

第10回 SPring-8 金属材料評価研究会
2015.2.6 研究社英語センタービル

二相ステンレス鋼の静的引張特性 と中性子線・放射光実験

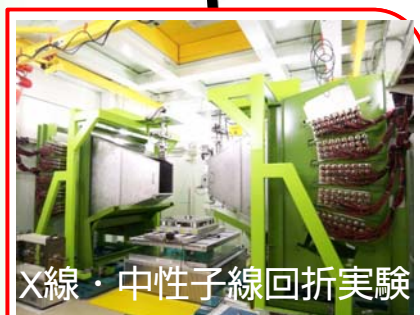
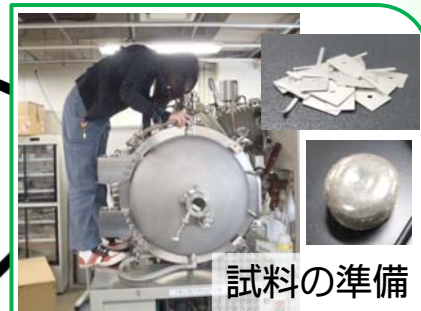
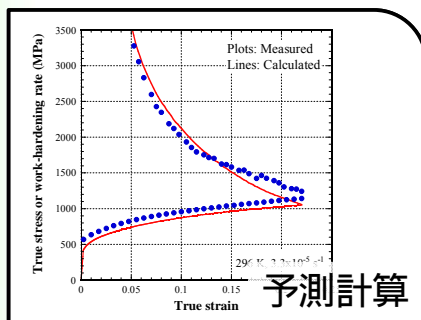
兵庫県立大学 大学院 土田紀之



姫路市「しろまるひめ」

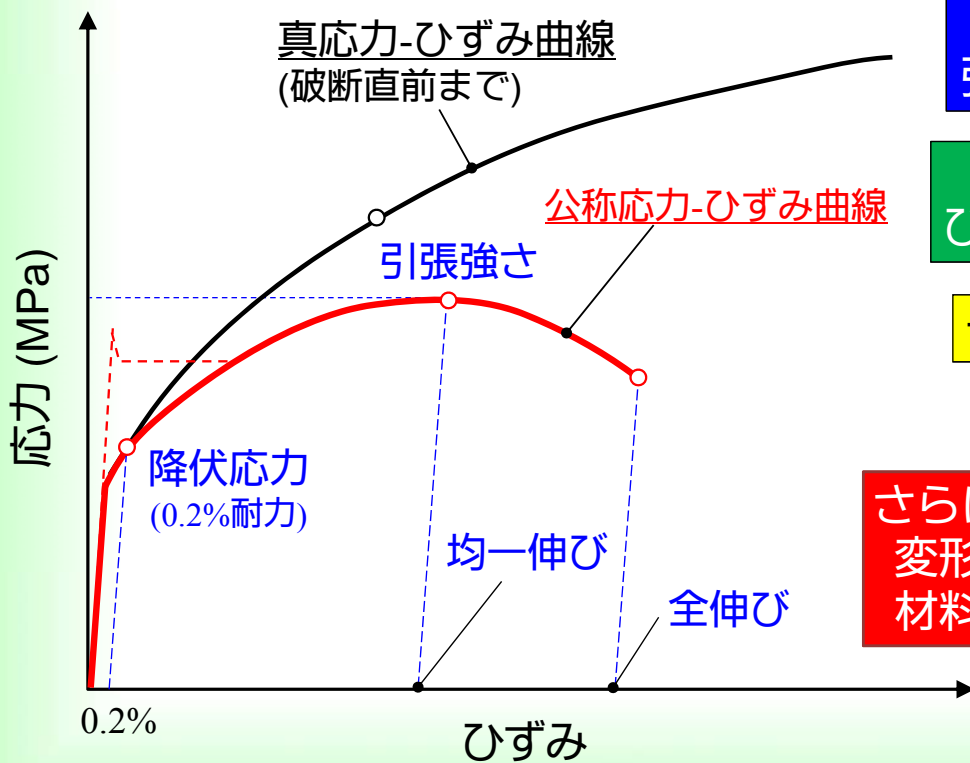


鉄鋼材料の「高強度化」と「省資源化」



各検討項目のリンク+産学・学学連携

応力-ひずみ曲線



二相ステンレス鋼

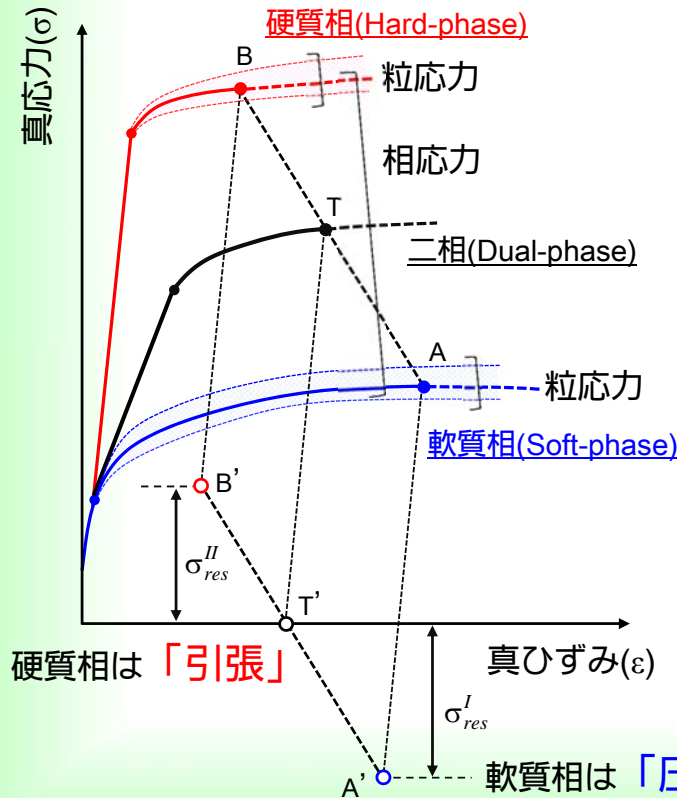
- オーステナイト(γ)とフェライト(α)が約1:1の二相組織
- 優れた耐腐食性, 強度特性
- 化学プラント, ガス輸送ラインパイプ, 海上プラットフォーム

1. 汎用二相ステンレス鋼
2. スーパー二相ステンレス鋼
3. 省資源型二相ステンレス鋼

高強度化

変形挙動の中身に関する検討
(優れた機械的特性, 強度-延性バランスの理由)

二相鋼の引張変形挙動



各相(γ相, α相)の変形挙動
「不均一変形挙動」
が重要な鍵



放射線
(放射光・中性子線)



相応力	相間(γとα)の不均一変形差
粒応力	同じ相における結晶粒間の変形差

目的

1. 省資源型二相ステンレス鋼の静的引張特性を調査し、
2. 放射光実験とその場中性子回折実験により、二相ステンレス鋼の引張特性と加工硬化挙動を相間、結晶粒間の不均一変形の観点より考察する。

不均一変形
応力分配

1. オーステナイト相とフェライト相の変形挙動の違い(相応力)
2. 各相における結晶粒群の変形挙動の違い(粒応力)

組織形態

各相の体積率, 化学成分および結晶粒径

実験方法

Table S32101とSUS329J4Lの化学成分 (mass%).

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	N
S32101	0.022	0.57	4.96	0.022	0.0004	1.51	21.22	0.33	0.23	0.217
329J4L (S31260)	0.018	0.49	0.69	0.028	0.0005	6.95	24.88	3.04	0.17	0.133

熱延前加熱：1180°C, 3.6ks

熱延：168mm → 5mm, 550°C巻き取り

熱延板焼鈍：1050°C, 30s

冷間圧延, 冷延板焼鈍：1050°C, 30s

(S32101: 3mm, SUS329J4L: 2mm)

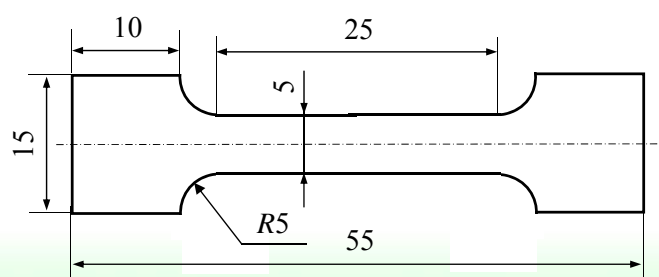
実験方法

1. 組織

- ・ 光学顕微鏡観察
- ・ X線回折実験 (変形前・後の体積率計算)

2. 静的引張試験

- ・ ギア駆動式引張試験機
- ・ 平行部幅5 mm, 平行部長さ25 mm
- ・ 296 K, $3.3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$
- ・ 破断まで, ひずみを加えた試験片(白色X線用)

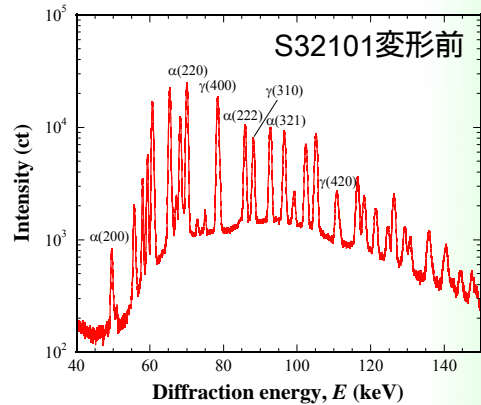


実験方法

3. 不均一変形挙動

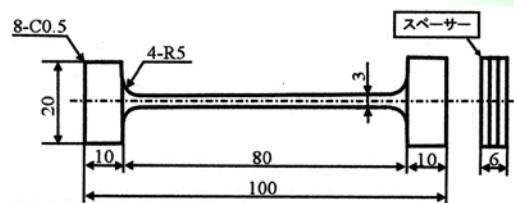
【白色X線回折実験】

- SPring-8 BL14B1
- エネルギー分散法 ($2\theta=10^\circ$)
- **予めひずみを加えた試験片を数本ずつ準備し、回折実験を行った。**



【その場中性子回折実験】

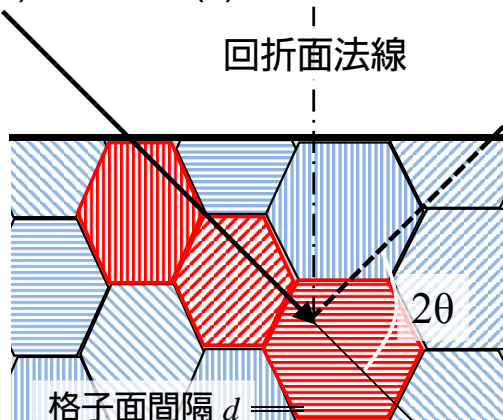
- 日本原子力研究開発機構 RESA
- 角度分散法 (波長: 1.9\AA)
- **引張変形 ($\sim 10^{-4} \text{ s}^{-1}$) を加え、各 $[hkl]$ 結晶粒群の回折プロファイルを測定した**
- $\gamma(111), \gamma(200), \gamma(311), \alpha(110), \alpha(200), \alpha(211)$



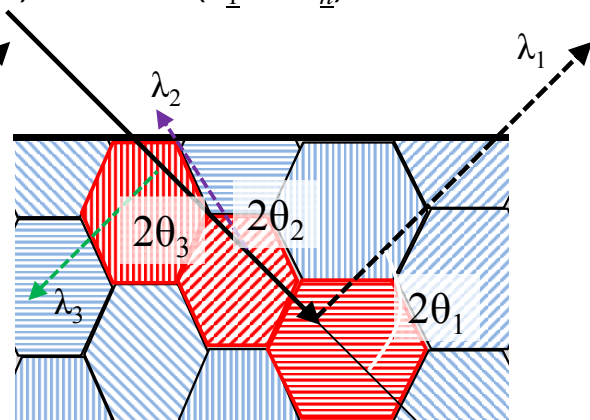
白色X線・中性子回折と「格子ひずみ」

格子ひずみ ε_{hkl} : 回折面の法線方向の垂直ひずみ

(a) 特性X線(λ), 中性子線



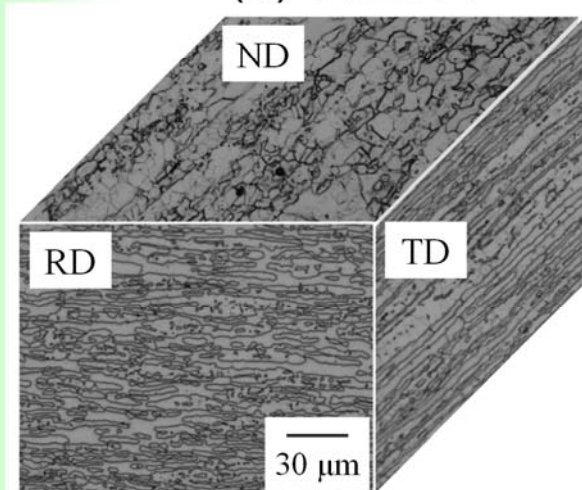
(b) 連続X線($\lambda_1, \dots, \lambda_n$), 白色X線



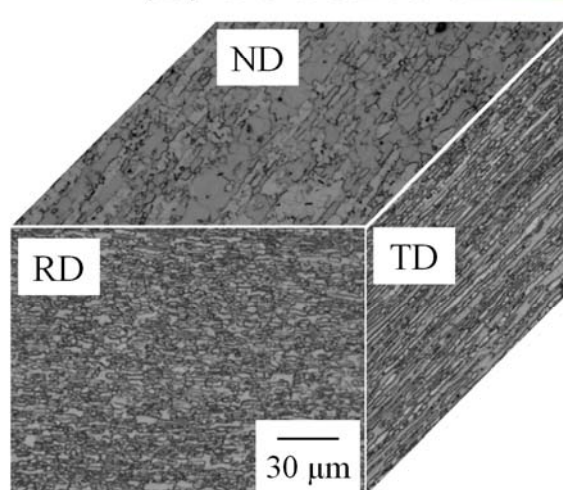
$$\varepsilon_{hkl} = \frac{\Delta d}{d_0} = \frac{d - d_0}{d_0} = \frac{E_{hkl}^0 - E_{hkl}}{E_{hkl}}$$

組織観察

(a) S32101



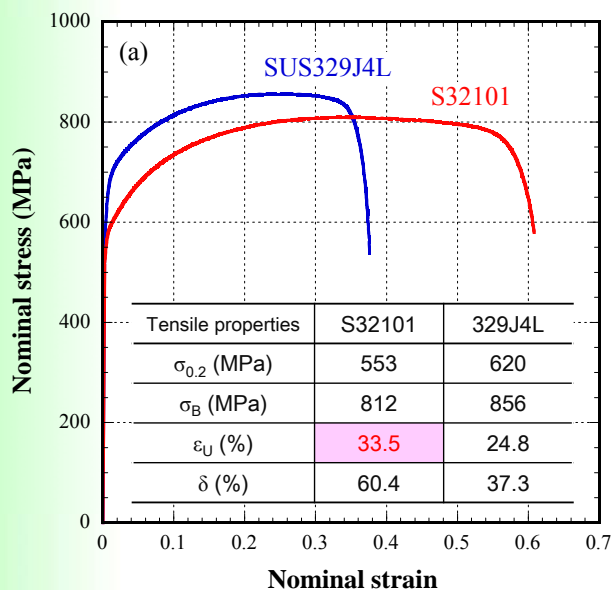
(b) SUS329J4L



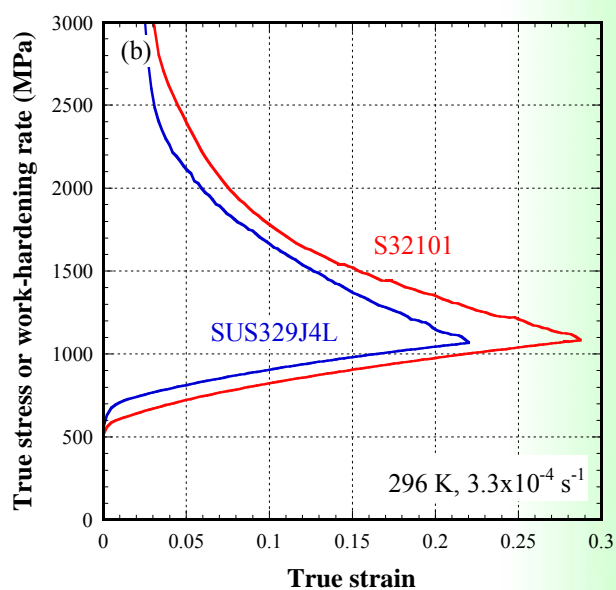
	S32101	SUS329J4L
平均結晶粒径	6.4 μm	4.2 μm
体積率 (γ:α)	51:49	39:61

応力-ひずみ曲線

(a) 公称応力-ひずみ曲線



(b) 真応力-ひずみ曲線, 加工硬化率



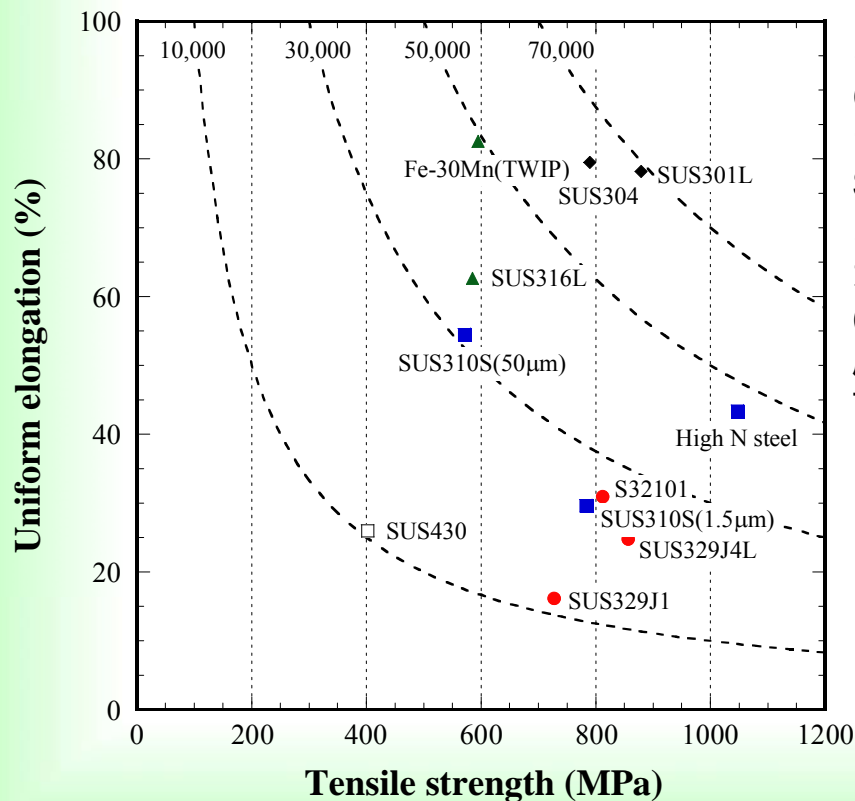
S32101鋼は均一伸びが優れており、それは高い加工硬化率と関係している

S32101とSUS329J4Lの機械的特性

	S32101		SUS329J4L
0.2% proof stress (MPa)	553	<	620
Tensile strength (MPa)	812	<	856
Uniform elongation (%)	33.5	>	24.8
Elongation (%)	60.4	>	37.3

強度は329J4L, 伸びはS32101の方が優れていた

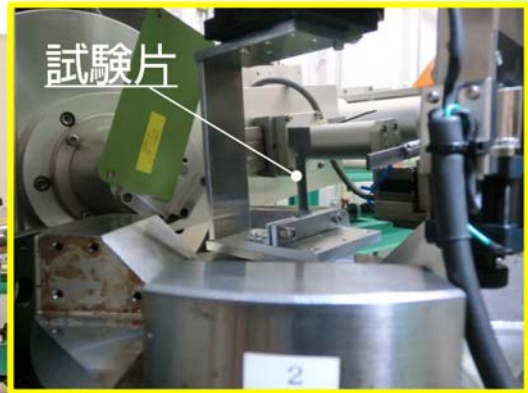
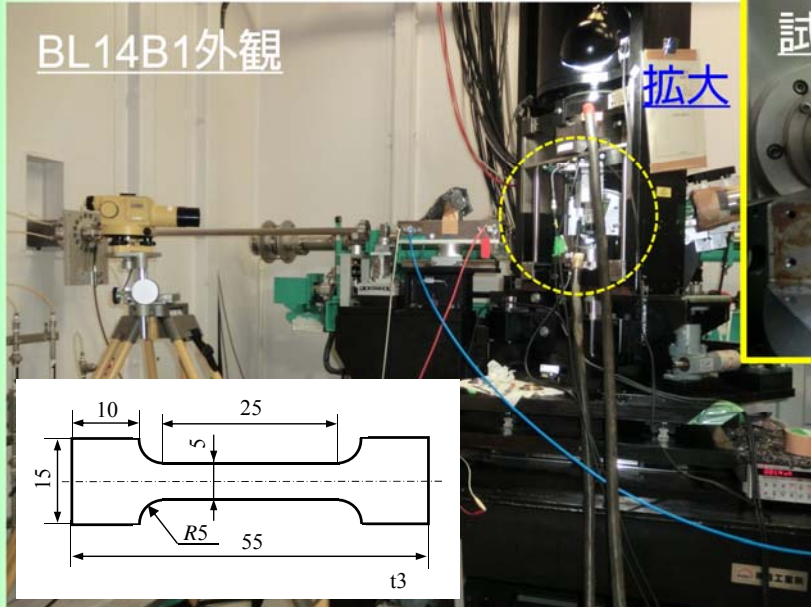
引張強さと均一伸びの関係



引張強さと均一伸びの関係(=強度-延性バランス)で見ると、S32101はSUS329J4Lよりも良く、安定オーステナイト鋼(SUS310S)並みの強度-延性バランスだと言える

白色X線(放射光)実験

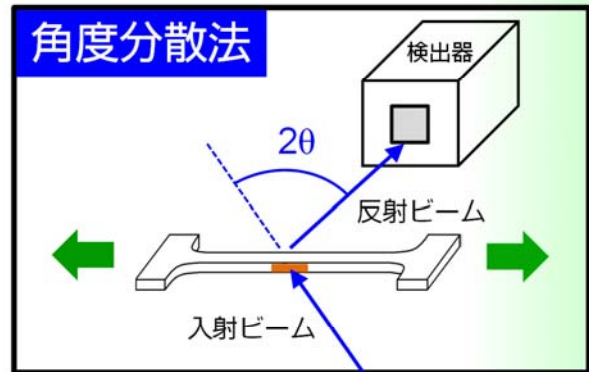
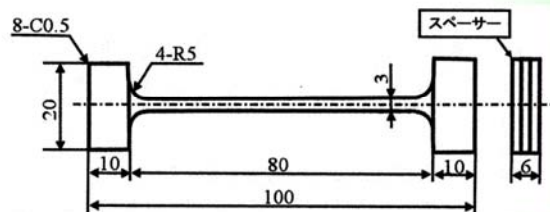
SPring-8(BL14B1)を用いて予めひずみを加えたS32101鋼とSUS329J4L鋼の「残留格子ひずみ」を測定した。



予めひずみを加えた試験片を数本ずつ準備し、それらを写真のように設置し、回折実験を行った。

その場中性子回折実験

RESA (日本原子力開発機構)

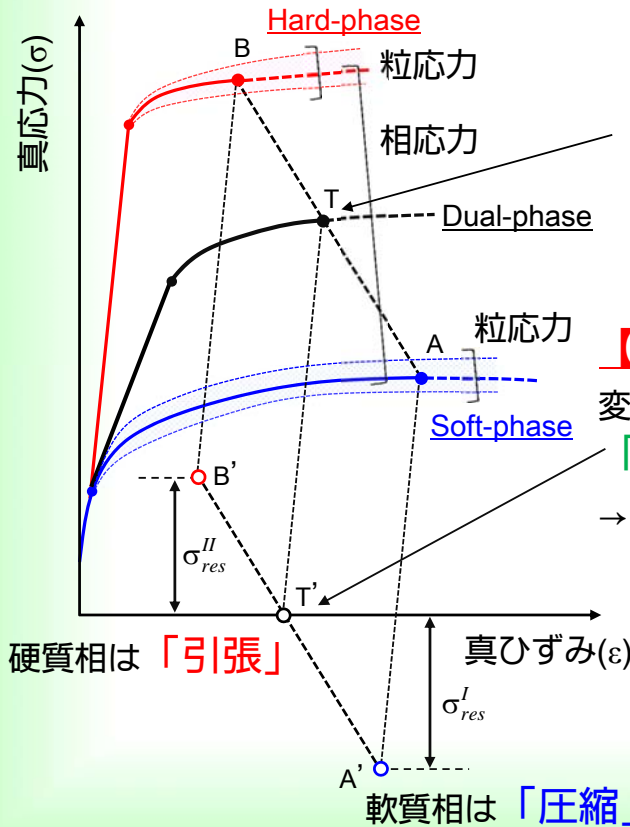


波長	1.9 Å
測定面	$\gamma(111), \gamma(200), \gamma(311)$ $\alpha(110), \alpha(200), \alpha(211)$

引張変形を加え、各[hkl]結晶粒群の回折プロファイルを得た

二相鋼の応力-ひずみ関係と「不均一変形」

(各相・各結晶粒の変形)



【その場中性子回折実験】

変形中の各結晶粒の強度が「格子ひずみ」として示される
→ 粒応力

【白色X線回折実験】

変形途中で除荷した時の各相の残留応力は、「残留格子ひずみ」として示される
→ 粒応力, 相応力

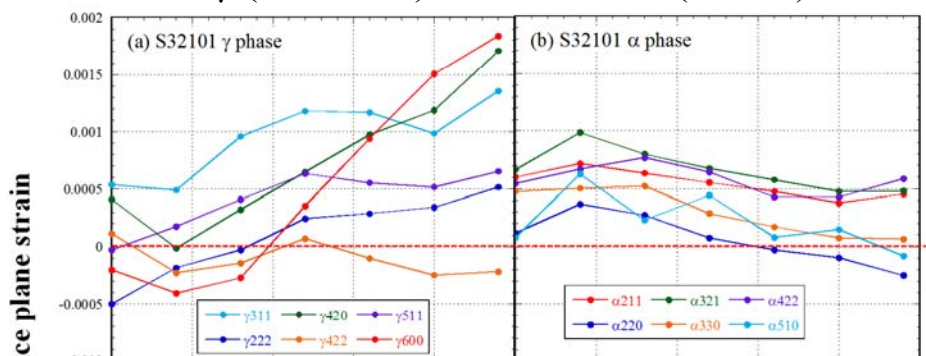
相応力	相間(γとα)の不均一変形差
粒応力	同じ相における結晶粒間の変形差

1. どちらが硬質相か? ~ 残留格子ひずみ

γ (austenite)

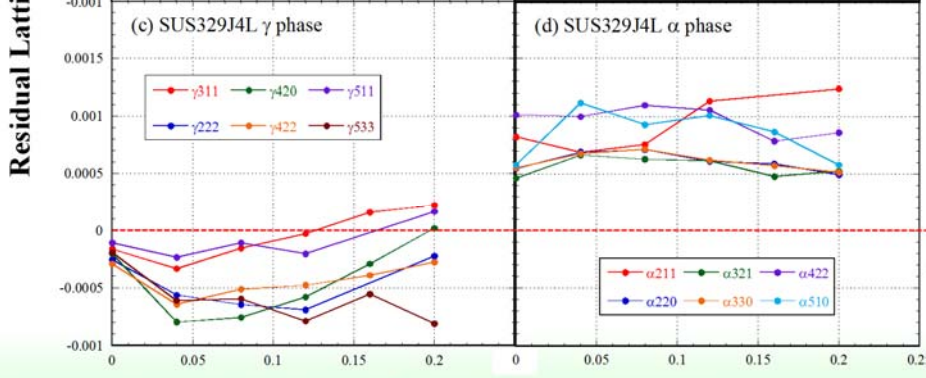
α (ferrite)

S32101



引張(硬質)
圧縮(軟質)

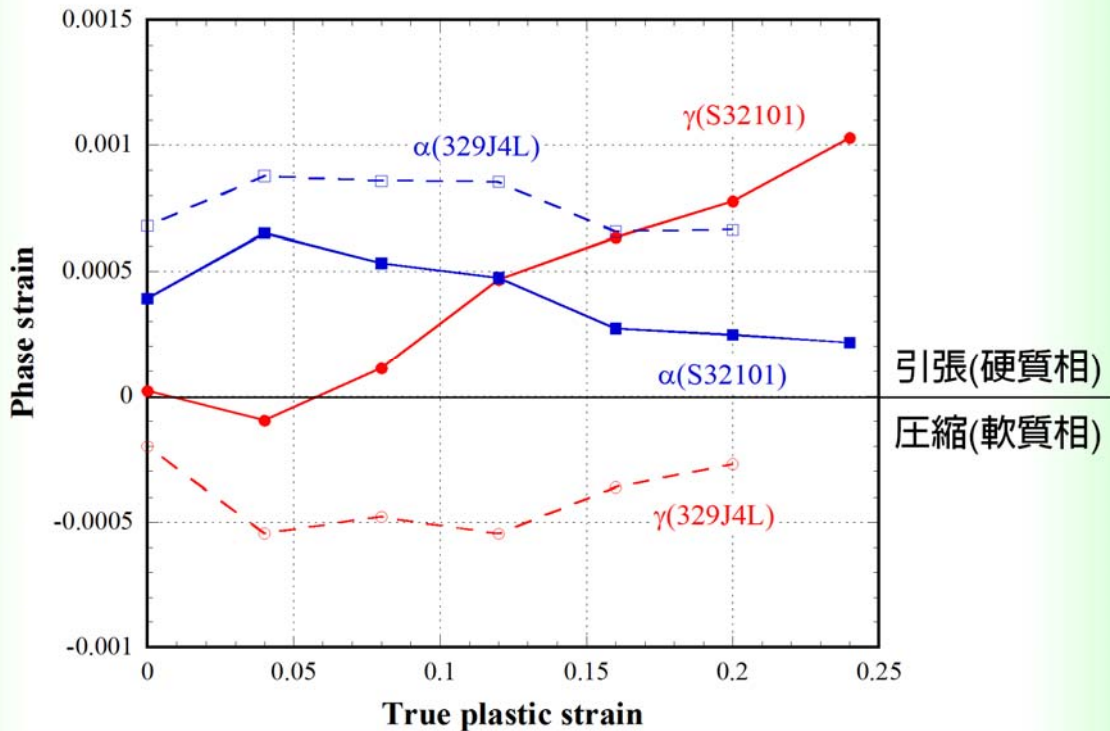
SUS329J4L
(S31260)



引張(硬質)
圧縮(軟質)

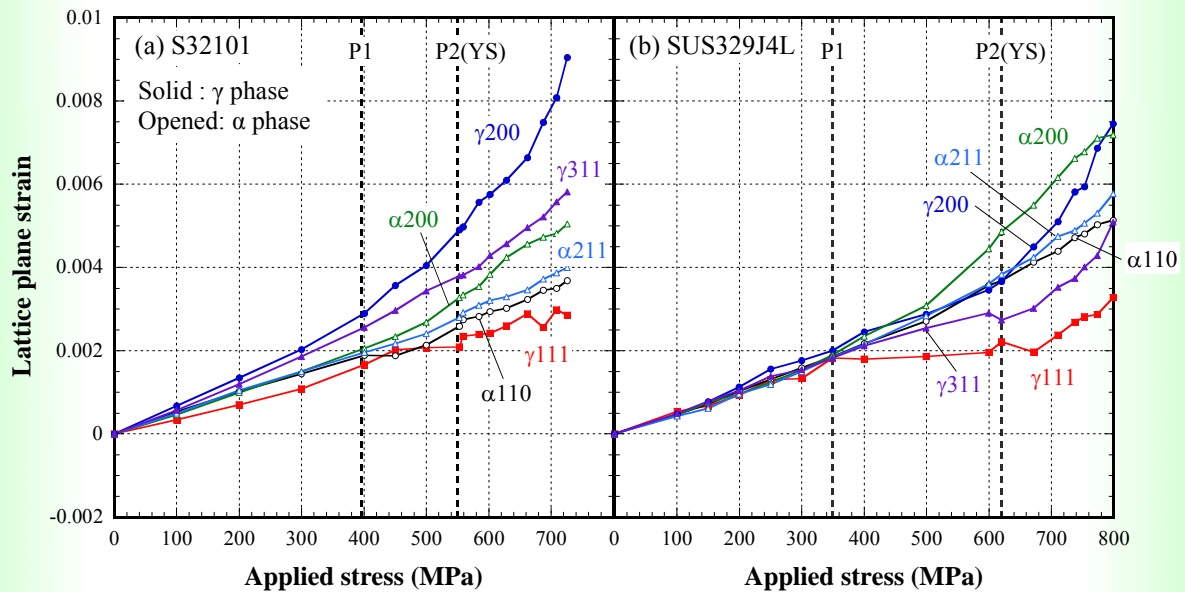
True plastic strain

2. 相間の応力差 ~ 相ひずみ



S32101は変形途中で γ と α の強度が逆転している

3. 各相での結晶粒間の応力差 ~ 粒応力

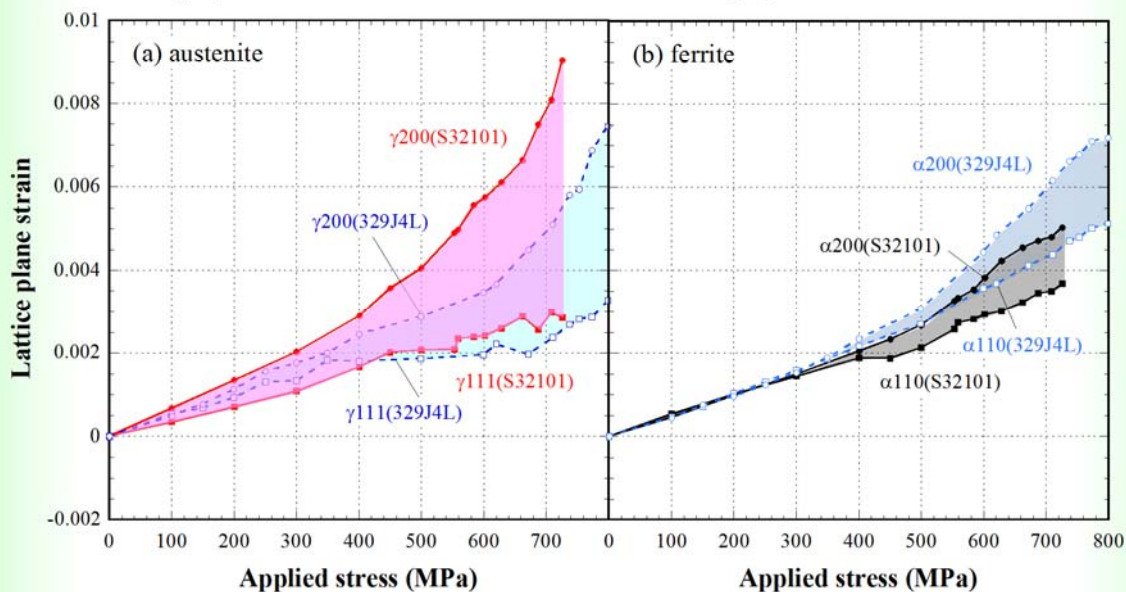


P1まで	弾性変形領域 (γ , α どちらも弾性変形)
P1~P2	弾塑性変形領域 (γ , α 一方が弾性, 一方が塑性変形)
P2以降	塑性変形領域 (γ , α どちらも塑性変形)

3. 各相での結晶粒間の応力差～粒応力

(a) オーステナイト

(b) フェライト



1. どちらも γ 相の粒応力が大きい
2. さらに γ 相の粒応力を比較すると、S32101の方が大きい
3. 格子ひずみ差 = 応力分配 = 加工硬化挙動と関係

S32101鋼の優れた均一伸びの理由

1	マクロな 応力-ひずみ関係		高い加工硬化率
2	不均一 変形挙動	相応力 (相間の変形差)	変形中に γ 相が硬質相になり, α 相との応力差(=相応力)も大 きくなる
		粒応力 (各相の加工硬 化挙動)	α 相よりも大きく、329J4L鋼 の γ 相よりも大きい
3	組織		γ 相の体積率 (S32101: 51%, 329J4L: 39%) 平均結晶粒径