強さ, 降伏点, 疲れ強さ, かたさ
	化学成分	
	組 織	
材料条件 (表面条件)	表面組織	加工層, 酸化膜, 表面処理
	反 応 性	酸化反応, 潤滑剤 (とくに EP) との反応性
	変 質 (応力サイクル, 温度による)	塑性流動, 加工硬化, 加工軟化, 変形帯, 転位

における視察調査に関するもので、各種歯車用工作機械・検査器・歯車減速装置についての詳細な報告がなされた。さらにオランダの Blok 教授の研究室における歯車潤滑に関する基礎研究の状況についての報告も付け加えられた。

2・2 動力伝達歯車設計式 上野幹事より本会研究協力部会所属の「動力伝達用歯車設計資料調査研究分科会」の経過概要の報告と説明がなされた。とくに計算式の誘導についての基本的な考え方、これに含まれる各係数の意義を解説し、今後の問題点についての見解が述べられた。これに対し、この計算式と各企業において実際に使用している設計計算式との対比関連が討論の中心となった。すなわち、工作誤差たとえば歯形誤差に対する考慮、自動車用歯車におけるように経済性が重視される歯車に対する取扱い、また自動車用や船用歯車を対象外とした理由、今後の規格化の見とおし、スコーリングやピッチングに対する面圧強さに関する基礎資料などについて各委員より質疑が提出され、意見の交換が行なわれた。

さらにこの設計計算式に取入れられている各係数に重量を付ける必要があるのではないか、製作者の種別による統計的処理も必要であるとの見解も述べられた。

2・3 動力伝達用歯車の損傷 高周波焼入れ材、焼入れ焼もどし材、鋳鋼材の各種のかたさの歯車を組合わせて、IAE 形試験機と実機における損傷を比較した例が報告された。ピッチング発生限度 (最高ヘルツ応力 p_H kg/mm²) と材料のブリネルかたさ H_B との比が、試験機で 0.32, 実機で 0.21 となっているが、これには試験機における平歯車、実機におけるはすば歯車という相違、さらにモジュールや減速比の差違の影響もあるが、歯車の精度や取付け誤差の相違が大きく関係しているものと考えられ、歯当たりや動荷重のばらつきを考えると実機での安全率を大きく取る必要があるとの見解が述べられた。

石橋委員より歯車の損傷に直接大きい影響を与える歯すじ誤差や組立誤差による片当たりに関して総合的な報告がなされた。すなわち歯の曲げたわみ、軸受部のたわみ、歯面接触部におけるヘルツ変形の局部的たわみに関するばね定数を用いて、歯すじ方向の接触幅と荷重分布を表わす式を導き、かたい歯車では三角形分布、やわらかい歯車では台形分布となととしているが、やわらかい歯車で片当たりが大きいと n 次 (たとえば 3.5) の放物線分布としたほうがよく、これらの式で実験結果をよく説明しうることを明らかにした。また負荷運転による摩耗に対する修正について、さらにやわらかい歯車では加工硬化の程度が大きいとため負荷能力の減少も著しくないことなどについても理論的に考察を加えた。

寺内委員は歯車のスコアリングについての総合報告を行なったが、まずスコアリングという用語に関する各国の関連規格の定義とくにスカuffingとの比較検討がなされた。ついで歯車の全体的温度上昇と表面温度についての考察とともに、寺内・Lechnerによる歯面瞬間温度の実測結果について述べ、また Blok, Jaeger の理論値と寺内の計算値との比較を行なった。

つぎにスコアリング実験について、IAE, Ryder, FZG の各試験機による結果を詳細にまとめ、スコアリング耐圧に及ぼす速度・かみ合い線長さ・接触時間・油量・給油法・油温・油粘度・歯先修正・表面仕上・油成分・添加剤の影響についてそれぞれ解説を加えた。

九州大学における焼ならし歯車、浸炭歯車、窒化平歯車の過負荷試験における損傷についての報告もなされた。やわらかい歯車ではなじみ性のためスコアリング耐圧は高いが、スコアリング発生後の表面の劣化や歯形変化ははげしい。浸炭歯車のようにかたい歯車では歯先修正を適当にしなければ、高速時の耐圧は低下するが、歯面の劣化や摩耗は少ない。軟窒化歯車は耐圧は高いが、表面かたさが不足するとピッチング、母材がやわらかいと高い接触圧力でケースクラッシングを発生する。またこれらの実験結果はかみ合い時の動荷重を実測しないと十分には説明できないとの見解が述べられた。

石橋委員はさらに片当たりのある場合やクラウニングを施した歯車の許容伝達動力の計算式を提示した。許容伝達動力は、片当たりが存在しない場合、歯すじ方向の片当たりが大きい場合にはそれぞれ許容ヘルツ応力 p_H の二乗、四乗に比例、クラウニング歯車では三乗に比例することを示した。また従来の p_H/H_B の値を批判的に検討し、これが 0.20~0.35 多くは 0.23~0.29 の範囲内にあることを述べ、弾性流体潤滑 (EHL)

効果による油膜があらさに比べて大きいとこの値が 0.7 にも達しうることを明らかにした。また表面または表面下層が加工硬化する条件を論じ、歯面間油膜により完全に分離されている場合と直接接触を生じている場合とでは面圧強さが異なることを指摘した。

2.4 歯車形継手 圧延機駆動スピンドル用の歯車形継手はスピンドル軸が傾斜角をもっているため、かみ合い面の往復すべりを伴い、スコアリングや摩耗を引起す。この損傷例と作動条件の解析と潤滑油試験についての紹介があり、マイルド EP 系の添加ギヤ油によって初期摩耗のち安定した運転ができることが報告された。

2.5 玉入りウォームギヤ 後藤委員より半円状のねじすじを有するウォームと同じくねじみぞを有するホイールとの間に玉を入れたウォームギヤについての研究結果の紹介があった。機構学的な接触点の解析によりかみ合い領域が求められ、これより有効玉数がわかるが、一般に有効玉数は少なく、かみ合い期間も短い。この難点を解決するために、基準ピッチ線と玉中心線との間に転位がある場合の解析を行ない、つねに 2 個以上の玉の接触が保たれる条件すなわち円滑な回転伝達を可能ならしめる条件を究明した。

2.6 歯車材の耐焼付き性 平野主査より円筒試験による歯車材と潤滑油の耐焼付き性すなわちスコアリング耐圧に関する実験結果について総合報告が行なわれた。まず同一粘度の潤滑油 (2 号タービン油) でも耐焼付き性の相違が著しいが、これは添加剤の有無や種類による影響よりも油の分子量構成によるものと考えられる。低分子量を含む油は加熱面上で薄膜状にひろがりやすく、蒸発しはじめの温度も低い。この蒸発開始温度を極端に異にする油 A, B を選んでスコアリング耐圧とピッチング寿命とを比較すると、蒸発開始温度の低い A 油はスコアリング耐圧も寿命も他のいずれの油よりも低く、B 油はこの両方とも高かった。

さらにヘルツ接触応力、EHL 膜厚、あらさ、材料の加工硬化性の相互的作用により表面層の塑性流動、深さ方向のかたさ分布に四つの基本的形態が存在すること、ピッチングの形状とすべり率などの接触条件との関連があることなど実験結果をまとめて報告が付け加えられた。

2.7 歯車の潤滑の基礎研究 Blok 教授により歯車潤滑の基礎研究の結果について総合報告がなされた。まず EHL の研究の進展と歯面潤滑とくにピッチングや歯面摩擦に対してしめるその意義について概説し、ついで歯車の潤滑状態すなわち部分的 EHL 状態に対して妥当する摩擦法則を、次元解析的に過去の多

くの実験結果を検討して求め、もっともよくまとまった Cameron-O'Donoghue の式についても批判的に紹介した。ついでスコーリングの発生条件として油の臨界温度について説明し、これが潤滑油の粘度級別 (viscosity grade) と関連していることを指摘し、この臨界温度が流体潤滑における粘性効果を取除いて油の化学組成のみによってきまることも示唆した。

さらに歯面温度を全体的温度上昇と閃光温度との和として表わし、摩擦係数を知ってせん光温度を計算する彼自身の名を冠した計算式を展開し、全体的温度上昇の推定に対しては、歯車箱を含む歯車系における熱回路網の構成を考え、この系の各部における熱源と熱抵抗を推定する方法を提示した。このうち歯車よりの潤滑剤の遠心力による飛散のために伝達される熱量と、油膜内に蓄積された熱量とを加えて全伝熱量を求める方法を解説した。

3. ころがり接触に対して使用される潤滑剤

3.1 ころがり——すべり接触に対する潤滑剤の影響 本分科会の特別講演会の講師 桜井俊男君 (東京工業大学) により表面損傷とくにころがり——すべり接触時の表面における化学反応と表面層の応力との関係について基礎的な知見の紹介がなされた。すなわち、固体表面の物理的・化学的不均一性さらに応力や表面電場により誘起された不均一性、疲れき裂の発生、伝ば、摩擦化学反応、塑性加工時の表面との化学反応、潤滑油粘度、化学構造、酸素・水素共存の影響、反応性と生成物との関係など広い角度からみた最近の研究成果についての解説がなされた。

つぎに同じく講師 玉井康勝君 (東北大学非水溶液化学研究所) によってころがり——すべり接触における鉱油および油脂の摩擦と潤滑に関する報告がなされた。ころがり——すべり接触や圧延においては一般に油性剤の効果は少なく、ことにすべり速度が大きいと境界潤滑的要素は少なくなる。しかしオイレン酸のような二重結合によるメカノケミカルな反応性による保護膜の効果は有効に作用する。ころがり接触ではさらに粘弾性効果が重要であり、緩和時間より接触時間が短いと油は固体的挙動をする、など基本的な知見が紹介された。

3.2 ギヤ油 講師 堀 昭吉君 (昭和石油会社中央研究所) により自動車用ギヤ油、工業用ギヤ油に対し要求される性質、評価項目および評価方法、添加剤の種類とその特長と作用さらに添加剤の組合わせ、ギヤ油に関する規格などについて解説がなされた。

またウォームギヤの潤滑については講師 高井義郎

君 (三菱石油会社研究部) により鉄-非鉄系における極圧剤の役割を考え直す必要があるとして、ウォームギヤ用潤滑油に対し要求される性質、摩擦あるいは効率・耐焼付き性・摩耗・ピッチング寿命に及ぼす油性状や添加剤の影響さらに四球試験やティムケン試験との相関などについての広範囲の実験結果をまとめた報告がなされた。

4. 圧延ロール

4.1 冷延用ロール 久能委員により冷間圧延に用いられる作動ロール、補強ロールおよび調質圧延ロールの材質の変遷、ロールの圧延性、表面疲れ、発生き裂などについての報告がなされた。とくにスポーリングに対する応力解析結果と実際のスポーリング発生条件との対応、寿命と材質・かたさとの関連などについて説明が加えられた。

4.2 熱延用ロール 講師 関本靖裕君 (日立金属会社若松工場) により熱延用ロールの損傷についての報告がなされた。各種圧延機用ロールの損傷の形態すなわち熱き裂、摩耗、はだあれ、絞りこみ損傷、スポーリングなどの発生状況と使用スタンド・ロール材質・かたさ・発生ひん度などの統計を示したのち、とくにき裂発生に対する応力的・熱的条件の解析、ロール表面における酸化皮膜の性状や生成機構などについて説明し、さらにかみ止め熱き裂・絞りこみ損傷などの異常圧延による表面損傷の状態やき裂発生機構に関する実験研究やこれに対する考察について紹介が行なわれた。

5. ころがり軸受

講師 山本精穂君 (日本精工会社軸受技術部) により高速軸受における従来の研究成果の展望的報告があり、引続いて高速軸受の問題点とくに各構成要素の理想運動からのかたよりについての実験結果が提示された。転動体の運動に関する実測結果を解析して、自転・公転すべりや玉の作動接触角・スピン角速度などが明らかにされ、玉の三次元的運動やジャイロ効果など複雑な挙動も推測され、さらにこれに及ぼす潤滑条件、接触条件の影響、EHL 膜厚の推定などについての研究結果も解説された。

6. 結 言

以上本分科会の概要を取りまとめて報告したが、その設置期間がちょうど大学紛争およびその收拾期間と重なり、活動が制約を受け、また取りまとめ報告も延引したのは遺憾であるが、近く報告集として公表できるよう作業を進めている。 (文責 平野富士夫)