成形限界応力曲面を用いた
自動車用軟鋼板の穴広げ割れ予測手法の開発

東海国立大学機構岐阜大学　工学部機械工学科
助教　箱山　智之
(2018 年度奨励研究助成（若手研究者）AF-2018041-C2)

キーワード：成形限界応力，穴広げ，軟鋼板

1．研究の目的と背景

自動車部品の加工コスト低減のためには，トライ・アンド・エラーレス生産の実現が必須であり，それを可能とするために成形不良予測に用いるプレス成形シミュレーションの高精度化が望まれる．プレス成形シミュレーションにおける予測が難しい成形の一つに伸びフランジ成形中の割れがあり，実験・計算の両面から多くの研究がなされてきた[1)-8)]．桑原ら[3)-6)]は，冷延軟鋼板，アルミニウム合金板，590MPa および 780MPa 級高張力鋼板を対象として，二軸引張特性を高精度に表現可能な材料モデルを構築し，穴広げ成形解析を行った．その結果，材料モデルが穴縁における塑性変形の予測精度に大きく影響することを明らかにした．

成形シミュレーションにおける材料の破断判定手法として，成形限界線（FLC）が広く用いられている．成形限界線とは，局所くびれが生じた瞬間のひずみ成分をひずみ空間上にプロットしたものであり，FLC にひずみが到達した瞬間に割れが生じると定義する．しかしながら，FLC は経路に依存し変化することが知られている．一方，成形限界に達したときの応力を応力空間にプロットした成形限界応力線（FLSC）は材料が等方硬化を示す時，経路に依存しないことが報告されている[9),10)]．Panich ら[7)]は，Marciniak–Kuczyński（M–K）成形限界解析[11)]によって FLSC を決定し，それに穴広げ成形解析から得られた応力経路を重ね合わせることにより，FLSC によって，穴広げ成形における破断が精度よく予測可能であることを明らかにした．しかし，材料モデルは，単軸引張試験，液圧バルジ試験および板厚方向圧縮試験結果に基づいて決定した Yld20000-2d 降伏関数[12)]であり，供試材の二軸変形特性の考慮は十分ではない．筆者ら[13)]は M-K 解析の高精度化のためには，二軸引張試験結果に基づいた降伏関数の適用が不可欠であることを明らかにしている．

本研究では，FLSC に基づく破断予測のさらなる高度化を目的とし，二軸応力試験[14), 15)]に基づく降伏関数により計算された FLSC を用いた穴広げ破断予測を行い，その精度を検証する．さらに，FLSC を用いた破断予測のさらなる実用化のためには，有限要素解析ソフトウェアに FLSC を組み込み，容易に破断判定をできる必要があることから，FLSC の定式化方法を検討した．

2．成形限界応力曲面を用いた穴広げ割れ予測

2・1　材料モデリング

供試材は公称板厚 1.2 mm の冷延軟鋼板（SPCE 相当）であり，機械的性質を**表 1** に示す．以下，異方性の主軸として圧延方向を x 軸，圧延直角方向を y 軸，板厚方向を z 軸とする．

二軸応力を受ける供試材の加工硬化特性を定量的に評価するために，十字形試験片を使用した二軸引張試験[14)]，および円管試験片を使用した二軸バルジ試験[15)]を行い，等塑性仕事面[16),17)]を測定した．まず圧延方向（RD）単軸引張試験において，基準となる対数塑性ひずみ$\varepsilon_0^{\mathrm{p}}$に達した瞬間における真応力$\sigma_0$とそれまでになされた単位体積あたりの塑性仕事$W_0$を測定する．他の応力経路においては，$W_0$と等量の塑性仕事が消費された時点の応力$(\sigma_x, \sigma_y)$を測定し，主応力空間にプロットし，その集合をもって等塑性仕事面を決定した．等塑性仕事面を測定した応力比はσ_x:σ_y =1:0, 4:1, 2:1, 4:3, 1:1, 3:4, 1:2, 1:4, 0:1 である．

表 1 供試材の機械的性質

Tensile direction/°	$\sigma_{0.2}$ /MPa	c* /MPa	n*	α*	r**
0	153	622	0.326	0.011	1.85
45	161	621	0.327	0.013	1.93
90	162	634	0.346	0.016	2.82

*Approximated using $\sigma = c(\alpha + \varepsilon^{\mathrm{p}})^n$ at ε^{p} =0.002~0.094.
**Measured at uniaxial nominal strain ε_{N} =0.1.

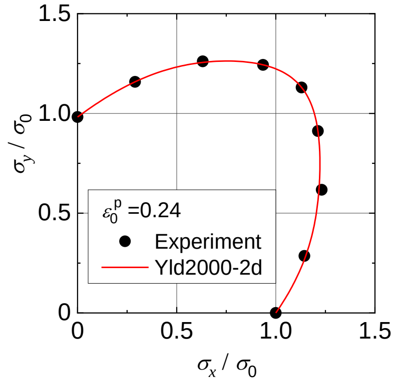


図 1 等塑性仕事面と Yld2000-2d 降伏曲面の比較．応力は相当応力σ_0で無次元化．

σ_x: σ_y =1:0, 0:1 では JIS13B 単軸引張試験片を使用した．$\varepsilon_0^{\mathrm{p}}$ =0.24 における等塑性仕事面に対して，等方硬化を仮定した Yld2000-2d 降伏関数 [18]を同定した．等塑性仕事面の測定結果と Yld2000-2d 降伏関数の比較を**図 1** に示す．Yld2000-2d 降伏関数のパラメータ決定には，以下評価関数を最小化するように定めた．

$$F(\alpha_i, M) = \sum_{j=1}^{N}\left(l_j' - l_j\right)^2 + 0.2\sum_{j=1}^{N}\left(\beta_j' - \beta_j\right)^2 \qquad (1)$$

ここで Nは実験点数である．l_j'およびl_jはそれぞれ原点と無次元化等塑性仕事点および降伏曲面までの距離，β_j'およびβ_jはそれぞれ塑性ひずみ速度の方向の実験値および関連流れ則を仮定し降伏関数から求まる計算値である．

2・2　成形限界解析

FLSC を算出するため，**図 2** に示すような板厚初期不整を仮定した M-K 解析 [11]を実施した．ひずみ速度感受性指数を 0.02 とする弾粘塑性モデルを適用した．その他の材料パラメータはヤング率 219GPa，ポアソン比 0.3，ひずみ硬化関数$564\left(\varepsilon_0^{\mathrm{p}} + 0.006\right)^{0.28}$ （MPa）とし，板厚初期不整は 0.995 とした．

任意の応力状態に対応できるよう，**図 3** に示すような応力空間上の成形限界応力曲面（FLSS）を決定するため，応力の主軸と初期異方性の主軸のなす角 θ を 0°～90°で変化させた．

2・3　穴広げ成形試験と有限要素解析

ワイヤ放電加工機により，初期穴径 30 mm をもつ円板試験片を製作し，穴縁近傍の局所くびれが目視で確認可能であった 43±2 mm まで成形した．この時，穴縁の接線方向から約 52°の方向に多数の局所くびれが穴縁全周に現れ，特に 45°においてより明瞭に確認された（**図 4**）．

Yld2000-2d 降伏関数の等方硬化モデルを用いて，穴広げ成形の有限要素解析を行った．解析モデルは穴広げ試験と同形状の金型を解析的剛体で定義し，ボルト締付け力より計算された金型抑え力を加えた状態でパンチを上昇させた．ブランク－パンチ間には両面にワセリンを塗布したテフロンシートをはさんだことから，摩擦係数はブランク－パンチ間：0.03，ブランク－上下ダイス間：0.2 とした．ブランクは対称性を考慮して 1/4 モデルとし，ビード頂点位置からの材料流入を無しとした．加工硬化式は，$564\left(\varepsilon_0^{\mathrm{p}} + 0.006\right)^{0.28}$ （MPa）とした．

図 5 は，成形高さ 38.5 mm における θ = 40°方向の半径方向の最大主応力分布である．穴縁の応力は FLSC に到達しており，局所くびれの発生瞬間と予測され，実験結果と概ね一致した．本材料に対しては，二軸引張試験結果に基づく材料モデルを用いることで，穴広げ成形中のくびれを FLSS によって高精度に予測可能であった．

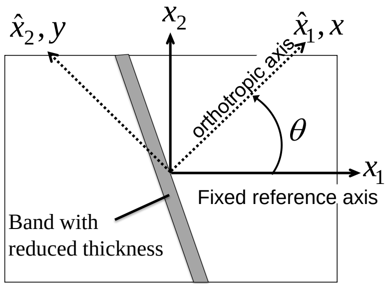


図 2 MK 解析の概略図.

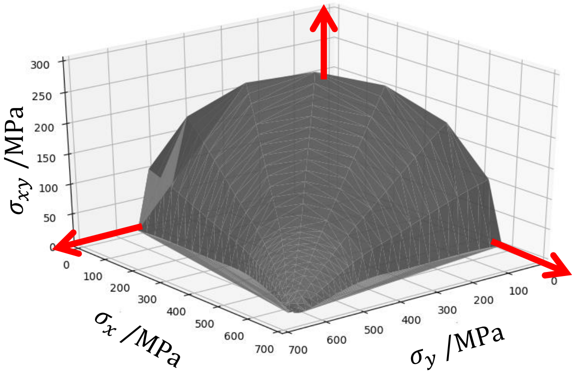


図 3 成形限界応力曲面概念図.

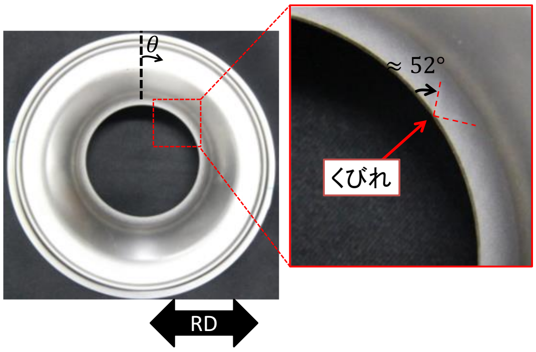


図 4 成形後の試験片

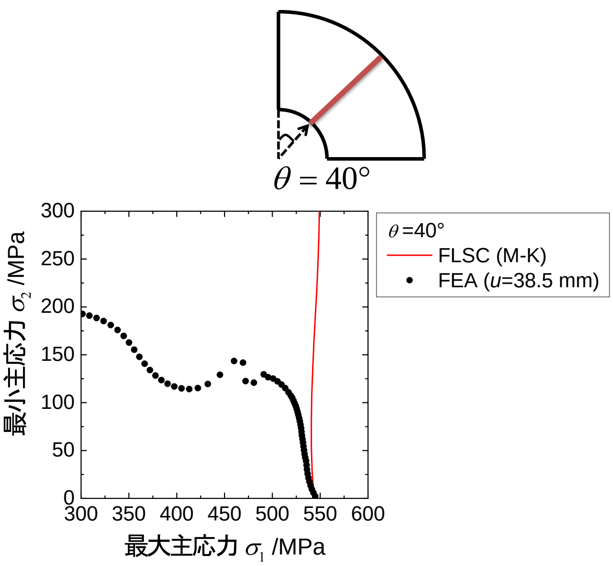


図 5 半径方向最大主応力分布と FLSC の比較

３．成形限界応力線の定式化の検討

３・１　定式方法

実験や成形限界解析で得られるFLSSは離散値であるから有限要素解析ソフトウェアに直接導入するのは困難である．有限要素解析ソフトウェア上で割れを判定するためには定式化が必要である．蔦森ら[19]の降伏関数のモデリング手法を参考に，3 次ベジエ曲線と 3 次スプライン関数を組み合わせ，FLSS の定式化を行った．

平面応力状態を仮定し，2 次元主応力空間における成形限界応力線$\Sigma = \{\sigma_1, \sigma_2\}^T$の定式を考える．材料の面内異方性に基づく，FLSC の主軸方向依存性を表現するために，圧延方向からの角度 0≦$\theta \leqq \pi/2$を n 等分し，その方向を最大主応力とする $n+1$ 個の FLSC をベジェ曲線で定義する．そしてそれらをスプライン関数で内挿することで，FLSS を表現する．

i 番目（$i = 1, 2, \dots n+1$）の規格化された成形限界応力線$F_i(t)$の最大主応力σ_1の方向は材料の圧延方向に対して$(i/2n)\pi$の角度をなしており，$F_i(t)$は式(2)のように記述する．

$$F_i(t) = (1-t)^3 A_i + 3(1-t)^2 t D_i + 3(1-t) t^2 E_i + t^3 C_i \tag{2}$$

ここで，A_i，C_i，D_i，E_iは**図 6** に示す 3 次ベジエ曲線の制御点の位置ベクトルである．式には含まれないが，図 6 のB_iは 3 次ベジェ曲線の制御点を定めるための位置ベクトルであり，直線$A_i\,D_i$，直線$C_i\,E_i$はそれぞれ点A_i，C_iで曲線に接している．tは$0 \leqq t \leqq 1$の曲線制御パラメータである．

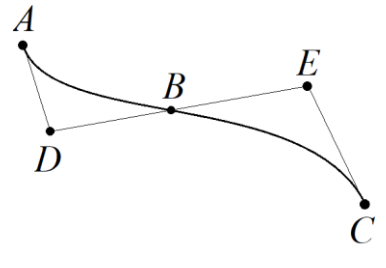


図 6 3 次ベジェ曲線の概念図

$\theta = (i/2n)\pi$における FLSC は式(2)によって定義できるが，シミュレーションに導入するためには，θについても連続量にする必要がある．任意の角度θの FLSC を表現するために，定義した$n+1$個の FLSC について，3 次スプライン関数$f_i(\theta)$によって内挿補間すると，FLSC は式(3)のようになる．

$$F(\theta, t) = \sum_{i=0}^{n} f_i(\theta) \begin{Bmatrix} (1-t)^3 A_i + 3(1-t)^2 t D_i \\ +3(1-t) t^2 E_i + t^3 C_i \end{Bmatrix} \tag{3}$$

スプライン関数$f_i(\theta)$は次のように表せる．

$$f_i(\theta) = a_i + b_i(\theta - \theta_i) + c_i(\theta - \theta_i)^2 + d_i(\theta - \theta_i)^3 \tag{4}$$

a，b，c，d は任意の係数である．

t の定義方法に任意性がある．$s = \varepsilon^p{}_2 / \varepsilon^p{}_1$と定義すると，$t$ は式(5)，(6)のように記述できる．$\varepsilon^p{}_1$，$\varepsilon^p{}_2$はそれぞれ 1，2 方向の塑性ひずみとする．本研究では，2 つの 3 次ベジエ曲線を接続して FLSC を定義した．

$s < 0$ のとき（単軸～平面ひずみ）

$$t = s + 1 \tag{5}$$

$s \geqq 0$ のとき（平面ひずみ～等二軸）

$$t = s \tag{6}$$

このとき，2 つの 3 次ベジエ曲線は式(7)，(8)のように記述できる．

$s < 0$ のとき

$$F_{ai}(t) = (1-t)^3 A_{ai} + 3(1-t)^2 t D_{ai} + 3(1-t) t^2 E_{ai} + t^3 C_{ai} \tag{7}$$

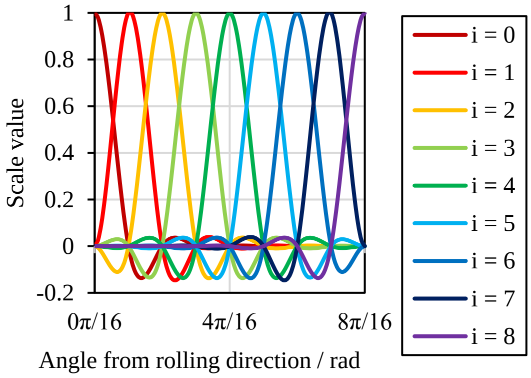
$s \geqq 0$ のとき

$$F_{bi}(t) = (1-t)^3 A_{bi} + 3(1-t)^2 t D_{bi} + 3(1-t) t^2 E_{bi} + t^3 C_{bi} \tag{8}$$

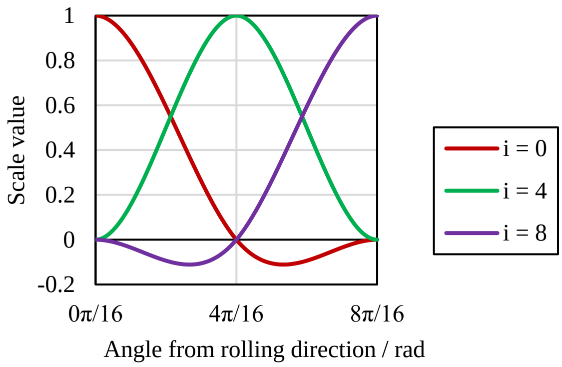
ベジェ曲線のパラメータの同定は各 θ で定義される FLSC の 3 次ベジェ曲線の制御点 A_i，C_i，D_i，E_i を定めることと同値である．A_{ai}，C_{bi} は元のデータから直接求めることができる．D_{ai}，E_{ai}，C_{ai}，A_{bi}，D_{bi}，E_{bi} は Excel のソルバー機能を用いて，それぞれの t における主応力と計算値との差が最小になるよう決定した．ただし，平面ひずみにおいて同一の成形限界応力となる必要があることから$C_{ai} = A_{bi}$とした．

３・２ 定式結果

FLSS の表現精度に及ぼす分割数の影響を明らかにするために，$n = 8$ と $n = 2$ のスプライン関数を求めた（**図 7**）．**図 8** に成形限界応力とベジェ曲線およびスプライン関数を用いた近似結果を示す．$n = 8$ と $n = 2$ の両条件にて入力パラメータである θ = 0, 45, 90 °は入力値を精度良く表現した．θ = 22.5, 67.5 ° においては，$n = 8$ では入力パラメータである一方で，$n = 2$ は予測データである．すなわち，$n = 2$ を用いても，FLSS を精度よく表現可能であった．

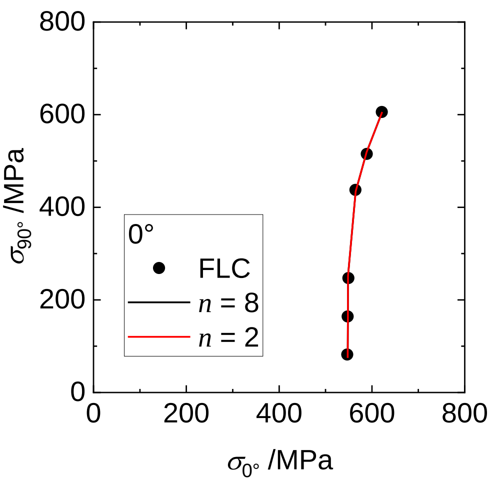


(a)　$n = 8$

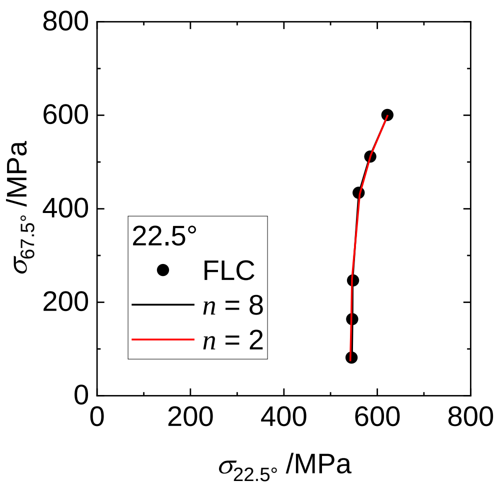


(b)　$n = 2$

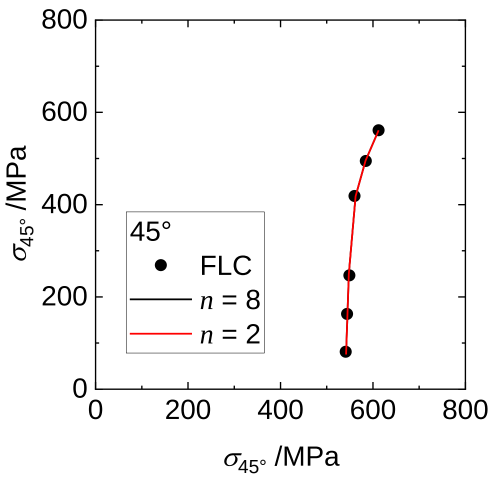
図 7 スプライン関数



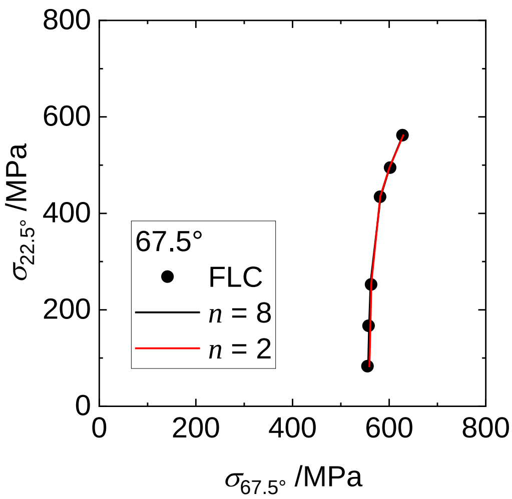
(a) $\theta = 0$ °



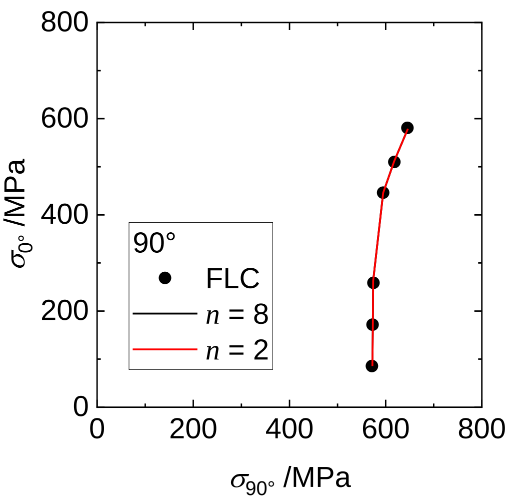
(b) $\theta = 22.5$ °



(c) $\theta = 45$ °



(d) $\theta = 67.5$ °



(e) $\theta = 90$ °

図 8 成形限界応力と近似結果の比較

４．まとめ

(1) M-K モデルを用いて成形限界解析および穴広げ成形解析を行った．その結果，本供試材においては，二軸引張試験結果に基づいて決定された材料モデルを用いることで，FLSS によって高精度な穴広げ破断予測が可能であった．

(2) ベジェ曲線とスプライン関数の組み合わせによって，FLSS を精度よく近似可能であった．さらに，本供試材においては，分割数 $n = 2$ で十分な精度が得られた．

謝　辞

本研究の遂行に際し，2018 年度公益財団法人天田財団奨励研究助成（若手研究者）(AF-2018041-C2) の支援を受けた．ここに記し，謝意を表する．

参考文献

1) 薄鋼板成形技術研究会編：プレス成形難易ハンドブック　第 3 版，(2007)，118-119，日刊工業新聞社.
2) 飯塚・比良・吉武：塑性と加工，46-534 (2005), 625-629.
3) 桑原・橋本・飯塚・Yoon : 塑性と加工, 50-585(2009), 925-930.
4) 橋本・桑原・飯塚・Yoon : 鉄と鋼，96-9 (2010), 557-563.
5) Kuwabara, T. & Ichikawa, K: Ro. J. Techn. Sci. Appl. Mechanics, 60 (2015), 63-81.
6) Kuwabara, T., Mori, T., Asano, M., Hakoyama, T. & Barlat, F.: Int. J. Plasticity, 93 (2017), 164-186.
7) S. Panich, F. Barlat, V. Uthaisangsuk, S. Suranuntchai & S. Jirathearanat, Mater. Des. 51, 756–766 (2013).
8) 蔦森・飯塚・天石・佐藤・荻原・宮本：塑性と加工, 57-662 (2016), 245-251.
9) K. Yoshida, T. Kuwabara & M. Kuroda, Int. J. Plasticity, 23 (2007), 361-384.
10) K. Yoshida & N. Suzuki, Int. J. Plasticity 24, 118-139 (2008).
11) Z. Marciniak and K. Kuczynski: Int. J. Mech. Sci., 9 (1967), 609.
12) Barlat, F. & Kuwabara, T.: 塑性と加工, 57-662 (2016), 230-237.
13) Hakoyama, T. & Kuwabara, T.: Effect of biaxial work hardening modeling for sheet metals on the accuracy of forming limit analyses using the Marciniak-Kuczynski approach, In: Altenbach, H., Matsuda, T. and Okumura, D. (Eds.), From Creep Damage Mechanics to Homogenization Methods., Springer, (2015), pp. 67-95.
14) ISO 16842: 2014 Metallic materials −Sheet and strip −Biaxial tensile testing method using a cruciform test piece
15) Kuwabara, T. and Sugawara, F.: Int. J. Plasticity, **45** (2013), 103–118.
16) Hill, R. & Hutchinson, J.W.: J. Appl. Mech., **59**(1992), S1-S9.
17) Hill, R., et al.: Int. J. Solids Struct., **31**-21(1994), 2999-3021.
18) Barlat, F., et al.: Int. J. Plasticity, **19**(2003), 1297-1319.
19) 蔦森・飯塚・天石・佐藤・荻原・宮本：塑性と加工，57-662 (2016)，245-251.