

球状工具の転圧を利用した表面創成における

工具と被加工材間の摩擦に関する研究

2011 年

二村 優

名古屋工業大学博士論文
甲第763号(課程修了による)
平成23年3月23日授与

目次

第1章 序論	1
1.1 回転塑性加工の位置づけ	1
1.2 塑性加工の機能表面生成	2
1.3 ボール転がりおよびバニシング加工に関する研究	3
1.4 研究の目的および本論文の構成	6
第2章 球転がりを利用したディンプル成形	9
2.1 緒言	9
2.2 マイクロディンプル成形加工について	9
2.2.1 マイクロディンプル成形加工の原理	9
2.2.2 マイクロディンプル成形ツールの仕組み	11
2.3 マイクロディンプル成形加工の加工条件	14
2.4 実験結果	15
2.4.1 ディンプル成形加工前後の表面観察結果	15
2.4.2 押込み量とディンプル成形の関係	16
2.4.3 送り速度とディンプル成形の関係	17
2.4.4 回転速度とディンプル成形の関係	18
2.5 結論	19
第3章 ボール転がりの初等理論およびFE解析	20
3.1 緒言	20
3.2 ボール転がりに働く力	20
3.2.1 理論モデルによる掘起こし力	21
3.2.2 理論モデルにおける加工荷重	23
3.3 ボール転がりのFE解析について	27
3.3.1 ボールバニシング加工の数値解析	27
3.3.2 自由回転する球転がりの解析モデル	29
3.3.3 被加工材の塑性曲線	31
3.4 ボール転がりのFE解析結果	32
3.4.1 ボール転がりの加工荷重	32

3.4.2	ボール転がりのひずみ分布	34
3.5	考察	36
3.5.1	ボール転がりの加工荷重	36
3.5.2	ボール転がりのひずみ分布	38
3.6	結論	39
第4章	摩擦試験機の設計および製作	40
4.1	緒言	40
4.2	転がり摩擦試験機の仕様	41
4.3	転がり摩擦試験機の構造	41
4.3.1	試験機本体	41
4.3.2	強制回転の機構およびすべり速度	45
4.3.3	試験片	48
4.3.4	ボール	49
4.4	試験装置の校正	50
4.4.1	垂直荷重と水平荷重の校正	50
4.4.2	被加工材取付け部の平面度	51
4.4.3	加工位置による加工荷重のばらつき	52
4.4.4	光学センサの動作確認	53
4.5	ボール押し込み量の定義	54
4.6	結論	56
第5章	ボールが自由回転して転圧するときの摩擦挙動	57
5.1	緒言	57
5.2	試験条件	57
5.3	試験結果	58
5.3.1	垂直荷重と水平荷重の測定結果	58
5.3.2	ボール周速の測定結果	61
5.3.3	溝形状の測定結果	63
5.3.4	被加工材の表面観察結果	66
5.4	考察	69
5.4.1	ボール転がりの加工荷重とボール周速の変動	69

5.4.2	加工部表面性状への潤滑状態の影響	72
5.4.3	ボール押し込み量と接触面圧	73
5.5	結論	73
第6章	ボールが強制回転して転圧するときの摩擦挙動と塑性変形	75
6.1	緒言	75
6.2	水平荷重の推定	76
6.3	試験条件	77
6.4	試験結果	78
6.4.1	自由回転の球転がりによる表面粗さの改善	78
6.4.2	強制回転の球転がりによる粗さの改善	82
6.4.3	スペクトル解析による表面形状の評価	90
6.5	考察	95
6.5.1	球転がりによる表面粗さの悪化	95
6.5.2	加工中の潤滑油の影響について	99
6.6	結論	101
第7章	総括	103
	参考文献	107
	付録 ー 加工荷重の導出	114
	謝辞	121

第1章 序論

1.1 回転塑性加工の位置づけ

塑性加工は、自動車やOA機器など特に大量生産が要求される産業活動とともに発展してきた。金属の塑性変形を利用したこの加工は、大量生産、高歩留まり、材料組織の改善などの優れた特徴¹⁾を有しており、さまざまな製品の加工に取り入れられてきた。高度経済成長以降、産業が多種少量生産に移り変わるにつれ²⁾、塑性加工は付加価値としての材料組織改質に注目が集まるようになった。塑性加工による材料組織の改質は、仕上げ加工の工程に積極的に導入され³⁾、製品の機能向上や加工時間の短縮、低級材料の適用範囲拡大につながった。

素材を大きく変形させることで素材内部の金属組織が微細化し⁴⁾、材料強度を著しく増大させる^{5), 6)}。特に、自動車産業では、大量生産・低コストの要求も合わせて締結部品へは塑性加工によって成形されてきた。締結部品とはボルトやネジのことであり、軸状部品への塑性加工には回転運動を利用した回転塑性加工が活躍する。回転塑性加工は、締結部品だけでなく、これまで熱間鍛造で成形されていた軸状部品へも適用がなされている。しかしながら、全製品の素形材のうちおよそ半数が軸状部品とされているが、軸状部品に塑性加工が利用されるのはわずか数%にとどまっているのが現状である⁷⁾。

回転塑性加工とは、円柱状または円板状の素材をその軸周りに回転させ、ローラやボール状の工具により局所的な塑性変形を逐次繰り返し与え、製品全体の形状を創成していく加工方法であり⁸⁾、素材または工具の回転運動を活用した塑性加工のことをいう。この加工では、鍛造やプレス機などの往復運動する駆動機を利用した工法に比べ、はるかに小さい加工荷重で成形でき、騒音や振動対策の面からも作業環境改善に有利である⁹⁾。回転塑性加工による対象製品は、回転対称体に限られるが¹⁰⁾、先に述べたような塑性加工としての特徴も当然備えている。

近年、回転運動を活用するという加工法の特徴から、回転塑性加工は単なる製品の成形以外にも、軸受部品などの摺動面に対し、なんらかの機能を有する表面構造を成形させる試みがなされてきている¹¹⁾。例えば、シャフトの摺動面に、V字形状の微細な形状¹²⁾やディンプル構造¹³⁾を成形させることで、接触部で良好な潤滑状態を維持し、製品表面の磨耗を抑えることが可能となっている。また、従来の鍛造を応用した緩みにくいネジの2重螺旋成形^{14), 15)}もなされており、回転塑性加工は製品の成形や材料組織の改善だけでなく製品表面への機能付与へも利用されてきている。

1.2 塑性加工による機能性表面の生成

製品の所定の表面，例えば摺動面や受圧面に対して，何らかの微細構造や材料組織などを成形し，従来よりも高機能な表面を持たせる加工方法が盛んに研究されている。塑性加工による機能性を有する表面生成は，ローラないしはボール状工具を用いて目的の表面に成形される^{16), 17)}。1928年に，蒸気機関車の車軸の仕上げ面・耐久性の向上のため，ドイツでローラ仕上げ法が発明された。この加工法は，研削で加工された面に対し，ローラ状の工具を転圧させる回転塑性加工のひとつである。加工部の表面粗さが減少すると同時に，表面近傍に圧縮応力場が残留することで，製品の疲労強度向上をもたらした¹⁸⁾。工具を転圧し，製品表面のみを変形させる加工方法は，のちにバニシング加工として確立された。そして，塑性変形を利用したバニシング加工による表面処理は，特殊な前処理を必要とせず，短時間で加工され，また品質面でも工程管理が容易になることから，適用範囲が次第に拡大してきている¹⁹⁾。しかしながら，塑性加工を利用した表面処理には，工具と材料間の接触状態が加工面の合否を決定するため，トライボロジーの考えなくしては高品質な加工は成り立たない^{20), 21)}。

バニシング加工によって得られる表面形状は，プラトー構造表面と呼ばれている²²⁾。この表面形状は，機械加工面と異なり，表面粗さの山部がローラまたはボール状工具によって材料表面を変形させ，平坦部と粗さ谷部からなる形状となっていることである。この表面形状によって，平坦部で受圧し，谷部から潤滑油の保持・供給がなされるため，摺動部に活用することで摩擦力低減に大きな効果を発揮する²³⁾。また，同時に表面粗さが大きく減少し，算術平均粗さ R_a で比較したとき元の表面粗さの 1/10 程度となり²⁴⁾，目視で鏡面に見える表面粗さとなる。多数のローラを遊星運動させ，材料表面を転圧するマルチローラ方式のバニシング加工が提案されてからは²⁵⁾，表面粗さ R_a を効果的に減少させる最適な加工条件が検討されてきた²⁶⁾。バニシング加工の加工条件は，主軸回転数，ツールの送り速度，加工荷重（バニシ圧などと呼ばれる），潤滑油などで決定される。特に，加工荷重の影響が仕上げ面の表面性状に鋭敏に現れる²⁷⁾。バニシング加工における加工荷重は，主として2通りの方法があり²⁸⁾，ローラ（またはボール）を高圧液体で保持する方法（定圧）と，マンドレルによって機械的にそれらを一定量だけ飛び出させる方法（定位）である。前者の場合，加工条件が安定しやすく均一な仕上げ面が得られるが，作動液の加圧用ポンプが必要になる。他方，後者では，ポンプなどの外部機構を必要とせず，ツール本体のみで加工が可能である^{29), 30)}。しかし，材料の振れや表面のうねりなどによってローラ（ボール）の飛出し量が一定とならず，表面性状にムラができる可能性がある³¹⁾。そのため，定位タイプの

バニシング加工では、前加工の表面性状の品質管理が重要となってくる。

機能性表面の成形は、材料表面の組織改善以外にも、表面に微細構造を成形させる工法も挙げられ、近年研究されはじめた。特に、摺動表面に長さ・深さが数 μm のディンプル(くぼみ)を成形させることで、摺動抵抗の減少や耐摩耗性の向上をもたらすことが認知されてきた³²⁾⁻³⁴⁾。しかし、たくさんのディンプルをもつディンプル構造表面をいかにして広範囲に、かつ短時間で成形させるか、その成形方法がまず問題となる³⁵⁾。

ディンプル成形に対し、レーザ加工³⁶⁾⁻³⁸⁾やミーリング加工³⁹⁾など切削加工による工法が試みられた。これらの工法では、狙った表面に規則的な配置でディンプルを加工できるため、エンジン用のすべり軸受などに適用できるよう研究が進められているが、専用機を必要とし加工時間が長く、加工したディンプルにバリが発生するなど問題点があり、改善がのぞまれているのが現状である。塑性変形によるディンプル成形もいくつか提案されており、ショットピーニング^{40),41)}や圧印加工⁴²⁾(インプリント)、転造⁴³⁾などによって成形される。これらは、軸状部品の外面を狙った加工であり、パイプ内面への加工に不向きであり、成形したディンプル周辺に盛り上りを残す。そして切削加工による工法ほどではないが、比較的長い加工時間を要する。

筆者らは、ディンプル構造表面の成形に対し、回転塑性加工による高い生産性に着目し、先のバニシング加工を応用したディンプル成形ツールを開発した⁴⁴⁾。2章で詳細に触れるが、この加工法はボール押し込みとローラバニシング加工を組合せた工法で、短時間で、かつ規則的な配置に成形できるものである。加工対象も円筒外面・内面に加え、平面へディンプル成形を行うツールも開発されている⁴⁵⁾。

1.3 ボール転がりおよびバニシング加工に関する研究

前節で述べた機能性表面である摺動面の高機能化において、ボールバニシング加工やディンプル成形では、ボール状工具によって表面組織の改質や表面構造を成形させる。これら加工中、ボールの運動は材料表面に押し込まれ、転がるという工程となる。ボールを転圧させるボールバニシング加工の場合、ボールの中心点が描く軌跡はほぼ重なることはないため、ボールバニシング加工で得られる表面品位は、究極にはボールが1回の転がりで成形できる加工表面で決定される。そのため、ボールバニシング加工をボール転がりの運動として捉えた場合、ボール状工具による材料変形、表面生成を把握することが必要となる。筆者らが開発したディンプル成形においても、個々

のディンプルは1回のボール転がりによって成形されているため、ボール転がりに関する同様の現象が重要となる。

ボール転がりに関する研究は玉軸受を模擬されることが多い。そのため、材料の変形は弾性域内とする研究報告が盛んである。玉軸受としてのボール転がりに関する研究報告は、Tabor⁴⁶⁾や石川ら⁴⁷⁾⁴⁹⁾が行っている。Taborは材料の変形が主として弾性変形内にとどまる場合、転がり抵抗は材料の弾性ヒステリシス損失に依存することを示した。石川らは、先のヒステリシス損失に加え、表面粗さのわずかな変形やごく少量の潤滑油も転がり抵抗の要因になることを調べた。

材料の変形が塑性域まで及ぶときのボール転がりの研究では、Bowden⁵⁰⁾やEldredge⁵¹⁾らによって基礎的な試験結果がまとめられている。材料に塑性変形が生ずるとき、まず問題となるのは、工具と材料間の接触圧力である。Bowdenは、鋼平面に硬い球を押し付ける試験を行い、押し込み荷重 W と平均応力 p_m (押し込み荷重から接触面積で割った値) が、Fig. 1.1 のように得られることを示した。Fig. 1.1 から、圧こんに働く平均応力は、押し込み初期では弾性的に増加し (OL 間)、圧こん全体が塑性域となるとおよそ $3Y$ (Y は材料の降伏応力) で落ち着くことがわかる (MN 間)。ボールと材料表面が接するとき、接触部で働く圧力が容易に材料の降伏応力を超えることになり、ボール転がり中でも同様の値となる。

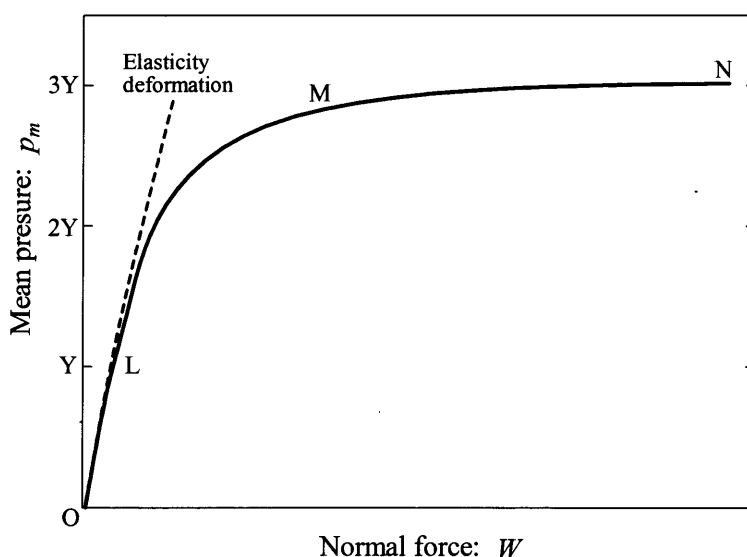


Fig. 1.1 Relation between W and p_m ⁵⁰⁾

Eldredge らは、並行に保持した 2 つの試験片の間に硬い球を挟み、球の転がり試験を行い、球転がり時の加工荷重や球によって成形される溝形状 (グループ) とその表面について論じた。この球転がり試験でも球の転がり抵抗に焦点が集まった。水平荷重の大半は球転がりによって材料を変形させるのに要する仕事量とされ、接触部の潤滑状態には依らないという結果となった。また、同一の軌道上で球の転がす回数を増加させた場合、溝形状表面の中心部で過度なせん断変形が生じ、最終的に溝の表面に剥離を引き起こした。ボール転がりをを用いて試験を行った研究報告では、玉軸受の性能評価としてボール転がりを捉えることが多く、軸受の転がり抵抗が議論される。こうした側面の研究報告において、ボールと被加工材間の接触部で生じる摩擦挙動や成形される加工表面はあまり詳細には議論されていない。

ボール転がりによって成形される加工表面の評価は、ボール転がり試験の観点からではなく、バニシング加工の試験結果⁵²⁾⁻⁵⁴⁾、すなわち、何度もボールが転がって得られた加工表面として調べられることがほとんどである。バニシング加工の研究報告は、種々の金属材料に対し、材料表面の硬度や粗さを最適にさせる加工条件が検討されてきており、定性的に加工条件と得られる結果について簡単にまとめられている。また、近年ではバニシング加工による表面成形は FE 解析⁵³⁾からも検討されてきている。Röttger⁵⁵⁾は、HRC60 以上の高硬度材へのバニシング加工について、近似的に 2 次元 FE 解析を適用した。切削加工は主に被加工材の表面に引張応力を残留させるが、バニシング加工後はこれが圧縮応力に変わることを解析結果より示した。Altan^{56), 57)}らは、種々の加工条件がバニシング加工後の表面粗さにどう影響が現れるかを解析し、解析結果と実験値が定性的に一致することを示した。

以上、ボール状工具を活用した表面生成の研究報告では、バニシング加工の点から議論されてきた。バニシング加工の加工条件と得られる加工結果を知ることは、実用的な面でたいへん有益である。しかしながら、先にも述べたようにバニシング加工で得られる加工表面は、ボール転がりによって得られる加工表面によって決定され得る。そのため、ボール状工具による材料表面の流動という巨視的な視点に加え、表面粗さに着目した微視的な観点からも、ボール転がりを議論しなければならない。また、実際のバニシング加工中のボールには、切削工具での刃先と同じように適切な送り速度が与えられる。送り速度が存在するために、ボールと材料間で純転がりではなくなり、すべりが生じる。ボールに働くすべりは、ボールを被加工材に押し付けるのに必要なバックアップローラなどの保持部品からも生じる。こうしたボールに働くすべりはボールの回転運動において抵抗となり、ボールと被加工材間の接触部での摩擦力を大き

くする。そのため、接触部で生じる摩擦力はバニシング加工で成形される材料表面に影響を及ぼすと考えられ、ボールの回転運動にも外力として働き、ボールに強制的な回転運動を生じさせられると思われる。

材料表面の変形は、接触部で生じる摩擦力が特に重要な因子となる。摩擦力が表面変形にどう影響するか、初等理論から検討され、摩擦力が存在することで表面粗さが減少することが Wanheim ら⁵⁸⁾によって示された。その後、実験的にも同様の結果⁵⁹⁾が確認され、また、工具と材料間に介在する潤滑油が材料表面の変形を阻害することも明らかにされた⁶⁰⁾。こうした研究報告の多くは、平滑工具を用いた圧縮を主体とした試験方法であるが、被加工材の表面粗さ凸部が工具によって押しつぶされ材料表面が変形されることから、ボール状工具でも同じ結果が得られると思われ、平滑工具との差異を含め、ボール状工具において摩擦力を伴うときの加工表面を評価・検討することも重要な課題である。

1.4 研究の目的および本論文の構成

機能性表面の生成における回転塑性加工の有効性に触れ、バニシング加工やディンプル成形がボール転がりを活用した加工であることを述べた。塑性加工によって成形される加工表面は、1.2 節で述べたように加工中のトライボロジーがその合否を決定した。本研究の目的は、鋼平面上をボールが転がる時の材料表面の変形と2者間の摩擦挙動について照準を合わせ、ボール転がりを利用した材料表面の成形に及ぼす工具-被加工材間の摩擦挙動の影響を解明することを目的とする。本論文では、まずボール転がりを利用したマイクロディンプル加工を行い、ボールと被加工材の接触状態によってディンプルの分布や深さが異なることを示し、接触部で生じる摩擦力がディンプル成形に大きく影響していることを述べる。次にボール転がり摩擦試験を製作し、加工荷重やボール押し込み量など測定結果について述べる。ボール転がりでの摩擦挙動には、ボールの回転運動として材料との接触によって自由に回転するときと、外力によってボールが強制的に回転される状況とを分けて考慮する必要がある。こうした状況を踏まえ、製作した転がり摩擦試験機で自由回転と強制回転の条件でボール転がりの試験を行う。強制回転の場合、自由回転と異なり、接触部で生じる摩擦力が材料表面の変形を積極的に促すことを示す。そして、スペクトル解析を用いて、成形される加工面粗さの粗さ曲線について論ずる。

各章の内容を以下に示す。本論文は、全7章より構成されている。また、Fig.1.2に

本研究のコンセプトを示し、各章の位置づけについてもまとめた。ここでは、ボール転がりによる摺動面の表面成形の特徴、その成形加工における問題点、そして問題点の解決手段と本研究の目的について示し、各章の内容の説明については以下に示す。

第1章の序論では、Fig. 1.2 の上部に図示したようにボール転がりを利用した機能性を有する表面生成の加工方法としてバニシング加工とディンプル成形について述べ、仕上げ面の向上や摺動特性の優れる表面生成のためには、ボールと材料表面間の接触部に起こる摩擦挙動が重要であることを述べる。

第2章は、ボールバニシング加工の応用的な試みとして開発したディンプル成形ツールを紹介する。個々のディンプルは、ボール転がりによって成形され、ボールと材料間の摩擦挙動がその成形に影響を与えることを示す。

第3章では、第2章で問題となったボールと被加工材間の摩擦挙動に着目し、初等理論とFE解析を用いて、ボール状工具に働く垂直応力・せん断応力からボールの水平荷重・垂直荷重について検討する。表面の材料流動やボール転がりによって材料に導入されるひずみ分布を示す。

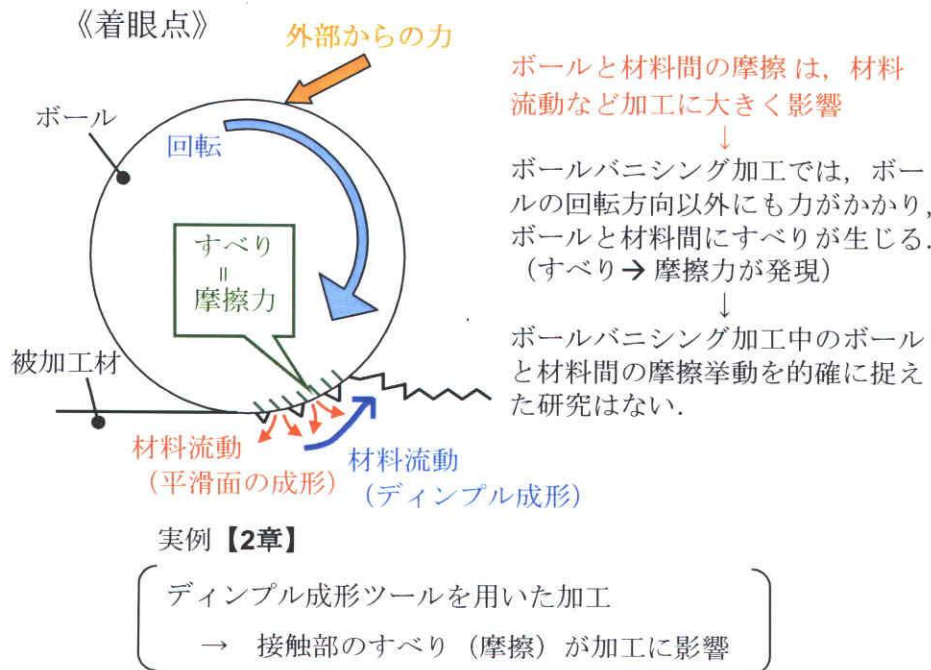
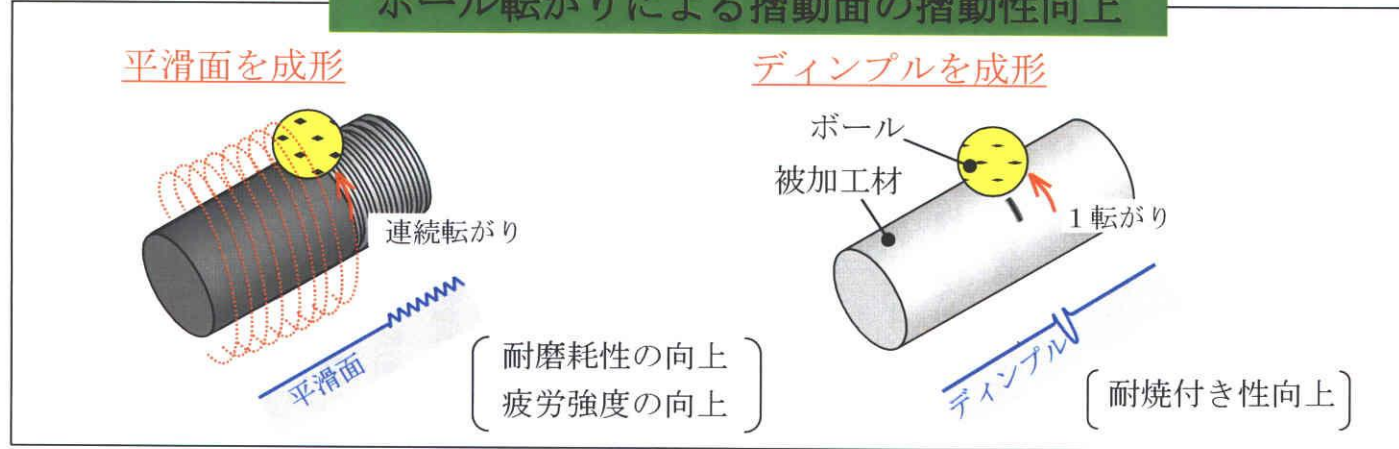
第4章では、ボール転がりの摩擦試験機的设计および製作について述べる。FE解析結果から、転がり摩擦試験機の仕様を決定し、本論文で要求する試験機の基礎的なデータを示す。また、FE解析結果から接触部の差異はボールの周速に現れたことから、それを測定可能なよう設計した。

第5章は、製作した転がり摩擦試験機を用いて、ボールが被加工材との接触のみの力で転圧するとき(自由回転)のボール転がり試験を行い、測定された加工荷重とボールの周速を示す。測定結果からボールと材料間の摩擦挙動を論じる。

第6章は、ボールと被加工材との間に任意のすべり速度を持たせて転圧を行い、すべり速度の違いによる摩擦挙動についてと、すべりによって発現した摩擦が被加工材の塑性変形に及ぼす影響について明らかにする。さらに、ボールと被加工材間にすべりを与えて摩擦挙動を捉えることは、ボール転がりを活用した実際の加工においてボールと被加工材間にすべりが生じてしまう現象についての解明にもつながる。また、自由回転と比較して、すべり速度または摩擦力の存在によって、それぞれの仕上げ面がどのように異なるかを明らかにし、強制回転で得られる仕上げ面では谷部の消滅が目立つことを示す。

第7章は、本論文の総括として、本研究で得られた結果をまとめ、今後の課題と将来の展望について述べる。

ボール転がりによる摺動面の摺動性向上



《目的》

ボールと材料間の摩擦挙動に照準を合わせる。

↓
初等解析・FE解析による摩擦挙動の検討【3章】

↓
研究には、ボールと材料間のすべり速度、摩擦力、接触面圧の測定可能な摩擦試験機が必要【4章】

〈ボール転がりの摩擦試験〉

- ① ボールが材料との接触により自由に回転して材料を転圧【5章】
- ② ボールが外部からの力によって回転して材料を転圧【6章】

↓
ボール転がりを利用した材料表面の成形に及ぼすボール-材料間の摩擦挙動の影響を検討

Fig. 1.2 Concept of study

第2章 ボール転がりを利用したディンプル成形^{1),2)}

2.1 緒言

ボール転がりを利用した加工には、ボールバニシング加工があげられることを、前章で紹介した。本章では、その加工の応用的な試みとして、ディンプル成形ツールについて述べる。ここでディンプルとは、深さ数 μm のくぼみのことをいう。ディンプル成形は本ツール以外にも、レーザ加工やミーリング加工、圧印加工などを利用した加工があげられる。その中でも本ツールは、バニシング加工との組合せによってディンプル成形を行うことで、加工を適用できる範囲が広く、円筒内面・外面・端面などを短時間で安定して仕上げることができ³⁾、被加工材表面の耐摩耗性や疲労寿命を向上させることができる特徴を持つ⁴⁾。

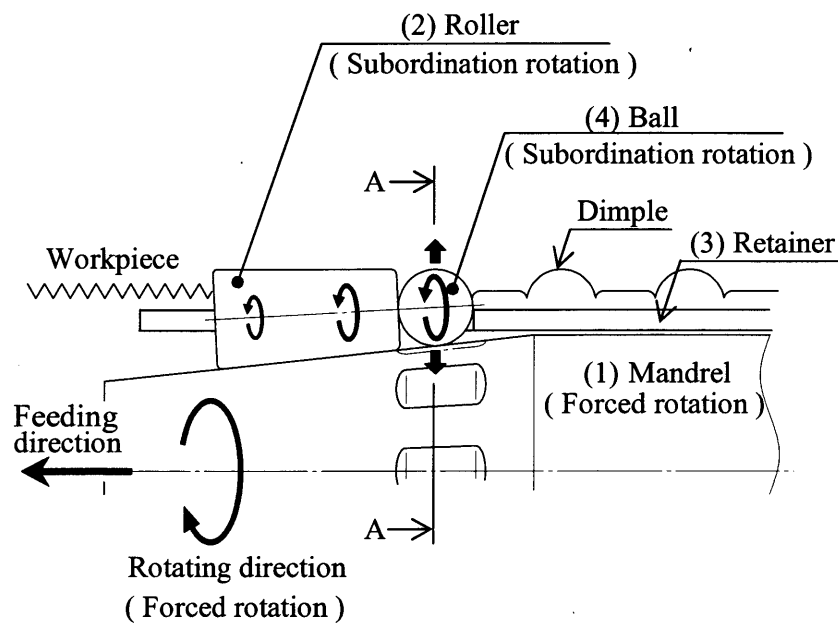
バニシング加工で成形される仕上げ面は、平坦部と谷部から構成され、谷部に潤滑油を捕捉させることで低摩擦を実現する⁵⁾。しかしながら、平坦部での油膜切れによる耐焼付性の低下が問題となる^{6),7)}。ディンプル成形ツールは、谷部からの潤滑油供給をより効果的に活用するための表面成形用に開発された⁸⁾。このツールはローラバニシング加工とボール押し込み加工を組合せた工法で、ボール押し込みによるディンプルの均一な成形をパイプ内面に施すことを目的とするものである。本章では、ボールバニシング加工の応用的な試みとして開発したディンプル成形ツールを用いて、ボール転がりによって成形されるディンプルについて、ボールと材料間の摩擦挙動がディンプル成形に影響を与えることを示す。

2.2 マイクロディンプル成形加工について

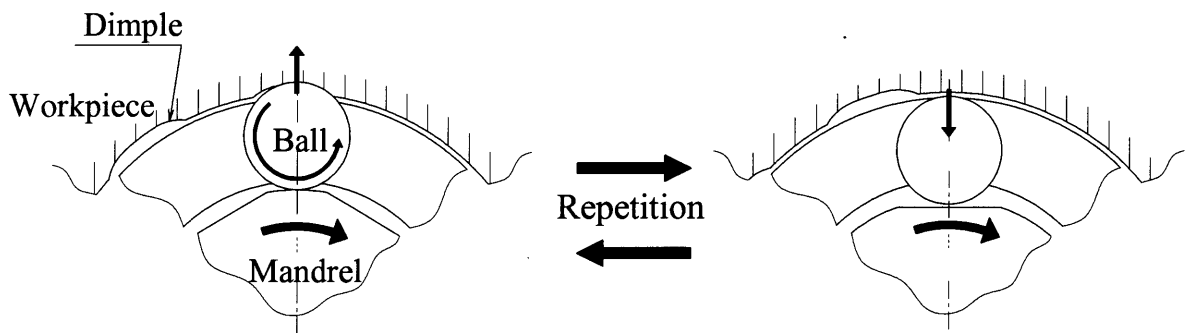
2.2.1 マイクロディンプル成形加工の原理

マイクロディンプル成形加工 (以下、ディンプル加工と呼ぶ) は、ボール転がりによる材料表面の転圧を断続的に行なうことで、パイプ内面に深さ数 μm の規則的に配列をしたくぼみを成形する加工方法である。Fig. 2.1 にマイクロディンプル成形ツールの加工原理図を示す。(1) マンドレルを回転させると、マンドレルと被加工材に挟まれている (2) ローラが従属して遊星運動のように回転し、それに合わせてローラを保持している (3) リテーナも回転する。(4) ボールもローラと同じリテーナに保持されていることから、ボールもマンドレルの円周に沿って遊星運動する。(1) ~ (4) は、駆動機の動きが伝達する順番になる。ここで、ボールと接触している箇所のみマンドレルの断面形状は多角形となっているため、マンドレルの回転によってボールは外側

へ繰り返し飛び出す。ボールが外側に飛び出したときに、ボールは材料表面に押付けられ、パイプ内面にディンプル（くぼみ）を成形する。このディンプルはマンドレルとリテーナの回転周期に合わせて成形されるため、規則的な配置となる。しかしながら、このツールの機構上、ローラとボールの径が異なるためにボールとマンドレルには周速差が生じてしまい接触部ですべりが発生することになる。そのため、ボールはマンドレルから受ける摩擦力によって強制的に回転させられることが考えられる。



(a) Feeding direction



(b) Section A-A

Fig. 2.1 Processing principle of roller-burnishing tool and dimple-forming tool

2.2.2 マイクロディンプル成形ツールの仕組み

マイクロディンプル成形ツール（以下ではディンプルツールと呼ぶ）の詳細図を Fig. 2.2 に示す。ディンプルツールは、ローラとボールが自在に回転できるようにリテーナで保持され、シャンク側ほど外径が大きくなるテーパを持たせたマンドレル円周上に等間隔に配置されている。ローラ後端にボールを設置し、ボールと接触するマンドレルの断面形状は六角形となっている。Fig. 2.3 のディンプル成形加工法の説明図に示すように、ツール径は厚みの異なる 6 枚のアジャストリング (Fig. 2.2 参照) の並びを組み換え、マンドレルテーパ上のローラの位置を前後に移動させることにより、最小単位 $2.5 \mu\text{m}$ で $50 \mu\text{m}$ の範囲でツール径を微調節できる。加工は、パイプ内径よりツール径を数 μm ~ 数十 μm 大きく設定し、ディンプルツール又はパイプを回転させて、パイプ内面にディンプルツールを通過させる。Fig. 2.3 よりまず①ローラが被加工材と接触し内面にバニシング加工を施す。続いて②ボールによりディンプル成形をする。次に戻し送りを掛けると、③ボールによりディンプル成形をする。最後に④ローラによってディンプル成形の時に発生するディンプル溝周辺の盛り上がりを平滑化する。ここで、②と③で成形したディンプルの位置に関係性はないため、加工条件によっては 2 つのディンプルが重なることも起こりうる。

Fig. 2.4 にディンプル成形した加工表面のディンプル分布と加工条件の関係図を示す。ここで、各記号は、

- a : Fig. 2.2 の B-B 断面の六角形頂点部分の長さ
- b : Fig. 2.2 の B-B 断面の多角形の頂点間の距離
- f : ツール送り速度
- K : マンドレル多角形状部の多角数
- L_1 : ツール回転方向のディンプル溝の長さ
- L_2 : 同一のボールで成形するディンプルの間隔
- p : ディンプルの送りピッチ

となっている。このディンプル成形の推定図は、マンドレルの回転速度でローラが回転したと仮定して得られる計算結果である。ボールはマンドレルの多角形の頂点付近を転がる間、外側に張り出し被加工材に押し付けられディンプル成形するため、長軸寸法 L_1 の楕円形状をしたディンプルを成形する。さらに、寸法 L_2 の間隔をあけて、次のディンプルを成形する。このようにディンプルの形状および送りピッチ p は、送り速度等の加工条件およびマンドレル形状、ボール径、ボール数等を変化させて制御することができる。

Fig. 2.5 にディンプルツールと被加工材をそれぞれフライス盤のスピンドル部とテーブル上の 3 爪スクロールチャックに取り付けて加工している様子を示す。また、本ツールは、旋盤やボール盤等にも取り付けて使用できる。

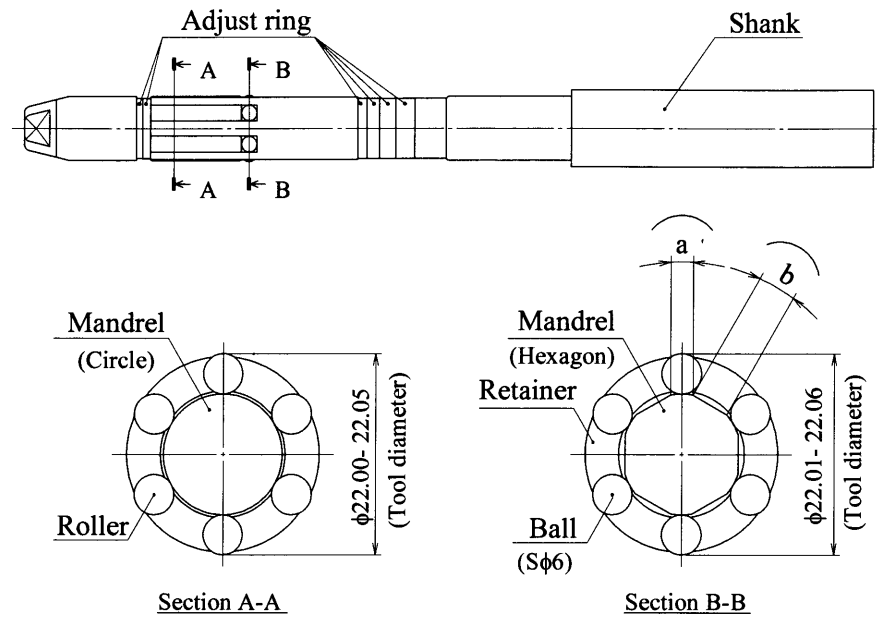


Fig. 2.2 Dimensions of dimple-forming tool

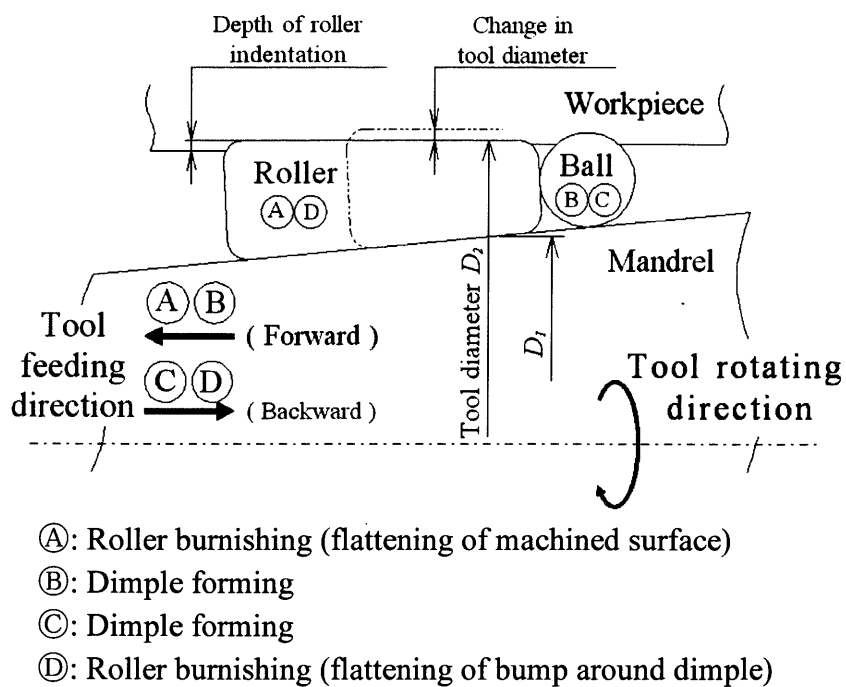


Fig. 2.3 Processing steps of dimple forming

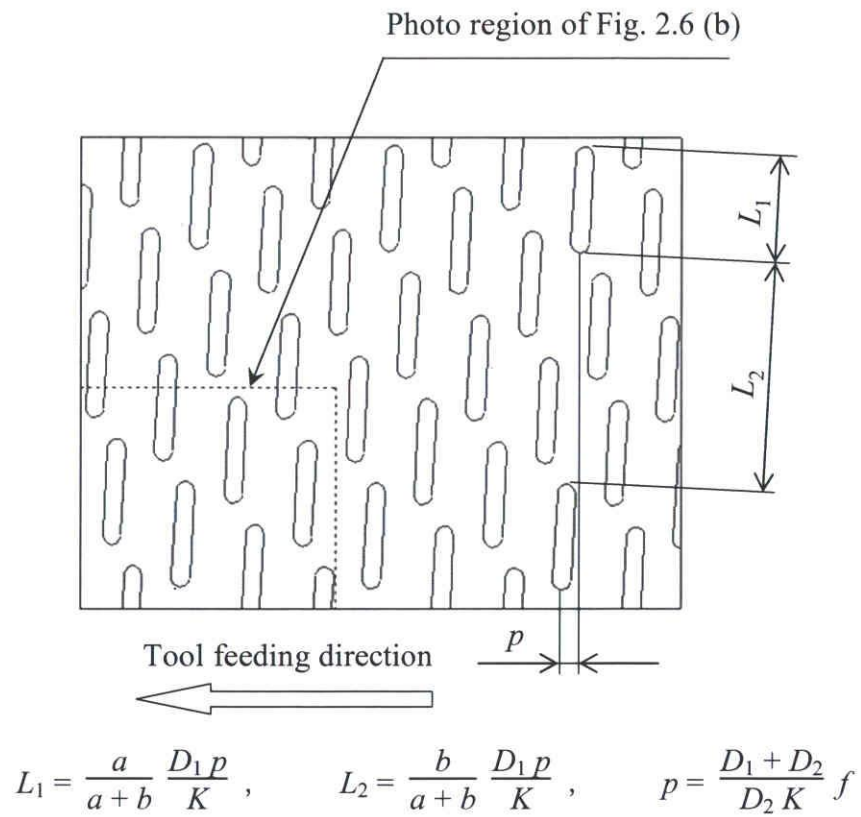


Fig. 2.4 Illustration of distribution of dimples on processed surface and processing condition

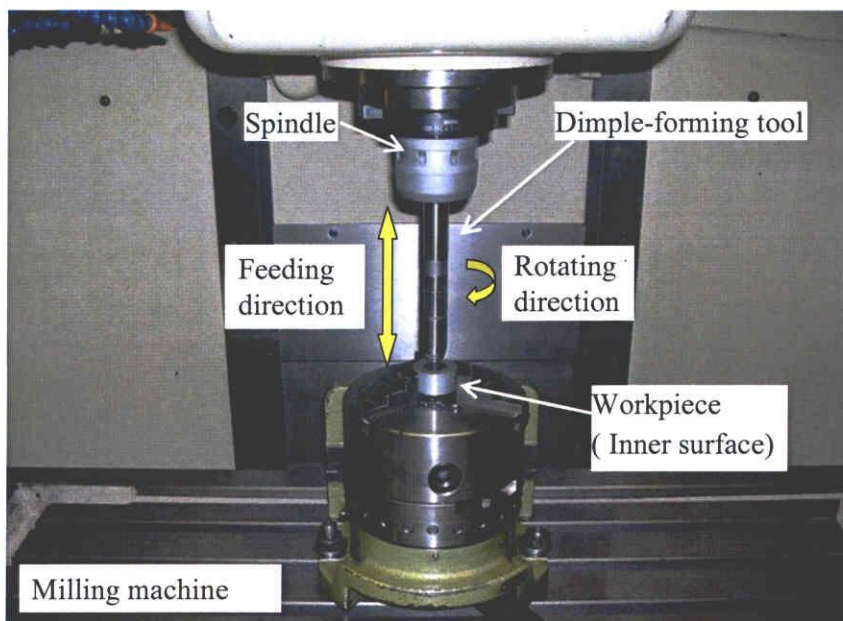


Fig. 2.5 Photograph of setup with the dimple-forming tool

2.3 マイクロディンプル成形加工の加工条件

本章で使用する被加工材はA2017である。A2017材の化学成分を Table 2.1 に示す。被加工材の硬度は 144 HV であった。被加工材は、内径 22 mm、長さ 30 mm の円筒状に機械加工される。円筒内面の表面粗さは、2 μmRz であり、この内面に本ツールによるディンプル加工を行った。ディンプル加工の加工条件は、Table 2.2 に示す範囲である。また、前進送り速度と戻し送り速度は、同一速度とした。

Table 2.1 Chemical composition of A2017 (mass%)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0.53	0.19	3.87	0.54	0.6	0.02	0.02	0.03	bal.

Table 2.2 Experimental condition

Inner diameter of workpiece, mm	22
Forward feed rate, mm/rev	0.01 – 1.9
Backward feed rate, mm/rev	0.01 – 1.9
Speed of rotation, mm^{-1}	70 – 1050
Roller indentation depth, μm	0 – 25
Ball indentation depth, μm	2.5 – 30
Lubricant	Mineral oil

2.4 試験結果

2.4.1 マイクロディンプル成形加工前後の表面観察結果

ディンプル加工前後の被加工材表面観察と表面粗さの結果を Fig. 2.6 に示す。パイプ内面をディンプル成形加工することで、加工前の凹凸はなくなり、ディンプル周辺に盛り上がりのない深さ $5\ \mu\text{m}$ 程度のディンプルが成形できた。これは、ツール戻り時のローラバニシングの平滑作用によるものである。また Fig. 2.3 の㊸と㊹で成形したディンプルが重なり合う箇所も見られた。ディンプルツールが前進送りのみのときは、ディンプルはローラバニシング加工されていないため、ディンプル周辺に $3\ \mu\text{m}$ 程度の膨らみが観察された。このときの加工条件でディンプルの分布を推定した Fig. 2.4 と比較すると、推定に近いディンプルが成形できていた。ただしローラとマンドレル、ローラと被加工材の接触部では、すべりが起こっているため、若干のずれは生じている (L_1 寸法の推定値: $1.7\ \text{mm}$, 実測値: $1.6\ \text{mm}$)。ここでは、ボールとマンドレルの間で周速の 5% 程度のすべり速度が発生していることが予測される。

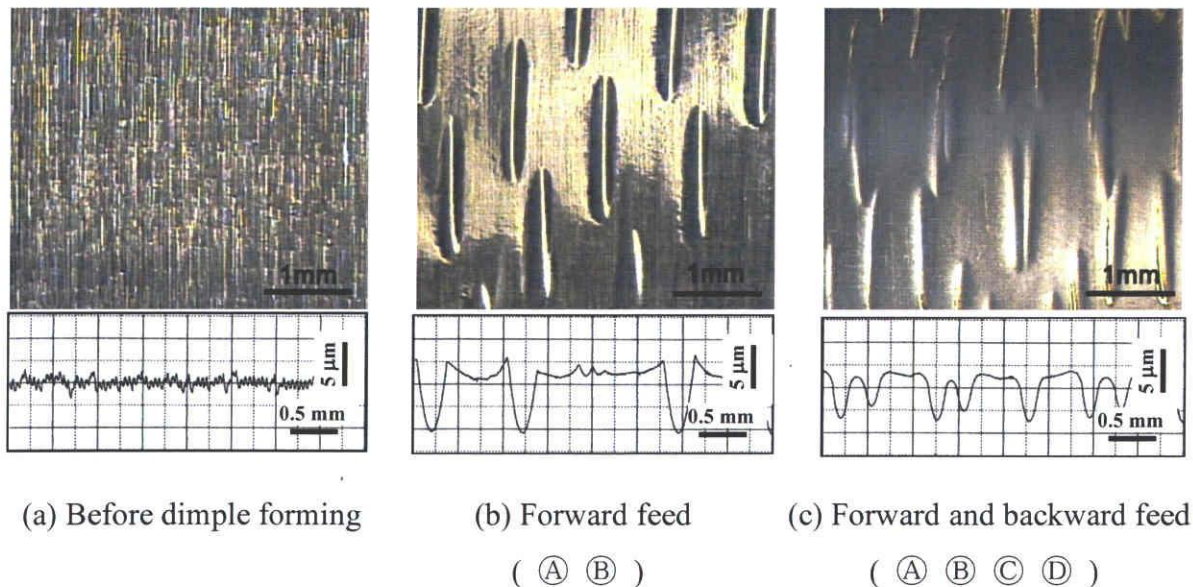


Fig. 2.6 Surface profiles and appearances of surface after dimple forming

2.4.2 押込み量とディンプル成形の関係

ディンプル深さは、ボールとローラの押込み量によって変化する。Fig. 2.7 に押込み量とディンプル深さの関係を示す。送り速度以外の加工条件は、回転数 1050 min^{-1} 、送り速度 1.5 mm/rev とした。加工は、ツール前進送りのみとツール前進 + 戻し送りで行い、それぞれの結果を○と●でプロットした。これより、ツール前進送りのみで加工を行った場合、押込み量が大きくなるほど、ディンプル深さも大きくなった。それに対しツール前進+戻し送りで加工を行った場合、ボール押込み量が $10 \mu\text{m}$ 以下ではボール押込み量が大きくなるほど、ディンプル深さも大きくなるが、ボール押込み量が $10 \sim 20 \mu\text{m}$ では、ディンプル深さはほぼ一定となり、ボール押込み量が $20 \mu\text{m}$ 以上では、ボール押込み量が大きくなるほどディンプル深さが小さくなった。そしてボール押込み量 $30 \mu\text{m}$ のときディンプルは成形できなかった。ここでは、㊸、㊹の加工で成形したディンプルが㊺のバニシング加工で消えたことになる。

ボール押込み量はローラ押込み量より常に $5 \mu\text{m}$ だけ大きく設定してある。ボール押込み量が小さい場合、ローラは加工に寄与せず、ディンプル深さはボール押込み量に伴って増加する。ボール押込み量をさらに大きくするとボールとローラ押込み量の差が一定であるため、ローラによる加工が進んでもツール前進 + 戻し送りで加工後のディンプル深さは $5 \mu\text{m}$ と一定である。ただし、㊸、㊹のディンプル成形と、㊺のバニシング加工による材料流動の量は押込み量が大きいほど増加する。ボール押込み量が $20 \mu\text{m}$ 以上でディンプル深さが減少したのは、ディンプル深さに対して㊺加工中の塑性流動が大きくなるためである。

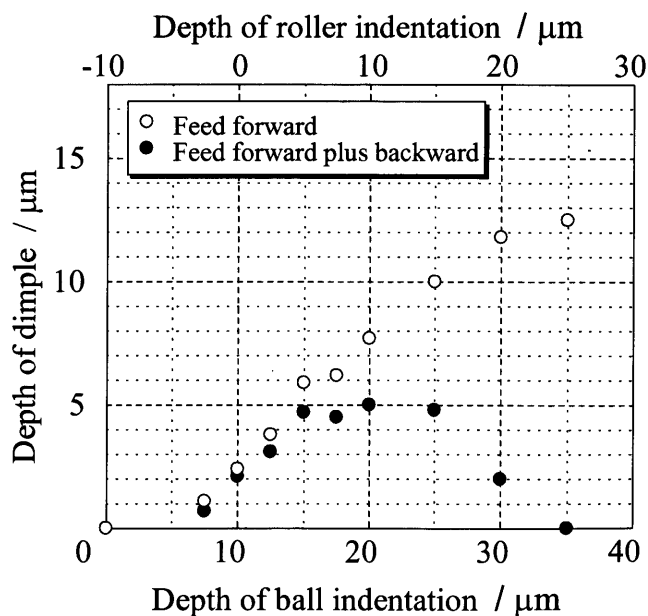


Fig. 2.7 Relation between depth of indentation and depth of dimples

2.4.3 送り速度とディンプル成形の関係

ディンプル成形加工条件で送り速度が小さい場合、Fig. 2.4 に示したようにディンプル間のピッチが小さくなりディンプルが重なり合う。そのため切削面のような凹凸の表面となり、ディンプル深さは小さくなる。本ディンプルツールを用いた場合、Fig. 2.8 の送り速度 0.6 mm/rev での推定結果に示すように、送り速度 0.6 mm/rev 以下でディンプルが重なり合う計算となる。そこで、ツール前進送り速度を 0.01 ~ 1.9 mm/rev で変化させたときの加工面を比較した。ツール送り速度とディンプル深さとの関係を Fig. 2.9 に、ツール送り速度 0.1 mm/rev で得られた加工面の測定・観察結果を Fig. 2.10 にそれぞれ示す。送り速度以外の加工条件は、回転数 1050 min^{-1} 、ローラ押し込み量 $5 \mu\text{m}$ 、ボール押し込み量 $10 \mu\text{m}$ とした。ツール送り速度 0.01 ~ 0.5 mm/rev では、ディンプルどうしが重なることでディンプル深さが小さくなり、その程度は送り速度が小さいほど大きく、送り速度 0.01 mm/rev では、ローラバニシングと同程度の平滑な表面状態となっていた。それに対し、送り速度 1.0, 1.5, 1.9 mm/rev では、ディンプルどうしが重なり合わず、盛り上がりのない深さ約 $5 \mu\text{m}$ ディンプルが成形できた。

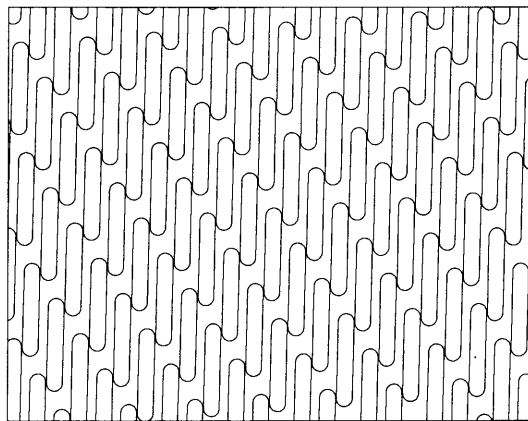


Fig. 2.8 Illustration of distribution of dimples on processed surface (Feedrate: 0.6 mm/s)

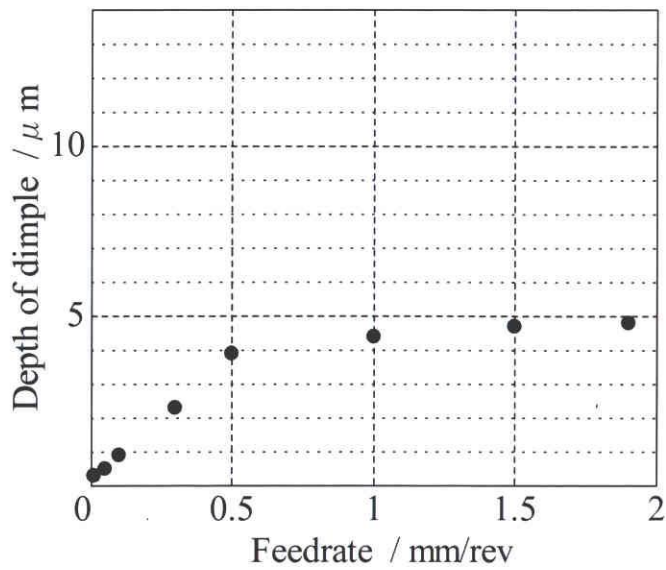


Fig. 2.9 Relation between feedrate and depth of dimples

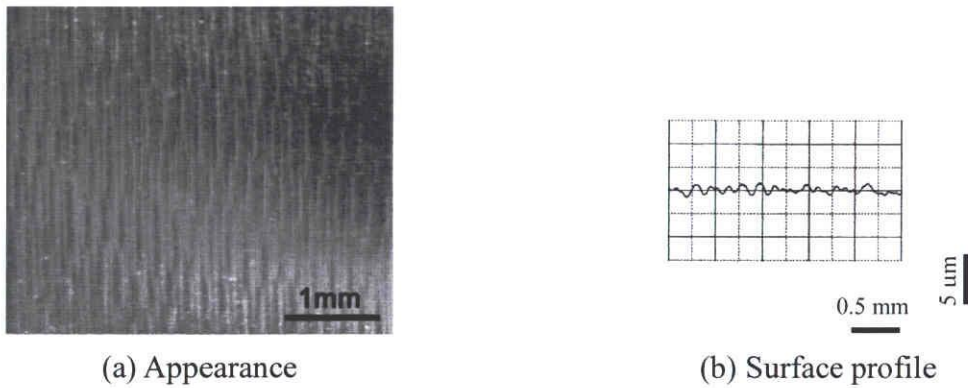


Fig. 2.10 Roughness profile and appearance of surface after dimple forming

2.4.4 回転速度とディンプル成形の関係

ツールの回転速度を変化させたときの加工面を比較した。Fig. 2.11 に回転速度を $70 \sim 1050 \text{ min}^{-1}$ で変化させて加工したときの、回転速度とディンプル深さとの変化を示す。回転速度の大きさに関わらず、成形されるディンプル深さはほぼ一定となっており、ツール回転速度は、成形するディンプルの深さに大きな影響は与えないといえる。

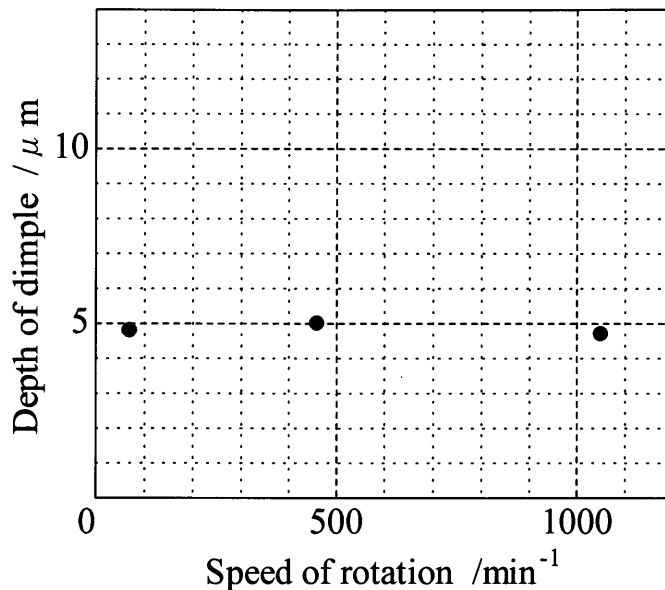


Fig. 2.11 Relation between speed of rotation and depth of dimples

2.5 結論

A2017 材のパイプ内面をディンプル成形加工することで、深さ 1~5 μm でディンプル周辺に盛り上がりのないディンプルが成形できた。しかし、ボール押し込み量が最大となる 35 μm ではディンプルは成形できなかつた。これは、ボールによってディンプルを成形する大きさより、ローラによって表面を平滑にする作用が強く、最終的に平滑な面となった。また、ツール前進送り加工後の場合、ディンプル周辺には膨らみの発生が確認できた。その後のローラバニシングで潰すことができるが、膨らみを潰すためのローラバニシングによってディンプルそのものが平滑になってしまう条件が存在することを考慮すると、その膨らみが小さいなることが望ましい。また、パイプ内面に実際に成形されるディンプルの位置は設計値と若干のずれが確認でき、接触部のすべりが誤差の要因になることがわかつた。このとき、ボールは自由に回転しているとは言えず、マンドレルやリテーナから強制的に回転させられている状態となっているため、ボールと被加工材、またボールとマンドレルの間ですべりが生じたことが要因であつた。

ディンプルの形状はボールが被加工材を転圧することによって成形されることから、加工中のボールの回転挙動、ボールと被加工材の接触面での面圧や摩擦挙動、そしてそのときの材料変形について把握する必要がある。

第3章 ボール転がりの初等理論およびFE解析¹⁾

3.1 緒言

前章では、ボールバニシング加工の応用的な試みとして、ディンプル成形を述べた。結果、ディンプルを成形するボールと被加工材との間ですべりが大きく生じているため、すべりが生じていないとして計算される設計値とはディンプルの分布とは異なってきた。分布が偏ることで、局所的に平坦部が集中し、そこでの凝着が起りやすくなることが考えられる。前章で示したディンプル成形におけるボールは、円筒内面へボールを押し付け、所定の距離だけボールが転がるという工程が断続的に行われる。これは円筒内面を鋼平面上に置き換えたとき、ボールの自由転がり運動とみなすことができる。本章は初等理論とFE解析を適用しボール転がりにおける摩擦挙動について検討する。

3.2 ボール転がりに働く力

ボールが鋼平面上を転がり、被加工材の変形が塑性域に達する場合、ボールに働く力は、被加工材を押しのけることによる掘起こし力とボール - 被加工材間で生じる摩擦力の2種類存在する (Fig. 3.1)。ボールバニシング加工のように、ボールが高圧液体で保持される場合、ボールは容易に自由回転できるため、ボールが受ける力は前者が大半を占め、摩擦力は小さいと思われる。掘起こし力によって、ボールには水平荷重と垂直荷重、それぞれの成分が働くものの、その合力はボールの中心に向く²⁾。そのため、ボールを回転運動させる力とは、2者間で生じる摩擦力になる。回転運動も、ボールの回転軸でモーメントがつり合う³⁾。ボールバニシング加工としてのボール転がりを考えた場合、掘起こし力の評価が重要となってくる。

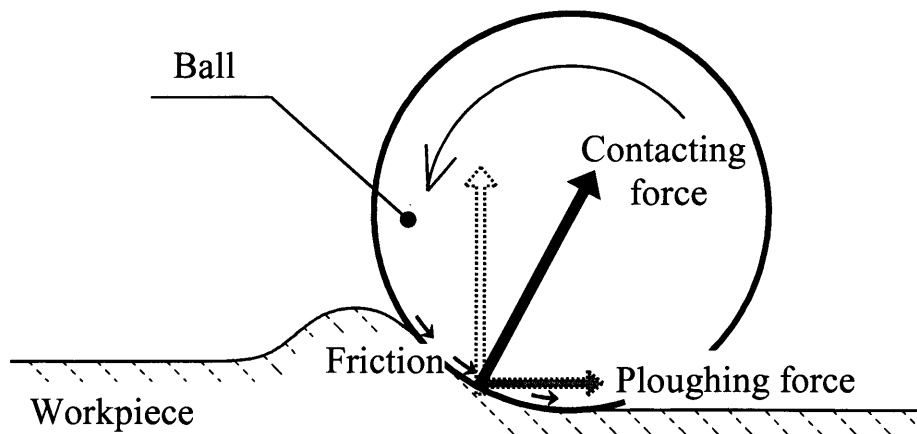


Fig. 3.1 Schematic illustration of ball rolling

3.2.1 理論モデルによる加工荷重

ボールの回転運動は、2者間の摩擦状態で決定されるため、ボールの自由回転を考慮した解析は困難となる。しかし、ボール転がりではボールの回転運動に依らずボールに常に掘起こし力が作用しており、ボールが自由回転するとき、ボールに働く荷重は掘起こし力が大半を占めると考えられる。また、ボールが強制的に回転され、ボールに働く摩擦力の向きが既知の場合、摩擦力をせん断応力として捉えることで、ボールに働く加工荷重を見積もることができる。ボール状工具による材料の加工荷重について、初等理論より SUH がまとめており⁴⁾、それは以下のように説明される。今、Fig. 3.2 に示す微小面積 dA に働く力に着目する。このとき、水平方向 dL と垂直方向 dF は (垂直応力 p 、せん断応力 s とする)、

$$dL = p \sin \beta dA \quad (3.1a)$$

$$dF = p \sin \beta \cos \gamma dA + s \sin \gamma dA \quad (3.1b)$$

で表現される。ここで dA は $dA = r^2 \sin \beta d\beta d\gamma$ であり、 r はボール半径である。式 (3.1) をボールと被加工材との接触面積で積分すれば、ボール全体に働く垂直荷重 L と水平荷重 F を算出することができる。まとめると、

$$L = \frac{\pi w^2}{8} p \quad (3.2a)$$

$$F = pr^2 \left\{ \sin^{-1} \frac{w}{2r} - \frac{w}{2r} \left[1 - \left(\frac{w}{2r} \right)^2 \right]^{1/2} \right\} + 2sr^2 \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{w}{2r} \right)^2 \right]^{1/2} \right\} \quad (3.2b)$$

で得られる。

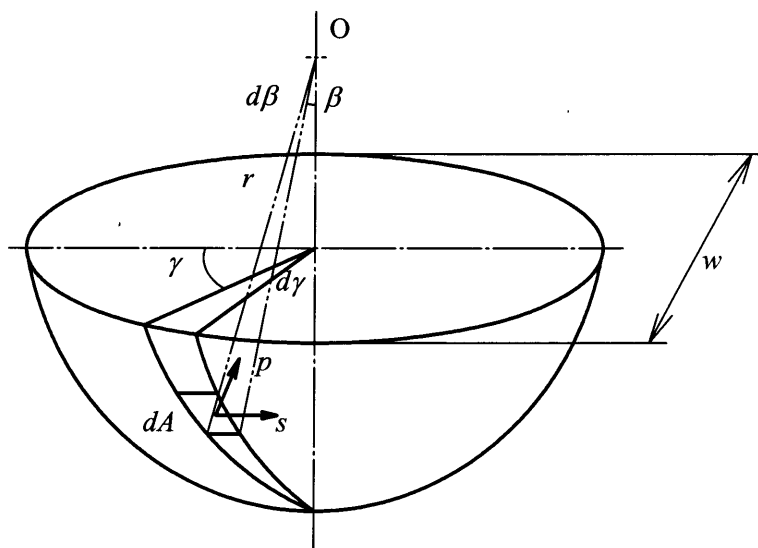


Fig. 3.2 Ploughing model of sphere-shaped tool

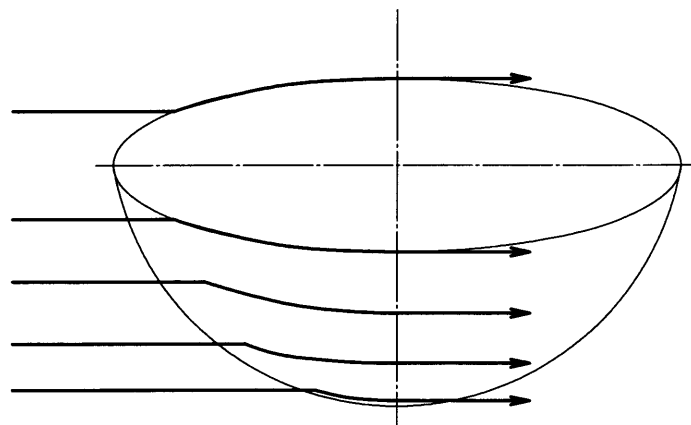
ところで、微小面積に働くせん断応力は Fig. 3.2 中で水平方向のみに作用しているため、式 (3.2a) の垂直荷重はせん断応力に依存しない形となっている。これは Fig. 3.3 (a) のようにボール状工具によって、材料が左右に分流する材料流動を仮定しているためであり、このとき、せん断応力項は水平方向のみに働く。しかし、Fig. 3.3 (b) のように、ボール直下への材料流動するパターンも考えられる。上式のせん断応力を含む項を修正し、それぞれの各荷重を算出した (Fig. 3.3 (b) を潜流モデルと呼称する)。微小面積 dA に働くそれぞれの荷重は (詳細な導出過程を付録に載せる)、

$$dL = p dA \cos \beta - s dA \sin (\beta \cos \gamma) \quad (3.3a)$$

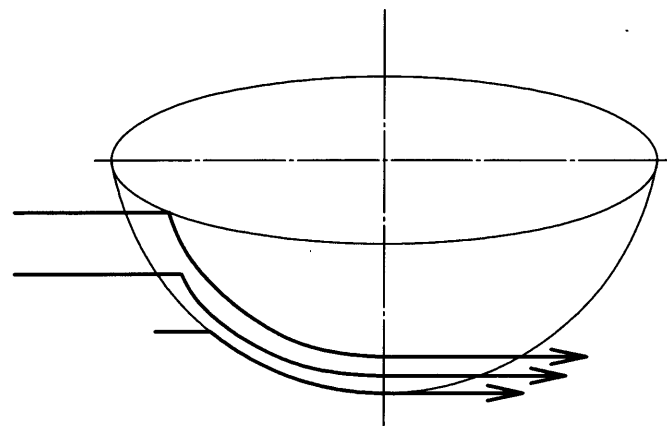
$$dF = p dA \sin \beta \cos \gamma + s dA \cos (\beta \cos \gamma) \quad (3.3b)$$

に書き換えられる。

式 (3.3) を接触面積で積分すれば、潜流モデルにおける垂直荷重と水平荷重が得られ、それぞれ式 (3.4) と式 (3.5) となる。



(a) SUH model for Eq. 3.2



(b) Underflow model for Eq. 3.3

Fig. 3.3 Material flow

$$L = \frac{\pi w^2}{8} p - 2L_2(s) \quad (3.4a)$$

$$F = pr^2 \left\{ \sin^{-1} \frac{w}{2r} - \frac{w}{2r} \left[1 - \left(\frac{w}{2r} \right)^2 \right]^{1/2} \right\} + 2F_2(s) \quad (3.4b)$$

ただし,

$$L_2(s) = \frac{sr^2\pi}{2} \left(\frac{C}{2} - \frac{1}{4} \sin 2C \right) + \frac{sr^2\pi^3}{96} \left(\frac{C}{2} \cos 2C - \frac{1}{4} \sin 2C \right) \quad (3.5a)$$

$$F_2(s) = \frac{sr^2\pi}{8} (1 - \cos 2C) + \frac{sr^2\pi^3}{48} \left(\frac{C^2}{4} - \frac{C}{4} \sin 2C - \frac{1}{8} \cos 2C + \frac{1}{8} \right) \quad (3.5b)$$

$$C = \sin^{-1} \frac{w}{2r} \quad (3.5c)$$

3.2.2 理論モデルにおける転がり摩擦係数

前節では、それぞれのモデルにおけるボール転がりより、ボールに働く垂直荷重と水平荷重を導出した。実際のボール転がりにおける材料流動は、SUHモデルと潜流モデルの中間の状態だと考えられ、各荷重もそれに倣うと思われる。ボール - 被加工材間で働く摩擦力はせん断応力 s であり、次式で表現できる。

$$s = mk = \frac{1}{2} m Y_0 \quad (k = \frac{1}{2} Y_0 \text{ for Tresca criterion}) \quad (3.6)$$

ここで、 m はせん断摩擦係数、 k はせん断降伏応力ある。また、材料が工具によって、掘り起こされるとき、接触部で生じる垂直応力 p は、

$$p = p_0 = 3 Y_0 \quad (3.7)$$

となることが知られ、 p_0 を塑性流動圧力と呼ぶ⁵⁾。以上、式 (3.2) と式 (3.4) に、式 (3.6) と式 (3.7) を代入することで、各モデルの垂直荷重 L と水平荷重 F を降伏応力 Y_0 とせん断摩擦係数 m を用いて表現できる。式中の定数項をまとめ、 Y_0 と m で表現し、ボール押し込み量 h とトラック幅 w を式 (3.8) で関係付けると、式 (3.9) と式 (3.10) が得られる。

$$w = 2\sqrt{2rh} \quad (3.8)$$

垂直荷重 L と水平荷重 F を降伏応力 Y_0 で規格化し、ボール押し込み量 h でプロットするとそれぞれ Fig. 3.4 と Fig. 3.5 が得られる。

- SUH モデル

$$L = 3L_1Y_0 \quad (3.9a)$$

$$F = 3F_1Y_0 + \frac{1}{2}F_2mY_0 \quad (3.9b)$$

$$L_1 = \frac{\pi w^2}{8}, \quad F_1 = r^2 \left\{ \sin^{-1} \frac{w}{2r} - \frac{w}{2r} \left[1 - \left(\frac{w}{2r} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}, \quad F_2 = 2r^2 \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{w}{2r} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}$$

- 潜流モデル

$$L = 3L_1Y_0 - L_2mY_0 \quad (3.10a)$$

$$F = 3F_1Y_0 + F_3mY_0 \quad (3.10b)$$

$$L_2 = \frac{r^2\pi}{2} \left(\frac{C}{2} - \frac{1}{4} \sin 2C \right) + \frac{r^2\pi^3}{96} \left(\frac{C}{2} \cos 2C - \frac{1}{4} \sin 2C \right)$$

$$F_3 = \frac{r^2\pi}{8} (1 - \cos 2C) + \frac{r^2\pi^3}{48} \left(\frac{C^2}{4} - \frac{C}{4} \sin 2C - \frac{1}{8} \cos 2C + \frac{1}{8} \right)$$

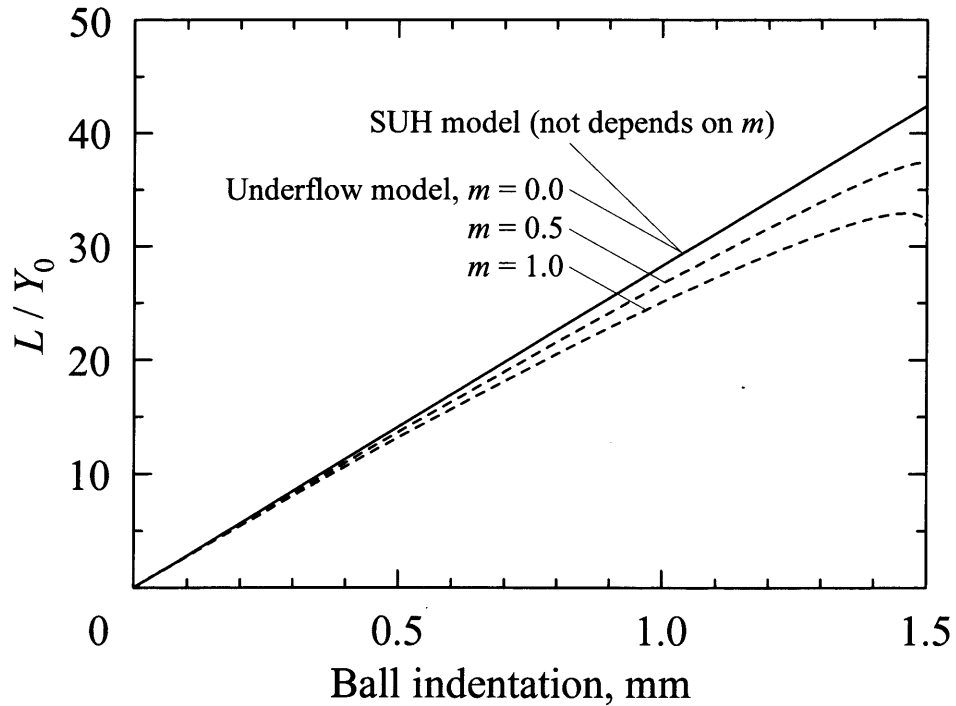


Fig. 3.4 Normal force for ball indentation

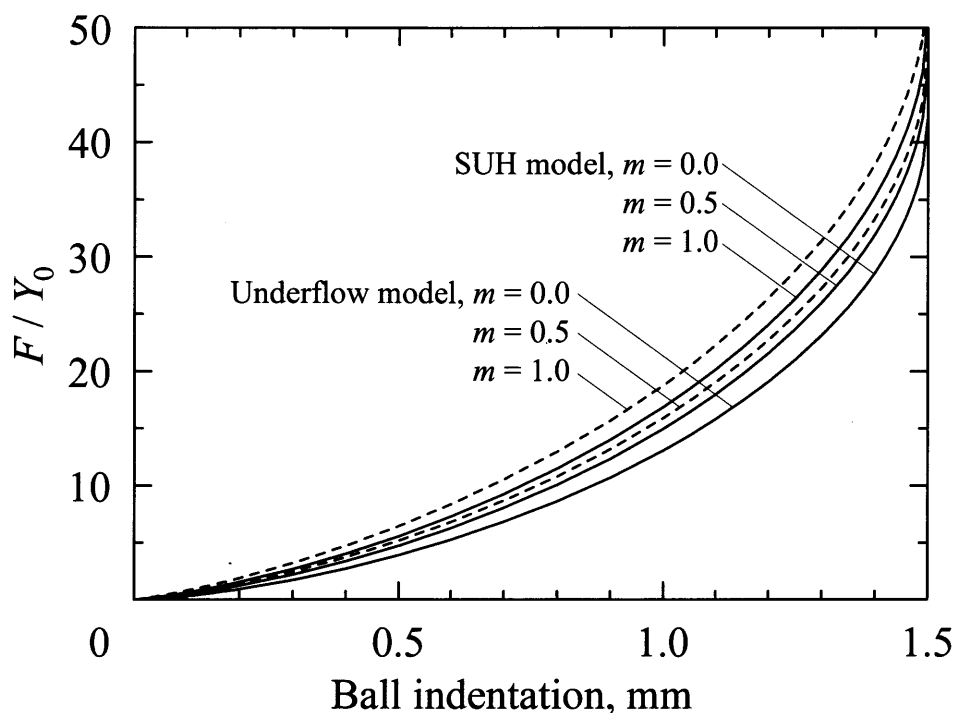


Fig. 3.5 Transverse force for ball indentation

SUHモデルでの垂直荷重 L は、せん断摩擦係数 m に依らない。このことは、式 (3.9a) 中にその係数を含まないことから分かる。一方、潜流モデルの場合、せん断摩擦係数が式 (3.10a) 中に存在するため、係数によって垂直荷重が変わってくる。せん断摩擦係数は $m=0\sim 1$ の範囲でとりえ、係数が最小値と最大値のときで比較したとき、垂直荷重はボール押し込み量 0.2 mm で 5%程度の差であり、あまり依存性は強くない。

水平荷重では、SUHモデルと潜流モデルの両方がせん断摩擦応力項を含むため、その係数によって、荷重が変動する (Fig. 3.3 (b)). SUHモデルと比較して、潜流モデルのほうが、ボール押し込み量に依らず 10%ほど水平荷重を大きく評価する。

ボール転がり時の転がり摩擦係数は、すべり摩擦係数と同様に垂直荷重 L と水平荷重 F の比 F/L で定義される。式 (3.9) と式 (3.10) より、それぞれの転がり摩擦係数を Fig. 3.6 にまとめる。ここで、式 (3.2b) より $w/2r$ で無次元化し、横軸としてプロットする。 $w/2r$ はボール直径に対するトラック幅の比であり $0 \leq w/2r \leq 1$ の範囲をとりうる。Fig. 3.6 より SUH モデルに比べ、潜流モデルで得られる転がり摩擦係数は、すべての範囲で大きい値となっている。潜流モデルでせん断摩擦係数 $m = 0.5$ が、SUH モデルのせん断摩擦係数 $m = 1.0$ と似た曲線を描いており、潜流モデルでの転がり摩擦係数は SUH モデルと比較すると、水平荷重と同様に大きくなるのが分かる。

自由回転のボール転がりでは、接触部の摩擦力は小さいために両モデルの差異は見られない。これは、Fig. 3.6 の $m = 0$ に相当する。また、ボールが強制的に回転することで、摩擦力が発現される場合、材料流動の様子から SUH モデルに比べ、潜流モデルのほうが実際の加工荷重を評価できると考えられる。

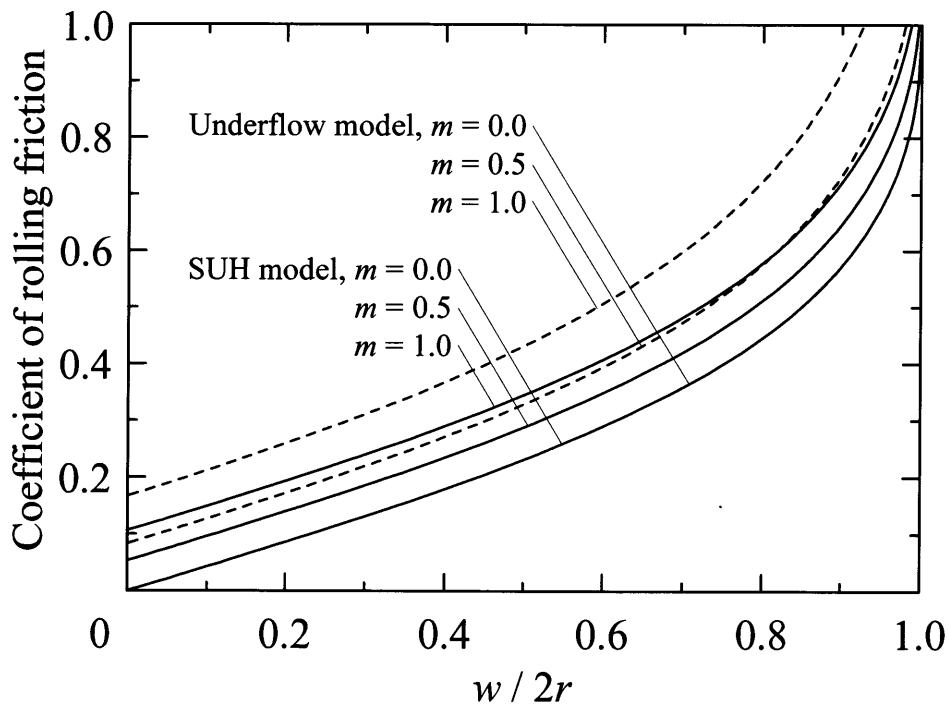


Fig. 3.6 Coefficient of rolling friction: F/L

3.3 ボール転がりの FE 解析について

初等理論では、ボール転がりの垂直荷重と水平荷重を接触部の垂直応力とせん断応力から評価を行った。自由回転するボール転がりにおいて、接触部に生じる摩擦力は小さいとみなし、垂直応力から各荷重を算出している。そのため、自由回転での摩擦力は定量的に把握できていないため、ボールバニシング加工への FE 解析を行い、摩擦力および各荷重について検討した。

ボール転がり、またはボールバニシング加工に数値解析を適用した研究報告は、あまり見られない。それは工具となるボールが回転運動し、さらに解析対象ないしは評価対象が被加工材の表面粗さとなることが多く、巨視的な運動と微視的な変形を同時に扱う必要性が数値解析の適用を困難にしていると思われる。今日の計算機の発達によりバニシング加工に FE 解析が用いられ始めてきたが、依然多くの計算時間を要し何らかの近似的なモデルを導入している。

3.3.1 ボールバニシング加工の数値解析

Röttger⁶⁾は、ボールバニシング加工について、近似的に FE 解析を適用した。被加工材の回転運動をツール側の螺旋運動に置き換え、さらに Fig. 3.7 に示す平面 A のみを考えた。いま、平面 A の垂直方向の材料流動を無視したとき、平面 A は平面ひずみとなる。実際にはバニシング加工された材料の断面観察写真から、表層近傍の材料のボール転がり方向への流動が確認されている⁶⁾が、それを無視することで、計算時間の大幅な短縮ができる。平面ひずみを仮定した、平面 A に対しボールの運動は Fig. 3.8 のように垂直移動と水平移動の組み合わせとなる。すなわち、ボールの動きは

- (1) 所定の荷重 (または変位) まで押込む
- (2) 除荷
- (3) ピッチ分だけ横へ移動
- (4) 再度押込む → (1)

というサイクルに置き換えられる。

以上の考えで、Röttger はボールバニシング加工後の残留応力について 2D 解析から得られた計算値と実験値を比較、検討した。棒材の残留応力は、長手方向 z 、半径方向 r 、周方向 θ の 3 方向あるが、周方向はよく一致するものの他方向は部分的な合致にとどまっている。モデル化の際の平面ひずみという拘束が強すぎるとことが原因であるとされている。

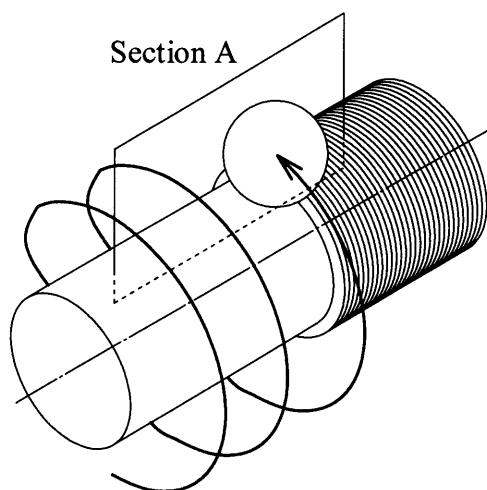


Fig. 3.7 Ball burnishing process on workpiece basis

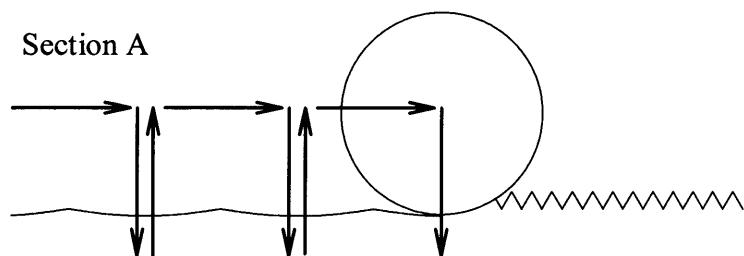


Fig. 3.8 Indent cycle for 2D burnishing process in [6]

ボールバニシング加工への3D解析を本格的に行ったのは Altan ら⁷⁾である。Fig. 3.7で示すように、ボールは被加工材表面を円弧状に運動するが、これを平面への運動に直す (Fig. 3.9)。ボールの動きは、先の押込みサイクルと異なり、ボール転がり方向を考慮したモデルで、さらにボールの周速が送り速度と等しくなるよう回転運動を与えた。また、被加工材の表面粗さを設けるため、被加工材にはかなり細かい要素分割を行っており、要素数は190,000程度となっている。

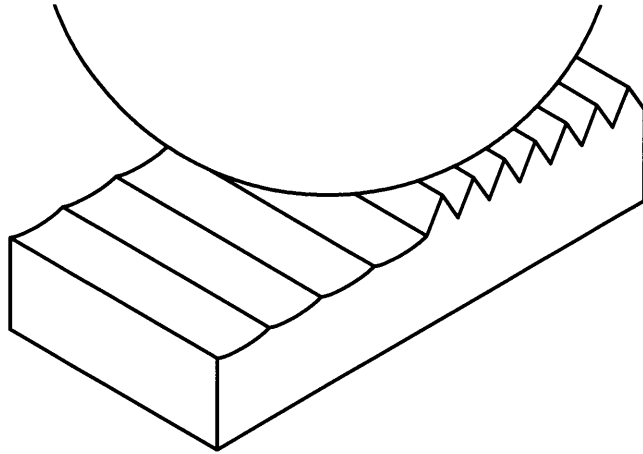


Fig. 3.9 3D burnishing process in [7]

回転運動が主体的になるボールバニシング加工への FE 解析は、これまで大胆なモデル化によって解析時間の短縮を図ってきた。本章では、自由回転するボール転がりの接触部における摩擦挙動を解析したい狙いがあるので、ボール転がりをモデル化する際、ボールには並進運動のみ与え、ボールの回転運動は解析結果から得られる情報としたい。Röttger や Altan らの場合、ボールの回転運動を擬似的に表現するか、解析条件にボールの回転数を含むため、ボールの自由回転とするには厳密さを欠く。

3.3.2 自由回転するボール転がりの解析モデル⁸⁾

ボール転がりについて、ボールの回転運動を未知とするために、Fig. 3.10 のような解析モデルを設定した。ボールにもメッシュを設け、ボールの回転軸である線分 OA 上の節点のみに並進運動をするよう強制変位を与えた。こうすることで、ボールの回転運動は被加工材との接触状態によって求められる。解析条件を Table 3.1 に示す。解析ソフトには汎用有限要素法ソフトウェアである ANSYS を使用した。また、材料特性に SCM440-A の物性値を与え、後述する実機による試験でも同じ材料を使用した。2 者間の摩擦則をクーロン摩擦とし、係数 0.01 ~ 0.5 のそれぞれで解析を行った。使用した ANSYS の解析では、時間的な影響は無視されるが (静解析)、後の摩擦試験と合わせるため、ボールの送り速度 10 mm/s と設定した。被加工材の塑性特性は、次節の円柱圧縮試験より得られた曲線を使用した。また、有限要素による多面体の影響をできるだけなくすため、オブジェクト表面ほど要素が細くなるように分割した (Fig. 3.10)。

Table 3.1 Simulation condition

Ball, mm	S ϕ 6, Rigid body
Workpiece, mm	10 × 3 × 2, Elastic-plastic body
Yield stress, MPa	450 (and Fig. 3.11)
Indentation depth, μm	50
Rolling distance, mm	4
Feeding velocity, mm/s	10
Friction coefficient (Coulomb's friction law)	0.01 ~ 0.5

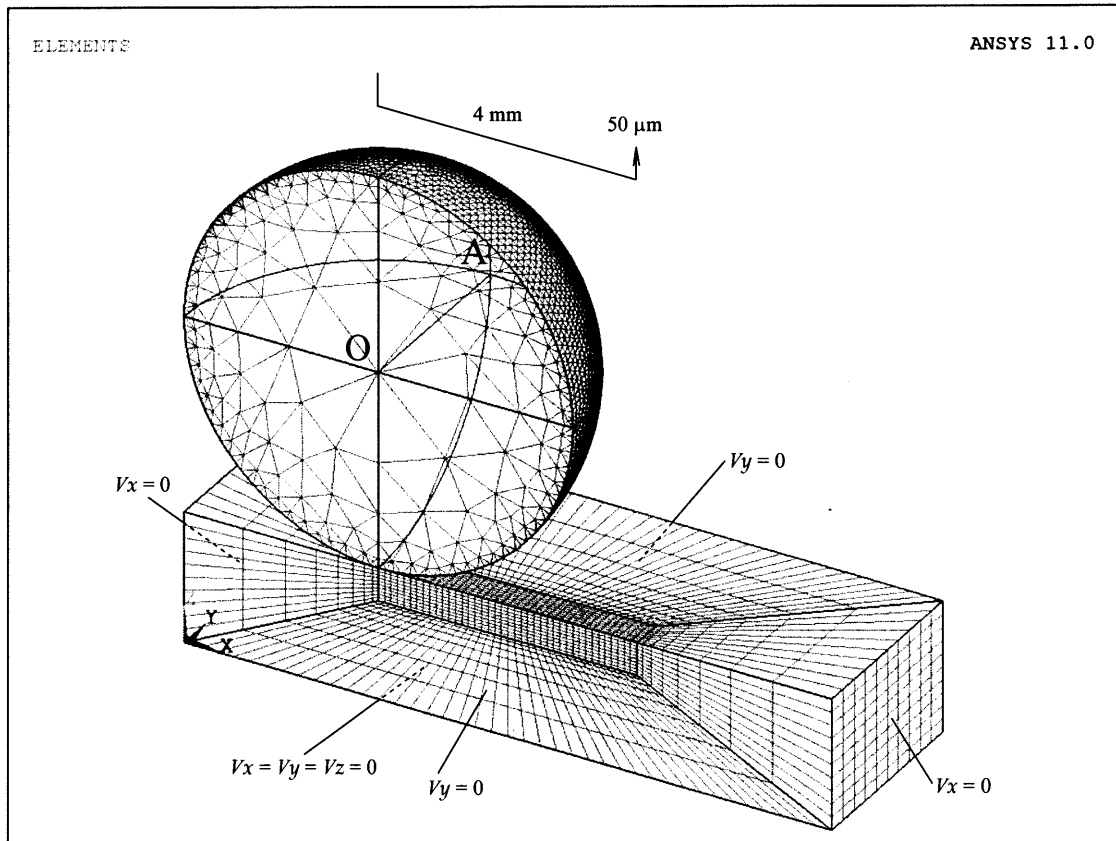


Fig. 3.10 Ball-rolling model (meshing & boundary condition) in this study

3.3.3 被加工材の塑性曲線

加工硬化を考慮するため、材料の塑性曲線を円柱圧縮試験から求めた。寸法 $\phi 5$ mm, 高さ 10 mm の円柱状試験片を作製し、平滑かつ平行工具にて圧縮試験を行った。圧縮時のストロークと圧縮荷重を測定した。なお、潤滑剤には、牛脂 + 黒鉛からなる黒色潤滑剤を使った。荷重曲線から真応力を算出し、得られた塑性曲線を Fig. 3.11 にまとめる。縦軸を真応力に、横軸を真ひずみとする。真応力 450 MPa 付近で降伏し、以後単調に硬化する曲線が得られた。降伏応力が明瞭に認められるのは、軟鋼に代表される低炭素鋼特有の現象である。

得られた塑性曲線に明確な降伏応力が見られたので、FE 解析では、これを多直線近似として解析中で設定した。多直線近似したグラフを Fig. 3.11 に合わせて載せる。

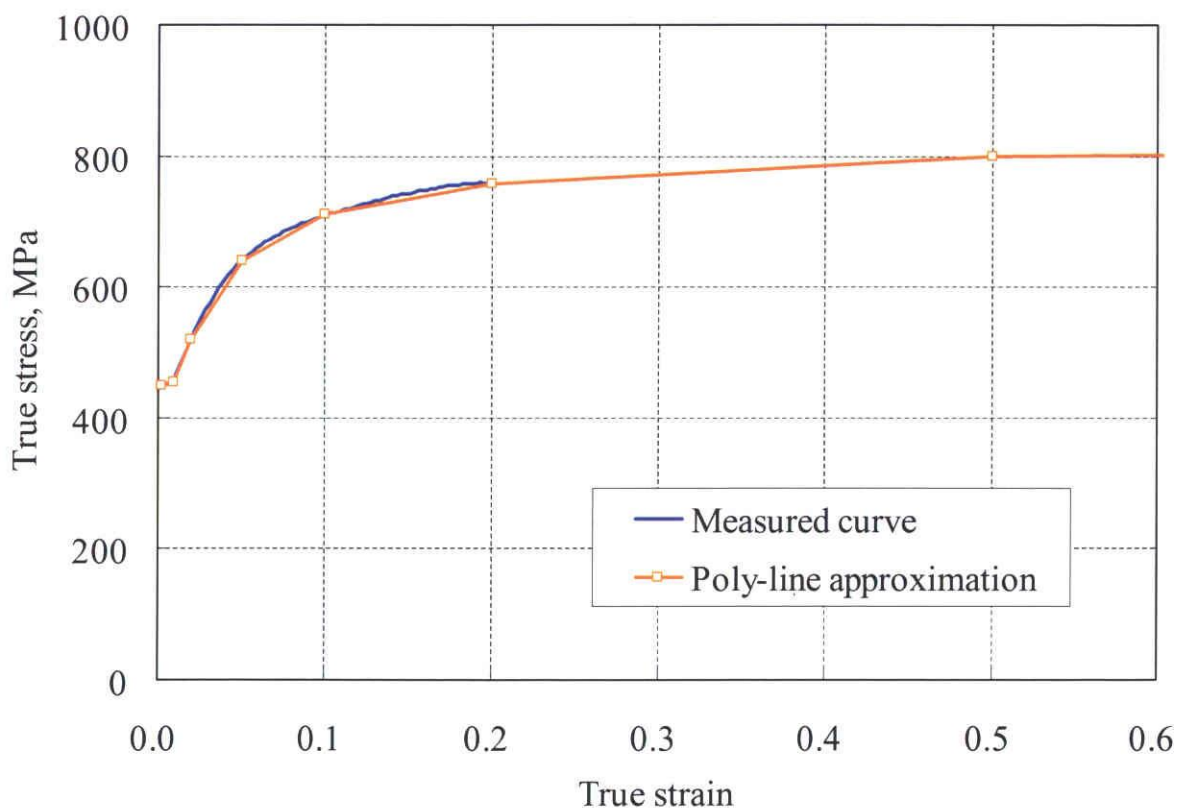


Fig. 3.11 Experimental and approximated Strain-Stress curve (SCM420 – A)

3.4 ボール転がりのFE解析結果

3.4.1 ボール転がりの加工荷重

ボール転がりのFE解析結果について、すべり摩擦係数を変えて得られた垂直荷重と水平荷重を Fig. 3.12 と Fig. 3.13 にそれぞれプロットする。それぞれの図は、ボールを $50\ \mu\text{m}$ だけ押し込んだ後、横方向に $4\ \text{mm}$ 転がしたときにボールに働く垂直荷重と水平荷重である。摩擦係数の違いによる各荷重の差は 3% 程度であり、自由転がりにおいて摩擦係数の違いが荷重に及ぼす影響は極めて小さいことが分かる。また、転がり距離が $4\ \text{mm}$ で両荷重ともほぼ定常域に達しており、そのとき、垂直荷重は $1600\ \text{N}$ 、水平荷重は $140\ \text{N}$ となっている。

自由回転でボールが転がる時、転がり中のボールの回転数を Fig. 3.14 に示す。ボールの送り速度 $10\ \text{mm/s}$ と比較するため、ボールの最外径での表面速度（以下、ボール周速）を縦軸としている。鋼平面が塑性変形しているため、ボール周速はわずかに減速している。摩擦係数 0.1 のときで、 $9.4\ \text{mm/s}$ であり最大の減速が認められる。そして、摩擦係数が大きくなるにつれ、ボール周速の減速量は小さくなっている。転がり距離 $4\ \text{mm}$ 付近におけるボール周速の挙動は、転がりモデルの境界部の影響が現れたと考えられる。境界の影響を無視したとき、ボール周速は転がり距離 $3\ \text{mm}$ 付近の値で落ち着くと思われる。

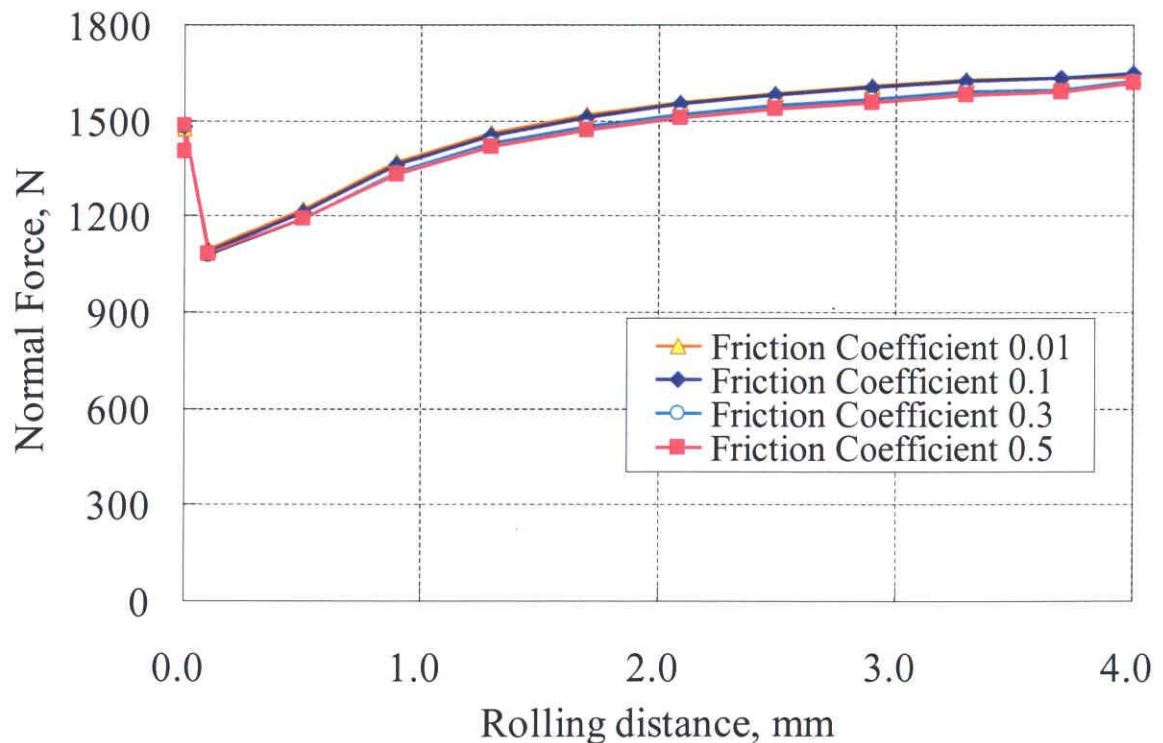


Fig. 3.12 Normal force obtained by FE analysis

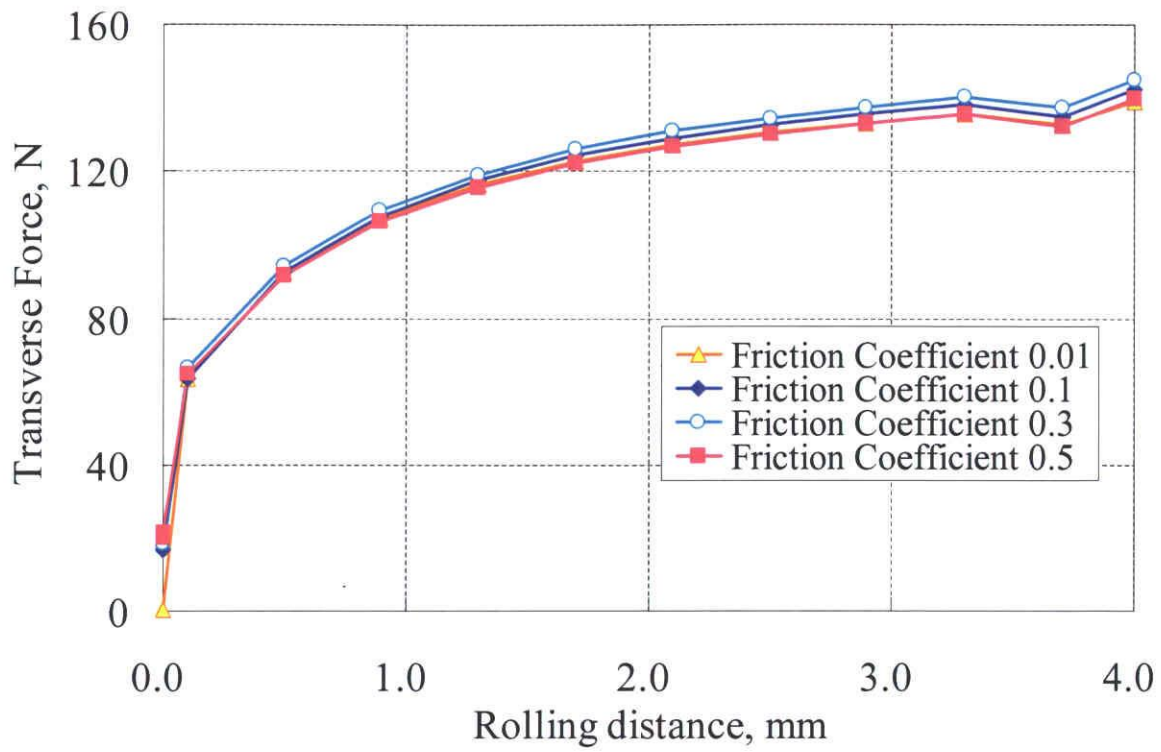


Fig. 3.13 Transverse force obtained by FE analysis

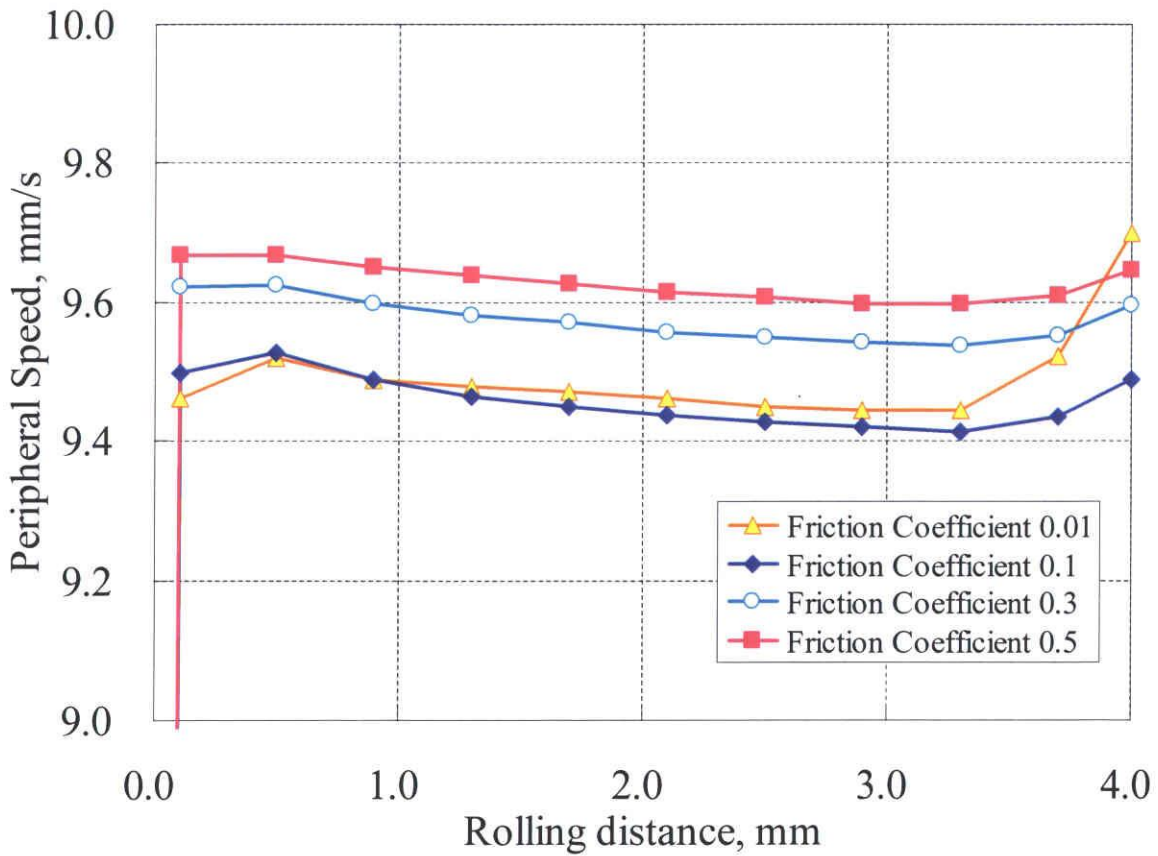


Fig. 3.14 Peripheral speed of ball rolling

3.4.2 ボール転がりのひずみ分布

ボール転がりによって被加工材に導入されるひずみは、被加工材の加工硬化をもたらすが、過度なひずみは早期の剥離を引き起こす。FE 解析から得られた被加工材のひずみ分布を Fig. 3.17 にまとめる。Fig. 3.17 に摩擦係数 μ が 0.01, 0.1, 0.3, 0.5 でそれぞれ得られた被加工材のひずみ分布を示す。また、各解析条件のときの、最大塑性ひずみ ϵ_{\max} を図中に示す。被加工材に塑性ひずみが導入される範囲は、摩擦係数による違いはあまり見られないが、摩擦係数が小さいほど最大塑性ひずみは大きくなり、摩擦係数 0.01 のとき 0.267 に達している。このとき、材料表面からおよそ 50 μm の深さにおいて、局所的に大きく変形していることが分かる。この変形は、有限要素のメッシュの様子から、せん断変形が起こっているためである。

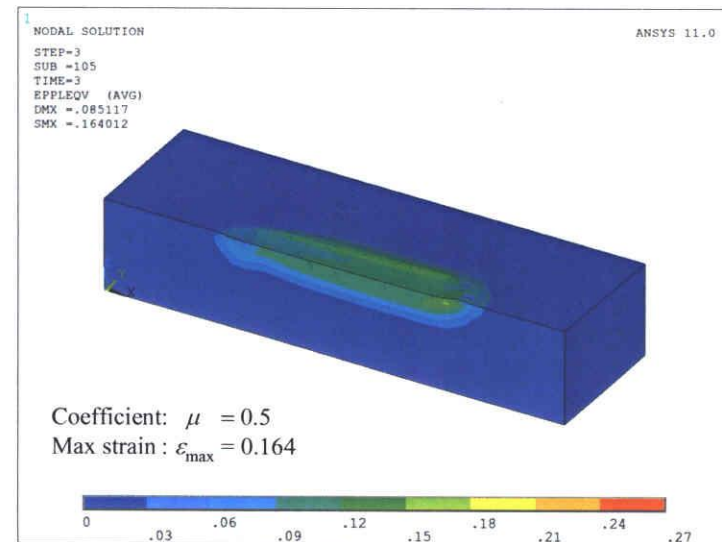
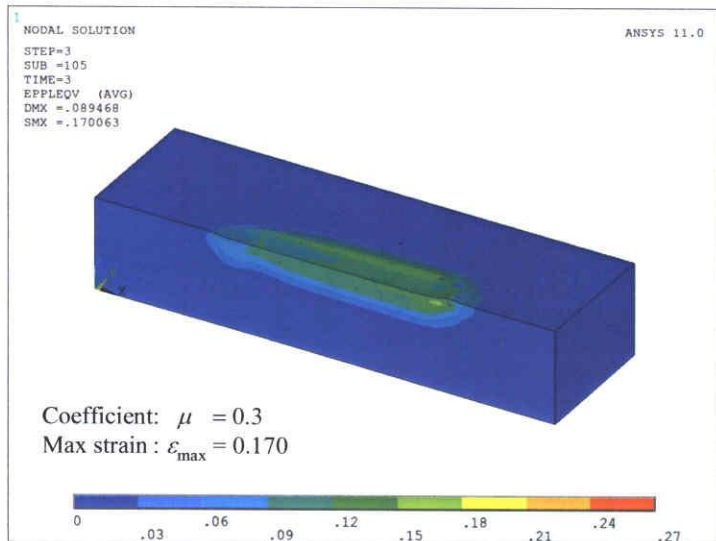
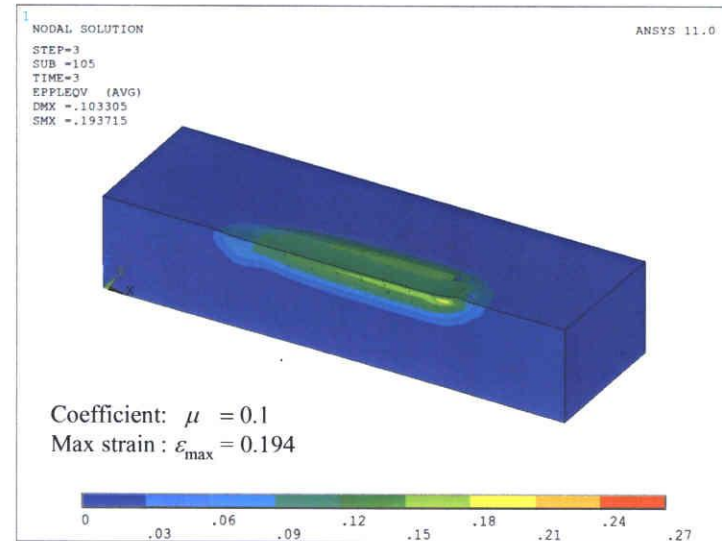
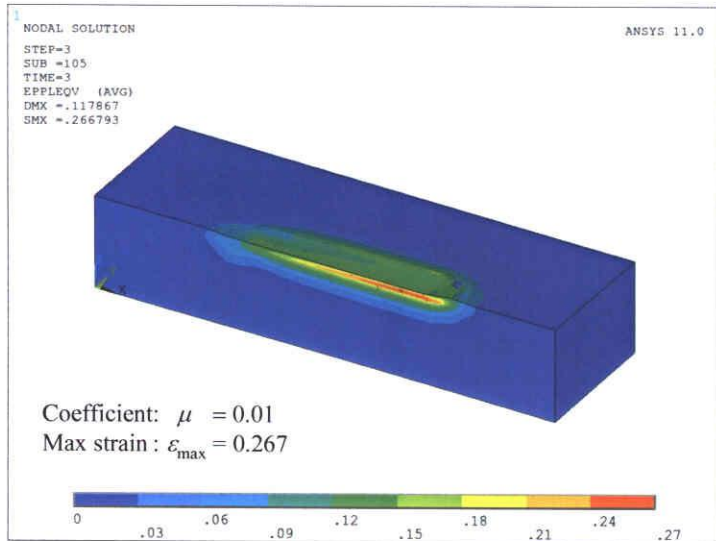


Fig. 3.15 Distribution of strain after ball rolling

3.5 考察

3.5.1 ボール転がりの加工荷重

ボール転がりにおける垂直荷重と水平荷重を初等理論と FE 解析より算出した。FE 解析結果から、摩擦係数を変えても垂直・水平荷重に大きな差は認められなかった。転がり摩擦係数を垂直荷重と水平荷重の比とした値を Fig. 3.16 に示す。転がり摩擦係数に及ぼす摩擦係数の影響は小さい。そのため、荷重に対する摩擦力の影響はほとんどなく、ボール状工具による掘起こし力が垂直・水平荷重の大半を占めていることが分かる。初等理論である SUH モデルと潜流モデルに、せん断摩擦係数 $m = 0$ とすると掘起こし力だけの値となり、係数がゼロのとき、両モデルは一致する。FE 解析結果では、ボール押し込み量 $50 \mu\text{m}$ ときで、このときの理論モデルにおける各荷重は、

$$L / Y_0 = 1.414$$

$$F / Y_0 = 0.111$$

となる。Fig. 3.15 からボールバニシング加工によって、材料の最表面に導入される塑性ひずみをおよそ 0.15 とすると、Fig. 3.11 の塑性曲線より材料表面の降伏応力は 700 MPa 程度であると判断できる。したがって、各荷重の具体的な値は次のようになる。

$$L_{\text{ath}} = 990 \text{ [N]}$$

$$F_{\text{ath}} = 078 \text{ [N]}$$

FE 解析から得られる各荷重は、Fig. 3.12 と Fig. 3.13 の定常域より、

$$L_{\text{FEM}} = 1600 \text{ [N]}$$

$$F_{\text{FEM}} = 0140 \text{ [N]}$$

であり、理論モデルより大きい値となっている。実際のボール転がりでは、周囲への材料表面に盛り上がりが生じ、接触面積の増加または見かけのボール押し込み量の増加が考えられ、荷重が大きくなる。ここで、理論モデルにおける FE 解析での各荷重に近いボール押し込み量は、

$$L_{\text{FEM}} / Y_0 = 1600 / 700 = 2.29$$

より、 $L / Y_0 = 2.29$ となる必要がある。式 (3.9a) からボール押し込み量が $80 \mu\text{m}$ 程度のときである。

FE 解析から得られた、加工中の被加工材の前方盛り上げの様子について、被加工材の長手方向の断面形状を Fig. 3.17 に示す。転がり距離 3 mm で送り方向に対し前方への盛り上げ高さはおよそ $50 \mu\text{m}$ であり、ボール転がりの加工荷重では、周囲の盛り上げを含んだ見かけの押し込み量を考慮する必要があることが分かる。

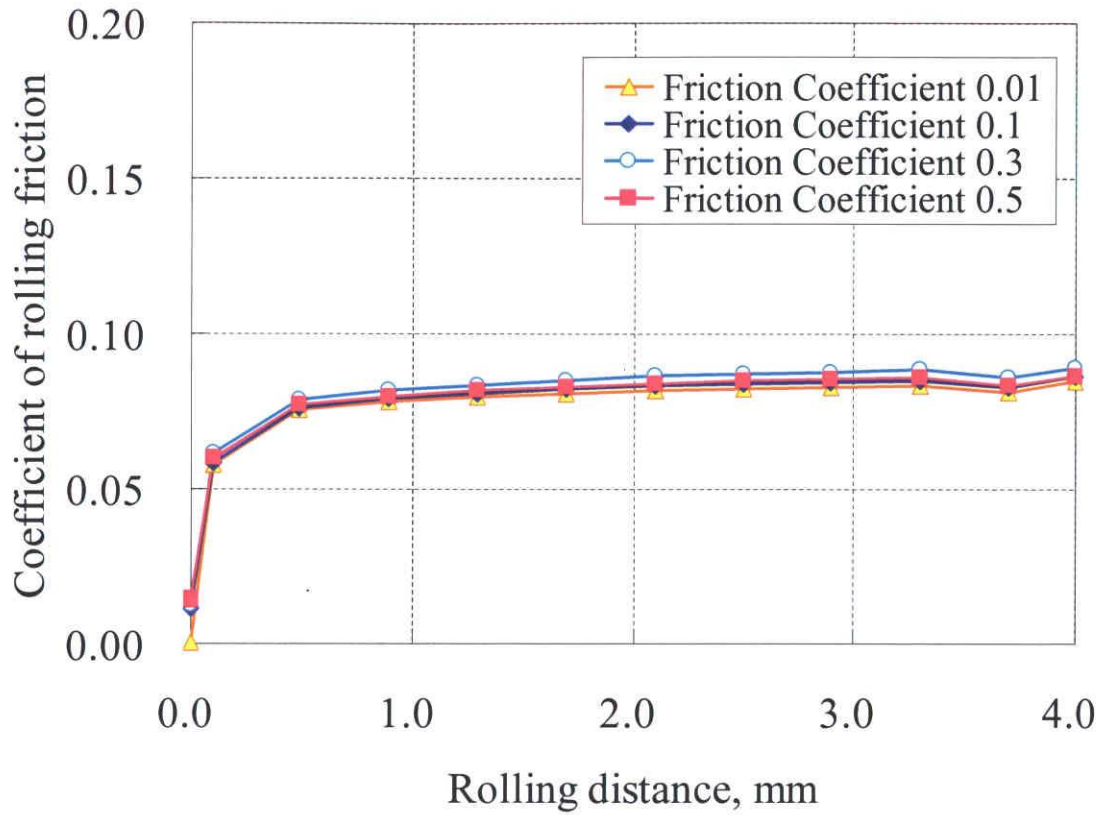
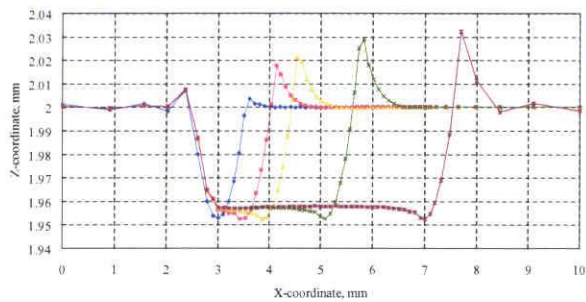
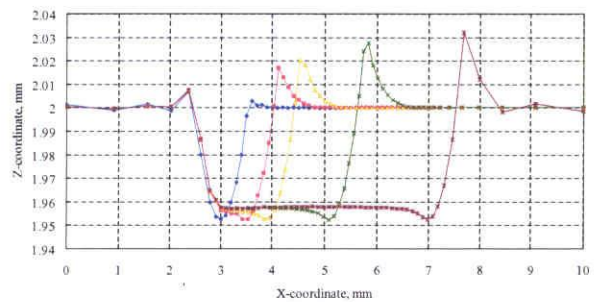


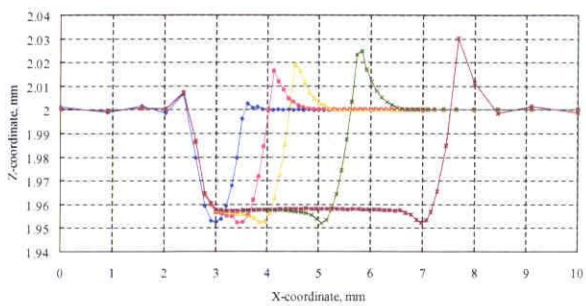
Fig. 3.16 Coefficient of rolling friction for ball rolling



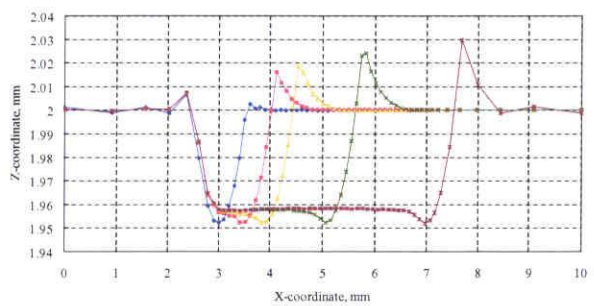
(a) $\mu = 0.01$



(b) $\mu = 0.1$



(c) $\mu = 0.3$



(d) $\mu = 0.5$

Fig. 3.17 Surface profile in feeding direction by FE analysis

喜田ら⁹⁾はローラバニシング加工に回転しごきの解析手法を適用し、上界法より加工荷重（トルクおよび推力をいう）の算出を試みている。ローラバニシング加工でもボールバニシング加工と同様に、盛りが生じる。喜田らの解析によれば、ローラ周辺への盛りを考慮することで、実験値と一致することを示している。本論文でも、ボールバニシング加工の場合で同様の計算結果を得たといえる。

3.5.2 ボール転がりの摩擦力

ボール転がりで生ずる摩擦力は、Fig. 3.1 で示すように、ボールの回転軸に周りに働き、ボールの回転運動に対しモーメントとなる。自由回転の場合、ボールの回転軸周りには何の拘束もないため、モーメントがつり合うよう生じると考えられる。ボール周速の解析結果 (Fig. 3.14) から、転がり開始から転がり距離 3 mm の範囲ではボール周速は減少し、転がり距離 3 mm から定常に達している。ボール周速の減少は、ボールの回転を妨げるよう摩擦力が作用していることであり、転がり開始時に見られることから、被加工材の盛りが進展するためであると考えられる。すなわち、Fig. 3.17 の断面形状から、ボールによって被加工材が盛りを形成する際、前方への材料流動がボール周速を減少させていると思われる。

自由回転でボールが転がる時、垂直荷重と水平荷重に及ぼす摩擦係数の違いはほとんど見られない。しかし、2章で述べたように、ボールに被加工材以外からの外力を受けて回転する場合、ボールはその外力によって強制的に回転された状態となる。理論モデルで検討した2つのモデルのうち、潜流モデルではボール回転軸周りとして働くため、強制回転での摩擦に即していると思われる。外力を受けるボール転がり、すなわち強制回転では、自由回転と異なり接触部に生じる摩擦力が垂直荷重と水平荷重の両方に影響を及ぼすと考えられる。

3.6 結言

ボール転がりの垂直荷重と水平荷重について、初等理論より各荷重を算出した。また、自由回転の運動としてボールの回転数を未知とする解析モデルを構築し、ボール転がりに FE 解析を行った。荷重・回転数について、検討した結果を以下にまとめる。

1. ボール状工具による掘起こし力を、SUH モデルから材料流動を修正し、垂直荷重と水平荷重を算出した。ボールが自由に転がる場合、摩擦係数の違いが両荷重に及ぼす影響は非常に小さい。
2. ボールの自由回転を考慮したボール転がりの FE 解析を行った。これによれば、垂直荷重と水平荷重に摩擦力による差はほとんど見られなかった。しかし、ボール周速は、摩擦係数が大きいほど、ボールの送り速度に対し、周速の減速分は小さくなった。
3. 被加工材に導入されるひずみ分布の FE 解析結果から、摩擦係数が小さいほど被加工材の最大塑性ひずみは大きくなり、摩擦係数 0.01 で 0.267 に達する。塑性ひずみは、材料表面より 50 μm 程度の位置で見られ、せん断変形による塑性変形が原因である。

第4章 転がり摩擦試験機的设计および製作

4.1 緒言

ボールによる転圧時のボールと被加工材間の接触部で生じる摩擦挙動は、成形される加工面に対し大きな影響を与える。2章では、ボールの回転運動にはマンドレルやリテーナからの拘束が存在するために、完全に自由に回転することはできず、被加工材などの接触部ですべりを伴うことを述べた。3章ではボール転がりのFE解析から摩擦係数の差が荷重にはあまり表れず、ボールの回転数に表れると述べた。そのためこの摩擦挙動を検討するにはボールの回転速度やボールと被加工材間のすべり、加工荷重を測定できる試験機が必要になる。

ボールバニシング加工によって成形される加工面は、Fig. 4.1のようにボールが被加工材の表面を何度も転がることで成形される¹⁾。この加工中、ボールの中心点が描く軌跡はほぼ重なることはないため²⁾、ボールバニシング加工で得られる表面品位は、究極にはボールが1回の転がりで成形できる加工面で決定できることになる。ボールバニシング加工のボールは、材料表面を一筆書きのように走査されるため、加工によって得られる最終的な表面性状は、ボールと被加工材間の接触状態に多大な影響を受ける。本報では基礎的な試験として鋼平面上をボールが直線的に1回だけ転がる、ボール転がりを対象とした転がり摩擦試験機を製作する。2章で示したようなディンプル成形ツールの場合、ボールに働く荷重やその回転数を測定することは困難であるため、水平運動へ置き換えることで、測定・評価を容易にした。ここでは、ボールの転圧時におけるボールと被加工材間の摩擦挙動を検討するための摩擦試験機を製作した。

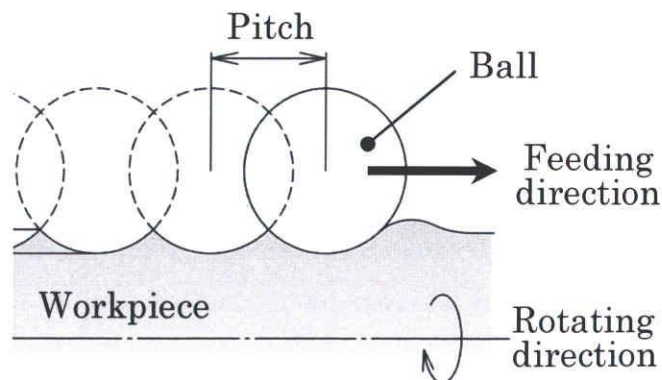


Fig. 4.1 Principle of ball burnishing

4.2 転がり摩擦試験機の仕様

3章で行ったボール転がりのFE解析結果から、本論文で要求される測定値を満足する転がり摩擦試験機の仕様をTable 4.1にまとめる。ボールに働く垂直荷重と水平荷重の測定に加え (Fig. 3.1), 転がり中のボールの回転数を測定可能なように各種センサを取り付けることにした。垂直荷重はボールの押し込み荷重にあたり、水平荷重は接触部の摩擦力と掘起こし力の合計値が測定される。また、FE解析結果を踏まえ、要求される測定精度も合わせて示す。

Table 4.1 Specification of rolling friction test apparatus

Items	Values
Normal force, N	20 – 2000 ± 1%
Horizontal force, N	10 – 0400 ± 1%
Peripheral speed of ball, mm/s	01 – 0100 ± 1%
Feedrate of slider, mm/s	01 – 0100 ± 1%

4.3 転がり摩擦試験機の構造

4.3.1 試験機本体

ボールが自由に回転し金属表面に転がり加工を行うことができる転がり摩擦試験機をFig. 4.2に示す。転がり加工中にボールと被加工材との間で発生する垂直荷重はJANOME社製プレス機に内蔵されたロードセルで、水平荷重は被加工材とスライダ間に取り付けられたせん断センサで測定できる。プレスのラムに取り付けられたツールはSφ6mmのボールとバックアップローラからなり、串団子状に加工されたボールの両端を玉軸受で保持することで自由に回転可能となっている。ボールの押し込み量はラムの移動量によって決めることができる。また、ボールの軸上とTHK社製スライダの側面に取り付けたキーエンス社製光学センサで加工中のボール回転数と被加工材の送り速度をそれぞれ測定できる。試験機の最大荷重・測定精度はTable 4.1を満たすよう設計・製作した。

製作した転がり摩擦試験機の主要構成部品をFig. 4.3に示す。ボールは、それを保持する棒部材 (回転軸) と一体のものとし、図のように両端をバックアップローラで受圧させる。このため、ボールに当たる球形部は、被加工材以外からは直接触れることはない。球形部の球径は、ボールバニシング加工で使用されるセラミック製ボール

と同じ $S\phi 6 \text{ mm}$ とする。回転軸の両端はベアリングで保持され、この回転軸に対しボール部の振れは組付け時で $2 \mu\text{m}$ 以下となるよう高精度に設計した。

加工荷重のうち垂直荷重はプレス機に内蔵されたロードセルで測定される (Fig. 4.2)。水平荷重はスライダとホルダの間に設置したキスラー社製せん断センサによって測定可能となっている。加工中に生じる水平荷重の向きは接触部の摩擦力で決まり、被加工材の送り方向と同じ方向か反対方向となる。本機で使用するせん断センサであれば、どちら向きでも測定可能である。また、ツールと試験機の詳細な主要寸法を Fig. 4.4 と Fig. 4.5 にそれぞれ示す。また、試験機の写真を Fig. 4.6 と Fig. 4.7 に示す。

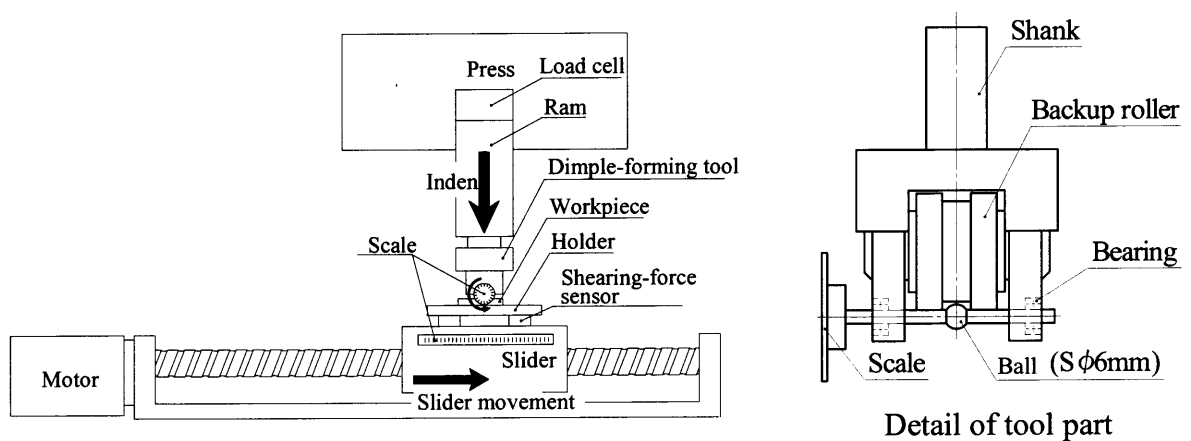


Fig. 4.2 Schematic illustration of rolling friction test apparatus (free rolling type)

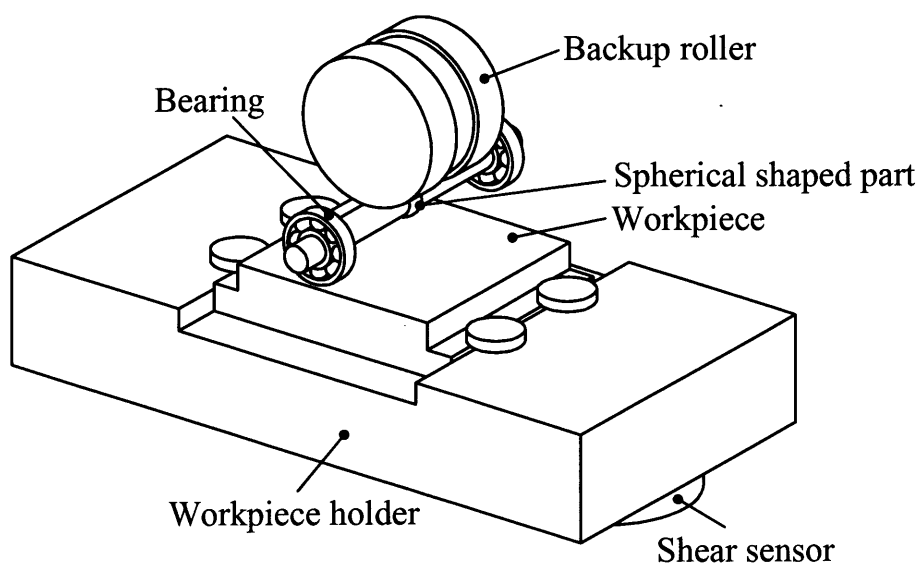


Fig. 4.3 Principle parts of ball rolling

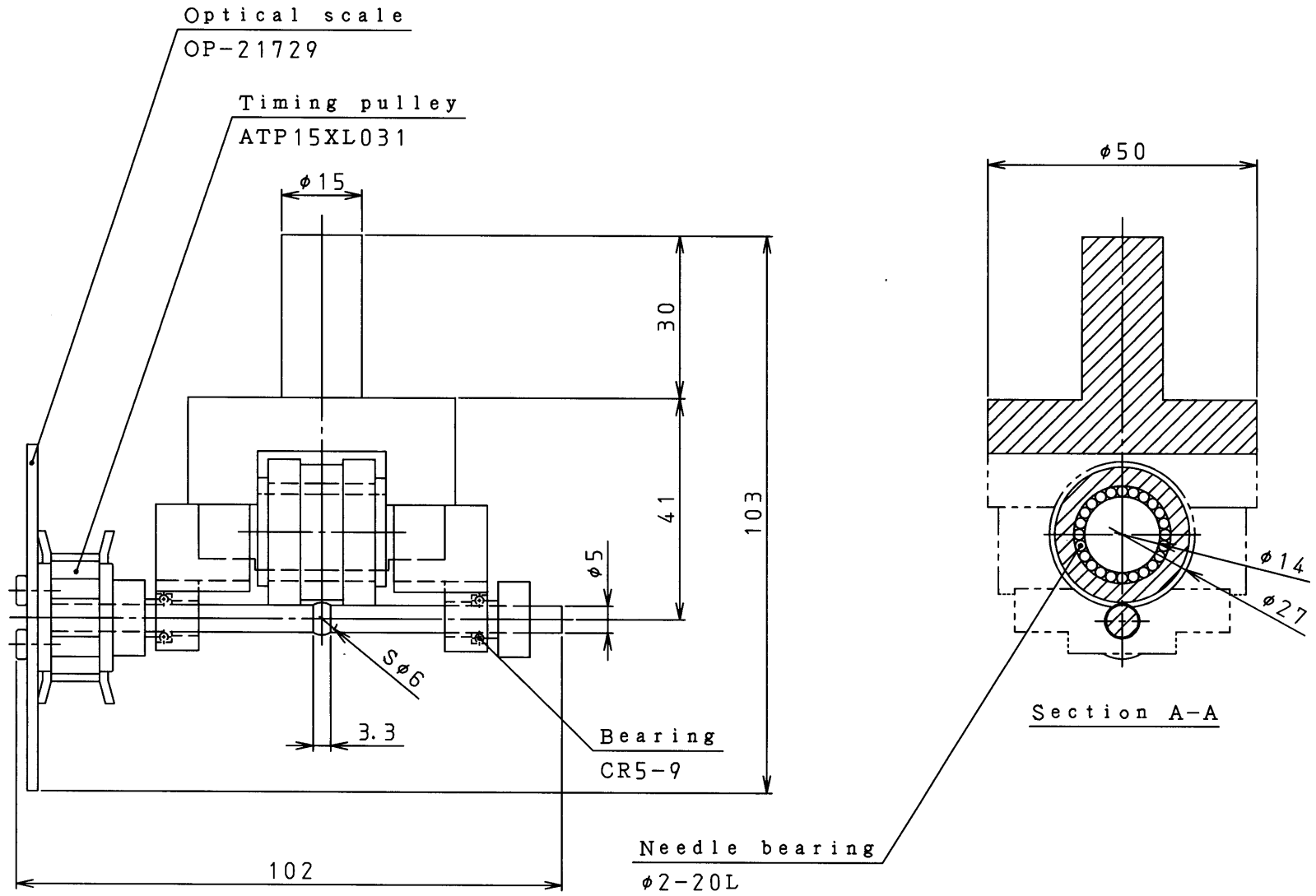


Fig. 4.4 Detail of tool part

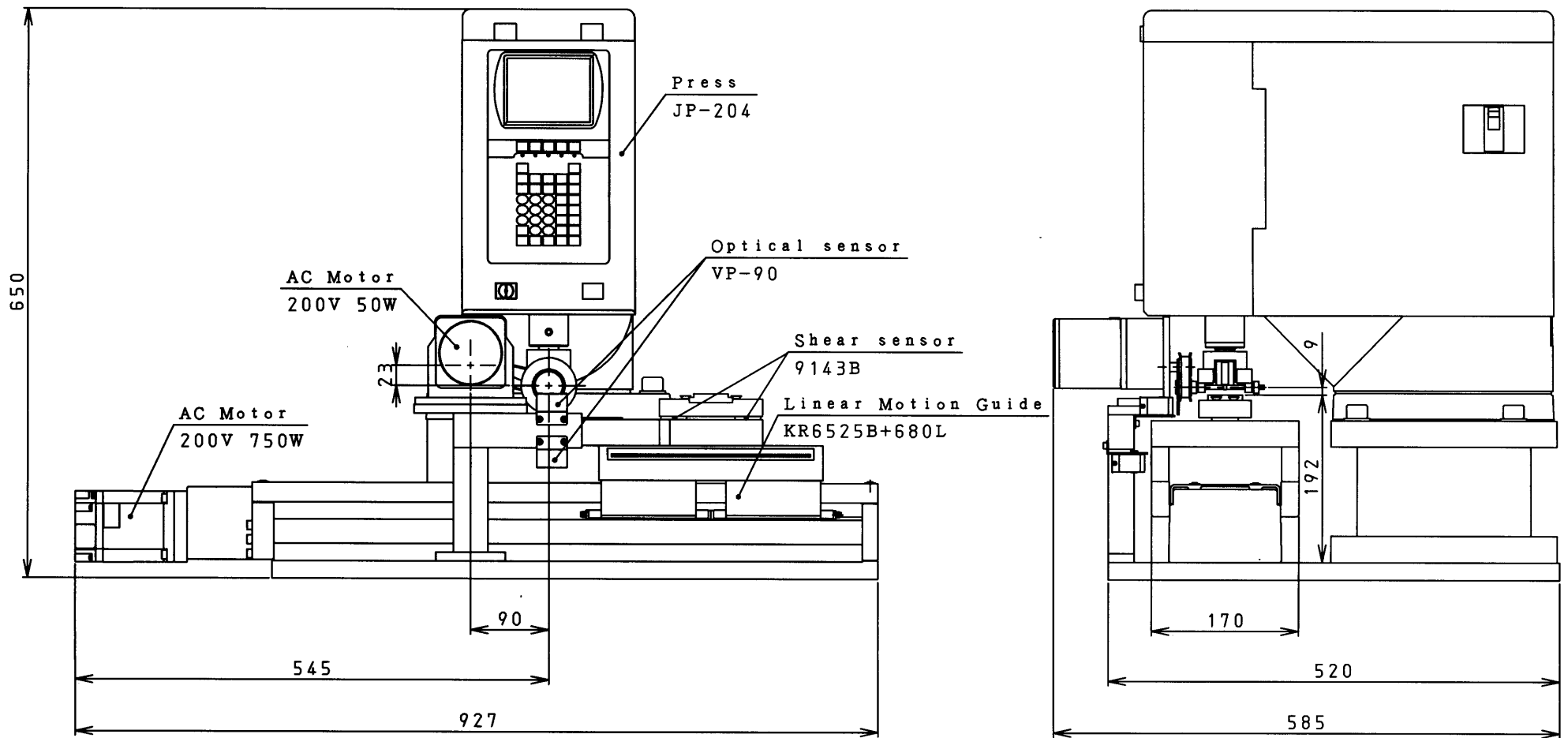


Fig. 4.5 Ball rolling test apparatus



Fig. 4.6 Appearance of ball rolling test apparatus (free rolling type)

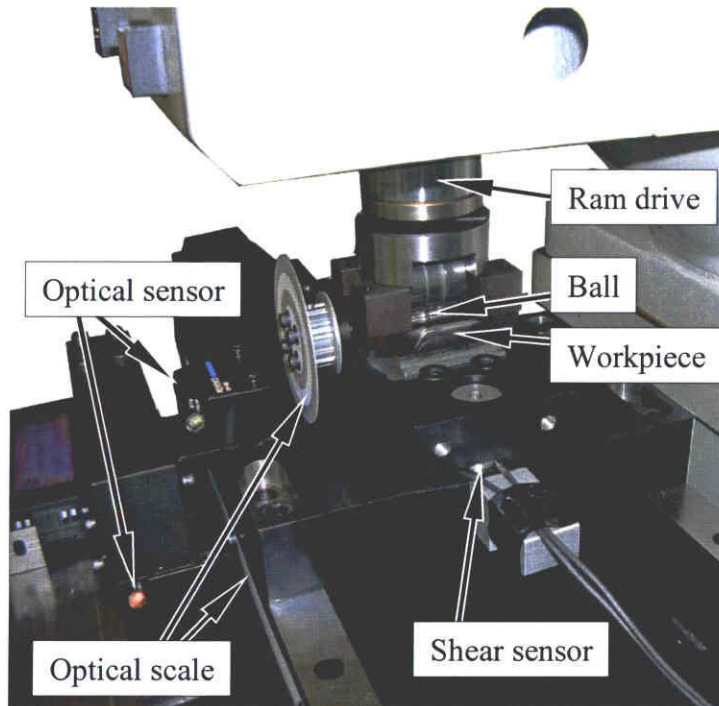


Fig. 4.7 Appearance of ball rolling apparatus (detail)

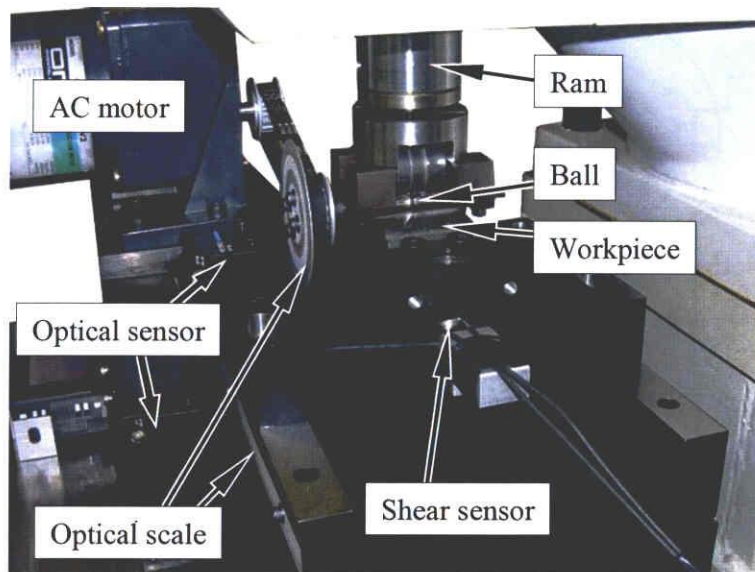
4.3.2 強制回転の機構およびすべり速度

ボールに強制回転を与えるにあたり、製作した転がり摩擦試験機 (Fig. 4.7) に Fig. 4.8 で示す駆動機器を製作し組み付けた。ボールの同軸上にタイミングプーリを取り付け、ベルトを介して駆動用モータと接続される。

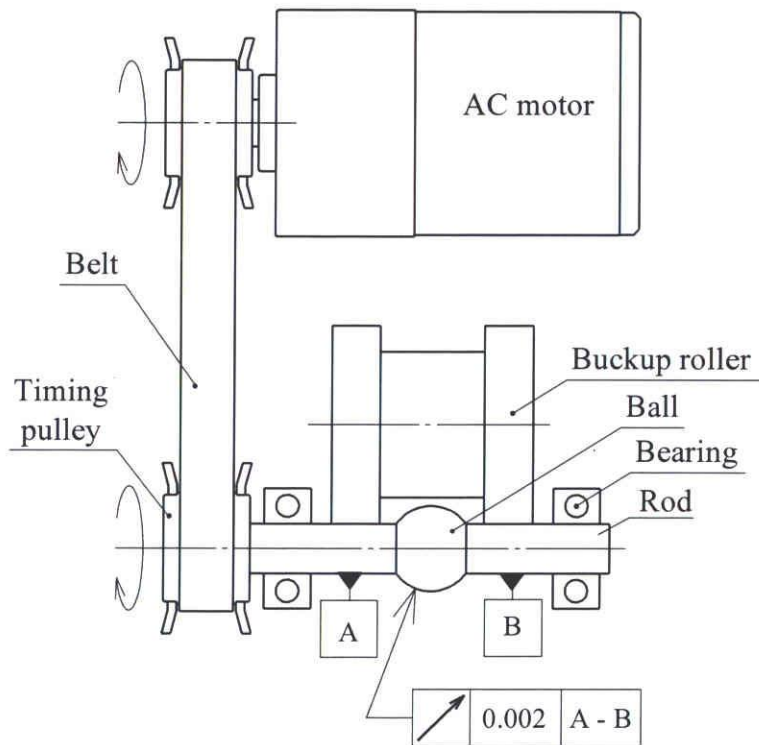
自由回転でボールが転がる時、ボールはボール押込み量に応じた周速 V_{Bfree} を持つ。自由回転の場合、ボールと被加工材間には固着域が存在しているため、ボールで転圧する中ではもっともボールと被加工材間のすべりが小さくなっている。そこで、自由回転のボール周速 V_{Bfree} に対するボール周速 V_B をすべり速度 S とし、式 (6.1) で定義する。

$$S = V_B - V_{Bfree} \quad (6.1)$$

上式で定義されるすべり速度で、負の値となる加工条件のとき、マイナス回転とし、正の値となる時、プラス回転と呼称する。ボールと被加工材間に生じる摩擦力は、すべり速度の向きによって決定される。マイナス回転の場合、被加工材の送り方向とは反対方向に摩擦力が働くことになる (Fig. 4.9)。



(a) Appearance of testing apparatus



(b) Schematic of ball rolling

Fig. 4.8 Structure of forced rolling

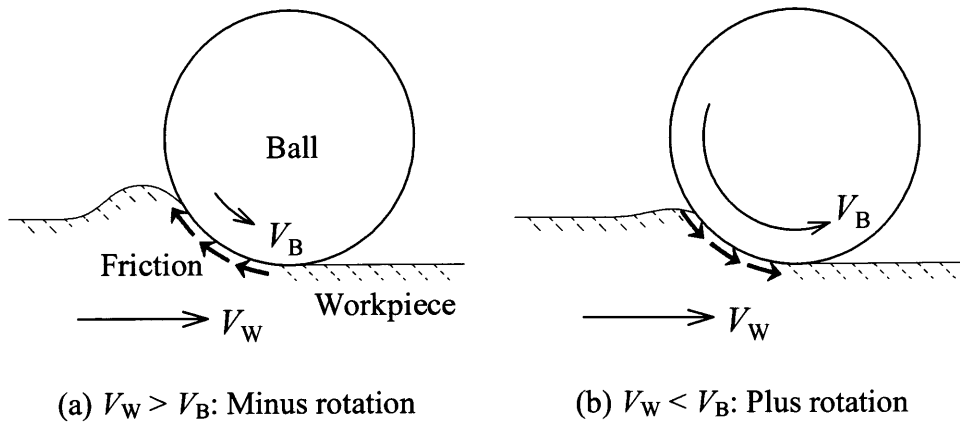


Fig. 4.9 Relation between slip speed and friction acting at workpiece

4.3.3 試験片

転がり摩擦試験で用いる試験片を、Table 4.2 の条件に揃える。被加工材には構造用鋼材で広く使用されるクロムモリブデン鋼 SCM440 を選択し、690°C - 4h の焼鈍処理後、40 × 40 × 10 mm のプレート状 (Fig. 4.10) に機械加工した。被加工材の加工面には、表面粗さの影響を極力無視するために #4000 耐水紙で研磨後、ラップ仕上げを行い表面粗さ 0.1 μmRz の試験片 (Workpiece A) と、平面研削によって表面粗さ 2 ~ 3 μmRz の試験片 (Workpiece B) を製作した。試験前の加工面の表面粗さ結果を Fig. 4.11 に示す。研削方向は転がり試験の送り方向に対し垂直にし、摩擦力の影響が材料流動に現れやすくなるようにした。

Table 4.2 Workpiece condition

Workpiece material	SCM440 (42CrMo4 in ISO)	
Hear treatment	Annealing (690°C - 4h)	
Flatness, μm	≤ 1	
Surface roughness	(A) 0.2 μmRz	(B) 2 ~ 3 μmRz
Yield stress, MPa	(A) 450	(B) 450
Hardness, HV	(A) 212	(B) 235

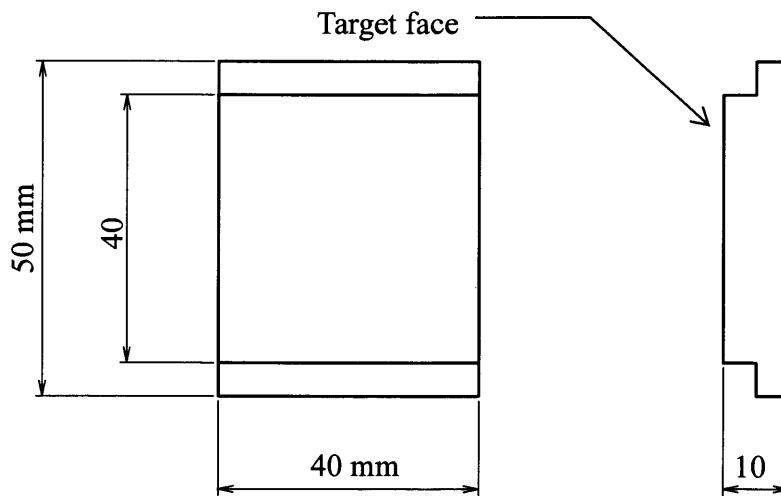


Fig. 4.10 Dimension of workpiece

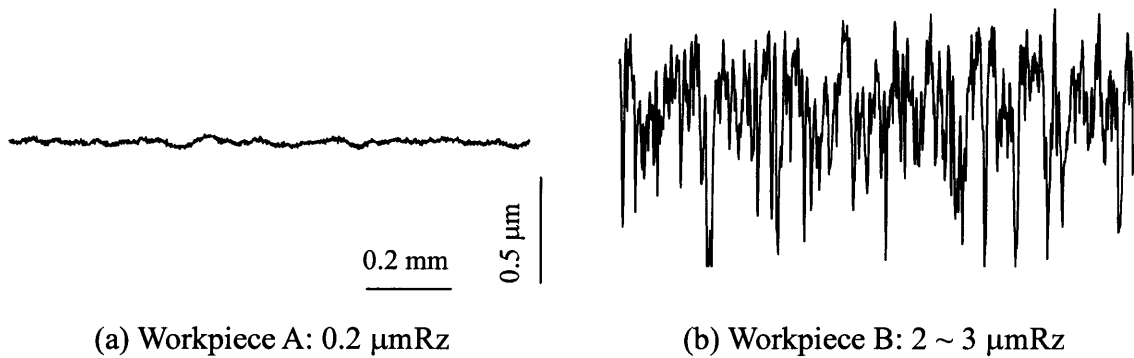


Fig. 4.11 Surface roughness of workpiece

4.3.4 ボール

ツール先端に位置するボールは、SKH 51 を球 $S\phi 6 \text{ mm}$ (Fig. 4.3), HRC 63, 表面粗さ $0.1 \mu\text{mRz}$ に加工したものを用いた。ボール転がりによって、被加工材の加工された表面には、ボールの表面形状が転写することが考えられるため、ボール部は研削加工で成形後、バレル加工で表面仕上げを行った。測定されたボールの表面粗さを R 補正し、水平に置き換えた結果を Fig. 4.12 に示す。また、4.3.1 節で述べたように、回転軸に対するボール表面の振れは $2 \mu\text{m}$ 以下とした。



Fig. 4.12 Surface roughness of ball-shaped tool

4.4 試験装置の校正

前節で，転がり摩擦試験機の校正部品や測定器に求められる精度を述べたが，製作した試験装置がその要求を満たしているか試運転評価を行い，要求を満たしていない場合は，校正や微調整を行った。

4.4.1 荷重測定器の校正

垂直荷重の測定に用いるプレス機内蔵のロードセルと，水平荷重の測定に用いるせん断力センサの校正を行った。ロードセルの校正は，校正用のロードセルを用いて行った。せん断センサは，スライダとホルダの間に設置され，所定のトルクで固定させる必要がある。そのため，設置後にセンサの校正を行わなければならない。せん断力センサの校正は，Fig. 4.13 に示すようにホルダに滑車を介して 50, 100, 150 N の錘を順に吊り下げ，せん断力センサに負荷をかけて測定される水平荷重の補正を行った。

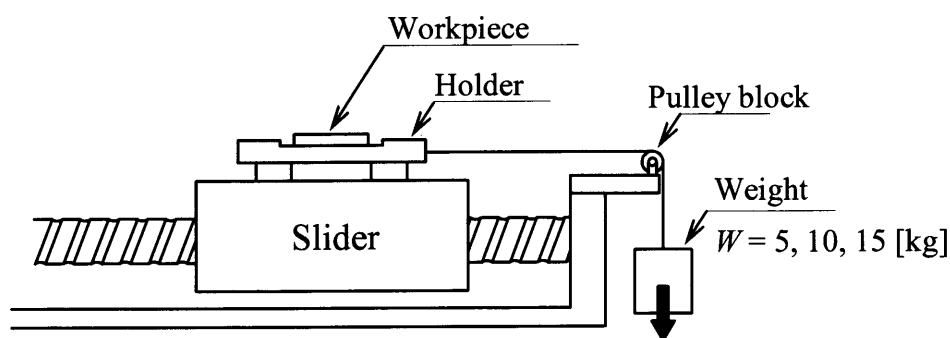


Fig. 4.13 Calibration method of shear sensor

4.4.2 取付け面の平行度

スライダ上に設置されたホルダに被加工材が取り付けられるため、スライダの移動方向に対するホルダの取付け面の平行度が大きい場合、ボールの押し込み量が加工中に変動する。製作した転がり摩擦試験機では、この平行度を $2\ \mu\text{m}$ 以下に収まるようシムを用いて微調整した。測定方法は Fig. 4.12 に示すようにホルダの取付け部の高さについて、任意の位置を $0\ \text{mm}$ とし、そこから $40\ \text{mm}$ 地点までを $2\ \text{mm}$ 間隔で変位センサにて測定した。組付け後の測定された取付け面の高さの測定結果を Fig. 4.14 に示す。Fig. 4.15 から平行度は $2\ \mu\text{m}$ 以内になっており、ボール転がり中の押し込み量の変動を抑えていることがわかる。

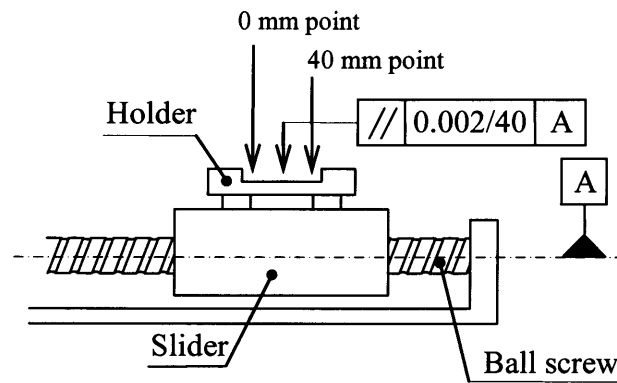


Fig. 4.14 Measuring method of the flatness of the holder

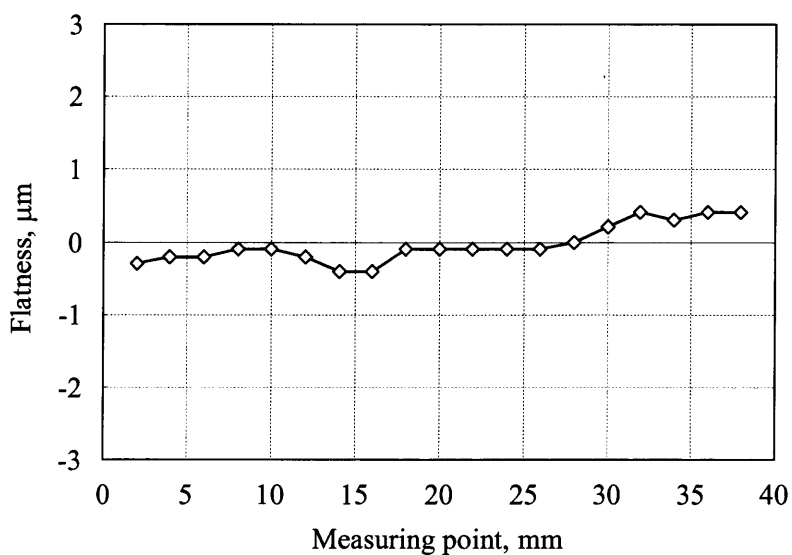


Fig. 4.15 Flatness of surface of workpiece on slide unit

4.4.3 押し込み位置による加工荷重のばらつき

スライダの送り方向に被加工材の中央部 20 mm 区間を加工部とした。試験機の剛性が高く、試験面の平行度が良好であれば、その 20 mm 区間のどこにボールを押し込んでも、ほとんど同じ荷重曲線が得られるはずである。しかし実際にはボールの押し込み位置の違いにより、ホルダやスライダのたわみに差異が存在し、垂直荷重にばらつきが生じる可能性がある。そこで、同じボール押し込み量 (ラム移動量) の場合、ボールの押し込み位置によって垂直荷重がどれだけ変動するか確認した。測定は、0 mm 地点においてボールが被加工材に接触した高さから 29, 60, 105 μm だけプレス機のラムを押し込み方向に移動させて行った。測定結果を Fig. 4.16 に示す。測定値はそれぞれ 200, 500, 1100 N 程度となり、その変動には突発的な挙動もなく、すべて 5%以下に収まっていた。

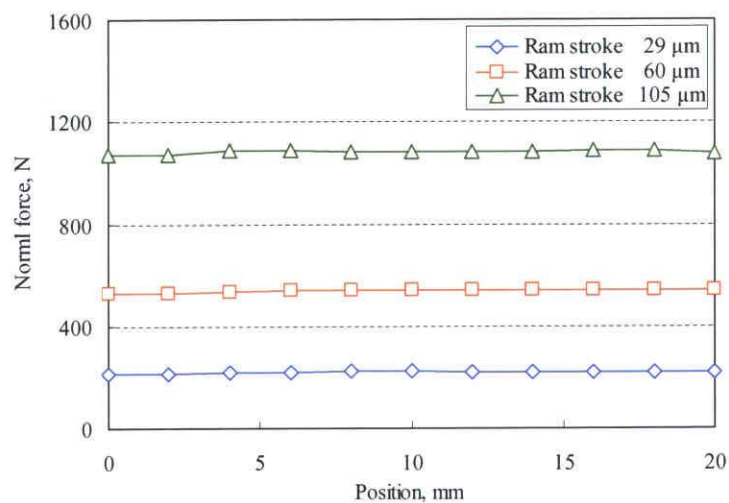
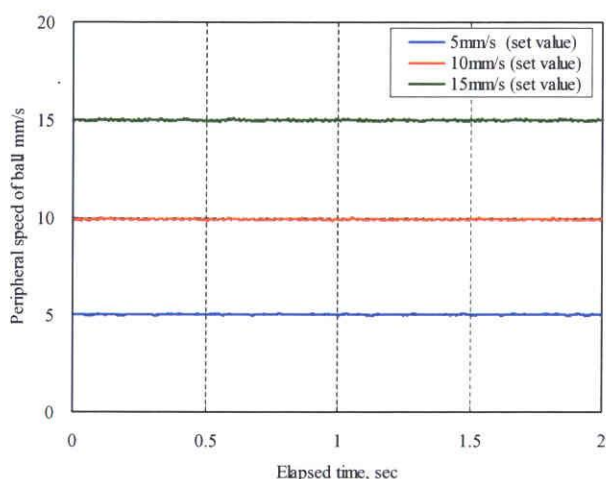


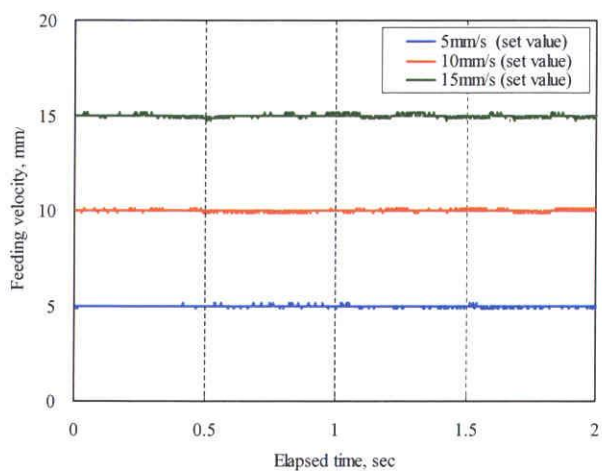
Fig. 4.16 Relation between indent position and normal force

4.4.4 光学センサの動作確認

製作した試験機に使用する光学センサは、光スケールを $25\ \mu\text{m}$ 間隔で検出することができる。光スケールが動いている場合、光学センサで感知した時間の間隔から移動速度を求めることができる。動作確認のため、無負荷の状態ではボールの回転とスライダの送りをそれぞれ $5, 10, 15\ \text{mm/s}$ の設定値で動作させたときのそれぞれの速度を測定した。測定結果を Fig. 4.17 に示す。これより回転速度、送り速度ともにほぼ設定値どおりの速度で動いていた。また測定値のばらつきは $\pm 2\%$ 以下であった。



(a) Peripheral speed of ball



(b) Feeding velocity of workpiece

Fig. 4.17 Measured result of optical sensor

4.5 ボール押し込み量の定義

第1章でも確認したが、ボールの押し込み量を一定としたバニシング加工の場合、押し込んだときに材料や装置全体がたわむため、押し込み量にはそれらの剛性を含んだ値になることが多い^{3)~7)}。加工条件としての普遍性を持たせるには、装置や材料のたわみ分を除いた値を真のボール押し込み量としなければならない。本研究では、被加工材にボールを押し込んだときの押し込み量を、ボールが被加工材に接触した位置から押し込み方向にボールが移動した距離と定義する (Fig. 4.18)。本試験機の場合、押し込み時に被加工材を保持するホルダがたわむことから、試験機の剛性を除いた押し込み量を直接測定することは困難である。本論文では次の間接的な方法を採用した。

まず、本装置を用いて、高硬度材にボールの単軸圧縮試験を行う。このとき、Fig. 4.16より垂直荷重はボールの押し込む位置にほとんど依存しない。この試験から試験機全体のたわみ - 垂直荷重の関係が得られる。押し込み量の計算式を式 (4-1)、式 (4-2) にて行った。ここで、ボールを被加工材に押し込むために設定したプレス機のラムの移動量は、プレス機やスライダ等の試験機の剛性と、ボールを支えているバックアップローラのたわみ量と、真のボール押し込み量の合計になる。下式中において、 H はバックアップローラの弾性変形量で、加工中のボールの位置をダイヤルゲージで測定した。 S_B はボールを押し込んだときのラムのストローク量、 S_P はラムの端面部を直接押し込んだときのラムのストローク量とし、 S_B と S_P の差を試験機の剛性とした。Workpiece AとWorkpiece Bのそれぞれに試験を行い、その結果をFig. 4.19にまとめて示す。

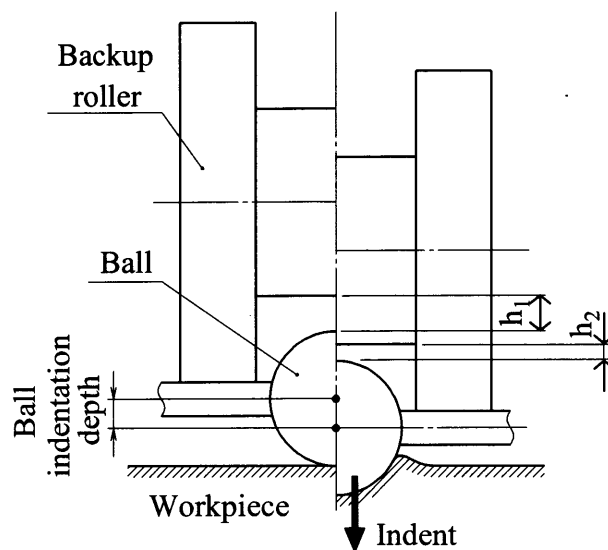
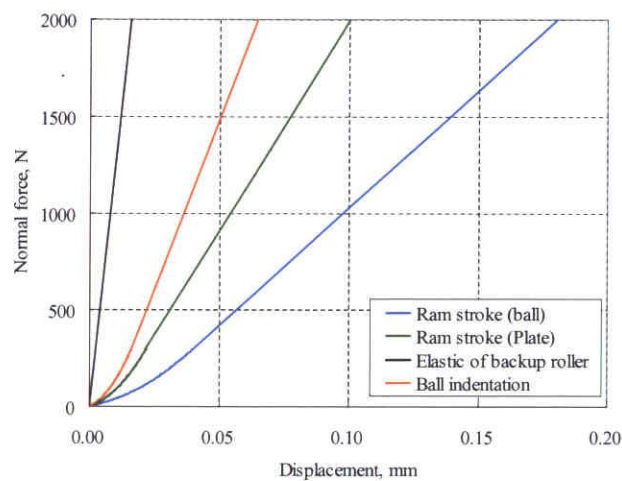


Fig. 4.18 Definition of ball indentation depth

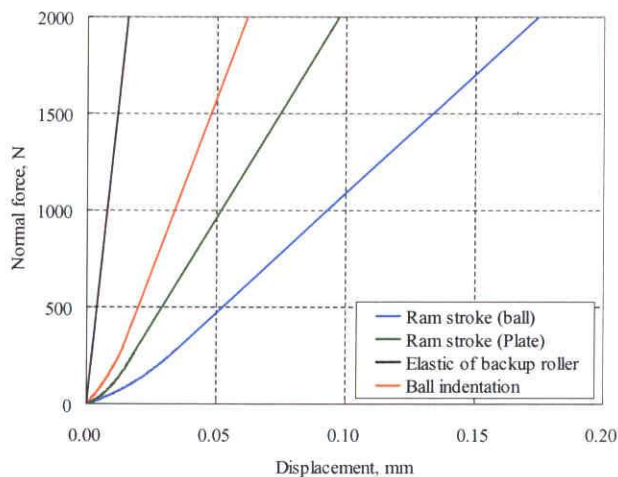
ここに示したとおり，例えば Workpiece A と WorkpieceB にボールを押込んだときのラム移動量が $50\ \mu\text{m}$ であるならば，ボール押し込み量はそれぞれ $20\ \mu\text{m}$, $19\ \mu\text{m}$ になる．このように，ラムの移動量の半分以上は試験機の撓みとなっていることがわかる．本論文のボール押し込み量は下式によって修正した値で示す．

$$H = h_1 - h_2 \quad (4-1)$$

$$\text{Ball indentation depth} = S_B - S_P - H \quad (4-2)$$



(a) Workpiece A: $0.1\ \mu\text{mRz}$



(b) Workpiece B: $2 \sim 3\ \mu\text{mRz}$

Fig. 4.19 Relation between ram stroke and ball indentation

4.5 結論

製作した試験機は、加工中の変化を捉えるために速度の測定精度は $\pm 1\%$ 、荷重の測定は $\pm 1\text{ N}$ 、回転軸に対するボールの振れは $2\ \mu\text{m}$ 以下とし、前章での FE 解析結果を踏まえて要求した試験機の精度を満たしていた。また、被加工材をホルダに取り付けたときの加工面の平行度はスライダに対し $2\ \mu\text{m}$ 以下を必要とした。測定器についてはこの測定が可能なスペックの機器を選定し、測定精度に問題がないことを確認した。試験機の部品を組み立てたときの精度については、微調整を行い上記の精度を確保した。また、ボールの押し込み量はボールが被加工材に接触した箇所から押し込み方向にボールが移動した距離と定義し、プレス機のラムの移動量とボール押し込み量の関係を示した。ボール押し込み量はラム移動量の半分以下の値となっていた。