

### 金属板材の面内二軸試験における限界ひずみの計測と評価

坂根, 昇 / SAKANE, Noboru

---

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編 / 法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編

(巻 / Volume)

59

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

5

(発行年 / Year)

2018-03-31

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00014797>

# 金属板材の面内二軸試験における 限界ひずみの計測と評価

Measurement and evaluation of limit strain in in-plane biaxial test of metal sheet

坂根昇

Noboru Sakane

指導教員 大澤泰明

法政大学大学院理工学研究科機械工学専攻修士課程

Transportation machines such as automobiles and aircraft are becoming lighter. A common way is to construct the structure with lightweight material. From the steel main body so far, attention is being paid to multi-materials that uses lightweight materials appropriately for the right materials. Among them, ductility is one of the important factors in material selection. In the ductility evaluation, the elongation at break from the tensile test is a specific criterion for setting the target value. However, there are ambiguity in the evaluation criteria of ductility. Experimentally point out the problem of the ductility evaluation standard value from the in-plane biaxial test.

**Key Words** : Al100-O, In-Plane Deformation, limit strain, FLD

## 1. 緒言

自動車や航空機などの輸送機の軽量化が進んでおり<sup>1),2)</sup>, 燃費を向上させる取り組みが為されている. その手段の一つが構造を軽量化材で構成することである. これまでの鉄鋼主体から, Al, Ti, Mg合金, 複合材等の軽量化素材の比率を増加させ, 材料を適材適所に使い分けるマルチマテリアル化が肝要である. 材料の改質・改善では, 強度増加と同時に加工性能, 延性とのバランスが重要である(Fig.1参照). 延性評価では, 引張試験からの破断伸びが目標値を設定する際の具体的特性値となる. 一方, プレス加工は単軸引張状態下で行われることはないから, 延性の定量化はFLDとの相関・対比, および加工方法と関連して総合的に同定されなければならない. ここで, 破断伸びやFLDにおける限界ひずみはその定義・算定に曖昧さや不明瞭さが暗黙の裡に含まれ, 概して, その値は信頼性に欠けると認められる.

本研究は十字型試験片を使用し, 曲げ変形や摩擦を含まない面内二軸試験と FLD(成形限界線図)における延性評価基準値をめぐる実験的問題を指摘し, 延性の定量化に関する考察を述べる.

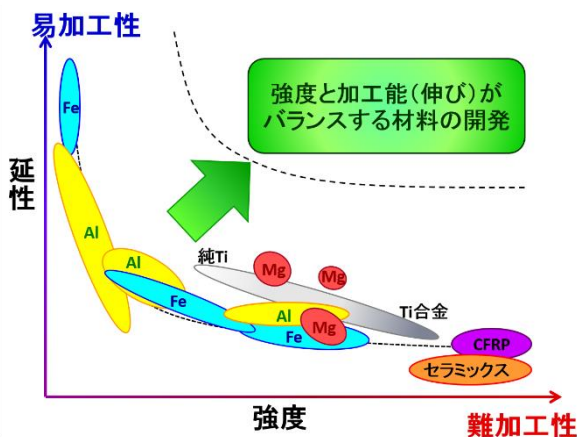


Fig.1 Evaluation of Material

## 2. 成形限界線図 (FLD)

板材のプレス成形の議論の場では, 加工材の受けるひずみ比 $\beta$ を $\beta = 1$ から $\beta = -1$ までとするFLDがその考察の対象になる. FLDはプレス成形部品の各部分の最大主ひずみと最小主ひずみを測定し, 最小主ひずみを横軸, 最大主ひずみを縦軸とする座標内にプロットして作成する. 板材の成形限界の理論的予測方法は, 局部くびれ発生を予測するものであり, Swiftの拡散くびれ限界, Hillの局部くびれ理論に始まり, M-K理論, S-R理論と呼ばれるものがその代表である. ちなみに, Swiftの張り出し領域における極大値のひずみ比 $\beta_{max}$ 及び主ひずみ $\epsilon_{1max}$ は, 0.484, 0.271であり, 絞り領域における極小値のひずみ比 $\beta_{min}$ 及び主ひずみ $\epsilon_{1min}$ は-0.290, 0.211である. 各予測方法に基づいた成形限界線を模式的にFig. 2に表す.

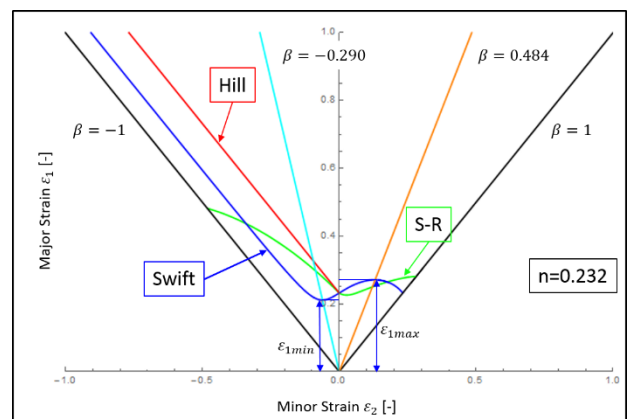


Fig.2 FLD

## 3. 公称ひずみ比と真ひずみ比の相関

FLDにおける公称ひずみ比 $\beta_0$ は二軸試験の場合, 固定値として求めることができる. 一軸を $c_1$ , 二軸を $c_2$ とすると(1)式のように求めることができ, Fig. 3のように表せる. また, 真ひずみ比 $\beta$ も(2)式のように求められ, Fig. 4のよ

うに表せる。公称ひずみ比 $\beta_0$ は比例直線となるが、真ひずみ比 $\beta$ は対数をとっているため、曲線となる。しかしながら、本実験を行った場合には、Fig. 4 のような曲線のような実験値とはならなかった。

$$\beta_0 = \frac{\varepsilon_{02}}{\varepsilon_{01}} = \frac{\frac{\Delta w}{w_0}}{\frac{\Delta l}{l_0}} = \frac{c_2}{c_1} \quad (\Delta l = c_1 t, \Delta w = c_2 t) \quad (1)$$

$$\beta = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \frac{\ln\left(\frac{w_0 + \Delta w}{w_0}\right)}{\ln\left(\frac{l_0 + \Delta l}{l_0}\right)} = \frac{\ln(1+c_2)}{\ln(1+c_1)} \quad (2)$$

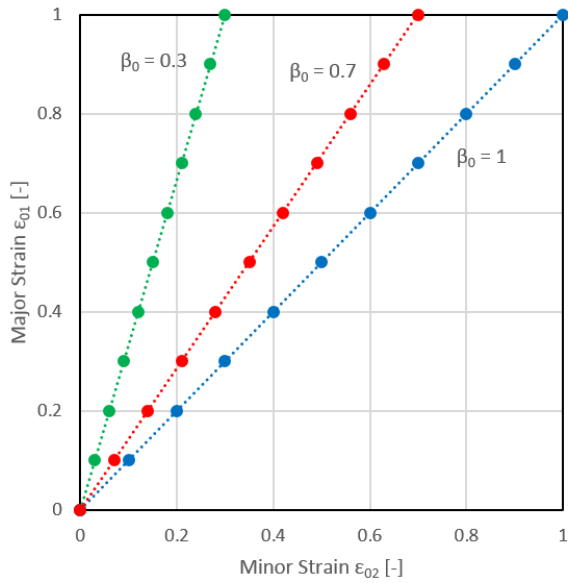


Fig.3 Nominal strain ratio

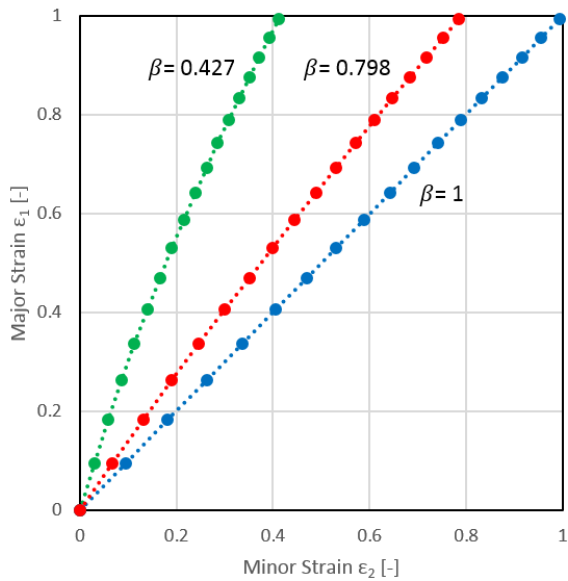


Fig.4 True strain ratio

#### 4. 破断伸びのゲージ長依存

引張試験を行い、デジタルビデオカメラで観察した引張試験の試験開始から破断までを 10 分割し、各段階におけるひずみ測定用格子の変化量を画像解析ソフトによって測定し、軸方向の軸ひずみ $\varepsilon_l$ を算出した。ひずみ分布を Fig.5 に示す。最大荷重点以前は一樣変形だが、最大荷重点以降は一樣な変形ではなくなる。また、ひずみ分布の面積は伸びであり、横軸のゲージ長と縦軸の軸ひずみを掛け算した値をとる。よって、不安定変形している間のひずみ分布が山なりになる場合は、ひずみの平均値を計算に用いる。だからこそ勾配が急な破断時のひずみ分布においては、ゲージ長の大小が限界ひずみに大いに影響を及ぼすのである。この限界ひずみのゲージ長依存は二軸試験の場合においても適用すると考えられる。

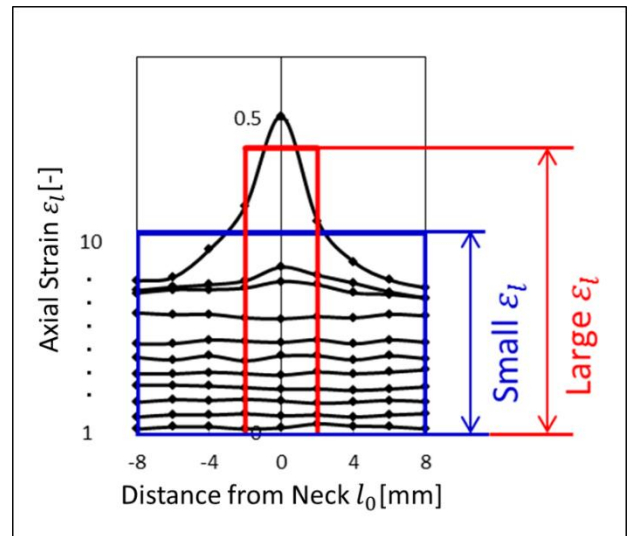


Fig.5 Strain Distribution

#### 5. 破断伸びと限界ひずみ

一般的な延性評価基準値は、破断伸びである。引張試験を行い、破断面を突き合わせて破断部をまたぐ初期標点間距離の伸びを測り算定する。これは公称ひずみで表示されるが、以後ここでは真ひずみ表示に統一する。また、限界ひずみの詳細な測定方法は一般的に考えられる中から、以下の 3 方法 (5.1, 5.2, 5.3) によった。供試材 Al 合金 A1100-O の物性値を表 1 に示す。

Table.1 Mechanical properties of A1100-O

Angle to rolling direction/°	0	45	90	mean	difference
n value [-]	0.265	0.214	0.233	0.232	0.035
r value [-]	0.508	0.461	0.662	0.523	0.124
Tensile strength [MPa]	88.8	83.8	85.0	85.3	3.125

$$\bar{x} = (x_0 + 2x_{45} + x_{90})/4$$

$$\Delta x = (x_0 + x_{90} - 2x_{45})/4$$

### 5.1 くびれを挟むゲージ長(G.L.)

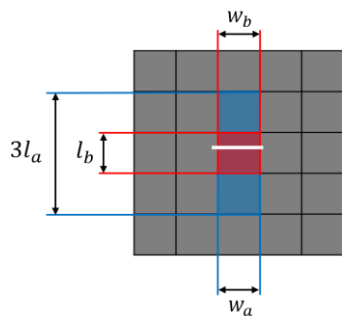
破断時のひずみ分布から、軸方向の軸ひずみ $\epsilon_l$ は明らかにゲージ長依存が認められる。ゲージ長が小さくなればなるほど $\epsilon_l$ は大きくなり、ゲージ長が大きくなればなるほど $\epsilon_l$ は小さくなる。本実験では、くびれを含む1格子と3格子にて計測を行った(Fig.6 参照)。

### 5.2 くびれの最近接格子(M-K)

Marciniak<sup>3)</sup>に倣い、くびれが発現し平面ひずみ変形へ移行した箇所の、くびれに最も近い格子を測定する方法を用いた(Fig.6 参照)。

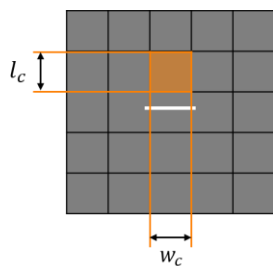
### 5.3 くびれと最近接格子の中間(Out/Safe)

平面ひずみ変形に移行したポイントをセーフ、試験片に光が通ったポイントをアウトとして二点の中間を限界ひずみとする方法を用いた(Fig.6 参照)。

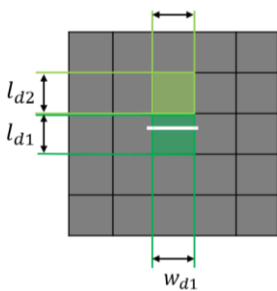


#### 1.くびれを挟むゲージ長依存 (G.L.)

※ $w_a$ は3格子の平均をとる



#### 2.くびれの最近接格子計測 (M-K)



#### 3.くびれと最近接格子の中間 (Out/Safe)

Fig.6 Gage length and M-K and Out/Safe

## 6. 破断の決定 (目視)

二軸試験の破断の決定のため、デジタルビデオカメラで観察し、試験片に光が通った時を破断とした。その際の画像を時間荷重線図の経過と対応させ、Fig.7, Fig8 に示す。

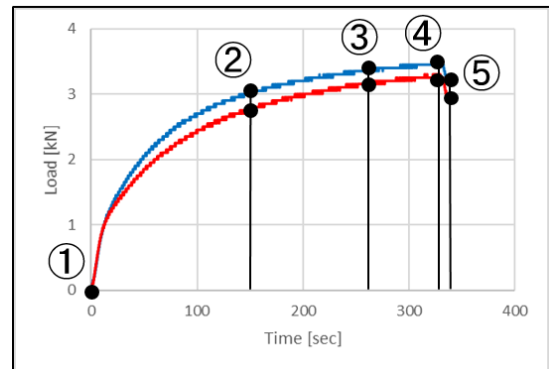


Fig.7 Load-Time curves

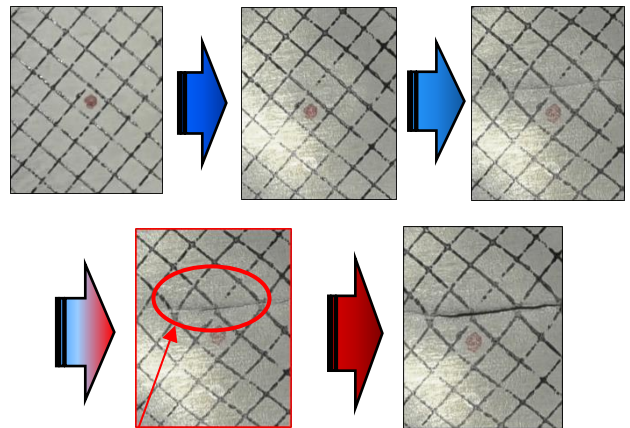


Fig.8 Select of fracture

## 7. 試験方法

圧延方向に対し $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  方向に切削加工した板厚 2mm の試験片 (Fig.8 参照) に 2mm 格子パターンをスタンプし、二軸試験を行った。クロスヘッドスピード (C.H.S.) は 1mm/min に設定し、速度比(1.0, 0.7, 0.3, 0, -0.5)にて、試験片中央部が破断終了するまで室温にて試験を行った。また、各特性値の算出およびグラフの作成にあたり、試験開始から終了までデジタルビデオカメラ用いてひずみ測定用の格子を観察し、その変化量を画像解析ソフトによって測定することよりひずみを算出した。

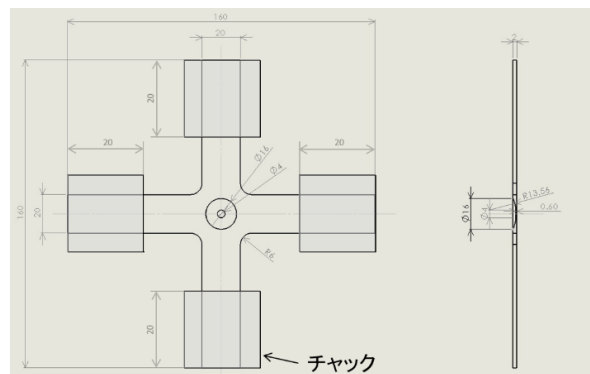


Fig.9 Geometries of in-plane biaxial test specimen

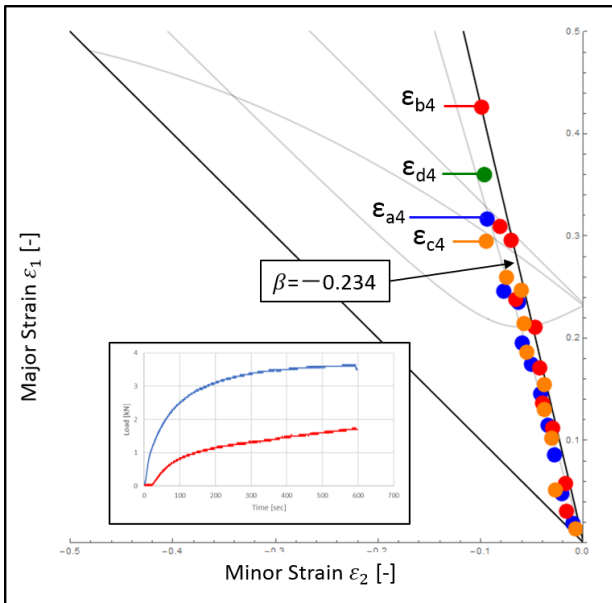
### 8. 引張試験及び平面ひずみ試験

二軸試験において、FLD の絞り領域にあたる試験を行うことは困難である。絞り領域では引張りと圧縮の組み合わせによって求めるが、二軸試験の場合では中央部において座屈が起き、破断しないので不可能であった。よって、引張試験を行うことができなかった。

平面ひずみは、1方向に引張りを加え、もう片方を固定する。その条件のもと、試験を行うとチャック部で破断してしまい、測定不可であった。中央部での破断を発生させるために中央部の厚みを薄くし、試験を行った。その試験結果を Fig.10 に示す。平面ひずみの場合、ひずみ比 $\beta$ は0となるが、本実験では-0.234 となった。これは、時間荷重線図から固定していた軸が引張られているために本来の平面ひずみ状態での試験ができていなかったと考えられる。また、 $r$  値が1以下であり、面内異方性も関係していると考えられる。

**Table.2 Limit strain by each method of measurement**

応力状態	測定方法	限界ひずみ $\epsilon_1$
平面ひずみ引張(0:1)	G.L.6 ( $\epsilon_{a4}$ )	0.317
	G.L.2 ( $\epsilon_{b4}$ )	0.426
	M-K ( $\epsilon_{c4}$ )	0.295
	Out/Safe ( $\epsilon_{d4}$ )	0.360



**Fig.10 Limit strain by each method of measurement with Load-Time curves**

### 9. 張り出し領域における試験

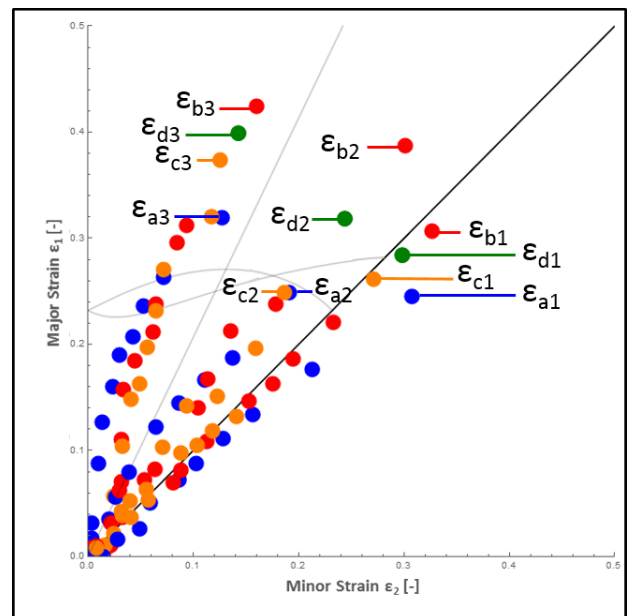
張り出し領域において、等二軸引張(1:1), 不等二軸引張{(0.7:1), (0.3:1)}の3つの応力状態で試験を行った。どの試験においても、軸ひずみ $\epsilon_1$ が最も大きい値だったのがG.L.2であり、最も小さい値だったのはG.L.6であった。

また、M-Kの値から、破断の伸びが最近接格子の伸びに比べてかなり大きいことがわかる。このことより、ゲージ長が大きければ限界ひずみは小さく、小さければ大きくなる。

限界ひずみという値は測定方法によって値を変える非常に曖昧なものといえる。

**Table.3 Limit strain by each method of measurement**

応力状態	測定方法	限界ひずみ $\epsilon_1$
等二軸引張(1:1)	G.L.6 ( $\epsilon_{a1}$ )	0.245
	G.L.2 ( $\epsilon_{b1}$ )	0.307
	M-K ( $\epsilon_{c1}$ )	0.262
	Out/Safe ( $\epsilon_{d1}$ )	0.284
不等二軸引張(0.7:1)	G.L.6 ( $\epsilon_{a2}$ )	0.249
	G.L.2 ( $\epsilon_{b2}$ )	0.387
	M-K ( $\epsilon_{c2}$ )	0.249
	Out/Safe ( $\epsilon_{d2}$ )	0.318
不等二軸引張(0.3:1)	G.L.6 ( $\epsilon_{a3}$ )	0.319
	G.L.2 ( $\epsilon_{b3}$ )	0.424
	M-K ( $\epsilon_{c3}$ )	0.374
	Out/Safe ( $\epsilon_{d3}$ )	0.399



**Fig.11 Limit strain by each method of measurement**

## 10. サークルによる限界ひずみ

追加実験として、これまで本実験では 2mm 格子のスタンプを用いてひずみの評価を行ってきたが、直径 5mm のサークルを用いてひずみの評価を行った。測定方法は Fig.6 と同様に 3 方法で行った。応力状態は不等二軸引張(0.3:1)で行った。

どの測定方法においても、格子パターンよりサークルパターンの限界ひずみの値が小さくなった。このことから、前述同様に、ゲージ長が大きければ限界ひずみは小さく、小さければ大きくなる。

Table.4 Limit strain by each method of measurement

応力状態	測定方法	限界ひずみ $\varepsilon_1$
不等二軸引張(0.3:1) Grid	G.L.6( $\varepsilon_{a3}$ )	0.319
	G.L.2( $\varepsilon_{b3}$ )	0.424
	M-K( $\varepsilon_{c3}$ )	0.374
	Out/Safe( $\varepsilon_{d3}$ )	0.399
不等二軸引張(0.3:1) Circle	G.L.15( $\varepsilon_{A3}$ )	0.196
	G.L.5( $\varepsilon_{B3}$ )	0.320
	M-K( $\varepsilon_{C3}$ )	0.165
	Out/Safe( $\varepsilon_{D3}$ )	0.211

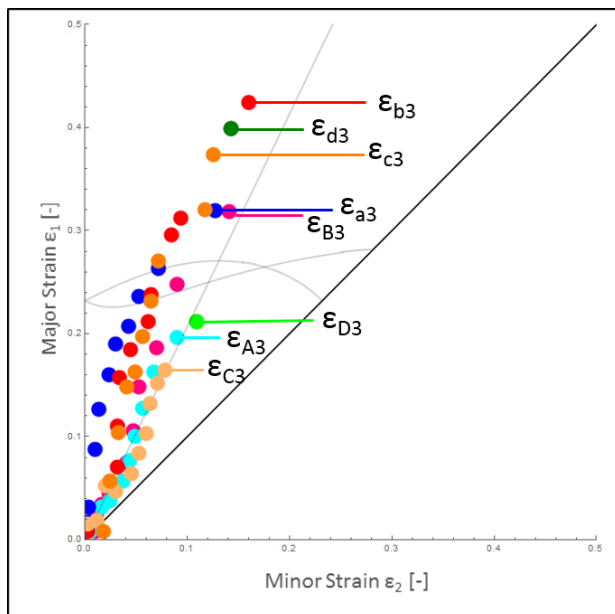


Fig.12 Limit strain by each method of measurement

## 11. 成形限界線

本実験で行った 3 方法による限界ひずみの測定を FLD に FLC(成形限界線)としてまとめた(Fig.12). Fig.12 からどの応力状態下においても G.L.2 の値が最も大きいことがわかる。また、測定方法によって、限界ひずみの値は大きく異なる。このことから、くびれに近いほど、ひずみが大きい値をとるためにゲージ長が大きくなるほどに限界ひずみが小さくなり、小さくなるほどに大きくなる。よって、限界ひずみの取り扱いには測定方法に留意して扱う必要がある。

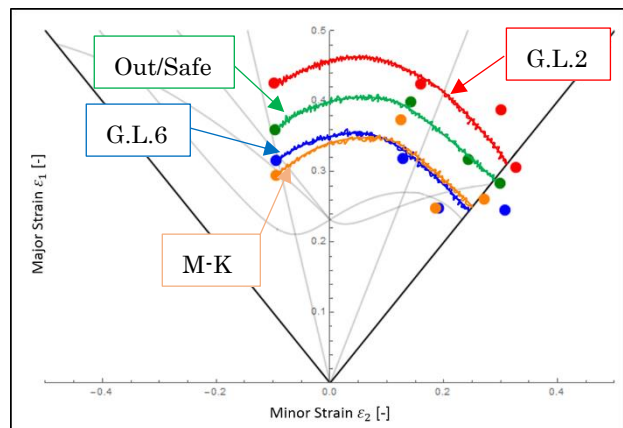


Fig.13 FLC by each method of measurement

## 12. 結言

プレス成形性の議論における『伸び』は、成形性の重要な定量化指標である。ひずみ速度、温度、応力ひずみ状態、負荷経路、結晶粒度などを変数とする、この『伸び』の同定にあたっては、本研究から示唆されるように、単純な応力状態下においても評価基準、定義によって大きく変動するので、特に材料開発においては、数値の取り扱いに留意することが肝要である。

### 謝辞

本研究遂行にあたり、度重なるご指導ならびに助言を頂いた法政大学大学院、指導教員である大澤泰明教授に深く感謝を致します。共に研究生活を行うとともに、常に協力および適切な助言を頂いた、加工工学研究室、修士課程2年の仲嶋雄大氏に心より感謝いたします。また、研究活動において数々のご協力頂いた同研究室の皆様にも深く感謝致します。

### 参考文献

- 1)日本アルミニウム協会,アルミニウム 第21巻 第89号,(2014),pp.8-11
- 2)日本アルミニウム協会,アルミニウム 第21巻 第90号,(2014),pp.18-24
- 3)Marciniak,Z.andKuczynski,K.,*Int.J.Mech.Sci.*, 9,(1967),pp.609-620