

# マルテンサイト変態に起因した 静水圧応力による 未変態オーステナイトの自己安定化

Self-stabilization of untransformed austenite by  
hydrostatic pressure via martensitic transformation

*Acta Mater.*, 110(2016), 95-102.

東京工業大学 物質理工学院 材料系



中田伸生

転載不可

九州大学 大学院工学研究院

石橋祐二(現:山陽特殊製鋼), 土山聡宏, 高木節雄

例えば, 「古典的核生成」では...

$$\Delta g = \frac{4\pi}{3} r^3 (\Delta G_V + \Delta G_S) + 4\pi r^2 \cdot \sigma$$

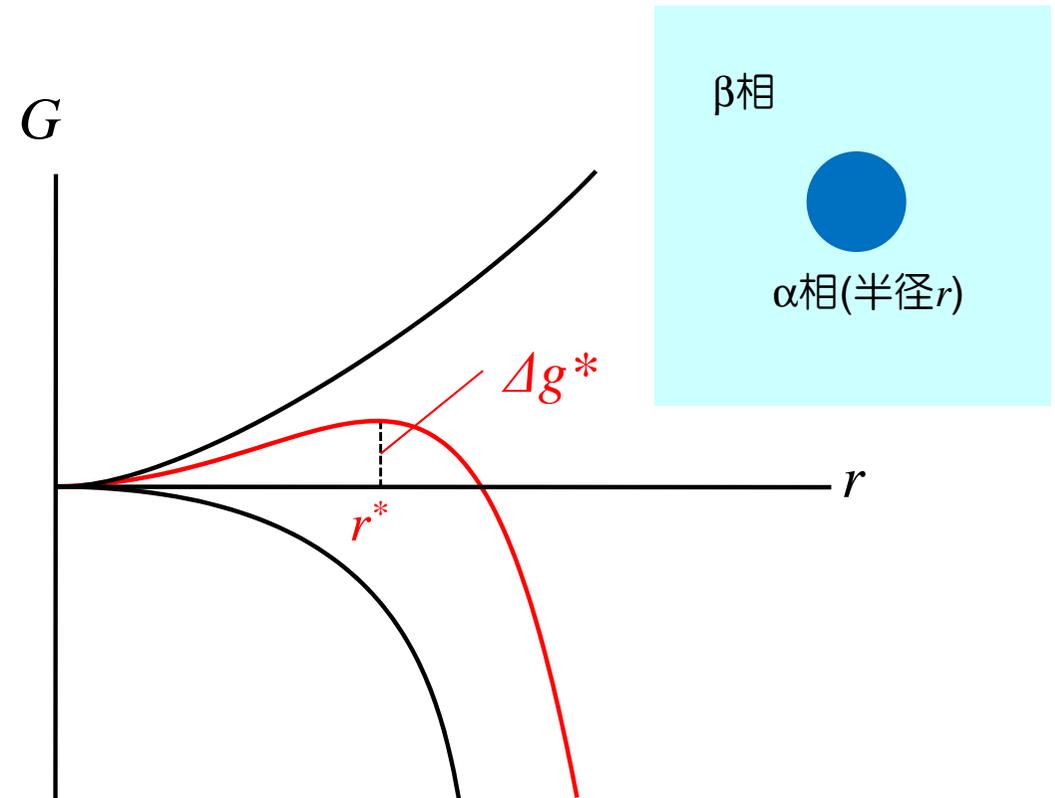
$$r^* = -\frac{2\sigma}{\Delta G_V + \Delta G_S}$$

$r$ : 核の半径

$\Delta G_V$ : 相変態に伴う化学的自由エネルギー変化

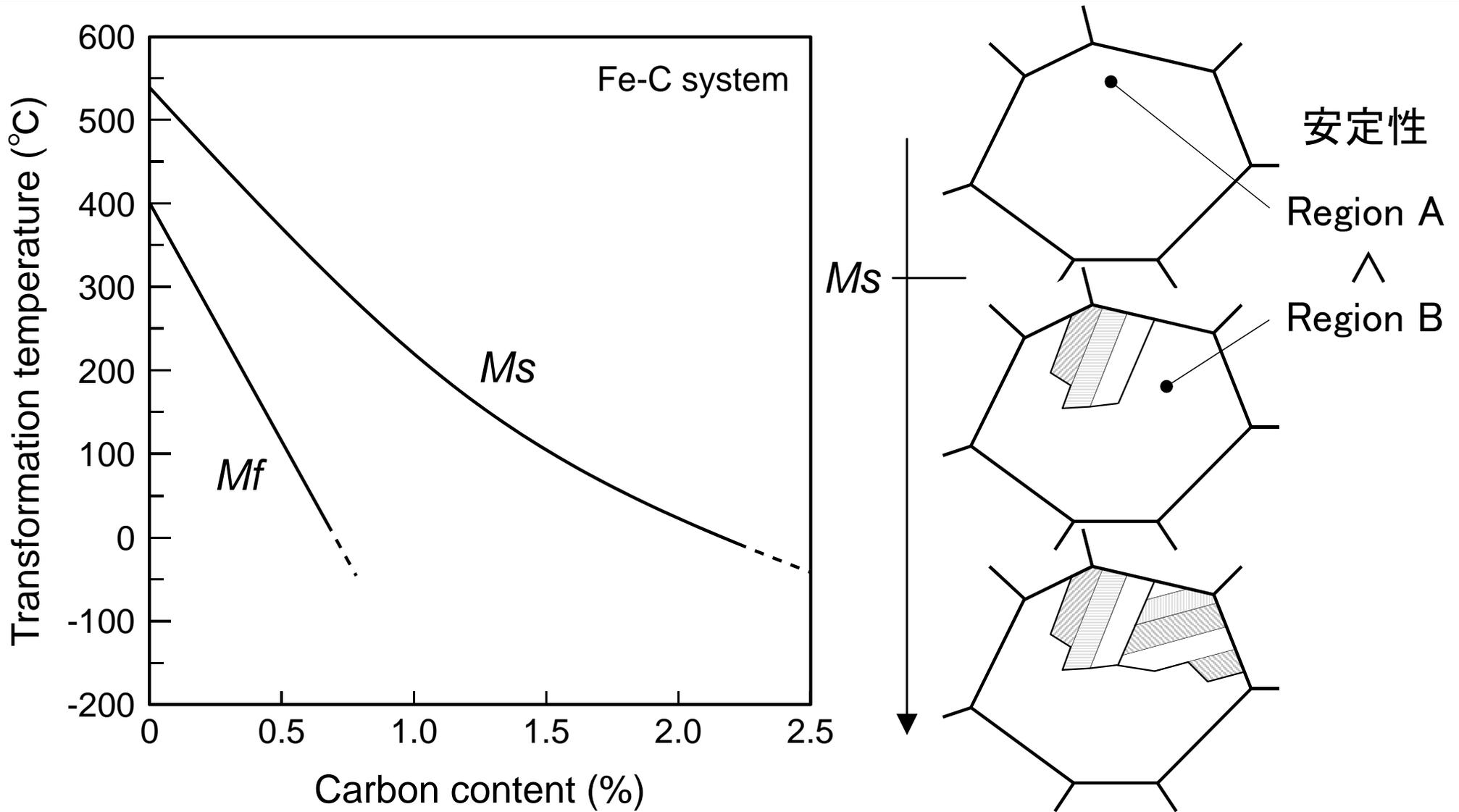
$\Delta G_S$ : 相変態に伴う弾性ひずみエネルギー変化

$\sigma$ :  $\beta$ 母相/ $\alpha$ 相の界面エネルギー



“弾性ひずみは無視, もしくは平均的な絶対値のみが議論”

本当にそれで良いのか？



- 侵入型元素の分配
- 核生成能の違い(粒界)
- 結晶粒の動的微細化
- 静水圧応力

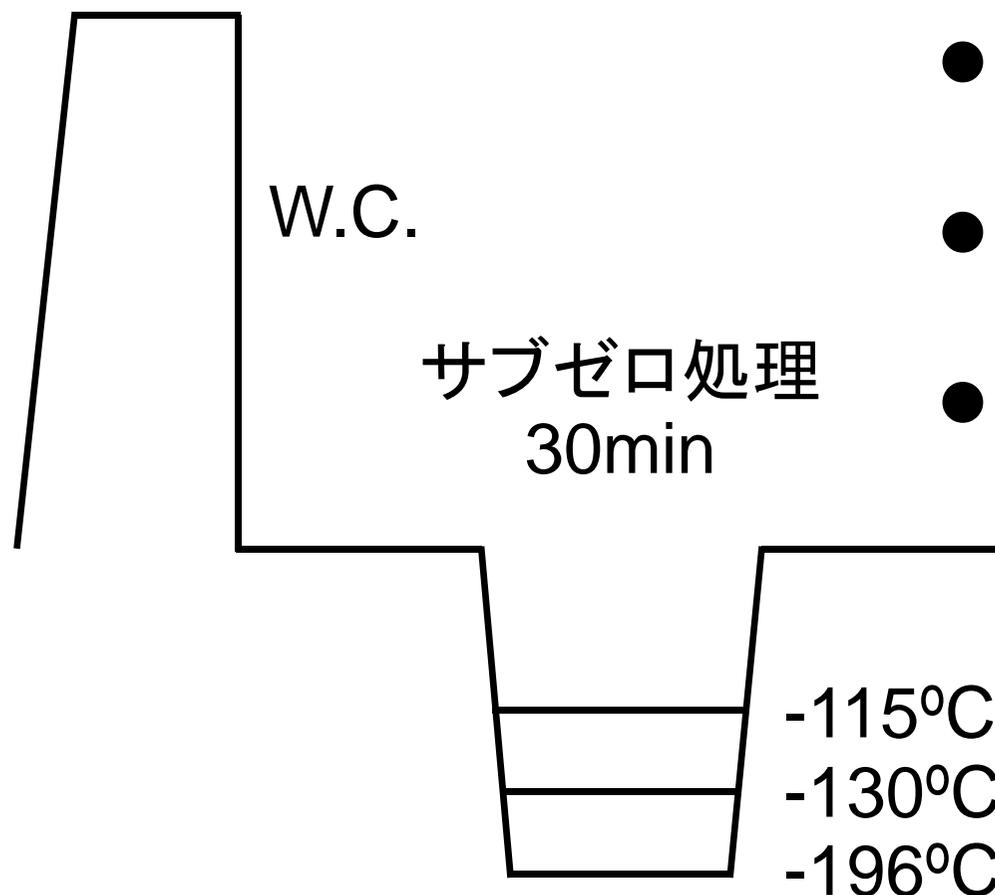
- × 純鉄でも100°C以上の温度差
- △ M/A異相界面に個性があるか？
- 形態による差があるか？
- ？

Fe-Niオーステナイト合金を用いて、

1. マルテンサイト変態に伴って発生すると考えられる静水圧応力を実測し、その性質(量や分布など)を巨視的・微視的に評価する。
2. マルテンサイト変態により発生する静水圧応力が残留オーステナイトの安定性に及ぼす影響を調査する。

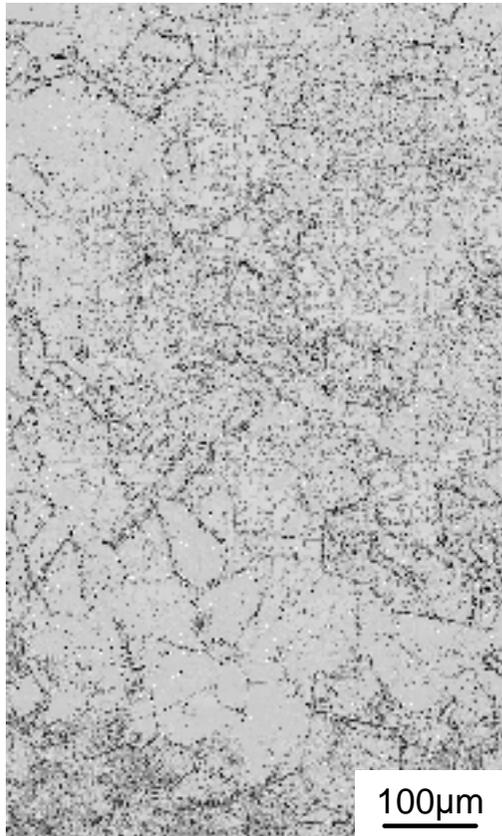
C	Si	Mn	P	S	Ni	Ti	Fe	Ms
<b>0.003</b>	0.036	0.836	0.002	0.003	<b>26.75</b>	<b>0.15</b>	bal.	-68°C

溶体化処理  
1000°C-30min



- 組織観察  
光学顕微鏡、SEM、EBSD
- マルテンサイト体積率測定  
XRD
- 格子定数測定(静水圧応力)  
XRD
- 静水圧応力分布測定  
EBSD/Wilkinson法

Solution treated



オーステナイト単一  
Ni偏析なし

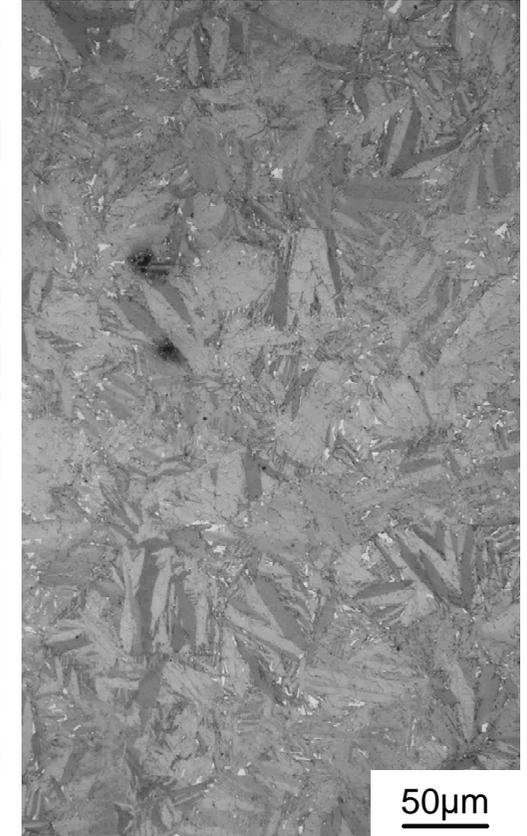
-115°C subzero



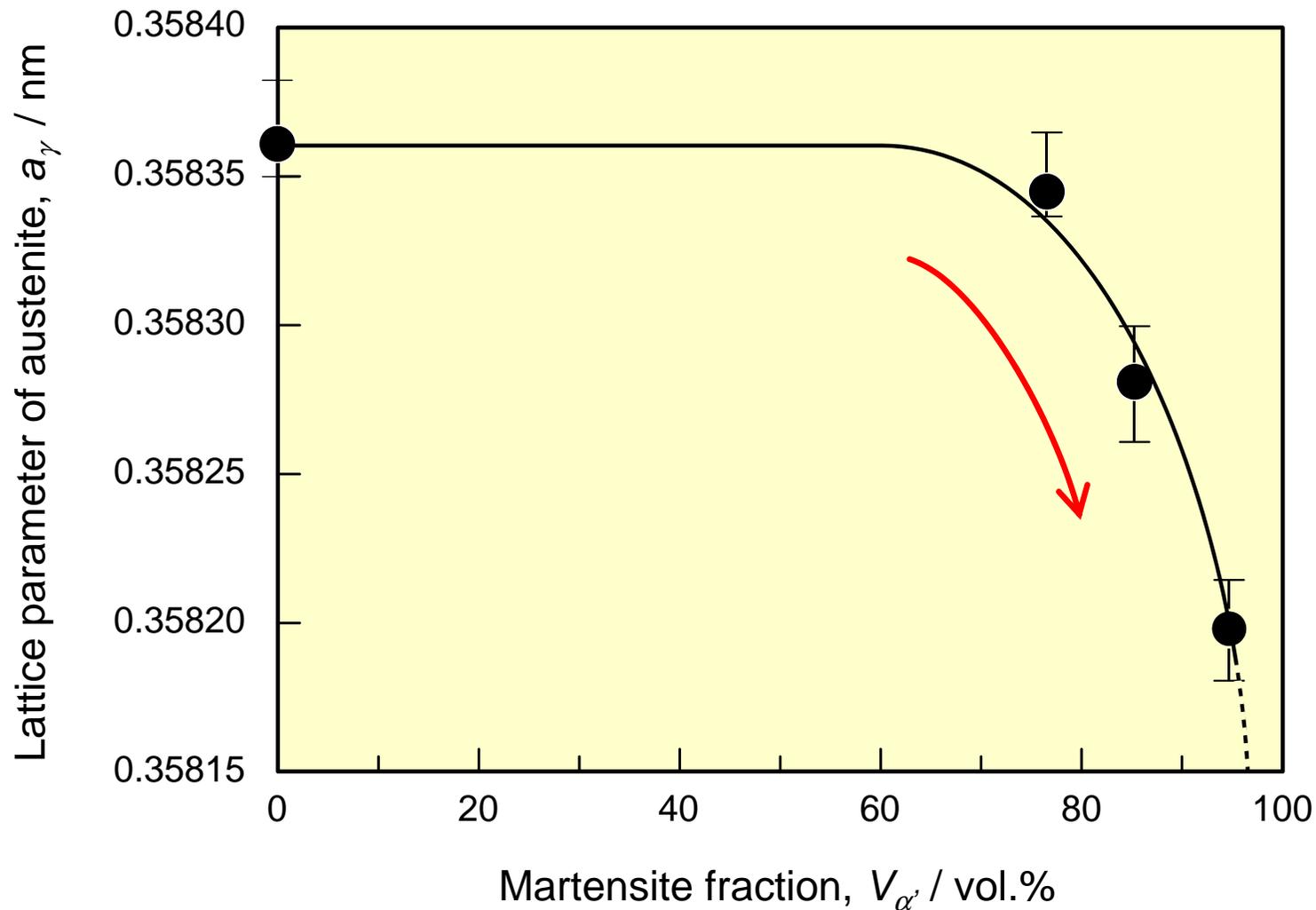
-130°C subzero



-196°C subzero



(マルテンサイト+残留オーステナイト)二相  
主にレンズマルテンサイトが均一に生成



マルテンサイト体積率>60%

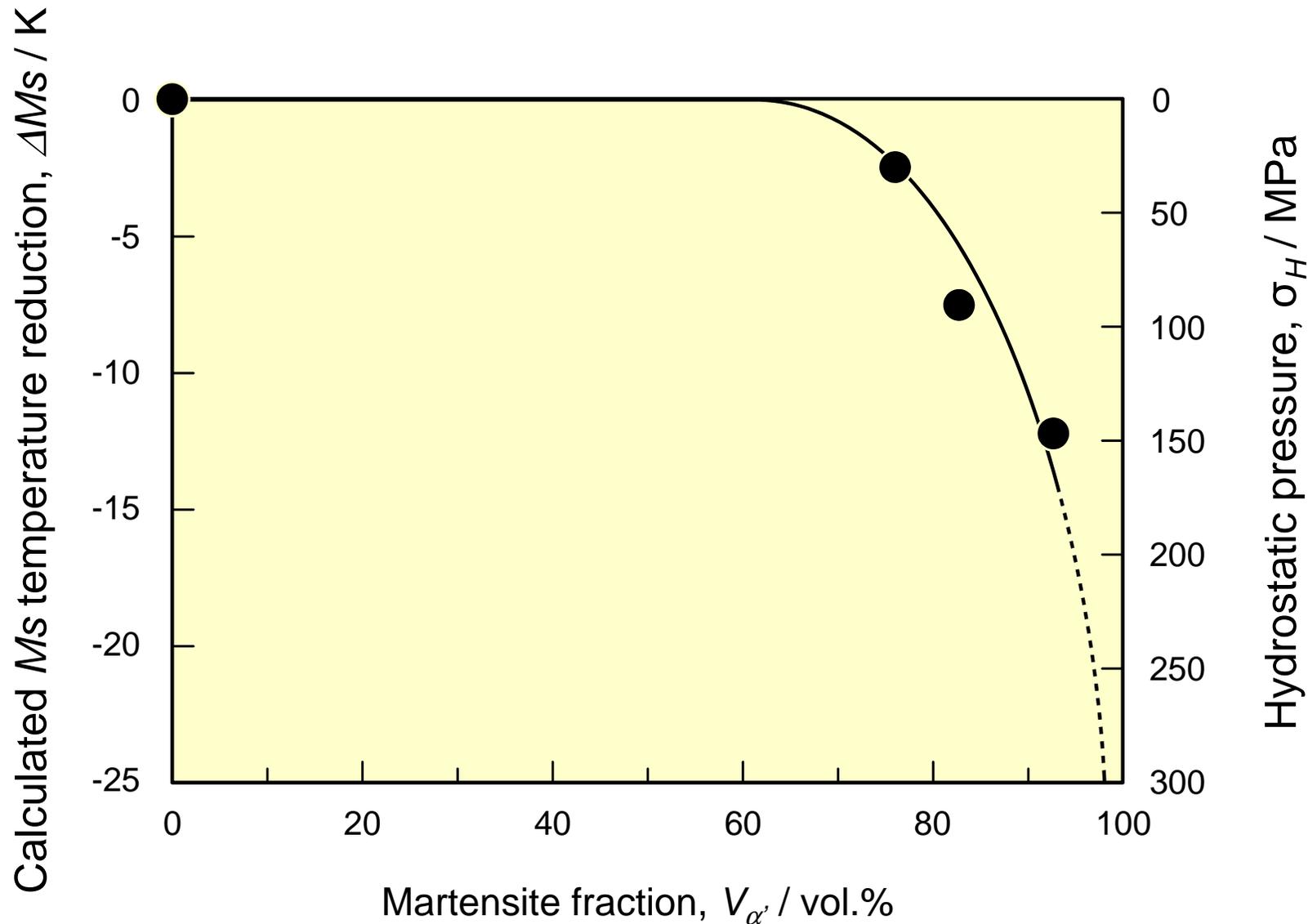
残留オーステナイトの格子定数が急激に減少  
(マルテンサイトに囲まれることが重要)

## 静水圧応力 $\sigma_H = K \left( \frac{\Delta V_\gamma}{V_\gamma} \right)$ [Pa]

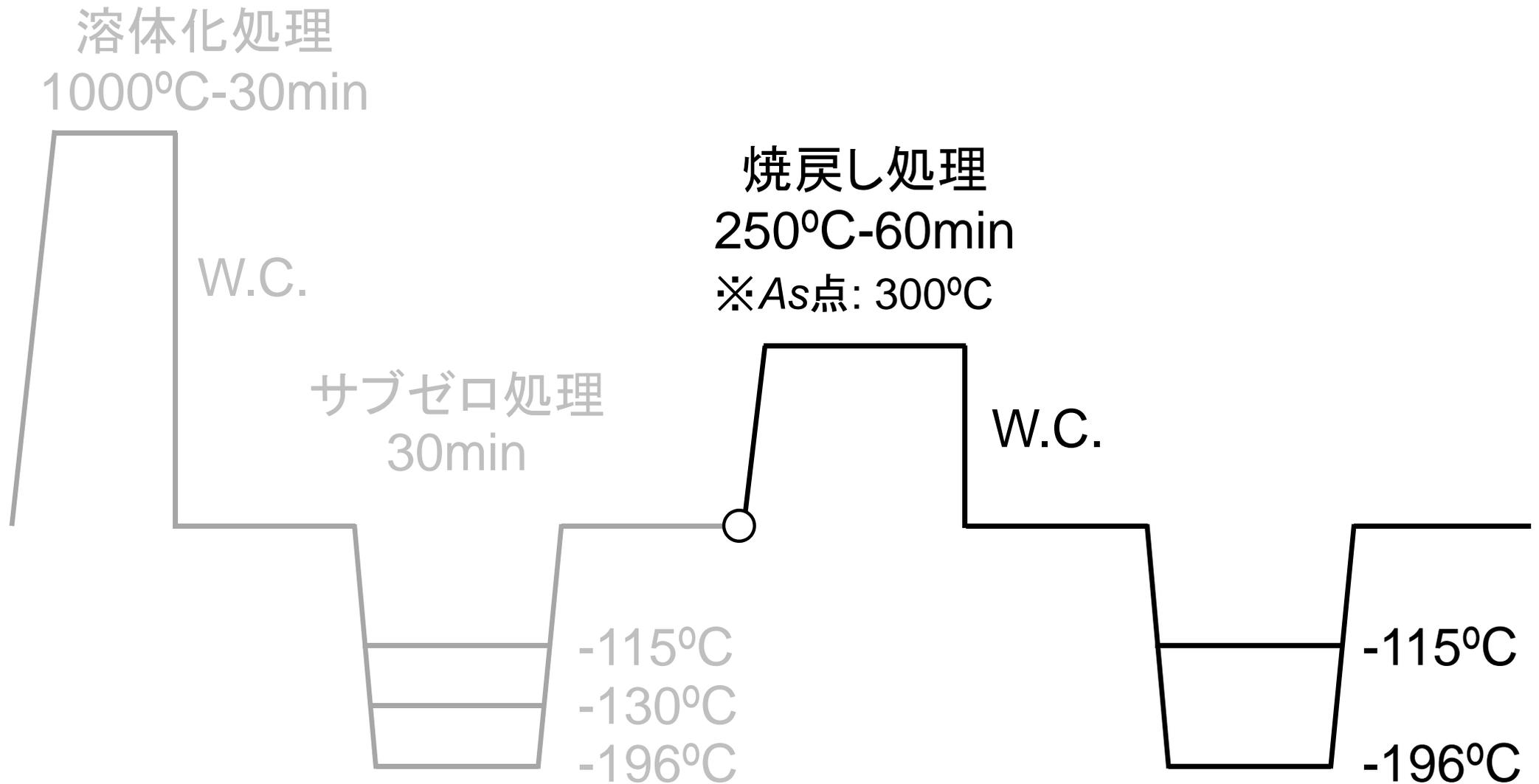
- $\sigma_H$ : 静水圧応力 (Pa)
  - $K$ : 体積弾性率 (Pa)
  - $\Delta V_\gamma / V_\gamma$ : 体積収縮率 (-)
- ( Fe-30%Ni合金の $K$ (室温)  $\rightarrow$  102GPa ( $E$ と $\nu$ から算出)  
 日本機械学会: 金属材料の弾性係数,  
 (1980), pp.52-64.

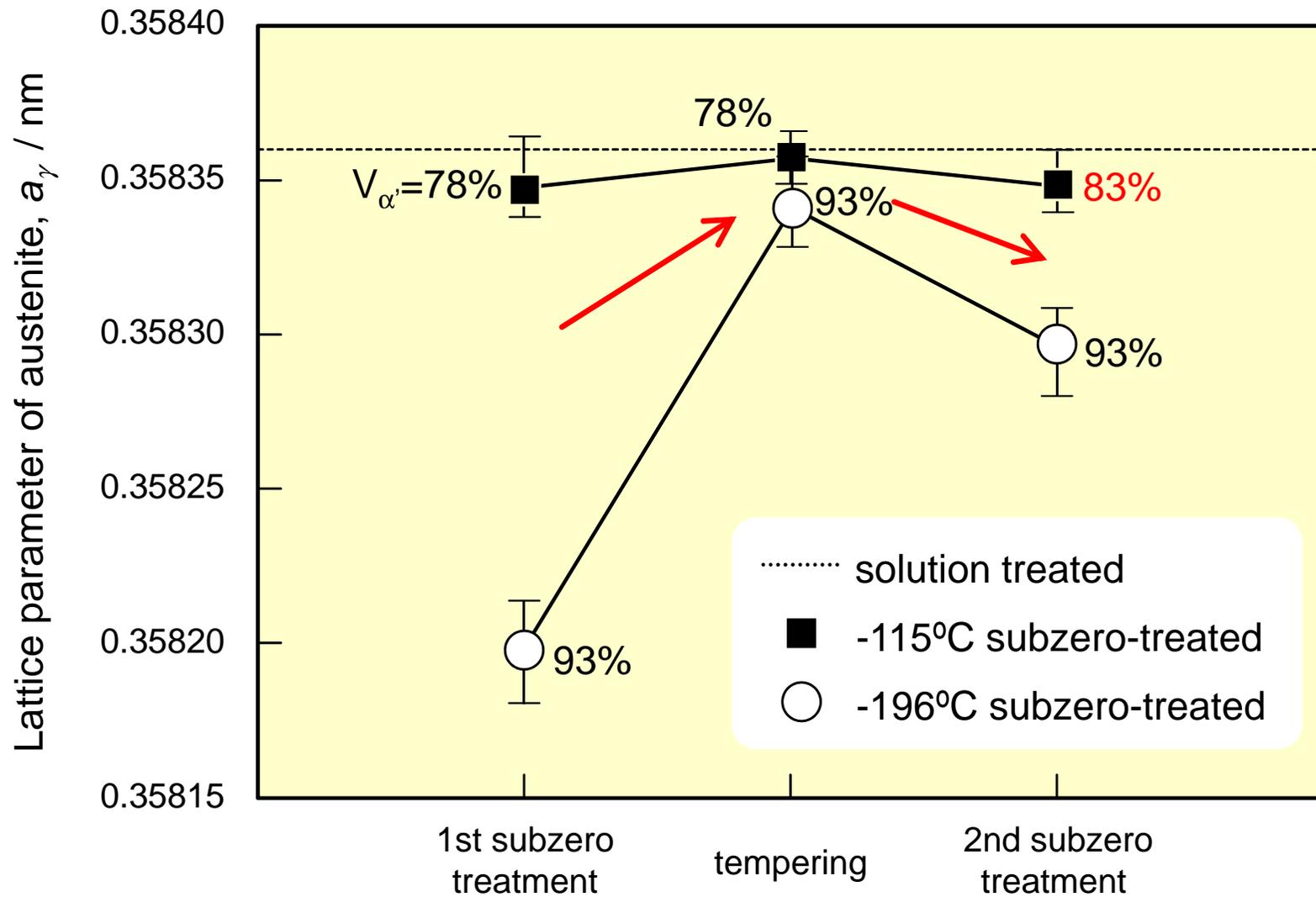
	Lattice parameter of austenite $a_\gamma$ (nm)	Volume of unit lattice $V_\gamma (\times 10^{-2} \text{ nm}^3)$	Reduction rate in volume of unit lattice $\Delta V_\gamma / V_\gamma$ (%)	Hydrostatic pressure $\sigma_H$ (MPa)
Solution treated material	0.35838	4.6029	0	-
-115°C S.Z. treated material	0.35834	4.6015	0.031	31.3
-130°C S.Z. treated material	0.35828	4.5989	0.088	89.7
-196°C S.Z. treated material	0.35821	4.5964	0.142	142

低温においても大差ないと思われる  
 ※剛性率  $\uparrow$ 、熱膨張によるミスフィット  $\downarrow$



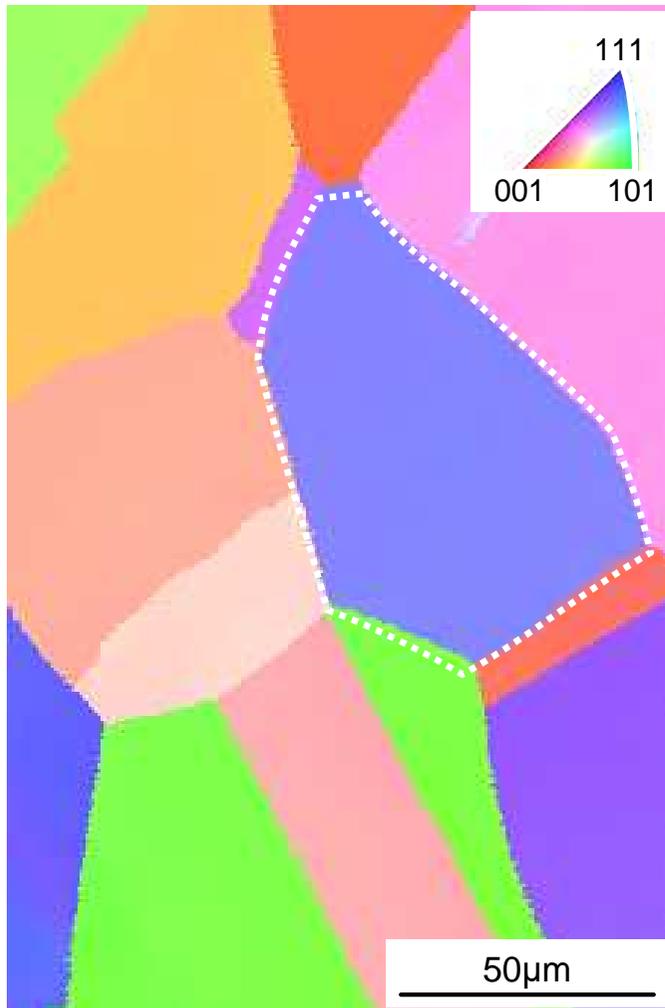
静水圧応力の発生により残留オーステナイトの $M_s$ は  
 $-10^{\circ}\text{C}$ 程度変化すると試算(最大でも $-30^{\circ}\text{C}$ 程度)





1. 250°C低温焼戻しにより静水圧応力の緩和

Solution treated



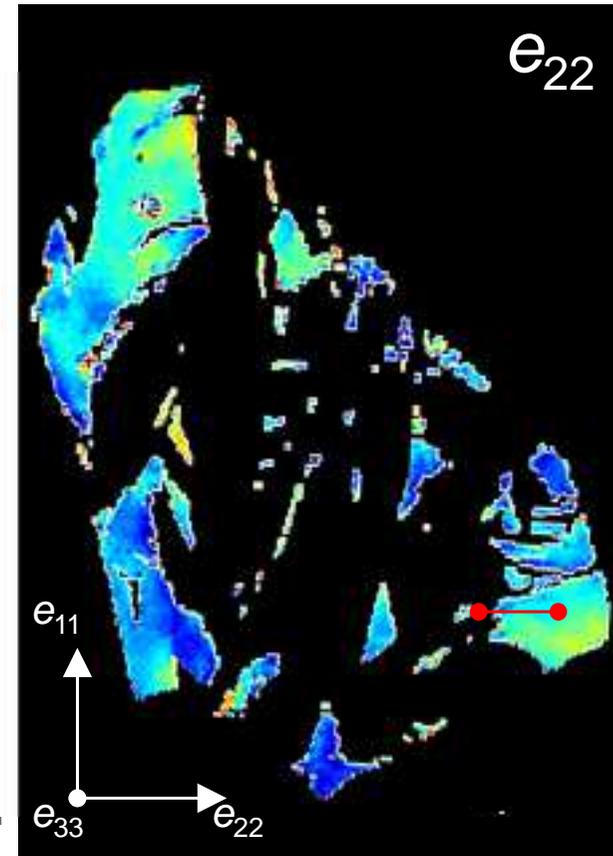
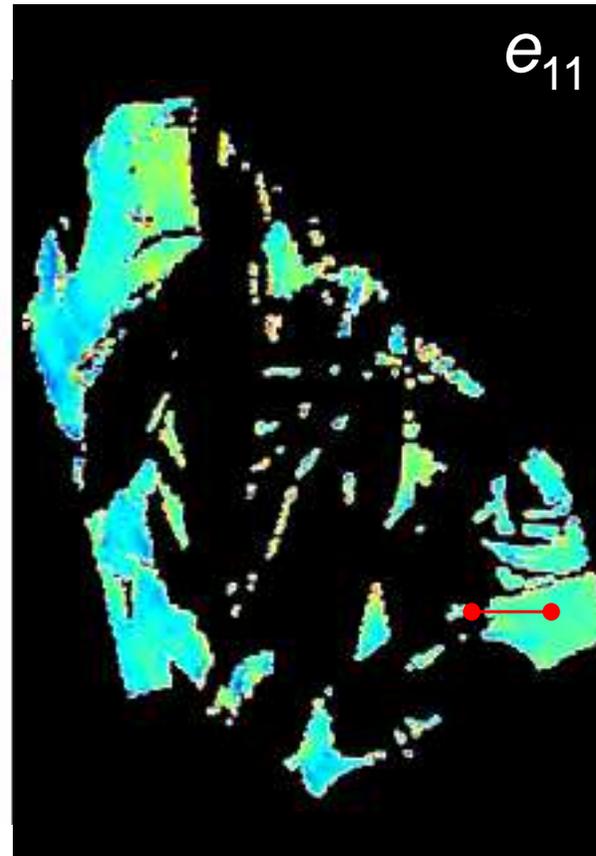
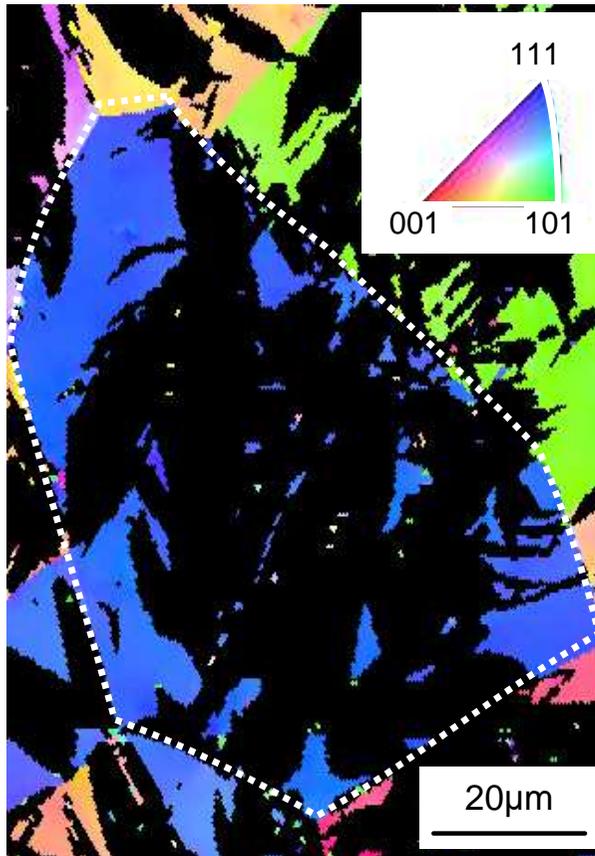
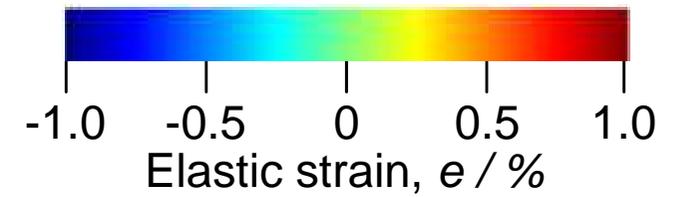
-115°C subzero



250°C tempering



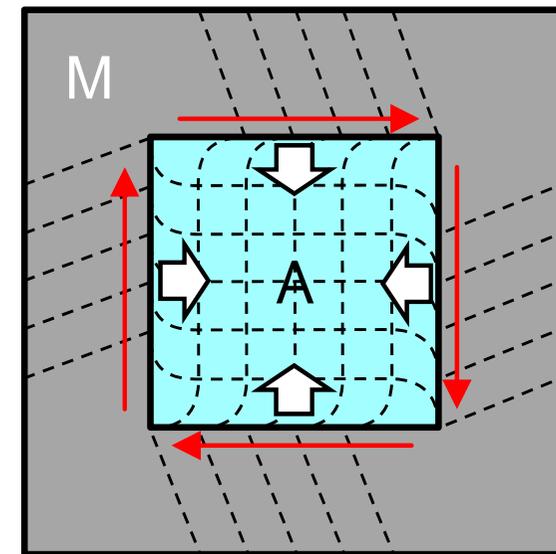
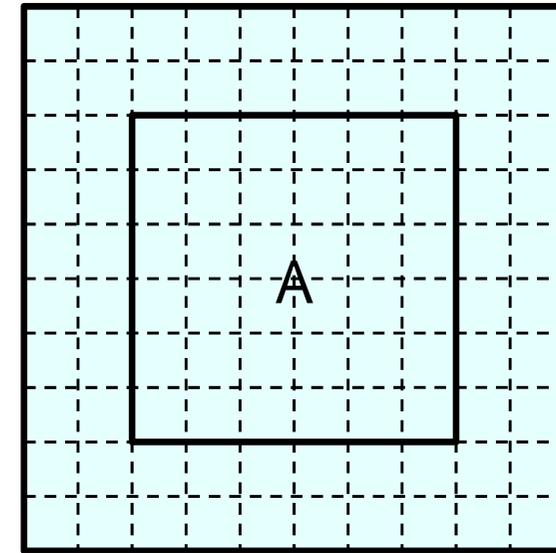
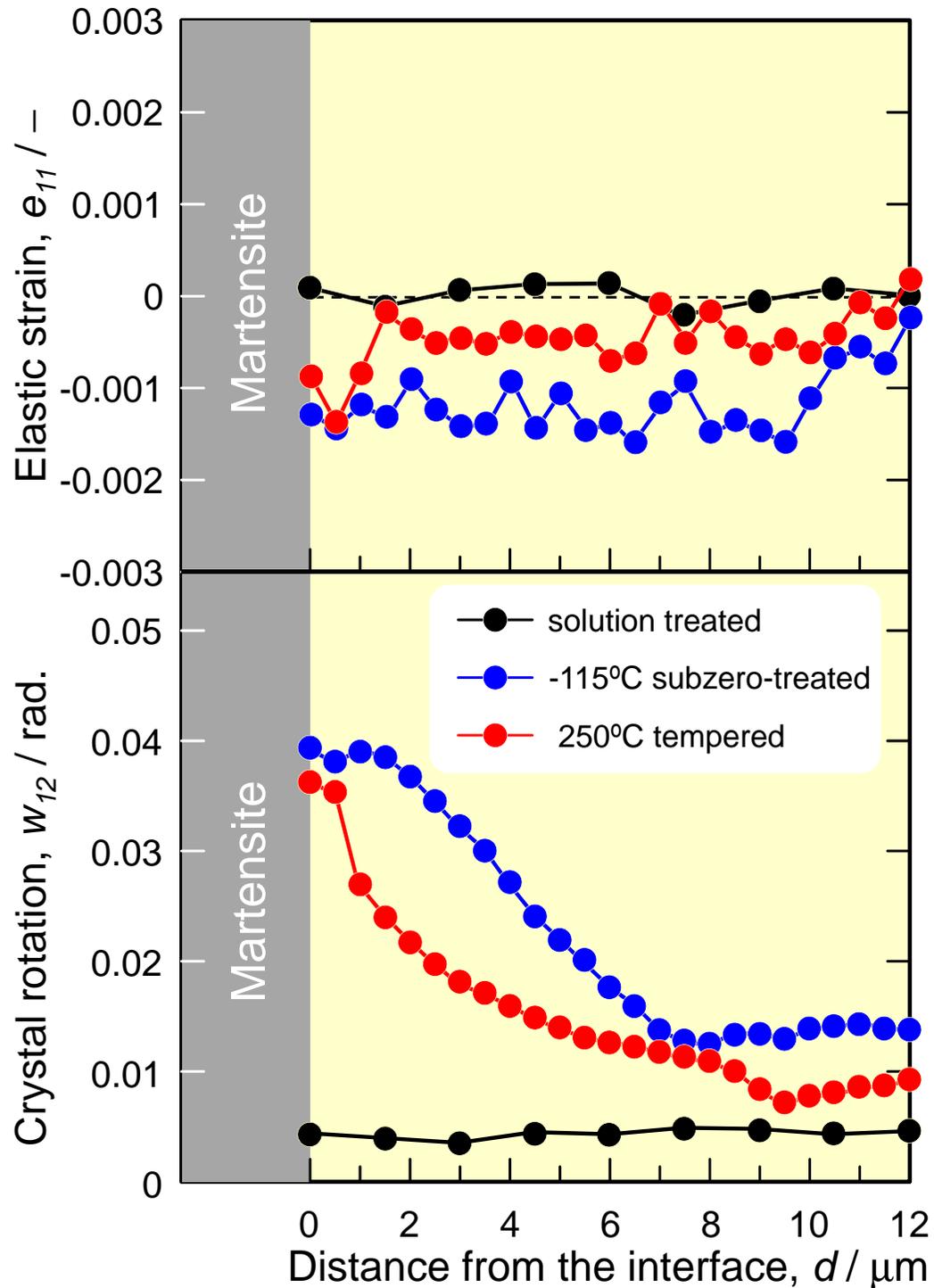
同一視野におけるEBSD/Wilkinson法の実施

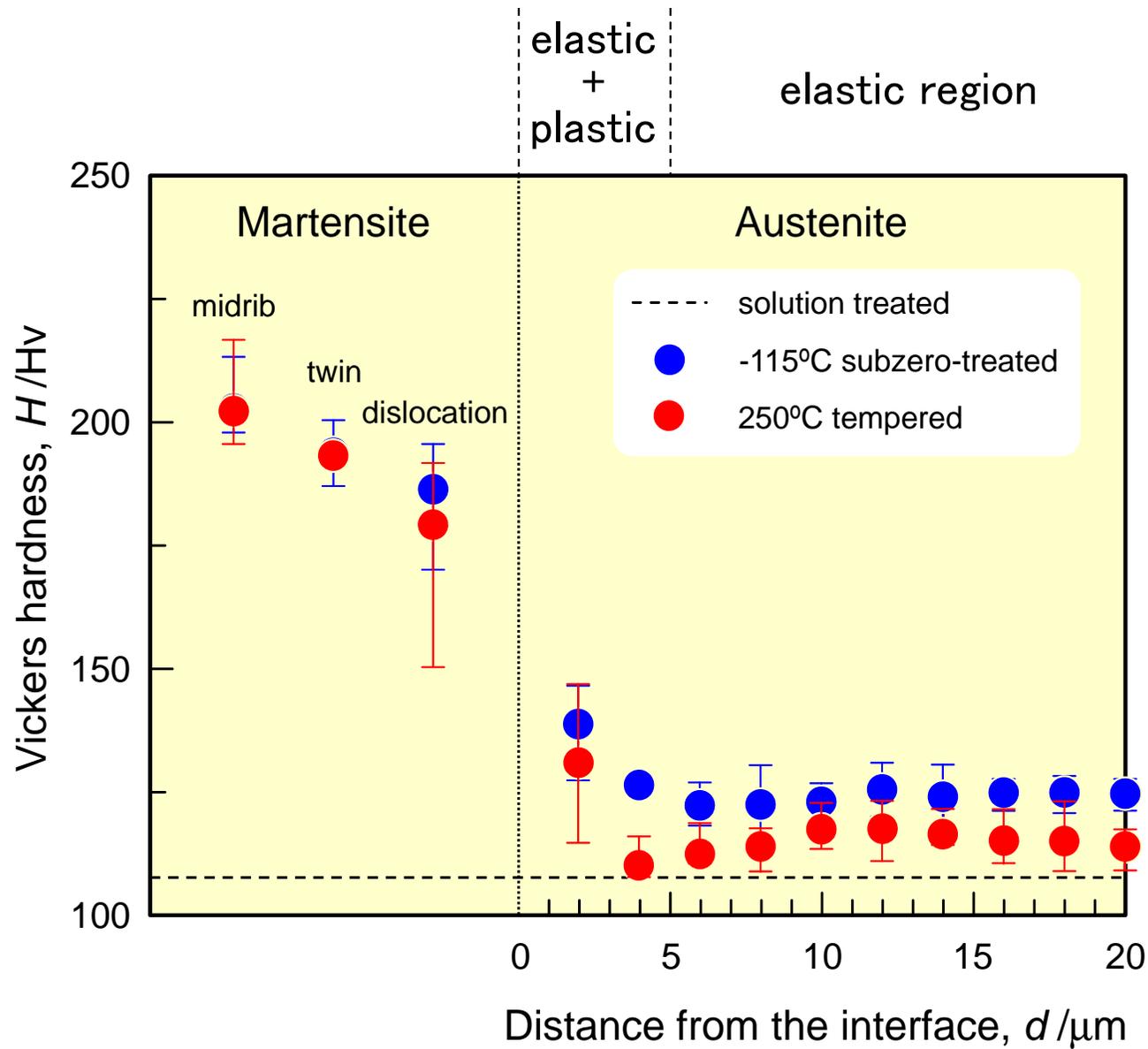


Ave.  $-1.16 \times 10^{-3}$

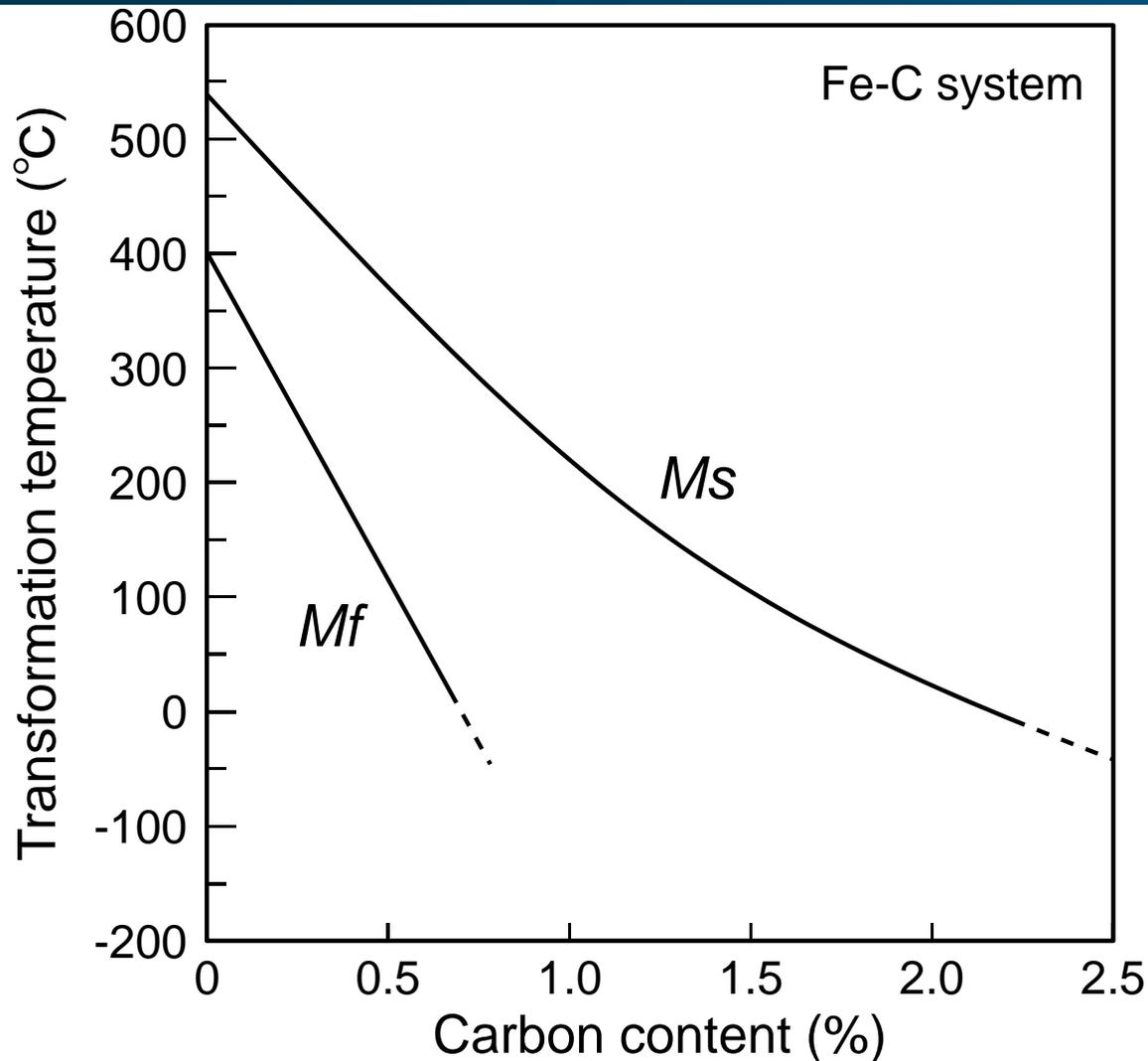
$-2.91 \times 10^{-3}$

- ✓ 残留オーステナイトの粒径が小さいほど、大きな弾性ひずみ
- ✓ 個々の粒内における弾性ひずみは比較的均一に分布する傾向
- ✓ EBSD/Wilkinson法では弾性ひずみを過大評価する  $-348\text{MPa} > -31\text{MPa}(\text{XRD})$





硬度低下 ← 静水圧応力の緩和 → オーステナイト安定性初期化



- 侵入型元素の分配
- 核生成能の違い(粒界)
- 結晶粒の動的微細化
- A母相への転位導入
- 静水圧応力
- × 純鉄でも100°C以上の温度差
- △ M/A異相界面に個性があるか？
- 形態による差があるか？
- マルテンサイトの核生成に大きく影響？
- △ 最大でも20°C程度(C濃度に大きく依存)

Fe-27%Niオーステナイト合金を用いて、マルテンサイト変態に伴って発生する静水圧応力を調査した結果、以下の知見を得た。

1. 微視的な観点では、静水圧応力はマルテンサイトに囲まれた残留オーステナイト粒内に比較的均一に分布しており、オーステナイトの微細化に伴い増加する。これに対応して、巨視的には、マルテンサイトが母相となり、その体積率が増加することで静水圧応力は増加する。さらに、この静水圧応力は焼戻し処理により容易に緩和される。
2. 静水圧応力だけでなく、格子不変変形に起因して、マルテンサイト界面近傍の残留オーステナイトに高密度の転位が導入される。そして、この転位は、静水圧応力とは対照的に焼戻し処理により消滅し難い。
3. マルテンサイト変態により発生する静水圧応力は残留オーステナイトを動的に安定化する。しかしながら、その安定化効果は最大でも $-30^{\circ}\text{C}$ 程度と見積もられ、一般的な $M_s$ - $M_f$ よりも小さい。つまり、静水圧応力以外にも残留オーステナイトを動的に安定化する因子があると考えられる(動的結晶粒微細化効果、未変態オーステナイトの加工硬化など)。

**X線回折により測定される未変態オーステナイトの格子定数から固溶合金元素量(とくに炭素、窒素)を見積もるべきではない!**