

影響係数を用いた荷重-ストローク線図に基づく 機械的特性の推定方法

電気通信大学 知能機械工学専攻
教授 久保木 孝
(平成 24 年度一般研究開発助成 AF-2012015)

キーワード：機械的特性，荷重-ストローク線図，影響係数

1. 研究の目的と背景

変形抵抗は塑性加工によって成形された製品に対して大きな影響を及ぼす。例えば、引抜き加工における残留応力は変形抵抗に応じて単調に大きくなることが知られている¹⁾。棒鋼の矯正加工においても、変形抵抗の大きさに応じて矯正条件を調整する必要がある²⁾。

板加工においても変形抵抗の影響は大きく、特に薄板の曲げ加工では顕著となる。薄板の曲げ加工では、スプリングバックが大きくなるが、その対策として、スプリングバックを考慮して、オーバーベンドする方法が有効であるが、変形抵抗が大きくなるにしたがい、オーバーベンド量は大きくする必要があり、スプリングバックを予測する、或いは、抑制するためにこれまでも多くの研究がなされてきている^{3,4)}。スプリングバックだけでなく、板を曲げた際に生じる曲げ線方向の反りを抑制する上でも変形抵抗を考慮する必要がある。金らは板材の端部に軽圧下を加えることによって反りを抑制することを示しているが⁵⁾、この際の適正な軽圧下圧力は変形抵抗に依存して調整する必要がある⁶⁾。

ひずみの蓄積とともに増加する変形抵抗を定量的に表現するために応力-ひずみ線図が用いられている。通常は、応力-ひずみ線図は引張試験によって測定され、有限要素法などを含む種々の解析に用いられている。

しかしながら、実製造ラインにおいて問題となるのは、変形抵抗バラツキを有することである。同一の化学成分を有していても、加工中の加工履歴によって異なる⁷⁾。或いは、購入の時期によって、さらには、同一のコイル材であってもサンプルする場所によって、変形抵抗は変化する。

変形抵抗の個々のバラツキを考慮し、高精度な曲げを実現するために、今井らは二段曲げをする実用的な方法を提案している⁸⁾。最終曲げ角度に到達する直前に材料を一度拘束を解除し、その際に生じるスプリングバック挙動を元に機械的特性を再評価し、最終曲げ角度を決定する方法である。これによって、高精度曲げ加工機を実用化している。しかしながら、事前に機械的特性を予測できれば、一段目の曲げ加工を省略できる可能性がある。

本報では、曲げ加工の前段に位置する成形における荷重-ストローク線図に基づく方法を提案する。基本的なコンセプトは、特許⁹⁾にて示されているが、ここでは具体的に検討した結果を示す。前段加工として張出し加工を取り上

げ、張出し加工で得られる荷重-ストローク線図より、材料の応力-ひずみ線図を推定する。まず、応力-ひずみ線図が既知であるマスター材を定め、有限要素法を用いてマスター材の応力-ひずみ線図が変化した際に生じる荷重-ストローク線図の変化を影響係数行列として求める。マスター材と応力-ひずみ線図を求める対象であるターゲット材の荷重-ストローク線図の差を求める。得られた差と影響係数行列を用いて、ターゲット材の応力-ひずみ線図を求める。本報では、数値解析と実験により妥当性を検証する。

2. 応力-ひずみ線図の推定方法

2.1 推定方法の適用イメージ

図1に本報が提案する応力-ひずみ線図の推定方法の適用イメージを示す。ここでは、曲げ加工の前段加工として張出し加工が存在している場合を想定する。まず、張出し

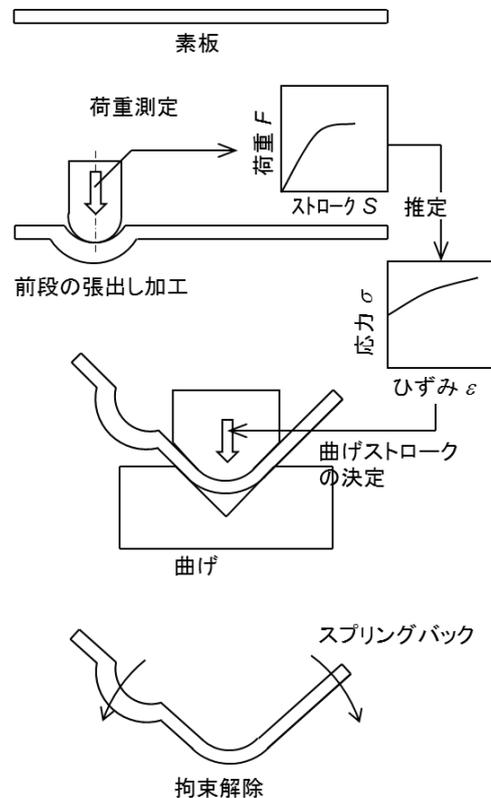


図1 応力-ひずみ線図推定法の実ラインへの適用

加工において、荷重-ストローク線図を採取する。得られた荷重-ストローク線図より、応力-ひずみ線図を推定する。推定された応力-ひずみ線図より曲げ加工におけるストロークの適正値を求め、スプリングバックを最小に抑制するなど、加工条件を適正化する。

2.2 推定方法の概念

図2に提案する応力-ひずみ線図の推定方法の概念図を示す。オフラインの実験にて得られるマスター材の応力-ひずみ線図と荷重-ストローク線図、有限要素法によって得られる影響係数行列、オンラインにて測定するターゲット材の荷重-ストローク線図を用いて、ターゲット材の応力-ひずみ線図を推定する。以下に詳細を示す。

(ステップ1) マスター材の応力-ひずみ線図と荷重-ストローク線図の測定

まず、マスター材を選定し、オフラインにおいて引張試験により応力-ひずみ線図 Q_{RM} と張出し加工により荷重-ストローク線図 L_{RM} を求める。

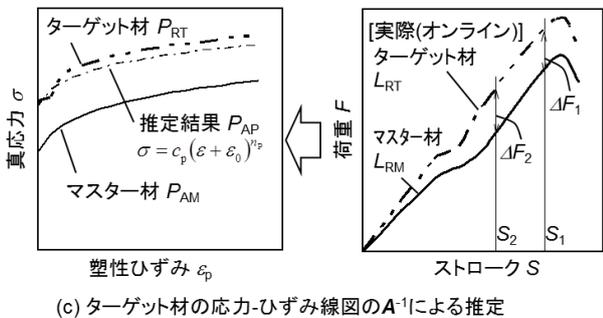
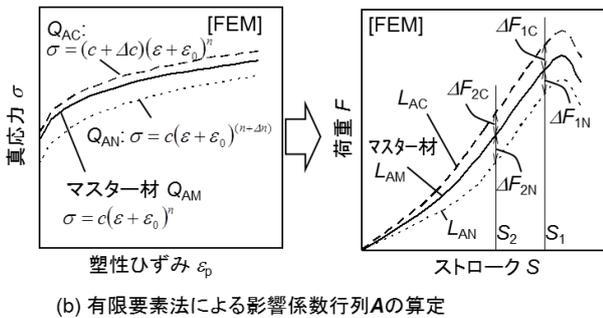
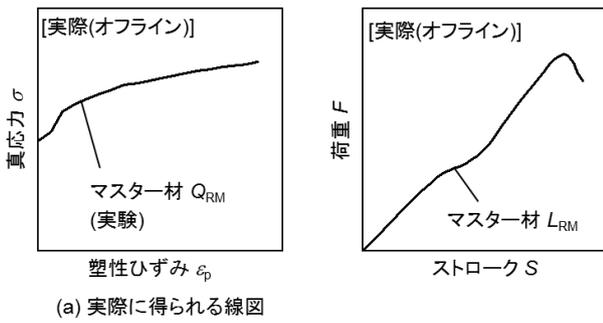


図2 応力-ひずみ線図推定法の概念図

本報では、応力-ひずみ線図を以下の Swift の式を用いて近似する。

$$\sigma = c(\varepsilon_p + \varepsilon_0)^n \quad (1)$$

ここで、 σ は応力、 ε_p は塑性ひずみ、 c は加工硬化係数、 n は加工硬化指数、 ε_0 はオフセットである。

(ステップ2) 応力-ひずみ線図の特性ベクトル p と荷重-ストローク線図の特性ベクトル f の決定

有限要素法を実行して、マスター材について、式(1)にて表現される応力-ひずみ線図 Q_{AM} を用いて荷重-ストローク線図 L_{AM} を求める。ここで、応力-ひずみ線図 Q_{AM} を定める特徴的な成分 p_i からなるベクトル p_M を定める。本報では以下にて導入する影響係数行列 A の次数を2とし、 p_i を以下とした。

$$p_1 = c/c^*, \quad p_2 = n/n^* \quad (2)$$

ここで、 c^* や n^* は、加工硬化係数 c や加工硬化指数 n を標準化するための定数である。

さらに、荷重-ストローク線図を特徴づける成分 f_i からなるベクトル f を定める。成分 f_i は以下の通りとした。

$$f_1 = F_1/F^*, \quad f_2 = F_1/F^* \quad (3)$$

ここで、 F_i はストローク S_i における荷重であり、 F^* は F^* を標準化するための定数である。ストローク S_i は次のステップにて導入する影響係数行列 A の固有値が最大となるように決定する。

(ステップ3) 影響係数行列の算出

有限要素法を用いて図2(b)のようにマスター材の特性ベクトル p_M を基準に数値偏微分を実施し、影響係数行列 A を算出する。

$$df_i = \sum_{j=1}^2 \frac{\partial f_i}{\partial p_j} dp_j \quad (4)$$

または、

$$df = A dp \quad (5)$$

(ステップ4) オンラインにおける荷重-ストローク線図の測定

実際にターゲット材を張出し加工し、荷重-ストローク線図を測定する。実機に適用する際はオンラインを想定している。図2(c)に示す通りターゲット材とステップ1にて測定したマスター材の荷重-ストローク線図の特性ベクトルの差をベクトル Δf (成分 $\Delta F_1, \Delta F_2$) して求める。

(ステップ5) ターゲット材の応力-ひずみ線図の算出

ターゲット材の応力-ひずみ線図の特性ベクトル P_T を以下の式により算出する。

$$p_T = p_M + A^{-1}df \quad (6)$$

式(1)~(3)を考慮すると、応力-ひずみ線図を求めることができる。

2.3 2段階推定法

マスター材とターゲット材の応力-ひずみ線図が大きく異なる場合、前節の方法では十分な推定精度が得られない。そこで、さらに以下の3通りの2段階推定法を考案した。

(2段階推定法-0)

前節の1段階推定法によって得られた応力-ひずみ線図を有する材料を新たなマスター材と考えて、同様の手続きによって、再度、ターゲット材の応力-ひずみ線図を求める方法である。この方法は、(ステップ4)において、荷重-ストローク線図を実験によって得ることができないため実際には適用できない。しかしながら、ターゲット材料も架空とする数値解析では実施でき、本報では最適な工具形状を見極めるために使用する。

(2段階推定法-1)

マスター材に比べてターゲット材の変形抵抗が大きい場合、変形抵抗比に反比例して影響係数行列 A の成分 a_{12} を小さく見積もっていることになる。そこで、 A の代わりに以下の修正影響係数行列 A_M を用いる。

$$A_M = \begin{bmatrix} a_{11} & \frac{c^{<1>}}{c_M} a_{12} \\ a_{21} & \frac{c^{<1>}}{c_M} a_{22} \end{bmatrix} \quad (7)$$

ここで、 $c^{<1>}$ は一段階目の推定によって求めた加工硬化係数、 c_M はマスター材の加工硬化係数である。

(2段階推定法-2)

第一段階目の推定によって得られる結果を元に新たにマスター材の応力-ひずみ線図を次式とする。

$$\sigma = c^{<1>} (\varepsilon_p + \varepsilon_0)^{n_M} \quad (8)$$

ここで、 n_M はマスター材の加工硬化指数のままであり、加工硬化係数 $c^{<1>}$ のみ修正する。さらに、式(8)の機械特性を有する材料を実際に張出し加工した際に得られるべき荷重-ストローク線図は以下であると仮定する。

$$F(s) = \frac{c^{<1>}}{c_M} F_{AM}(s) \quad (9)$$

ここで、 $F_{AM}(s)$ は第一段階で用いたマスター材の荷重-ストローク線図の実測値である。加工硬化係数と荷重は比例関係にあるため成立するはずである。

3. 研究方法

1段階推定法と2段階推定法-0を対象に、数値解析のみにより有効性を検証するとともに、高精度な応力-ひずみ線図の推定が可能な適正な工具形状を求める。さらに、1段階推定法、2段階推定法-1、2段階推定法-2を実材料に適用して精度の検証を行う。

3.1 張出し加工条件

張出し加工の概念図を図3に、主な加工条件を表1に示す。適切な工具形状を見つけるためにパンチ半径とダイ肩半径を様々に組み合わせて推定精度を比較した。

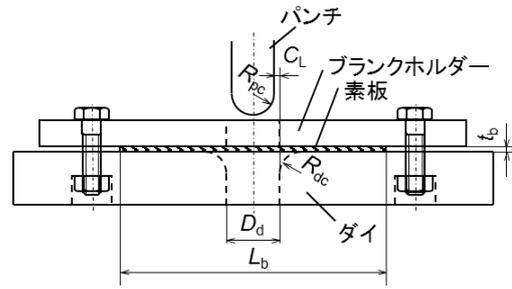


図3 張出し加工の概念図

表1 基本となる主な加工条件

パンチ	パンチ半径 R_{pc}/mm	6 - 8.5
ダイ	パンチ半径 R_{dc}/mm	5 - 15
	穴直径 D_d/mm	20
材料	材質	A1100, SPCC
	厚さ t_b/mm	1.5
	辺長さ L_b/mm	100

3.2 有限要素法解析

有限要素法に用いたモデルを図4に示す。有限要素法解析には、Wales 大学 Swansea 校(現 Swansea 大学)にて開発された汎用コード ELFEN を用いた。二次元軸対称モデルを用い、静的陰解法を適用した。材料は弾塑性体、ダイスは剛体とし、ロッキングを防止するために F-bar 四角形要素を用いた¹⁰⁾。

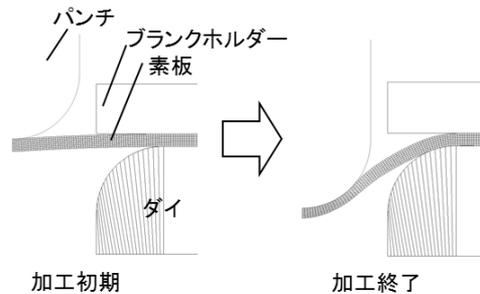


図4 有限要素解析用に次元軸対称モデル

4. 研究成果

4.1 解析による工具形状適正化

応力-ひずみ線図を推定するために適した工具形状を定めるために有限要素法による検討を実施した。(ステップ4)において、実際に測定される荷重-ストローク線図の代わりに有限要素法を用いて得た線図を元に応力-ひずみ線図を推定し、推定精度を検証した。ここではマスター材としてA1100を、ターゲット材としてSPCCを選択した。

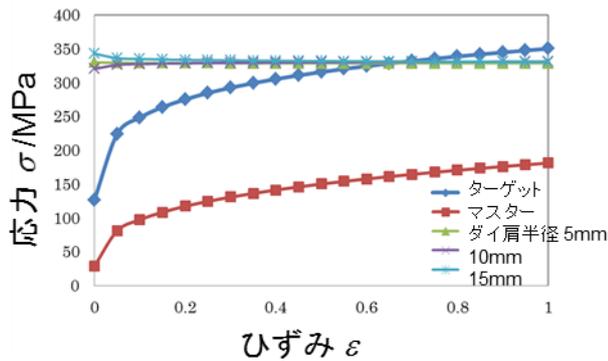


図5 ダイ肩半径が推定される応力-ひずみ線図に及ぼす影響(FEM, パンチ半径 $R_p = 6\text{mm}$, 1段階推定法)

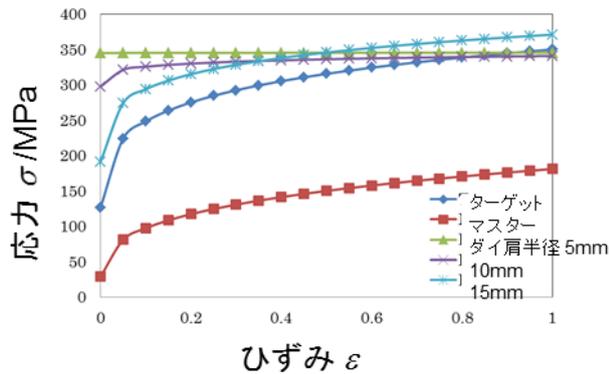


図6 ダイ肩半径が推定される応力-ひずみ線図に及ぼす影響(FEM, パンチ半径 $R_p = 8.5\text{mm}$, 1段階推定法)

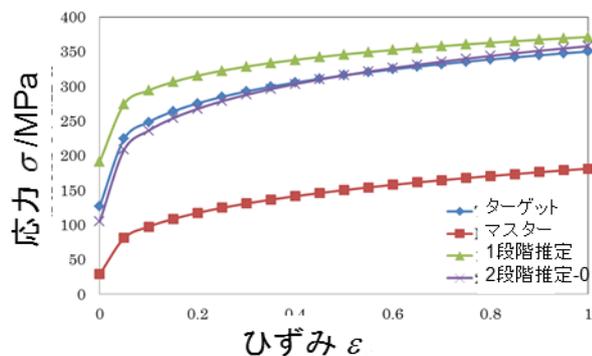


図7 1段階推定法と2段階推定法の比較 (FEM, パンチ半径 $R_p = 8.5\text{mm}$, ダイ肩半径 $R_{cd} = 15\text{mm}$)

図5にパンチ半径 R_p が6mmにおける歳のダイ肩半径が推定精度に及ぼす影響を示す。パンチ半径 R_p が6mmではダイの穴直径 $D_d = 20\text{mm}$ に対して小さくなり過ぎるために正しい応力-ひずみ線図は得られない。図6にパンチ半径 R_p が8.5mmにおける歳のダイ肩半径が推定精度に及ぼす影響を示す。推定精度は大きく改善され、特にパンチ半径 R_p が15mmにおいて精度の改善がみられる。

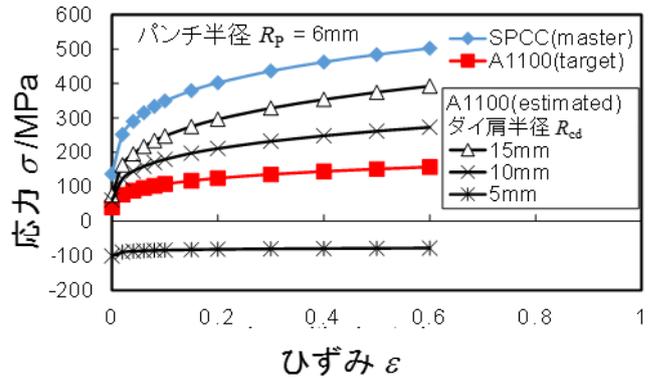


図8 ダイ肩半径が推定される応力-ひずみ線図に及ぼす影響(実験, パンチ半径 $R_p = 6\text{mm}$, 1段階推定法)

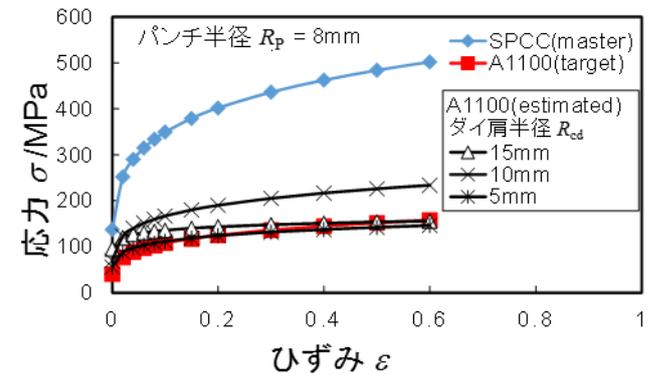


図9 ダイ肩半径が推定される応力-ひずみ線図に及ぼす影響(実験, パンチ半径 $R_p = 8\text{mm}$, 1段階推定法)

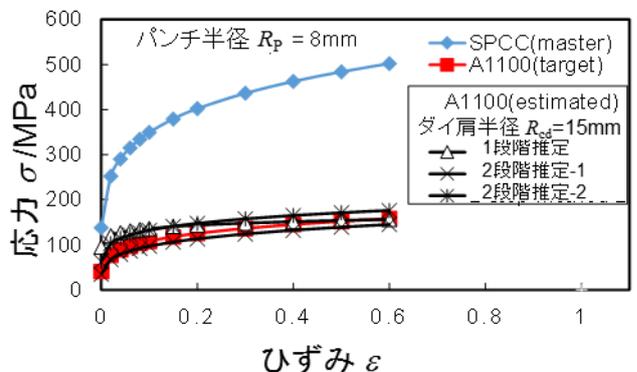


図10 1段階推定法と2段階推定法の比較 (実験, パンチ半径 $R_p = 8\text{mm}$, ダイ肩半径 $R_{cd} = 15\text{mm}$)

図 7 に 1 段階推定法において最も高い精度が得られたパンチ半径 $R_p = 8.5\text{mm}$, ダイ肩半径 $R_p = 15\text{mm}$ における 2 段階推定法の効果を示す。2 段階推定法-0 を用いることによって, 1 段階推定法よりも高精度な推定が可能となる。

4. 2 実験による検証

実験によって, 本研究が提案する推定法の精度を検証した。ここではマスター材として SPCC を, ターゲット材として A1100 を選択した。図 8 にパンチ半径 R_p が 6mm における歳のダイ肩半径が推定精度に及ぼす影響を示す。パンチ半径 R_p が 6mm ではダイの穴直径 $D_d=20\text{mm}$ に対して小さくなり過ぎるために正しい応力-ひずみ線図は得られない。

図 9 にパンチ半径 R_p が 8mm における歳のダイ肩半径が推定精度に及ぼす影響を示す。推定精度は大きく改善され, 特にパンチ半径 R_p が 15mm において精度の改善がみられる。なお, ここには示さないが, FEM の場合は $R_p=8.5\text{mm}$ が最適であったが, 実験の場合は, $R_p=8.0\text{mm}$ が最も精度よく推定できた。

図 10 に 1 段階推定法において最も高い精度が得られたパンチ半径 $R_p = 8\text{mm}$, ダイ肩半径 $R_p = 15\text{mm}$ における 2 段階推定法の効果を示す。1 段階推定法でも高い精度での推定が可能で, 2 段階推定法との差があまり見られない。強いて比較すると 2 段階推定法-1 が, ターゲット材の応力-ひずみ線図に近い線図を得た。

5. 結論

板材の塑性加工中に得られる荷重-ストローク線図から応力-ひずみ線図を推定する方法を提案した。マスター材の応力-ひずみ線図と荷重-ストローク線図, マスター材の応力-ひずみ線図を用いた有限要素法解析による数値偏微分成分からなる影響係数行列, ターゲット材の荷重-ストローク線図から, ターゲット材の応力-ひずみ線図の推定が可能となる。曲げ加工であれば, 前段加工として位置する張出し加工に適用することによって, オンラインでの応力-ひずみ線図の推定が可能で, 曲げ加工工程の適正化などに応用することができる。本報では, 工具形状を適正化するとともに, より高精度な推定が可能な 2 段階推定法も

提案した。提案した方法の有効性を有限要素法で検討するとともに, 実験により検証した。

謝 辞

本研究では公益財団法人 天田財団のご援助により, 新たな機械特性推定方法の有効性を検証するとともに, 更なる研究を進めるに当たっての有用性に関する目処を得ることができました。ここに公益財団法人 天田財団に心より感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Kuboki, T., Kawakami, I., Neishi, Y., Kuroda, K. & Akiyama, M.: J. of Material Science Research International, **7**-1 (2001), 41-46.
- 2) 浅川基男: 塑性と加工, **41**-468 (2000), 69-73.
- 3) Hirota, K. & Mori, Y.: JSME International Journal Series A, **48**-4 (2005), 352-357.
- 4) Yoshida, F., Uemori, T. & Fujiwara, K.: Int. J. Plast., **18** (2002), 633-659.
- 5) 金英俊, 柴田 隆浩・前田篤志・久保木孝: 塑性と加工, **55**-646 (2014), 1003-1007.
- 6) Maeda, A., Jin, Y. & Kuboki, T.: J. Mater. Process. Technol., **225** (2015), 178-184.
- 7) Kuboki, T., Akiyama, M., Matsui, K. & Terada, K.: 7th International Conference on Technology for Plasticity, (2002), Yokohama, 1201-1206.
- 8) Imai, K., Koyama, J., Jin, Y., Murata, M. & Kuboki, T.: Steel Res. Int., **79** (2008), 209-216.
- 9) 小山純一, 金 英俊, 久保木 孝, 村田 眞: 特開 2009-119522 号(2009).
- 10) Swift, H.W.: J. Mech. Phys. Solids, **1**-1 (1952), 1-76.
- 11) de Souza Neto, E.A., Peric, D., Dutko, M. & Owen, D.R.J.: Int. J. Solids Struct., **33**-20-22 (1996), 3277-3296.