新塑性加工技術シリーズ　3

プロセス・トライボロジー

―― 塑性加工の摩擦・潤滑・摩耗のすべて ――

日本塑性加工学会 編

コロナ社

■ 新塑性加工技術シリーズ出版部会

部会長	浅川基男	（早稲田大学名誉教授）
副部会長	石川孝司	（名古屋大学名誉教授，中部大学）
副部会長	小川茂	（新日鉄住金エンジニアリング株式会社顧問）
幹事	瀧澤英男	（日本工業大学）
幹事	鳥塚史郎	（兵庫県立大学）
顧問	真鍋健一	（首都大学東京）
委員	宇都宮裕	（大阪大学）
委員	高橋進	（日本大学）
委員	中哲夫	（徳島工業短期大学）
委員	村田良美	（明治大学）

（所属は 2016 年 5 月現在）

刊行のことば

ものづくりの重要な基盤である塑性加工技術は，わが国ではいまや成熟し，新たな展開への時代を迎えている．

当学会編の「塑性加工技術シリーズ」全19巻は1990年に刊行され，わが国で初めて塑性加工の全分野を網羅し体系立てられたシリーズの専門書として，好評を博してきた．しかし，塑性加工の基礎は変わらないまでも，この四半世紀の間，周辺技術の発展に伴い塑性加工技術も進歩を遂げ，内容の見直しが必要となってきた．そこで，当学会では2014年より新塑性加工技術シリーズ出版部会を立ち上げ，本学会の会員を中心とした各分野の専門家からなる専門出版部会で本シリーズの改編に取り組むことになった．改編にあたって，各巻とも基本的には旧シリーズの特長を引き継ぎ，その後の発展と最新データを盛り込む方針としている．

新シリーズが，塑性加工とその関連分野に携わる技術者・研究者に，旧シリーズにも増して有益な技術書として活用されることを念じている．

2016年4月

日本塑性加工学会　第51期会長　真　鍋　健　一

（首都大学東京教授　工博）

■「プロセス・トライボロジー」 専門部会

部 会 長　中　村　　保（静岡大学名誉教授）

副部会長　早　川　邦　夫（静岡大学）

■ 執筆者

中村　保（静岡大学名誉教授）　1.1 ～ 1.3 節

水野高爾（名古屋工業大学名誉教授）　1.4 節

土屋能成（岐阜大学）　1.5 節，3 章

木村茂樹（日本工作油株式会社）　2.1 節

石橋　格（アイルブ株式会社）　2.2 節

小見山　忍（日本パーカライジング株式会社）　2.3 節

王　志剛（岐阜大学）　4 章

小豆島　明（横浜国立大学名誉教授）　5 章

松下富春（元中部大学）　6.1.1，6.1.2 項，6.1.4 ～ 6.1.8 項，6.2 節

神　雅彦（日本工業大学）　6.1.3 項

松本　良（大阪大学）　7.1，7.2 節

北村憲彦（名古屋工業大学）　1.4，7.3，7.4，8.2 節

池田修啓（大同化学工業株式会社）　7.3 節

片岡征二（元湘南工科大学）　8.1，8.4 ～ 8.6 節

村川正夫（日本工業大学名誉教授）　8.2 節

小山秀夫（元千葉大学）　8.3 節

柳田　明（東京電機大学）　8.7 節

（2019 年 12 月現在，執筆順）

青木　勇
阿高松男
新井　透
池　浩
片岡征二
河合　望
川口康信
木原諄二
木村　紘
工藤英明
濟木弘行

田渕和彦
津谷裕子
堂田邦明
時枝　満
永栄義勇
中村　保
福田正人
松下富春
水野高爾
村木正芳
山本普康

（五十音順）

ま　え　が　き

トライボロジー（Tribology）という用語は，1966 年英国の Jost, H.P. の主催する FLW（Friction, Lubrication and Wear）委員会で提案され誕生した．その意味は，「すべり合う表面の科学と技術」である．さらに，プロセストライボロジー（Process-Tribology：塑性加工における摩擦と潤滑）という用語は，1976 年にプロセストライボロジー分科会〔主査：河合望（名古屋大学）〕の設置に当たり，春日保男教授（名古屋大学）によって提案されて用いられるようになった．これらの用語は，40 ～ 50 年間使われ続けて，ほぼ市民権を得たように思う．ただし，プロセストライボロジーという一語で表すのはやや抵抗があることから，現在，分科会の名称は，・（中黒（なかぐろ））を挿入して，「プロセス・トライボロジー分科会」と表すこととした．

わが国で，プロセス・トライボロジーの課題が，学問として大学等において研究の対象として取り上げられるようになったのは，1950 年代になってからである．それ以来，わが国のプロセス・トライボロジーの研究開発は，春日保男教授を始めとする多くの先達のお陰で，たくさんのプロセス・トライボロジストによって引き継がれてきた．そのため，多くの研究課題が解決され，また工具材料，被加工材料，工具表面処理，潤滑剤，素材，潤滑システム等について，イノベーティブな技術開発が行われてきた．その結果，現在，わが国のプロセス・トライボロジー分野の研究や技術開発は，世界の中でもリーディング的成果を上げている．

プロセス・トライボロジーの特異な条件は，工具と接触する摩擦対の一方である被加工材が巨視的塑性変形を伴うことである．これは，接触面の微視的構

造や接触面積に独特な変化をもたらし，接触機構，潤滑機構，摩擦特性，焼付き特性，摩耗特性等に特異な影響を与えている．このように特異な条件下のプロセス・トライボロジーについて解説するため，日本塑性加工学会のプロセス・トライボロジー分科会では，1988 年に「塑性加工におけるトライボロジ」（コロナ社）を編集・出版した．さらに，1993 年には，塑性加工技術シリーズの一つとして，「プロセストライボロジー　―塑性加工の潤滑―」（コロナ社）を編集・出版した．

今回は，その改訂版として，新塑性加工技術シリーズ「プロセス・トライボロジー　―塑性加工の摩擦・潤滑・摩耗のすべて―」を編集・出版することとなった．「刊行のことば」の裏面に表記した専門部会を立ち上げ，改訂版の構成と内容について検討した．その結果，基本的には前著の構成を踏襲することとしたが，新たに独立した章として，「第 3 章　工具材料と表面処理」を追加した．また，最新の研究開発技術については，それぞれの章に組み入れた．すなわち，「3 章　工具材料と表面処理」には，工具と素材の表面構造（テクスチャー）が潤滑に及ぼす影響について，「5 章　圧延におけるトライボロジー」には，熱間圧延における酸化膜の潤滑効果について，「7 章　鍛造・押出しにおけるトライボロジー」には，振動・サーボプレスによる潤滑効果について，「8 章　板材成形におけるトライボロジー」には，ホットスタンピングについて，追加記述した．

最後に，ご多用の中，ご協力いただいた執筆者各位に御礼申し上げるとともに，出版を企画された一般社団法人 日本塑性加工学会に謝意を表する．

2019 年 12 月

「プロセス・トライボロジー」 専門部会長　　中 村　保

目　　次

1.　総論 ――塑性加工におけるトライボロジーの基礎――

1.1　塑性加工におけるトライボロジーの課題と役割 …… 1
1.2　塑性加工に起因するトライボロジーの特徴 …… 3
1.3　プロセス・トライボロジーの科学技術の発展動向 …… 5
1.4　潤滑および摩擦の機構 …… 7
1.4.1　流体潤滑理論の基礎式と塑性加工への適用 …… 8
1.4.2　表面および接触の機構 …… 20
1.4.3　潤滑機構および摩擦 …… 24
1.4.4　焼付き，温度および材料特性 …… 30
1.5　工具摩耗と製品表面 …… 35
1.5.1　工　具　摩　耗 …… 35
1.5.2　製品表面の平滑化 …… 41
1.5.3　焼 付 き 現 象 …… 43
引用・参考文献 …… 45

2.　塑性加工用潤滑剤

2.1　液 体 潤 滑 剤 …… 48
2.1.1　種 類 と 特 性 …… 48
2.1.2　添　　加　　剤 …… 51

2.1.3 用 途……58
2.2 固体潤滑剤……61
2.2.1 固体潤滑剤の種類と特性……62
2.2.2 固体潤滑剤の用途……67
2.3 固体潤滑皮膜……69
2.3.1 化成型皮膜処理……70
2.3.2 リン酸塩皮膜の塑性加工特性……72
2.3.3 潤滑剤の組合せ……73
2.3.4 電解型リン酸塩皮膜処理……75
2.3.5 塗布型皮膜処理……76
2.3.6 一液型潤滑皮膜処理……76
引用・参考文献……79

3. 工具材料と表面処理

3.1 工具材料の組成・組織……81
3.2 工具表面処理……84
3.3 耐摩耗性……87
3.4 耐焼付き性……92
3.5 材料との適合性……93
3.6 工具材料・表面処理の動向……96
引用・参考文献……97

4. 摩擦試験法

4.1 摩擦試験の在り方……99
4.2 汎用基礎的摩擦試験法……100
4.2.1 点接触形式の摩擦試験……101
4.2.2 線接触形式の摩擦試験……102

4.2.3　面接触形式の摩擦試験……103
4.3　塑性加工向け基礎的摩擦試験法……104
4.3.1　圧縮–回転式摩擦試験……105
4.3.2　圧縮–すべり式摩擦試験……106
4.4　塑性加工摩擦試験法の活用……108
4.4.1　板材成形シミュレーター……108
4.4.2　引抜き・しごき加工シミュレーター……112
4.4.3　押出し・鍛造加工シミュレーター……115
4.4.4　圧延加工シミュレーター……119
4.5　摩　耗　試　験……121
引用・参考文献……124

5.　圧延におけるトライボロジー

5.1　板圧延の力学……128
5.1.1　板圧延のプロセス……128
5.1.2　圧　延　荷　重……130
5.1.3　摩　擦　係　数……132
5.2　冷間圧延潤滑……133
5.2.1　摩　擦　係　数……133
5.2.2　潤滑メカニズム……138
5.2.3　入口油膜厚さ……139
5.2.4　潤滑メカニズムと摩擦せん断応力……144
5.2.5　界　面　温　度……150
5.2.6　焼　　付　　き……154
5.3　熱間圧延潤滑……159
5.3.1　圧延荷重（圧延圧力）……159
5.3.2　摩　擦　係　数……162
5.3.3　ス　ケ　ー　ル……167
5.3.4　潤滑メカニズムと摩擦モデル……169

引用・参考文献……171

6. 引抜きにおけるトライボロジー

6.1 引抜きの力学と潤滑剤の作用機構……174
6.1.1 潤滑の課題……174
6.1.2 潤滑に影響を及ぼす因子……177
6.1.3 超音波振動を付加した場合の潤滑状態……180
6.1.4 潤滑剤の供給方法とその効果……181
6.1.5 潤滑状態の評価方法……186
6.1.6 潤滑膜の厚さ……187
6.1.7 引抜き材の表面性状……190
6.1.8 ダイの摩耗……192
6.2 引抜き用潤滑剤……195
6.2.1 潤滑剤に要求される特性……195
6.2.2 潤滑剤の種類……197
6.2.3 各種材料の引抜き加工用潤滑剤……204
引用・参考文献……214

7. 鍛造・押出しにおけるトライボロジー

7.1 鍛造の力学と摩擦・潤滑……216
7.1.1 潤滑剤の捕捉・流出の過程……218
7.1.2 摩擦せん断応力の表現と変形解析……221
7.1.3 鍛造加工における摩擦条件の評価……228
7.2 冷間鍛造……231
7.2.1 潤滑の課題……231
7.2.2 トライボロジー条件……236
7.2.3 潤滑剤および潤滑技術の実際……239
7.3 熱間鍛造および温間鍛造……247

7.3.1　潤滑剤の役割と具備すべき条件……248
7.3.2　型の損傷と型材料……251
7.3.3　潤滑剤および潤滑技術の実際……257
7.4　押　　出　　し……263
7.4.1　鋼の熱間押出し……265
7.4.2　アルミニウムの熱間押出し……268
引用・参考文献……272

8. 板材成形におけるトライボロジー

8.1　板材成形における摩擦・潤滑理論……277
8.1.1　板材成形の摩擦現象……277
8.1.2　摩擦低減のための基本……279
8.1.3　潤滑剤の取込み機構……280
8.1.4　金属どうしの凝着の低減……282
8.2　せ ん 断 加 工……287
8.2.1　工具切れ刃の摩耗……287
8.2.2　工具寿命に及ぼす諸因子の影響……291
8.2.3　製品性状への影響……300
8.3　曲げ加工における潤滑の影響……300
8.4　深絞り加工および張出し加工……301
8.4.1　深絞り加工の力学……301
8.4.2　深絞り加工におけるトライボロジー……305
8.4.3　張出し加工におけるトライボロジー……312
8.5　し ご き 加 工……313
8.5.1　しごき加工の力学……313
8.5.2　しごき加工におけるトライボロジー……316
8.6　ドライプレス加工……319
8.6.1　潤滑剤の地球環境との関わり……319
8.6.2　ドライプレス加工の実施例……319

8.7 ホットスタンピングにおけるトライボロジー……321
8.7.1 潤滑特性評価試験機……322
8.7.2 ホットスタンピング用の潤滑剤の開発……323
8.7.3 スケール厚さ，亜鉛めっきの影響……325
8.7.4 金型表面改質……327
引用・参考文献……328

索 引……332

1 総論 ── 塑性加工における トライボロジーの基礎 ──

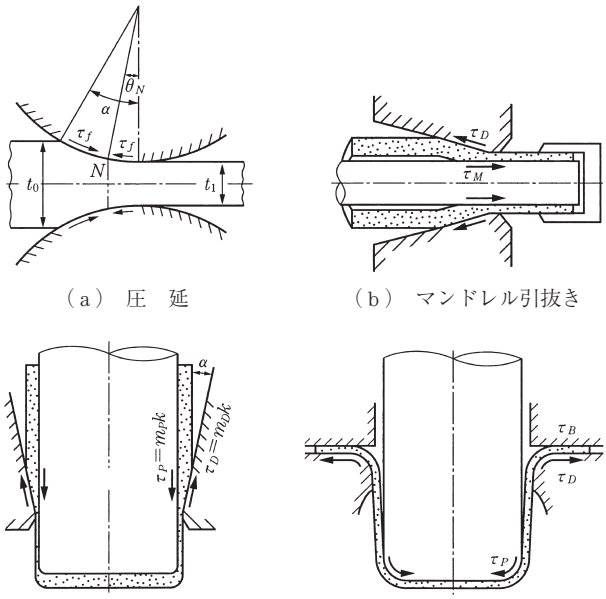
1.1 塑性加工におけるトライボロジーの課題と役割

塑性加工では，所望の機能，形状精度，および表面仕上げを持った製品を，低コストで生産性良く製作することが要求される．最近は，特に歯車などの運動継手を含む複雑形状部品のネットシェイプ加工など，高精度化，高表面品質化および高強度化に対する要求がますます強くなっている．また，チタン合金や複合材料などの難加工材の加工にも適用が進んでいる．複雑形状部品や難加工材の塑性加工では，素材がきわめて大きな材料流動を生じ，工具面圧が高く，素材表面積拡大が顕著になり，摩擦面温度も上昇するため，摩擦抵抗の低減あるいは摩擦管制，表面仕上げ向上，焼付き防止，および工具摩耗低減などのトライボロジーに関する課題の解決が重要な鍵となっている．さらに，温・熱間加工では，工具と素材の接触界面の温度がきわめて高くなるため，特に摩擦環境温度によるトライボロジー関連の課題の解決が重要となる．

塑性加工における工具面摩擦力は，通常，素材の変形を妨げ，加工面圧の増大をもたらすことが多い．したがって，摩擦力の低下は加工力および加工エネルギーの低減に直接結び付いている．そこで，潤滑の大きな目的は摩擦力の低減を図ることにある．また，工具寿命を延長することは，生産性を上げ，工具コストを低減するために重要である．その寿命は，面圧，温度，すべり速度などの過大な工具負荷による破壊や摩耗によって律せられるが，適切な潤滑剤，工具材料，工具表面処理により，その負荷を軽減することが可能である．さら

に，温・熱間加工の場合はもちろん，冷間加工でも塑性変形仕事，摩擦仕事による温度上昇により，工具に対する熱的な負荷が増大する．このような熱的負荷を軽減するために，適切な潤滑剤や工具材料・表面処理などの適用による摩擦低下，焼付き防止，摩耗抑制，伝熱抑制などといったトライボロジーの役割が要求される．

一方，**図 1.1** に示すように，圧延のかみ込み力，管の心金引きにおけるマンドレルの摩擦力，缶のしごき加工におけるパンチ側面摩擦力，および深絞りにおけるパンチ頭部摩擦力は，変形を促進し，加工力の一部を負担している．また，鍛造のように摩擦条件によって素材材料流動がきわめて大きな影響を受ける場合には，摩擦管制によって素材材料流動の制御を行うとともに，摩擦力を積極的に活用した新成形プロセスの開発も可能である[1)†]．



（a） 圧　延　　（b） マンドレル引抜き

（c） 缶のしごき　　（d） 深絞り

図 1.1　工具摩擦面を利用した塑性加工の例

† 肩付き数字は，章末の引用・参考文献番号を表す．

さらに，塑性加工では，加工が進むに伴い，被加工材の塑性変形に起因する表面トポグラフィーの変化や，工具との相互作用による表面構造の変化の結果として，製品表面が創成される．要求される表面仕上げとしては，光学ドラムや磁気ディスクなどの鏡面（$R_z=10^{-7}$ m オーダー）から自動車ボディ表面（$R_z=10^{-5}$ m オーダー）まで幅広く分布している．特に被加工材の鏡面化や平滑化は，工具のバニシ作用や工具面の転写によりもたらされるため，工具の表面仕上げに大きく依存するが，介在する潤滑剤の挙動も大きな役割を担っている．鏡面化を目的とする場合，工具と被加工材界面は，凝着や焼付きのない境界潤滑状態を維持することが要求される．以上のような塑性加工におけるトライボロジー関連の課題は，プロセス条件，接触の幾何学条件，潤滑条件，および工具と素材の条件などに影響されて現れるため，それらの課題の解決には，それらのトライボロジー現象を支配するメカニズムの解明とトライボロジー特性の評価，およびそれに基づいた潤滑剤，工具材料，工具表面処理などの開発が必要となる．

1.2　塑性加工に起因するトライボロジーの特徴

表 1.1 は，代表的な塑性加工における摩擦条件範囲を示したものである[2)]．板材成形の摩擦条件は，鍛造や押出しのように大きな塑性変形を受ける加工に比較して，あまり厳しくないと考えられている．表に示すように，素材の降伏応力に対する工具面圧比 p/Y は 1 以下，素材の表面積拡大比 $X=A/A_0$ は 0.5 ～ 1.5 程度と小さく，また加工速度も 10^{-1} m/s（相対すべり速度＝10^{-1} m/s 程度）まで，摩擦面温度も 150℃以上になることはまれである．そのため，最近は薄板の曲げ，張出し，深絞りなどの成形において，塑性変形量や相対すべり量が小さい場合には，防錆油をそのまま潤滑剤として流用する場合が増えている．しかし，例えば深絞りや張出し成形における成形限界の向上のためには，摩擦抵抗の低減や管制は依然として重要であり，また高張力鋼板，チタン板およびステンレス鋼板などの成形においては焼付きの抑制や製品表面損傷の

表 1.1　塑性加工における摩擦条件範囲

加工法 / 条件因子	板材加工	引抜き・しごき加工	圧延・回転加工	鍛造・押出し加工
面圧 p〔MPa〕（面圧比 p/Y^*）	1～100 程度（0.1～1 程度）	100～1 000 程度（1～2 程度）	100～1 000 程度（1～3 程度）	100～3 000 程度（1～5 程度）
加工速度 v〔m/s〕（すべり速度 v_s）	10^{-3}～10^{-1} のオーダー（0～10^{-1} のオーダー）	10^{-2}～10 のオーダー（10^{-2}～10 のオーダー）	10^{-2}～10 のオーダー（10^{-3}～10^{0} のオーダー）	10^{-3}～10^{-1} のオーダー（0～10^{-1} のオーダー）
摩擦面温度 T〔℃〕	室温～ 150 程度	室温～ 300 程度	室温～ 200 程度 温・熱間温度	室温～ 400 程度 温・熱間温度
表面積拡大比 X A/A_0^{**}	0.5 ～ 1.5	1 ～ 2	1 ～ 2	1 ～ 100 程度
摩擦面への潤滑剤の供給形態	捕捉	導入	導入	捕捉（導入）

〔注〕 $^*Y$：被加工材の単軸降伏応力，$^{**}A/A_0$：被加工材の加工後と前の表面積の比

防止といった課題がつねに顕在化してくる．引抜き・しごき加工では，工具面圧比 p/Y は 1 ～ 2 程度，表面積拡大比 X も 2 程度までであるが，工具と素材の相対すべり速度は 10 m/s の高速に達する場合があり，摩擦面温度は 300℃以上に達することがある．その場合には，化成皮膜処理と金属石けん潤滑で，超硬合金ダイの使用が避けられない．特に引抜きでは，摩擦力の増加は引抜き力の増加，ひいては限界引抜き率の低下をもたらす．圧延では，工具面圧比は 1 ～ 2 程度，表面積拡大比も 2 程度まで，加工速度も 10 m/s の高速に達する場合があり，引抜きと同程度であるが，ロールと素材の相対すべり速度は 1 桁小さい．そのため，摩擦面の温度上昇は，200℃程度まで，潤滑剤の導入量も引抜きに比較して多いため，ほとんどの場合，液体潤滑剤で間に合う．ただし，図 1.1 に示すように，圧延の場合には，ロールと素材の摩擦力が素材のかみ込み力となるため，かみ込み限界以上の摩擦力が必要となる．圧延，引抜きなどと比較して，鍛造や押出しでは，金型による素材の変形拘束が強く，高い圧縮応力状態で加工するため，工具面圧は素材降伏応力 Y の 5 倍程度，すなわち 3 GPa 程度まで上昇する場合がある．また，きわめて大きな塑性変形が与えられるため，素材表面積拡大比 X は 100 以上に達する場合がある[3)]．ま

た，鍛造では，据込み，軸押出し，缶のせん孔などの形式，あるいは鍛造の部位によって，摩擦に直接影響を及ぼす条件（工具面圧 p，表面積拡大比 X，相対すべり量 ΔV，温度 T など）が大きく変化する．例えば，円柱素材の据込み端面では，面圧 p は素材変形抵抗 Y の 1 ～ 1.5 倍程度，表面積拡大比 X は最大でも 2 倍程度であるが，X は外周で最大となり据込み量程度となる．これに対して，缶のせん孔におけるパンチ頭部では，面圧 p は素材変形抵抗 Y の 5 倍程度，表面積拡大比 X はせん孔深さによっては 100 以上となる場合があるが，相対すべり量 ΔV はきわめて少なくなる．歯形のような突起プロフィル形状の鍛造では，歯先の丸み外端部で局所的にきわめて大きな表面積拡大比が生じる[4]．

1.3　プロセス・トライボロジーの科学技術の発展動向

プロセス・トライボロジーの科学技術の発展動向については，Schey, J.A.[5] が，1983 年までについてまとめているが，ここではそれ以降の発展動向についても併せて**表 1.2** に示す．わが国の項目が多いように見受けられるが，決して身びいきして選んでいるわけではない．生産加工技術の分野では，1970 年代から 2010 年頃までは，わが国の先進的な科学技術開発が最も盛んに行われ，その成果が現れた結果であると考えられる．

表 1.2　プロセス・トライボロジーの科学技術の発展動向

西暦年	事　　項
1931 年	回転ダイによる引抜き摩擦の測定（Linicus, W.B. & Sachs, G.,　独）
1931 年	圧延理論による摩擦逆算（Ekelund, S.,　独）
1937 年	リン酸塩皮膜処理潤滑法（ボンデライト・ボンダリューベ）（Singer, F.,　独）
1938 年	深絞りの研究（福井伸二，　日本）
1946 年	摩耗研究（Holm, R.,　独）
1948 年	板圧延理論による摩擦逆算（Bland, D.R. & Ford, H.,　英）
1949 年	弾性流体潤滑理論（Grubin, A.N. & Vinogradova, E.,　露）
1950 年	極圧添加剤の作用機構（Bowden, F.P. & Tabor, D.,　英）

索　　引

【あ】

亜鉛系皮膜 70
亜鉛石けん 74
亜鉛めっき 325
圧　印 241
圧　延 4
圧延圧力 159
圧延圧力分布 130, 145
圧延加工シミュレーター 119
圧延荷重 130, 159
圧延式潤滑性評価試験機 136
圧延速度依存性 133
圧延理論式 130
圧縮–回転式摩擦試験 105
圧縮–すべり式摩擦試験 106
圧縮率 22
圧着ローラー 182, 184
圧力依存性 27
圧力係数 12
圧力媒体 267
圧力分布 12, 16
油の粘–弾–塑性応答のモデル 28
アブレシブ摩耗 36, 288, 290
アモントン・クーロンの法則 135
アルミニウム青銅 81
アルミニウムの熱間押出し 268

【い】

硫　黄 57, 199
硫黄系極圧剤 202
異径異周速式 120
異周速式摩擦試験法 121
板圧延 128
板抑え 299
板材成形 3
　――の摩擦現象 277
板材成形シミュレーター 108
板成形用潤滑剤 59
板掘起しタイプ 93
一液型潤滑皮膜処理 76
移着物 43
入口油膜厚さ 139, 142, 143

【う】

ウスタイト 168

【え】

液体潤滑剤 48, 239
エステル 56
エッチング面 286
エネルギー式 140
エネルギー方程式 18
エマルション 205
エマルション圧延 142
エマルション濃度 170
塩化ステアロイル 311
塩　素 57
塩素系極圧添加剤 202
円筒しごき加工 313
円筒端面式 103

【お】

オイルピット 148
応力集中部 251
大越式迅速摩耗試験 91, 121
大越式摩耗試験結果 87
送り曲げ 300
押え曲げ 300
押込み–すべり式 112
押出し 4, 263
押出し・鍛造加工シミュレーター 115
帯板しごき式摩擦試験 112
帯板しごき式摩擦試験法 114
温間加工用潤滑剤 106
温間鍛造 247
温度上昇 31, 32
温度伝導率 34

【か】

界面温度 150
界面活性剤 206
化学(的)蒸着法 84, 243
加工硬化指数 34
加工硬化性 34
加工速度 3
かじり 43
化成型皮膜処理 70, 201
化成皮膜処理法 176
型
　――の損傷形態 251
　――の冷却 250
型かじり 109
　――のシミュレーター 108
型材の表面処理 256
型摩耗タイプ 93
金型表面改質 327
かみ込み角 129
かみ込み条件 129
可容速度場 225
ガラス潤滑剤 257, 265, 266
カルシウム系皮膜 70
カルボキシル基 56
乾式潤滑 181, 189, 196, 197
間接押出し 270, 271
完全潤滑 312

【き】

機械構造用鋼　81
逆算摩擦係数　134
基　油　51
境界潤滑　25, 139, 146
　――の混合潤滑　146
境界潤滑膜　24, 25
境界潤滑領域　278
境界摩擦　25
境界摩擦係数　27
強制潤滑法　182, 184
強制潤滑用ノズル　184
凝着のしやすさ　43
凝着摩耗　36, 87, 288, 290
極圧作用　57
極圧性　196
極圧添加剤　55, 241
局所引抜き式摩擦試験　113
巨視的塑性変形　26
巨視的な潤滑剤プール　219
亀　裂　288
金属加工用潤滑油　58
金属間化合物　83
金属石けん　56, 174, 197
金属的親和性　93

【く】

くさび効果　279, 280
くさび作用　8
グラファイト　62, 242
クリアランス　297
　――の増加　287
繰返し打撃　39
クロムめっき　257

【け】

結晶粒度　34
限界平均油膜厚さ　44
検定曲線　229

【こ】

高温強度　97
高級アルコール　56
高強度ハイテン材　293
工業用潤滑油　58
合金工具鋼　81
工具コーティング　293
工具材の表面粗さ　95
工具材料　81
工具表面処理　84
工具摩耗　1, 35
工具面圧　3, 4
工具面転写　41
合成潤滑油　53, 54
高速度鋼　81, 83
剛粘塑性解析　226
降伏応力　34
降伏開始圧力　13
高分子化合物　261
後方押出し　33
後方押出し式摩擦試験法　118
後方張力圧延式　136
後方張力圧延式摩擦試験法　119
高摩擦コンテナー　235
高摩擦パンチ　235
鉱　油　51
固　化　28
黒　鉛　62, 83, 199, 258
極低速の相対すべり速度　111
固体潤滑剤　55, 61, 62, 67, 241
固体潤滑皮膜　69
コーティングの効果　293
コロイド状態　258
転がり–すべり式　121
混合潤滑　138
混合潤滑状態　26, 27
混合潤滑モデル　147, 149
コンテナー　263

【さ】

再潤滑効果　278
最大絞り力　309
最大高さ　21
材料との適合性　93
サブゼロ処理　90
差分型摩擦因子　314
サーボプレス　245
酸化安定剤　258
酸化処理　40
酸化被膜付き
　ベーナイト処理鋼板　292
酸化防止剤　55, 57
酸化膜どうしの凝着　285
産業廃棄物　201
残留オーステナイト　90

【し】

しごき加工　313
しごき式摩擦試験　114
湿式潤滑　184, 192, 202
湿式引抜き用　196
脂肪酸アミン塩　56
絞り膜効果　279, 280, 305
絞り力と摩擦の影響　304
シャワー方式　259
自由押出し式　117
シュウ酸塩皮膜　201, 209, 213, 243
シュウ酸第一鉄皮膜　72
潤滑機構　99
潤滑剤の吸着効果　279, 282
潤滑剤封入押出し法　245
潤滑剤付着量　179, 190
潤滑剤フレーク　201
潤滑剤捕捉効果　179
潤滑剤ボックス　182
潤滑性能評価法　115
潤滑添加剤　54
潤滑特性評価試験機　322
潤滑膜厚さ　12, 185, 187, 188, 191, 222, 233
潤滑膜形成メカニズム　306
潤滑メカニズム　138, 169
潤滑油膜厚さ　13
準静水圧押出し　268
準微視的な潤滑剤プール　219
上界法　223
上界要素法　223
初期摩耗　121
ショットブラスト　242
初等解法　222
初等近似解法　130

真実接触部 25
新生面
——と酸化膜の凝着 283
——の凝着 282
——の露出 21
迅速摩耗試験法 122
振動速度 181
真の接触面積 22
親和性 37

【す】

水酸基 56
水溶性型 49
水溶性ガラス 261
水溶性黒鉛潤滑剤 259
水溶性潤滑剤 203, 205
スクイーズ作用 9
スケール 167
スケール厚さ 325
ステアリン酸 311
ステライト 83
ステライト盛り金 257
ステンレス極細線 194
ストライベック線図 135
スパイクテスト 118
スパッターコーティング 65
スプレー 259
すべり圧延式潤滑性
評価試験機 137, 156
すべり距離 114
すべり線場 22, 224, 225
スライドモーション 245
スラッジ 72, 201
スラブ法 130, 222

【せ】

静圧流体潤滑 148
静水圧 24
製品表面の平滑化 41
石　灰 200
接触熱コンダクタンス
248, 255
接触面の温度 30
接触率 27, 147
セラミックス 83, 93
セラミック(ス)ダイ
268, 320
前後方押出し試験法 118
線材引抜き式 114
先進率 129
線接触 101
線接触形式の摩擦試験 102
せん断応力一定則 222
せん断加工 33, 287
せん断仕事率 18
せん断速度 299
前方押出し式 117
全率固溶体 37

【そ】

相互溶解度 37
層状構造 62
相対すべり速度 3, 4
速度検定線図 230
速度不連続線 223
側面摩耗 287
素材材料流動 2
素材表面下地処理 242
素材表面積拡大 1, 237
素材表面積拡大比 4
塑性加工摩擦試験法 108
塑性加工向け
基礎的摩擦試験法 104
塑性加工用潤滑剤 48
塑性加工用潤滑油 58, 59
塑性加工用リン酸亜鉛系皮膜
71
塑性接触領域 148
塑性流体潤滑 41
ソリュブル 49, 133

【た】

ダイ界面温度 194
耐荷重能 101
ダイカスト金型 97
耐型かじり性能 109
ダイ肩半径部 306
ダイ肩部の応力 303
ダイ側摩擦係数 315
耐酸化性 97
ダイ寿命 193
体積弾性係数 22
ダイ全角 189
ダイ出口の温度 178
耐熱グリース 267
耐熱限界 67
耐熱合金 83
耐熱高分子 267
ダイの摩耗 192
耐剥離性 87, 97
ダイビード 108
耐ヒートスクラッチ性評価
156
ダイベアリング部 193
大変形弾塑性有限要素解析
226
ダイボックス 181, 184
ダイ摩耗 194
耐摩耗性 87
耐焼付き性 92
ダイヤモンドライクカーボン
86, 320
多環芳香族化合物 51
タフトライド 256
炭化物 83, 87
炭化物被覆パンチ 42
鍛　造 4
——の力学 216
鍛造加工シミュレート 218
弾塑性有限要素法 221
断面減少率 176, 178
端面摩耗 287

【ち】

力の釣合い式 10
チタン炭化物 84
チタン窒化物 84
窒　化 256, 266
チャタリング 129, 134
鋳　鉄 81
中立点 129
超音波振動 180
超硬合金 83, 293
超平滑仕上げ面 41
直鎖脂肪酸 56
直鎖状パラフィン 52
直接押出し 270

【つ】

突き曲げ　300

【て】

定常摩耗　121
ディッピング　259
ティムケン式　103
適合性　93
デッドゾーン　226
デッドメタル　268
電解型リン酸塩皮膜処理　75
添加剤　55, 199
点接触　100
点接触形式　101

【と】

動圧流体潤滑　146
動粘性効果　279, 280, 305, 307, 316
塗布型処理　70
塗布型皮膜処理　76, 201
トポグラフィー　221
塗膜型　200
ともがね　38
ともがねタイプ　93
ドライ絞り加工　320
ドライせん断加工　295
ドライプレス加工　279, 319
トライボロジーシミュレーター　135
トライボロジー設計　244
トライボロジー特性　84, 99
トラクションドライブ　19
トレスカの降伏条件　302

【な】

内部変形仕事率　223
ナフテン系油　51, 52
難加工材　1
軟化抵抗　251

【に】

二次元分流押出し式　118
二次引張応力　233
二層皮膜の二工程処理　78
ニート圧延　139
乳化剤　58
ニュートンの粘性式　11
二硫化モリブデン　199, 242

【ぬ】

抜きかす　289
濡れ性改善　58

【ね】

熱拡散率　34
熱間圧延潤滑剤試験機　162
熱間圧延潤滑性評価試験機　165, 170
熱間静水圧押出し　267
熱間ダイス鋼　81, 253
熱間鍛造　247
熱間鍛造温度　251
熱間鍛造金型　97
熱間鍛造式　122
熱間鍛造用鋼　251
熱間チムケン試験機　132, 162, 164
熱間転動試験機　164
熱間トライボロジーシミュレーター　132, 163
熱間深絞り試験　324
熱境界条件　221
熱サイクル　254
熱絶縁性　33
熱たわみ　232
熱抵抗　248
熱伝導率　18, 32, 34
ネットシェイプ　231, 238
ネットシェイプ加工　1
熱軟化層　251
熱流体潤滑理論　19
粘　性　196
粘性流体膜類似則　222
粘度式　140
粘度の圧力依存性　17

【の】

ノズル　182
ノックアウト　233, 238
ノモグラフ　115

【は】

バウデン試験機　155
バウデン・レーベン式　101, 102
鋼の熱間押出し　265
破断力　305
バナジウム炭化物　86
パーム油　133
パラフィン系油　51, 52
張出し加工　312
ばり道　216
半固体潤滑剤　242
パンチ側摩擦係数　315
パンチの弾性変形　246
汎用基礎的摩擦試験法　100

【ひ】

非塩素系潤滑剤　35
被加工材表面凹凸　279
　――の効果　281
引抜き加工　174
　――のトライボロジー　177
引抜き式摩擦試験　114
引抜き・しごき加工　4
引抜き・しごき加工シミュレーター　112
引抜き速度　174, 178, 181
引抜き抵抗　181
引抜き用潤滑剤　195
引抜き用潤滑皮膜処理　200
非黒鉛系白色潤滑剤　261
微視的塑性流体潤滑機構　114
非水溶性潤滑剤　205
ヒートスクラッチ性　154
ヒートチェック　39, 250, 251
被覆率　62, 64
比摩耗量　124
評価試験機　170
表面粗さ　191, 192
表面硬化処理　266
表面構造の変化　20
表面光沢　191
表面酸化膜　35
表面仕上げ　1, 3

表面積拡大 237
表面積拡大比 3, 4, 20, 114
表面積拡大率 278
表面テクスチャー 295
表面トポグラフィー 3
平板しごき試験 286
平板引抜き加工 91
平板引抜試験 323
ビレット 263
疲労摩耗 39
ピン・ディスク式 102, 103
ピン・ディスク式摩擦試験 121, 283

【ふ】

ファインブランキング 296
ファレックス式 103
ファンデルワールス力 56
深絞り加工 301
深絞り式 108
付加的仕事 178
付加的せん断変形 233
腐食摩耗 39
フッ化アルミニウム系処理 72
フッ化アルミニウム皮膜 201
フッ化チタン系処理 72
物理(的)蒸着法 83, 243
振り子式 101
ブリスター欠陥 271
プレスブレーキ 300
プレス油 59, 60
プレートアウト 142
フローガイド 271
分子間引力 56
粉末合金 83
粉末コーティング 327
分流点 226

【へ】

ベアリング面 271
平滑性 192
平均温度上昇 151
平均せん断応力 25
平坦率 186, 190, 193, 201
へき開 62
ヘッダー 241
ヘッディング 241
ヘマタイト 168
変形抵抗 34
変形ひずみ 178
変態ひずみ 87

【ほ】

棒材前方押出し 244
ホウ砂 76, 200
防食材 55
防錆添加剤 55, 57
ホットスタンピング 321
ホットスタンピング用潤滑剤 324
ボライディング 256
ポリエチレンフィルム 312
掘起し項 26
ボール・ディスク式 102
ボール通し式 112

【ま】

マイクロディンプル 296
マグネタイト 168
マクロ塑性流体潤滑 138, 144, 145, 146
摩　擦
　——の凝着理論 25
　——の定式化 27
摩擦角 129
摩擦管制 1, 2
摩擦機構 99
摩擦距離 37
摩擦係数 25, 62, 99, 115, 132, 133, 162, 178
摩擦試験 99, 121
摩擦仕事 178
摩擦仕事率 32, 223
摩擦条件範囲 3
摩擦せん断応力 22
　——の ηV 依存性 106
摩擦せん断係数 115
摩擦抵抗 1
摩擦特性値 101
摩擦法則 106, 107
摩擦面温度 1, 3, 4
摩擦モデル 169, 170, 221
摩擦モデル則 222
摩　耗 251
摩耗係数 37, 99, 124
摩耗試験 121
摩耗体積 37
マルテンサイト 90
マンドレル 263

【み】

見かけの接触面積 22
ミクロプール 278, 308, 310
ミクロプールメカニズム 285, 309, 318
未固溶炭化物 88
ミーゼスの降伏条件 22

【む】

無かじりタイプ 93
無機系固体潤滑剤 62
無機物 198
無潤滑 269
無洗浄油 51

【め】

メカニカルデスケーラー 201
面圧負担効果 279
面接触 101
面接触形式の摩擦試験 103

【や】

焼付き 1, 30, 43, 134, 154
　——が発生する限界の条件 43
　——の限界荷重 101
　——の発生条件 44
焼付き限界 99
焼付き限界圧下率 157
焼付き現象 43
焼付き状態 62
焼付き発生限界線 158
焼付き発生条件 114
焼戻し軟化 233
焼戻しパラメーター 253
焼戻し母曲線 253

【ゆ】

有機系固体潤滑剤 68
有効硬さ 24
ユジン・セジュルネ法 265
油　性 196
油性型 49
油性剤 55
油性作用 56
油性潤滑剤 202, 206
油性添加剤 241
油膜厚さ 14, 55, 140
油膜の形成 8
油溶性潤滑剤 259

【よ】

溶融塩 267
溶融塩浸漬法 84
溶融ガラス 267

【り】

リジェクション 201, 202
流体潤滑の基礎式 9
流体潤滑理論 7, 8
両性酸化膜 35
リ　ン 57
リング圧縮式 115
リング圧縮摩擦試験法 229
リング内径の変化率 115
リン酸亜鉛 73, 174
リン酸亜鉛皮膜 75
リン酸塩処理 70
リン酸塩皮膜 70, 200, 201
リン酸塩皮膜処理 243
リン酸鉄 72
リン酸マンガン皮膜 70

【れ】

冷間圧延理論式 134, 135
冷間ダイス鋼 81
冷間鍛造 231
冷間タンデムミル 133
冷却強さ 256
レイノルズ方程式 9, 15, 140, 142
連続伸線機 202
連続の式 10
連続引抜き圧延式 119

【ろ】

ロール摩耗 160

【わ】

ワックス 242

【A】

Amontons の法則 7, 222
Archard 37
　――の界面温度の解析 150

【B】

Bland & Ford 131, 134
BN 62

【C】

chemical vapor deposition 84
Coulomb の法則 7
CVD 84, 243

【D】

diamond-like carbon 96
DLC 86, 96, 320
DLC コーティング 295

【H】

Hitchcock のロールへん平式 134
Holm の理論 36

【K】

Karman の圧延理論式 131

【L】

Li-グリース系圧延油 164

【M】

MC 型炭化物 88
MoS_2 62

【N】

Nadai 131

【O】

Orowan 131
　――の熱間圧延理論式 132

【P】

physical vapor deposition 83
plasto-hydrodynamic lubrication 144
PTFE 68
PVD 83, 84, 243

【S】

SAE 式 103
SRV 試験機 102, 162, 163
SRV 振動・摩耗試験機 132
Stribeck 線図 138

【T】

TD 処理 84, 327
TiN 被膜 96
TRD 84

【U】

U 曲げ 300
U 曲げ加工 91
U 曲げしごき式摩擦試験 111

【V】

VC 86
VC 被覆 256
VC 被覆層 92
V 曲げ 300

プロセス・トライボロジー——塑性加工の摩擦・潤滑・摩耗のすべて——

Process Tribology — Tribology, Lubrication, and Wear in Metal Forming —
© 一般社団法人 日本塑性加工学会　2020

2020 年 2 月 28 日　初版第 1 刷発行

検印省略

編　　者　一般社団法人
日本塑性加工学会
発 行 者　株式会社　コロナ社
代 表 者　牛来真也
印 刷 所　萩原印刷株式会社
製 本 所　有限会社　愛千製本所

112-0011　東京都文京区千石 4-46-10
発 行 所　株式会社　**コ ロ ナ 社**
CORONA PUBLISHING CO., LTD.
Tokyo Japan
振替 00140-8-14844・電話(03)3941-3131(代)
ホームページ https://www.coronasha.co.jp

ISBN 978-4-339-04373-0　C3353　Printed in Japan　(横尾)

本書のコピー，スキャン，デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられています。
購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は，いかなる場合も認めていません。
落丁・乱丁はお取替えいたします。