

# 有限要素法と離散化最適化手法に基づく 高張力鋼の結晶集合組織の最適設計

大阪工業大学 工学部 機械工学科

解春雷

(平成 12 年度外国人技術者養成援助助成 AF-2000030)

## 1. 緒言

近年、環境保護の立場から自動車業界では車体重量の軽量化により燃費向上を図ろうという試みが活発になっている。その中の1つとして自動車ボディにおいてはその比強度の高さから高張力鋼板の採用が推しすすめられています。しかし、高張力鋼板には異方性の強さ、伸びが低い、 $r$  値が低いなどに起因する成形性の悪さが問題とされている。しかし、かつてから考えられているような  $n$  値、 $r$  値といった材料試験によるマクロ的な材料特性が成形性と相関がない場合があるのが実情である。この事から成形性を材料試験から予測する事に対する限界は明らかであると言える。その後の多くの実験検証に基づき、その成形性はその結晶集合組織、結晶粒内での各すべり系毎の硬化発展、多相材料においては異なる結晶集合組織、硬化発展を有する各相の割合、相互作用が大きく影響を与える事が分かっている。

また、コンピュータの進歩を背景として、結晶塑性理論に基づく塑性加工有限要素シミュレーション手法の開発・利用が活発になっている。また、これら理論を支える単結晶・多結晶金属の結晶微視構造を計測する実験装置、実験技術の進歩も忘れてはならない。X線回折解析による結晶方位分布自動計測（極点図、ODF 解析）、結晶粒単位の結晶方位解析（EBSD 解析）、元素分析（ESCA, EPMA）、画像処理による結晶粒形状計測、X線による残留応力解析、SEM・AFM によるすべり帯・塑性変形局所化観察、レーザー顕微鏡による微視表面構造観察などが挙げられる。圧延加工における加工熱処理などにより得られた板材の微視的構造を示す結晶集合組織、各すべり系毎の硬化発展に代表される結晶形態因子を実験装置から取り込み、さらに塑性加工に伴う材料の結晶形態変化と硬化発展を予測できる結晶塑性有限要素解析手法の開発により、高強度・軽量・高成形能材料の創製を目指したコンピュータシミュレーションの世界が広がるものと考えられる。

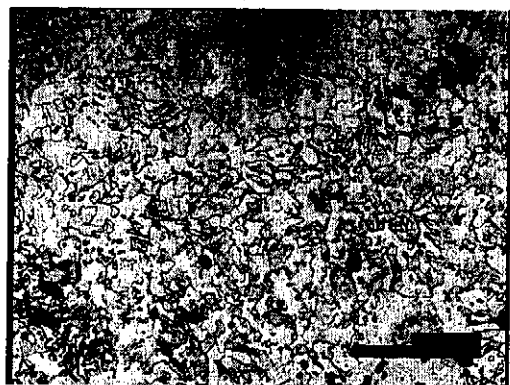
本研究ではフェライト（軟質相）、マルテンサイト（硬質相）から構成される2相高張力鋼(dual phase steel)の各相が変形能に与える影響に焦点を当てた。各相の硬化発展、割合、結晶集合組織を考慮した材料モデルを採用した有限要素法によって有限要素仮想材料試験を行い、結晶形態因子がひずみの局所化および応力-ひずみ関係に与える影響を検討した。2相高張力鋼板としては軟質であるフェライト相に約5~30%の割合で硬質のマルテンサイト相が含有する材料をターゲットとした。かつては良い成形性を得るためにはより均一な相を持つ单相の材料が良いとされていたが近年、日本での研究により性質（硬

度、硬化発展等）の異なる相（例としてフェライト相、パーライト相、ベイナイト相、オーステナイト相、マルテンサイト相）が一定の割合で混合された鋼が高強度高成形能化に有効である事が明らかとなった。これらは複合組織鋼の名称で親しまれている。この中でもフェライト相、マルテンサイト相からなる2相高張力鋼板では伸びは軟質なフェライト相が受け持ち、強度は硬質なフェライト相が受け持つといった各相の長所を生かした他の同程度の引張り強さを持つ高張力鋼板と比べると比較的伸びが大きいのが特徴である。しかし、実加工の現場では更なる伸びの高さが要望されているといった現実も在る。

このような現実を背景に本研究では先の軟質相に軟質鋼を硬質相に硬質鋼を想定した相毎に異なる結晶集合組織、硬化発展を有する仮想材料モデルに基づく2相高張力鋼板の仮想材料試験解析を行なった。解析条件としては軟質相であるマトリクスに硬質相が5~30%の割合で含有した材料モデルを採用した。この仮想材料試験解析より硬質相の含有量が応力-ひずみ関係に与える影響を明らかにすると共に本複合組織材料モデルの有効性を示す。更に本複合組織材料モデルを採用した板成形解析を行い、各相の結晶集合組織、硬化発展、硬質相の含有量等が成形性に与える影響を明らかにする。金型には1991年のNUMISHEET 国際会議で示されたドイツ機械学会提案のVDIベンチマーク金型を採用した。

## 2. 組織

例として Photo.1 に主としてフェライト、マルテンサイト2相からなる100kgf/mm<sup>2</sup>級高張力鋼板の光学顕微鏡写真を示す。



16.7 μm

Photo.1 Microstructure of 100kgf/mm<sup>2</sup> grade steel  
Photo.2にこの鋼板に950℃,30分間の焼鈍処理を施した

材料の光学顕微鏡写真を示す。



16.7 μm

Photo.2 Microstructure of annealed steel

### 3.材料物性

本研究では軟質鋼を軟質相、硬質鋼を硬質相に想定した2相鋼の材料物性、成形性予測を目的とすることから以下にその物理的根拠を示す。

まず初めに軟質鋼、2相鋼、硬質相の3材料の圧延方向0°、45°、90°3方向の応力-ひずみ関係をFig.1に示す。

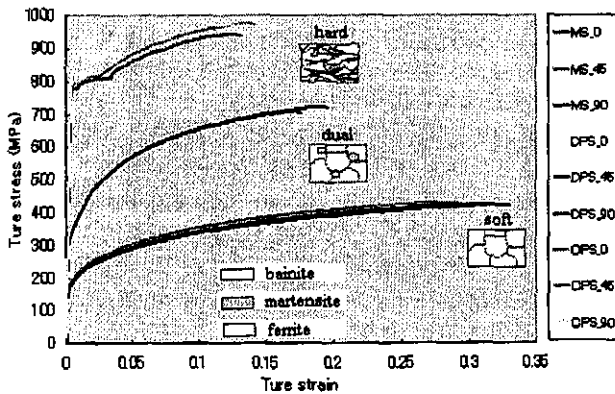


Fig.1 Relationship between true stress and true strain of Three materials

2相鋼の伸び、引張り強さは軟質鋼と硬質鋼のほぼ中間的な値を示していることがわかる。つまり、硬化則が中間的な値をとることが推測される。また、2相鋼は初期の硬化が強い性質を示していることが特徴的である。

次にオイラー角座標空間上の優先方位をFig.2に示す。

Fig.3, 4に示す結晶集合組織の解析結果から軟質鋼では{111}<110>、{111}<211>からなるγファイバでの強い集積が認められる。これに対し、高張力鋼材料である2相鋼ではこのγファイバに加え{001}<110>、{113}<110>、{111}<110>からなるαファイバへの集積が認められる硬質鋼ではγファイバへの集積が見られなくなり{001}<110>、{113}<110>、{223}<311>が見られる。これらの結果から2相鋼は軟質鋼と硬質鋼が持つ結晶集合組織の中間的なものであることが推測できる。

更にFig.5に典型的なフェライト、マルテンサイトの結晶方位と軟質相と想定した軟質鋼、硬質鋼の結晶方位の違いを示す。軟質鋼は典型的なフェライト相の優先方位とほぼ一致している。しかし、硬質鋼は典型的なマルテンサイト相と若干、異なることがわかる。これは硬質鋼のマトリクスがベイナイト相である事による違いであ

ると考えられる。しかし、本解析では変形を受け持つ相が軟質相であるフェライト相である事からこの優先方位の違いは大きな影響を与えないと想定した。

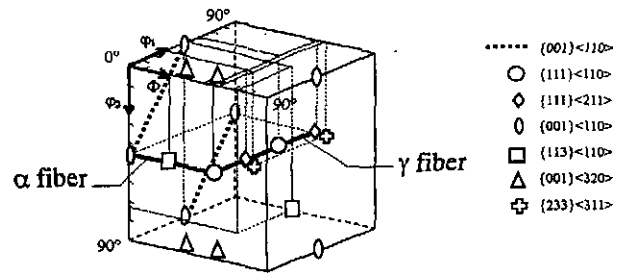
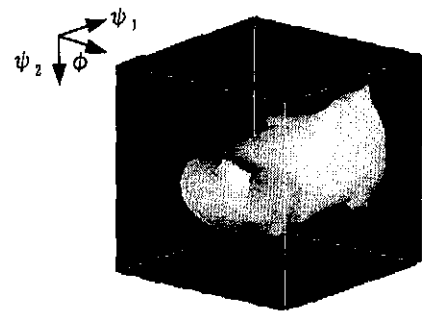
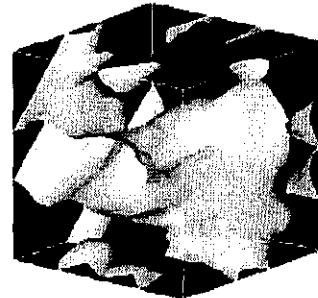


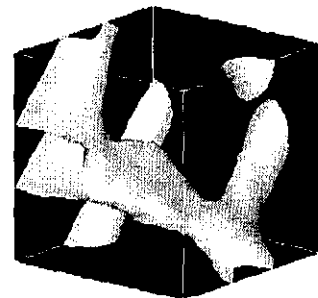
Fig.2. Reduced Euler angle coordinate space with certain fibers and selected orientations



(a) soft phase steel (DDQ)

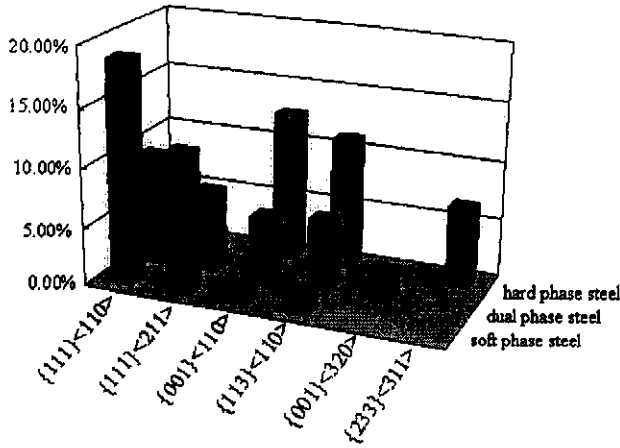


(b) dual phase steel (DP600ZE)



(c) hard phase steel (CP800)

Fig.3 35%-maximum density surface of ODFs, skeleton lines and selected ori



	{111}<110>	{111}<211>	{001}<110>	{113}<110>	{001}<320>	{233}<311>
soft phase steel	18.8%	11.8%	1.2%	1.8%		
Dual phase steel	9.4%	6.9%	5.4%	5.9%	2.3%	
Hard phase steel	2.2%		12.7%	11.2%	0.0%	6.7%

Fig.4. Volume fractions of the main texture components

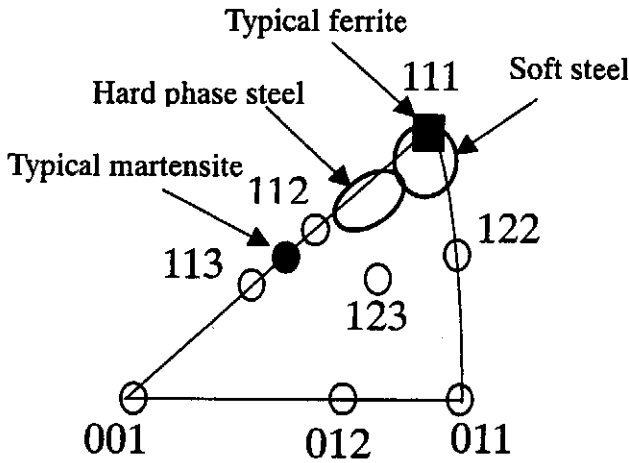


Fig.5. Comparison of preferred orientation

#### 4.弾/結晶粘塑性有限要素法

結晶座標系で定義される Cauchy 応力の客観性のある速度の式<sup>6)7)8)9)</sup>を示す。

$$\begin{aligned}
 \dot{\tilde{\sigma}} &= C^e : D^e \\
 &= C^e : (D - D^P) \\
 &= C^e : (D - \sum_{(a)} \dot{\gamma}^{(a)} P^{(a)}) \\
 &= C^e : D - \sum_{(a)} R^{(a)} \dot{\gamma}^{(a)} \\
 R^{(a)} &= C^e : P^{(a)} \\
 P^{(a)} &= (s^{*a} m^{*a} + m^{*a} s^{*a}) / 2
 \end{aligned}$$

$\dot{\tilde{\sigma}}$ : the corotational rate of Cauchy stress

$C^e$ : fourth order tensor elastic modulus

$D$ : the rate of deformation tensor

$D^P$ : the rate of plastic deformation tensor

$P^{(a)}$ : Schmid tensor

$m^{*a}$ : the unit vector normal to the slip plane

$s^{*a}$ : the unit slip direction vector

せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}^{(a)}$ に対する構成式として Hutchinson, Pan-Rice の指数則を用いる。

$$\dot{\gamma}^a = \dot{a}^a \left[ \frac{\tau^a}{g^a} \right] \left[ \left| \frac{\tau^a}{g^a} \right| \right]^{m-1}$$

$\tau^a$ : resolved shear stress

$g^a$ : critical resolved shear stress

$m$ : coefficient of strain rate sensitivity

各滑り系毎の硬化発展方程式を示す。

$$\dot{g}^a = \sum_{b=1}^n h_{ab} |\dot{\gamma}^b|$$

$$h_{ab} = h(\gamma) q_{ab}$$

$$h(\gamma) = H_0 \operatorname{sech}^2 \left( \frac{H_0 \gamma}{\tau_s - \tau_0} \right)$$

$$\dot{\gamma} = \sum_{a=1}^{48} \dot{\gamma}^a$$

$$q_{ab} = 1$$

$q_{ab}$ : Zhou's latent hardening modulus

$h(\gamma)$ : hardening coefficient

$H_0$ : hardening modulus

$\tau_0$ : initial critical resolved shear stress

$\tau_s$ : saturation strength

3 項の物理的事実より本解析では軟質鋼を軟質相、硬質鋼を硬質相と仮定した材料モデルを提案するため各相の硬化発展式の同定を行った。Table.1 に軟質鋼および硬質鋼の引張り試験により得られた応力-ひずみ曲線と X 線回折解析により得られた結晶集合組織のデータを用いて同定した軟質相と硬質相の結晶塑性材料特性値を示す。

Table.1 Material parameters for crystal Models

	Soft phase	Hard phase
$\tau_0$	66.0 MPa	258.5 MPa
$H_0$	206.0 MPa	246.0 MPa
$\tau_s$	156.0 MPa	375.0 MPa
Young's modulus	210 GPa	
Density	$7.8 \times 10^{-9} \text{ MPa} / (\text{mm} / \text{s})^2$	
Poisson's ratio	0.3	
Reference Strain rate	0.5 /s	
Strain rate sensitivity exponent	0.03	
Elastic anisotropy parameters	$C_{11}$	237.0 GPa
	$C_{12}$	141.0 GPa
	$C_{44}$	116.0 GPa

### 5.解析モデル

引張り試験片には Fig.6 に示す寸法のものを選定した。解析条件を以下に示す。材料物性については Table1 に示す結晶塑性材料特性値およびX線回折解析により得られた結晶集合組織の計測データを採用し、これを用いて有限要素モデルを作成し有限要素仮想材料試験を行った。

- Size of specimen : 15×5mm, t=0.6mm
- Material of specimen : dual phase steel
  - soft phase: mild steel
  - hard phase: complex phase steel
  - hard phase content 5~30%
- Number of integration point : 2400
- Integration type : SRI

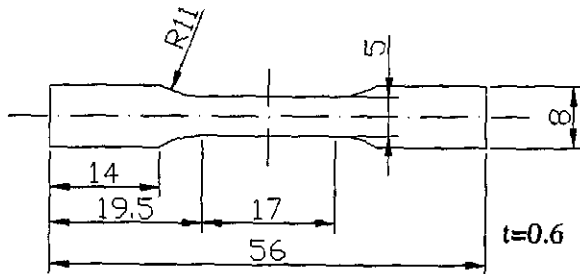


Fig.6 Specimen

Fig.7 に軟質層であるマトリクスに対して硬質相を5~30%の割合で変化させた材料モデルの ODF 解析結果を示す。

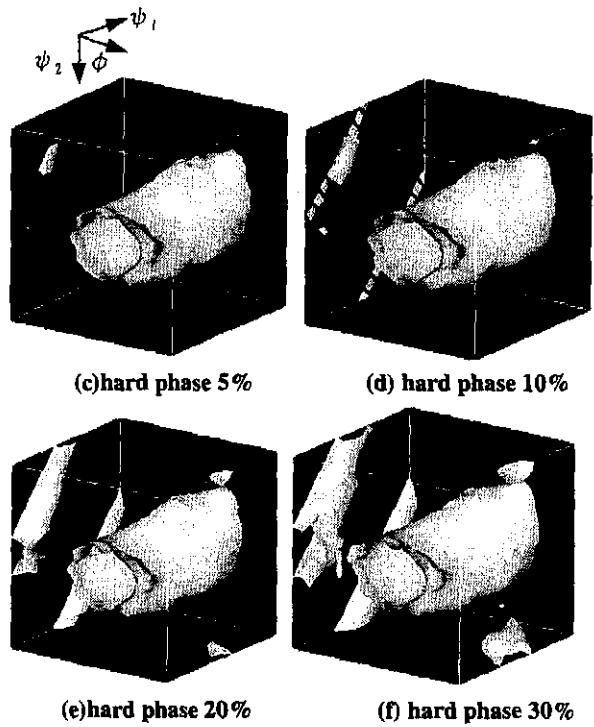
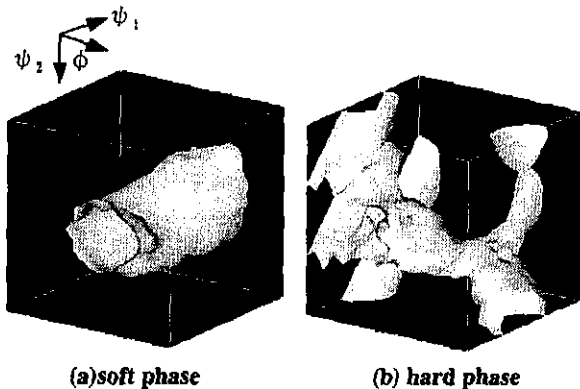
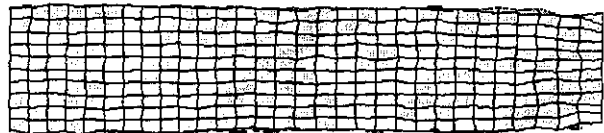


Fig.7 Maximum density surface of ODFs

### 6.有限要素解析結果

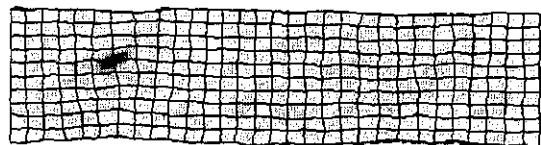
Fig.8 に各材料モデルの引張り試験解析結果を示す。硬質相含有量の増加とともにひずみの局所化の傾向が顕著になっている事がわかる。また、Fig.9-11 に材料各モデルの応力-ひずみ関係、引張り強さ、伸び、降伏比の値を示す。この結果では硬質相含有量 5~30%でその増加とともに引張り強さが増加し、伸びが低下するという複合則を満足する傾向が示された。



(a) soft phase



(b) hard phase 5%



(c) hard phase 10%



(d)hard phase20%



(e)hard phase30%

Fig8 Thickness distributions

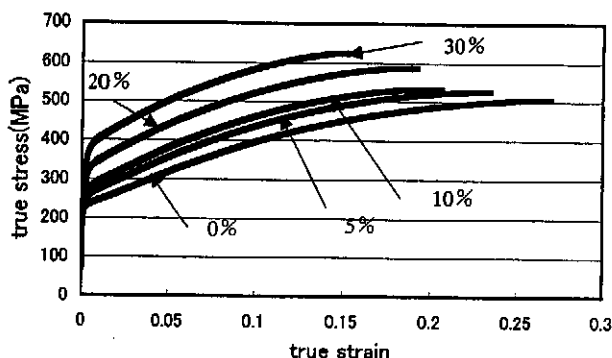


Fig.9 Relationship between true stress and true strain

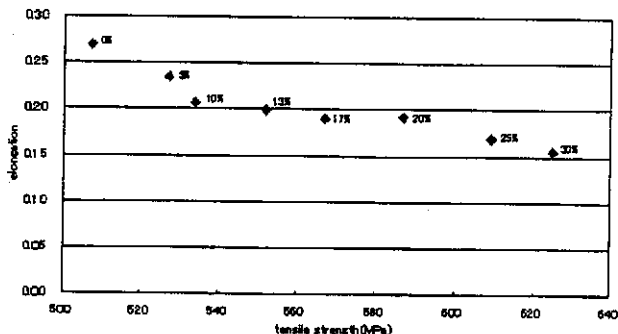


Fig10 Mechanical properties

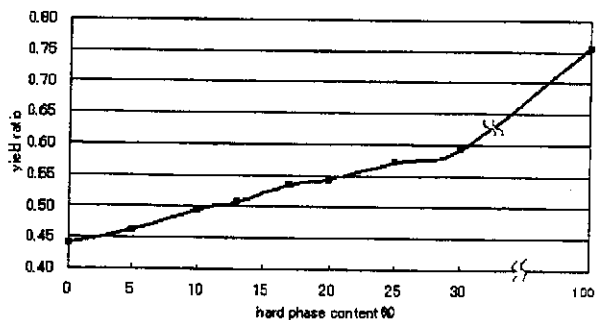


Fig11 Relationship between hard phase content and yield ratio

## 7.成形性評価

以上のように軟質相、硬質相個々に異なる硬化発展、結晶集合組織を採用した複合材料モデルにより、その材料物性値そして機械特性値の違いが考慮できる事が示された。次にこの材料モデルを採用した板成形解析を行い成形性（最小板厚ひずみで評価）の評価を行った。金型には Fig.12 に示す 1991 年の NUMISHEET 国際会議で示されたドイツ機械学会提案の VDI ベンチマーク金型を採用した。

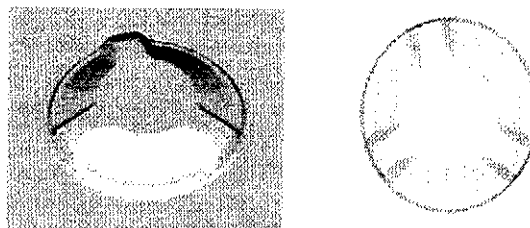


Fig.12 Die shape (VDI benchmark)

板成形解析条件を以下に示す。

- Size of specimen : □344mm, t=1.5mm
- Material of specimen : dual phase steel  
soft phase steel  
hard phase:phase steel  
hard phase content 5~30%
- Number of integration point : 51200
- Integration type : SRI

各材料モデルの最小板厚ひずみの値を Fig.13 および Table.2 に示す。本解析では硬質相の含有量を 0, 5, 10, 13, 17, 20, 25, 30%と変化させた 8 種類の材料モデルを採用し、硬質相が成形性（最小板厚ひずみで評価）に与える影響を検討した。Fig.13 に示すように 0~13%では硬質相の含有量の増加とともに単調な成形性の低下が見られるが 13, 17%では成形性に变化はなく、20%で再び成形性が低下した後 20~30%でも成形性の变化は得られなかった。

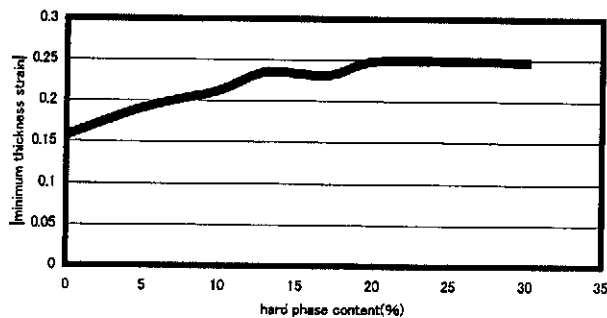


Fig13 Relationship between hard phase content and minimum thickness strain

Table.2 minimum thickness strain

Hard phase content(%)	minimum thickness strain
0	0.157
5	0.191
10	0.212
13	0.235
17	0.231
20	0.248
25	0.249
30	0.247

Fig14に最も良い成形性を示した硬質相0%の材料と最も悪い成形性を示した硬質相25%の材料の板厚ひずみ分布を示す。両者ともエッジ部でかつ板の縁から最も遠い部分にひずみの局所化が起こっていることがわかる。また、この付近のしわ押さえ部からの流入状態に違いが生じている事が分かる。

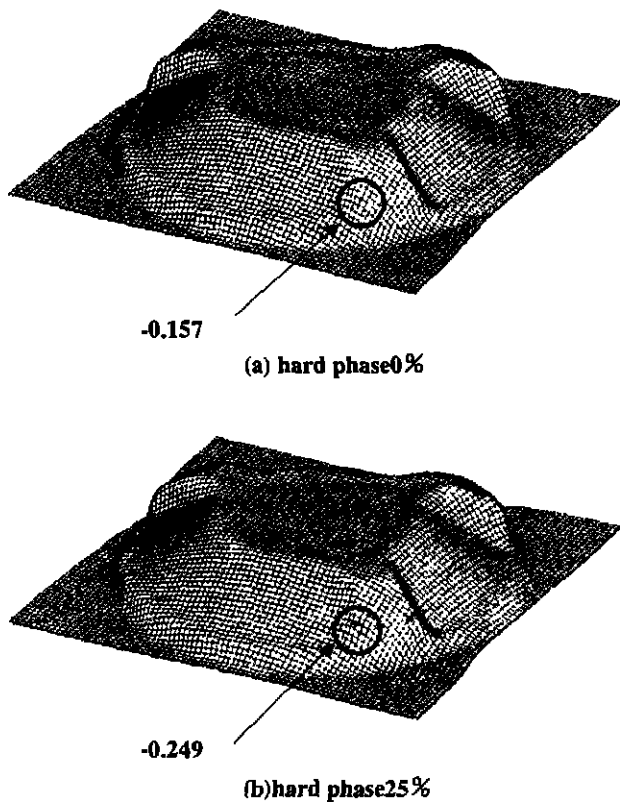


Fig14 Thickness strain distribution

## 8.結言

仮想材料試験解析より硬質相の含有量が増加する事により伸びが低下し、初期降伏応力および引張り強さが上昇するという複合則を満たす結果が得られた。同様に硬質相の含有量により降伏比がどのように変化するかを検討した結果、これも硬質相の高い降伏比、軟質相の低い降伏比を反映した複合則を満足する事が確認された。

更に本複合組織材料モデルを採用した VDI ベンチマーク金型による板成形解析を行い、硬質相の含有量等が成形性に与える影響を検討した。本結果では 0~13%では硬質相の含有量の増加とともに単調な成形性の低下が見られるが 13, 17%では成形性に変化はなく、20%で再び成形性が低下した後 20~30%でも成形性の変化は得ら

れなかった。これらの結果より集合組織を考慮した硬質相の含有量を変化させる事によりその成形性をコントロールできる事が確認された。

## 9.参考文献

- 1) K. Lucke and M. Holscher: Textures and Microstructures, 14-18(1991)585-596
- 2) Thyssen Krupp stahl AG : 40 TH MWSP CONF . PROC . , ISS (1998)
- 3) Charles Barrett and T B Massalski, : "Structure of metals", (1980), Inter National Materials Science and Technology, Volume35
- 4) Asaro, R.J. and Rice, J.R. : "Strain Localization in Ductile Single Crystals", J. Mech. Phys. Solids, 25(1977) , pp.309-338.
- 5) Hill, R. and Rice, J. : "Constitutive Analysis of Elastic-Plastic Crystals at Arbitrary Strain", J. Mech. Phys. Solids, 20(1972) , pp401-413.
- 6) Xianghui Dong, Sheng Ping Wang, Eiji Nakamachi, : "Dynamic explicit finite element analysis", Nakamachi Lab report(1996)
- 7) Hutchinson, J.W. , : "Bounds and Self-Consistent Estimates for Creep of Polycrystalline Materials", Proc. R. Soc. Lond, A384(1975), pp.101-127.
- 8) Pan, J. and Rice, J. R. : "Rate Sensitivity of Plastic Flow and Implications for Yield-Surface Vertices", Int. J. Solids Structure, 19, 11(1983) , pp.973-987
- 9) R.J.Asaro, : "Crystal plasticity", Journal of applied Mechanics, Vol.50(1983), pp921-934
- 10) 山崎一正, 水山弥一郎, 岡賢, 徳永良郎, : "超高強度鋼板の曲げ性におよぼす金属組織の影響—超高強度鋼板の加工性に関する研究 I", 塑性と加工, 第 36 巻, 第 416 号(1995), pp973-978
- 11) 山崎一正, 水山弥一郎, 徳永良郎, : "超高強度鋼板の加工性におよぼす金属組織の影響—超高強度鋼板の加工性に関する研究 II", 塑性と加工, 第 38 巻, 第 433 号(1997), pp159-164
- 12) 岩谷二郎, 田中福輝, 白沢秀則, 宮原征行, : "超高強度冷延鋼板のプレス成形性", 塑性と加工, 第 35 巻, 第 404 号(1994), pp1122-1127
- 13) 白田松男, 樋渡俊二, 佐久間康治, 片山知久, 高橋学, : "変態誘起塑性を有する高強度鋼板の張出し成形性", 塑性と加工, 第 39 巻, 第 444 号(1998), pp77-81
- 14) 福本紀, 尾野忠, 由田征史, : "超深絞り用高強度冷延鋼板のプレス成形性", 塑性と加工, 第 35 巻, 第 404 号(1994), pp1103-1108
- 15) 飯塚栄治, 三浦和哉, 比良隆明, 加藤俊之, : "高強度鋼板の深絞り性に及ぼす表面粗度の影響", 塑性と加工, 第 35 巻, 第 404 号(1994), pp1097-1102
- 16) 井上雄, 高橋恒夫, : "X線および中性子線回折", 軽金属(1983), pp230-239