

## 成形性評価シミュレーション技術開発部会の紹介

櫻井 健夫\*・桑原 利彦\*\*・宇都宮 裕\*\*\*  
西田 進一\*\*\*\*・上間 直幸\*\*\*\*\*・山中 晃徳\*\*

### Introduction of the sectional meeting on technology development for formability evaluation simulation

Takeo SAKURAI\*, Toshihiko KUWABARA\*\*, Hiroshi UTSUNOMIYA\*\*\*  
Shinichi NISHIDA\*\*\*\*, Naoyuki UEMA\*\*\*\*\* and Akinori YAMANAKA\*\*

#### 1. はじめに

本研究部会は、主要軽圧メーカ6社（古河スカイ（現UACJ）、住友軽金属（現UACJ）、日本軽金属、三菱アルミ、昭和電工、神戸製鋼）で2005年より立上げた「アルミニウム研究奨励基金」の活動のなかで、2011年に各メーカの代表が集まり、企業でかかえる現状のアルミニウムおよびアルミニウム合金における技術開発課題を議論、抽出し、各社共通に持つ課題を研究部会として立上げることにした3テーマ（圧延組織形成予測、アルミニウム中の水素、成形評価シミュレーションの高精度化）の内の一つである。

実用アルミニウム合金板の成形性の課題は、これまででも研究部会として活動され、以下の部会報告書が発刊されている。

- ① A1100の成形性<sup>1)</sup>
- ② アルミニウム合金板の成形性<sup>2)</sup>
- ③ アルミニウム合金薄板のプレス加工データブック<sup>3)</sup>
- ④ 自動車車体用アルミニウム合金薄板の成形性データブック<sup>4)</sup>

これらの部会成果は、アルミニウム合金板の成形性向上のための基礎データベースとして活用され、貴重なものであった。

近年、自動車等輸送機は、意匠性の問題から複雑な形状を求められるようになってきた。よって、シミュレーションを有効活用し、複雑な形状でもプレス成形を可能とし、かつ、金型設計からプレス成形し、部品取得までの時間を短縮化する技術の開発が進んでいる。特に、鋼板ではシミュレーション技術の高度化とともに、有用する材料モデルがある程度確立されている。一方、アルミニウム合金板は、鋼板と比べ成

形性は劣り、鋼板と同様の材料モデルを活用しただけでは、忠実に成形挙動を予測することができていない。また、上述の過去の部会で報告されたアルミニウム合金板のデータベースを活用することでシミュレーションは可能であるものの、未だ成形不具合を完璧に予測することはできていない。よって、アルミニウム合金板の成形予測の精度向上には、アルミニウム合金板特有の材料モデルを見出すことが必要となる。そこで、本部会は、成形シミュレーション技術の高精度化を目的に従来のデータベース意外の新しい手法を取入れることで、アルミニウム合金板で解析に用いるための材料モデルを構築し、予測高度化をはかり、実際の変形挙動を忠実に再現するために発足した。

#### 2. 研究部会の構成

本研究部会は表1に示す委員で構成されている。学側からは塑性加工、特に成形加工を専門とする東京農工大学と群馬大学、また、組織学的要素を取入れた変形の解析を得意とする大阪大学に参加頂き、新しい知見と成果を取入れるようにした。産側は、上述したように軽圧メーカの各社が持つ課題の一つであることから、軽圧5社より成形加工を長年研究している専門家、シミュレーションの研究を専門とする若手研究者などから参加頂き発足当初は12名であった。現在では、東京農工大学と大阪大学より修士大学院生が加わり、また、2013年度より新たに東京農工大学で、組織予測シミュレーションを専門とする若手准教授に入会頂き15名のメンバーで、最新の技術を取り入れ、成形シミュレーションの高精度化を図るための材料モデルの構築を進めている。

\*株式会社神戸製鋼所 アルミ銅事業部門 技術部（〒141-8688 東京都品川区北品川5-9-12）。Technology Control Department, Aluminum and Copper Business, Kobe Steel, LTD. (5-9-12 Kitashinagawa, Shinagawa-ku, Tokyo 141-8688).

\*\*東京農工大学 大学院工学研究院先端機械システム部門（小金井市）。Division of Advanced Mechanical Systems Engineering, Institute of Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology (Koganei-shi, Tokyo).

\*\*\*大阪大学 大学院工学研究科 マテリアル生産科学専攻（吹田市）。Graduate School of Engineering, Division of Materials and Manufacturing Science, Osaka University (Suita-shi, Osaka).

\*\*\*\*群馬大学 大学院工学研究科 生産システム工学専攻（太田市）。Department of Production Science and Technology, Graduate School of Engineering, Gunma University (Ota-shi, Gunma).

\*\*\*\*\*株式会社UACJ 技術開発研究所名古屋センター（名古屋市）。Nagoya Center, Research and Development Division, UACJ Corporation (Nagoya-shi, Aichi).

受付日：平成25年9月19日

表1 成形性評価シミュレーション技術開発部会構成メンバー

区分	名称	役職	氏名	備考
大学・公立機関	東京農工大学	教授	桑原 利彦	幹事
	〃	M1	川口 順平	
	〃	准教授	山中 晃徳*	
	大阪大学	教授	宇都宮 裕	
	〃	M1	風岡 徹*	
	群馬大学	助教	西田 進一	
企業	(株)UACJ		上間 直幸	部会長
	〃		野口 修	
	(株)神戸製鋼所		為広 信也	
	〃		櫻井 健夫	
	日本軽金属(株)		森山 慶彦	
	〃		半田 岳士	
	三菱アルミニウム(株)		齊藤 洋	
	〃		福増 秀彰	
(株)コベルコ科研		中島 伸吾		

\*2013年度より新規参加メンバー

表2 共通サンプル (A5182-O) の化学成分 (mass%)

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
供試材	0.09	0.17	0.02	0.23	4.55	0.03	0.02	0.01	Rem.
JIS規格	≤0.20	≤0.35	≤0.15	0.20-0.50	4.0-5.0	≤0.10	≤0.25	≤0.10	Rem.

表3 共通サンプル (A5182-O) の機械的性質

	引張強さ (MPa)	0.2%耐力 (MPa)	伸び (%)	n値 10-20%	r値 15%
0°	274	136	28.4	0.291	0.789
45°	269	137	29	0.326	0.713
90°	268	137	28.6	0.303	0.797

JISS号引張試験片

### 3. 研究部会の進め方

研究部会を進めるにあたり、成形シミュレーション高精度化のため複雑な成形技術を必要とする自動車部材にターゲットをおいた。供試材は、自動車部材として広く用いられ、アルミニウム合金としても一般的に知られ、JIS規格合金であるA5182-O材とした。

#### 3.1 部会共通サンプル

実験に供したA5182-O材は、神戸製鋼所製で板厚1.0mmの冷間圧延板を焼なまし処理した自動車用の材料である。供試材の化学成分および機械的性質を表2および表3に示す。成分はJIS規格に準じており、機械的性質は自動車パネル材として用いられる一般的な特性を持った材料であり、異方性もほとんどないことを確認している。

#### 3.2 成形試験ベンチマーク

成形性評価のベンチマークとして、液圧バルジ試験を選定した。液圧バルジ試験は、一般的に素材の純粋な張出性

を評価するのに適した成形試験方法で、金型や潤滑などの抵抗や摩擦の影響を受けることなく張出成形領域（等二軸領域）での成形限界を知ることが可能である。本部会での実成形によるバルジ試験は、東京農工大学とコベルコ科研が持つφ150mmおよびφ100mmの球頭型の試験機を用いて行っている。液圧バルジ試験の成形シミュレーションも実施している。

#### 3.3 成形シミュレーション（群馬大学 西田進一）

三次元有限要素法を用いた塑性加工解析が現在ではすでに一般的に実施されている。しかしながら、現状では、解析結果が実験結果を完璧に再現しているとは言い難い。本部会における成形性評価シミュレーション技術の達成目標は2点ある。1点は、成形後の製品形状の完璧な再現であり、もう1点は、完璧な破断予測である。

本部会で使用するソフトは、主にAbaqusやDEFORMであり、今後、新しいソフトを追加する予定である。従来の塑性加工シミュレーションで使用されてきたパラメータは主に、

単軸引張試験から取得した変形抵抗や $r$ 値であり、降伏条件はミーゼスやヒルが一般的であった。本学会では、これらに加え、新たに二軸引張試験にて取得した適切な降伏関数を解析ソフトに組入れる。図1は、本学会のベンチマークとした液圧バルジ試験につきDEFORMを使用し、成形シミュレーションを施した一例を示す。今後、さらに、バウシガ効果を考慮した解析も行う予定である。破断予測方法として、単軸のみならず二軸領域も考慮した破断予測モデルを解析に組入れる。さらなるプレス成形解析の精度向上のため、素材の弾塑性解析は元より、金型およびプレス機の弾性変形および弾性変形挙動も解析にて考慮する必要があると考える。

解析が複雑になるにつれ、計算時間の増大が懸念されるが、高速に並列計算可能なコンピュータが日々開発されており、その心配はいずれ解消するであろう。したがって、本学会としては、世界に先駆け、時代の数歩先を行くシミュレーション技術の研究を行っていきたい。

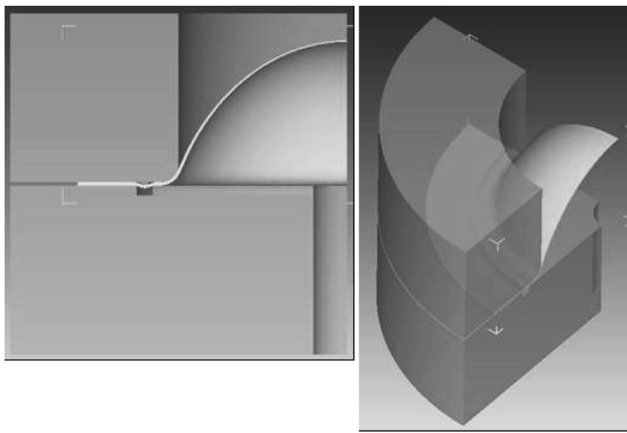


図1 液圧バルジ解析の一例

#### 4. 成形シミュレーション高精度化のための新しい手法

##### 4.1 二軸引張、二軸バルジ試験適用による成形シミュレーション高精度化（東京農工大学 桑原利彦）

塑性力学研究の究極の目標は、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が、実際の材料の弾塑性変形挙動を可能なかぎり忠実に再現する必要がある<sup>5),6)</sup>。

二軸引張応力を受ける金属板材の弾塑性変形挙動を精密に測定し、材料モデルを高精度に同定するための材料試験法としては、図2に示す十字形試験片を用いた二軸引張試験方法が有用である<sup>7),8)</sup>。本学会の東京農工大学 桑原研究室では、二軸引張試験方法による適切な降伏関数の選択は有限要素解析によるアルミニウム合金板の成形シミュレーションの精度向上に有効であることを立証した<sup>9)</sup>。本試験方法は2013年内にISO規格として正式に採択される予定である

一方、数%以上の比較的大きな塑性ひずみ範囲に対する材料モデリングの手法としては、二軸バルジ試験方法が有用である（図3）<sup>10)</sup>。二軸バルジ試験方法の最大の特長は、板材から製作された円管試験片に軸力と内圧をサーボ制御によ

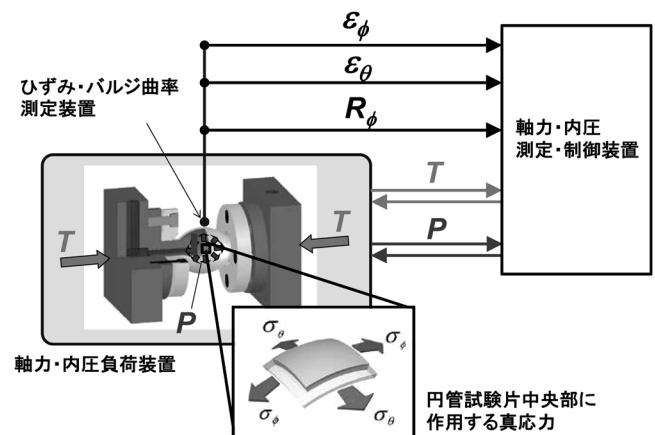
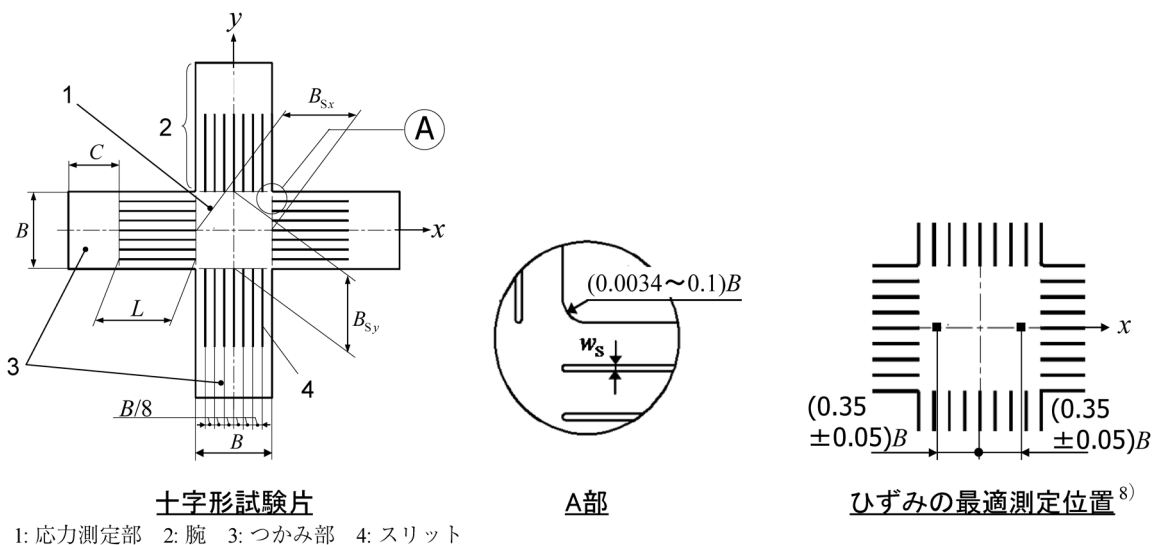


図3 サーボ制御二軸バルジ試験方法の模式図<sup>10)</sup>



十字形試験片  
1: 応力測定部 2: 腕 3: つかみ部 4: スリット

図2 推奨される十字形試験片の形状

り同時に作用させることにより、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-ひずみ曲線が連続測定でき、しかも板材の成形限界ひずみや成形限界応力までも実測できることである。当部会メンバーである東京農工大学では、アルミニウム合金板の二軸バルジ試験を行い、異方硬化挙動を精密に再現できる材料モデルを構築した<sup>11)</sup>。

これら二軸引張試験ならびに二軸バルジ試験により、従来以上の精密な材料モデルを適用することで、アルミニウム合金板の成形不具合を高精度に予測することが可能となることが期待できる。

#### 4.2 不均質性有限要素解析技術の適用による成形シミュレーション高精度化 (大阪大学 宇都宮 裕)

現在の成形の数値解析のほとんどは一樣な材料を仮定して行われている。すなわち、被加工材全体に対して均一な材料定数が仮定される。しかし、現実には材料組織は多結晶体であり、偏析や介在物などが存在するなど本来不均質である。力学的な不均質性は塑性加工によって、自由表面の粗さの増大、せん断帯あるいはくびれの発生など不均一変形となって顕在化する。現在では、結晶塑性有限要素法の発達によって、こうした現象の予測が可能となっているが、材料の寸法と結晶粒径を考えれば、計算負荷の点で必ずしも実用的ではない。こうした不均一変形を予測することができれば、計算負荷の増大を招くことなく成形性シミュレーションを高精度化することができると考えられる。そのためには、材料に存在する力学的な不均質性を統計的に定量化し、その加工に伴う発展をモデル化、有限要素解析に導入することで高精度化を図る<sup>12)</sup>。不均質性の定量化するための実験手法としては、ビッカース硬さ統計<sup>13)</sup>と、EBSD解析によって得られるKAM値などのパラメータの統計の応用を検討する。そして、実験に基づいて不均質性の発達を数式化する。こうした不均質性を、材料定数の統計分布として要素にマッピングすることで有限要素解析に導入し、上述の不均一変形の予測を実現し、シミュレーションの高精度化を図る予定である。

#### 4.3 結晶塑性解析技術 (UACJ 上間直幸, 東京農工大学 山中晃徳)

成形シミュレーションを高精度化するためには、解析条件の設定が重要である。特に材料特性としては塑性構成則(降伏条件式, 硬化発展則, 流れ則)の定義がポイントとなるが、実用化されているアルミニウム合金板の多くは異方性を有しており、汎用ソルバに搭載されている古典的なモデルでは厳密な材料応答を再現しているとは言いがたく、要求される解析精度が得られない可能性が高い。そのため、実材料の塑性変形挙動を再現すべく種々の材料モデルが提案され検証が行われている<sup>14)~19)</sup>。しかしながら例えば、Mg添加量の異なる5000系合金の成形限界ひずみが等二軸と単軸~平面ひずみで逆転するような現象は予測できていない(図4)<sup>20)</sup>。一方で結晶塑性理論を用いた解析で成形限界ひずみに及ぼす各方位の影響が調査されCube方位とRandom方位で図4と同様に变形領域により成形限界ひずみの大小が異なることが予測されており上記逆転現象の発生メカニズム解明が期待される(図5)<sup>21)</sup>。また、結晶塑性解析による実材料の異方性予測も期待される。

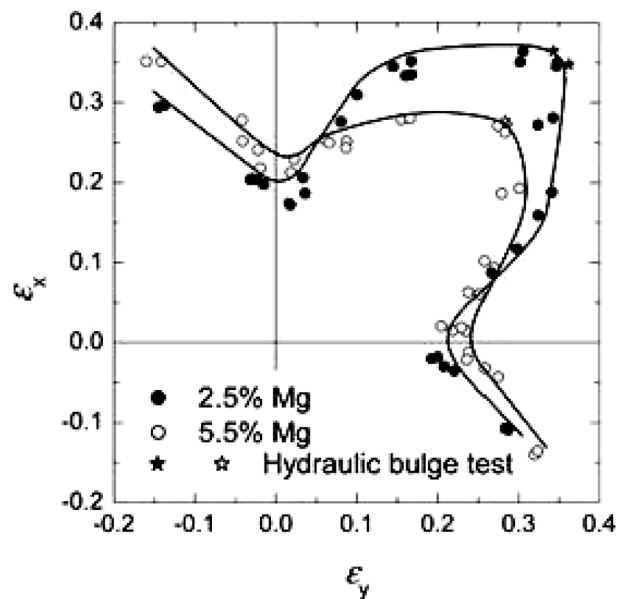


図4 5000系合金の成形限界線図<sup>20)</sup>

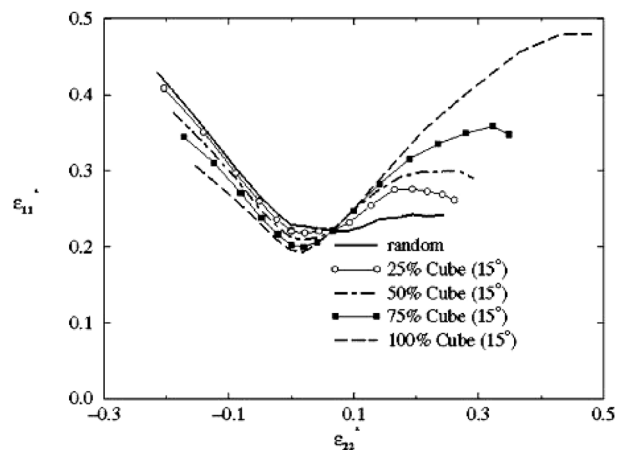


図5 Cube方位の成形限界<sup>21)</sup>

## 5. まとめと今後の進め方

現在、前章で紹介した新しい技術のなかで二軸引張の適用を進め、ベンチマークとした液圧バルジ試験の成形シミュレーションの精度向上を進め、適正な降伏関数の選択により成果を上げている。また、より一層の高精度化を進めるにあたり、二軸バルジ試験の適用を検討中である。これまでの研究成果は、2013年若手金属学会春期大会において2件(東京農工大学<sup>22)</sup>、群馬大学<sup>23)</sup>)講演し、秋期大会では1件(東京農工大学<sup>24)</sup>)講演予定である。また、2014年ノルウェーで開催されるICAA14(14th International Conference on Aluminium Alloys)でも講演を予定している。

今後、さらなる精度向上を目指し、不均質性有限要素法についても検討を開始し、共通サンプルであるA5182-O材の引張特性ならびに変形時の硬さ分布から変形予測技術を進めている。また、これまで、成形予測にはあまり用いられていない結晶塑性解析予測技術についても本研究部会で取り入れる予定である。

現在、本研究部会の成形性評価のベンチマークとして液圧

バルジ試験を実施しているが、今後は、実成形試験を考慮し、金型を使った各種基礎的な成形評価を実施する予定である。評価する試験法としては、球頭張出試験、円筒絞り試験、角筒絞り試験等を計画し、特に球頭張出試験については、ベンチマークとした液圧バルジ試験とほぼ同一の形状のものにし、金型成形による潤滑や摩擦などの抵抗の問題点を考慮し、成形シミュレーションの破断予測技術の確立と高精度化を実施していく予定である。さらに、最終目標として、実製品のプレスも検討していく予定で、部会内でターゲットとする自動車部品を議論し、実部品に適用可能な技術確立を進めていく。

#### 参 考 文 献

- 1) 軽金属学会研究委員会, 研究部会報告書 No. 7, (1982).
- 2) 軽金属学会研究委員会, 研究部会報告書 No. 12, (1985).
- 3) 軽金属学会研究委員会, 研究部会報告書 No. 23, (1991).
- 4) 軽金属学会研究委員会, 研究部会報告書 No. 30, (1996).
- 5) T. Kuwabara: *Int. J. Plast.*, **23** (2007), 385–419.
- 6) 桑原利彦: 塑性と加工, **54** (2013), 18–24.
- 7) T. Kuwabara, S. Ikeda and T. Kuroda: *J. Mater. Process. Technol.*, **80–81** (1998), 517–523.
- 8) Y. Hanabusa, H. Takizawa and T. Kuwabara: *J. Mater. Process. Technol.*, **213** (2013), 961–970.
- 9) 彌永大作, 桑原利彦, 上間直幸, 浅野峰生: 軽金属, **62** (2012), 7–13.
- 10) T. Kuwabara and F. Sugawara: *Int. J. Plast.*, **45** (2013), 103–118.
- 11) 彌永大作, 瀧澤英男, 桑原利彦: 塑性と加工, **55** (2014), (掲載決定).
- 12) H. Utsunomiya, K. Masui, S. Kaneko and T. Sakai: *Advanced Technology of Plasticity*, (Proc. 9<sup>th</sup> ICTP), Gyeongju, (2008), (CD-ROM).
- 13) H. Utsunomiya, Y. Tamura, T. Yukimoto and T. Sakai: *Steel Research International*, **79** (2008), 301–306.
- 14) R. Hill: *Proc. R. Soc. Lond., Ser. A, Math. Phys. Sci.*, **193** (1948), 281–297.
- 15) M. Gotoh: *Int. J. Mech. Sci.*, **19** (1977), 505–512.
- 16) 呉屋守章, 伊藤耿一: 日本機械学会論文集A編, **54** (1988), 1617–1622.
- 17) F. Barlat, J. C. Brem, J. W. Yoon, K. Chung, R. E. Dic, S.-H. Choi, F. Pourbogat, E. Chu and D. J. Lege: *Int. J. Plast.*, **19** (2003), 1297–1319.
- 18) F. Yoshida and T. Uemori: *Int. J. Plast.*, **18** (2002), 661–686.
- 19) T. Kuwabara: *Int. J. Plast.*, **23** (2007), 385–419.
- 20) 桑原利彦, 梅村昌史, 吉田健吾, 黒田充紀, 平野清一, 菊田良成: 軽金属, **56** (2006), 323–328.
- 21) P. D. Wu, S. R. MacEwen, D. J. Lloyd and K. W. Neale: *Mater. Sci. Eng. A*, **364** (2004), 182–187.
- 22) 川口順平, 桑原利彦, 櫻井健夫: 軽金属学会第124回春期大会講演概要, (2013), 323–324.
- 23) 西田進一, 初山武蔵, 桑原利彦, 櫻井健夫: 軽金属学会第124回春期大会講演概要, (2013), 325–326.
- 24) 川口順平, 桑原利彦, 櫻井健夫: 軽金属学会第125回秋期大会講演概要, (2013), 141–142.