

平成 22 年 5 月 13 日現在

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2007～2009

課題番号：19560727

研究課題名 (和文) 対向液圧成形における液圧分布の解明と有限要素解析への応用

研究課題名 (英文) Outflow characteristics of a pressure medium during sheet hydroforming and its finite element modeling

研究代表者

宅田 裕彦 (TAKUDA HIROHIKO)

京都大学・大学院エネルギー科学研究科・教授

研究者番号：20135528

研究成果の概要 (和文)：雄型に対向する液圧によって絞り成形を行う対向液圧成形法は、多品種少量生産が求められる産業界で大きな注目を集めている。本研究では、成形中に生じる圧力媒体の流出現象をシミュレーションに適した形で定式化することを目的として、詳細な実験検討を行った。その結果、圧力媒体の流出開始臨界液圧は力のつり合いに基づいて予測できることを示した。一方流出開始後の液圧は、材料の変形に伴って時々刻々と大きく変化し、この変化をシミュレーション中でも適切に考慮することが高精度な成形性予測を行う上で不可欠なことを明らかにした。

研究成果の概要 (英文)：Sheet hydroforming is a deep-drawing process in which hydraulic pressure is employed instead of a female die, and is drawing a lot of attention in various industries. In this study, the outflow characteristics of a pressure medium during sheet hydroforming and their numerical modeling that can be utilized in finite element simulations of sheet hydroforming processes were examined. We proposed a numerical model to predict the critical outflow pressure of a pressure medium at the initial stage of the process. We also revealed that, after the critical outflow pressure is reached, the hydraulic pressure changes largely with the sheet deformation, suggesting that such a change in the hydraulic pressure should be taken into consideration to conduct accurate numerical simulations.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2008年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学・材料加工・処理

キーワード：対向液圧成形，液圧分布，圧力媒体流出，摩擦低減効果

1. 研究開始当初の背景

(1) 対向液圧成形法は雌型に代わって雄型に対向する液圧により板材を成形するプレス加工法であり、成形限界の向上や工程の短縮など、多くの利点を有している。最近では多品種少量生産が求められる産業界において大きな注目を集めている。

(2) 対向液圧成形法の特長を十分発揮させるには、被加工材の形状、材質、板厚などに応じた成形パラメータの最適化と精密な制御が重要である。対向液圧成形法では通常のプレス加工における制御因子に加えて液圧も緻密に制御する必要があり、成形条件の決定が格段に困難となっている。

(3) 迅速且つ適切に成形条件を決定するため、有限要素解析を援用したプロセス設計支援が切望されている。しかしながら、その解析精度は現場の要求に耐えうるレベルに達していない。その一方で、理論的観点から有限要素法定式化およびプログラム開発に取り組んだ研究事例はこれまでほとんどない。

(4) このように、対向液圧成形のさらなる普及には高精度有限要素解析プログラムが不可欠であるものの、その研究開発は世界的にあまり進んでいないのが現状である。

2. 研究の目的

そこで本研究では、汎用性と現場での要求にも耐えうる高い解析精度の両者を兼ね備えた新しい対向液圧成形解析プログラムの研究開発を行うことを最終目的として、研究を推進する。補助金交付期間内では、対向液圧成形性を大きく左右する圧力媒体流出現象に注目して、有限要素解析に適したその高精度なモデル化手法の研究開発を行うことを目的とする。角筒絞り対向液圧成形過程を対象として詳細な実験を行い、成形中に被加工材に作用する液圧分布を実験的に解明する。そしてその結果を踏まえて、有限要素解析における圧力媒体流出現象の高精度かつ実用的な取り扱い手法を検討する。

3. 研究の方法

本研究では、角筒絞り対向液圧成形中の液圧推移を詳細に検討した。図1に実験で用いた金型の模式図を示す。以下に、主要な実験条件を箇条書きに示す。

(1) 液圧室内液圧はパンチの押し込みとともに電動ポンプによって加圧される。液圧室内の最大液圧はリリーフ弁によって制御される。また参考のため、液圧を用いない通常

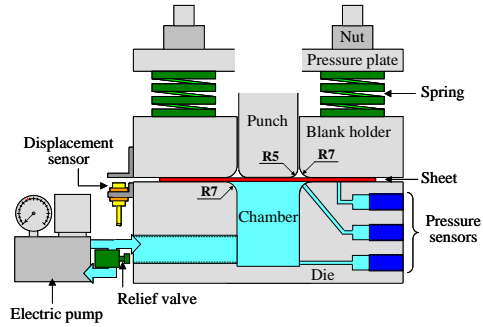


図1 角筒絞り対向液圧成形実験装置の模式図

のプレス成形実験も行う。

(2) ブランクホルダー-ダイ間の間隙から圧力媒体が流出する際のダイ上面液圧分布を測定するために、図2に示すようにダイ上面に測定穴を設ける。測定穴はダイ側面まで貫通しており、側面側に取り付けた圧力センサによって成形中のダイ上面液圧推移を測定する。本手法による液圧測定の妥当性は、事前検討によって示されている。

(3) 圧力媒体および潤滑剤には、同一の鉱油系作動油を用いる。ただし、対向液圧成形特有の現象であるパンチ肩における摩擦保持効果を十分に発生させるため、パンチには潤滑油を塗布しない。

(4) ブランクホルダカ（以下、BHF）はバネによって与えられ、成形中はナットによって保持される。

(5) 供試材には板厚 0.7mm の軟鋼板（新日鐵製）を用いる。供試材の引張特性を表1に示す。初期寸法は 100mm×100mm である。成形後の試験片形状をレーザー形状測定器によって測定する。

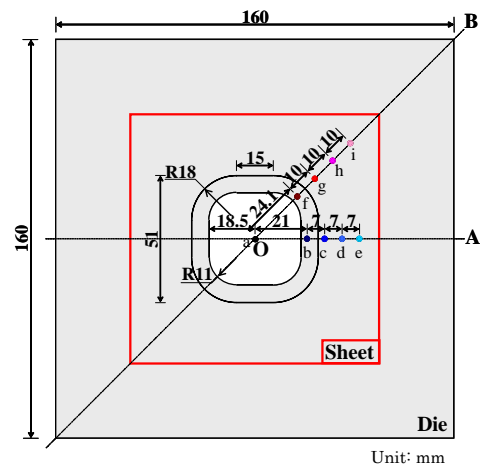


図2 ダイ上面の模式図. 点 a~i は測定穴を示す。

表 1 供試材の引張特性*

E	σ_y	σ_B	F	n	ϵ_0	r
GPa	MPa	MPa	MPa			value
211	147	297	530	0.24	0.0032	2.10

* E はヤング率, σ_y は降伏応力, σ_B は引張強さ, r は r 値をそれぞれ示す. 真応力-真塑性ひずみ線図を $0.1 \leq \bar{\epsilon}^p \leq 0.2$ の範囲でスウィフトの式 $\bar{\sigma} = F(\epsilon_0 + \bar{\epsilon}^p)^n$ により近似した.

(6) 本研究では, 液圧室内の最大液圧が 20MPa, 25MPa, 30MPa の 3 条件で, また BHF が 5 kN, 10kN, 15kN, 20kN の 4 条件で実験を行う.

4. 研究成果

(1) 液圧推移

図 3 に 3 つの最大液圧条件下における, パンチストロークに伴う液圧室内液圧の推移を示す. ただし BHF は 20kN である. また図 4 に 4 つの BHF 条件における, 液圧室内液圧の推移を示す. ただし最大液圧は 20MPa である. いずれの条件においても, 液圧推移の定性的傾向は変わらないことが明らかである. そこで以下では, 最大液圧 20MPa, BHF20kN の結果を用いて説明する.

図 5 に液圧室内およびダイ上面の各測定点における液圧推移を示す. ダイ-ブランクホルダ間の間隙 (ギャップ) 変化を参考のため示す. 成形開始直後に液圧室内液圧は急激に

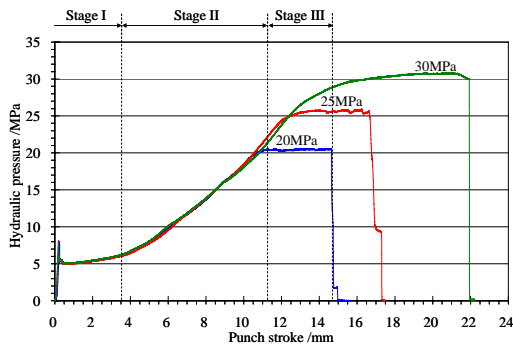


図 3 BHF20kN における各最大液圧条件下での液圧室内液圧の推移

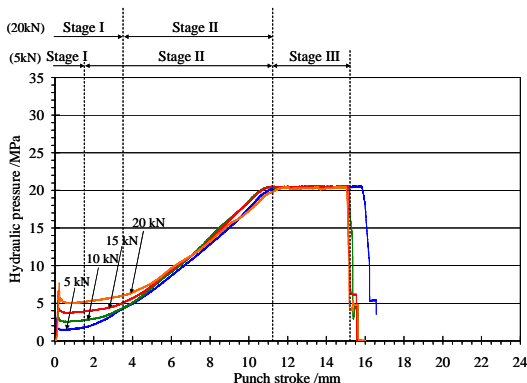


図 4 最大液圧 20MPa における各 BHF 条件下での液圧室内液圧の推移

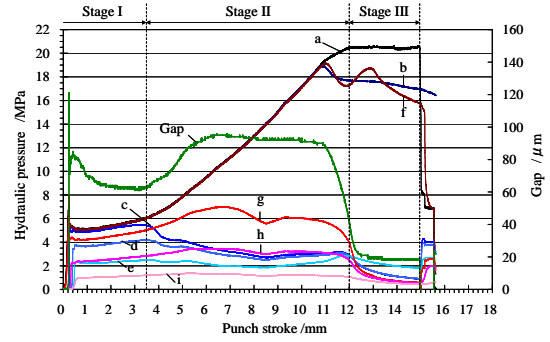


図 5 最大液圧 20MPa および BHF20kN での各測定点における液圧の推移

上昇してピークに達し, その後 5MPa 程度まで急激に減少する. 一方ダイ上面液圧 (図 2 における点 c, d, e, g, h, i) は, 液圧室内液圧がピークに到達する前後から上昇し始める. この結果より, 圧力媒体は液圧室内液圧がピークに達する前後で流出を開始すると考えられる. 全ての液圧はそれからしばらく安定的に推移した後, ストローク約 3.5mm で液圧室内液圧は再び上昇を始める. 以下, ここまでの過程を第一段階と呼ぶ.

液圧室内液圧は最大液圧に達するまで急激に上昇し続ける. このときダイ上面では, 線 OA 上の液圧 (点 c~e) は一旦低下してから安定的に推移する. 一方線 OB 上の液圧 (点 g~i) は, 逆に一旦上昇するものの再び低下し, その後安定する. またダイ肩部の液圧 (点 b, f) は, ストロークが約 11mm に達するまでは液圧室内と変わらないがその後減少を始める. ここまでの過程を第二段階と呼ぶ.

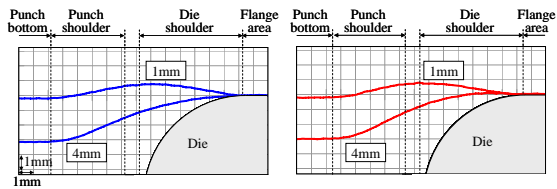
液圧室内液圧が最大液圧に到達した後, 破断が生じるまで最大液圧が安定的に持続される. このときリリース弁が作動してポンプからの圧力媒体供給が減少するため, ダイ肩部およびダイ面上の液圧は大きく減少する. この過程を第三段階と呼ぶ.

(2) 液圧推移のメカニズム

(1) で示したように液圧が推移するメカニズムについて, 被加工材の変形過程に基づいて段階ごとに考察する. また各段階における液圧室からダイ上面までの液圧分布も併せて考察する.

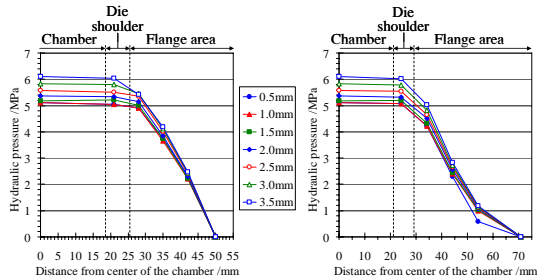
① 第一段階

圧力媒体の流出開始後, 液圧がしばらく安定的に推移するメカニズムを考察する. 図 6 にパンチストローク 1 mm における線 OA, OB に沿った成形品断面形状を示す. ダイ肩部近傍で明らかな逆張り出しが確認できる. このときストローク 1mm ではダイ肩部液圧 (点 b, f) は液圧室内液圧と一致していることから, 被加工材はダイ肩とほぼ接触していないと考えられる. 以上より, この時点では被加工



線 OA に沿った断面 線 OB に沿った断面

図 6 ストローク 1mm, 4mm における断面形状



線 OA に沿った断面 線 OB に沿った断面

図 7 第一段階におけるダイ上面の液圧分布

材-ダイ肩間に十分な間隙があると考えられ、その結果圧力媒体が安定的に流出したため液圧も安定して推移したと考えられる。

図 7 に第一段階中の様々なストロークにおける液圧室からダイ上面までの液圧分布を示す。前述のように、第一段階では液圧室とダイ肩の液圧は変わらず、またダイ肩からダイ上面にかけてほぼ線形的に減少する。この傾向は第一段階の間持続される。

② 第一段階から第二段階への移行

液圧が安定的に推移した後、再び上昇に転じるメカニズムを検討する。図 6 にストローク 4mm における線 OA, OB に沿った断面形状を示す。ストローク 1mm で見られた大きな逆張り出しがほぼ見られない。これより、逆張り出しがなくなったことで被加工材とダイ肩が接触し、それにより圧力媒体が液圧室内に閉じこめられたため液圧が上昇したと考えられる。図 4 に示すように上昇に転じるストロークは BHF が大きいほど遅い。これは BHF が大きいほど逆張り出しが大きいためと考えられる。

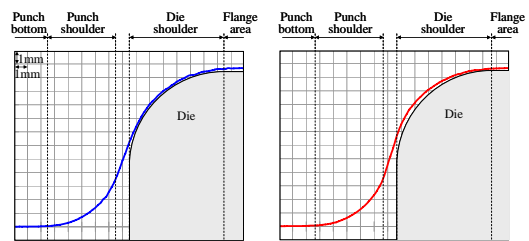
③ 第二段階

第二段階開始後、ダイ上面の液圧は線 OA 上で低下が、また線 OB 上で上昇が見られた。この原因は変形形状から説明できる。図 6 に示すように、線 OA 上では逆張り出しが完全に消滅したため圧力媒体の流出が妨げられ、液圧が低下する。一方線 OB 上では小さいながらも逆張り出しが残っているため、圧力媒体は OB 方向へ優先的に流出し、その結果 OB 上の液圧が上昇したと考えられる。OB 方向で逆張り出しの消滅が遅いのは、この部分が二

重の曲率を持つ複雑形状部であるためと考えられる。その後線 OB 上液圧も低下に転じるが、これは OB 方向でも逆張り出しが完全に消滅するためと考えられる。

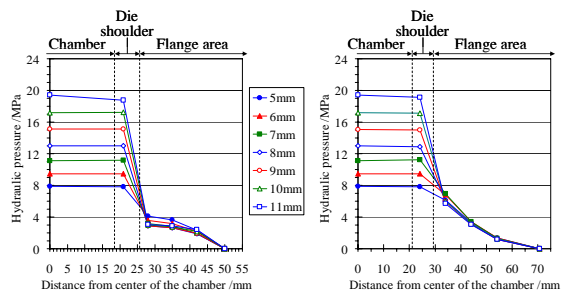
ダイ肩部液圧が低下を始める直後のストローク 13mm における断面形状を図 8 に示す。被加工材はダイ肩部に良くなじんでいることが判る。この結果より、ダイ肩部液圧が低下するのは、被加工材がダイ肩になじむことで摩擦損失が生じたためと考えられる。

図 9 に第二段階中の様々なストロークにおける液圧室からダイ上面までの液圧分布を示す。ダイ肩部での大きな摩擦損失により、ダイ上面の液圧は液圧室内液圧に比べて非常に小さい。また第一段階のような分布の線形性が成り立たない。図 10 に、ストローク 9.5mm における BHF と点 c, g の液圧の関係を示す。この結果より、第二段階ではダイ上面液圧分布の線形性はくずれている一方で、ダイ上面の液圧はやはり BHF と非常に大きな相



線 OA に沿った断面 線 OB に沿った断面

図 8 ストローク 13mm における断面形状



線 OA に沿った断面 線 OB に沿った断面

図 9 第二段階におけるダイ上面の液圧分布

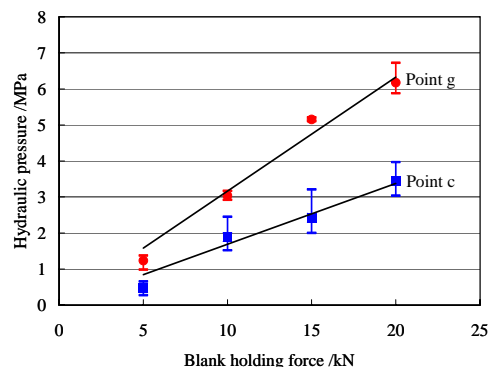


図 10 ストローク 9.5mm における BHF と点 c, g の液圧の関係

関があることが判る。

④第三段階

図 11 に第三段階中の様々なストロークにおける液圧室からダイ上面までの液圧分布を示す。第二段階に比べてダイ面上の液圧はさらに低下している。一方摩擦損失の大きさは、液圧室からダイ肩にかけてよりもダイ肩からダイ上面にかけての方がはるかに大きい。これより、摩擦損失には、材料のダイ肩へのなじみに比べて逆張り出し消滅の影響の方が大きいことが示唆される。

(3) 圧力媒体の流出開始臨界液圧

圧力媒体の流出はダイ上面に潤滑剤を供給することと同様の効果があるため、流出開始臨界液圧の予測は成形性を予測する上で重要である。そこで以下のように簡便な予測式を提案した。

(1) で示したように、圧力媒体は液圧室内液圧がピークに達する前後で流出を開始すると考えられる。しかしながらピーク液圧は瞬間的な現象であるため、変形にはほとんど影響しないと考えられる。そこで本研究ではピーク現象は無視し、液圧室内液圧が安定推移領域における液圧値に到達した時点で流出を開始するとモデル化する。

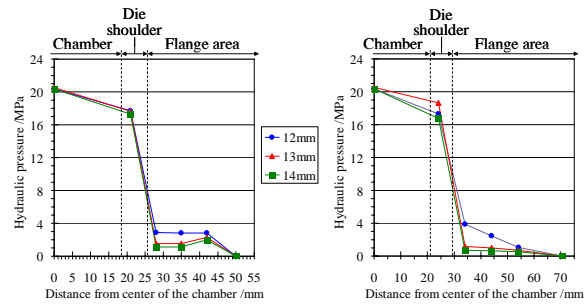
圧力媒体流出中は、成形初期であればブランクホルダおよびパンチによる下向きの加工力と圧力媒体による上向きの押し上げ力が釣り合っていると仮定できる。安定推移領域においてこの加工力と液圧による押し上げ力を様々な成形条件下で比較した結果を図 12 に示す。ただし、加工力は BHF とパンチ力の和で与え、また押し上げ力は図 7 に基づいて線形近似した液圧分布を初期材料面積について積分して算出した。図 12 より、押し上げ力は全ての条件において加工力と良好につき合っており、上記仮説の妥当性が示された。これは言い換えれば、このつり合いが満たされた時点で圧力媒体流出が開始することも考えられることから、つり合いに基づいて流出開始臨界液圧（安定推移領域の液圧）を予測できることが示された。

(4) 有限要素解析における液圧のモデル化

以上の結果に基づき、圧力媒体流出現象の有限要素定式化手法を検討した。

①(3) で示したように、圧力媒体流出開始臨界液圧は、加工力と液圧による押し上げ力のつり合いに基づいて予測できる。有限要素解析では成形中の時々刻々の加工力を計算することができるため、解析においても流出の有無を容易に予測できる。

②成形初期ではダイ面上の液圧は線形的に分布すると近似することが可能である。一方成形中期以降では、材料の変形に伴ってダイ肩部での摩擦損失が高まり、その結果ダイ上



線 OA に沿った断面

線 OB に沿った断面

図 11 第三段階におけるダイ上面の液圧分布

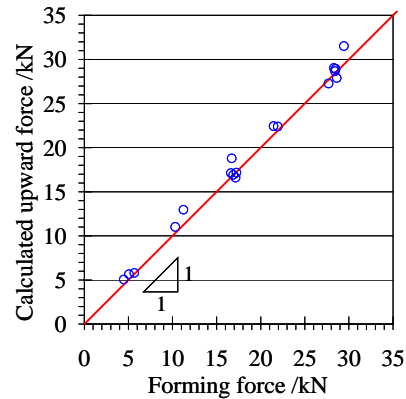


図 12 安定推移領域における加工力と液圧による押し上げ力の相関

面液圧は大きく低下する。従って成形中期以降のダイ上面液圧を適切に近似するためには、ダイ肩部での摩擦損失量を予測するモデルを構築することが今後の課題である。

③図 5 で示したように、ダイ上面の液圧は非常に複雑な変化を示すため、計算においてこの推移を直接表現することは困難である。そこで、圧力媒体流出に伴う潤滑剤としての効果に注目して、ダイ上面の摩擦係数（摩擦係数）を液圧の関数として変化させる方法が新たなモデルとして考えられる。今後このモデルの定式化を進めるため、ダイ上面の液圧と摩擦力の関係を詳細に検討する必要がある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

(1) Takayuki Hama, Keita Matsushima, Toru Kitajima, Hitoshi Fujimoto, and Hirohiko Takuda, Correlation between sheet deformation and hydraulic pressure variation during sheet hydroforming, ISIJ International, 査読有, 49-11 (2009), 1736-1743.

(2) Takayuki Hama, Ken Kurisu, Keita

Matsushima, Hitoshi Fujimoto, and Hirohiko Takuda, Outflow characteristics of a pressure medium during sheet hydroforming, ISIJ International, 査読有, 49-2 (2009), 239-246.

〔学会発表〕(計6件)

(1) 浜孝之, 高精度対向液圧成形解析プログラムの開発とその適用事例, 第77回金属プレス加工技術研究会「板材成形シミュレーションの最新動向」, 2009年10月2日, 中小企業会館.

(2) 浜孝之, 北島達, 松嶋啓太, 藤本仁, 宅田裕彦, 対向液圧角筒絞り成形における液圧特性, 日本塑性加工学会 平成21年度塑性加工春季講演会, 2009年5月30日, 京都大学吉田キャンパス.

(3) Takayuki Hama, Ken Kurisu, Keita Matsushima, Hitoshi Fujimoto, and Hirohiko Takuda, Outflow characteristics of a pressure medium during square-cup sheet hydroforming, The 9th International Conference on Technology of Plasticity (ICTP 2008), 2008年9月9日, 大韓民国・慶州.

(4) 浜孝之, 松嶋啓太, 栗栖憲, 藤本仁, 宅田裕彦, 対向液圧角筒絞り成形における圧力媒体流出特性, 日本塑性加工学会 第58回塑性加工連合講演会, 2007年10月26日, 札幌市教育文化会館.

(5) 浜孝之, 松嶋啓太, 栗栖憲, 藤本仁, 宅田裕彦, 対向液圧成形における圧力分布測定法の提案と検証, 日本塑性加工学会 第58回塑性加工連合講演会, 2007年10月26日, 札幌市教育文化会館.

(6) 浜孝之, 栗栖憲, 松嶋啓太, 藤本仁, 宅田裕彦, 対向液圧成形における液圧分布の測定, 日本鉄鋼協会 第154回秋季講演大会, 2007年9月20日, 岐阜大学.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宅田 裕彦 (TAKUDA HIROHIKO)
京都大学・大学院エネルギー科学研究科・教授
研究者番号：20135528

(2) 研究分担者

浜 孝之 (HAMA TAKAYUKI)
京都大学・大学院エネルギー科学研究科・助教
研究者番号：10386633

藤本 仁 (FUJIMOTO HITOSHI)
京都大学・大学院エネルギー科学研究科・准教授
研究者番号：40229050

その他の研究協力者
京都大学大学院エネルギー科学研究科
の大学院生3名