

V 曲げ加工金型の溝底亀裂および肩部損耗の メカニズム検討と長寿命化に関する研究

電気通信大学 機械知能システム学専攻
教授 久保木 孝

(2019 年度 重点研究開発助成 課題研究 AF-2019003-A3)

キーワード：金型形状，トポロジー最適化，疲労試験

1. 研究の目的と背景

産業界にて板曲げ加工に広く適用される図 1 に示す V 曲げ加工において、ダイの溝底で発生する割れが大きな問題となることがある。ダイを継続使用すると、割れが進展して、ある時突然にダイが分裂し、分裂片が飛び出し、作業者に怪我を負わせることがある。塑性変形中に金型に蓄積されるエネルギーは非常に大きく、場合によっては大きな事故につながりかねない。曲げ加工として、エアベンディング、ボトミング、コイニングが行われている。エアベンディング<ボトミング<コイニングの順に、高精度加工が可能であるが、同時に、加工荷重も大きくなる。エアベンディングが実施されることを前提として、ダイ設計される場合が多い。製造現場においては、高精度加工が要求されると、緊急措置として、ボトミングやコイニングが採用されることがあり、通常の繰り返し作業の中で、割れの進展が進んでいると、一時的な荷重が大きくなるボトミングやコイニングの適用によって、金型が破壊することがある。したがって、割れが生じないようなダイを設計・製作することも意義がある。従来は、摩耗対策として、熱処理によってダイ全体の硬さを上昇させていた。ところが、全体が硬いと、ダイ破壊時にダイの破片が飛散しやすくなるため、現在では、表層のみを窒化処理して硬くしている。このような工夫をしてもダイの破壊問題は、現存しており、現状以上に割れにくいダイの開発が望まれている。

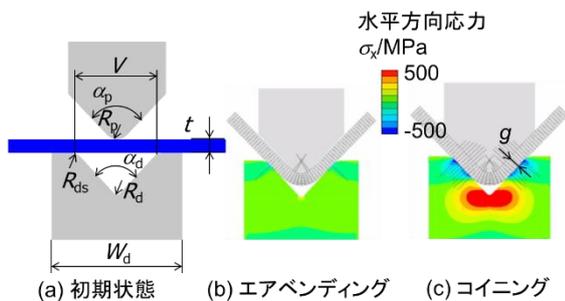


図 1 V 曲げにおける応力状態

そこで、計算力学分野で用いられているトポロジー最適化技術¹⁾などを用いて、ダイ溝底部の割れの原因と考えられる引張応力を最小化するダイの最適形状を設計・製作し、有用性を静的破壊試験、および、疲労試験により検証した。なお、本報告では、損耗に関する成果については省略する。

2. 研究方法

研究の対象とした加工条件を表 1 に示す。パラメータは図 1 に対応している。ダイ形状は、株式会社アマダにて用いられている標準的な形状をベースに設計した。

表 1 実験条件

パンチ	解析での取り扱い	剛体
	ヤング率 E/GPa	206
	先端半径 R_p/mm	0.6
	先端角度 $\alpha_p/^\circ$	86
ダイ	解析での取り扱い	剛体(板曲げ時) 弾性体(トポロジー最適化)
	ヤング率 E/GPa	206
	ダイ幅 W_d/mm	29.5
	V溝幅 V/mm	25
	溝底半径 R_d/mm	0.5
	V溝角度 $\alpha_d/^\circ$	86
	肩半径 R_{ds}/mm	3
	奥行き (mm), 実験のみ	20
	材質, 実験	ねずみ鉄, FC250
	板材	解析での取り扱い
材質		SPCC
長さ L/mm		40
板厚 t/mm		2.6
奥行き (mm), 実験のみ		20

ダイ形状の最適化を行うに際し、成形品の曲げ半径は極小にまで低下できることを前提とする。直感的には V 溝斜面を結ぶ大きな R を設けると、応力を抑制できると考えられるが、曲げられた板形状の曲げ半径が必然的に大きくなり、成形形状の自由度が制限される。そのため V 溝底には大きなコーナ変形を設けることはしない。

ダイ形状の最適化は、① トポロジー最適化に基づく 2 つ穴ダイと② 直感に基づくキーホールダイについて実施し、静的破壊試験と、繰り返し負荷を作用させる疲労試験を実施した。

3. 解析と実験手順

3・1 トポロジー最適化による 2 つ穴ダイの提案

変位を最小にするためのトポロジー最適化ではこれまで研究され²⁾、一般に使用されている。ここでは、応力値を最小とするために、汎用コードのソルバーを反復使用し

形状を最適化するコードを新たに開発した。ここで、Swansea 大学にて開発された汎用コード ELFEN のソルバーを用いた³⁾。

平面ひずみにてトポロジー最適化を実行した簡単な解析例を図2に示す。長方形の2点に荷重を作用させている。長方形の中央上面に発生する水平方向の応力 σ_c を最小化するための形状を求めた。上面[A]部は形状最適化の対象外とし、[A]部を除く[B]に対して形状を最適化した。仮想密度とヤング率はほぼ比例関係にあると仮定し、中央上面の応力 σ_c が小さくなるように微小長方形(Voxel)の密度を繰り返し調整する。応力 σ_c を Voxel 密度で偏微分し影響度を求め、影響度に応じて密度を修正した。これは、ニューラルネットワークで用いられている誤差逆伝播法と同様の手法である。1 回当たりの最大の密度修正量を 10% とした。50 回修正後では、中央部下部の三角形部分を空洞化する形状が得られた。

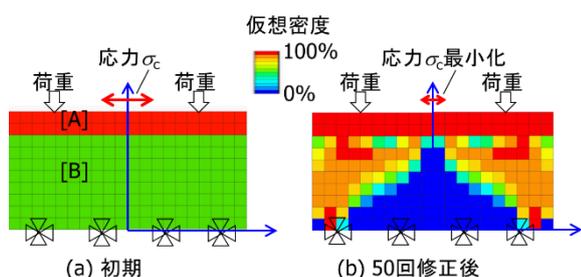


図2 応力値を最小化するトポロジー最適化

トポロジー最適化を含めた形状最適化の流れを図3に示す。トポロジー最適化により V 溝底に生じる応力を最小化するための形状を探索する。トポロジー最適化では人間の直感では得られない形状の取得が期待される。ここで、V 溝上面や下部など図中①の赤色の部分は、適正化の対象外とする。ここで図に示す 2 つ穴形状 (右半分では 1 つ穴) が得られたが、形状は Voxel の集合体であり、滑らかなとならない。

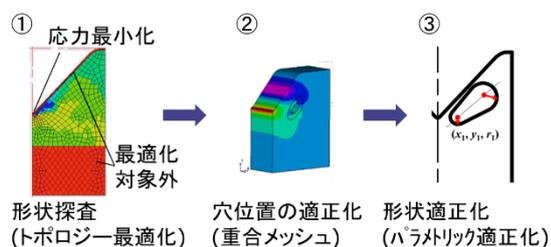


図3 形状最適化の流れ

トポロジー最適化によって得られた穴形状を滑らかな楕円形状に近似し、重合メッシュ⁴⁾を用いて穴の適正位置を求めた。概念図を図4に示す。グローバルメッシュに、穴を有するローカルメッシュを重合して解析を行う。ローカルメッシュの位置を変更しても、不連続な部分が独立しているため、メッシュを再作成する必要がなく、位置をパ

ラメータとするパラメトリック適正化に適している。

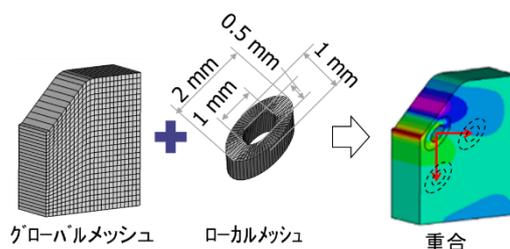


図4 重合メッシュを用いた穴位置適正化

トポロジー最適化により穴形状を、重合メッシュを用いて適正な形状を求めた。その結果に基づき、通常の有限要素法解析を用いて、パラメトリック適正化を実行して、最適形状を決定した。

3.2 直感に基づき考案したキーホールダイの提案

上述のトポロジー最適化では、応力を評価するのは V 溝底であり、上面を最適化の対象外としている。この条件に当てはまらない形状を、著者の直感に基づき考案した。V 溝中央部にスリットを設け、その下に円形状を設けるキーホール形状である。キーホール形状を、有限要素法を用いたパラメトリック適正化により形状を求めた。概念図を図5に示す。

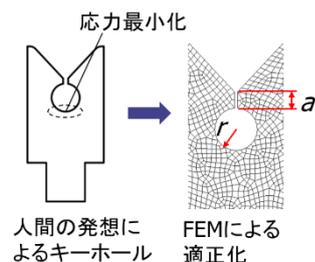


図5 キーホールダイ形状とパラメータ

キーホールダイでは、従来ダイで最大応力が生じる部分にスリットを設け、スリットの先に応力集中が生じないように円形の穴を設ける。このような形状は、前述のように V 溝上部を適正範囲から除外している場合には、トポロジー最適化では得られない。円形穴の底に大きな応力が生じるため、この応力が最小となるような穴半径 r と穴深さ a を求めた。

3.3 検証実験方法

トポロジー最適化によって求めた 2 つ穴ダイと、直感を基に提案するキーホールダイの効果を検証するために、静的破壊試験と、繰り返し負荷による疲労試験を実施した。

実験に用いたパンチを図6に示す。負荷を加える度に新しい板を挿入するのは、非効率であるため、工夫することとした。まず、図6(a)のように曲げた板をパンチ表面に挟持し、ダイに押しつけた。この場合、繰り返し負荷を加え

た場合には、ダイスが疲労破壊する前に板が破断することがあった。そこで、図6(b)のように板を挟むことなくパンチを直接、ダイに押しつけることとした。この際、有限要素法を用いて、図1(c)の板をコイニング曲げする状況を再現するパンチ形状を求めた。具体的には、板のコイニング曲げの際にダイスに生じるV溝近傍の応力分布と同様の応力分布を生じさせるパンチ形状とした。ここでのコイニングの条件は、「パンチとダイ斜面の隙間 g が板厚 t とが等しい」とした。



図6 パンチ

4. 解析結果

4.1 適正な2つ穴ダイ形状

トポロジー最適化の結果を図7に示す。「パンチとダイ斜面の隙間 g が板厚 t とが等しい」コイニング状況において最適化した。板を挟んだ状態で、板を弾塑性体、ダイを剛体として有限要素法によるコイニングの解析を実施し、面圧分布を求めた。続いて、弾塑性ダイに同様の面圧負荷を発生させた状態でトポロジー最適化を実施した。

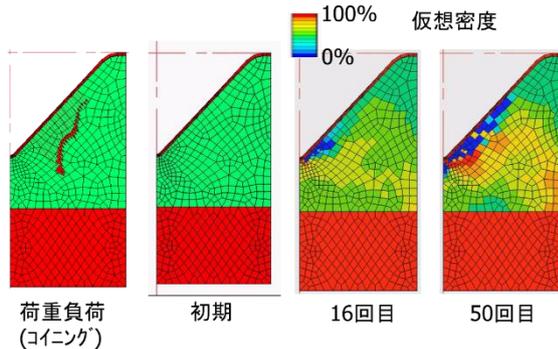


図7 トポロジー最適化による形状探索

最適化の進行とともにV溝の斜面に沿って、細長い空洞が広がっていく。誤差逆伝播法による最適化では、効率的に応力を低下させるVoxelの仮想密度が先に減少する。過度に最適化を繰り返すと、50回目のように大きく空洞が広がってしまった。そこで、繰り返し数16回の結果を参考にV溝底に楕円空孔を設けることとして、楕円空孔位置の適正化を図4に示した重合メッシュを用いて実施した。

重合メッシュを用いた解析結果の例を図8に示す。溝底の水平応力分布は位置(d)のとき、すなわち、V溝中心近傍に楕円穴がある場合である。重合メッシュによる更なる詳

細な結果は論文として報告している^{5),6)}。

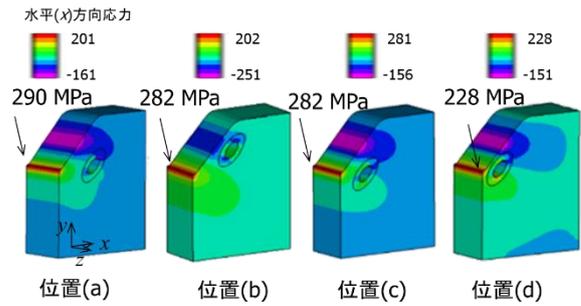


図8 重合メッシュによる位置適正化

上述のトポロジー最適化による形状探索と重合メッシュによる位置最適化の結果に基づき、さらにパラメータ最適化を行った。結果を図9に示す。楕円形状ではなく、更なる形状自由度を与えるために、2つの円弧をつなぐ形状とした。パラメータは、図中の2つの円弧中心座標と円弧半径である。涙形状(c)において最大主応力は最小化し、従来ダイに比較して63%まで低減できる結果となった。2つ穴ダイについては、国際会議にて詳細に報告している⁷⁾。

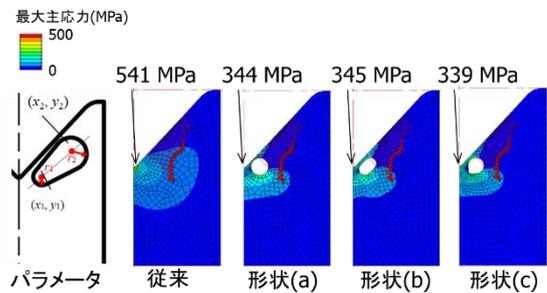


図9 パラメトリック適正化結果

4.2 適正なキーホール形状

キーホールダイについて、適正な穴半径 r と穴深さ a をパラメトリック最適化により求めた。結果を図10に示す。

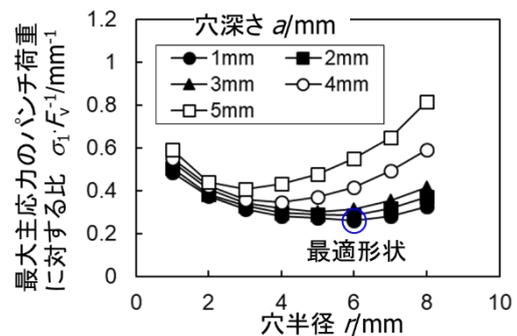


図10 キーホールダイ形状適正化

縦軸は、図5に示したキーホール穴底に生じる最大主応力 σ_1 の負荷パンチ荷重 Fv に対する比 σ_1/Fv を示している。穴深さ a によらず、 σ_1/Fv を最小とする穴半径 r が存在して

いる。また、穴深さ a の減少にともない σ_1/F_V は減少する。穴深さ a が 3mm 以下では、 a の影響は小さい。以上の結果より、最適形状を穴半径 $r = 6\text{mm}$ 、穴深さ $a = 1\text{mm}$ とした。負荷時の応力分布を、従来ダイと比較して、図 1 1 に示す。キーホール穴底に生じる主応力は、通常ダイスの溝底に生じる応力の 60% となった。

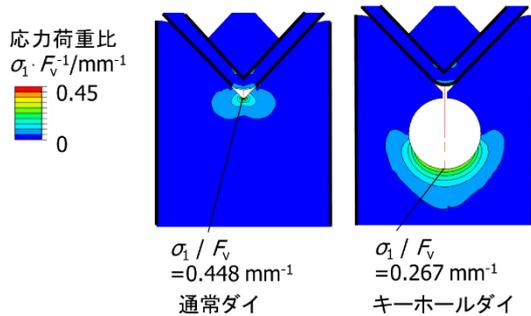


図 1 1 キーホールダイと従来ダイの応力分布

5. 実験結果

5.1 ダイ製作

以上の結果に基づき、図 1 2 のダイを製作し静的破壊試験と、疲労試験を実施した。材質として、通常用いられている材質と比べて脆性を示すねずみ鋳鉄を用いた。これにより、通常のダイよりも、低いパンチ荷重で破壊し、少ない繰返し数において疲労破壊が生じると考えられる。

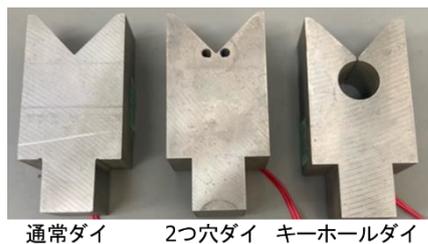


図 1 2 製作したダイ

ひずみゲージを最も応力が高くなると考えられる場所に貼り付け、パンチ荷重とひずみの関係を調査し、2つ穴ダイやキーホールダイの特性を調べた。ひずみゲージ、および、ダイへの負荷方法を図 1 3 に示す。

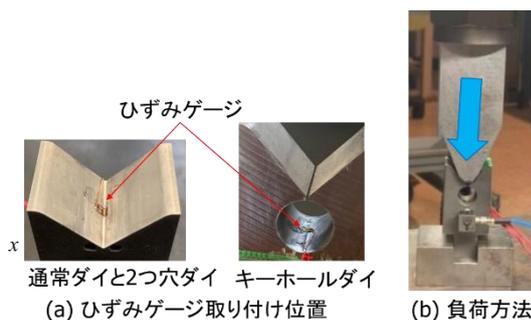


図 1 3 ひずみゲージの貼付と負荷の状況

5.2 負荷実験

静的破壊試験の結果を図 1 4 に示す。ダイが破壊するまでパンチを押し付けた。溝底や穴底のひずみゲージの値は、狙い通り、2つ穴ダイやキーホールダイでは、従来ダイに比べて小さい値となった。しかし、耐荷重は2つ穴ダイ > 従来ダイ > キーホールダイとなった。キーホールダイでは、図 1 1 に示した通り、高い応力が穴底に広く分布することが一因であると推察している。広く分布することによって、どこか一箇所に亀裂が生じると大きな破壊につながるためと考えている。

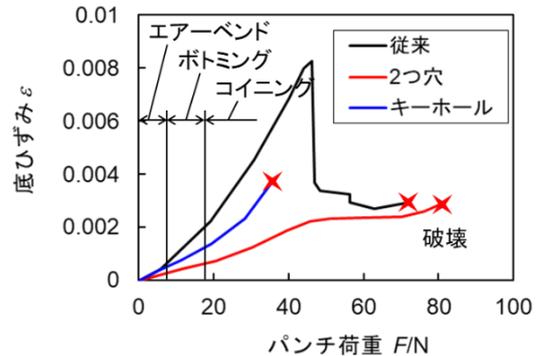


図 1 4 静的破壊試験結果(溝底、穴底のひずみ変化)

疲労試験結果を図 1 5 に示す。静的破壊試験結果と同様に繰返し疲労実験においても、耐荷重は、2つ穴ダイ > 従来ダイ > キーホールダイとなった。トポロジー最適化によって得られた2つ穴ダイは、従来ダイに比べて、優れた特性を有した。一方、直感に基づき設計したキーホールダイは、従来ダイよりも劣る結果となった。

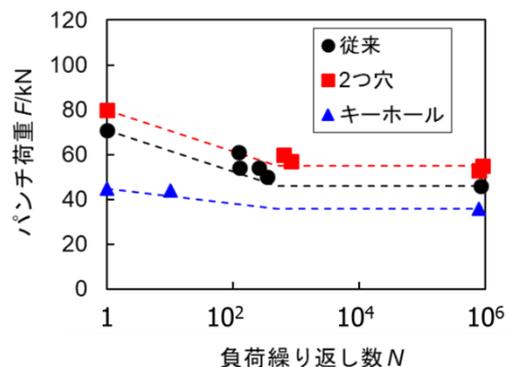


図 1 5 疲労試験結果

6. キーホールダイの補強

キーホールダイでは、穴が大きく、変形が大きくなる。この特性は、反対に考えると、外部からの拘束を有効に活用できる可能性もある。そこで、ワイヤを外部から巻き付け、予ひずみを加えることを想定して、解析を実施した。解析モデルと結果を図 1 6 に示す。ダイ側面に分布荷重を与えることによって、穴底に発生する応力を低減できる。図中のグラフの横軸は、分布荷重を積分した水平方向荷重

F_h であり、縦軸はコイニング状態における穴底の主応力 σ_1 とダイの上面の水平方向変位 δ_x である。水平方向荷重 F_h の増加にともない穴底部に生じる主応力 σ_1 は顕著に減少する。また、キーホールが存在によりダイ上面は左右に開くが、側面から荷重を付与することによって、この変位 δ_x も抑制可能である。この解析ではスリット部[A]にスペーサなどの挿入を仮定していないため、大きな水平方向荷重 F_h が作用すると、水平方向変位 δ_x が負となる、つまり、キーホール部分が閉じるように変形する。

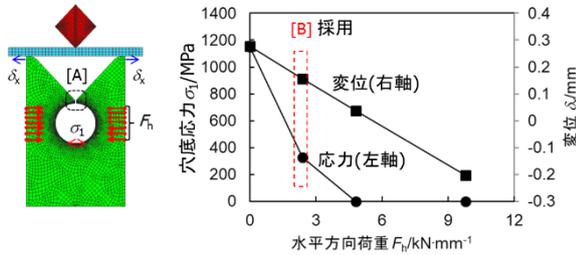


図 16 側面からの水平方向荷重付与の効果

張力を付与したピアノ線をダイスに巻き付けることにより水平方向荷重 F_h を作用させることとした。直径 0.2mm のピアノ線を用い、引張強さの 1/5 の張力 65.4 N にて巻き数を 730 とし、図 16 の赤破線[B]の状況、つまり、水平方向荷重 $F_h = 2.43 \text{ kN/mm}$ を実現することとした。さらに巻き数を増やすと効果は増大すると考えられるが、手作業により巻きつけたため、ピアノ線の巻き数を増やすことが困難であった。

ピアノ線によって補強されたキーホールダイの疲労試験結果をダイ外観とともに図 17 に示す。ここでは、[A]にて示すスリット部にはスペーサを挿入し、ピアノ線による水平方向荷重負荷によって、ダイが内側に変形することを防止している。[B]にて示す静的破壊試験では、従来ダイの 1.6 倍の耐荷重を示した。また、 10^6 回数までの広範囲において耐荷重は、従来ダイに比べて、著しく向上した。

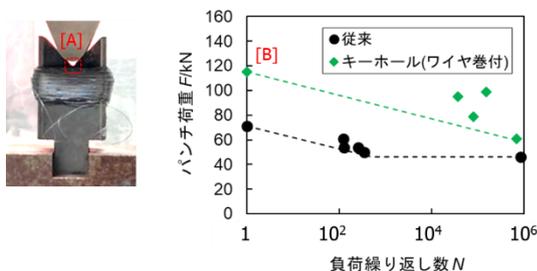


図 17 疲労試験結果 (ワイヤ巻付け効果)

図 18 に静的破壊試験における破断状況を示す。通常ダイでは、V 溝底より亀裂が生じた。2 つ穴ダイでは、溝底、或いは、涙形状の穴から亀裂が生じていたが、先行して亀裂が生じた場所は特定できなかった。キーホールダイでは、穴底部側から亀裂が生じていた。ワイヤを巻き付けたキーホールダイでも同様に亀裂が生じていたが、ダイの飛散は

見られなかった。

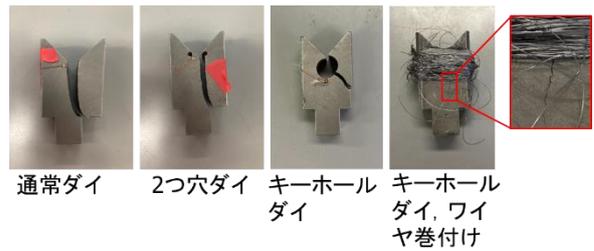


図 18 静的破壊試験における破断状況

7. 結言

本報告書では、V 曲げ加工金型の耐荷重と疲労特性の向上を目的として、トポロジー最適化を含めた方法による 2 つ穴ダイと、人間の直感に基づくキーホールダイを提案した結果を示した。トポロジー最適化を用いる方法では、トポロジー最適化によって形状を探索し、形状の近似楕円の適正位置を重合メッシュにより求めた。これらの結果に基づき、パラメトリック適正化により、涙状の 2 つ穴形状を求めた。キーホールダイは、パラメトリック適正化によって、形状を適正化した。提案のダイの効果を検証するために静的破壊試験と疲労試験を実施し、涙形状の 2 つ穴を有するダイは従来ダイに対して、強度向上が見られた。一方、キーホールダイでは、強度が低下した。これを改善するため、ピアノ線を巻き付けたキーホールダイを提案し、著しく強度向上を実現する効果があることを示した。

謝辞

本研究では公益財団法人天田財団のご援助により、V 溝底のひずみを低減し、疲労寿命を延長し得る金型形状を得ることができ、さらなる研究を進めるための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。

本研究の推進に際し、当研究室において研究テーマとして葉野龍之介氏が真摯に取り組まれました。また、神奈川県産業技術総合研究所の高橋和仁氏、電気通信大学の遊佐泰紀助教、梶川翔平准教授、ものづくり大学の牧山高大准教授に協力を得ました。葉野氏のほか、研究のテーマとし、当研究室では上田裕典氏と宮川直樹氏が、遊佐研究室においては諏訪浩貴氏が研究に取り組まれました。深く感謝いたします。

参考文献

- 1) M. Bendsoe, N. Kikuchi: Generating optimal topologies in structural desing using a homogenization method, *Comput. Methods. Appl.Mech. Engrg.*, Vol. 71, (1988), pp. 197-224.
- 2) 松井 和己, 寺田 賢二郎, 西脇 眞二, 石橋 慶輝: 有限変形を伴う構造物に対する consistent トポロジー最適化手法, *日本計算工学会論文集 2001 巻 (2001)*,

Paper No. 20010046.

- 3) P. Mullet, J. Rance: Applied discrete element technology, Bench Mark, No. 1 (2003), pp. 17-24.
- 4) Y. Yumoto, Y. Yusa, H. Okada: An s-version finite element method without generation of coupling stiffness matrix by using iterative technique, Mechanical Engineering Journal, Vol. 3, No. 5 (2016), Paper No. 16-00001.
- 5) H. Suwa, Y. Yusa: Fracture mechanics evaluation of v-bending die with a hole using parametric analysis system with coupling-matrix-free iterative s-version fem, COMPLAS XVI, (2021), Paper No. 645.
- 6) H. Suwa, Y. Yusa, T. Kuboki: Parallel parametric analysis approach based on an s-version fem for fracture mechanics analysis in designing hole positions, Mechanical Engineering Journal, Vol. 10, No. 3 (2023), Paper No. 22-00462.
- 7) R. Yakuno, H. Suwa, K. Takahashi, S. Kajikawa, Y. Yusa, T. Kuboki: Stress relief for crack prevention by adding holes to v-bending die, Proc. 14th Int. Conf. Techn. Plast. (ICTP2023), (2023), French Riviera, France, pp. 307-316.