

新塑性加工技術シリーズ 1

塑性加工の計算力学

— 塑性力学の基礎からシミュレーションまで —

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も遂げ、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)

■ 「塑性加工の計算力学」専門部会

部会長 湯川伸樹 (名古屋大学)

■ 執筆者

小坂田	宏	造	(大阪大学名誉教授)	1章	
上森	武	武	(岡山大学)	2.1, 2.2, 2.6, 2.7節	
吉田	健	吾	(静岡大学)	2.3～2.5節	
濱孝	孝	之	(京都大学)	2.8～2.10節	
柳本	本	潤	(東京大学)	3.1, 3.2節	
桑原	利	彦	(東京農工大学)	3.3, 3.4節, 5.1節	
湯川	伸	樹	(名古屋大学)	4.1, 4.2節	
早川	川	邦	夫	(静岡大学)	4.3節, 5.4節
杉友	友	宣	彦	(株式会社 JSOL)	4.4節
酒井	井	讓		(横浜国立大学名誉教授)	4.5節
王	志	剛		(岐阜大学)	5.2節
吉田	田	佳		(岐阜大学)	5.3節
眞山	山	剛		(熊本大学)	5.5節
瀧澤	澤	英	男	(日本工業大学)	5.6節

(2024年2月現在, 執筆順)

相澤	龍彦	沢田	孚夫
井関	日出男	島	進
伊藤	耿一	神馬	敬
井上	達雄	田中	伸司
芋阪	浩男	田中	豊喜
小木	曾克彦	富田	佳宏
加藤	和典	永井	康友
川井	謙一	藤田	昌大
木内	学	牧野	内昭武
後藤	學	村上	糺
小森	和武	横内	康人

(五十音順)

ま え が き

本書は1992年に刊行された『材料加工の計算力学 — 進歩するシミュレーション技術 —』（塑性加工技術シリーズ1）の改訂版である。旧版が刊行された当時はちょうど有限要素法による解析がさまざまな実用的な塑性加工問題に適用され始めたころであり、一般に使える計算機の性能の大幅な飛躍と相まって、汎用のFEM解析が一気に広がった時期であった。そのような数値解析の適用拡大の一方で、それまでの解法の有用性がなくなるわけではなく、旧版の出版部会長の神馬敬先生がまえがきの中で「FEM解析では膨大な数値計算を経て結果が得られるゆえに、正しい結果が得られたか否かの判断が大切で、実験結果との対比ができれば最善だが、初等理論、すべり線場法、上界接近法などを用いて並行して解析を行い、加工様式を定性的に理解できる見通しのよい変形モデルを作成することが望まれる。加工様式によってはFEMよりほかの解析法のほうが適していることがあることは圧延プロセスの制御に初等理論が活用された例から明らかであり、解析法の選択は重要である。」と述べておられるとおりである。このことは、FEM解析がさらに精緻にかつ大規模な解析として進歩した現在でも変わらず、本書においても塑性理論から初等解法、そして数値解析と順を追って理解を深められるような構成を踏襲している。

それぞれの解析手法は塑性加工技術の発展とも密接に関連して発展してきていることから、最初に塑性加工の歴史、そしてそれに関連する塑性力学の発展を俯瞰してみる章を最初に設けたのも、本書の特徴である。第4章の数値解析においては、線形弾性、剛塑性、弾塑性の有限要素解析に加えて、板成形解析などで現在よく使われる動的陽解法による有限要素解析、さらには粒子法によ

る解法についても加えた。第5章では、シミュレーション高度化のための実験手法として、材料変形特性、摩擦や破壊等に関するパラメータの測定法、あるいは解析結果の評価のための応力測定や材料組織の評価方法、また解析精度の検証と評価のための考え方を示した Varidation and Verification などをもとめ、解析を具体的な実際の加工に適用しようとする人の助けとなるよう工夫されているのももう一つの特徴である。本書が材料加工プロセスの解析に携わっているあるいはこれから学ぼうとしている人たちの助けとなり、これからのシミュレーション技術の一層の発展に寄与できることを願う。

本書では内容が多岐にわたっており、日本塑性加工学会プロセッシング計算力学分科会の委員の方々を中心に多数の方々に執筆をお願いした。執筆者の方々に深く感謝申し上げるとともに、諸般の事情により刊行が遅れたことをお詫び申し上げます。出版に向けさまざまなご協力をいただいた学会関係の方々、とりわけ最後の取りまとめにおいて多大なるご助力をいただいた京都大学 浜孝之先生、静岡大学 吉田健吾先生、山形大学 黒田充紀先生に深甚の謝意を表します。またコロナ社には辛抱強く脱稿をお待ちいただき、また編集上のさまざまな助言をいただき、感謝申し上げます。

2023年12月

「塑性加工の計算力学」専門部会長 湯川 伸樹

目 次

1. 塑性加工と塑性力学の歴史

1.1 塑性加工の歴史	1
1.1.1 産業革命以前の塑性加工	1
1.1.2 産業革命以後の塑性加工の進歩	3
1.1.3 自動車大量生産のための塑性加工	5
1.2 塑性力学の発展	9
1.2.1 塑性力学の始まり	9
1.2.2 降伏条件と塑性構成式	11
1.2.3 すべり線場理論	12
1.2.4 スラブ法	13
1.2.5 上界法	14
1.2.6 有限要素法	16
1.2.7 各種のシミュレーション方法	19
1.3 塑性力学の役割	20
1.3.1 塑性力学とシミュレーション	20
1.3.2 塑性加工分野以外での塑性力学の利用	21
引用・参考文献	22

2. 基礎理論

2.1 応力とひずみ	24
2.1.1 応力と応力増分	24

2.1.2	ひずみとひずみ増分	26
2.2	応力-ひずみ関係とその硬化則	28
2.3	降伏条件式	30
2.3.1	等方性降伏条件式	30
2.3.2	異方性降伏条件式	32
2.4	加工硬化則	35
2.4.1	等方硬化則	35
2.4.2	移動硬化則	37
2.4.3	複合硬化則・異方硬化則	38
2.5	塑性流動則	39
2.5.1	Reuss, Prandtl-Reuss, Lévy-Mises の式	39
2.5.2	最大塑性仕事の原理	40
2.5.3	関連流動則	42
2.5.4	尖り点効果	45
2.5.5	Hencky の全ひずみ理論および J_2 変形論	46
2.5.6	圧縮性材料の塑性構成式	47
2.6	仮想仕事の原理, 変分原理	49
2.6.1	仮想仕事の原理	49
2.6.2	補仮想仕事の原理	51
2.6.3	速度形の仮想仕事の原理	51
2.6.4	弾塑性体の変分原理	52
2.6.5	剛塑性体の変分原理	55
2.6.6	解の唯一性の十分条件	56
2.7	塑性不安定	58
2.7.1	薄板の拡散くびれ	58
2.7.2	内圧・軸力・ねじりを受ける円管の不安定	60
2.7.3	液圧バルジを受ける薄板の不安定	62
2.7.4	薄板の局部くびれ	63
2.8	延性破壊の理論	68
2.9	結晶塑性解析	71
2.9.1	すべり系	72

2.9.2	単結晶の構成式	73
2.9.3	Schmid 則とすべり増分	75
2.9.4	すべり系の加工硬化	78
2.9.5	結晶塑性モデルによる変形解析	80
2.10	有限変形問題への拡張	82
2.10.1	配置の変化が変形に及ぼす影響	82
2.10.2	剛体回転がひずみに及ぼす影響	83
2.10.3	剛体回転が応力に及ぼす影響	85
2.10.4	結晶塑性解析における結晶方位回転	86
	引用・参考文献	89

3. 解 析 解

3.1	ス ラ ブ 法	95
3.1.1	解析の対象とする領域と応力場の近似	96
3.1.2	スラブ要素に作用する応力ベクトルと面積	96
3.1.3	スラブ要素に作用する力の釣合い式	97
3.1.4	力の釣合い式と降伏条件を連立させた解析解の導出	97
3.1.5	入口面において被加工材が受けるせん断変形に対応した仮想的な 応力 σ_s	99
3.2	すべり線場法	100
3.2.1	すべり線場とホドグラフおよびそれらの決定	101
3.2.2	基礎的關係	104
3.2.3	すべり線場の描き方と例題	109
3.3	エネルギー法	110
3.4	上 界 法	113
3.4.1	上 界 定 理	114
3.4.2	上界定理の一般化	115
3.4.3	連続な可容速度場とその応用	118
	引用・参考文献	128

4. 数 値 解 析

4.1 線形弾性有限要素法	130
4.1.1 弾性変形の支配方程式	130
4.1.2 有限要素分割による離散化	132
4.1.3 形 状 関 数	133
4.1.4 有限要素剛性方程式	136
4.1.5 全体構造の剛性方程式	138
4.2 剛塑性有限要素法	140
4.2.1 変 分 原 理	140
4.2.2 剛塑性有限要素剛性方程式	142
4.2.3 解析上の問題点	148
4.3 弾塑性有限要素法	151
4.3.1 等方弾塑性体構成式	152
4.3.2 仮想仕事の原理	154
4.3.3 有限要素剛性方程式	157
4.3.4 時 間 積 分	159
4.4 動的陽解法	163
4.4.1 動解析の定式化	163
4.4.2 時間離散化手法	167
4.5 SPH 法 解 析	172
4.5.1 SPH 法の歴史と特徴	172
4.5.2 粒 子 モ デ ル	173
4.5.3 SPH 法 の 理 論	176
4.5.4 重 み 関 数	181
4.5.5 人 工 粘 性	182
4.5.6 弾 性 解 析	182
4.5.7 弾 塑 性 解 析	183
4.5.8 解 析 例	184
引用・参考文献	186

5. シミュレーション高度化のための実験手法

5.1 材料試験法	189
5.1.1 単軸引張試験	189
5.1.2 単軸圧縮試験	189
5.1.3 金属薄板の面内圧縮試験および面内反転負荷試験	190
5.1.4 平面ひずみ圧縮および平面ひずみ引張試験方法	191
5.1.5 引張-せん断組合せ試験方法	192
5.1.6 液圧バルジ試験方法	192
5.1.7 二軸圧縮試験方法	193
5.1.8 十字形試験片を用いた二軸引張試験方法	193
5.1.9 二軸バルジ試験方法	195
5.1.10 引張-圧縮組合せ応力試験方法	196
5.2 摩擦試験法	196
5.2.1 摩擦試験法	197
5.2.2 摩擦法則	199
5.3 延性破壊の評価方法	202
5.3.1 延性破壊予測モデル	203
5.3.2 ひずみの計測	206
5.4 残留応力測定法	207
5.4.1 変形測定法	207
5.4.2 X線応力測定法	208
5.5 集合組織の測定	209
5.5.1 集合組織に関連する基礎知識	209
5.5.2 集合組織の測定方法	211
5.5.3 集合組織測定結果の力学解析への利用	212
5.6 Verification と Validation	213
引用・参考文献	218
索引	223

産業革命で蒸気動力による熱間厚板圧延機や鍛造ハンマーが発明され、19世紀に熱間圧延や熱間鍛造が始まった。20世紀前半に電動モータを動力源として薄鋼板の冷間圧延が行われるようになり、薄鋼板のプレス加工が始まった。これらの結果、各種の塑性加工法が自動車の大量生産に使われるようになった。

19世紀に研究が始まった塑性力学は20世紀前半に大きく発展し、スラブ法が板圧延の制御基礎式として、上解法が冷間鍛造の加工力計算に使われるようになった。20世紀後半に塑性変形の有限要素法解析の研究が始まり、21世紀初めから塑性加工シミュレーションに不可欠なツールになった。

この章では、塑性加工と塑性力学の発展の概要を説明する。

1.1 塑性加工の歴史

1.1.1 産業革命以前の塑性加工

文字が成立し文献資料によって歴史事象を検証できる前の先史時代は、機器や武器の材料によって石器時代、青銅器時代、鉄器時代に分けられる。石器時代には人工的な金属はなかったが、自然に存在する隕鉄や銅、金などの装飾品が出土しており、石器で打撃して作られたと考えられている。

青銅は銅と錫の合金であるが、錫の割合を30%にすると融点が700℃程度にまで低下するため、当時の加熱方法でも鑄造が可能であった。青銅の生産はメソポタミア、エジプトでBC3500年ごろから、中国でBC3000年ごろから、インドではBC2500年ごろから始まった。

鉄の生産を始めたことで有名なヒッタイトはBC2000年ごろに現在のトルコ

の首都アンカラ近辺のアナトリアに流入し、鉄を独占して BC1400 年ごろにエジプトに並ぶ大帝国をつくっていた。砂鉄や鉄鉱石を木炭で加熱還元してつくった海綿鉄を破碎して介在物を取り除き、鉄の破片を集めて鍛接で不純物を絞り出して接合、成形するのがヒッタイトの製鉄技術と見られる。ヒッタイト帝国は BC1200 年ごろに異民族の侵入により滅亡したが、これにより製鉄技術が世界各地に拡散し、インドには BC1000 年ごろ、中国には BC700 年ごろに伝わった。日本列島では弥生後期（AD100 年～300 年）に鉄生産が始まった。

世界各地のヒッタイト起源の製鉄では、高温に熱した鉄（鋼）を鉄製の金床（アンビル）の上でハンマーを用いて叩くハンマー（自由）鍛造が用いられた。動力としては早い時期に家畜の力も利用するようになったが、鍛造技術自体は AD1400 年ごろまでは大きな進歩はなかった。16 世紀に火縄銃が種子島に伝来したとき、短時間で類似品の生産が日本国内でできたのは、鍛造技術ではヨーロッパと大きな差がなかったためと見られる。

青銅や鉄の自由鍛造以外の塑性加工としては、コインの型鍛造が早くから行われていた^{1)†}。銀貨や銅貨の半密閉鍛造は BC700 年ごろに、地中海域で始まったが、鉄製の金型が用いられたものと見られる。

ヨーロッパでは西ローマが滅亡した AD400 年ごろからルネサンスの始まる 1400 年ごろまでを「中世」と呼ぶ。中世には民族の移動などで進歩が停滞したが、11 世紀ごろから水車を動力として使用するようになった。AD1400 年～1600 年のルネサンスの時代には、芸術だけでなく技術の分野でも進化が見られ、針金の引抜きや鍛造ハンマーに水車を使用するようになった²⁾。1500 年ごろに活躍したレオナルド・ダ・ビンチ（L. da Vinci）は技術のスケッチを多く残しており、圧延機のスケッチも描いている。動力源は水車を想定していたと見られ、鑄鉄のロールがあれば当時でも実現不可能な機構ではなかった。

ルネサンス時代にはガリレオ・ガリレイ（G. Galilei）などの科学者が科学的な知識を広め、1600 年ごろからは技術の改良が活発に行われるようになった。

† 肩付き数字は、章末の引用・参考文献番号を表す。

1700年以後は工業が発展し、1712年にニューコメンにより負圧型の蒸気エンジンが開発され、1728年には板の圧延が始まるなど、産業革命の下地が整った。

1.1.2 産業革命以後の塑性加工の進歩

産業革命は、AD1770年ごろに、ワット（J. Watt）がニューコメンの蒸気機関を加圧型の大動力・回転型に改良したとき、を始まりとする。その実現には、ウィルキンソン（J. Wilkinson）の中ぐり盤で鑄鉄製シリンダーの高精度加工が可能になったことが寄与した³⁾。蒸気動力は瞬く間にほとんどの機械の動力として応用され、大きな力を必要とする塑性加工は蒸気動力の出現により変化を始めた。

〔1〕 蒸気ハンマー

1784年に、ワットは、ハンマーの動力に蒸気を用いた蒸気ハンマーの特許を得た。高压蒸気でピストンをもち上げて自由落下させる落槌型ハンマーは、1838年にスコットランドで発明され、大型の鋼製品が鍛造されるようになった。英国のネスミス（J. Nasmyth）は、1839年に自由落下型の蒸気ハンマーを設計し1842年にはそれを製造したが、後に蒸気加速型のハンマーに改良した。このハンマーは、作業者が打撃速度を容易に制御できるという特徴があったため、当時爆発的に売れた。

日本では、1859年に、江戸幕府がオランダ製の蒸気ハンマーを長崎製鉄所に輸入した。その後、明治政府により長崎などに造船所が開設され、ハンマーによる自由鍛造が行われていた。型鍛造は、1909年に陸軍砲兵工廠がフランス製の小型ドロップハンマーを数台輸入し、小銃部品を製作した。

〔2〕 形鋼圧延

1779年にはウィルキンソンにより蒸気動力の圧延機が発明され、1800年代には鋼の棒材が生産されるようになった。マンネスマン（Mannesmann）兄弟は、棒材を回転しながら半径方向に繰り返し圧縮するときに中心部に亀裂が生じることに着目し、2個のロールで強く圧縮しながら材料を回転しながら丸棒中心部にプラグを置いて穿孔するマンネスマン穿孔圧延法を1885年に発明し、

これにより継目なしパイプの製造が可能になった⁴⁾。

〔3〕 プレス 機 械

液圧プレスはラムに加わった加圧液の力をそのまま加工部に伝える装置であり、加圧液として初期には水を用いていたが、その後油に変わった。液圧プレスは、速度は低い、長いストロークで加圧する加工に向いている。

1795年に英国ブラマー（J. Bramah）が水圧プレスを発明して鍛造に用いた⁵⁾。1860年代には鉛の押し出しに水圧プレスが使用されるようになった。日本では、1924年に小松製作所が最初の市販油圧プレスを製作した。

液圧プレスは大荷重を出せるので大型プレスに使われている。1943年に、大型の砲身の自由鍛造などのため、4千トン水圧プレスが日本製鋼所に設置された。1960年代には、航空機部品の型鍛造のため、アメリカヤソ連で6~7万トンの超大型水圧プレスがつくられた⁶⁾。2012年に航空機部品製造のために日本で製造された5万トン油圧プレスは、速度の細かい制御が可能である。

機械プレスでは回転運動をクランク機構により往復運動に変え、リンク機構で力を増幅して加工を行う。20世紀初期に、英国のWilkins and Mitchell社によってトグルプレスが考案された。初期のプレスは油圧と歯車の組合せで偏心軸を回転した。1900年ごろから利用が広がった電気により、プレスの動力は電動モータに置き換わった。機械プレスの機構は、出力の小さい電動モータのエネルギーをフライホイールに蓄え、クラッチで回転運動をクランクに伝えて往復運動に変え、各種のリンク機構を介してラムを往復させる。20世紀の間、これら機械プレスの基本的な構造に大きな変化はなく、モータの性能の向上とともに大型化し、高速化していった。

20世紀の終わりごろには大出力のサーボモータが出現し、フライホイールやクラッチなどを介さずモータで運動を直接制御し、自由な運動ができるようにしたサーボプレスが発売された⁷⁾。サーボプレスの自由な動きは、板プレス加工で摩擦低減などに有効利用されている。さらに、デジタル制御の特性を生かして測定装置など各種の機器との連携も可能であり、情報を共有する情報化時代に適した新しい利用方法の開発が期待されている。

1.1.3 自動車大量生産のための塑性加工

織物の大量生産は産業革命のころから行われていたが、機械部品の大量生産は1914年に米国でT型フォードの生産のためにベルトコンベヤが導入されたころに始まり、米国では1940年代には工業全体で高いレベルの大量生産に達していた。日本では1960年ごろから大量生産時代に入った。塑性加工は高速の加工が得意であるため、大量生産に非常に多く使用されるようになった。

〔1〕 薄鋼板の高速圧延

大量生産される乗用車には多くの冷間圧延された薄鋼板（コールドストリップ）が用いられているが、薄板の圧延ではロール径を小さくする必要がある。これによりロール強度が低下するだけでなく、ロールの曲がりにより中央部が厚いクラウン形状の板になるため、バックアップロールを用いた四段圧延機が不可欠になる（図1.1参照）。最初の大型四段圧延機は1891年に米国に設置された板幅2800mmの可逆圧延機であるが、圧延速度はきわめて低かった⁸⁾。

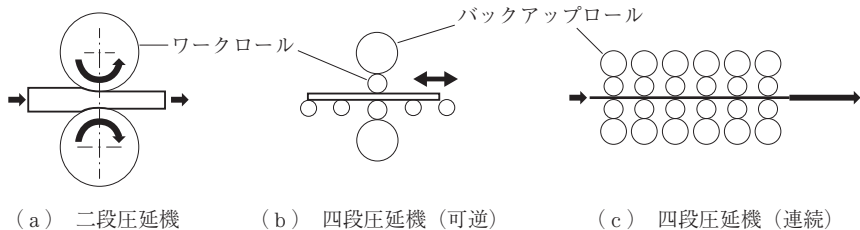


図1.1 板圧延機と圧延方式

2スタンド以上にまたがって熱間薄板（ホットストリップ）圧延を行うタンデム連続圧延は、1926年にアメリカで初めて成功した。図1.2に示すように、冷間薄板（コールドストリップ）圧延もこのころに始まっている。それ以来、モータの高速化や制御方法の高度化でコールドストリップ圧延の速度は1970年ごろまで年とともに高くなっていった⁹⁾。

1970年ごろに圧延機の高速度の限界に達し、速度の増加はほとんどなくなった。ストリップの連続圧延でもコイル交換が生産性を落とすため、ストリップの連続圧延中に先行コイルの後端をつぎのコイルの先端に接合して無停止で操

索 引

【あ】	応力ベクトル	24	キルヒホッフ応力	154
	重み関数	181	【く】	
アイソパラメトリック要素	重み付き補間法	176	くびれ	58
	温間鍛造	8	グラジエント	178
圧延機			クーラン条件	171
【い】	【か】		グリーン・ラグランジュ	
板鍛造	ガウスの定理	179	ひずみ	84
板プレス加工	下界接近法	113	グリーン関数	82
一液潤滑	拡散くびれ	58	【け】	
一般化したフックの法則	加工硬化	28	形状関数	133
移動硬化則	加工硬化則	28	結晶塑性解析	71
異方硬化則	加工熱処理	8	結晶塑性有限要素法	80
異方性	仮想仕事の原理	154	結晶方位分布関数	211
異方性降伏条件	形鋼圧延	3	現在配置	154
	型鍛造	2	【こ】	
【う】	活動すべり系	76	剛完全塑性	12
薄鋼板	カーネル関数	176	公称ひずみ	28
運動方程式	カーネル積分	173, 176	構成式	12
	可容速度場	14	構造力学	21
【え】	カルマンの圧延方程式	14	後続降伏条件	35
影響半径	慣性の影響	172	剛塑性有限要素法	18, 140
液圧バルジ試験方法	完全解のすべり線場	103	後退オイラー法	161
液圧プレス	完全積分	148	高張力鋼板	7
エネルギー法	完全塑性	153	コーシー応力	157
延性破壊	関連流れ則	152	コーシーの式	25
延性破壊条件式	関連流動則	42	個別要素法	19
エンドレス圧延			コールドストリップ	5
【お】	【き】		【さ】	
オイラー角	機械プレス	4, 7	最小ポテンシャルエネルギー	
応力増分	基準配置	154	の原理	137
応力テンソル	境界値問題	154	最大せん断応力説	11
応力-ひずみ関係	共回転応力テンソル	86		
応力-ひずみ曲線	共回転座標系	86		
	極限解析法	113		
	局部くびれ	58		

最大塑性仕事の原理	40	線形弾性有限要素法	130	テイラーモデル	81
サーボプレス	4	潜在硬化	79	転位密度	80
産業革命	3	前進オイラー法	160	電子線後方散乱回折法	80
【し】		全体構造の剛性方程式	138	テンソル量	178
軸対称問題	15, 120	選択低減積分	148	【と】	
試行応力	160	せん断弾性ひずみ		等方硬化則	37
質点モデル	175	エネルギー説	11	等方性降伏条件	30
シミュレーション	20	【そ】		トグルプレス	4
集合組織	86, 209	相互作用係数行列	78	トレスカの降伏条件	10
十字形試験片	193	双晶変形	88	【な】	
集中質量マトリックス	166	相当応力	30	流れ関数	122
主すべり系	72	相当塑性ひずみ	36	ナットフォーム	8
上界接近法	113	相当塑性ひずみ増分	36	【に】	
上界定理	15, 114	速度こう配テンソル	156	二軸バルジ試験	195
上界法	14	速度ベクトル	154	二段圧延機	5
蒸気ハンマー	3	塑性異方性	86	ニュートンの運動方程式	175, 180
真応力	26	塑性構成式	11, 12	ニュートン・ラフソン法	162
人工粘性	182	塑性仕事	35	ニュートン力学	9
真ひずみ	28	塑性スピン	87	【ね】	
【す】		塑性スピントテンソル	87	熱間薄板	5
水圧プレス	4	塑性ひずみ局所化現象	58	熱間鍛造	7
数学的均質化法	81	塑性ポテンシャル	43	熱間フォーム	8
スカラー量	178	【た】		【は】	
ストレッチ成形	6	第2種ピオラ・キルヒホッフ		背圧鍛造	8
スピントテンソル	156	応力	154	バウシニング効果	29
スプライン曲線	181	大規模モデルへの適応性	163	白色潤滑	7
すべり系	72	大変形弾塑性有限要素法	18	バックアップロール	5
すべり線	101	多軸油圧プレス	8	半価幅値	208
すべり線場	101	単軸圧縮試験	189	半径修正子	163
すべり線場理論	12	弾性有限要素法	16	反転負荷試験方法	191
すべり方向	72	弾性予測子	162	ハンマー鍛造	2
すべり面	72	弾塑性構成式	12	半密閉鍛造	2
スラブ法	13	弾塑性有限要素法	17	【ひ】	
【せ】		タンデム連続圧延	5	非圧縮性	148
正解応力	103	【ち】		非軸対称問題	127
正解速度	103	地球物理学	21	微小変形	151
積分点	80	中心差分法	164		
節点	16, 132	【て】			
セルフコンシステント		低減積分	148		
モデル	81				

微小変形有限要素法	18	ベナルティ法	141, 147	有限変形理論	82, 154
微小変形理論	82	変位ベクトル	154	有限要素剛性方程式	136
ひずみ増分	27	変位法	16	有限要素法	16, 80
ひずみ速度依存性モデル	77	変形測定法	207	優先方位	209
ひずみ速度感受性指数	77	変形抵抗	20		
ひずみ速度テンソル	87, 156	変分原理	14, 15, 52, 140	【よ】	
ひずみテンソル	26	変分法	9	陽解法有限要素法	19
微積分法	9			要素	132
非調質鋼	7	【ほ】		要素再分割	150
引張-圧縮組合せ応力試験		ボイド	68	四段圧延機	5
方法	196	ボイド合体モデル	71		
非連成モデル	203	補仮想仕事の原理	51	【ら】	
		ホットスタンピング	7	落植型ハンマー	3
【ふ】		ホットストリップ	5	ラグランジュ記述	172
フォーマ	7			ラグランジュ未定乗数法	141
不完全解のすべり線場	103	【ま】		ラプラシアン	177
フックの法則	28	摩擦試験法	197		
ブラッグの回折現象	208	摩擦特性	21	【り】	
プラントル・ロイスの式	12	マンネスマン穿孔圧延	3	粒子	174
プレス加工	6			粒子モデル	174, 175
分解せん断応力	75	【み】		臨界分解せん断応力	76
分流鍛造	8	ミーゼスの降伏応力	162	リン酸塩皮膜	7
		ミーゼスの降伏条件	11, 152		
【へ】		【も、や】		【れ】	
平衡方程式	25	モールの降伏条件	12	冷間圧延	5
平面ひずみ	12	ヤコビマトリックス	136	冷間薄板	5
平面ひずみ圧縮試験方法	191			冷間鍛造	7
平面ひずみ問題	118, 122	【ゆ】		連成モデル	205
ベクトル量	178	油圧プレス	4	連続体スピニングテンソル	86
ヘッダー	8			連続体力学	9

【英字】

elastic predictor	163	J_2 変形論	47	SPH 法	172
FFT 法	82	Jaumann 応力速度テンソル	86	Swift, Ludwik の加工硬化則	
Geiringer の式	106	non-Schmid 則	76		28
GTN モデル	205	n 乗硬化則	28	Swift の式	153
Gurson の降伏関数	70	ODF	211	Total Lagrange	155
Hencky の第 1 定理	105	Prandtl-Reuss の式	151	Updated Lagrange	151
Hencky の第 2 定理	109	radial corrector	163	V&V	214
Hencky の方程式	105	radial return	163	Validation	215
J_2 流れ則	44	Reuss の式	39	Verification	215
		r_{min} 法	161	π 平面	162
		Schmid 則	75	Ψ 一定法	208

塑性加工の計算力学 — 塑性力学の基礎からシミュレーションまで —

Computational Mechanics for Metal Forming

—From the Fundamentals of Plastic theory to Numerical Simulation—

© 一般社団法人 日本塑性加工学会 2024

2024年4月5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 978-4-339-04371-6 C3353 Printed in Japan

(柏原)



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。