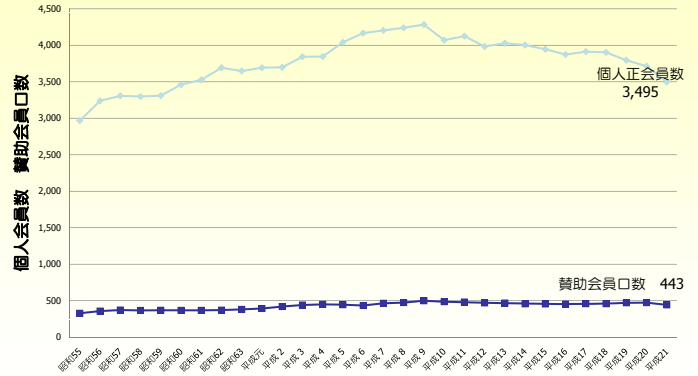


複層薄鋼板の プレス成形による超軽量・ 超高強度構造の製造

2010年4月30日（金）
生産技術研究所（機械工学）
S59機械工学科卒 柳本 潤



社団法人日本塑性加工学会 正会員数と賛助会員口数の推移



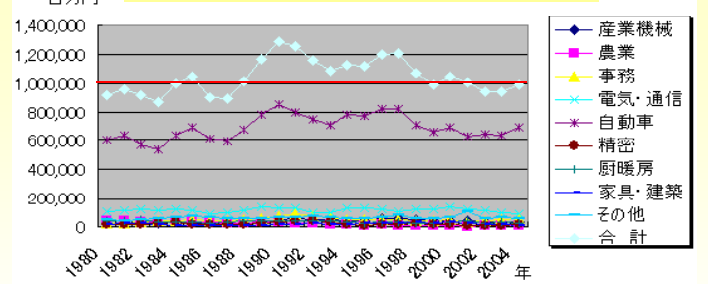
東京大学 1961年(昭和36年)社団法人 個人会員数はピークより約18%減少
参考) 日本ロボット学会 正会員・学生会員数は約4,300名、賛助会員数は72団体



複層薄鋼板のプレス成形による超軽量・超高強度構造の製造 薄板プレス成形の現状と課題



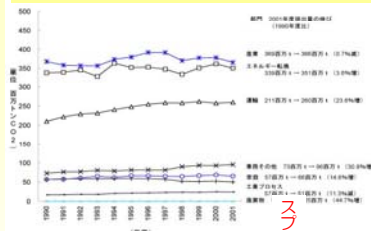
金属薄板プレス工業品の販売額【業種別】



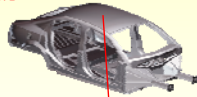
- 金属薄板プレス工業は1兆円(9864億円)産業で、基幹産業の一つ(常に需要がある。あらゆるところに利用されている。)
- スプリングバックは、この1兆円産業に100%密接に関わっている大きな課題
- 裾野は広い。電気・通信でも10%、自動車は最大で70%のシェア
- 自動車約20兆円、大手鉄鋼約6兆円、PC1兆7336億円、液晶TV4796億円



金属薄板プレス工業品への社会からの要求—温室効果ガス排出量削減



- 温室効果ガス排出量の20%以上は自動車
- 排出量削減→燃費向上→エンジンと車体
- 車体を軽量化



スプリングバック量が增加

軽くする
薄くする
高強度
 σ_{TS} が増える

$$M = \rho W L t$$

$$t = \frac{F}{\sigma_{TS} W}$$


自動車部品への適用例(鉄)

温室効果ガス排出量削減のための高強度材料利用
大きなスプリングバックが大きな問題

例:自動車におけるハイテン材適用比率

1998年: 軟鋼 89%, 高張力鋼 11%

2003年: 軟鋼 52%, アルミ 2%, 高張力鋼 46%

(引用文献: 日本鉄鋼協会 創形創質工学会板成形フォーラム特別講演会(2005/1/14))

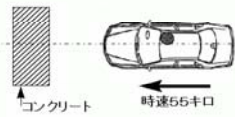


衝突安全基準の規制強化

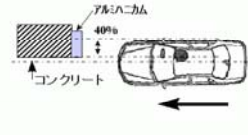
(図:国土交通省HPより)

前面衝突試験

○フルラップ前面衝突試験
(平成7年度より実施中)

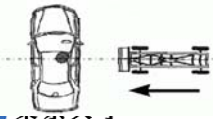


○オフセット前面衝突試験
(平成12年度以降実施予定)



側面衝突試験

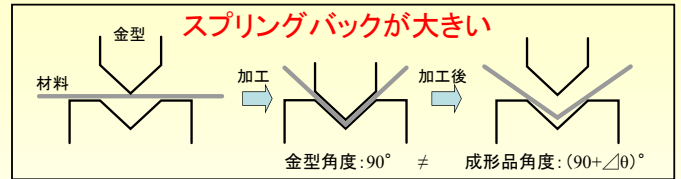
(平成11年度から実施)



- ・年々、規制が増えている
- ・軽自動車の規制も強化されている (大きさUP、衝突速度UP)
- ・大型車と小型車の衝突試験も予定
- ・国際基準化も視野

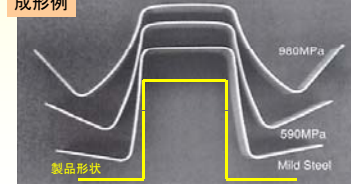
高張力鋼板のプレス成形上の問題

スプリングバックが大きい

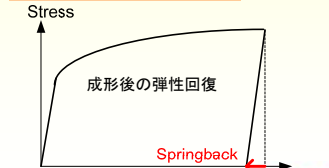


成形例

写真:プレス技術、42-8(2004)

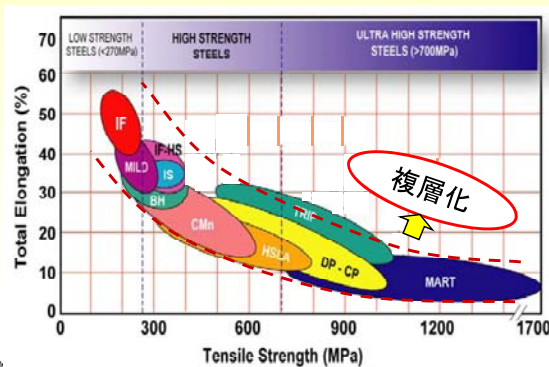


スプリングバック発生の原理



金型形状と成形品形状の違い/高強度ほど顕著

鉄鋼材料の強度-延性バランス



超軽量構造製造の問題

- ・強度と延性(伸び、加工性)は相反する
- ・材料の強度×延性はほぼ同じ値を取る
- ・軽量化のために強度を上げたい

⇒スプリングバックが大きくなる

⇒材料の延性が小さすぎる

つまり、軽量化による超軽量構造は難加工

複層鋼板のプレス成形による超軽量・超高強度構造の製造 複層鋼板PROJECT

LISM 複層鋼板プロジェクト

Layered-Integrated Steel and Metals (LISM)

文部科学省の「ナノテクノロジー・材料を中心とした融合新規分野研究開発」の下で

「組織制御統合体の開発プロジェクト」として

超高強度超軽量移動体を可能にする複層鋼板(LISM)を開発

複層型の材料設計により

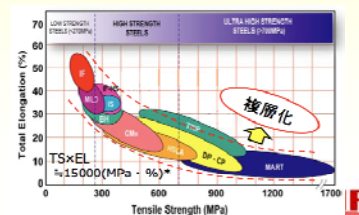
単一材料の自律的な組織形成による特性限界を打破

高強度層と高延性層の複層化

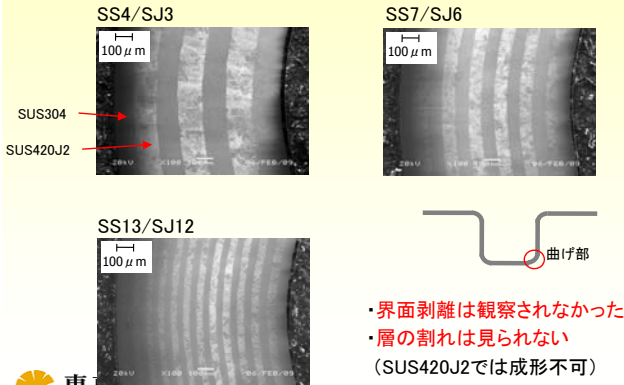
飛躍的な材質向上

高強度化と相反する特性の両立

(延性・加工性、耐疲労、耐水素脆化、耐腐蝕...)



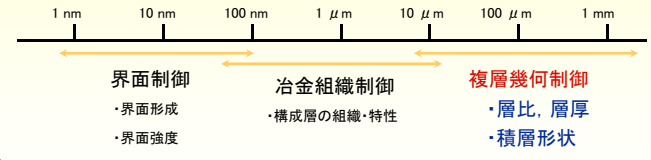
曲げ部断面SEM観察



研究概要: 超高強度軽量移動体を可能にする複層鋼板とTiシートの複合構造 (平成18年度~平成22年度 チームリーダー 東京大学工学系研究科 小関 敏彦)

研究目的:
 (1) 高強度-高靱性の複層鋼板、高比強度-高靱性の複層Ti合金シートを、それぞれ、複層の接合学術的創製、各層の組織制御、層間の界面制御を基盤として開発する。更に両材料の複合技術の開発してそれらの複合構造を可能とし、次世代の多層な超高強度軽量移動体の基礎を確立する。
 (2) ナノスケールインターフェイスング、および、マルチスケール組織制御に基づく新たな金属複層材料およびそれによる製造プロセスを世界に先駆け開発する。

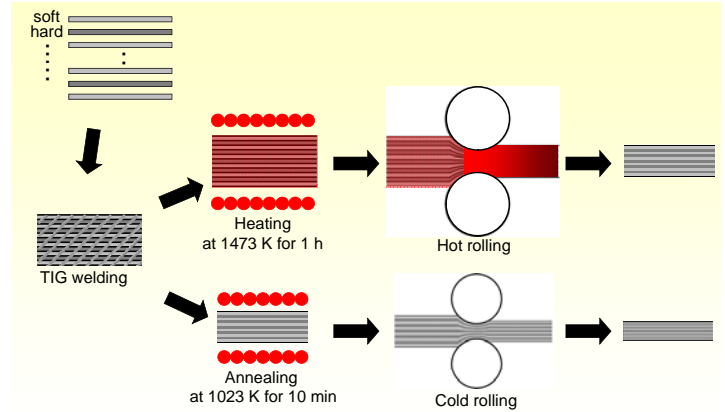
マルチスケールな材料制御



- 引張り強度, 局部変形評価, 疲労試験, 水素脆化, etc.
- 延性評価, プレス成形性評価, 延性向上機構, etc.

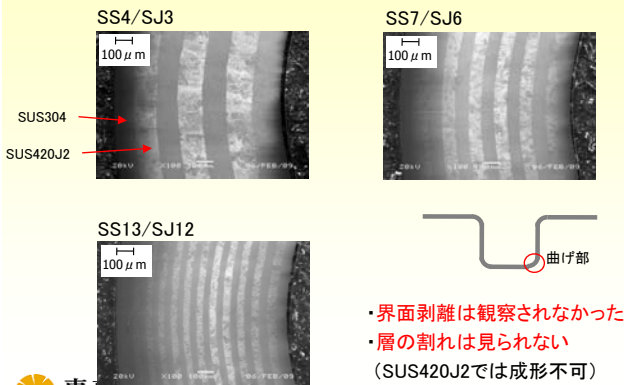
複層薄鋼板のプレス成形による超軽量・超高強度構造の製造

PART 0 複層鋼板の特徴的な性質

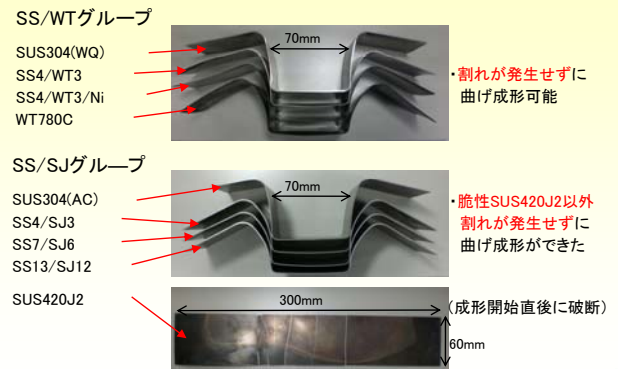


SS/SJシリーズの製造プロセス (SS/WTシリーズでは熱処理無し)

曲げ部断面SEM観察



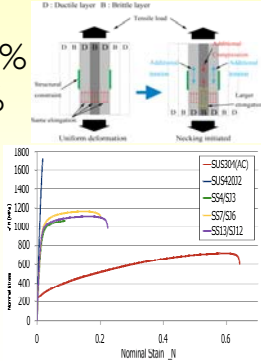
ハット曲げ成形試験結果



脆性材Bと延性材Dを複層にする

- B材は強度1700MPa、伸び1.5%
- D材は強度700MPa、伸び70%
- B材とD材を半分ずつ複層化した材料の強度は？伸びは？

強度 $(1700+700)/2=1200$
伸びはどうなりますか？



複層薄鋼板のプレス成形による超軽量・超高強度構造の製造

PART 1 複層鋼板の塑性加工性の実験による評価

Part I 複層鋼板の塑性加工性の評価

高強度・高延性の複層鋼板について
プレス曲げ時の挙動や成形性を明らかにする
(単一鋼板とは異なる特異な変形挙動、形状凍結性、曲げ成形限界...)

実験内容

- ハット曲げ
- V曲げ
- 単純曲げ
- 密着曲げ

評価項目:

- 曲げ成形形状の評価 (成形の可・不可、スプリングバック)
- 界面の観察 (割れ、界面剥離)

試験条件:

- 荷重負荷中: 90°
- 除荷後: (90+Δθ)°
- Δθ: スプリングバック

形状金型による曲げ

複層鋼板

SS/SJグループ

- SUS304: 高延性
- SUS420J2: 高強度・低延性・脆性 (マルテンサイト系ステンレス)

- SS4/SJ3 (7層)
- SS7/SJ6 (13層)
- SS13/SJ12 (25層)

SS/WTグループ

- SS4/WT3 (7層)
- SS4/WT3/Ni (7層)

材料: SUS304, WT780C, Ni (インサート材)

寸法: 1mm 厚, 300mm 長さ, 60mm 幅

Production process of the test materials

Group	Constituent material			1st process	2nd process	3rd process	Final process
	Material	t[mm]	Number of layers				
SS/WT Group	SUS304	5	4	Heating at 1200°C for 60 minutes, ↓ Hot rolling to t=3mm.	Cold rolling to t=1mm.		Heating at 1000°C for 2 minutes, ↓ Water quenching.
	WT780C	6	3				
	Ni	0.5	6				
	SUS304	5	4				
	WT780C	6	3				
SS/SJ Group	SUS304	1	4	Heating at 1200°C for 60 minutes, ↓ Hot rolling to t=4mm.	Heating at 750°C for 10 minutes, ↓ Air cooling.	Cold rolling to t=1mm.	Heating at 1100°C for 2 minutes, ↓ Air cooling.
	SUS420J2	1	3				
	SUS304	1	7				
	SUS420J2	1	6				
	SUS420J2	1	12				
SS/SJ Group	SUS304	1	-				Heating at 1050°C for 2 minutes → Air cooling.
	SUS420J2	1	-				

複層鋼板の特性

Mechanical properties of the test materials

Group	YS[MPa]	TS[MPa]	u-EL[%]	f-EL[%]	
SS/WT Group	SS4/WT3	710	839	21.3	27.1
	SS4/WT3/Ni	725	868	21	25.9
	SUS304(WQ)	226	690	68	70.2
	WT780C	1080	1440	5.5	7.1
	Ni	85	393	45	47.5
SS/SJ Group	SS4/SJ3	557	1071	8.8	8.9
	SS7/SJ6	611	1168	14.5	20.0
	SS13/SJ12	636	1119	16.4	22.4
	SUS304(AC)	244	721	59.3	64.3
SUS420J2	951	1723	1.7	1.7	

マルテンサイト化→焼入れのみ

複合則との比較

体積分率V

	SUS304	WT780C	Ni		SUS304	SUS420J2
SS4/WT3	0.53	0.47	0.00	SS4/SJ3	0.57	0.43
SS4/WT3/Ni	0.49	0.44	0.07	SS7/SJ6	0.54	0.46
				SS13/SJ12	0.52	0.48

	YS[MPa] (Experiment)	YS[MPa] (ROM)	YS Error[%]	TS[MPa] (Experiment)	TS[MPa] (ROM)	TS Error[%]
SS4/WT3	710	631	12.6	839	1045	19.7
SS4/WT3/Ni	725	591	22.8	868	998	13.0
SS4/SJ3	557	547	1.7	1071	1150	6.9
SS7/SJ6	611	571	7.2	1168	1183	1.3
SS13/SJ12	636	584	9.0	1119	1202	6.9

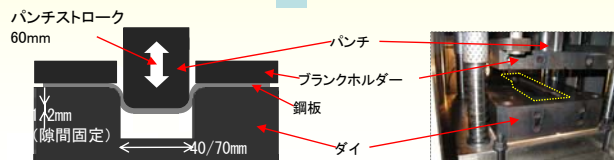
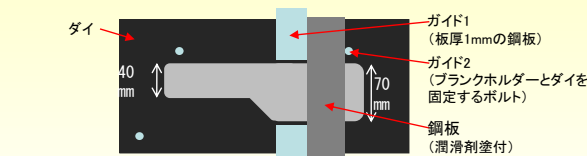
複合則との比較
 $\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$

YS, TS: 概ね一致
 EL: 予想値を下回る

	u-EL[%] (Experiment)	u-EL[%] (ROM)	u-EL Error[%]	f-EL[%] (Experiment)	f-EL[%] (ROM)	f-EL Error[%]
SS4/WT3	21.3	38	44.5	27.1	40	32.8
SS4/WT3/Ni	21	39	46.0	25.9	41	36.6
SS4/SJ3	8.8	35	74.6	8.9	37	76.3
SS7/SJ6	14.5	33	55.7	20.0	35	43.4
SS13/SJ12	14.5	32	48.2	22.4	34	34.6

成形試験1: ハット曲げ

金型の概要



ハット曲げ成形試験結果

SS/WTグループ

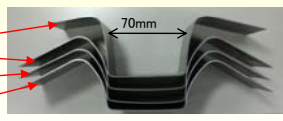
- SUS304(WQ)
- SS4/WT3
- SS4/WT3/Ni
- WT780C



・割れが発生せずに
曲げ成形可能

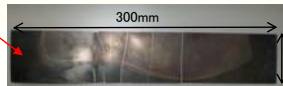
SS/SJグループ

- SUS304(AC)
- SS4/SJ3
- SS7/SJ6
- SS13/SJ12



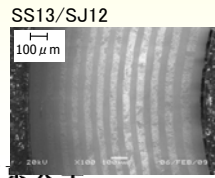
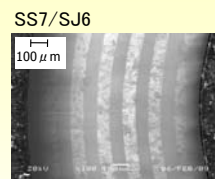
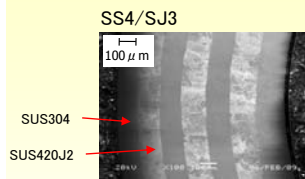
・脆性SUS420J2以外
割れが発生せずに
曲げ成形ができた

SUS420J2



(成形開始直後に破断)

曲げ部断面SEM観察

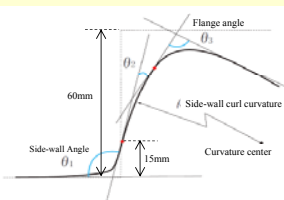


・界面剥離は観察されなかった
 ・層の割れは見られない
 (SUS420J2では成形不可)

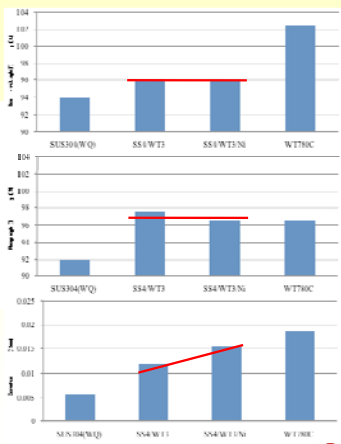
スプリングバック

ハット曲げ形状でのスプリングバック

SS/WTグループ



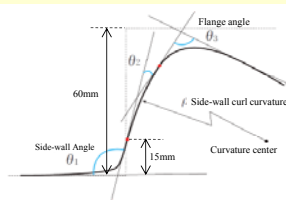
- ・WT780Cと複層鋼板との比較:
底部・側壁部間のスプリングバック・
壁そり量
- ・SS4/WT3とSS4/WT3/Niとの比較:
壁そり曲率ρ



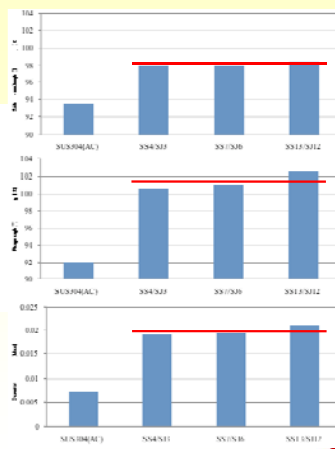
スプリングバック

ハット曲げ形状でのスプリングバック

SS/SJグループ

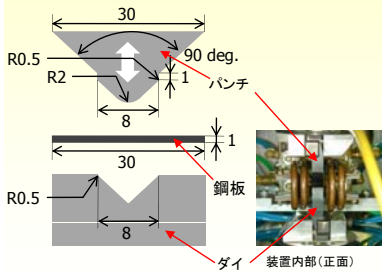


- ・SS4/SJ3, SS7/SJ6, SS13/SJ12での比較:
各パラメータともほとんど差がない
層数増加(に伴う接合界面の増加)は
スプリングバックにはあまり影響がない

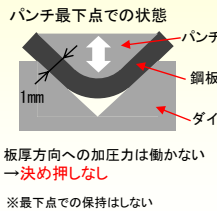


成形試験2：V曲げ

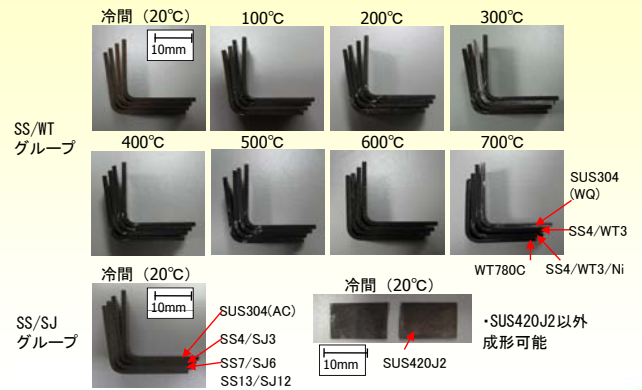
金型の概要



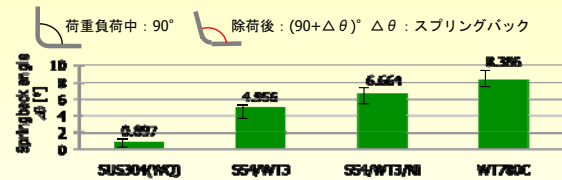
Atmosphere	Vacuum (order of 10^{-2} Torr)
Forming temp.	20°C
Punch speed	1mm/s
Punch stroke	2.75mm



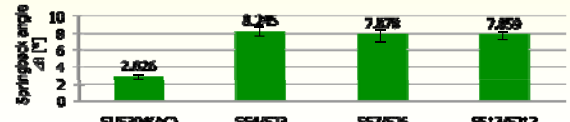
V曲げ成形試験結果



スプリングバック



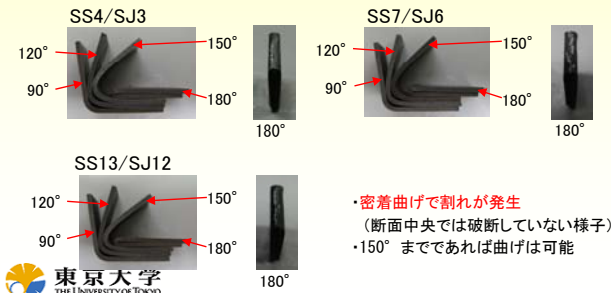
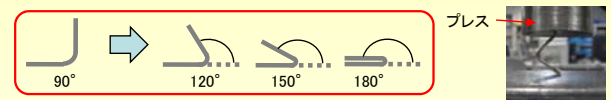
荷重負荷中：90° 除荷後：(90+Δθ)° Δθ：スプリングバック



・WT780Cとの比較→スプリングバックは低減、5~6° 前後のスプリングバック(比較的大きい)
 ・SS4/WT3とSS4/WT3/Niの比較→スプリングバックと強度は相関、Niの影響(G拡散、界面→)

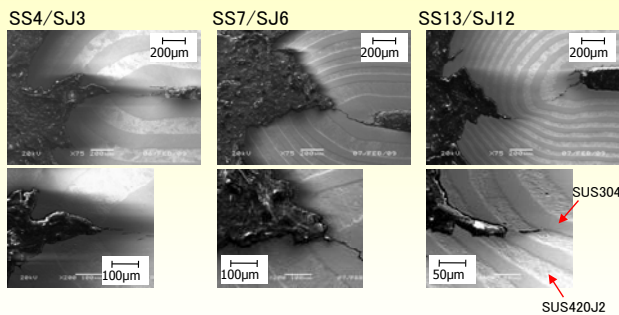
・成形不可能のSUS420J2に対し、8° 前後のスプリングバック(かなり大きい)
 ・スプリングバックは同程度→強度(または構成材料の強度とその体積分率)に影響

成形試験3：単純・密着曲げ



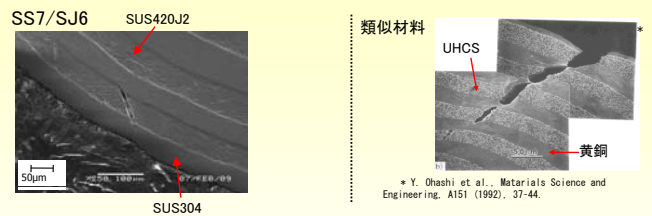
・密着曲げで割れが発生
 (断面中央では破断していない様子)
 ・150° までであれば曲げは可能

曲げ部断面SEM観察



・割れ部分のごく近傍以外に界面剥離は見られない→強い界面強度
 ・割れの先端：すべて高延性SUS304層内で割れが停止
 ・層数増加(割れを抑制するSUS304層をより多く配置)が割れの進展を抑制する

割れの伝播に関する考察



・SS7/SJ6: SUS420J2層に亀裂(最外SUS304層は破断していない)
 →複層鋼板の割れは最外SUS304層からではなく、内側のSUS420J2層から発生

- (1) 曲げ外側に最大のひずみ発生
- (2) ひずみ勾配により高延性層の破断は生じないが、その一層内側の高強度層でも大きなひずみが生じている
- (3) 最外層より1層内側の高強度層に割れが発生(左上写真)

レール金型によるプレス実験

対象: TS=1200MPa, 全伸び25%の複層鋼板2種
 (1) T-02(SUS304, SUS420J2, 15層)
 (2) T-03(SUS301, SUS420J2, 15層)

試験機: 2500/500kN複層式油圧プレス機

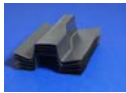
金型: レール金型

- ・板材の厚さは1mm, 板押さえは隙間一定制御(1.2mm)
- ・ストロークは60mm程度, グリースを塗布



加圧能力	インナーライド アウターライド	1000~2500kN 100~500kN
ストローク	インナーライド アウターライド	300mm 300mm
スライド速度	インナーライド アウターライド	可変 76mm/s

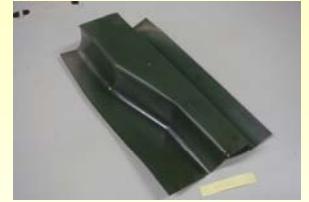
・内部空間: 500 × 500 × 500mm
 ・今回はアウターライドのみを使用



T-02



T-03



両者とも3次元的な金型でも成形可能, スプリングバックは大.

Part I のまとめ

ハット曲げ成形

- ・界面剥離, 層内外の割れは見られず十分なプレス成形性
- ・成形不可能な構成材料を複層化することで成形可能

V曲げ成形

- ・スプリングバックは構成材料の中間, その予測が可能
- ・各複層鋼板のスプリングバックは同程度→(構成材料の平均)強度と相関あり

単純曲げ・密着曲げ

- ・高延性SUS304層内で割れが停止
 —SUS420J2層で一気に割れが進展し破断, 層数増加が割れの進展を抑制する可能性
- ・最外SUS304層破断前にSUS420J2層に亀裂発生, 割れの起点・伝播について検討

レール形状金型による曲げ

- ・TS=1200MPaの複層鋼板において曲げ加工は可能だった
- ・外側に割れは見られないが, スプリングバック量は大きい

複層薄鋼板のプレス成形による超軽量・超高強度構造の製造

PART 2 複層鋼板の塑性加工性の解析・FEMによる評価

Part II 複層鋼板の塑性加工性の解析・FEMによる評価

○ Part I Part 2 複層鋼板の塑性加工性の実験による評価

- ・複層化によって脆性材でも加工可能となることが確認された

しかし, 力学特性や延性向上機構についての解析的検討が不十分

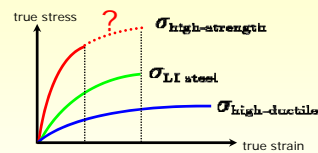
→ FEMによる複層鋼板のくびれ解析によってこれらの検討を行う

○ Part 2 複層鋼板の塑性加工性の解析・FEMによる評価

- ・複層鋼板の成形解析, 力学特性に関する検討

複層鋼板のSSカーブの取り扱い

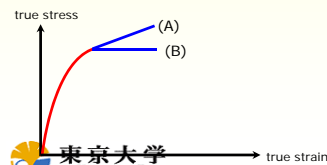
複層鋼板中の高強度材のSSカーブをどのように扱うか?



- ・高強度材(硬質層)は, 単独で引っ張った場合に得られる破断限界を超えて伸びる

- ・そのため, 元の破断限界以降のSSカーブがどうなっているかが不明

- ・解析では最低でも複層鋼板の破断限界までのカーブが必要となる



- (A) 元のカーブの単純な延長
- (B) 元のカーブの最後の強度を維持
- (A) → 過大評価
- (B) → 過小評価

真のカーブがどうなっているか推定する必要がある

複層鋼板中の高強度材のSSカーブ推定

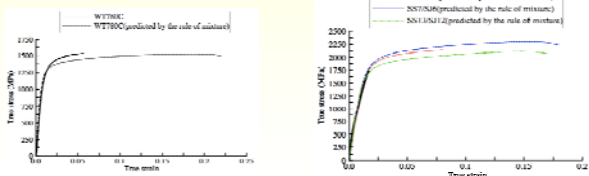
複合則(The rule of mixtures (averages))の適用

強度(応力)に関する複合則

$$\sigma_G = V_A \sigma_A + V_B \sigma_B \quad V_A + V_B = 1$$

$$\sigma_{high-strength}(\epsilon) = \frac{\sigma_{L2 steel}(\epsilon) - V_{high-strength} \sigma_{high-strength}(\epsilon)}{V_{high-strength}}$$

複合則による高強度材のSSカーブ



複合則による高強度材のSSカーブによる解析結果と実験値との比較が必要

参考: Semiatiinの理論

拡散くびれ発生条件式

$$\frac{d\sigma_1}{d\epsilon_1} - \sigma_1 = 0$$

応力に関する複合則

$$\sigma_s = A_m \sigma_{1m} + A_c \sigma_{1c} \quad A_m, A_c: \text{断面積分率}$$

サンドイッチ材の構成材にn乗硬化則を適用して一様伸びひずみの予測式を得る:

$$\epsilon_d(u) = \frac{F_{1m} \epsilon_{d_m}(u) + F_{1c} \epsilon_{d_c}(u)}{F_{total}} \quad \epsilon_d(u): \text{一様伸びひずみ} \quad F: \text{荷重}$$

サンドイッチ材の一様伸びは、構成材の荷重分率と一様伸びひずみ値によって表される

(特徴): クラッド材がコア材よりも大きな一様伸びを持つ場合、不安定点で、クラッド材は(加工)硬化し、コア材は(幾何学的)軟化する。不安定が生じるひずみは、構成材の間に位置し、その正確な値は構成材の体積分率とともに相対的加工硬化に依存する。

(仮定): isostrain (ひずみが一緒)

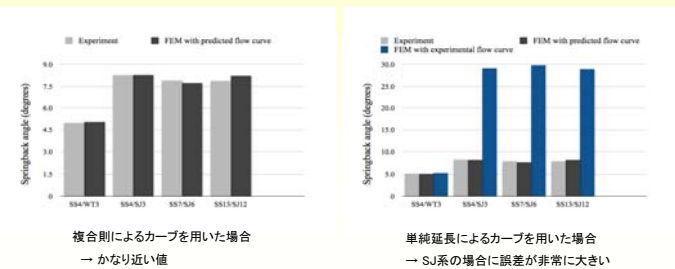
(仮定): 両方の構成材が、乗硬化則に従う → 両方ともある程度延性的な場合に有効

(仮定): 各構成材の最大荷重が引張り強度(UTS)に等しいとする

実際には荷重はひずみの関数になるので、隠な形で解は得られない。ここでは荷重比のひずみへの依存性は小さいと仮定している。

実験データとの比較検証

SS4/WT3, SS4/SJ3, SS7/SJ6, and SS13/SJ12のV曲げ時のスプリングバック量を実験値とシミュレーション値を比較



複合則によるカーブを用いた場合
→ かなり近い値

単純延長によるカーブを用いた場合
→ SJ系の場合に誤差が非常に大きい

複合則によるSSカーブの推定が有効

延性向上メカニズムの考察

複層鋼板の破断に関する先行研究

• SUS304/SUS420J2, SPCC/SUS420J2 (Inoue et al. 2008)

- マルテンサイト層厚が大きい場合には延性は小さく、脆性的に破断
- マルテンサイト層厚が小さい場合には脆性破断から延性破断に移行した
- 硬質層の破壊靱性が大きいと遷移層厚が大きくなる
- 遷移層厚は弾性解とShear Lag (SSL)解から得られた層厚の中間に収まった

• SCM415/SUS304 (Nambu et al. 2009)

- 界面強度が無い場合にはマルテンサイト鋼単体と同じ伸び
- 界面強度が弱い場合には一様伸びまで変形する前に剥離を伴って破断
- 界面強度が大きい場合には一様伸びまで変形した後、局所くびれが発生して延性的に破断

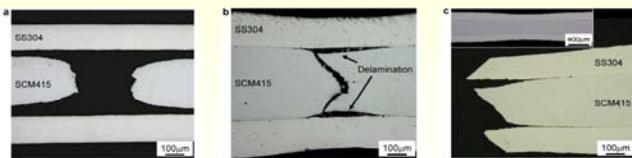
• マルテンサイトの層厚・靱性および界面強度の制御によって脆性破断と剥離破断を回避し、一様伸びまで伸びることができる

複層鋼板の延性は構成材の強度比と加工硬化指数に依存

南部ら (2009) の実験

3層SS304/SCM415に対して、3パターンの界面強度の場合の引張り時の挙動を調べた

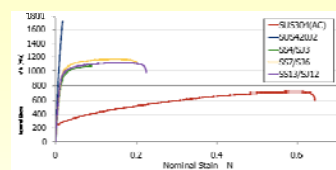
- 界面強度: 無(重ねてあるだけ) → 単体時の伸びと同程度
- 界面強度: 中(接着剤) → 一様伸び前に剥離を伴って破断
- 界面強度: 大(圧延と熱処理) → 一様伸びまで伸びた後、延性的に破壊



Nambu et al., Composites Science and Technology(2009)

→ 界面強度が複層鋼板の延性向上の鍵の一つ

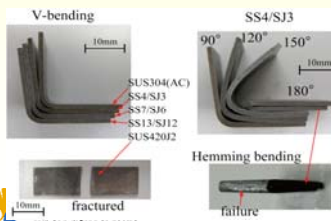
引張り試験



材料	破断伸び(%)
単層SUS420J2	1.7
SS4/SJ3	8.9
SS7/SJ6	20.0
SS13/SJ12	22.4
単層SUS304	64.3

複層鋼板中のSUS420J2は、単層時の破断伸びを大きく超えた所まで引張り変形を受けている

V曲げ試験



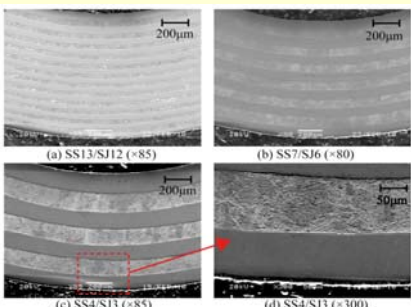
V曲げ試験による成形性評価結果

- 単層では成形開始直後に割れた
- すべての複層鋼板で、90° ~ 150°の曲げは成功した

• 密着曲げ(180°)では分離はなかったものの、外側にき裂発生

V曲げ後のSEM観察

- ・V曲げを受けたSS4/SJ3, SS7/SJ6, SS13/SJ12のSEM観察写真
- ・最もひずみが大きい部位である曲げ部を拡大して撮影



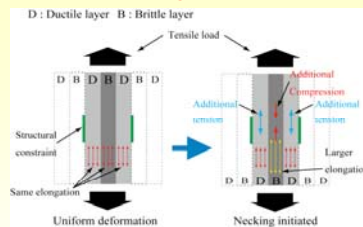
FEMによると最大で15%程度のひずみが生じているはず(赤い破線で囲まれた界面付近)
→この領域のひずみは単層のSUS420J2の破断ひずみを大きく超えている

いずれの試験片の内部や界面においても、割れや剥離は見られず材料は一体となって成形されている

この観察結果より、複層鋼板の界面の固着強度が非常に高く、曲げ加工を受けても割れや剥離は生じていないことがわかる

複層鋼板の延性向上機構

“Macroscopic structural restriction of necking initiation”



1. 一様に引っ張られる場合、硬質層と軟質層のひずみは同一のはず
2. 硬質層にくびれが生じると、その層のひずみは軟質層のひずみよりも大きくなるとうとする
3. しかし材料は強力な界面のおかげで一体として変形しようとするはずであり、このひずみのギャップを埋める作用が生じるはず
4. くびれ発生に至らない軟質層から硬質層の変形を押しとどめる向きに応力が生じる
5. 結果として軟質層のくびれ発生が遅れ、材料全体が強度を保ったまま変形を続けられる

Swiftの理論による説明

複層鋼板の延性向上の主因は、拡散くびれ発生が遅れであるとしているので、拡散くびれ条件に関する理論的考察を行った

- ・これは硬質層の応力場についての話
- ・一様な引張り下では拡散くびれが生じるまでは軸方向応力が優勢であると仮定

軸応力: σ 軸ひずみ: ϵ

拡散くびれ発生条件: $\frac{d\sigma}{d\epsilon} = \sigma$

仮想的な欠陥により、微小なひずみ $\delta\epsilon$ が生じたとする

その微小ひずみによって生じた応力増分 $\delta\sigma$ は $\delta\sigma = \sigma\delta\epsilon$

一方加工硬化による応力増分 $\Delta\sigma$ は $\Delta\sigma = \left(\frac{d\sigma}{d\epsilon}\right)\delta\epsilon$

$\Delta\sigma \leq \delta\sigma$ となる(ここまでSwiftのくびれ理論)

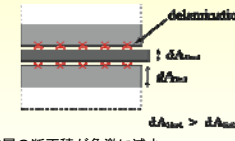
Tensile test



dA : 断面積減少率

(a) 界面が弱い場合

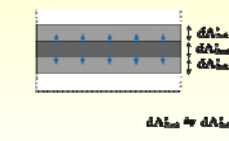
Weak bonding



硬質層の断面積が急激に減少

(b) 界面が強い場合

Strong bonding



硬質層の断面積減少量が抑えられる
(軟質層の加工硬化量に余力がある場合)

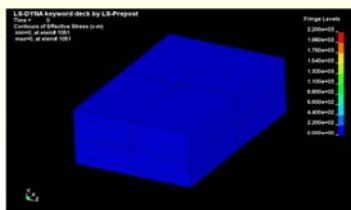
その結果、 $dA_{hard} > dA_{hard}$ となる

すなわち仮想的くびれによる応力増分 $\delta\sigma$ は (a) よりも (b) の場合の方が小さくなる

の状態がより長くなる→不安定条件の満足(=<くびれ発生)の遅れ

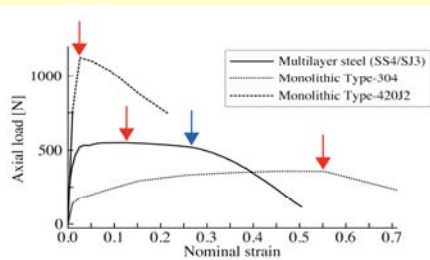
延性向上機構のFEM解析による検討

7層の複層鋼板を3次元ソリッド要素でモデル化し、対称条件により1/8のみを解析
解析にはLS-DYNAを使用(陽解法) 片側の節点に強制変位を与えて引張りとした。
界面完全固着モデル:異なる材料の層が節点を共有している→実際の複層鋼板に近い
(解析モデルによくない条件が入っていない→主に界面固着による影響を見られる)



モデル(変形前) 1/1表示 厚さ1mm, 幅2mm, 長さ3mm

FEMでの引張り荷重の履歴(vs. 公称伸びひずみ)



赤い矢印: 最大荷重値への到達
青い矢印: 明確な除荷の開始点

特徴1

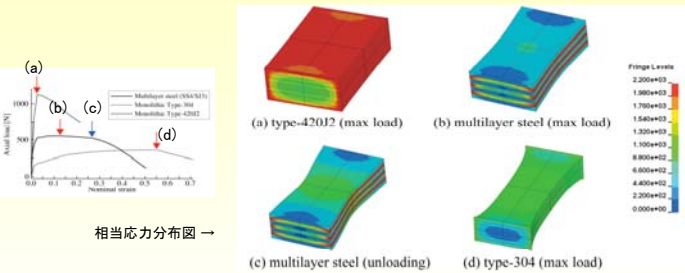
複層鋼板SS4/SJ3と単層SUS420J2の最大荷重点が異なっている→くびれ発生が遅れ

特徴2

単層材(SUS304, SUS420J2):最大荷重への到達直後に急激な除荷

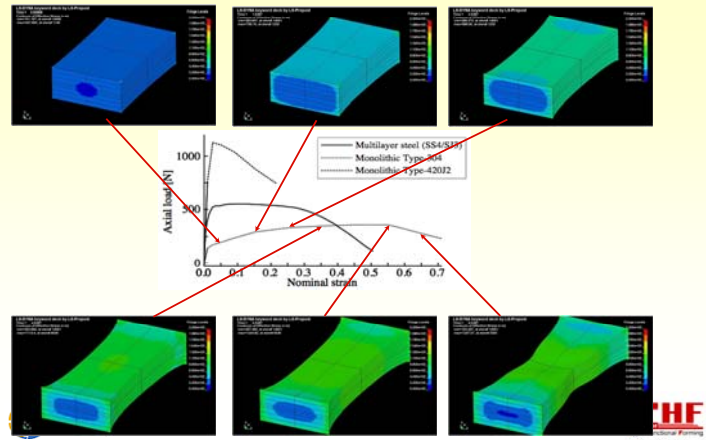
複層鋼板(SS4/SJ3):最大荷重値付近での荷重の停滞(最大荷重値と除荷開始点が異なる)

変形の様子からの考察

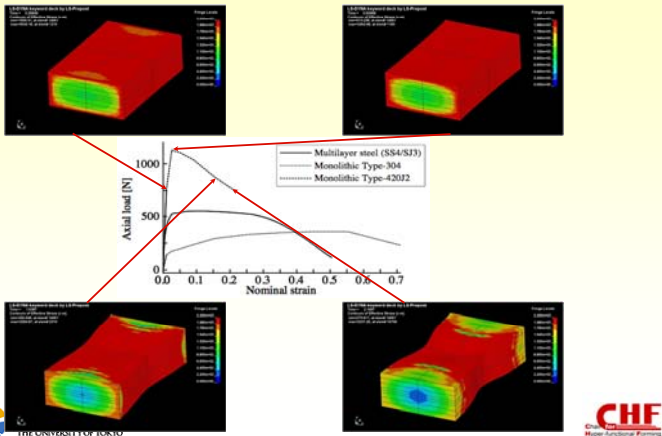


- (a): 単層SUS420J2の最大荷重値時の変形の様子。この直後から急激なくびれ進展。
- (b): 複層鋼板SS4/SJ3の最大荷重値時。この後しばらく明瞭なくびれは現れない。
- (c): SS4/SJ3の荷重値が大きく減少開始。モデルにもくびれの幾何学的特徴が見られる。
- (d): 単層SUS304の最大荷重値時の変形の様子。この後くびれ進展。

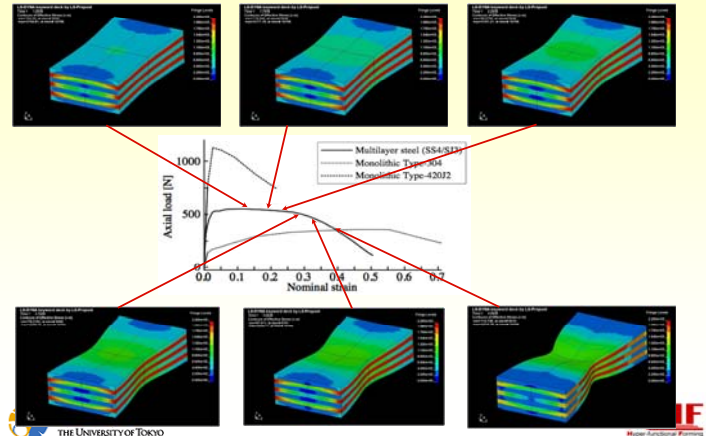
SUS304の変形履歴



SUS430J2の変形履歴



SS4/SJ3の変形履歴



延性向上機構の解析的検討のまとめ

複層鋼板は引っ張り試験、各種曲げ試験において、その構成材である高強度材の破断ひずみを超えたひずみ域まで変形可能であることが実験的に確認されている。

加工後試験片のSEM観察によって、内部に割れや剥離等の欠陥は見られなかった。すなわち複層鋼板の界面強度が非常に高く、変形中も材料は一体と見なすことがわかった。

複層鋼板の延性向上効果は、マクロな視点では、強力な界面強度による複層構造の幾何学的拘束が主因である。

先にくびれようとする硬質層の変形を、まだ加工硬化に余裕がある軟質層が界面を通して阻害する。その結果、硬質層のくびれ発生は単層時に比べて遅れる。

硬質層のくびれ発生の遅れは、複層鋼板の破断も単層の硬質層材の破断よりも遅れるということの意味する。すなわち複層鋼板の延性(加工性)は向上しているということである。

最終的には軟質層の拘束能力が限界に達した時点で、材料はくびれ発生から破断に至ると考えられる。

まとめ

- ・ 複層化によって構成脆性材を大きく上回る伸びが実現できる
- ・ 構成材料から複合則によって概ねのスプリングバック後形状を予測可能
- ・ 複層鋼板の延性向上の原因は強力な界面によるくびれ進展の拘束
- ・ 複層鋼板は次世代の超高強度軽量移動体の実現に有望