AuCd 合金のマルテンサイトの結晶構造と中性子散乱

帝京大学理工学部 大庭卓也

Takuya OHBA: Crystal Structure of AuCd Martensite and Neutron Scattering

The AuCd is one of the typical alloys which show martensitic transformation. There are two distinct martensites called γ_2' and ζ_2' phases appearing proximate to the composition of $\text{Au}_{52.5}\text{Cd}_{47.5}$ and $\text{Au}_{50}\text{Cd}_{50}$, respectively. The crystal structure of ζ_2' martensite was solved and it was described to be a superposition of transverse waves whose polarization is $\langle 1\bar{1}0 \rangle$ and wave vector is $\langle 110 \rangle$. The phonon dispersion relations were observed for $\text{Au}_{52.5}\text{Cd}_{47.5}$ and $\text{Au}_{50.5}\text{Cd}_{49.5}$ overcoming the difficulty of strong absorption of neutron with an isotope ^{114}Cd . The phonon softening behaviors were observed in addition to the peculiar behavior on $\text{Au}_{52.5}\text{Cd}_{47.5}$.

1. はじめに

マルテンサイト変態はよく知られた変態でありながら、歴史的に金属の組織観察から発展してきたため、多くの分類分けがなされ、初心者にはとっつきにくいところもある。そこでまずマルテンサイト変態の特徴と最近の話題のいくつかを紹介し、次に本論文の主題である結晶構造と中性子散乱の話に移っていくことにする。

マルテンサイト変態は鋼の硬化に利用されるなど、古くから知られている。また、形状記憶合金で知られている形状記憶効果はマルテンサイト変態を利用したものであり、工学的に広く利用されている。マルテンサイト変態は表面に現れる特徴的な組織に注目し、いわゆる結晶学的な研究が多く行われている。マルテンサイト変態に見られる特徴には、次のようなものがある。¹⁾ (1) 表面起伏や形状変化が見られる、(2) 晶癖面といわれるマルテンサイト相と高温相(母相といわれる)の界面が特定の面として存在する、(3) 結晶方位関係を持っている、(4) 双晶や積層欠陥のような欠陥が不可避免的に導入される(これを格子不変変形という)、(5) 無拡散変態である。マルテンサイト変態の研究は日本では先駆的な研究が多くなされ、組織に着目したマクロな結晶学的な研究ともいえるマルテンサイト変態の現象論的理論として知られているものも、多くの成功をおさめている。²⁾⁻⁵⁾

統計熱力学的な観点から、マルテンサイト変態のメカニズムに関わった研究も盛んに行われている。この説明には多少の言葉の説明が必要なので簡単に言葉の説明をしながら話を進めていく。まず、熱による変態駆動力と変態によって生じる弾性的な力の兼ね合いから熱弾性型、非熱弾性型と分類されている。^{6), 7)} 一般的に熱弾性型と呼

ばれているものは変態の際の温度ヒステリシスが小さく、形状記憶合金として利用されているのはこのタイプのものである。非熱弾性型の典型としては鉄系の物質があり、大きな温度ヒステリシスを持っている。また、温度に対する変態の進み方から、温度を一定にしておいても変態が進む等温変態と、温度を下げる事によって変態が進む非等温変態という分類もされている。^{8), 9)} これらはマルテンサイト変態の核生成と成長の問題と関わっている。最近、掛下ら¹⁰⁾により等温変態と非等温変態に関して統一的理解がなされるようになり、新たな展開が見えてきている。これは変態の潜伏時間という問題¹¹⁾ともかかわっている。さらに、変態に前駆してマルチバリエーションが生成している方がエネルギー的に得であるという理論や、双晶境界の構造とのかかわりなど^{12), 13)}も問題になっている。

原子レベルのミクロな立場にたつと、マルテンサイト変態は無拡散変態で起こる変位型変態として知られ、一次の相変態の代表的なものとして知られている。原子レベルで考えた変態のメカニズムについては、マルテンサイト相と母相との結晶方位関係がある事から、ある程度の推察がなされてきた。多くの β 相合金では母相の立方晶面がマルテンサイト相の稠密面になるような変態メカニズムを考えてきた。このなかでフォノンのソフト化という考え方は魅力的な考え方の一つであり、中性子散乱の非弾性散乱によるフォノンの測定もなされている。しかしフォノンのソフト化とマルテンサイト相の結晶構造とが必ずしもよい一致を示しているわけではない。¹⁴⁾⁻¹⁶⁾ また、X線による研究もなされ、前駆現象として弾性散乱が観察され、それらがブリルアンゾーンの周期性を持っていないという報告もなされている。¹⁷⁾ この結果から山田らによるMLRモデル^{18), 19)}なども提案されている。

AuCd 合金はマルテンサイト変態をする典型的な合金として知られ、変態の温度ヒステリシスは小さく、熱弾性型と分類されるものである。この AuCd 合金の 1:1 付近の母相の結晶構造は CsCl 型の構造であり、マルテンサイト相にはわずかな組成の違いにより、二つのまったく異なった相が現れる。一つは γ_2' 相といわれ $\text{Au}_{52.5}\text{Cd}_{47.5}$ 付近に、もう一つは ζ_2' 相といわれ $\text{Au}_{50}\text{Cd}_{50}$ 付近に現れる。マルテンサイト変態の現象論的理論と呼ばれている研究に関しても、AuCd は最初に適用された合金のひとつである。古くから多くの研究がなされ、それらの相の存在は知られていながら、特に ζ_2' 相については、その結晶構造は未知のままであった。

この報告では、長いあいだ結晶構造が未知であった ζ_2' マルテンサイト相の結晶構造、および γ_2' マルテンサイト相とそれらの中性子散乱の最近の研究結果について述べる。

2. ζ_2' 相 $\text{Au}_{50.5}\text{Cd}_{49.5}$ と γ_2' 相 $\text{Au}_{52.5}\text{Cd}_{47.5}$ の結晶構造とマルテンサイト変態

ζ_2' マルテンサイト相は 1940 年に Köster と Schneider により bct であるとの報告がなされた。²⁰⁾ 1955 年に Wilkens により菱面体的に変形した B2 (CsCl 構造) であるという報告があり、その後も多くの報告がなされ文献²¹⁾にまとめられている。1975 年には Vatanayan と Hehman²²⁾によって Trigonal の $P\bar{3}1m$ であるとの報告があるが、いわゆる結晶構造解析の信頼因子としての R 因子の記述もなく、その結果に疑問が持たれていた。このような中、われわれは応力誘起の方法によってマルテンサイト相の単結晶の作製に成功し、結晶構造解析を行った。その結果は空間群が $P3$ で単位胞内に 18 個の原子を含んでいる構造である事がわかった。²³⁾ 表 1 に結晶学的パラメータと原子位

表 1 ζ_2' 相 $\text{Au}_{50.5}\text{Cd}_{49.5}$ の結晶学的パラメータと原子位置。
(Crystal data and atomic parameters of ζ_2' $\text{Au}_{50.5}\text{Cd}_{49.5}$.)

Crystal Data for ζ_2' Au _{50.5} Cd _{49.5}				
Space Group	P3			
	Trigonal			
Lattice Constants	a=8.095 (3) Å			
	c=5.794 (6) Å			
	18 atoms/cell			
The Final Atomic Parameters for ζ_2' Au _{50.5} Cd _{49.5}				
Site	x	y	z	B
Au (1a)	0	0	0	1.6 (2)
Au (1b)	1/3	2/3	0.151 (2)	1.0 (2)
Au (1c)	2/3	1/3	0.000 (1)	1.6 (2)
Au (3d)	0.3333 (9)	−0.0192 (8)	0.416 (1)	0.9 (1)
Au (3d)	0.6921 (7)	0.0253 (7)	0.708 (2)	1.1 (1)
Cd (1a)	0	0	0.507 (3)	0.5 (2)
Cd (1b)	1/3	2/3	0.650 (4)	1.2 (3)
Cd (1c)	2/3	1/3	0.506 (3)	0.8 (3)
Cd (3d)	0.335 (2)	−0.022 (2)	0.913 (3)	1.6 (2)
Cd (3d)	0.680 (1)	0.014 (1)	0.211 (3)	0.8 (1)

R=7.8%, wR=4.1%

置座標を示し、図 1 (a) にその模式図を示す。 c_1 面の積層で表現すると図 1 (b) のようになる。 $z=0$ の面では+の印であらわされた Au 原子が $z=0$ の面から c_1 軸方向へ変位しており、その上の面にある Cd 原子が矢印で示されているように外側に押しやられている。下にある Cd 原子は逆に空間を埋めるように集まってきている。同様な変位は $z \sim 0.5$ の面の+印で示されている Cd 原子とその周りの原子にも見られる。これらの変位によっても原子間距離は 2.83 ~ 2.99 Å 程度と金属の原子半径から無理のない値になっている。

この結晶構造解析の結果から原子レベルでの変態のメカニズムを推察する事ができる。 ζ_2' マルテンサイト相と

図 1 (a) ζ_2' 相 $\text{Au}_{50.5}\text{Cd}_{49.5}$ マルテンサイト相の結晶構造、
(b) ζ_2' 相 c 面の断面図。((a) Crystal Structure of ζ_2' $\text{Au}_{50.5}\text{Cd}_{49.5}$, (b) Section of ζ_2' $\text{Au}_{50.5}\text{Cd}_{49.5}$ martensite structure.)

母相の関係を図2に示す。母相の $\langle 111 \rangle$ がマルテンサイト相の c_t 軸になり、 $\langle 211 \rangle$ が a_t 軸、 b_t 軸になる。 ζ_2' マルテンサイト相を母相の結晶軸に取り直し、母相の原子位置からの変位という形であらわしたものが表2である。directionと記してあるのは母相のどの方向へ変位しているかを近似的に表している。 $[5\bar{5}1]$ 、 $[3\bar{3}1]$ 、 $[2\bar{2}1]$ などは $[1\bar{1}0]$ と考えると、母相のCsCl型構造が ζ_2' マルテンサイト相になるには図3に示すように $\{110\}$ 面が3枚おきに $\langle 110 \rangle$ 方向へずれた3つのモードを考え、これらが重ね合わさったものを考えると、上に述べたような c_t 軸方向への原子の変位もうまく説明できる。表2にはそれらのモードも記してある。これは $\langle 1\bar{1}0 \rangle$ 方向に偏向面を持つ $\langle 110 \rangle$ へ進む横波変位波の重ねあわせとして記述できる。これは、多くの β 相合金が母相の $\{110\}$ 面がマルテンサイ

図2 母相とマルテンサイト相の関係。この図では母相の $[1\bar{1}1]$ をマルテンサイト相の c_t 軸にとり、 $[1\bar{2}1]$ を a_t 軸、 $[21\bar{1}]$ を b_t 軸にとってある。(Relation between parent phase and martensite phase axes. $[1\bar{1}1]$ and $[1\bar{2}1]$ of the parent phase are taken to be c_t and a_t axis of the martensite phase, respectively.)

表2 立方晶からの原子変位。(Atomic displacements from the ideal positions.)

Atomic Displacements from the Ideal Position					
atom	x	y	z	direction	mode
1 Au (1a)	0.000	0.000	0.000		
2 (1b)	0.152	-0.152	0.152	$[1\bar{1}1]$	A+B+C
3 (1c)	0.000	0.000	0.000		
4 (3d)	0.042	-0.105	0.102	$[1\bar{2}2]$	A
5	0.105	-0.102	0.042	$[2\bar{2}1]$	C
6	0.102	-0.042	0.105	$[2\bar{1}2]$	B
7 (3d)	0.067	-0.067	-0.005	$[1\bar{1}0]$	C
8	0.065	0.004	0.068	$[101]$	B
9	-0.004	-0.068	0.065	$[0\bar{1}1]$	A
10 Cd (1a)	0.005	-0.005	0.005		
11 (1b)	0.146	-0.146	0.146	$[1\bar{1}1]$	A+B+C
12 (1c)	0.005	-0.005	0.005		
13 (3d)	0.036	-0.105	0.099	$[1\bar{3}3]$	A
14	0.105	-0.099	0.036	$[3\bar{3}1]$	C
15	0.099	-0.036	0.105	$[3\bar{1}3]$	B
16 (3d)	0.059	-0.059	0.011	$[5\bar{5}1]$	C
17	0.059	-0.011	0.059	$[5\bar{1}5]$	B
18	0.011	-0.059	0.059	$[1\bar{5}5]$	A

ト相の稠密面になるような変態をするという事実との整合性もよく、都合がよい。

γ_2' マルテンサイト相は、Ölander²⁴⁾により最初に構造解析が行われ、orthorhombicの構造を持っている。われわれは単結晶を用いてより精密な構造の決定をした。²⁵⁾結晶学的パラメータと原子位置を表3に示し、構造を図4に示す。原子はマルテンサイト相稠密面(001)面の理想的な位置からずれており、これはAuとCdの原子半径の違いによると考えられる。²⁶⁾この結晶構造から類推される変態のメカニズムは母相の $\{110\}$ 面を交互にずらしたものと理解する事ができる。

図3 変態に必要な3つの $\{110\}$ 面の変位。(Three transverse displacement waves.)

表3 γ_2' 相 $\text{Au}_{52.5}\text{Cd}_{47.5}$ の結晶学的パラメータと原子位置。(Crystal data and atomic parameters of γ_2' $\text{Au}_{52.5}\text{Cd}_{47.5}$.)

Crystal Data for γ_2' $\text{Au}_{52.5}\text{Cd}_{47.5}$	
Space Group	Pcmm
	Orthorhombic
Lattice Constants	$a = 4.859(3) \text{ \AA}$
	$b = 3.151(1) \text{ \AA}$
	$c = 4.766(1) \text{ \AA}$
	4 atoms/cell

The Final Atomic Parameters for γ_2' $\text{Au}_{50.5}\text{Cd}_{49.5}$				
Site	x	y	z	B
Au (2e)	0.2003 (1)	0	1/4	1.10 (3)
Cd (2f)	0.7050 (1)	1/2	1/4	1.01 (5)

R=4.78%, wR=5.10%

図4 γ_2' 相 $\text{Au}_{52.5}\text{Cd}_{47.5}$ マルテンサイト相の結晶構造. c 軸方向から見た図. (Crystal structure of γ_2' $\text{Au}_{52.5}\text{Cd}_{47.5}$ martensite.)

3. 中性子散乱実験

結晶構造から推察すると, AuCd 合金はフォノンのソフト化という考えをうまく適用できそうである. フォノン分散関係を直接的に観察するのは中性子の非弾性散乱の実験が一番の方法である. しかし AuCd 合金は中性子散乱実験には適していない. 特に Cd は中性子の吸収材に使われており, 通常は中性子の散乱実験を行う事は不可能である. われわれは Cd のアイソトープ ^{114}Cd を用いて母相の単結晶を作製する事によりこの困難を克服し, 中性子の非弾性散乱の実験を行った.^{27), 28)}

まず $\text{Au}_{50.5}\text{Cd}_{49.5}$ に関して述べる. 結晶構造解析の結果から $\langle 110 \rangle$ へ進む $\langle 1\bar{1}0 \rangle$ 方向に偏向面を持つ横波変位波が考えられるので $[\zeta\zeta 0]\text{TA}_2$ モードのフォノン分散関係に興味を持たれる. 結晶構造から期待されるのは $\zeta = 1/3$ のフォノンのソフト化である. 図5に $[\zeta\zeta 0]\text{TA}_2$ フォノンの分散関係を示す. $\zeta = 0.35$ に期待されたようにフォノンのソフト化が観察された. ソフト化の傾向はすでに 425 K でも観察され, 変態点 (304 K) に近づくにしたがってフォノンのエネルギーは小さくなっていく. また, ここでフォノンのエネルギー全体がほかのマルテンサイト変態する合金に比べ, 非常に小さい点は注目に対する.²⁸⁾

フォノン分散関係の $\zeta \approx 0$ 付近の立ち上がりは弾性定数にあたる. TA_1 モードは c_{44} に対応し, TA_2 モードは $c_{11} - c_{12}$ に対応し, この比 $A = \frac{2c_{44}}{c_{11} - c_{12}}$ は弾性異方性といわれている. Zirnisky²⁹⁾ は AuCd 合金の弾性異方性を測定し, 高温から変態温度に向かって行くに従い大きくなると報告している. フォノン分散関係から求めた弾性異方性を求めてみると Zirnisky の求めた値とほぼあっている.

また, 母相の $[1 + \delta \ 1 - \delta \ 0]^*$ に沿って弾性散乱を観察すると図6に示すようにソフト化の起こっているところでいわゆる $1/3$ 反射といわれる弾性散乱が観察され, 温度の低下とともに次第にその強度が増す事がわかる.

同様に $\text{Au}_{52.5}\text{Cd}_{47.5}$ についてもアイソトープ ^{114}Cd を用いた単結晶を作製し, 中性子の非弾性散乱の実験を行っ

図5 $\text{Au}_{50.5}\text{Cd}_{49.5}$ の $[\zeta\zeta 0]\text{TA}_2$ フォノン分散関係. (Phonon dispersion relation of $[\zeta\zeta 0]\text{TA}_2$ branch in $\text{Au}_{50.5}\text{Cd}_{49.5}$.)

図6 $\text{Au}_{50.5}\text{Cd}_{49.5}$ の方向に測定した $1 + \delta \ 1 - \delta \ 0$ に見られる弾性散乱の温度依存性. (Temperature dependence of the $1 + \delta \ 1 - \delta \ 0$ elastic scattering observed in $\text{Au}_{50.5}\text{Cd}_{49.5}$.)

た.³⁰⁾ この場合には先にも述べたように $\{110\}$ 面が交互にずれるとマルテンサイト相を得る事ができるので, 結晶構造から期待されるフォノンのソフト化は, ブリルアンゾーン境界で起こると考えられる. 図7に $[\zeta\zeta 0]\text{TA}_2$ モードのフォノンの分散関係を示す. ブリルアンゾーン境界では温度の低下とともにフォノンのエネルギーが低下しており, ソフト化している様子が伺える. この場合にはさらに $\zeta = 0.35$ の位置でもフォノンのエネルギーの低下を見る事ができ, ソフト化が起こっている. これはわずかな組成の違いで生じる γ_2' 相と ζ_2' 相が競合し合っている事を示していると思われる.

γ_2' 相と ζ_2' 相の競合に関して言うと, この組成では熱

図7 Au_{52.5}Cd_{47.5}の $[\zeta\zeta 0]TA_2$ フォノン分散関係。(Phonon dispersion relation of $[\zeta\zeta 0]TA_2$ branch in Au_{52.5}Cd_{47.5}.)

図8 Au_{52.5}Cd_{47.5}の $[1\bar{1}0]^*$ 方向に測定した $1/3$ 反射。 $1 + \delta \ 1 - \delta \ 0$ に見られる弾性散乱の時間依存性。(Time dependence of the $1 + \delta \ 1 - \delta \ 0$ elastic scattering observed in Au_{52.5}Cd_{47.5}.)

処理の違いによって二つのマルテンサイト相が現れる事³¹⁾がわかっている。しかし、今回の試料についてはあらかじめ熱測定により γ_2' 相だけが現れる事を確認した。試料の不均一性についても同一インゴットの中央部分の一部を用いて熱測定を行い、鋭い変態温度を得ているので試料の濃度の不均一も考えられない。したがって、この競合は試料の問題ではなく本質的なものである。

Au_{52.5}Cd_{47.5}についてはさらに興味深い現象がわかった。³⁰⁾ 図8に $[1 + \delta \ 1 - \delta \ 0]^*$ 方向に測定した $\delta = 1/3$ 反射の316 Kでの弾性散乱の強度測定の結果を示す。 γ_2' マルテンサイト相の結晶構造からはこの位置に反射が現れる事は期待できないが、図8が示すように反射が現れ、さらに時間が経つにしたがってその強度を増している。つ

まり $1/3$ に現れる弾性散乱は時間依存性を持っていることがわかる。³⁰⁾ この現象に関しては新たに見つかった母相での時効による変態温度の低下という現象と関わりがあると考えているが、詳しくは参考文献32), 33)を参照していただきたい。また、 $\zeta = 0.35$ のフォノンのソフト化とも関わりがあると考えられ、さらに研究を進めていく必要がある。

4. マルテンサイト相の結晶構造について

マルテンサイト相は母相との結晶方位関係が古くからいわれており、改めてその結晶構造を求める必要もないような錯覚に陥りやすい。実際には結晶構造が正しく決まらないままに、多くの議論がなされてきた合金がある。たとえば形状記憶合金として広く利用されているTiNi系合金がそうである。TiNi(Fe)合金は低温でmonoclinicのマルテンサイト相へ変態するが、^{34), 35)} その変態の前駆現象として、AuCd合金と同様に $\zeta = 1/3$ にフォノンのソフト化が起こる事が報告されている。³⁶⁾⁻³⁸⁾ 現在ではmonoclinicのマルテンサイト相へ変態する前に、R相といわれる相が存在する事が明らかになっており、フォノンのソフト化はmonoclinicのマルテンサイト相の前駆現象ではなく、R相の前駆現象と考えたほうがよさそうである。

R相といわれている理由も、初期のころ母相の立方晶が $\langle 111 \rangle$ 方向に菱面体的に歪んでできると思われていて、そのような名称がついたものと考えられる。しかし、最近の研究によって、実はこのR相もAuCdの ζ_2' 相と同様の空間群を持つ結晶構造である事がわかってきた。³⁹⁾ 同様の構造を持っている事を考えると変態における原子レベルでの変位も ζ_2' AuCdと同様であり、立方晶が $\langle 111 \rangle$ 方向に歪んでできるのではない。すでに名前は定着しているので今更混乱を招く必要はないが、R相という名前は適当ではないようである。同じようにマルテンサイト相の構造についている名称が、その対称性を表していないので戸惑う事がある。新しい表記法を提案してあるので詳しくは参考文献40)を参考にいただきたい。

マルテンサイト相の中には結晶構造がはっきりしていない段階から多くの物性が測定されているものがある。物性科学の発展から考えても仕方ない事かもしれないが、これは結晶学的な観点からすると正しい解釈を与えない可能性があり危険である。マルテンサイト相の結晶構造に関する研究は重要でありながら、その結晶構造が決められなかったのは、単結晶が得にくかったり、結晶構造解析に適する粉末試料(多結晶試料)が得にくい事に主な原因があると思われる。マルテンサイト変態に関しては電子論的なアプローチも行われており、変態のメカニズムやその他のいろいろな物性を議論するためには、結晶構造の理解が非常に大切な出発点であることを再認識したい。

5. おわりに

マルテンサイト変態のミクロなメカニズムに関して、フォノンのソフト化という見方は非常に魅力的であるが、マルテンサイト相の結晶構造とフォノンのソフト化の関係がかならずしもよい対応を示していない系が多い。このようななかで、AuCd合金はその対応が非常によく現れている系であると考えられる。

また、中性子散乱の実験では弾性散乱強度の時間依存性という新たな問題を提起しており、マルテンサイト変態はいろいろな事柄が複雑に絡み合っているようである。研究を進める上で当然の事ではあるが、これらをできるだけ正しく、単純な現象に分けて研究を進めていく事が必要と思われる。

本研究を遂行するにあたり、絶え間ない御協力をいただいた筑波大学物質工学系大塚和弘教授に心から感謝いたします。また中性子散乱実験でお世話になったB. N. L. のS. M. Shapiro博士に感謝し、実験の機会を与えていただいた学術振興会の日米協力中性子散乱実験に感謝いたします。この研究の一部は文部省科学研究費補助金、特定領域研究「相変態」でおこなわれました。

文 献

- 舟久保康熙 編：形状記憶合金，産業図書。
- M. S. Wechsler, D. S. Lieberman, and T. A. Read: *Trans. AIME.*, **197**, 1503 (1953) .
- J. S. Bowles and J. K. Mackenzie: *Acta Metall.*, **2**, 129, 138 (1954), *Acta Metall.*, **2**, 224 (1954).
- D. S. Lieberman, M. S. Wechsler and T. A. Read: *J. Appl. Phys.*, **26**, 473 (1955).
- K. Otsuka: *Materials Science Forum*, **56-58**, 393 (1990).
- K. Otsuka and C. W. Wayman ed.: *Shape Memory Materials*, Cambridge University Press, 1998.
- G. V. Kurdjumov and L. G. Khandros: *Dokl. Nauk. S.S.S.R.*, **66**, 211 (1949).
- G. V. Kurdjumov and O. P. Maximova: *Dokl. Nauk S.S.S.R.*, **61**, 83 (1949).
- G. V. Kurdjumov and O. P. Maximova: *Dokl. Nauk S.S.S.R.*, **73**, 95 (1950).
- T. Kakeshita, K. Kuroiwa, K. Shimizu, T. Ikeda, A. Yamagishi and M. Date: *Materials Trans. JIM.*, **34**, 423 (1993).
- H. Abe, M. Ishibashi, K. Ohshima, T. Suzuki, M. Wutting and K. Kakurai: *Phys. Rev.* **50**, 9020 (1994).
- G. R. Barsch and J. A. Krumhansl: *Metall. Trans.*, **19A**, 761 (1988).
- A. L. Roitburd: *Mater. Sci. Eng.*, **A127**, 229 (1990).
- M. Mori, Y. Yamada and G. Shirane: *Solid State Commun.*, **17**, 127 (1975).
- G. Guenin, D. Rios Jara, M. Morin, L. Delaey, R. Pynn and P. F. Gobin: *J de Physique, Colloq. C4, suppl.*, **12**, **43**, C4-597 (1982).
- Y. Morii and M. Iizumi: *J. Phys. Soc. Jpn.*, **54**, 2948 (1985).
- Y. Noda, M. Takimoto, T. Nakagawa and Y. Yamada: *Metall. Trans.*, **A19**, 265 (1988).
- Y. Yamada, Y. Noda and M. Takimoto: *Solid State Commun.*, **55**, 1003 (1985).
- Y. Yamada: *Proc. of International Conference on Martensitic Transformations, Japan Institute of Metals*, **89** (1986).
- W. Köster and A. Schneider: *Z. Metallk.*, **32**, 156 (1940).
- H. M. Ledbetter and C. M. Wayman: *Metallurgical Transactions*, **3**, 2349 (1972).
- S. Vatanayan and R. F. Hehman: *Shape Memory Effects in Alloys*, J. Perkins ed., Plenum Press, 1975, New York, p115-p14
- T. Ohba, Y. Emura and K. Otsuka: *Materials Trans. JIM*, **33**, 29 (1992).
- A. Ölander: *Z. Krist.*, **83A**, 145 (1932).
- T. Ohba, Y. Emura, S. Miyazaki and K. Otsuka: *Materials Trans. JIM*, **31**, 12 (1990).
- T. Tadok and K. Shimizu: *Trans. JIM*, **18**, 735 (1977).
- T. Ohba, S.M.Shapiro, S. Aoki and K. Otsuka: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **33**, L1631 (1994).
- T. Ohba, S. M. Shapiro, S. Aoki and K. Otsuka: *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* **376**, 701 (1995).
- S. Zirnisky: *Acta Metallurgica*, **4**, 164-171 (1956).
- T. Ohba, S. Raymond, S. M. Shapiro and K. Otsuka: *Jpn. J. Appl. Phys.* **37**, L64 (1998).
- T. Suzuki, T. Takagi, A. Nagasawa and N. Nakanishi: *J. Mater. Sci.*, **16**, 3013 (1981).
- X. Ren, T. Ohba, S. Yamada, T. Ishii and K. Otsuka: *Proceedings of The Third Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing*, 12-16, Honolulu, Hawaii, p.1233. (1998).
- T. Ohba, K. Komachi, K. Watanabe, S. Nakamura and K. Otsuka : submitted to proceedings of ICOMAT-98.
- G. R. Purdy and J. G. Parr: *Tans. Am. Inst. Min. Engrs*, **221**, 631 (1961)
- Y. Kudoh, M. Tokonami, S. Miyazaki and K. Otsuka: *Acta Metall.* **33**, 2049 (1985).
- S. K. Satija, S. M. Shapiro, M. B. Salamon and C. M. Wayman: *Phys. Rev.*, **B29**, 6031 (1984).
- P. Moine, J. Allain and B. Renker: *J. Phys. F: Met. Phys.* **14**, 2517 (1984).
- H. Tietze, M. Müllner and B. Renker : *J. Phys. C: Solid State Phys.*, **17**, L529 (1984).
- T. Hara, T. Ohba, E. Okunishi and K. Otsuka: *Materials Trans. JIM*, **38**, 11 (1997).
- K. Otsuka, T. Ohba, M. Tokonami and C. W. Wayman: *Scripa Mater.*, **29**, 1359 (1993).

プロフィール

大庭卓也 Takuya OHBA

帝京大学理工学部材料科学工学科
〒320-8551 宇都宮市豊郷台1-1

Department of Materials Science and Engineering,
School of Science and Engineering, Teikyo University,
1-1, Toyosatodai, Utsunomiya 320-8551, Japan
email: ohba@koala.mse.teikyo-u.ac.jp

最終学歴：広島大学大学院理学研究科物性学専攻
博士課程修了

専門分野：回折結晶学

現在の研究テーマ：マルテンサイト変態の結晶学的研究

趣味：写真撮影(だった?)