二次元流れ型切削における工藤のすべり線場解の実現性 (その 2)*

——炭素鋼, 黄銅, アルミニウムの切削実験と解の実現性——

高田孝次** 白樫高洋*** 星 光一**** 白井英治***

Study on Compatibility of Kudo's Slip Line Solutions for Two Dimensional Flow-Type Machining (Part 2)

——Comparison of Solutions with Machining Experiments——

Koji TAKADA, Takahiro SHIRAKASHI, Koichi HOSHI, Eiji USUI

Kudo's slip line solutions are compared with the results of machining of carbon steels, α -brass and pure aluminium under various cutting conditions.

For the cases of α -brass and other non-ferrous metals which show the coefficient of friction on the rake face less than unity, the solutions are verified to be successfully constructed so as to fit measured shear angle ϕ , friction angle β and observed secondary flow along the tool face. The solutions, however, fail to account for the case of pure aluminium, since the actual coefficient of friction is more than unity.

For the cases of carbon steels, the solutions are unable to be constructed so as to fit the measured ϕ , β and the secondary flow. The reason for the unsuccess may be attributed to the particular nature of the secondary flow along the tool face. Eliminating the secondary flow layers as a particular form of built-up edge, the solutions are successfully constructed.

The cutting forces predicted by the solutions for a constant maximum shear stress are in good agreement with the measured forces for the case of α -brass and for the cases carbon steels as well, if the secondary flow layers are eliminated.

1. ま え が き

前報¹⁾では工藤の解²⁾のあたえる塑性変形と解の許容範囲について吟味し, 特に解の許容範囲は切削方程式 (せん断角 ϕ と摩擦角 β , すくい角 α との関係) に関する従来の実験結果の多くを非常によくカバーしうるものであることを指摘した。しかしながら塑性学の理論では解の許容範囲のみで, ある切削条件に対していかなる ϕ , β の工藤の解が実現するかを具体的に予想することはできない。したがって実測される β と同一値をもち, しかも ϕ と塑性変形の状況が実際と一致するような工藤の解を任意の切削条件に対して常に構成できるかどうかは別途に実験的検討を要する問題である。

本報告は限られた実験範囲ではあるが, この意味での吟味をおこない, さらに工藤の解のあたえる切削抵抗についても検討をおこなってみた結果である。

2. ϕ , β , 塑性変形の検討

図 1 に主要な工藤の解のすべり線場と格子線変形を示す。同図中の模型 [4], [5] は類似の性格を持ち, いずれを用いても実際への近似の程度は似たものとなるので, すべり線場構成の容易さから主として模型 [5] を検討に使用した。また模型 [7] は前報で著者が提案した解であり, せん断面の pre-flow 領域を説明できるが, 図示の斜線部のすべり線場が不完全であり, 完全な解ではない。図示の場合は模型 [5] に pre-flow (せん断面前方の塑性流れをいう) 域のすべり線場をつけたものとなっているが, 模型 [1], [4], [6] にこれをつけることも可能であり, 本報告では pre-flow 域をもつ解をすべて模型 [7] とよぶ。なお本報告では模型 [1]~[6] の場合, 刃先 E と C₂ 点を結んだ直線が切削速度方向となす角をせん断角 ϕ とし, 模型 [7] では格子横線の変形から妥当とおもわれる図示の位置で ϕ を定義した。

切削実験に使用した被削材は 0.13%C, 0.25%C, 0.89%C の 3 種の炭素鋼, 7-3 黄銅, 純アルミニウムであり, 表 1 に示す切削条件で二次元切削し, 切削抵抗を測定した。この切削抵抗 2 分力の測定値からすくい面の平均摩

*原稿受付 昭和47年2月23日。昭和43年度精機学会春季大会学術講演会 (昭和43年4月6日) にて発表。

**正 会 員 機械技術研究所 (東京都杉並区井草 4-12-1)

***正 会 員 東京工業大学工学部 (東京都目黒区大岡山 2-12-1)

****正 会 員 旭川工業高等専門学校 (旭川市字近文五線 4 号)

図 1 工藤のすべり線場解と格子線変形

表 1 被削材と切削条件

被 削 材	0.13%, 0.25%, 0.89% 炭素鋼 (焼準状態) 7-3 黄銅 (焼鈍調質状態) 純アルミニウム (AlPi-1/2H 焼鈍状態)
工 具	超硬合金 ISO P-20 [var., 0, 7, 0, 0, 0, 0]
切 削 幅	3~3.5 mm
切 削 厚 さ	0.3 mm
切 削 速 度	1~250 m/min, 可変
切 削 剤	乾燥
切 削 型 式	円筒端面の二次元旋削および形削盤による板材の二次元平削り

擦角 β を計算し、すべり線場解の与えるすくい面応力分布から求められる平均の β と比較した。また切削を急停止して³⁾ 各切削条件における切りくず生成の顕微鏡写真を作製し、せん断角および塑性流れの状態をすべり線場解の格子線変形と比較した。

2.1 炭素鋼の切削の場合

炭素鋼の切削では図 2 に数例を示すように、構成刃先

域以上の切削速度域で炭素含有量、切削条件のいかんによらず工具のすくい面には常に著しい secondary flow (二次塑性流れ) があり、熔融金属の潤滑層が介在するような状態にある。このようにすくい面に沿う幅の狭い領域に secondary flow を集中させることは模型 [4], [5], [6] によってのみ可能であり、したがって模型 [1] の切削状態は普通炭素鋼の高速乾切削では実現しないと考えられる。

工藤の解はすくい面の摩擦応力分布が与えられれば構成できる。すなわちこの応力分布に応じてすべり線場が

切削条件: 被削材 0.25 C 炭素鋼, すくい角 10°, 他は表 1 に同じ

図 2 模型 [5] により ϕ , β を実際にあわせたときの secondary flow の不一致

定まり, ϕ , β , 変形がきまってくる. そこで模型 [5], [6] をもちいて実測値と同じ β をもち, 同時に平均のせん断角も実測値と一致するようにすべり線場を構成することをまず試みた. 模型 [5], [6] ではせん断面の扇形すべり線場の大小によりせん断角は直接に変化し, 一方これに対する β の変化は少ないから, 結局本実験の範囲ではすべての場合に所要の解をうる事ができた. しかし得られた解では塑性変形, 特にすくい面の secondary flow の状態が実際と一致しない場合が多く, 一般に解のあたえる secondary flow の帯状域の幅は実際よりも小であった. また大すくい角, 低切削速度, 低炭素鋼の場合ほど不一致が顕著となる. 図 2 は切削速度を変えた場合にこれを示したものである.

一方, 実測値と一致する β を持ち, 同時に secondary flow の状態も実際とほぼ一致する解をつくることも可能であったが, この場合にはせん断角 ϕ の理論値が実測値より著しく大となってしまう. 図 3 に数例を示したが, 大すくい角, 低切削速度, 低炭素鋼の場合ほど不一致が著しいことが再現されている. なお同図に見るように不一致の著しい場合, 構成した解が許容域の外にすることがあるが, このような解はもちろん可容でない.

さて以上のように模型 [5], [6] では ϕ , β , 変形の三者を実際と一致させて解をつくる事ができなかったのので, つぎに模型 [7] を利用することを試みた. すなわち β と secondary flow を実際と一致させて模型 [5], [6] の解を構成し, これに pre-flow 域のすべり線場をつければ平均のせん断角は図 1(e) のように ϕ' から ϕ に減少し, β の変化は生じないから実際の状態とよく一致するようになる. 本実験の範囲では常に若干の pre-flow 域が存

在し, 特に低速域ではこれが大となるから, この点でも模型 [7] の適用は妥当と考えられた. 図 4 は図 2 の切削速度 75.5 m/min の場合に模型 [7] の解を構成してみたものであり, ϕ , β , 変形の三者が実際とほぼ一致している. しかし模型 [7] はもともと不完全解であり, 大きな pre-flow 域を必要とする場合には結局適当でないことが後述の切削抵抗の検討で示される.

2.2 7-3 黄銅の切削の場合

低切削速度では模型 [7] による pre-flow 域を必要とする例も若干みられたが, 炭素鋼の場合と異なり, 7-3 黄銅の切削における工藤の解の実現性は全般に良好であった. 炭素鋼では模型 [5], [6] が主であったが, 7-3 黄銅では模型 [1], [4] が実際との適合性がよく, これらの模型で ϕ , β , 変形のすべてが実際に一致するようにすべり線場解を構成することができた. 図 5 は結果の数例である. 表面的な理由にすぎないが, 7-3 黄銅では同図にみるようにせん断面での変形が速度不連続線のそれに近

実線: 実測値, 点線: 理論値, 被削材: 炭素鋼
他の切削条件は表 1 に同じ

図 3 模型 [5], [6] により β と変形を実際にあわせたときの ϕ の不一致

(a) 実際の変形状態を示す写真

(b) 格子線変形とすべり線場解

被削材: 0.25C 炭素鋼, 切削条件は図 2 に同じ
ただし切削速度は 75.5 m/min

図 4 模型 [7] による ϕ , β , 変形の実際との一致

(a) $\alpha=10^\circ$, $\phi=26^\circ$, $\beta=30.5^\circ$

(b) $\alpha=-14^\circ$, $\phi=21^\circ$, $\beta=22.9^\circ$

切削条件: 被削材, 7-3 黄銅, 切削速度 168 m/min ((a) 図)
233 m/min ((b) 図), 他は表 1 に同じ

図 5 模型 [4] による ϕ , β , 変形の実際との一致

切削条件は図 5 に同じ, ただし切削速度のみ可変
図 6 7-3 黄銅における実測点位置と工藤の解の許容域

く, すくい面では図 4 (a) にみるようなどみ状の secondary flow を生じないことが工藤の解の適合性を高めていると思われる。図 6 は ϕ , $\beta-\alpha$ 座標における実験点の位置を示すものであり, すくい角 10° では模型 [1] およびそれに近い模型 [4], [5] が実現し, すくい角 -14° では模型 [4], [5] となることが前報の解の許容域からわかる。炭素鋼では解の適合性が不良のため明りようでないが, すくい角によるこの変化の傾向は類似して

いた。なお 7-3 黄銅以外の非鉄金属に対しても工藤の解の適合性は一般に良好であった。

2.3 純アルミニウムの切削の場合

純アルミニウムを切削すると表 1 の切削条件では全切削速度ですくい面の平均摩擦係数 μ が 1 より大となり, 著しく小さなせん断角の状態が実現した。工藤の解は $\mu < 1$ の場合を対象としており, このような切削状態にはまったく適合しない。なお別報⁴⁾で述べるが, $\mu \geq 1$ の場合, 工藤の解に似たすべり線場解をうることができ, これによれば実測値と一致する ϕ , β , 切削抵抗をうることができる。

3. 切削抵抗の検討

炭素鋼, 7-3 黄銅とも低速域より高速域のほうが工藤の解の実際との適合性はよい。そこで炭素鋼の場合, 切削速度 255 m/min において ϕ , β を実際に一致させてすべり線場解を構成し, これが実測される切削抵抗と同一の切削抵抗をあたえるように最大せん断応力 k の値を設定した。そしてこの k の一定値を用いたすべり線場解の切削抵抗と実測値を各切削速度について比較してみた。

図 7 はその結果であり, ϕ , β を実際に一致させた模型

被削材: 炭素鋼, すくい角 $-5^\circ, 10^\circ$, 他の切削条件は表 1 に同じ

図 7 切削抵抗の実測値と理論値との比較

[5], [6] の結果 (●印) が 80 m/min 以上の切削速度で実測値とよい一致をしめている。しかし 80 m/min 以下の速度では, すべり線場解の切削抵抗が次第に実測値を上回り, 構成刃先域に近づくとき相違はかなり著しくなる。これに対して模型 [7] による切削抵抗 (×印) は全体に実測値より大であり, また特に低速域ではまったく実測値と一致しないことがわかる。前報に述べたように低速域ほど pre-flow 域は大きく模型 [7] の解の不完全さが強調されるためと思われる。なお完全塑性体を前提とする以上, k の設定値は工具すくい角 α によって不変でなければならないが, 高速域で切削抵抗の実測値と一致する k の値を設定する際, すでに図 8 に示すように 10 kg/mm² 程度の相違を生じた。

図 9 は模型 [1], [4], [5] をもちいる 7-3 黄銅の同様な検討結果であり, 7-3 黄銅の場合, 工藤の解は切削抵抗においてもまた十分な成功をみせている。特に k の設定

被削材: 0.25C 炭素鋼, 切削速度 188 m/min
他の切削条件は表 1 に同じ

図 8 すくい角による k の設定値の変化

被削材: 7-3 黄銅, 切削条件は図 5 に同じ, ただし切削速度のみ可変

図 9 切削抵抗の実測値と理論値との比較

値は $\alpha = -14^\circ$ で 41.4 kg/mm², $\alpha = 10^\circ$ で 44.8 kg/mm² と大差がなく, 熱処理の手違いから母材硬度に $H_V = 72.9$ ($\alpha = -14^\circ$), $H_V = 75.1$ ($\alpha = 10^\circ$) 程度の差異があったことを考慮すると同一の k の値と考えてよいと思われる。なお 7-3 黄銅の場合でも低速域では理論値が実測値を上回るが, この領域では完全塑性体による近似が十分でなく, やはり加工硬化などの要因を考慮する必要があるように思われる。

4. 炭素鋼の切削における刃先滞留層

7-3 黄銅における工藤の解や純アルミニウムにおけるすべり線場解の成功を⁴⁾考えると, 炭素鋼における完全剛塑性体すべり線理論の不適合はむしろ奇異に感じられる。他にも原因はあるが, 不適合の重要な原因の一つは図 2, 4 に示したすくい面のよどみ状の secondary flow にあるように思われた。図 2 (b) と図 4 のすべり線場解を比較すればわかるが, この secondary flow を説明するために図 1 (e) のように ϕ' を大にすると pre-flow 域が必要となり, 不完全な模型 [7] を用いざるをえないからである。またこのようにして図 4 (b) の格子線

変形をえても、詳細にみれば同図(a)の secondary flow は格子線変形のそれとは異質なものようである。著者の1人はこのようなよどみ状の層が低速では構成刃先に転化すること⁵⁾、接触面積拘束工具の場合にもすべり線場解の不適合の原因となること⁶⁾を指摘したが、最近益田⁷⁾はこの層を刃先滞留層と名づけ、これが切りくず内の塑性流れとは分離した「よどみ」であることを電子顕微鏡による観察から明らかにしている。

そこでこの滞留層を構成刃先に相当するものとして除外し、図10のようにすくい角 α を変更して模型[5]、[6]を構成してみたところ、 ϕ 、 β 、変形のすべてを実際に一致させることができた。また図11に示すように切削抵抗の理論値も構成刃先域の直前まで実測値と非常によく一致する。さらに図8に示すように k の設定値のすくい角による変化も $2 \sim 3 \text{ kg/mm}^2$ となり、ほぼ k 一定とみなしうようになった。図2、4の滞留層のどの部分を構成刃先とみ、どの部分を塑性流れとみるかには若干の任意性があるが、このような処理をおこなえばすべり線理論が十分な適合性をもつことは確かである。

5. 被削材、切削条件と工藤の模型

すべり線の理論では被削材、切削条件の組合せに対し

図10 刃先滞留層を除外した工藤の解の構成

被削材: 0.25C 炭素鋼, すくい角, 10° , 他の切削条件は表1に同じ

図11 切削抵抗の実測値と理論値との比較

て図1のどの模型が実現するか予想することができないので、既述の被削材以外の材料、 1 m/min 以下の切削速度、各種切削油剤の使用などを含む広範な条件での実験的検討を試みた。はっきりした法則的なものは結局みいだせなかったが、大略の傾向はつぎのようである。

1. すべりを生じやすい材料、すなわちせん断面での変形がぜい性的な黄銅、ホワイトメタル、硫黄快削鋼などは模型[1]あるいはこれに近い模型[4]、[5]が多い。またすべり線の曲率が小さい解が適合する。
2. 鋼類では、中高速域で模型[1]は実現せず、模型[6]に近い模型[4]、[5]が多い。また低炭素鋼ほど刃先滞留層は大となる。
3. いわゆる粘い材料、銅、ニッケル、鉛、アルミ合金、では模型[1]に pre-flow 域をつけた模型が多い。またすべり線の曲率が大きい解が適合する。
4. 極低速域では模型[7]が一般であり、切削速度が大となると模型[1]、[4]に、さらに切削速度が大となると模型[6]に近い模型[4]、[5]に転ずる傾向がある。
5. すくい角が大なる場合は模型[1]とこれに近い模型[4]、[5]が多い。すくい角が負になると模型[6]に近い模型[4]、[5]になる。またすくい角が非常に大きいときは模型[7]となる。
6. 切削油剤を使用すると模型[6]、[5]から模型[1]、[4]に転ずる傾向がある。

6. 結 論

2報にわたって工藤のすべり線場解の実現性を検討したが、結論を総括すればつぎのとおりである。

1. 工藤の解は実際の塑性変形、特にすくい面の secondary flow と切りくずカールをよく説明することができる。
2. 工藤の解の許容域は低速切削を除けば ϕ 、 β - α 座標における従来の諸実験の結果の大部分をカバーすることができる。
3. 低速切削域を除けば、 $\mu < 1$ の切削状態となる非鉄金属に対し ϕ 、 β 、変形のすべてが実測値と一致するように工藤の解を構成することができる。 k の値を一定とした切削抵抗の理論値はすくい角、切削速度が変化する場合の実測値とよく一致する。
4. 炭素鋼の切削における工藤の解の適合性は不良であり、 ϕ 、 β 、変形のすべてを実測値に一致させることはできない。ただし、すくい面の刃先滞留層を構成刃先として除外すれば解の適合性は十分に改善される。切削抵抗についても同様であり、滞留層を除外

すれば k 一定の理論値はすくい角, 切削速度が変化する場合の実測値とよく一致する.

5. 低速切削では工藤の解の実際との適合は不良であり, pre-flow 域のすべり線場を付す必要がある. また切削抵抗の理論値も実測値と一致しない. 低速域では完全塑性体による近似が十分でなく, 加工硬化などの要因を考慮する必要があると思われる.
6. 被削材, 切削条件の組合せに対して工藤の解のどの型が適合するかは予想できない. 実験的に若干の傾向は認められたが法則的なものはみあたらなかった.

塑性学の理論は本来, 説明的なものであり, 境界条件が指定された場合に応力, 変形の状態を求められるようにできている. 工藤のすべり線場解も同様であり, すくい面の摩擦応力分布が境界条件として与えられなければ解を構成できないし, 模型の型も指定できない. したがって切削の場合のように被削材, 工具, 切削条件のみが与えられており, 境界条件をも含めて生ずる状態を直接に予想したいといった問題には本来無力である. しかし, この点は Merchant, Lee-Shaffer, Shaw, Oxley と経過した切削方程式の論議のすべてに共通しており, 工

藤のすべり線場解はこうした記述的切削理論の一つの終点をなすものであろう. 工藤の解の意義は低切削速度域を除けば, k 一定の完全剛塑性体近似で切削状態, 切削抵抗を十分説明できる切削模型を提案したことであり, 今後 k の値とすくい面摩擦応力分布 (あるいは実現する模型の型) を独立に予想することができれば実用的な意義をもつものと考えられる.

文 献

- 1) 臼井英治, 高田孝次: 二次元流れ型切削における工藤のすべり線場解の実現性 (その1), 精密機械, **33**, 3 (1967) 175.
- 2) H. Kudo: Some New Slip-Line Solutions for Two-Dimensional Steady-State Machining, Inst. J. Mech. Sci., **7** (1965) 43.
- 3) たとえば D. Kececioglu: Shear-Strain Rate in Metal Cutting and Its Effects on Shear-Flow Stress, Trans. ASME, **80** (1958-2) 158.
- 4) 臼井英治, 白樫高洋, 高田孝次: 切削における二, 三の特別な場合のすべり線場解, 精密機械, **38**, 8 (1972) 672.
- 5) 臼井英治, 星 光一: 接触面積拘束工具の切削性の研究 (第4報), 精密機械, **30**, 3 (1964) 273.
- 6) 臼井英治: 接触面積拘束工具の切削性の研究 (第3報), 精密機械, **29**, 9 (1963) 639.
- 7) 益田和昭: 純鉄の切削における超硬工具の摩耗特性, 日本機械学会論文集, **35**, 280 (1969-12) 2427.