

# 金属板材の曲げ加工エネルギーに関する研究

職業能力開発総合大学校 精密機械システム工学科

教授 小川 秀夫

(平成19年度一般研究開発助成 AF-2007009)

キーワード：V曲げ加工，エネルギー，プレス加工

## 1. 緒 言

塑性加工に必要なエネルギー特性の検討は塑性加工機械の設計，選定にとって欠かせないものである。また最近の地球温暖化防止，低炭素化社会実現の観点からも，エネルギー低減のための新しい加工法の開発，現行加工法の改善，適正加工条件の検討が必要となっている<sup>1)</sup>。

金属板材のプレス加工に関するエネルギー特性についてみれば，せん断加工，深絞り加工についてはこれまでに多くの検討がなされており<sup>2), 3)</sup>，生産技術に広く活用されている。これに対し，曲げ加工のエネルギー特性についての検討は見当たらない<sup>4)</sup>。

精密板金加工における最近の曲げ加工には，曲げ角精度をはじめとして非常に高い精度が要求されている。要求された高精度曲げ加工を実現する手段として，サーボ式プレスブレーキの使用が効果的とされ，急速に普及してきている。下死点精度が高く，スライドの複雑なモーションコントロールが可能ながその理由であるが，これらの特性を十分に発揮させるためにはプレスブレーキ各部の慣性エネルギーを極限にまで削減する必要があり，フライホイールなどのエネルギー蓄積機能を利用することができない。このため曲げ加工に要するエネルギー特性の詳細な把握が必要となっている。

以上のような背景から，金属板材の曲げ加工エネルギー特性を明らかにすることを本研究の目的とした。本報ではその第一段階として，金属板材の曲げ加工の中で最も基本的で，最も多く行われているV曲げ加工を取り上げ，加工条件と加工エネルギーの関係を検討した。また，V曲げ加工に必要なエネルギー算出式の導出を試みた。

## 2. 曲げ加工条件及び方法

### 2. 1 曲げ型

使用したV曲げ型形状を Fig. 1 に示す。Table 1 は曲げ型各部の寸法である。より広範囲な曲げ型寸法の影響を検討するため，V曲げ加工のFEMシミュレーションではパンチ先端半径  $r_p$  を 0.2~3.0mm，ダイ溝幅  $w_d$  を 6.0~20.0mm の範囲でそれぞれ変化させた。 $r_p$ ， $w_d$  以外の曲げ型各部の寸法は，実験，シミュレーションともに Table 1 の値で一定とした。

### 2. 2 加工板材

実験に使用した加工板材とその機械的特性値を Table 2 に示す。①，②は冷間圧延鋼板，③は 780MPa

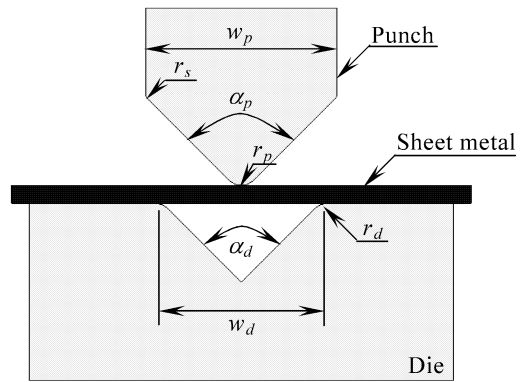


Fig. 1 Bending tool

Table 1 Specifications of bending tool

|       |                                |  |
|-------|--------------------------------|--|
| Punch | V-width $w_p$ (mm)             | 10.0                                       |
|       | Top angle $\alpha_p$ (deg.)    | 90.0                                       |
|       | Top radius $r_p$ (mm)          | 0.2~3.0<br>Experiment : 0.2, 0.5, 1.0, 2.0 |
|       | Shoulder radius $r_s$ (mm)     | 0.5  |
| Die   | Groove width $w_d$ (mm)        | 6.0~20.0 Experiment : 9.72                 |
|       | Groove angle $\alpha_d$ (deg.) | 90.0                                       |
|       | Shoulder radius $r_d$ (mm)     | 1.0  |

Table 2 Sheet metals used for V-bending

| Sheet metal | Thickness $t$ (mm) | Tensile strength $\sigma_B$ (MPa) | Work hardening property  |
|-------------|--------------------|-----------------------------------|--|
| ① SPCC      | 1.0                | 328.9                             | $\bar{\sigma}=542.8 \times (0.00914 + \bar{\epsilon}^n)^{0.19}$  |
| ② SPCE      | 2.0                | 304.7                             | $\bar{\sigma}=533.4 \times (0.00703 + \bar{\epsilon}^n)^{0.23}$  |
| ③ SPFC780Y  | 1.0                | 840.7                             | $\bar{\sigma}=1217.7 \times (0.00057 + \bar{\epsilon}^n)^{0.12}$ |
| ④ SUS430    | 1.0                | 473.7                             | $\bar{\sigma}=811.8 \times (0.00711 + \bar{\epsilon}^n)^{0.20}$  |
| ⑤ C1100P    | 1.0                | 246.1                             | $\bar{\sigma}=356.3 \times (0.02500 + \bar{\epsilon}^n)^{0.17}$  |

級高張力鋼板, ④はステンレス鋼板, ⑤はタフピッチ銅板であり, 板金加工で多く使用されている代表的な材質を対象とした. 使用した加工板材の公称板厚  $t$  は SPCE が 2.0mm で他は 1.0mm であるが, より広範囲な板厚特性についても検討するため, V 曲げ加工のシミュレーションでは各材質の機械的特性値を Table 2 の値とした条件で,  $t=0.25\sim 2.2\text{mm}$  の範囲で変化させた.

曲げ試験片寸法は 40mm (曲げ線長さ)  $\times$  30mm (圧延方向寸法) とした. 曲げ試験片の製作にあたっては, まずシヤーで上記寸法よりやや大きめの長方形にせん断し, その後高速砥石試料切断機で 4 辺を所定の寸法に切断して, 試験片製作時のせん断加工で生じた加工硬化領域を取り除いた.

### 2. 3 実験及びシミュレーション方法

300kN 油圧式材料試験機に曲げ型を取付け, 加工板材に潤滑油を塗布せず曲げ加工実験を行った. また, 曲げ加工時の試験機及び金型の弾性変形の影響を排除するため, 曲げ加工実験とは別に, 荷重が作用したときのそれらの変形量を調べる実験を行い, 曲げ荷重-パンチ行程線図を校正した.

V 曲げ加工の FEM シミュレーションには弾塑性有限要素法プログラム AITAS-2D<sup>5)</sup>を使用した. シ

ミュレーションでは, 板厚に対して曲げ線長さが十分長い場合を対象とし, 曲げ変形を平面ひずみ状態として扱った. シミュレーションにあたっては, 加工板材の板厚断面を 4 節点四角形要素で分割した. 要素の大きさは, パンチ斜面やダイ溝斜面などと接触する領域では 0.0625mm (板厚方向)  $\times$  0.0943mm (周方向) の小さい長方形とし, それ以外の領域は 0.0625mm (板厚方向)  $\times$  0.125mm (周方向) の大きい長方形とした.

なお, 曲げ荷重や曲げ加工エネルギーは単位曲げ線長さ(1mm)あたりの値として整理した.

## 3. 結果及び考察

### 3. 1 荷重線図と V 曲げ加工の 3 形態

V 曲げ加工に要するエネルギーは荷重線図によって囲まれた面積で示されることから, まず V 曲げ加工の荷重線図について検討した. なお, 荷重線図の検討にあたっては次の点に留意した. V 曲げ加工はその加工過程の進展につれて自由曲げ, 底突き曲げ, 圧印曲げへと曲げ形態が変化する<sup>6)</sup>. したがって V 曲げ加工のエネルギーについても, それぞれの曲げ形態でのエネルギーを区別して明らかに

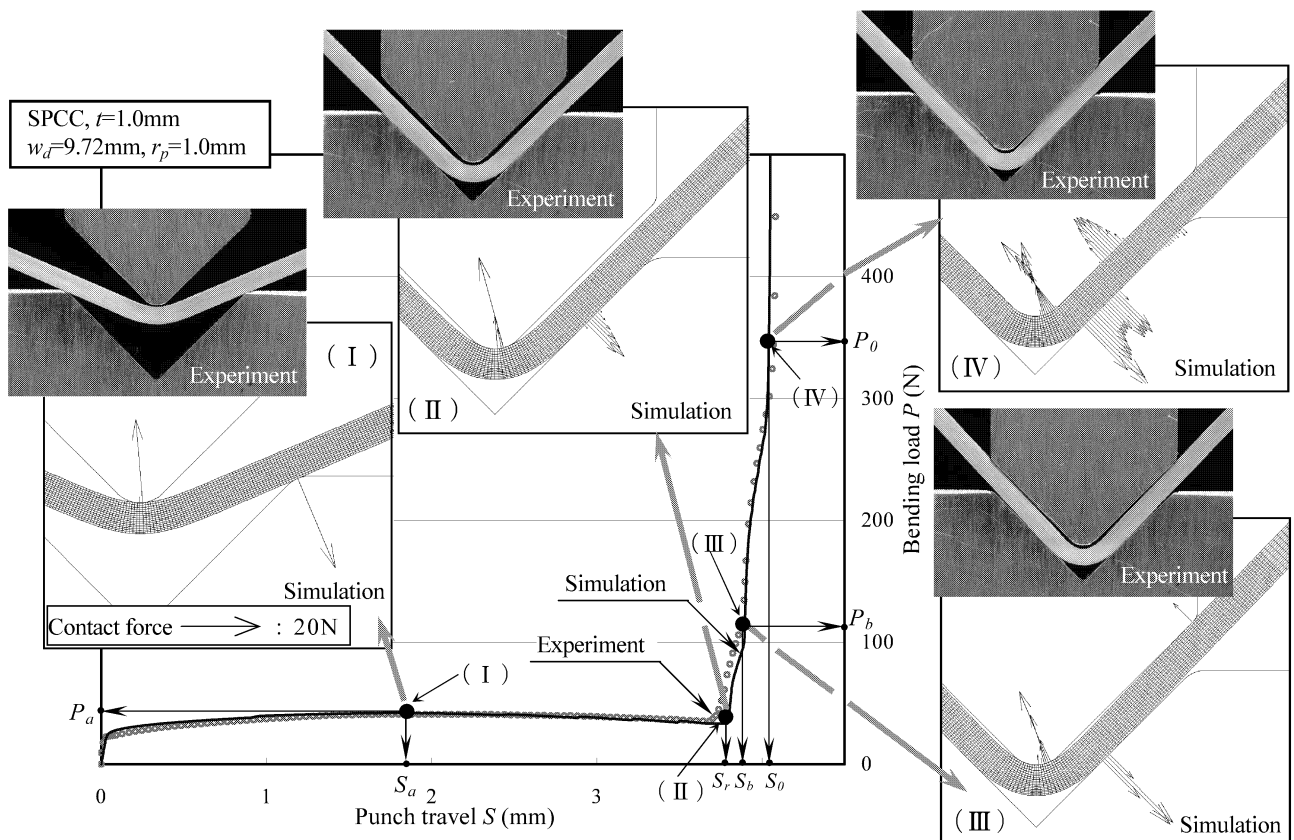


Fig. 2 Bending load-punch travel diagram and the geometries of deformation at several special stages (The arrow symbols on the bent sheet geometries of simulation results denote the contact force between the bending tools and the sheet metal)

する必要があったと考えられた。このことから、まず曲げ形態の変態点を明確に示すことにした。

Fig. 2 は  $t=1.0\text{mm}$  の SPCC を  $w_d=9.72\text{mm}$ ,  $r_p=1.0\text{mm}$  の曲げ型で V 曲げ加工をしたときの曲げ荷重—パンチ行程線図で、○印は実験結果、実線はシミュレーション結果である。また Fig.2 中には、(I) ~ (IV) の●印の段階での変形形状(実験結果及びシミュレーション結果),ならびにシミュレーション結果の変形形状内には曲げ型と加工板材との接触力の大きさも示した。

曲げ加工開始後、加工板材はパンチ先端とダイの左右肩の3点に接して曲げられていき、(I)の段階で曲げ荷重は極大値  $P_a$  を示す。その後、パンチ行程  $S_r$  の(II)の段階で曲げ加工品外側表面がダイ溝斜面に接し、曲げ加工中の角度がダイ溝角度の  $90^\circ$  にほぼ等しい状態となる。曲げ加工がさらに進行すると、曲げ加工品外側表面はダイ肩部から離れ始め、接触点はダイ溝幅中央部へと移行していく。このため曲げ荷重が急増するとともに、曲げ加工品は  $90^\circ$  よりも曲がりすぎた形状となり、パンチ行程  $S_b$  の(III)の段階で曲げ加工品内側表面がパンチ肩部に接触する。この段階で曲げ加工中の角度は最小値を示し、荷重線図には屈曲点が現れる。曲げ加工開始から(III)の段階までは、板はパンチ先端とダイの左右肩(あるいはダイの左右溝斜面)の3点に接して曲げられていく。このような状態は曲げ加工に必要な最少点数による曲げであり、このような形態でのV曲げ加工は自由曲げとよばれる。

(III)の段階に至ると板はパンチ先端、ダイの左右溝斜面及びパンチの左右肩の5点に接する。この状態は曲げ加工に必要な最少の接触点数でなくなることから自由曲げ形態は終わり、底突き曲げとよばれる形態となる。その後、曲げ型と加工板材とは多数点で接しながら曲げ加工が進行し、パンチ行程  $S_0$  の(IV)の段階で幾何学的下死点(パンチ斜面とダイ溝斜面の間隔が板厚に等しくなった状態)に至る。幾何学的下死点においても曲げ加工品に発生している応力状態は、パンチ先端部での曲げ外側に発生している引張応力と、パンチ肩部で曲げ戻されたときに曲げ内側に発生する引張応力とが共存した状態となっている<sup>7)</sup>。このことから幾何学的下死点においても底突き曲げの形態にある。底突き曲げ形態はその後パンチ斜面とダイ溝斜面間で板厚が数%圧縮されるまで続くが、そこでの変形の主体は圧縮変形となることから、本報では(IV)の幾何学的下死点までを底突き曲げ形態の範囲とした。(IV)の段階以降は板厚を圧縮する圧印曲げとなるので、それに必要なエネルギーはここでは対象外とした。

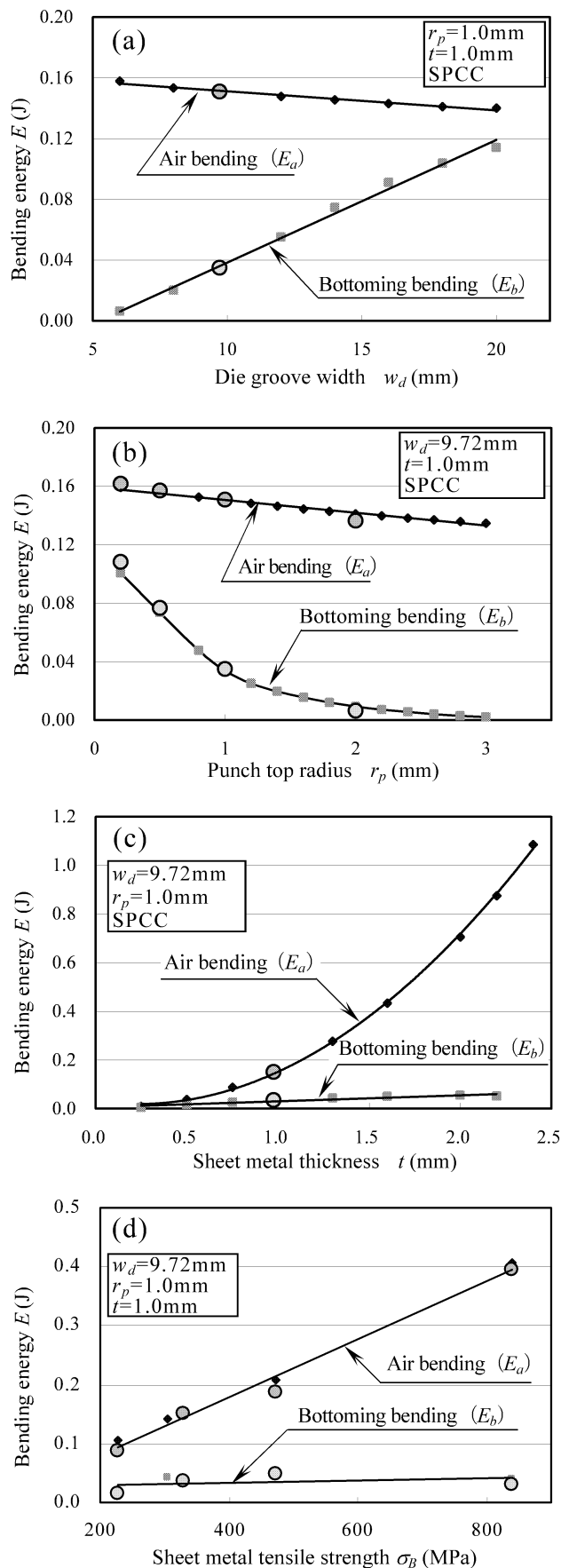


Fig. 3 Relation between bending conditions and bending energy (Large round symbols in figures denote experimental value)

したがって本報では、曲げ加工開始から (III) の段階までに必要なエネルギーを自由曲げエネルギー $E_a$ とし、(III) ~ (IV) の段階までに必要なエネルギーを底突き曲げエネルギー $E_b$ とした。

加工に要するエネルギーは荷重線図によって囲まれた面積であることを考慮して Fig. 2 の荷重線図を見ると、自由曲げエネルギー $E_a$ に大きな影響を及ぼす荷重線図上の特性値は $P_a$ ,  $P_b$ ,  $S_b$ であり、底突き曲げエネルギー $E_b$ に大きな影響を及ぼす特性値は $P_0$ ,  $\Delta S(=S_0-S_b)$ であるといえる。なお、 $P_b$ ,  $P_0$ は (III), (IV) の段階での曲げ荷重値である。

### 3. 2 曲げ加工条件と加工エネルギー

Fig. 3(a)~(d)は曲げ型寸法、及び加工板材特性が曲げ加工エネルギー $E_a$ ,  $E_b$ に及ぼす影響を示した結果である。大きい○印は実験結果であり、小さい■印はシミュレーション結果を示している。まず Fig. 3(a)に示すように、ダイ溝幅 $w_d$ が大きくなっても $E_a$ はわずかに減少するだけである。しかし $E_b$ は $w_d$ が大きくなると増加する。Fig. 3(b)はパンチ先端半径 $r_p$ が $E_a$ ,  $E_b$ に及ぼす影響を示した結果である。 $r_p$ が大きくなっても $E_a$ はわずかに減少するだけであるが、 $E_b$ は急激に減少する。Fig. 3(c)は加工板材の板厚 $t$ を変化させた場合の結果である。 $t$ が大きくなると $E_a$ は増加し、その変化は2次式により近似できる。しかし $E_b$ はわずかに増加するだけである。Fig. 3(d)は加工板材の引張強さ $\sigma_B$ が変化した場合の結果で、 $\sigma_B$ が大きくなると $E_a$ は直線的

に大きくなるが、 $E_b$ の増加はきわめて小さい。

曲げ加工エネルギーが加工条件によってこのように変化する理由を以下に考察した。Fig. 4は $w_d$ を8.0mmと12.0mmとした場合の荷重線図(シミュレーション結果)を比較したものである。 $w_d$ が大きくなると荷重値 $P_a$ ,  $P_b$ は小さくなり、 $P_0$ は大きくなる。また、パンチ行程 $S_b$ ,  $S_0$ も大きくなる。パンチ先端半径 $r_p$ や加工板材の $t$ ,  $\sigma_B$ が変化した場合にも荷重線図に変化が現れる。荷重線図上で示される特性値(曲げ荷重, パンチ行程)と曲げ加工条

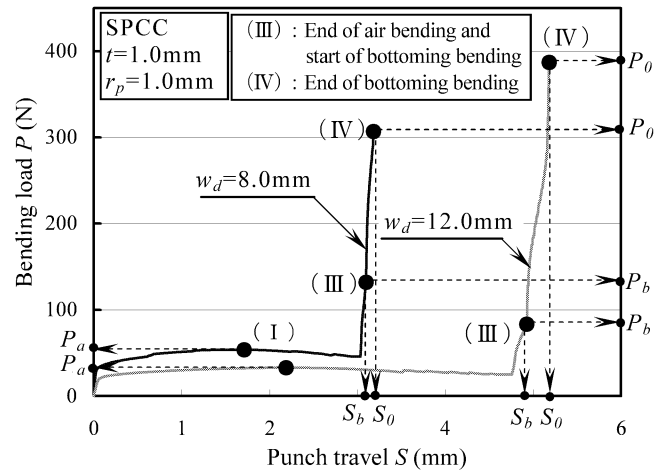


Fig. 4 Effect of die groove width  $w_d$  on bending load - punch travel diagram (Simulation results)

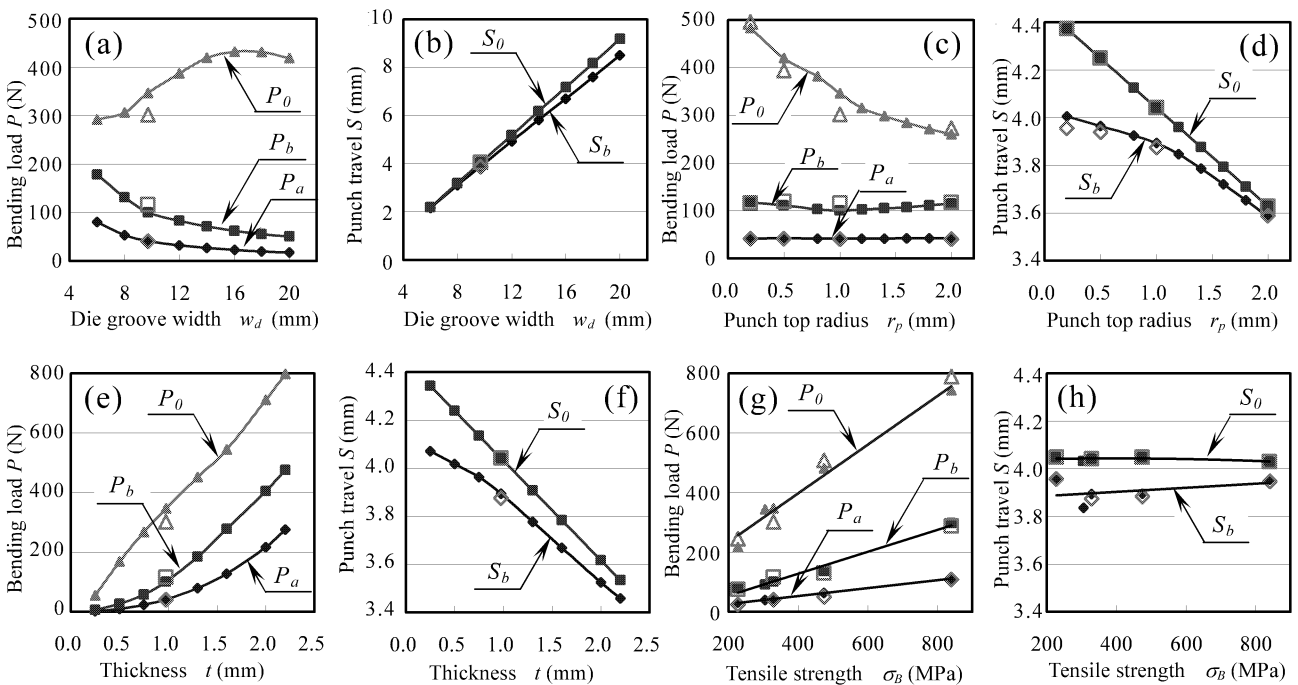


Fig. 5 Effect of bending conditions on bending load and punch travel (Large symbols in figures denote experimental value)

件の関係を整理した結果が Fig. 5 (a)~(h)である。

Fig.5 (a), (b)は  $w_d$  が変化した場合の結果である。 $w_d$  が大きくなると、Fig.4 で見られたように、 $P_a$ ,  $P_b$  は減少し、 $S_b$  は増加する。このため、 $P_a$ ,  $P_b$ ,  $S_b$  によって支配される  $E_a$  はほとんど変化しないことになる。また、 $w_d$  が大きくなると  $P_0$  は増加し、 $S_0$  と  $S_b$  の差として示される  $\Delta S (=S_0 - S_b)$  も増加する。このため  $P_0$ ,  $\Delta S$  によって支配される  $E_b$  は増加することになる。

Fig.5 (c), (d)は  $r_p$  が変化した場合の結果である。 $r_p$  が大きくなると Fig.3(b)に示したように  $E_a$  はわずかに減少したが、それは、 $P_a$ ,  $P_b$  はほぼ一定で、 $S_b$  が減少するためといえる。また  $r_p$  が大きくなると  $E_b$  は大きく減少したが、それは  $E_b$  を支配する  $P_0$  と  $\Delta S$  の両者が減少するためである。

Fig.5 (e), (f)は加工板材の  $t$  が変化した場合の結果である。 $t$  が大きくなると  $E_a$  は増加したが、それは  $P_a$ ,  $P_b$  の増加に比べ  $S_b$  減少の影響は小さいためといえる。一方、 $t$  が大きくなっても  $E_b$  の変化がわずかであったのは、 $P_0$  は増加しても  $\Delta S$  は減少するためである。

Fig.5(g), (h)は加工板材の  $\sigma_B$  が変化した場合の結果である。 $\sigma_B$  が大きくなると  $E_a$  が増加した理由は、 $P_a$ ,  $P_b$  が増加し、 $S_b$  もわずかに増加するためである。しかし  $E_b$  の変化がほとんどなかったのは、 $P_0$  は増加しても  $\Delta S$  が減少するためである。

### 3. 3 加工エネルギー算出式の提案

曲げ型寸法や加工板材の材質、板厚が変わった場合でも、曲げ加工に必要なエネルギーを算出できる近似式の導出を試みた。算出式はその実用性を考慮し、 $P_a$  と  $S_0$  の積として求められるエネルギーを基準エネルギー  $E_0 (=P_a \times S_0)$  とし、 $E_0$  を用いて自由曲げに必要なエネルギー  $E_a$ 、及び底突き曲げに必要なエネルギー  $E_b$  を表すことを試みた。

$E_0$  をエネルギー算出の根拠とした理由は以下のようである。まず  $E_0$  を構成する因子の内の  $P_a$  は、自由曲げに必要な荷重であることからこれまでに多くの研究がなされており、一般に(1)式で近似的に求められることが知られている<sup>8)</sup>。したがって曲

$$P_a = C \times \frac{\sigma_B \times b \times t^2}{w_d} \quad \cdots (1)$$

げ加工条件を (1) 式に代入することによって  $P_a$  の値を求めることできる。

一方、 $E_0$  を構成するもう一つの因子  $S_0$  は曲げ型寸法  $w_d$ ,  $r_p$  と加工板材の  $t$  によって(2)式のように

$$S_0 = \frac{w_d}{2} + (1 - \sqrt{2}) \times (t + r_p) \quad \cdots (2)$$

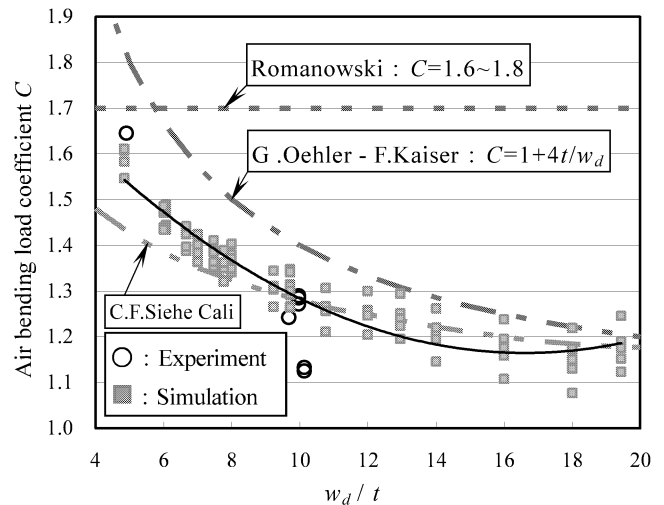


Fig.6 Air bending load coefficient C

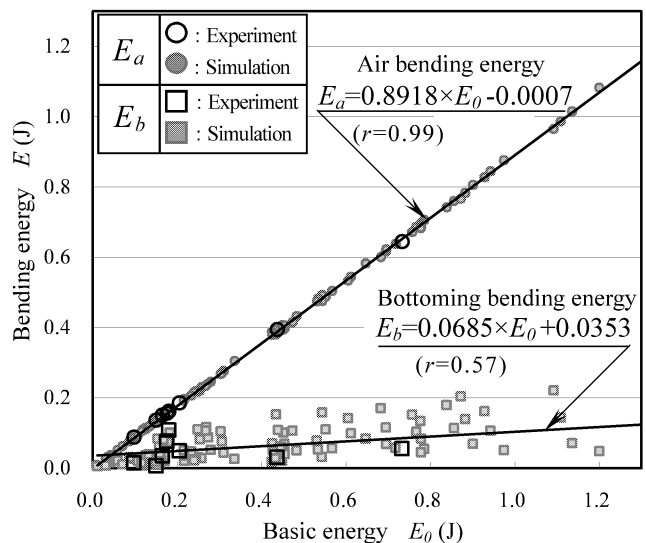


Fig. 7 Relation between basic energy  $E_0$  and bending energy  $E$

幾何学的に求めることができる。よって  $E_0$  は曲げ加工に際して、曲げ加工条件から容易に求めることができるためである。ここで(1)式の  $C$  は曲げ加工力係数であり、Fig. 6 に示すように C.F.Siehe Cali<sup>9)</sup>, G.Oehler-F.Kaiser<sup>10)</sup>, Romanowski<sup>8)</sup>らによって  $w_d/t$  の関数として与えられている。今回の曲げ加工結果から得られた  $C$  を Fig.6 中に示したが、その値は C.F.Siehe Cali と G.Oehler-F.Kaiser のほぼ中間であることが確認でき、これらの  $C$  を用いて  $P_a$  を求めることができる。なお、(1)式中の  $b$  は曲げ線長さである。

以上のようにして求められる  $E_0$  と  $E_a$ ,  $E_b$  の関係を示した結果が Fig. 7 である。図には曲げ型寸法

$w_d, r_p$ , 加工板材の  $t, \sigma_B$  の組み合わせを変えて行った曲げ加工結果をすべてプロットした. 曲げ加工条件が変わっても  $E_0$  と  $E_a$  の間には非常に強い正の相関があり (相関係数  $r=0.99$ ), 両者の関係は数値の有効桁数を考慮すると(3)式として表すことがで

$$E_a=0.89 \times E_0 - 0.00 \dots (3)$$

きる. つまり, 自由曲げ加工に要するエネルギー  $E_a$  は基準エネルギー  $E_0$  の約 0.9 倍として見積もることができる.

一方, Fig.7 中に示したように  $E_0$  と  $E_b$  の間には中程度の相関がみられた (相関係数  $r=0.57$ ).  $E_0$  と  $E_b$  の関係を詳細に調べてみると, 加工板材の  $t, \sigma_B$  が変化した場合には  $E_0$  と  $E_b$  の間には強い相関があることが確認できたが, 金型寸法  $w_d, r_p$  の変化に対しては両者に強い相関はなく, 全体としては中程度の相関となった. 全結果を直線で近似すると, (4)

$$E_b=0.07 \times E_0 + 0.04 \dots (4)$$

式のようにおくことができ,  $E_b$  は  $E_0$  の約 0.07 倍強として見積もることができる.

#### 4. 結 言

金属板材の V 曲げ加工に要するエネルギーについて検討し, 以下の結果を得た.

- (1) 曲げ型寸法  $w_d, r_p$  が変化しても自由曲げに必要なエネルギー  $E_a$  の変化は小さい. しかし, 底突き曲げに必要なエネルギー  $E_b$  は  $w_d$  が大きくなると増加し,  $r_p$  が大きくなると減少する.
- (2) 加工板材の  $t, \sigma_B$  が大きくなると  $E_a$  は増加するが,  $E_b$  の増加はきわめて小さい.
- (3) 幾何学的下死点までのパンチ行程  $S_0$  と自由曲げ状態における曲げ荷重の極大値  $P_a$  の積で求

められるエネルギーを基準エネルギー  $E_0 (=P_a \times S_0)$  とすると, 曲げ型寸法, 加工板材が変わっても  $E_0$  と  $E_a$  は強い相関を示し,  $E_a$  は  $E_0$  の約 0.9 倍となる. また,  $E_0$  と  $E_b$  は中程度の相関を示し,  $E_b$  は  $E_0$  の約 0.07 倍強となる.

#### 謝 辞

本研究を行うにあたり, 財団法人天田金属加工機械技術振興財団から研究開発助成を賜りましたことを大変光栄に思うとともに, 同財団に対して深く感謝申し上げます.

#### 参考文献

- 1) 地球温暖化対策の中期目標について, 首相官邸ホームページ, <http://www.kantei.go.jp/>
- 2) 日本塑性加工学会編: 塑性加工便覧, コロナ社, (2006), 383-384.
- 3) 同上, (2006), 486-487.
- 4) 日本塑性加工学会編: 塑性と加工 DVD 版, (2005).
- 5) 滝沢堅: FEM シミュレーションシステム分科会資料集第 6 号, (1994), 19-27.
- 6) 日本塑性加工学会編: 曲げ加工, コロナ社, (1995), 46-47.
- 7) 小川秀夫: 塑性と加工, **43**-493, (2002), 145-149.
- 8) 日本塑性加工学会編: 塑性加工要覧, コロナ社, (1986), 283.
- 9) C.F. Siehe Cali: Pressures for right angle bends, **82**, (1938), 101.
- 10) G.Oehler-F.Kaiser: Shnitt-, Stanz-, und Ziehwerk zeuge, (1949), 213-214.