

刈谷産業振興センター

塑性加工セミナー2023

～ 進化を続ける高精度板金プレスシミュレーション ～

2023年9月27日

JSOL NTT DATA Trusted Global Innovator
NTT DATA Group

商標について

本資料に掲載されている商品またはサービスなどの名称は、それぞれの所有者の商標または登録商標です。

Ansys®、及びその他すべてのANSYS, Inc.の製品名は、ANSYS, Inc.またはその子会社の米国およびその他の国における商標または登録商標です。

本資料では、下表に示す通り一部の製品名に簡易表記を用いています。

正式名称	簡易表記
Ansys LS-DYNA	LS-DYNA
Ansys LS-PrePost	LS-PrePost
Ansys LS-OPT	LS-OPT
Ansys LS-TaSC	LS-TaSC

「高精度板材成形シミュレーションのための 材料モデルとDIC活用」

広島大学名誉教授、株式会社CEM研究所代表取締役

吉田 総仁 様（株式会社JSOL エンジニアリング事業本部 技術顧問）



広島大学

高精度板材成形シミュレーションのための 材料モデルとDIC活用

Key words:

異方性降伏関数, 異方硬化モデル,
Yoshida-Uemori model,
成形シミュレーション, スプリングバック,
DIC, 材料データベース

広島大学名誉教授／(株)CEM研究所
吉田 総仁 (Fusahito Yoshida)



概要

1. はじめに

- 板材成形シミュレーション高精度化における材料モデルの重要性

2. 異方性とその発展のモデル

- 6次応力多項式型の3D異方性降伏関数(YSD6)
- MatYLDによる材料パラメータ同定
- 異方性発展(異方硬化)モデル(2015)の提案
- 成形シミュレーションへの応用

3. 大ひずみ繰返し塑性モデル: Yoshida-Uemori model

- Yoshida-Uemori (Y-U) model
- 成形シミュレーションとくにスプリングバック予測への応用
- MatParaによる材料パラメータ同定
- 非線形弾性モデルの検討

4. DIC計測・解析の材料試験への活用

- DIC技術の利点
- 単軸引張りDIC計測を利用した大ひずみ加工硬化特性の決定
- 引張り曲げを利用した大ひずみ加工硬化特性の決定
- 平面ひずみ引張り試験

5. まとめ

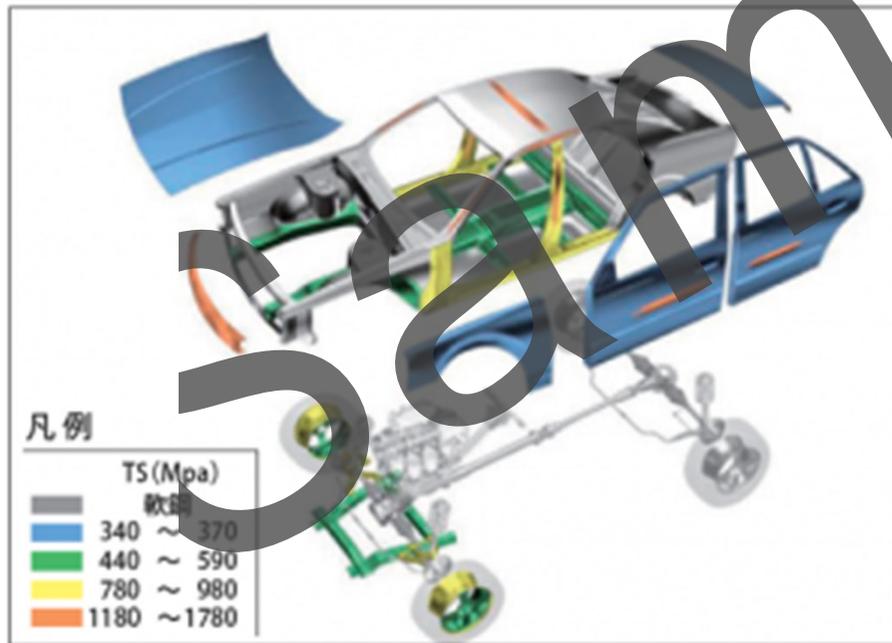
中心課題は

高機能・難加工 板材の成形技術

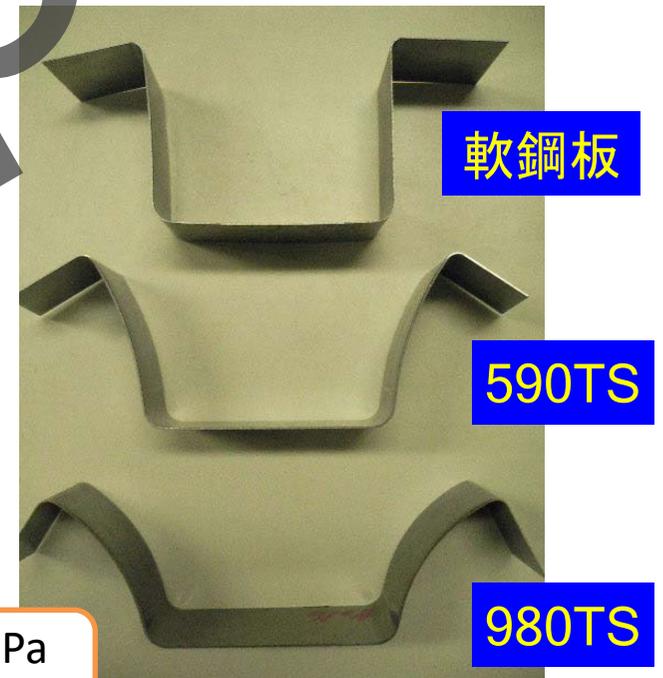
- 高強度
- 軽量
- 高耐食性
- 電(磁)気特性
など

- 成形割れ・しわ
- スプリングバック
- 面ひずみ
など

高張力鋼板, アルミニウム, マグネシウム, チタン, ステンレス・銅合金などのH材, クラッド板など

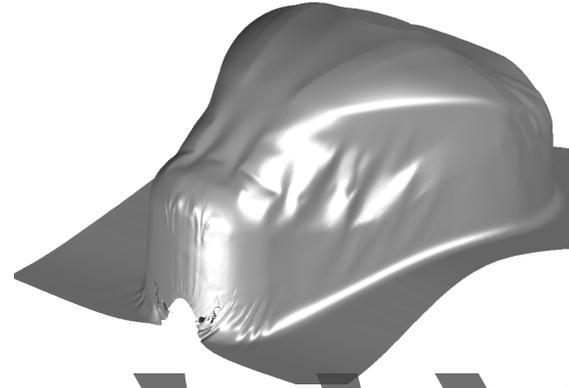
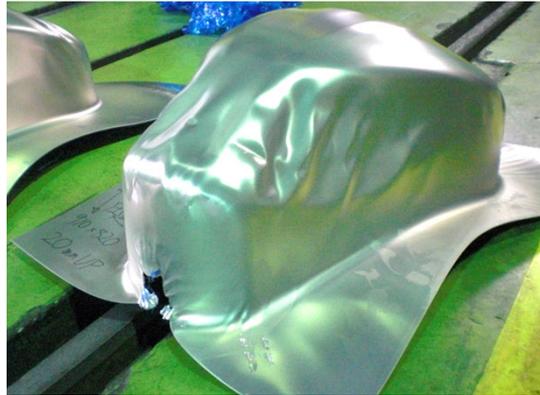


高張力鋼板(ハイテン)の使用
(自動車ホワイトボディ)



鋼板の冷間加工
は1470MPa

成形シミュレーションの高精度化のための重要項目



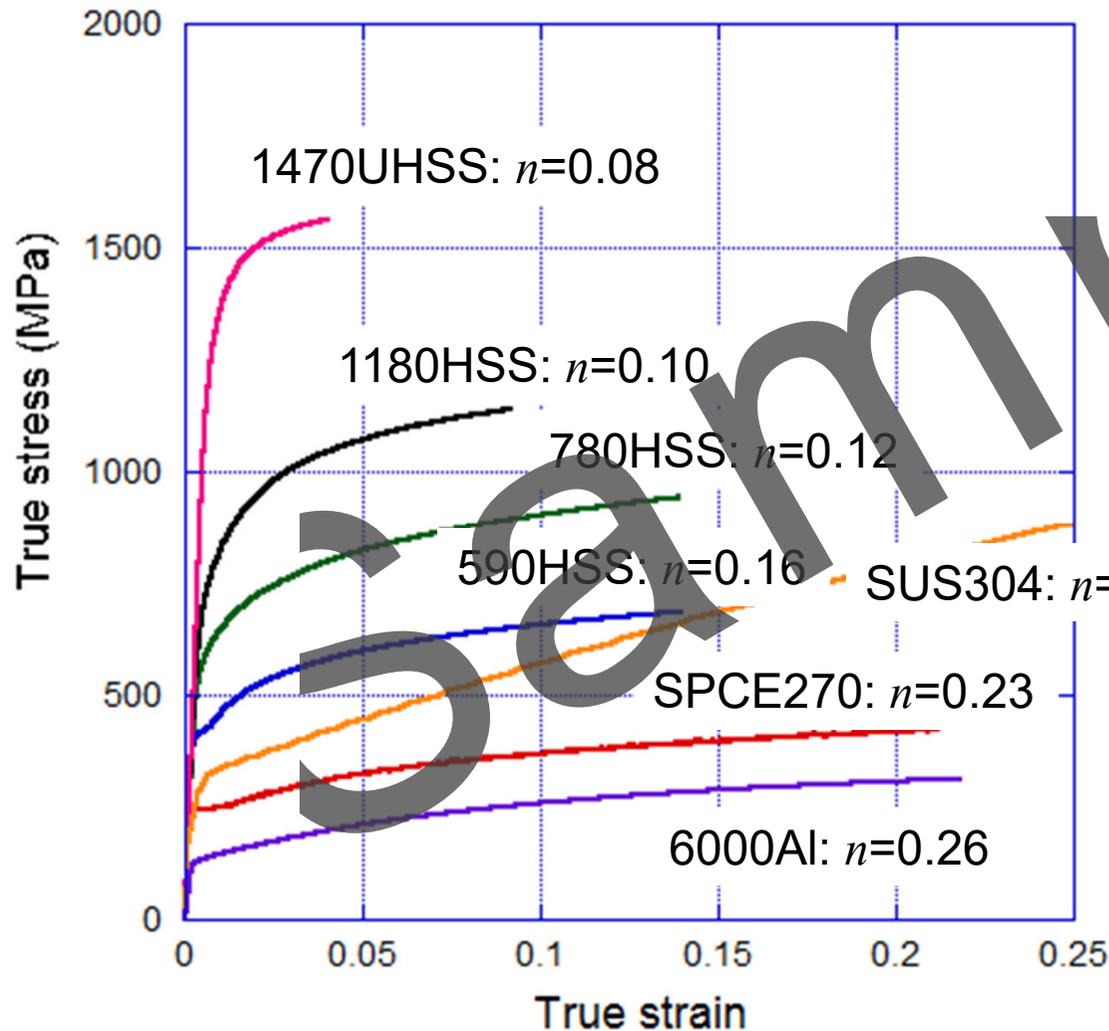
Simulation by LS-DYNA

2005年頃まで
でほぼ完成

- FEM解析法と要素タイプの選択(新しい要素の開発), 接触判定アルゴリズムなど
- **材料モデル**(弾塑性構成式)
+ **成形限界クライテリオン**(FLD, 縁割れ限界, 引張り曲げ限界など)
 - 現在, 最も研究が盛ん
 - 最近注目されている
- 金型のたわみの考慮

スプリングバックの大きな材料

- 塑性変形抵抗 σ の大きな材料(ハイテンなど)
- ヤング率 E の小さな材料(アルミニウム, チタン, マグネシウムなど)



スプリングバック

$$\frac{\Delta\theta}{\theta} = \frac{\Delta\kappa}{\kappa} = \frac{M_0}{EI}$$

塑性変形抵抗

パネル剛性

$$= \frac{1}{3} \left(\frac{\sigma}{E} \right) \left(\frac{R}{t} \right)$$

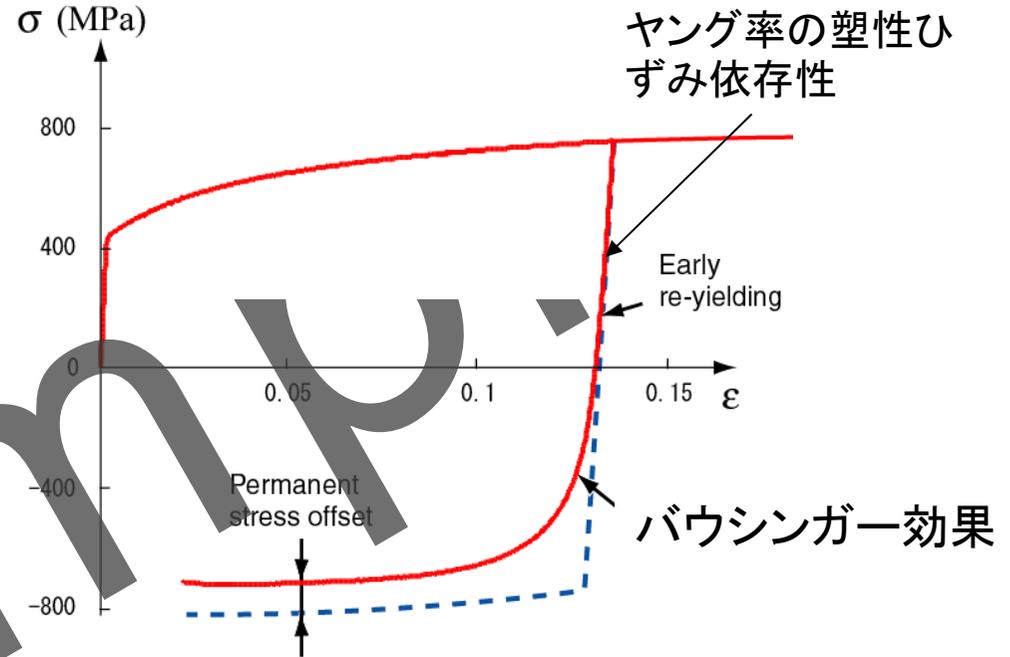
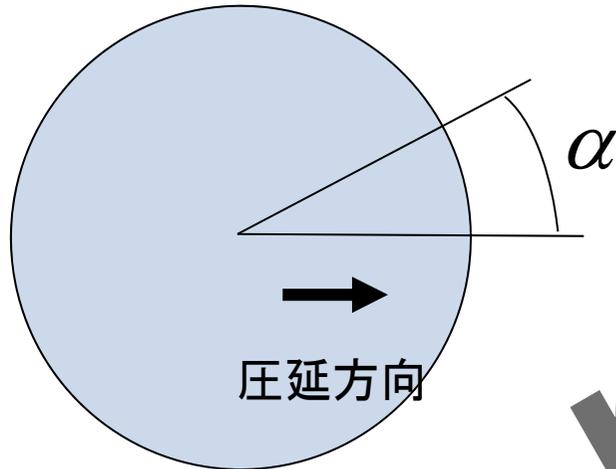
曲げ半径

ヤング率

板厚

材料モデル(=弾塑性特性の数式モデル):

異方性, ヤング率の塑性ひずみ依存性, 加工硬化(バウシ
ンガー効果も含む)のモデル化が重要



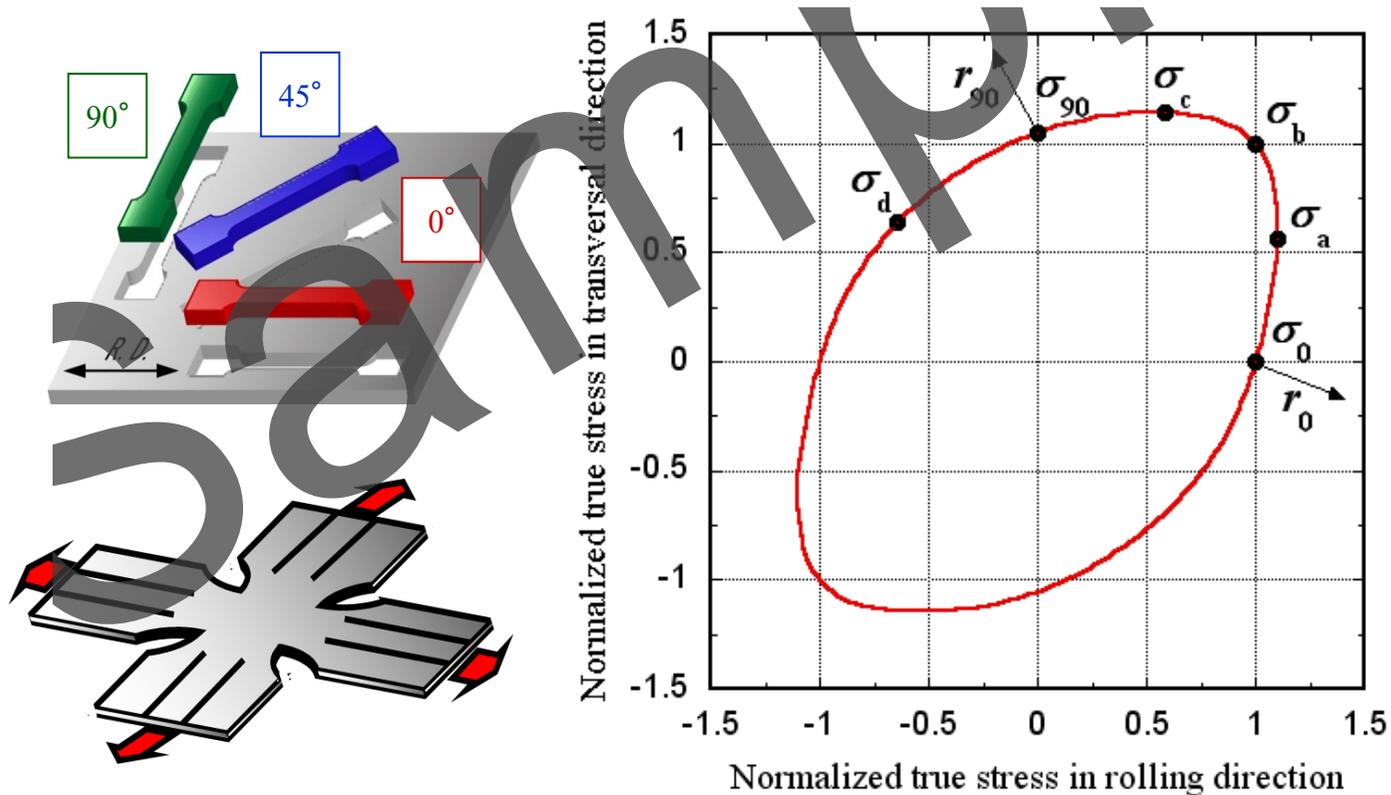
円筒深絞りにおける耳の発生



スプリングバック



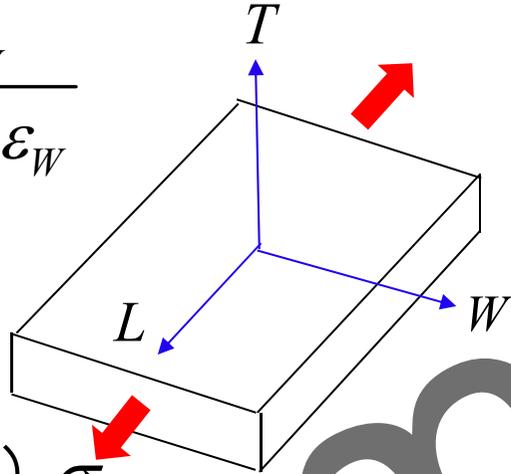
異方性降伏関数と 成形シミュレーションの高精度化



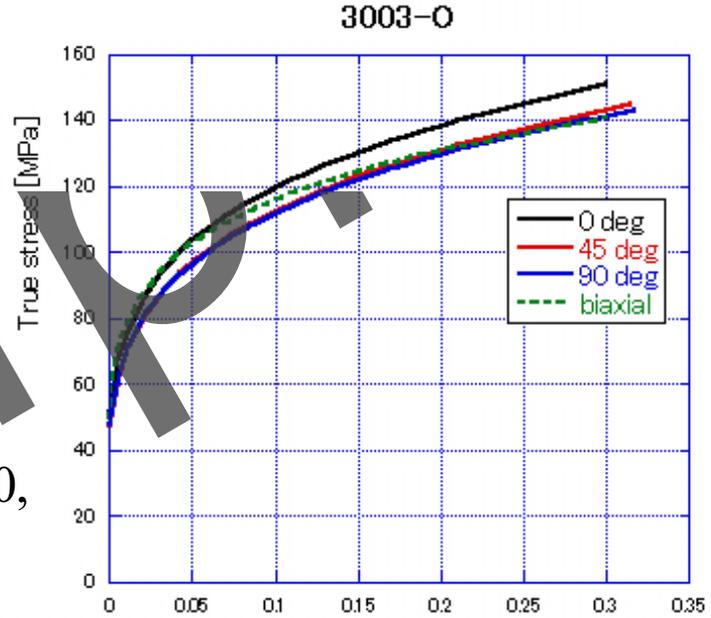
板の異方性とその表現：異方性降伏関数

変形(r値)異方性と応力の板方向依存性

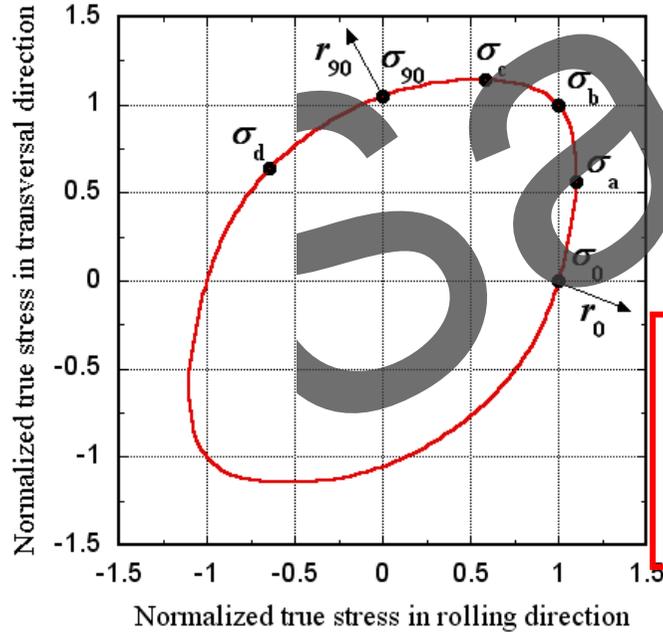
$$r = \frac{\epsilon_W}{\epsilon_T} = - \frac{\epsilon_W}{\epsilon_L + \epsilon_W}$$



$$\text{Flow stress} = \sigma(\alpha)$$



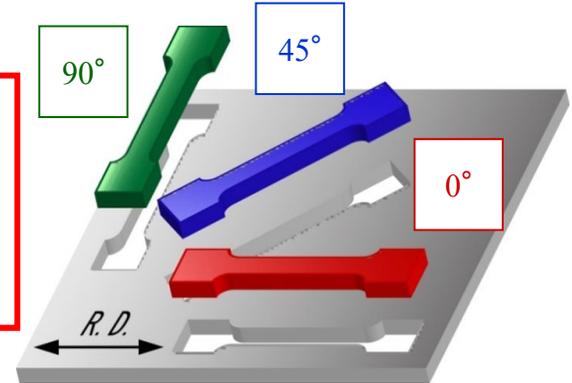
降伏曲面(関数) σ



$$f = \phi(\sigma) - Y = 0,$$

$$D^p = \frac{\partial f}{\partial \sigma} \lambda$$

- 材料の弾塑性判別
- 塑性ひずみ増分の方向の決定



種々の異方性降伏関数

Samr.

降伏関数による異方性の表現

Samr.

Hill48モデルによる r 値の面内異方性と 流動応力の方向依存性の予測

Samr.

6次降伏関数の提案と その異方性パラメータの同定法

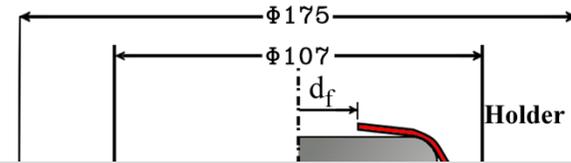
Samr.

6次多項式降伏関数(YSD6)による計算と実験(SPCE)の比較



Samr

穴広げ試験のFEシミュレーション (板厚ひずみの分布)



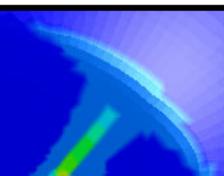
sample

6次応力多項式型(YSD6)とYld2000-2dの比較

sample.

異方性発展を考慮した
楕円穴拡げのシミュレーション

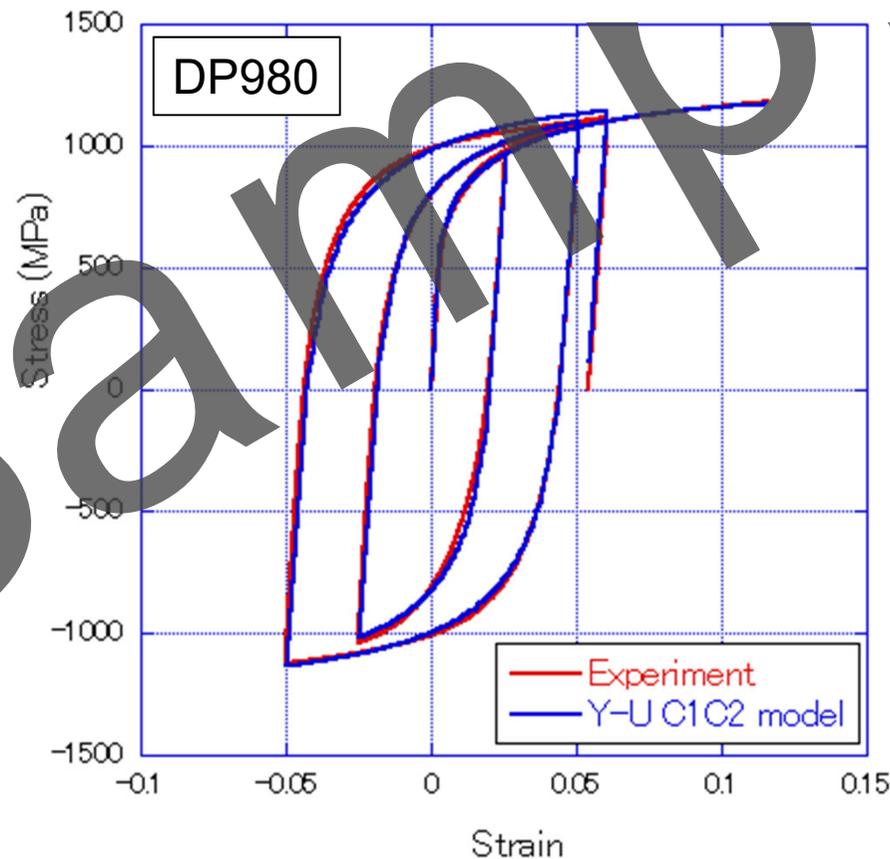
6 poly IH
(等方硬化)



sample



繰返し塑性モデル(Yoshida-Uemori model) によるスプリングバックの高精度予測



スプリングバックの力学基礎

Samr.

なぜ繰返し塑性モデルが必要か？

sample

ヤング率(除荷における応力-ひずみ勾配)の塑性ひずみ依存性

スプリングバック

sample

塑性ひずみ依存性

異方性・大ひずみ繰返し塑性構成モデル (Yoshida-Uemori model)

Samr

ハイテンの大きなバウシंगाー効果,
繰返し硬化の予ひずみ依存性の表現

Samr.

Mat Para



繰返し塑性構成式の方法パラメータ同定ツール

応力-ひずみ (σ - ϵ) 実験データから構成式中の材料パラメータを自動的に同定。

Yoshida-Uemori, Swift, Armstrong-Frederickなどの材料モデルが使える。

実験データなしでもひずみ反転条件を設定すれば各モデルによる σ - ϵ 関係が計算できる。

同定したパラメータ、 σ - ϵ 計算結果+図などのファイルが保存できる。

広島大学VB（株）CEM研究所が開発

代理店JSOLなど

材料モデルの板材成形シミュレーションへの応用

スプリングバック解析はモデル選択に強く依存する

sample

非線形弾性モデルがスプリングバック計算に及ぼす影響

sample

Y-U移動硬化モデルを使う場合には
非線形弾性の影響は少ない

Samr.

高精度成形シミュレーションの製品開発への応用例

異方硬化モデルの有効性を確認

sample

材料試験におけるDIC計測・解析の活用



sample

DIC計測の利点



Samr.

例1) DIC単軸引張りデータを利用した大ひずみ硬化特性の決定



2.5 10⁴ 1180_t1.4 (JIS13B)

sample

DICひずみ計算

l

k

試験片中央断面($y=0$)に
おけるひずみ分布

sample

応力計算

$$d\sigma = [D^{ep}] d\epsilon$$

Matlabでは応力計算機能+511

sample

DIC単軸引張りデータを利用した1180高張力鋼板の 大ひずみ硬化特性の決定

1180 t1.4

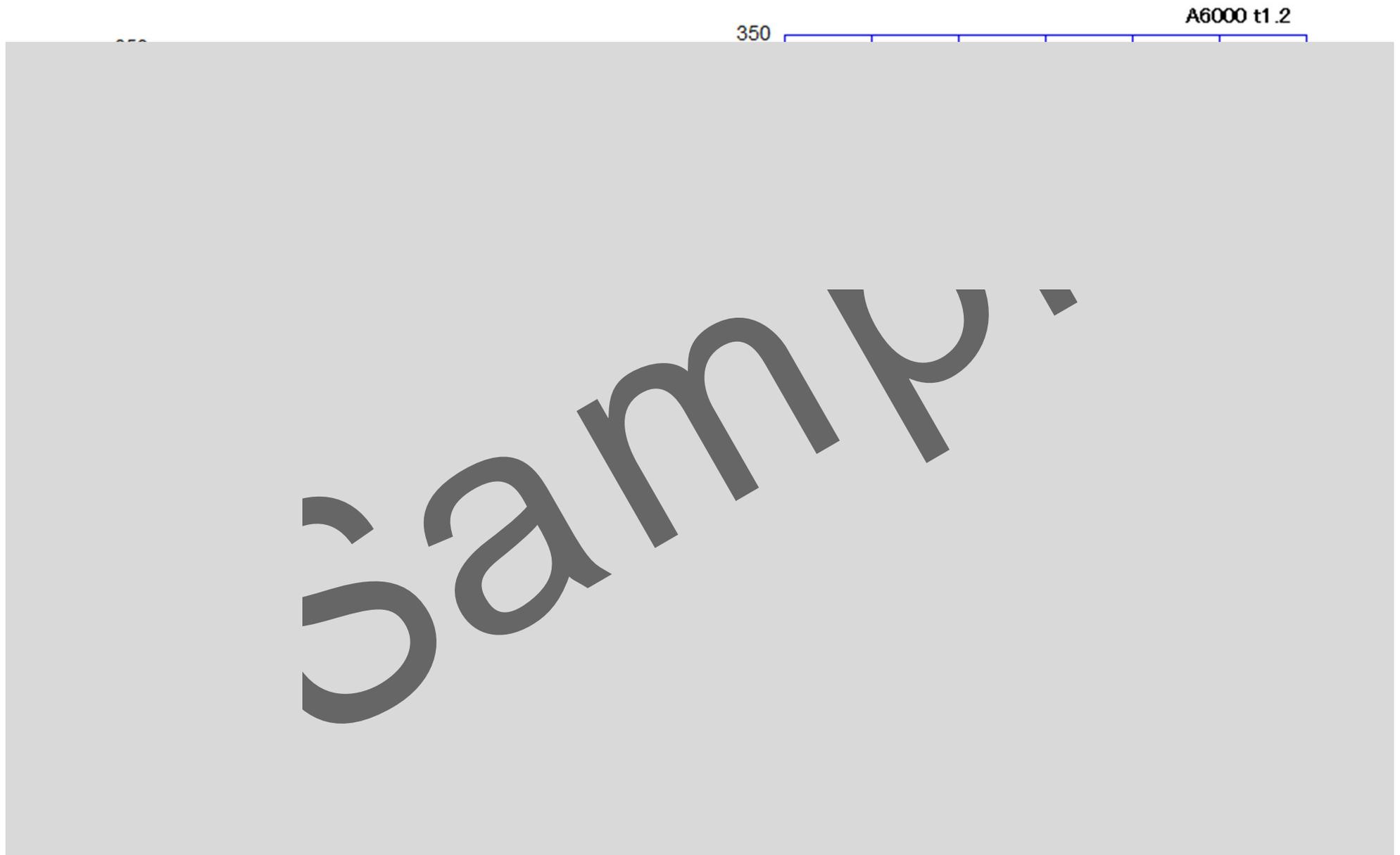
sample

例3) 平面ひずみ引張り

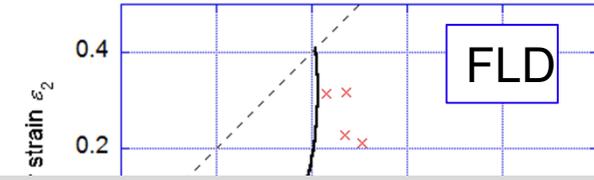
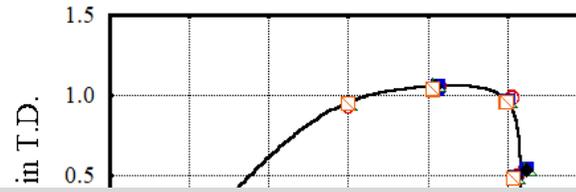
A6000 t1.2

sample

A6000板の平面ひずみ引張り



材料データベース
の構築



Samr

材料データベースに収録するデータ

1. 材料の弾塑性挙動とエネルギーパラメータ

sample

・ 係数 σ_0 (ハムリ), 曲率半径 R (曲率半径) など



まとめ



- 成形・スプリングバックの高精度シミュレーションのためには材料モデル(=異方性降伏関数+加工硬化則)が重要.
- Yoshida-Uemori (Y-U)モデルを用いることで高精度なスプリングバックやしわ発生などの予測ができる.
- Y-U移動硬化モデルを使う場合には非線形弾性モデルを使う必要はない(Y-U線形弾性モデルで十分な精度).
- DIC計測を利用したひずみ・応力解析は重要な技術である.
- 材料データベースは企業の貴重な財産となる.

「JSOLの材料モデルソリューションのご紹介と 最新の開発状況」

株式会社JSOL エンジニアリング事業本部
生産技術CAE部 技術課
乃万 暢賢

JSOLの材料モデルソリューション のご紹介と最新の開発状況

株式会社JSOL

エンジニアリング事業本部 生産技術CAE部 技術課

乃万 暢賢

Samy

CONTENTS

目次

1. JSTAMPがご提供する材料モデル
2. 材料モデルのパラメータ同定
3. 最新の開発状況
4. おわりに



1

JSTAMPがご提供する材料モデル

sample

JSOLがご提案する生産技術関連ソリューション

MatPara
CalSysSmart
MatYLD



OMNISCAD
JSTAMP/EZ
JSTAMP/BlankDesigner

JSTAMP®/NV
JSTAMP/LI

Ansys
LS-DYNA

Moldex3D

Simpleware™
Software

Ansys
LS-DYNA

MatchID
Metrology beyond colors

解析精度に影響を及ぼす諸因子

材料モデリング

SD効果

流れ則

異方硬化

異方性降伏関数

ひずみ速度依存

バウシंगा効果の
モデル化

加工硬化

増分ステップ

メッシュサイズ

マススケーリング

ツール速度

NIP

アダプティブ
メッシュ

JSTAMP[®]

Solid

摩擦則

低減積分/完全積分

金型たわみ

N2S / S2S

Shell

要素の次数

ペナルティ係数

ねじり剛性付与

IGA

接触

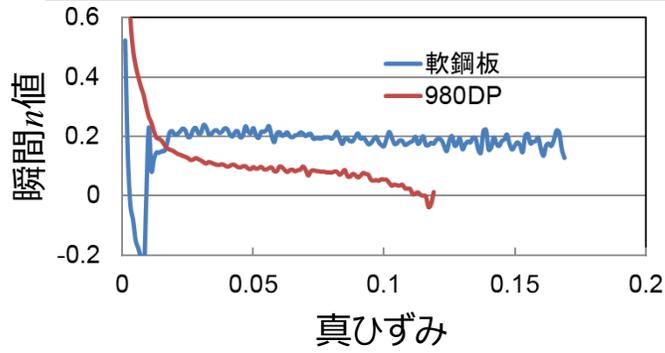
解析パラメータ

要素タイプ

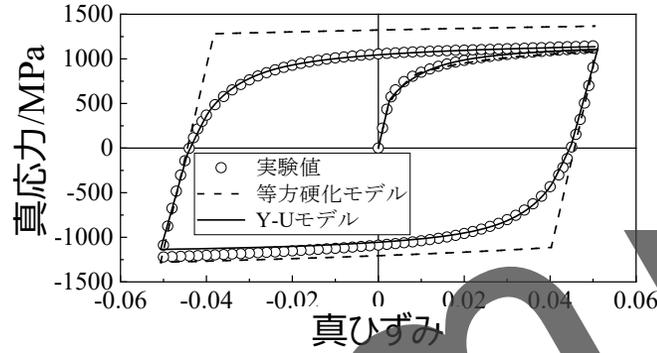
鋼板の塑性変形特性

加工硬化特性

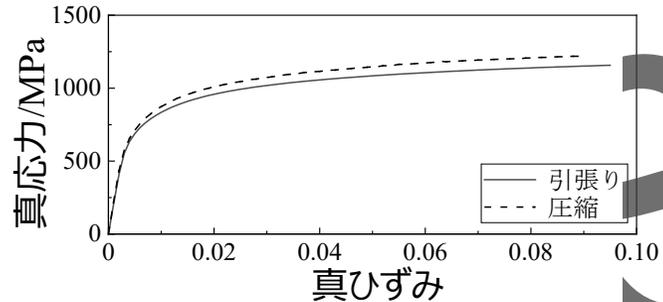
成形に伴うn値の変化



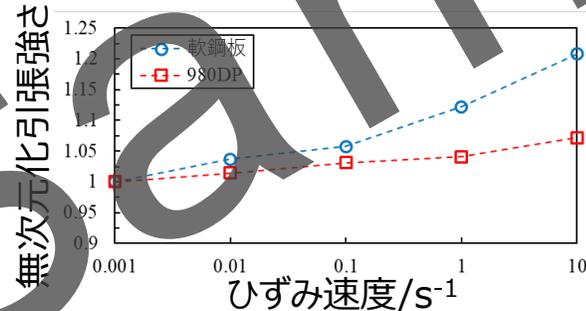
バウシガ効果



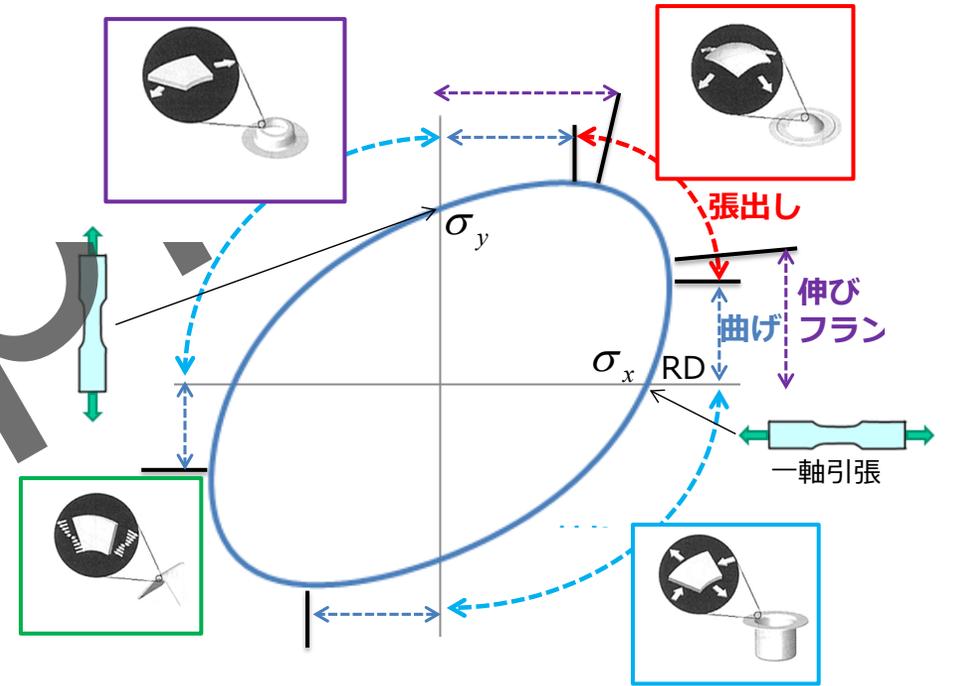
応力の引張/圧縮非対称性 (SD効果)



ひずみ速度依存性



塑性異方性



- 使用している材料モデルがどの現象を表現できているか
- それらの挙動をどれくらいの精度で表現できているか

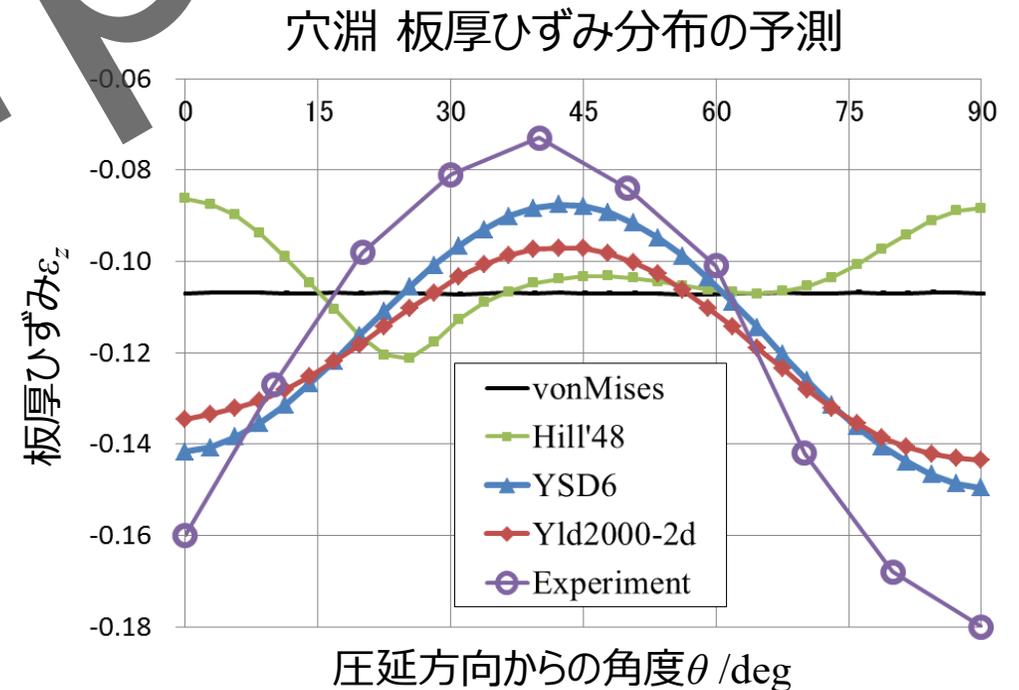
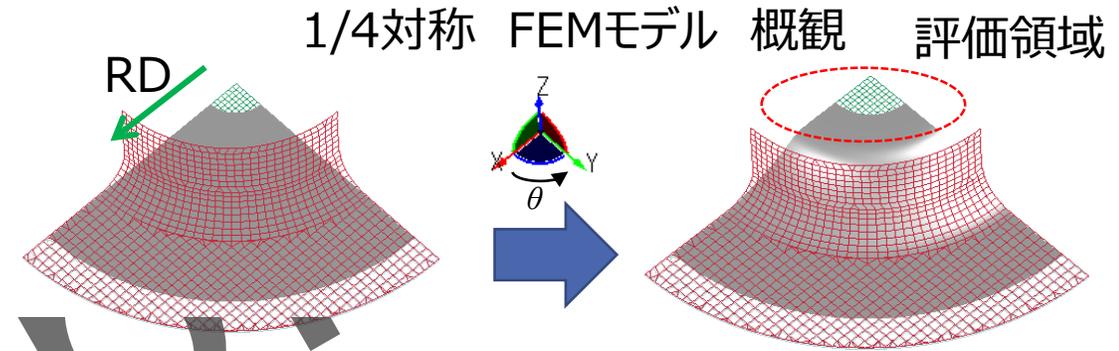
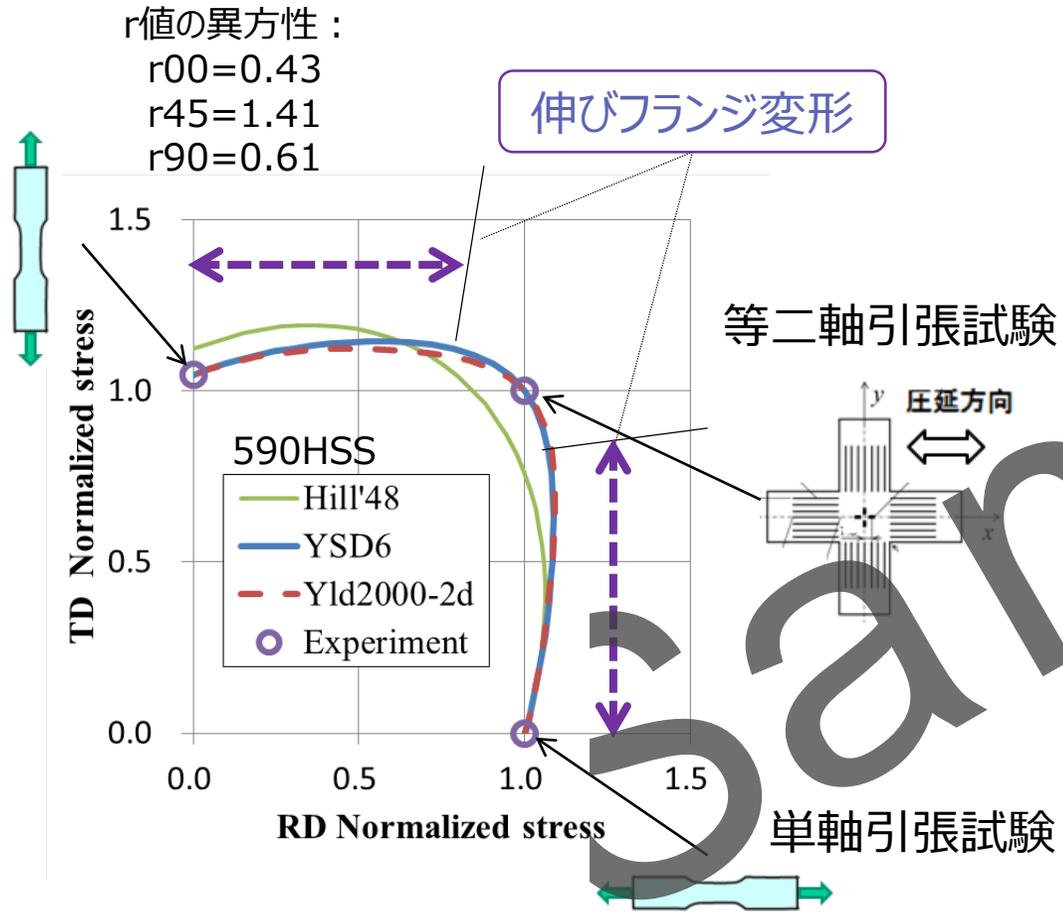
JSTAMP標準搭載の材料モデル

MAT	降伏関数	硬化則	異方硬化	ヤング率ひずみ依存*	ひずみ速度依存	SD効果
36	Yld89	等方硬化	×	×	○	×
37	Hill'48	等方硬化	×	多点データ/評価式		×
64	von Mises	等方硬化	×	×	○	×
103	Hill'48	等方硬化/簡易的な移動硬化	×	×	○	×
125	Hill'48	Y-U	×	評価式	×	×
133	Yld2000-2d	等方硬化/簡易的な移動硬化	×	多点データ/評価式	○	×
242	Yld2000-2d	Y-U	×	△（評価式のみ、JSTAMPでは不可）	×	×
282	Hill'48	等方硬化	△	×	○	×
287	Hill'48	Y-U	×	多点データ/評価式	×	×
289	Yoshida 6th	Y-U	○	多点データ/評価式	×	×

*評価式 $E = E_0 - (E_0 - E_a) \left[1 - \exp(-\xi \bar{\epsilon}^p) \right]$

基礎的な試験による降伏関数の影響の検証

橋本他：鉄と鋼, 96 (2010), 557-563.

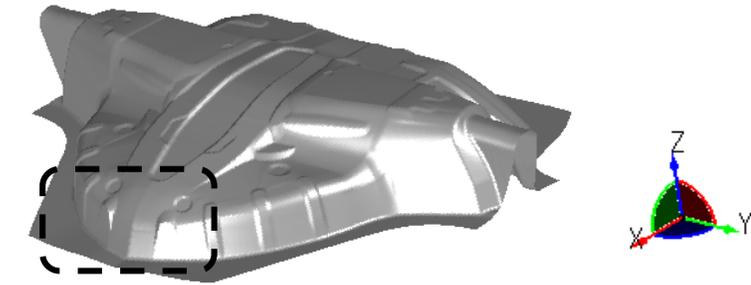
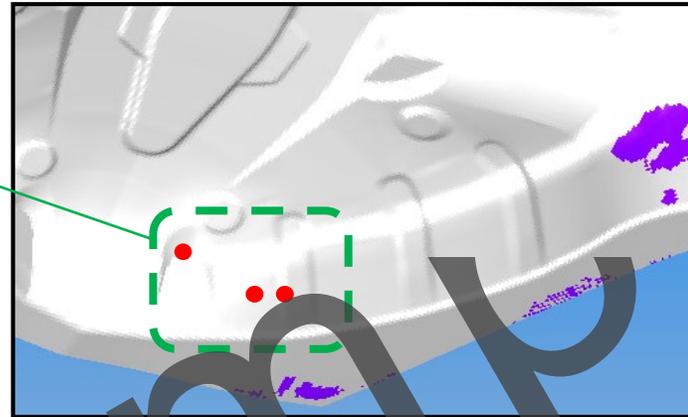
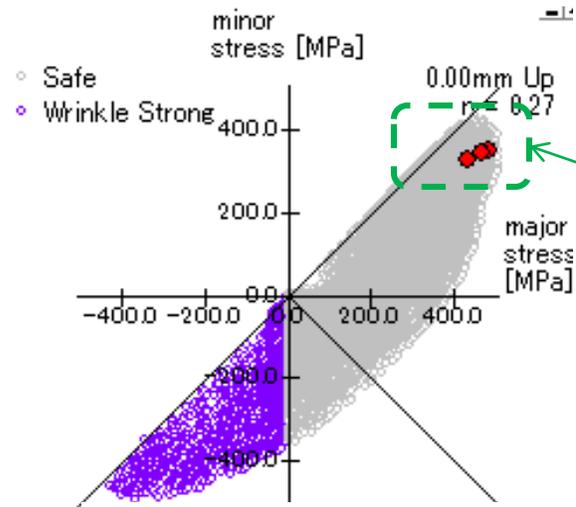


注) - Hill'48の異方性パラメータは3方向のr値から決定
 - YSD6: Yoshida6次降伏関数

降伏関数が板減予測に及ぼす影響

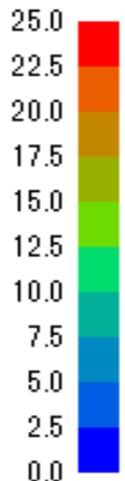
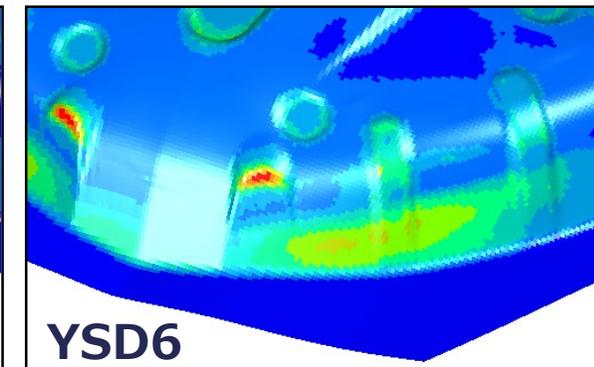
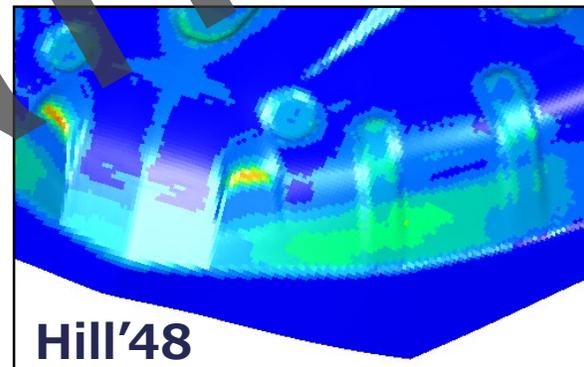
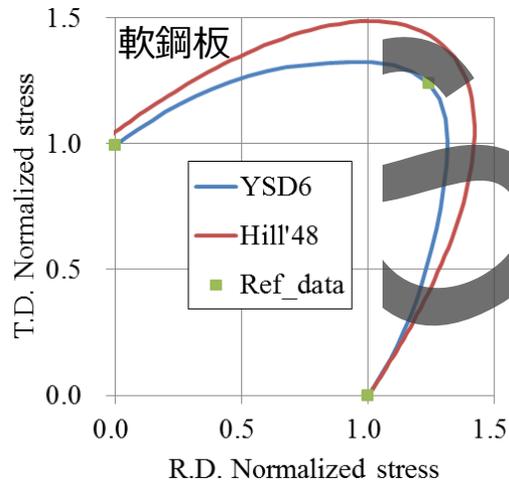
F. Yoshida et al.: Int. J. Plasticity, 45 (2013), 119-139.

成形後の各要素の主応力状態



板厚減少率[%]

r値の異方性:
 $r_{00}=2.12$
 $r_{45}=2.15$
 $r_{90}=2.89$

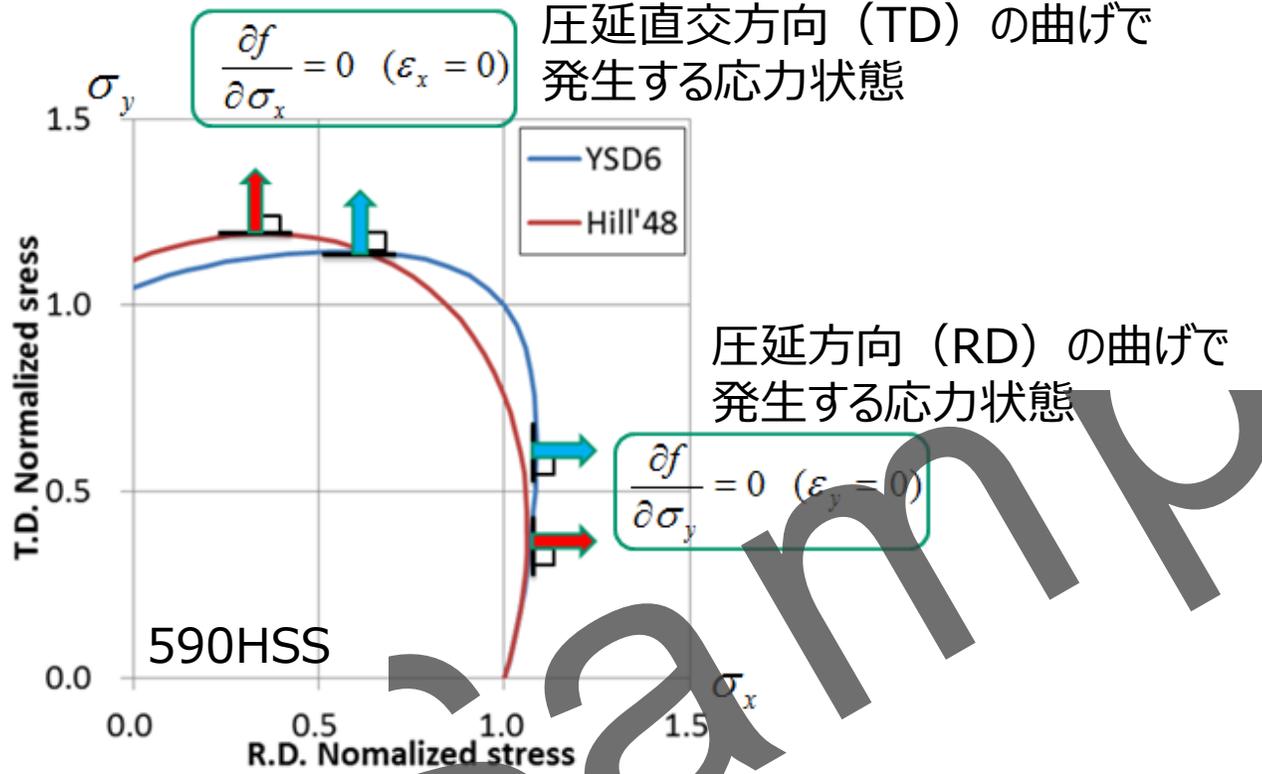


等二軸応力を高く見積もったHill'48はYSD6よりも張出し変形の板減を小さく予測.

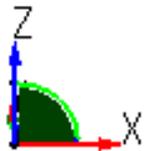
注) - Hill'48の異方性パラメータは3方向のr値から決定
 - YSD6: Yoshida6次降伏関数

降伏関数がスプリングバック予測に及ぼす影響

r値の異方性：
 r00=0.43
 r45=1.41
 r90=0.61



ハット曲げ
 SB計算結果イメージ

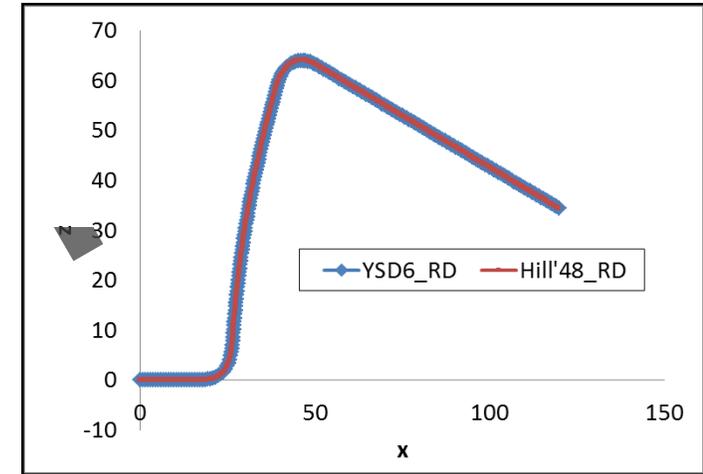


降伏曲面上，RD方向の曲げに対して発生する応力に差は見られないがTD方向では差異が存在⇒この差がSB量に影響

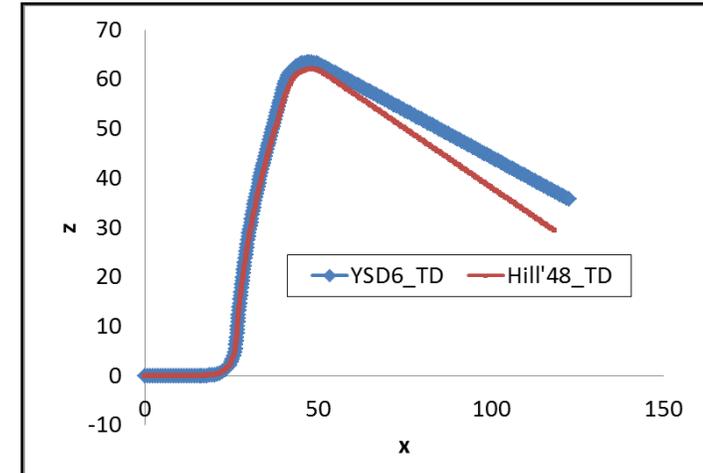
NUMISHEET2011 BM4

橋本他：鉄と鋼，96 (2010)，557-563.

RD方向の曲げから計算されるSB形状



TD方向の曲げから計算されるSB形状



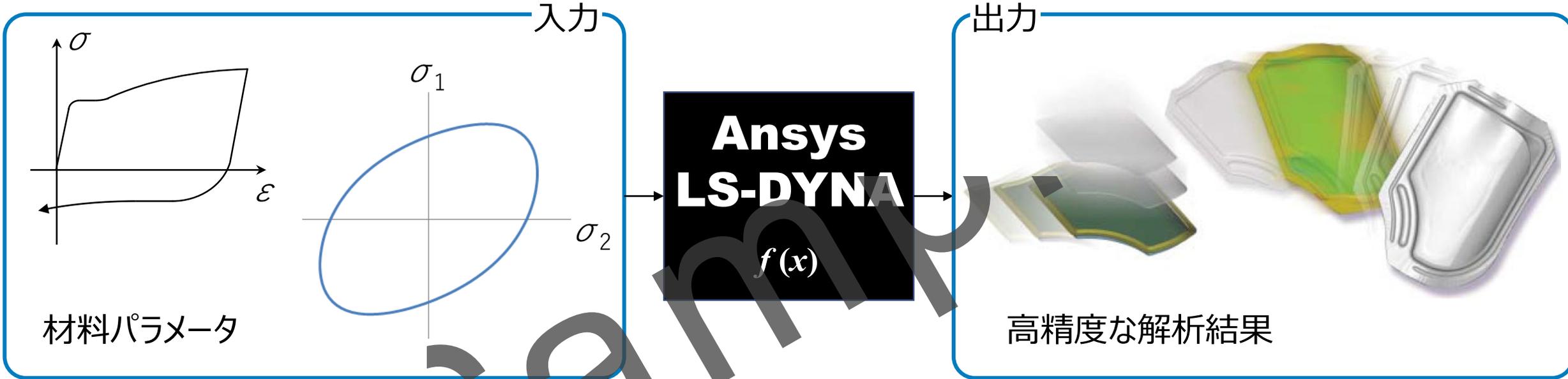
PART

2

材料モデルのパラメータ同定

材料パラメータの重要性

Keyword: Garbage in, garbage out



- ユーザーの皆様で試験→パラメータ同定
- 材料DBを使う（社内DB、有償DB、文献値、etc）
- JSOLに委託

Mat Para
Mat YLD
CalSysSmart

※MatPara、MatYLDの開発元は、株式会社CEM研究所です。<http://www.cem-inst.com/>

※CalSysSmartの開発元は、EZModeling Pty Ltd です。

材料試験法と対応する材料データ

Sample

多軸応力試験法

応力軸試験

Sample

D

Probe: [Hold CTRL to probe], Mouse @ [1045;51.27] Statistics: \bar{x} -23.45 σ 264.9 μ -47.25 θ 37.34 -1.5 -0.9 -0.3 0.3 0.9 1.5

バウシंगा効果測定方法

手書き文字検出

Sample

加工硬化則の同定

Sample

移動硬化則の同定

Sample

等塑性仕事面

Sample

降伏関数のフィッティング

サンプル

降伏関数の次数について

サンプル

MatParaについて

Sample

ステンレス材 アルミ合金材

• Armstrong-Frederick

• AF移動硬化+寺刀硬化

MatYLDについて

サンプル

CalSysSmartについて

サンプル

板材成形CAE材料データベース2020

※異種鋼材の引張強さを統一して表示する程度です。材料ごとの引張強さを参照してください。

Sample

26	1180MPa級高張力鋼板	1.2	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	注1	×	×	×	○	○	○	○	○	×	×
----	---------------	-----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

材料パラメータの同定サービス

Sample

PART

3

sample

最新の開発状況

解析精度に影響を及ぼす諸因子

材料モデリング

SD効果

Ver. 2. 16

流れ則

異方硬化

異方性降伏関数

ひずみ速度依存

バウシंगा効果の
モデル化

加工硬化

増分ステップ

マススケーリング

メッシュサイズ

ツール速度

NIP

アダプティブ
メッシュ

JSTAMP[®]

Solid

摩擦則

低減積分/完全積分

Ver. 2. 17. 1

金型たわみ

N2S / S2S

Shell

要素の次数

ペナルティ係数

ねじり剛性付与

IGA

接触

解析パラメータ

要素タイプ

SD (Strength Differential) 効果

サンプル

SD効果の測定方法

手書きによる測定

Sample

実験結果の一例



降伏関数の非対称形への拡張

sample

実試験結果へのフィッティング事例

Sample

SD効果を考慮した解析事例

Sample

A-YSD6thの精度検証

Sample

PART

4

おわりに

おわりに

おわりに

本講演では、下記のご紹介をいたしました。

- 板金プレス成形解析における材料モデルの重要性
- 材料パラメータ取得のための材料試験法およびデータの準備方法
- JSOLがご提供いたします、各種材料モデルパラメータ同定ソフトウェア
- 材料関連ソリューションの開発状況

材料モデルの高精度化は高精度なプレス成形解析のためには欠かせません。

JSOLではJSTAMPにさまざまな最新の材料モデルを搭載してまいりますのでご期待ください。

Sample



JSOL

NTT DATA Trusted Global Innovator
NTT DATA Group

今はない、答えを創る。



Ansys®、及びその他すべてのANSYS, Inc.の製品名は、ANSYS, Inc.またはその子会社の米国およびその他の国における商標または登録商標です。その他の社名、商品名、サービス名などは、各社の商号、商標または登録商標です。本資料に記載するシステム名、製品などには、必ずしも商標表示（R、TM）を付記していません。
本資料のすべての権利は、株式会社JSOLに帰属します。資料および内容に関しましては、第三者に開示、提供等されないようお願いいたします。

株式会社JSOL エンジニアリング事業本部

■東 京

〒102-0074 東京都千代田区九段南1-6-5 九段会館テラス 11F
TEL : 03-6261-7610 FAX : 03-5210-1142

■名古屋

〒460-0002 名古屋市中区丸の内2-18-25 丸の内KSビル 17F
TEL : 052-202-8181 FAX : 052-202-8172

■大 阪

〒550-0001 大阪市西区土佐堀2-2-4 土佐堀ダイビル11F
TEL : 06-4803-5820 FAX : 06-6225-3517

E-mail cae-info@sci.jsol.co.jp **URL** www.jsol-cae.com

JSOL



今はない、答えを創る。

sample

JSOL