特別講演

第 185 回春季講演大会学術功績賞受賞記念 特別講演(2023年3月9日)

金属板材の高度材料試験法の研究

Advanced Material Testing Methods for Sheet Metals

桑原利彦 Toshihiko Kuwabara 東京農工大学 大学院工学研究院 先端機械システム部門 教授



し はじめに

塑性力学研究の目標の一つは、成形不具合現象の完璧なる 予測手法の確立である。成形不具合の予測精度向上のために は、解析に用いる材料モデル^{1,2)}が、実際の材料の弾塑性変形 挙動を可能な限り忠実に再現できる必要がある。

成形シミュレーションを活用して成形不具合の予測精度向 上を目指す上では、材料モデルの妥当性を実験的に検証する 必要がある。実際のプレス成形では、板材は多軸応力を受け、 部位によっては反転負荷を受ける。したがって、材料モデル の妥当性の実験検証は、それらの応力状態を再現できる材料 試験方法に準拠すべきである³⁰。

以上の問題意識のもとで、筆者は、28年におよぶ研究を通 じて、各種の高度材料試験方法を開発してきた。さらにそれ らの試験方法の適用が成形シミュレーションの高精度化に寄 与することを、多くの実験により立証した。以下、筆者の研 究グループが開発した各種の材料試験方法の概要ならびに関 連論文を記す。具体的な測定結果については、それぞれの関 連文献を参照されたい。

(2) 開発した高度材料試験方法

筆者の研究グループが開発した、金属板材の高度材料試験 方法を概説する。以下、素板の圧延方向、板幅方向、板厚方向 をおのおのx, y, z軸とする。

2.1 十字形試験片を用いた二軸引張試験法

二軸引張試験に用いる十字形試験片を図1に示す。本試験 片は、一枚の金属素板から、レーザ加工などにより簡便・安 価に製作可能である⁴。有限要素解析によれば、図1に示す十 字形試験片が以下の条件を満足する場合、応力の同定誤差は 2%未満である^{5,6)}。

- ①t₀≤0.08B(t₀:素板板厚、B:応力測定部の辺長)
- ②N≥7, L≥B, w_s≤0.01B (N:腕部のスリット本数、L:スリット長さ、w_s:スリット幅)

③0.0034≤R/B≤0.1 (R: 腕の付け根の丸味半径)
 ④試験片中心から最大荷重軸方向に (0.35±0.5) Bの位置に



ひずみの最適測定位置(x軸が最大主応力方向の場合)



図1 十字形試験片^{7,8)}。1:応力測定部、2:腕、3:つかみ部、4:スリット

^{* 1987}年に東京工業大学大学院総合理工学研究科にて工学博士号を取得後、同精密工学研究所助手、平成1年東京農工大学工学部講師、1992 年助教授、2004年共生科学技術研究院教授、2008年工学研究院先端機械システム部門教授に就任し、現在に至る。

おいて、x軸およびy軸方向の垂直ひずみ成分を測定する。

本試験片を用いた二軸引張試験方法は2014年に国際規格 ISO16842⁷⁾として、2020年に日本産業規格JIS Z 2257⁸⁾とし て正式に承認された。

本試験片に付与可能な最大相当塑性ひずみ $\epsilon_{\text{max}}^{\text{p}}$ は材料の機械的性質 (加工硬化指数や異方性) やスリット幅に依存する ($\epsilon_{\text{max}}^{\text{p}}$ を大きくするためには w_s は可能な限り小さくすること が好ましい)⁷⁰。通常の延性金属材料であれば $\epsilon_{\text{max}}^{\text{p}} \approx 0.01 \sim 0.05$ 、 SUS304などの加工硬化指数が0.5を超えるような材料で $\epsilon_{\text{max}}^{\text{p}} \approx 0.1$ である⁷⁰。応力測定部の板厚を減少させて $\epsilon_{\text{max}}^{\text{p}}$ の増 大を図った十字形試験片が提案されている⁹⁰。

図1以外にも様々な形状の十字形試験片が考案されている が³⁾、応力の同定誤差や最適なひずみの測定方法を、FEAを 用いて定量的に評価している研究は極めて少ない。二軸引張 試験機については文献を参照されたい^{10,11)}。

本試験法は、ひずみ経路急変法¹²⁾による後続降伏曲面の尖 り点の検出¹³⁾ や、非法線性を有する新しい材料構成式¹⁴⁾の 実験検証に寄与した。さらに申請者は、材料モデルの高精度 化が成形シミュレーションの解析精度向上に寄与すること を、引張曲げスプリングバック¹⁵⁾、穴広げ¹⁶¹⁸⁾、面ひずみ¹⁹⁾、 液圧バルジ成形²⁰⁾に対して立証した。

図1の十字形試験片を改良して、図2に示す平面ひずみ引 張試験片を考案した²¹⁾。最大主応力方向の腕部のスリットを なくし、その腕部方向に試験力を負荷し、もう一方の腕部は 二軸引張試験機のチャックに保持して変位を0に保持するこ とにより、板材の平面ひずみ引張試験を実現できる。

2.2 2軸バルジ試験方法

図1の十字形試験片で実験可能な塑性ひずみ範囲は、材料 のn値や異方性の影響を受けるが、多くの場合5%未満であ る^{7,8)}。筆者らは、十字形試験片よりも大きな塑性ひずみ範囲 にたいして材料の弾塑性変形特性を測定する方法として、鋼



Zero strain direction

管^{22,23)} やアルミニウム合金押出し円管^{24,25)} などの円管試験片 に任意の応力経路を負荷できる軸力ー内圧型サーボ制御二 軸バルジ試験方法を開発した。二軸バルジ試験装置の概念図 を図3 (a) に示す。試験片に軸力*T*と内圧*P*を負荷すること により、管軸方向および円周方向真応力 (σ_{ϕ} , σ_{θ})を試験片 中央部に発生させると同時に、円管試験片中央部における、 試験片外表面の円周方向ひずみ ε_{θ}^{s} 、管軸方向ひずみ ε_{ϕ}^{s} 、管 軸方向曲率半径 \mathbf{R}_{ϕ} を計測する。本試験方法の特長は、*T*, *P*, ε_{θ}^{s} , ε_{ϕ}^{s} , R_{ϕ} の測定値を入力値として、(σ_{ϕ} , σ_{θ})をフィー ドバック制御できる点にある。すなわち、精密に制御された 応力経路下での、材料の弾塑性変形挙動や成形限界ひずみ、 成形限界応力が測定できる。応力経路は線形応力経路のみな らず、非直線的な応力経路も負荷できる。

金属薄板を均等曲げ・溶接して円筒試験片を作製し、二軸 バルジ試験方法を適用すれば、任意の応力経路における、降 伏初期から破断に至るまでの金属板材の二軸応力–ひずみ曲 線が測定でき、しかも成形限界線や成形限界応力線が実測で きる。この手法は、軟鋼板^{26,27)}、純チタン板²⁸⁾、590aMPa級 高強度鋼板²⁹⁾、熱延鋼板³⁰⁾、6000系³¹⁾および5000系アルミ ニウム合金板^{18,32,33)}の材料モデリングに活用された。各線形 応力経路において破断した円管試験片(材料:590MPa級鋼 板)の写真を図3(b)に示す。破断直前の塑性ひずみおよび 真応力の測定値から、供試材の成形限界線および成形限界応 力線を直接測定できるのも本試験方法の特長である。



図3 サーボ制御二軸バルジ試験方法。(a) 試験方法の模式図。 (b) 各線形応力経路において破断した円管試験片(材料: 590MPa 級鋼板)²⁹ (Online version in color.)

図2 平面ひずみ引張試験片²¹⁾

2.3 櫛歯金型を用いた金属薄板の面内反転負荷試験法

板材成形における形状凍結不良の多くは、曲げモーメント の開放に伴うスプリングバックに起因する。スプリングバッ クの予測精度向上のためには、反転負荷を受ける板材の弾塑 性挙動³⁴⁾ や引張りと圧縮の応力非対称性を精密に再現でき る材料モデル^{35,36)}の構築と材料パラメータ同定のための高精 度な材料試験方法の確立が不可欠である。

そこで、板材試験片の面内に連続反転負荷を加えるため に、図4 (a) に試験治具を開発した³⁷⁾。この櫛歯金型は、金属 薄板の面内圧縮試験用の金型^{38,39)} を改良したもので、薄板試 験片を座屈させずに、面内反転ひずみを連続して負荷するこ とができる。この櫛歯金型は、板厚0.25mmのリン青銅板³⁷⁾ や板厚0.3mmのステンレス鋼板⁴⁰⁾の応力非対称性の研究に 適用された。

図4 (b) に試験片形状を示す。FEAによれば、圧縮応力の 測定誤差を最小化しかつ面内座屈抑制に優れる試験片形状と して、 $L/W \ge 2.2$, B/W = 1.4, R/W = 1.6, Q = 0が推奨され ている⁴¹⁾。

2.4 積層試験片の単軸圧縮試験法

ある種の金属板材は、同じ大きさの塑性ひずみにおける引 張真応力と圧縮真応力の大きさが異なる現象、すなわち引張 と圧縮の応力非対称性 (Tension-Compression Assymmetry: TCA)が発現する。高強度鋼のTCAは静水圧に起因するとの 報告があり⁴²⁾、冷延軟鋼板についてもTCAが報告されてい る^{35,43)}。しかし軟鋼板のTCAが静水圧に起因する現象である かどうかは解明されていない。そこで、板厚方向単軸圧縮試 験から測定された真応力-板厚塑性ひずみ曲線 ($|\sigma_z| - |\epsilon_z^p|$ 曲 線)と等二軸引張試験から測定された面内引張真応力-板厚 塑性ひずみ曲線 ($\sigma_b - |\epsilon_z^p|$ 曲線)を比較することにより、降伏 応力の静水圧依存性を検証できると考えた。

金属板材の板厚方向圧縮試験装置の外観を図5(a)⁴⁴⁾に示 す。本試験装置は通常の引張試験機に組み込んで使用した。 試験装置の圧縮平板の詳細を図5(b)に示す。圧縮平板は厚 さ3.0 mmの超硬基板上に厚さ1.0 mmの多結晶ダイヤモン ド焼結体 (PCD)をコーティングして製作した。PCDは摩擦 低減効果を有し、試験片と圧縮平板の間の摩擦力により生じ る圧縮試験片の不均一変形を抑止する効果がある。この圧縮 板はKoizumiとKurodaにより考案された⁴⁵⁾。圧縮平板はダ イセットに組み付け、平板間の平行度を保証した。試験片は 圧縮平板の中央に設置し、圧縮荷重はロードセルにて、試験 片の変位は上下のダイセットの間隔の変化量を接触式変位計 により測定した。

初期板厚が1 mm程度の薄い板材を板厚方向に圧縮して も、圧縮変位量が微小であるため、圧縮塑性ひずみを高精度 に測定することは困難である。そこで、供試材を板厚方向に 積層し、初期板厚を大きくすることで圧縮変位量を増加さ せ、圧縮塑性ひずみの測定精度を向上させた。層間すべりを 防止するため、供試材は接着剤で接着した。接着剤が十分硬 化した後、放電加工機によって各試験に応じた形状に切り出 し、試験片を作製した。

積層圧縮試験機では、試験片の圧縮方向変位を上下のダイ セットの間隔の変化から測定するが、この方法では圧縮工具 および試験機の弾性変形量が変位の測定値に含まれてしま う。そこで弾性変形の影響を排除するため、断面積が同じで 高さが異なる2つの試験片を圧縮試験に供し、公称応力が等



図4 (a) 金属薄板の面内反転負荷試験用櫛歯金型³⁷⁾ と (b) 最適試験片形状 (斜線部はつかみ部)⁴¹⁾ (Online version in color.)



しい時の試験片の高さ差から圧縮塑性ひずみを決定する。これにより、試験装置の弾性変形が σ_z - $|\epsilon_z^o|$ 曲線に及ぼす影響を排除できる。

なお、板材を積層して直方体形状の試験片に加工し、それ に1方向もしくは二方向の圧縮力を負荷し、かつ降伏応力に 静水圧依存性がないと仮定することにより、π平面上の降伏 曲面の測定にはじめて成功したのはTozawa⁴⁶⁾である。筆者 らは、積層圧縮試験片の板面と平行方向の圧縮試験を行い、 応力ーひずみ曲線を測定し、それが一枚板の面内圧縮試験 (図4)により測定された応力ー塑性ひずみ曲線と一致するこ とを確認している⁴⁴。

2.5 引張圧縮組合せ応力試験法

絞り容器のフランジ部の応力状態を再現する試験方法と して、引張圧縮組合せ応力試験を考案した。試験片を図6(a) に示す。長手方向に引張荷重を、幅方向に圧縮荷重を負荷す ることにより、引張圧縮組合せ応力場を60mm×60mmの応 力測定部に発生させることができる。各軸方向の垂直ひずみ 成分の測定には、二軸ひずみゲージを用いる。幅方向に圧縮 荷重を負荷するための治具を図6(b)に示す。この治具は二 軸引張試験機に組み込んで使用する。



(a)



(b)

図6 金属板材の引張圧縮組合せ応力試験⁴⁷⁾。 (a) 試験片形状(単位:mm)。(b) 試験用治具

3 おわりに

このたびの受賞の対象となった各種材料試験法の開発は、 決して筆者個人のアイデアに由来するものではなく、実験塑 性力学の分野で活躍されてきた多くの研究者の方々の論文か らアイデアを得ている。筆者はこれらの研究成果に改良を加 えたに過ぎない。その意味で、斯界のすべての論文執筆者の 方々にまずは深く御礼を申し上げる次第である。さらに、試 験機の設計・製作およびそれらを使った実験および解析結果 は、筆者の研究室に代々配属された学生諸君の粉骨砕身、献 身的に研究に取り組まれた努力の賜物である。彼らの存在な くしては本稿で述べた研究成果をあげることはできなかっ た。深く感謝致します。また、共同研究を通じて、実に多くの 大学および企業の方々と議論させて頂き、その途上で研究上 のアイデアを頂戴することも多くあった。あわせて深甚なる 謝意を表します。

高度な材料試験方法が世界に広く普及すれば、実用金属材 料の変形挙動に関する学術知見がより深まり、材料モデリン グ技術のさらなる高度化が進む。これにより成形シミュレー ションの解析精度がより向上し、試行錯誤のない生産の実現 にさらに一歩近づくと期待できる。塑性加工技術がこれまで 以上の高みに到達し、「持続発展可能な社会」の到来が加速さ れることを切に願うものである。

参考文献

- 1) D. Banabic, F. Barlat, O. Cazacu and T. Kuwabara : Int. J. Mater. Form., 13 (2020), 749.
- 2) F.Barlat, 桑原利彦: 塑性と加工, 57 (2016) 662, 230.
- 3) T.Kuwabara : Int. J. Plasticity, 23 (2007) 3, 385.
- 4) T.Kuwabara, S.Ikeda and T.Kuroda : J. Material Process. Technol., 80/81 (1998), 517.
- 5) Y.Hanabusa, H.Takizawa and T.Kuwabara : Steel Research Int., 81 (2010) 9, 1376.
- 6) Y. Hanabusa, H. Takizawa and T. Kuwabara : J. Mater. Process. Technol., 213 (2013) 6, 961.
- ISO16842 : 2021 Metallic materials Sheet and strip Biaxial tensile testing method using a cruciform test piece.
- 8) JIS Z 2257:2021 十字形試験片を用いる金属板材の二軸 引張試験方法.
- 9) N. Deng, T. Kuwabara and Y. Korkolis : Exp. Mech., 55 (2015), 1005.
- A. Hannon and P. Tiernan : J. Mater. Process. Technol., 198 (2008), 1.
- 11) 松本繁, 田代和義, 真崎明夫, 池田聡, 吉田健吾, 高橋進,

桑原利彦: 塑性と加工, 53 (2012) 623, 1376.

- 12) M. Kuroda and V. Tvergaard : Acta Mater., 47 (1999), 3879.
- 13) T. Kuwabara, M. Kuroda, V. Tvergaard and K. Nomura : Acta Mater., 48 (2000) 9, 2071.
- M. Kuroda and V. Tvergaard : J. Mech. Phys Solids, 49 (2001), 1239.
- T.Kuwabara, S.Ikeda and Y.Asano: Proc. 8th NUMIFORM, (2004), 887.
- 16) 桑原利彦, 橋本一真, 飯塚栄治, J.-W. Yoon: 塑性と加工, 50 (2009) 585, 925.
- 17) 橋本一真, 桑原利彦, 飯塚栄治, J.-W. Yoon: 鉄と鋼, 96 (2010) 9, 557.
- 18) 三宅能安, 桑原利彦: 軽金属, 70 (2020) 6, 217.
- (2010) 588, 43.
- 20) 彌永大作, 桑原利彦, 上間直幸, 浅野峰生: 軽金属, 62(2012) 1, 7.
- 21) 桑原利彦, 池田聡: 鉄と鋼, 88 (2002) 6, 334.
- 22) T.Kuwabara, M.Ishiki, M.Kuroda and S.Takahashi : Journal de Physique IV, 105 (2003), 347.
- 23) 吉田健吾, 桑原利彦: 鉄と鋼, 92 (2006) 1, 36.
- 24) T.Kuwabara, K.Yoshida, K.Narihara and S.Takahashi : Int. J. Plasticity, 21 (2005), 101.
- 25) K. Yoshida, T. Kuwabara, K. Narihara and S. Takahashi : Int. J. Forming Process., 8 (2005) SI, 283.
- T. Kuwabara and F. Sugawara : Int. J. Plasticity, 45 (2013), 103.
- 27) S.Coppieters, T.Hakoyama, P.Eyckens, H.Nakano,A.Van Bael, D.Debruyne and T.Kuwabara : Int. J.Mater. Forming, 12 (2019), 741.
- 28) M. Ishiki, T.Kuwabara and Y.Hayashida : Int. J. Mater. Forming, 4 (2011) 2, 193.
- 29) T.Hakoyama and T.Kuwabara : From Creep Damage Mechanics to Homogenization Methods, ed. by H.Altenbach, T.Matsuda and D.Okumura, (2015) Springer, 69.
- 30) S. Nomura and T. Kuwabara : ISIJ Int., 62 (2022), 191.

- T.Kuwabara, T.Mori, M.Asano, T.Hakoyama and F.Barlat: Int. J. Plasticity, 93 (2017), 164.
- 32) 山中晃徳,橋本圭右,川口順平,桑原利彦,櫻井健夫:軽 金属,65 (2015) 11,561.
- 33) 川口順平, 桑原利彦, 櫻井健夫: 軽金属, 65 (2015) 11, 554.
- 34) F.Yoshida, T.Uemori, S.Abe and R.Hino : Proc. NUMISHEET 2008, (2008), 19.
- 35) R.K.Verma, T.Kuwabara, K.Chung and A.Haldar : Int. J. Plasticity, 27 (2011), 82.
- 36) R.K.Verma, K.Chung and T.Kuwabara : ISIJ Int., 51 (2011) 3, 482.
- 37) T. Kuwabara, Y. Kumano, J. Ziegelheim and I. Kurosaki : Int. J. Plasticity, 25 (2009), 1759.
- L. Dietrich and K. Turski : Rozprawy Inzynierskie, 26 (1978), 91 (in Polish).
- 39) 桑原利彦, 森田佳之, 宮下洋介, 高橋進: 塑性と加工, 36 (1995) 414, 768.
- 40) 桑原利彦, 齋藤怜奈, 平野孝明, 大橋信昭: 鉄と鋼, 95 (2009) 11, 732.
- 41) 乃万暢賢, 桑原利彦: 塑性と加工, 53 (2012) 617, 574.
- W.A. Spitzig, R.J. Sober and O. Richmond : Acta Metall., 23 (1975), 885.
- 43) 桑原利彦, 森田佳之, 宮下洋介, 高橋進: 塑性と加工, 36 (1995) 414, 68.
- 44) T.Kuwabara, R.Tachibana, Y.Takada, T.Koizumi,
 S. Coppieters and F.Barlat : Int. J. Mater. Forming, 15 (2022), 13.
- 45) T. Koizumi and M. Kuroda : IOP Conf. Series, Journal of Physics, 1063 (2018).
- 46) Y.Tozawa : Mechanics of Sheet Metal Forming, ed. by D.P.Koistinen and N-.M.Wang, Plenum Press, New York, (1978), 81.
- 47) 桑原利彦, 堀内義雅, 上間直幸: ヤナ ジーゲルハイモヴァ: 塑性と加工, 48 (2007) 558, 630.

(2023年8月9日受付)