

氏名(本籍)	高橋裕男(宮城県)
学位の種類	工学博士
学位記番号	工第106号
学位授与年月日	昭和45年5月6日
学位授与の要件	学位規則第5条第2項該当
最終学歴	昭和26年3月 東北大学工学部機械工学科卒業
学位論文題目	押しおよびすえ込み加工に関する塑性加工 学的研究

(主査)

論文審査委員	教授 竹山 寿夫 教授 田中英八郎 教授 戸部 俊美 教授 島田 平八
--------	--

論文内容要旨

金属材料素材に工具を介して圧縮力を加えて塑性変形を起させ、所要寸法形状の製品を作る加工は圧縮加工と呼ばれ、とくに成形を室温で行なう場合は冷間鍛造と呼ばれて自動車部品、電気機器部品、一般産業機器部品、日用品部品の大量生産の方式として近年脚光を浴び、ここ10年ほどの間に国内外においてその技術はめざましい普及発展を見せてきた。しかしながら、この加工に関する諸因子が材料の変形挙動におよぼす影響の科学的解明は多くの研究者によって試みられてきたとはいえなお不十分であり、加工の実際に当っては無駄な試行錯誤がくり返され、ひいてはこの加工のさらなる普及発展が阻まれている。

本研究は圧縮加工のうちの2つの基本的加工である押し加工とすえ込み加工とにおける加工影響因子が素材々料の塑性変形ならびに加工力におよぼす影響を力学的に解明しようとするものであるが、これらの加工は工具にとってもしばしば極めて苛酷な条件下で行なわれることがその特徴であ

り、したがって加工影響因子が材料の変形ならびに加工力に与える影響を定量的に把握することはこの加工における加工限度および製品性質と関連して極めて重要な意義を持つ。しかし、既往の多くの研究にも拘らず加工の実際上問題となるような条件を包含した広範囲にわたる摩擦条件、工具角度および加工度の組合せならびに加工形式の影響も考慮した、静的にも動的にも両立する厳密理論解は得られていないのが実情である。

本文は3章より成り、押出加工については第1, 2章において、すえ込み加工は第3章で扱ふこととし、比較的容易に厳密解が求められるという理由によって、第1および3章における理論解析は平面ひずみのすべり線場理論を用いて行なうこととした。

第1章の定常押出加工の解析に当っては、先ず工具面摩擦条件を、クーロン摩擦の条件と指定摩擦応力の条件とに分けて境界条件の形で規定し、摩擦条件の定式化を行なった。そして実際によく使われる直線工具による4つの基本的加工形式(中実材の前方および後方押し、せん孔、中空材の前方押し)の各々についてすべり線場解析を行なった。しかし、この種のすべり線場解析はHill(1)にはじまり、JohnsonとKudo(2)は主に極端な摩擦条件についてはあるが手広く行なっており、本文におけるように包含する条件範囲を拡げても直線工具による場合は、直線すべり線から出発してすべり線場解を見出すことができるものと推測された。

本章で考えた条件範囲は、工具角度 α は全角にして $0^\circ < \alpha \leq 180^\circ$ 、断面積減少率 R は $0 < R < 100\%$ 、工具面摩擦は摩擦係数 μ にして $0 \leq \mu$ から付着摩擦におよぶものである。

すべり線場解は加工形式が同じでもこれらの R , α , μ の組合せによって異なるが、ある条件範囲においては共通な様式にもとづいた解が求まるので、考えられるすべての変形様式(文献(1), (2)で提案されているものも含めて)を条件範囲別に分類し、各変形様式の解が成立する条件範囲を明確化し、定常押出加工のすべり線場解析を体系化することを試みた。ある与えられた境界条件に対して1つの変形様式のすべり線場解が成立つかどうかの判定は、Hill(3)のくさび先端の応力状態に関する研究をクーロン摩擦が作用する場合に拡張することによって行なうことができた。このHillの条件を発展させた判定条件は簡単な形に定式化することができるが、Prager(4)の提案による応力面を用いる幾何学的解法に判定条件を導入することによって幾何学的に極めて簡単に判定ができた。このPragerの方法はクーロン摩擦が作用する問題の解析に極めて有力な方法であり、本研究を通じて主としてこの方法によって解を求めたが、図式解法であるため、条件によっては精度が低下する場合もあるので、数式を併用して解の精度を上げるようにした。

Hillの条件を判定条件に用いることにより、しばしば加工の実際において製品欠陥の原因となる、いわゆるデッドメタルの発生に理論的な根拠を与えることができた。

各変形様式の解の成立範囲についての議論の詳細は中実材の前方押しを例にとって行なったが、

他の3つの加工形式についても全く同様な変形様式を考えることによって解を求めることができるから、解の成立範囲も中実材前方押しに対すると全く同様にして決定できる。しかし成立範囲そのものは加工形式の影響をうけるので、中実材前方押しに対するものがそつくりそのまま他の加工形式に通用することにはならない。

後方押しの場合には、上述した判定条件によると、摩擦がどうあれ、ダイス角が 160° 以下であればデッドメタルが生じない（前方押しでは摩擦がある限り断面積減少率が大きくなるとデッドメタルが発生する）という結果が得られた。これは後方押しにおけるコンテナ面摩擦力の作用方向が前方押しと逆なためであり、このような加工形式の影響は、他種の解析法による研究においては指摘できなかったことである。

せん孔加工においては、塑性変形領域を出た材料がコンテナ面と摩擦接触をするものと考えられるので、この部の摩擦の影響を解析において考慮するため、応力不連続線を用いる Bishop (5)の方法を利用して摩擦接触範囲を定めるようにした。また、本文で取扱ったような境界条件を満足させることができる応力不連続線を図式に求める方法を提案した。

応力不連続線の問題は前方張力を付与して行なう中空材の前方押しにも適用され、引抜きおよびしごきの2つの方式で前方張力を付与する中空材前方押しのすべり線場を提案し、張力付与方式の影響を調べた。

以上の各押し形式のそれぞれについて、 R を95%までの範囲でできるだけ広くとり、 α を 30° から 30° とびに 180° まで、 μ を0から0.05とびに0.2までと付着摩擦の場合（せん孔についてはポンチ面付着摩擦、コンテナ面 $\mu=0.05$ の場合も）についてすべり線場解を求め定常押し圧力におよぼす R 、 α 、 μ の影響を調べ、与えられた R と μ の組合せに対して極小押し圧力を与える工具角度（最適工具角度）を決定した。また、極端な摩擦条件についてはあるが、材料の内部変形におよぼす加工形式と摩擦の影響を調べ、加工度も低く、摩擦も小さくて、一見、表面亀裂が発生しないと思われる条件においても亀裂が発生する場合がありますと指摘した。なお、製品欠陥と関連して、発生するデッドメタルの大きさと R 、 α 、 μ との関係も調べた。

直線ダイスは実際によく使われるとは云っても、工具の製作精度あるいは摩耗対策上、直線とはいえ多少とも円弧状をなしていたり、出口部分に丸味がついているのが普通であるので、円弧ないし丸味の押し圧力におよぼす影響を調べるため、極端な摩擦条件の場合について、新しいすべり線場も提案して影響を調べたが、押し圧力はダイス形状をダイス出入口点を結ぶ直線で置換えてもほぼ同じであった。なお、直線ダイスによる押しではダイス面上で摩擦係数が一定でなく、次々と変っている場合でも平均摩擦係数を考えることによって、一定摩擦係数に対するデータから精度よく押し圧力を推定することができることを確かめた。

第2章では軸対称押しに関して行なった実験について述べたが、ここでは押し加工の特徴を大

験的に調べると同時に、前章の解析結果の実際との関連を調べることを主眼とした。前章の解析は平面ひずみ条件下での加工についてであり、材料も剛完全塑性材料を仮定している点で非現実的のそりをまぬがれない。そこで先ず、非硬化性材料についての押出圧力を知って、同じ条件で加工硬化性材料を押出すに必要な押出圧力を推定するため、Hill(6)によって提案された補正法を適用し、自由押出実験によってこの補正法が十分精度の高い方法であることを確かめた。また自由押出しについては材料の降伏応力曲線を知って、限界加工度を図式に見出す方法を提案し、この方法で見出される限界加工度が実験とよく一致することを確認した。

行なった実験は自由押出しのほか、アルミニウム焼鈍材を用いた中実材前方押出し、せん孔および中空材前方押出しであり、これらの実験における押出し後期非定常過程に入る直前の荷重を素材断面積で割り、さらに加工硬化に対するHillの補正法によって基準化した平均押出圧力について前章の解析結果と比較することとした。しかし、前章は平面ひずみ押出しに関するものであるので、軸対称押出しに対する値に換算するため、Hillら(6)の方法とPawelski(7)の方法で換算して実験と比較した。その結果、Pawelskiの方法はせん孔についてはよく実験と合う結果を与えたが、その他についてはHillらの方法の方がよく実験に合い、せん孔の場合でもPawelskiの方法を適用するには、すべり線場の細部まで求めておかねばならないのに対し、Hillらの方法は単に平均押出圧力だけがわかっていればよいので実用上はるかに便利であり、しかもどの押出形式に対しても $\alpha = 180^\circ$ で R が非常に大きい場合を除けば最大では20%程度の誤差(理論値の方が実験値より低い)になるが、全般を通じ比較の実験と合う結果を与えることがわかった。

本章では潤滑剤として主にジョンソンワックス $\mu 111$ を用いたが、最適工具角度の摩擦依存性を調べるために、ヒタゾルを用い、またワセリン封入(8)条件で実験を行なって最適工具角度を求め、同一断面積減少率同士で比較すると前章の解析結果とよく一致することがわかった。

さらに実験的に確認されたデッドメタルの形状も理論的に予測されたものと酷似するものであったから、前章の解析結果は軸対称押出加工の実際と十分よく対応するものであると結論することができる。

なお、ジョンソンワックス $\mu 111$ を押出加工に用いた場合、摩擦係数は0.04程度と推定され、この値はコンテナ面摩擦から算定することができることがわかった。

第3章はV形ダイスによる平面ひずみすえ込みの解析に関するものであり、広範囲の工具角度、摩擦条件および材料寸法比の組合せに対する解を求めるために、新しいすべり線場の提案も行なったが、すべり線場解析と同時に、塑性加工問題の解析によく使われるSachs流の初等解法によって、すえ込み圧力を計算し、同一条件に対するすべり線場解と比較した。初等解法で用いる降伏条件は時には、物理的に全く無意味なものになってしまうが、それでもすべり線場解とよく一致す

る結果を与える条件範囲があることがわかった。そこで10%以内の誤差ですべり線場解と一致する条件範囲を調べ、表にまとめた。誤差を20%まで許すと条件範囲はかなり広いものとなる。

以上の研究によって、押しおよびすえ込み加工に関して従来、経験的に知られていた事柄の多くに理論的な根拠を与え、またこの加工の今後の発展に対して有用な示唆を与えることができた。

参 考 文 献

- (1) R.Hill: J. Iron & St. Inst., 159(1948)177.
- (2) W.Johnson & H.Kudo: The Mechanics of Metal Extrusion, Manchester Univ. Press, 1962
- (3) R.Hill: J. Mech. Phys. Solids, 2(1954)278.
- (4) W.Prager: An Introduction to Plasticity, Addison Wesley, 1959, Chapt. 4.
- (5) J.F.W. Bishop: J. Mech. Phys. Solids, 2(1953)43.
- (6) R.Hill ほか: J. Iron & St. Inst., 159(1948)353.
- (7) O.Pawelski: Archiv f. Eisenhw., 32-9(1961)607.
- (8) 工藤 ほか: 機械学会誌, 69-568(昭41)601.

審 査 結 果 の 要 旨

押出し加工は金属材料の重要な加工法の一つで従来多くの研究があるが、解析的な研究は一次元の取扱いが主で、二次元ないし三次元の取扱いは範囲が限られていた。この研究は平面ひずみ理論を、新たな剪断線場を加え工具面にクーロン摩擦が作用する場合に拡張して広範な加工条件の下にその解を与え、その結果が実験と併せて軸対称工具による加工に有効なことを示したもので、3章より成る。

第1章は平面ひずみ理論の展開である。種々の摩擦係数 μ および付着摩擦の場合に工具角度 α 、断面積減少率 R の相互の関係に応じて通常押出しでは10種の剪断線場があり、これにより殆んどすべてがつくされることを示し、これらの解法を拡張して間接押出し、中空管の押出しならびにせん孔について応力場と速度場を定めた。その結果をまとめてそれぞれの加工について μ 、 α 、 R を与えた時変形様式、平均押し圧力を定める図表を得た。同時に加工に有害となるデッド・メタル発生条件を示している。

摩擦の作用の下では最適工具角度 $\bar{\alpha}$ が定まり、それは μ および R が大きい程大きいこと、せん孔を除けば押し形式による変化は著しくないこと、平均押し圧力 p_m は加工条件が同一ならば中実材の間接押し、通常押し、中空材の直接押し、せん孔の順に大きいことなどが明らかにされた。

また、工具面上で μ が変化する場合および曲線ダイスの場合を取扱い、相当摩擦係数、相当ダイス角を定義しこれにより加工力の換算可能なことを論じている。

第2章は軸対称押し加工に関する実験とこれによる前章の結果の検討である。加工硬化に関するR. Hillの補正法を発展させた図式法を提案し、平面ひずみの結果を軸対称押しに換算する三つの方法を詳細に比較検討して、最も簡単な平均押し圧力についてのHill-Tupperの仮定が有効であることを実証した。

まず軟鋼(S20C)の自由押出しの加工限度について図式法の適用性を確かめ、それが硬化指数の大きい程高くなることを示した。ついで平面ひずみと軸対称変形間の換算を基準化押し圧力 p_m/Y_m 、対数押し比 $\ln(A/a)$ 曲線の形で行ない、この図式法を適用することにより通常押しでは実用上殆んどすべての場合に対してH-T換算法が有効で、 R が等しい時平面ひずみ理論よりの $\bar{\alpha}$ の換算値と実験とがよく一致することを示した。また、デッド・メタルの発生状態からみて平面ひずみ理論の縦断面応力分布そのものが軸対称の場合をかなりよく近似していることを観察している。

第3章は二次元のV型ダイスによるすえ込み加工の平面ひずみ理論による研究である。工具面にクーロン摩擦の作用する場合について種々の加工条件の下における平均すえ込み圧力を求めた。外開きすえ込みの時工具角度 α と摩擦角の関係により面圧分布傾向の全く異なる応力場のあることが

示されている。また、この結果により初等的解法を検討し、その有効範囲を明確にしている。

要するに、本研究は押し出し加工に関して、平面ひずみ理論をクーロン摩擦がある場合に拡張して広範囲の加工条件における変形状態を明らかにし、かつ実験により結果の軸対称押出しに適用可能なことを明らかにしたもので、精密工学ならびに精密工業に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。