

軽量金属材料の基礎

ものづくり基礎講座（第63回技術セミナー）

『金属の魅力をみなおそう 第4弾 材料機能編 第2回 軽量金属材料』

Trans-Regional
Corporation Center

Trans-Regional
Corporation Center

Trans-Regional
Corporation Center

東北大学金属材料研究所

正橋直哉

masahasi@imr.tohoku.ac.jp

2020.2.18 (Tue.) 14:05～14:30

Trans-Regional
Corporation Center

クリエイション・コア東大阪 南館3階 技術交流室

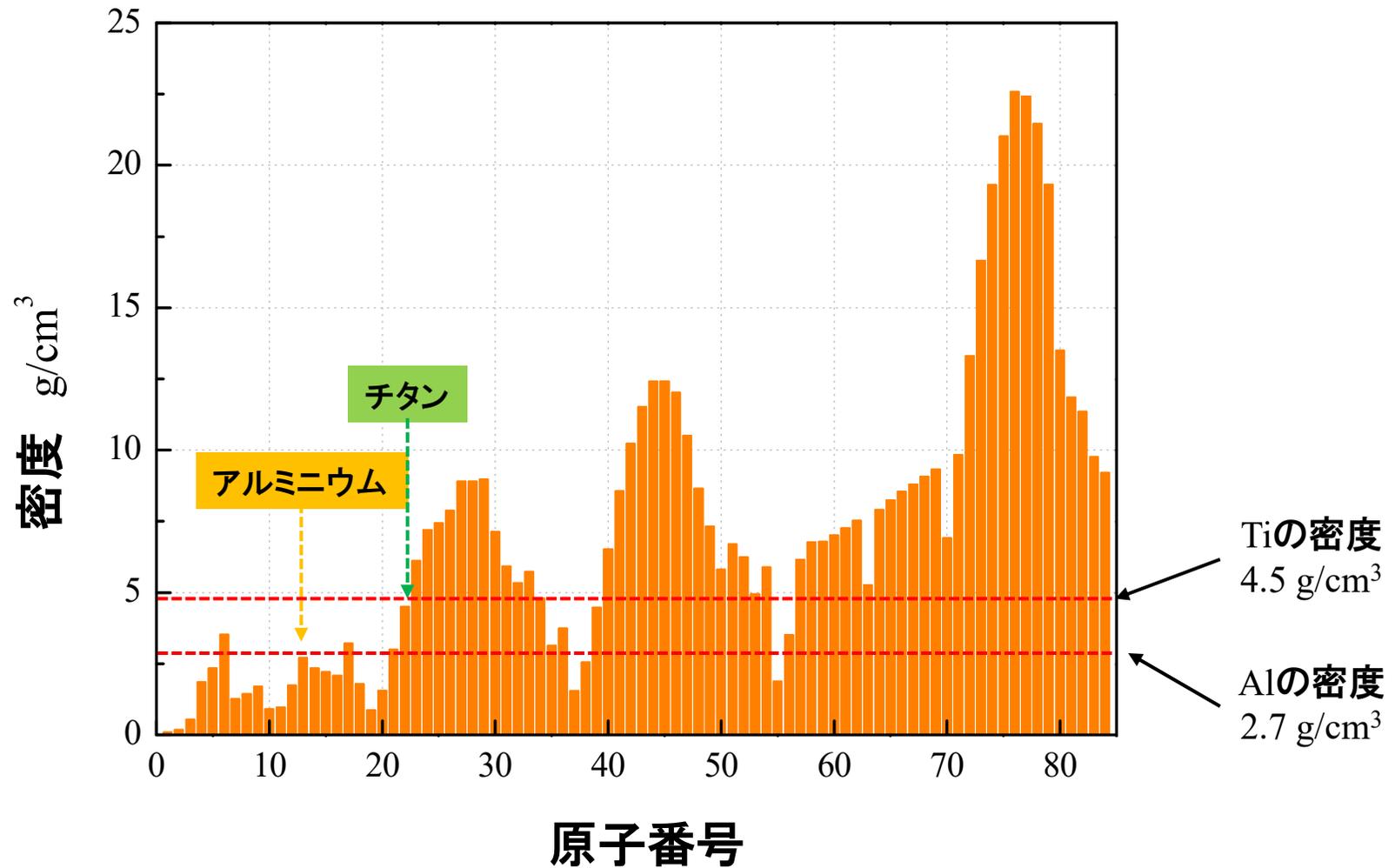
Trans-Regional
Corporation Center

Trans-Regional
Corporation Center¹

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
	I _a	II _a	III _b	IV _b	V _b	VI _b	VII _b	VIII			I _b	II _b	III _a	IV _a	V _a	VI _a	VII _a	O	
1	¹ H				アルカリ金属		アルカリ土類金属		遷移金属		卑金属								² He
2	³ Li	⁴ Be			半金属		非金属元素		ハロゲン				⁵ B	⁶ C	⁷ N	⁸ O	⁹ F	¹⁰ Ne	
3	¹¹ Na	¹² Mg											¹³ Al	¹⁴ Si	¹⁵ P	¹⁶ S	¹⁷ Cl	¹⁸ Ar	
4	¹⁹ K	²⁰ Ca	²¹ Sc	²² Ti	²³ V	²⁴ Cr	²⁵ Mn	²⁶ Fe	²⁷ Co	²⁸ Ni	²⁹ Cu	³⁰ Zn	³¹ Ga	³² Ge	³³ As	³⁴ Se	³⁵ Br	³⁶ Kr	
5	³⁷ Rb	³⁸ Sr	³⁹ Y	⁴⁰ Zr	⁴¹ Nb	⁴² Mo	⁴³ Tc	⁴⁴ Ru	⁴⁵ Rh	⁴⁶ Pd	⁴⁷ Ag	⁴⁸ Cd	⁴⁹ In	⁵⁰ Sn	⁵¹ Sb	⁵² Te	⁵³ I	⁵⁴ Xe	
6	⁵⁵ Cs	⁵⁶ Ba	ランタノイド	⁷² Hf	⁷³ Ta	⁷⁴ W	⁷⁵ Re	⁷⁶ Os	⁷⁷ Ir	⁷⁸ Pt	⁷⁹ Au	⁸⁰ Hg	⁸¹ Tl	⁸² Pb	⁸³ Bi	⁸⁴ Po	⁸⁵ At	⁸⁶ Rn	
7	⁸⁷ Fr	⁸⁸ Ra	アクチノイド	¹⁰⁴ Rf	¹⁰⁵ Db	¹⁰⁶ Sg	¹⁰⁷ Bh	¹⁰⁸ Hs	¹⁰⁹ Mt										
価電子数	1	2											3	4	5	6	7	0	
ランタノイド			⁵⁷ La	⁵⁸ Ce	⁵⁹ Pr	⁶⁰ Nd	⁶¹ Pm	⁶² Sm	⁶³ Eu	⁶⁴ Gd	⁶⁵ Tb	⁶⁶ Dy	⁶⁷ Ho	⁶⁸ Er	⁶⁹ Tm	⁷⁰ Yb	⁷¹ Lu		
アクチノイド			⁸⁹ Ac	⁹⁰ Th	⁹¹ Pa	⁹² U	⁹³ Np	⁹⁴ Pu	⁹⁵ Am	⁹⁶ Cm	⁹⁷ Bk	⁹⁸ Cf	⁹⁹ Es	¹⁰⁰ Fm	¹⁰¹ Md	¹⁰² No	¹⁰³ Lr		

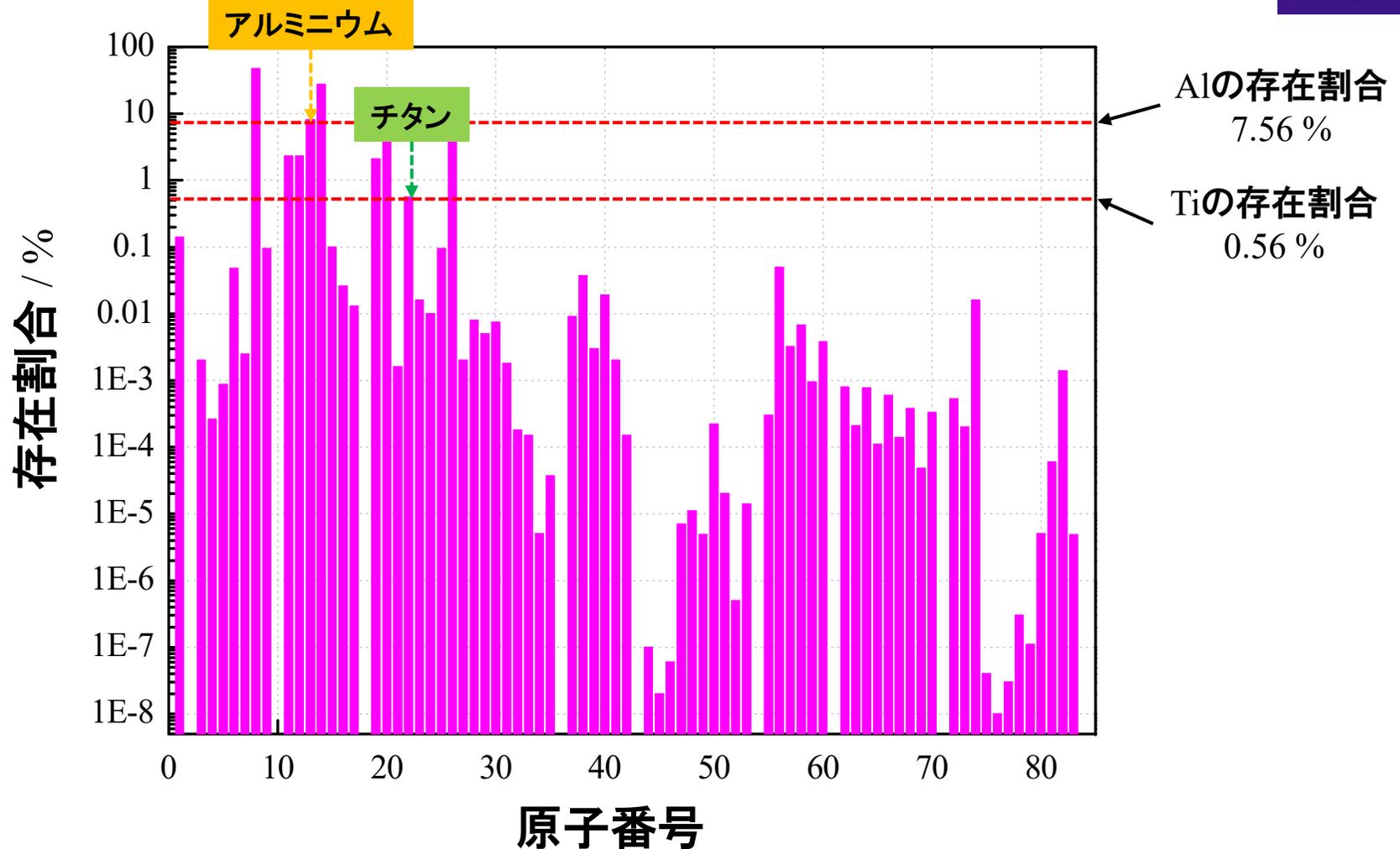


85元素



- ① Alは12番目(全元素で22番目)に軽く、Tiは16番目(全元素で29番目)に軽い。
- ② Alは卑金属で一番軽量で、Tiは遷移金属中ScとYに次いで3番目に軽量。

順番	原子番号	元素記号	元素名	分類	原子量	密度[g/cm ³]	融点[°C]
1	3	Li	リチウム	アルカリ金属	6.941	0.53	180
2	19	K	カリウム	アルカリ金属	39.0983	0.86	64
3	11	Na	ナトリウム	アルカリ金属	22.9897	0.97	98
4	20	Ca	カルシウム	アルカリ土類金属	40.078	1.55	839
5	37	Rb	ルビジウム	アルカリ金属	85.4678	1.63	39
6	12	Mg	マグネシウム	アルカリ土類金属	24.305	1.74	639
7	4	Be	ベリリウム	アルカリ土類金属	9.0122	1.85	1278
8	55	Cs	セシウム	アルカリ金属	132.9055	1.87	29
9	14	Si	ケイ素	半金属	28.0855	2.33	1410
10	5	B	ホウ素	半金属	10.811	2.34	2300
11	38	Sr	ストロンチウム	アルカリ土類金属	87.62	2.54	769
12	13	Al	アルミニウム	卑金属	26.9815	2.7	660
13	21	Sc	スカンジウム	遷移金属	44.9559	2.99	1539
14	56	Ba	バリウム	アルカリ土類金属	137.327	3.59	725
15	39	Y	イットリウム	遷移金属	88.9059	4.47	1523
16	22	Ti	チタン	遷移金属	47.867	4.54	1660
17	63	Eu	ユウロピウム	ランタノイド	151.964	5.24	822
18	32	Ge	ゲルマニウム	半金属	72.64	5.32	937
19	88	Ra	ラジウム	アルカリ土類金属	226	5.5	700
20	33	As	ヒ素	半金属	74.9216	5.72	81
21	31	Ga	ガリウム	卑金属	69.723	5.91	30
22	23	V	バナジウム	遷移金属	50.9415	6.11	1890
23	57	La	ランタン	アルカリ土類金属	138.9055	6.15	920
24	52	Te	テルル	半金属	127.6	6.24	449
25	40	Zr	ジルコニウム	遷移金属	91.224	6.51	1852
26	51	Sb	アンチモン	半金属	121.76	6.68	630
27	58	Ce	セリウム	ランタノイド	140.116	6.77	795
28	59	Pr	プラセオジウム	ランタノイド	140.9077	6.77	935
29	70	Yb	イッテルビウム	ランタノイド	173.04	6.9	824
30	60	Nd	ネオジウム	ランタノイド	144.24	7.01	1010



- ① AlはSiに次いで2番目(全元素で3番目)でTiは8番目(9番目)に多い。
- ② Alはケイ酸塩や酸化物として、Tiは酸化物として存在する。

	Ti	Ti6Al4V	SUS304	Al	AZ31	Hastelloy
比重(g/cm ³)	4.51	4.42	8.0	2.8	1.8	8.9
結晶構造	hcp↔bcc	bcc + hcp	fcc	fcc	hcp	fcc
融点(°C)	1668	1540-1650	1400-1427	660	838-905	1305
ヤング率(GPa)	106	113	199	68	45	205
電気抵抗(μΩ-cm,20°C)	47-55	171	72	2.7	9.3	130
電気伝導度(対Cu)	3.1	1.1	2.4	30.0	18.5	1.3
熱伝導度(W/m°C)	17	7.5	16	237	96	12
熱膨張係数(×10 ⁻⁶ /°C)	8.4	8.8	17	23.7	26	12



チタンの長所

- ① 密度が低い ➡ 軽量材料
- ② bcc構造になる ➡ 成型加工可能
- ③ 酸素と結合する ➡ 耐食材料
- ④ 融点が高い ➡ 高温耐熱材料



アルミニウムの長所

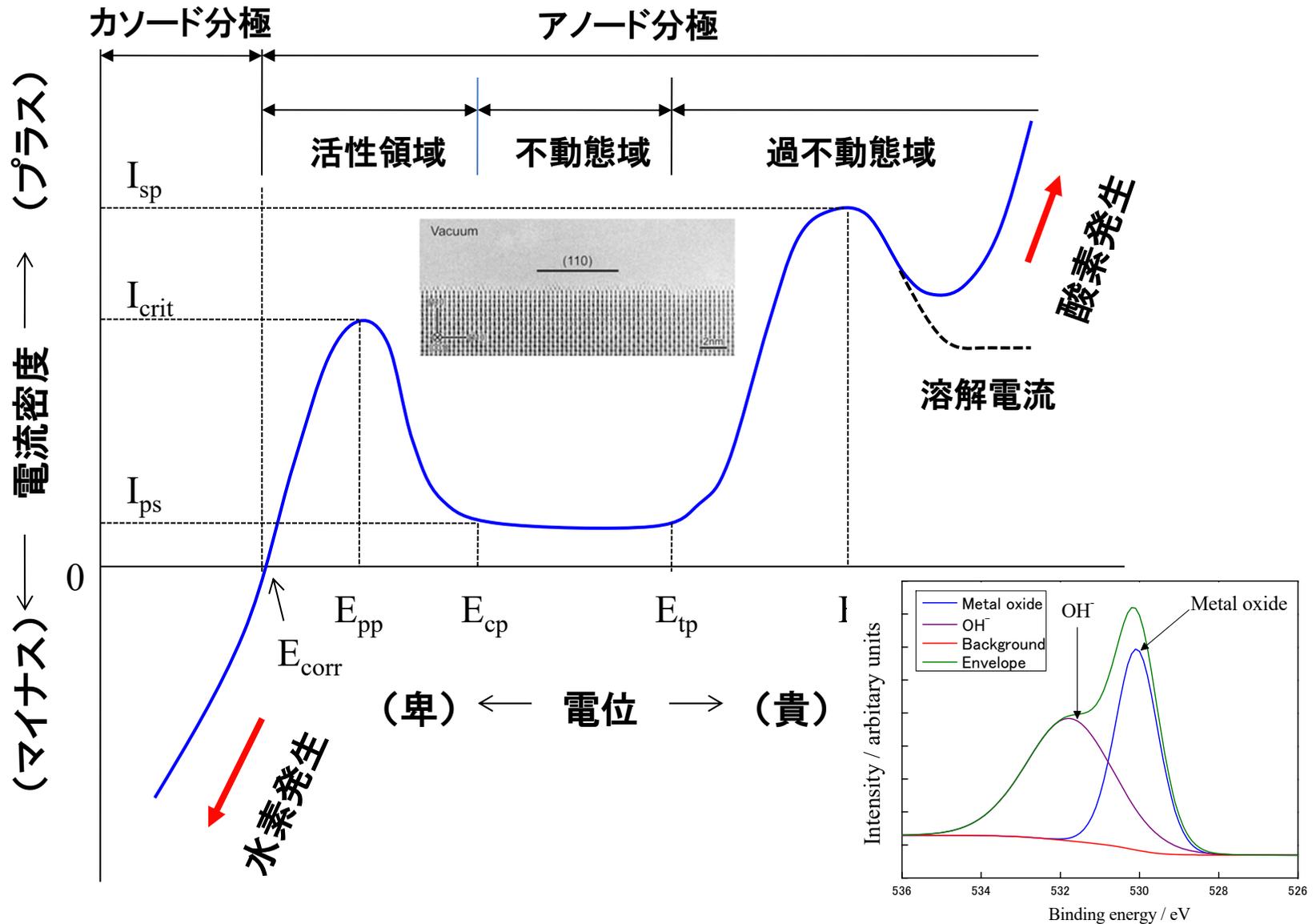
- ① 密度が低い ➡ 軽量材料
- ② fcc構造 ➡ 成型加工可能
- ③ 酸素と結合する ➡ 耐食材料
- ④ 電気・熱を通す ➡ 導電・熱交換

	金属	イオン化反応	E^0 (V vs SHE)	実環境中耐食性
貴 ↑ ↓ 卑	Au	Au/Au^{3+}	1.5	Au
	Pd	Pd/Pd^{2+}	0.99	Ti
	Ag	Ag/Ag^+	0.80	Pd
	Cu	Cu/Cu^{2+}	0.34	Zr
	Pb	Pb/Pb^{2+}	-0.13	Ag
	Ni	Ni/Ni^{2+}	-0.25	Cu
	Co	Co/Co^{2+}	-0.28	Al
	Fe	Fe/Fe^{2+}	-0.44	Cr
	Zn	Zn/Zn^{2+}	-0.74	Fe
	Cr	Cr/Cr^{3+}	-0.76	Ni
	Mn	Mn/Mn^{2+}	-1.19	Co
	Zr	Zr/Zr^{2+}	-1.54	Pd
	Al	Al/Al^{3+}	-1.66	Zn
	Ti	Ti/Ti^{2+}	-1.63	Mg
	Mg	Mg/Mg^{2+}	-2.37	Mn
				低い

金属のイオン化傾向から予測される耐食性と実環境での耐食性には違いがある

☞ 実環境で耐食性の高い金属は酸化物生成自由エネルギーが大きい

不動態形成合金の分極曲線模式図



純Ti表面2.6nm領域からのXPSスペクトル

身の回りのアルミニウム



成田山深川不動
新本堂

パリアラブ世界研究所
(パリ)



JR熊本駅



MacBook Pro



「レゴ」のキーチェーン



水筒



アウディグランドピアノ



アルミボトル



iphoneアルミジャケット



アイスクリーム用スプーン



ロンドン五輪トーチ



アルミニウム繊維



アルミホイル

アイスクリーム用スプーン ロンドン五輪トーチ アルミニウム繊維

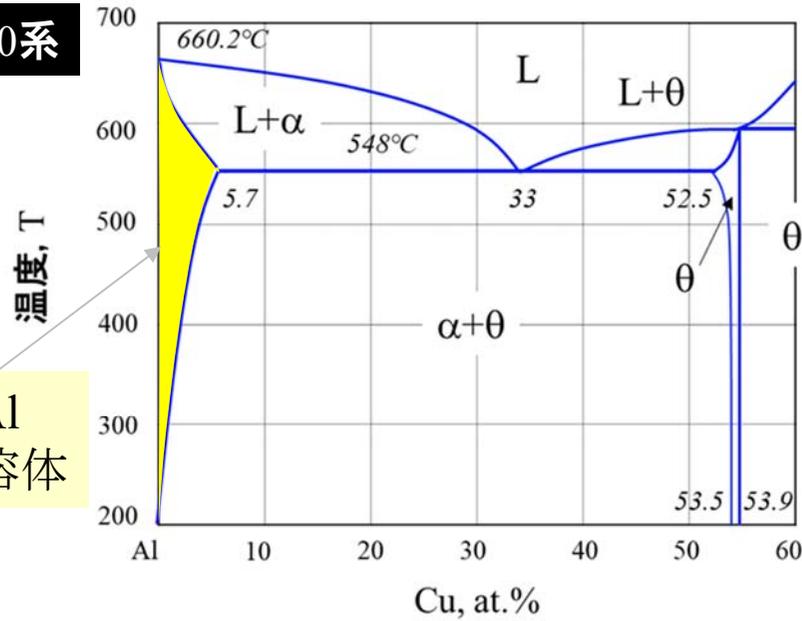
JIS規格	合金	特徴	材料科学的な意味
1000系	Al	展延性、溶接性、耐食性	低強度用
2000系	Al-Cu(-Mg)	強度、切削性	Cu:析出硬化(ジュラルミン)
3000系	Al-Mn(-Mg)	高強度、耐食性、成形性	Mn:再結晶温度を増加
4000系	Al-Si(-Cu-Mg-Ni)	耐摩耗性、耐熱性	Si:熱膨張率低減、耐熱性向上
5000系	Al-Mg	成形性、溶接性、耐塩性	Mg:固溶強化
6000系	Al-Mg-Si	強度、耐食性	Mg ₂ Si:析出硬化
7000系	Al-Zn-Mg(-Cu)	強度	MgZn ₂ , Mg ₃ Zn ₂ (Al,Zn) ₄₉ :析出硬化

A B C D - X Y ← X=Hの時、Y=1n:加工硬化のみ、2n:加工硬化後軟化熱処理、3n:加工硬化後安定化処理
 X=Tの時、Y=2:寸法安定化熱処理、3:溶体化後冷間加工、4:溶体化後自然時効、
 5:急冷後時効、6:溶体化後時効、7:溶体化後安定化、8:溶体化後冷間加工・時効
 F:製造まま、O:焼鈍し材、H:加工硬化材、T:熱処理材(時効)

基本合金は0、改良合金の順に1~9(日本で開発され国際規格にないものはN)

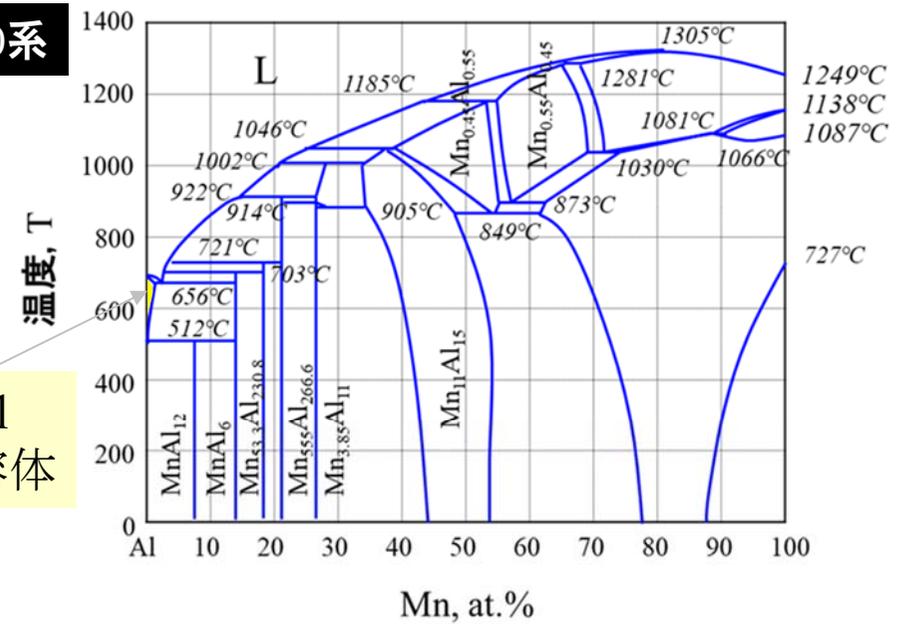
アルミニウム合金状態図の特徴

2000系



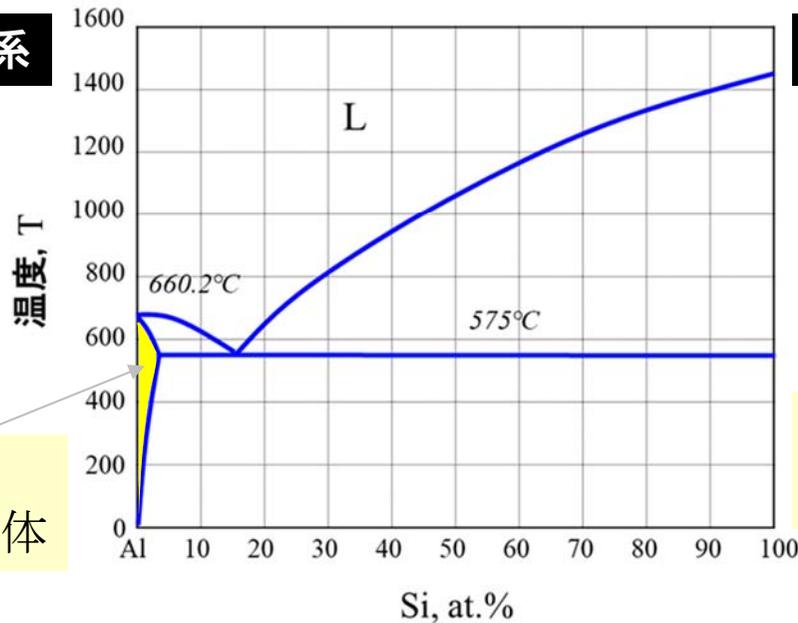
Al
固溶体

3000系



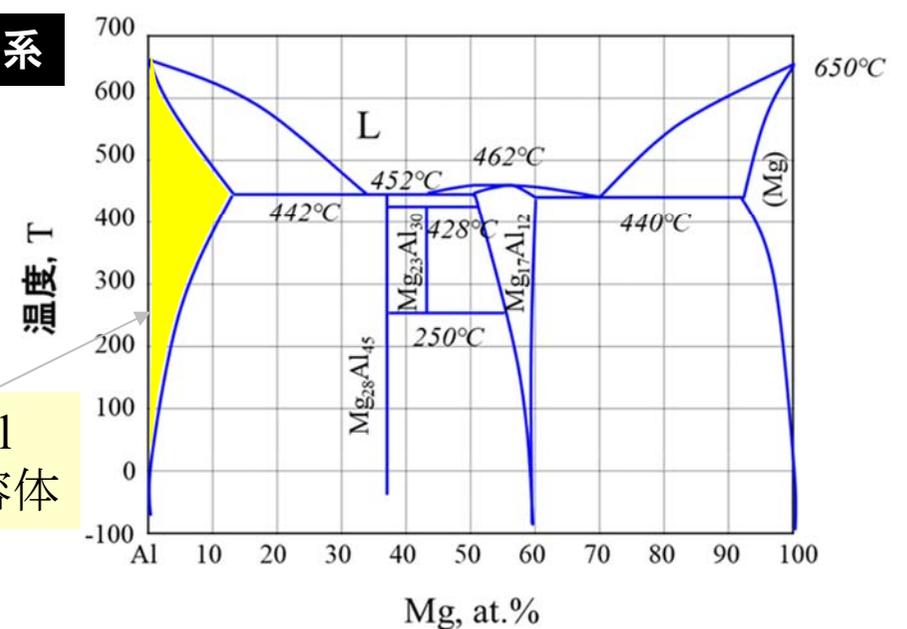
Al
固溶体

4000系



Al
固溶体

5000系



Al
固溶体

【強化の基本】 純Alは冷間加工で強化。Alは他の元素と固溶体を形成しないので、「固溶強化」は用いることができない。狭い固溶体の溶解度の変化を利用して、少量の第二相を微細に析出させて、「析出強化」により強化させる。

析出強化の基本

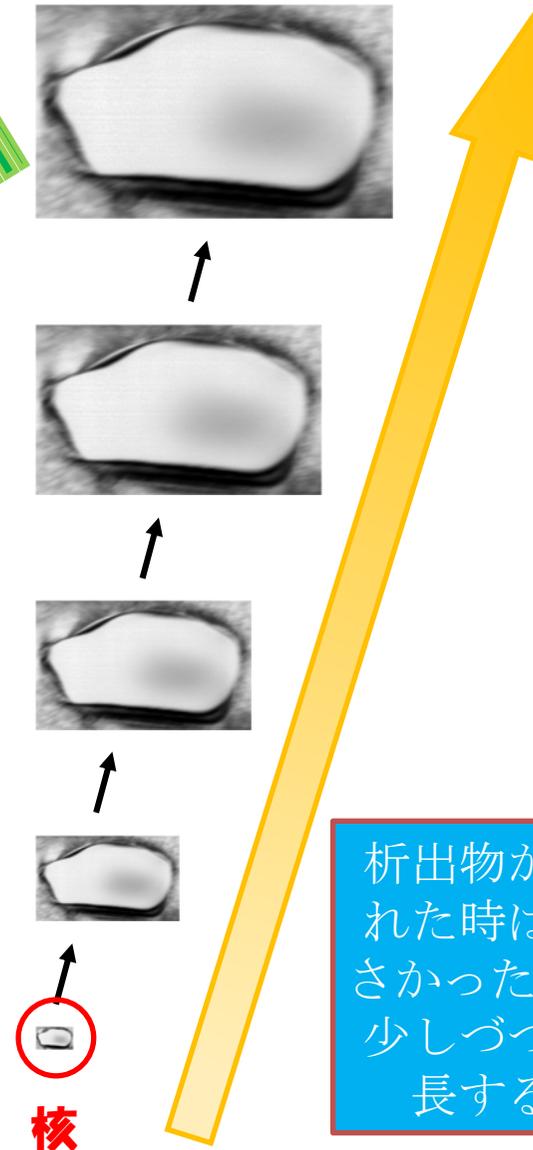
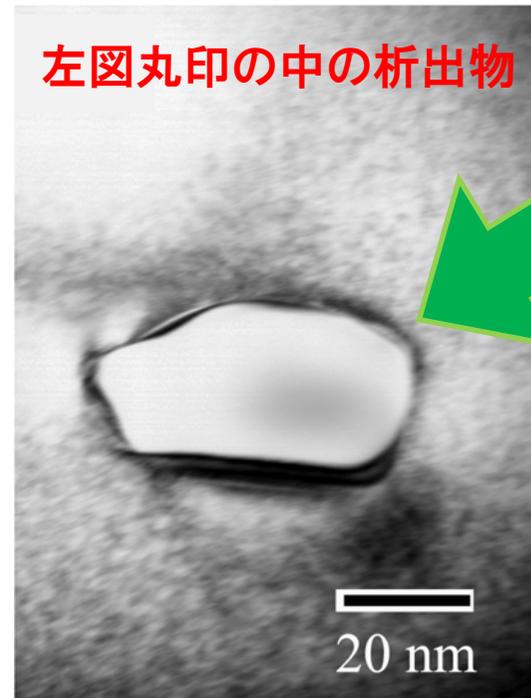
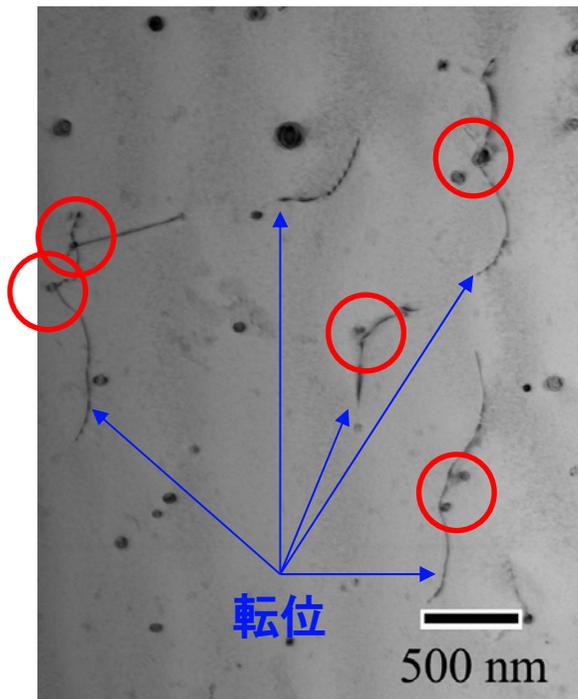
$$\tau_f = \tau_0 + \alpha \cdot G \cdot b / \lambda \dots\dots\dots (\text{Orowanの式})$$

λ : 粒子間距離、 G : 剛性率、 α : 結晶構造に依存する係数

b : バーガースベクトル、 τ_0 : 摩擦応力

☞ 析出物の割合が小さくても、微細に分散させる (λ を小さくする) と材料は強くなる (τ_f は大きくなる)。

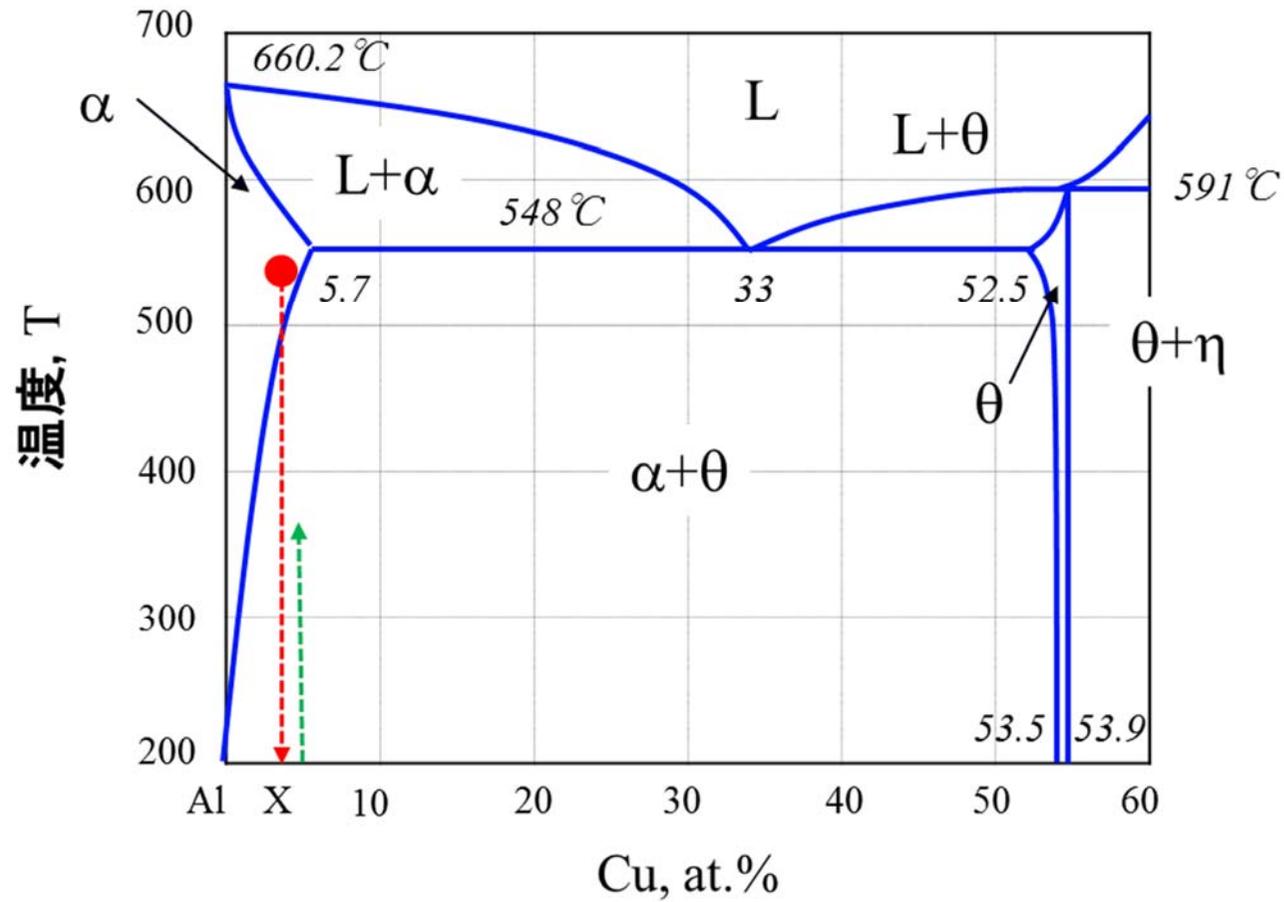
【成型加工の基本】 Alは軟らかいので、機械加工による成型加工は熱処理前に行い、完成品形状としてから熱処理を施して強化させる。



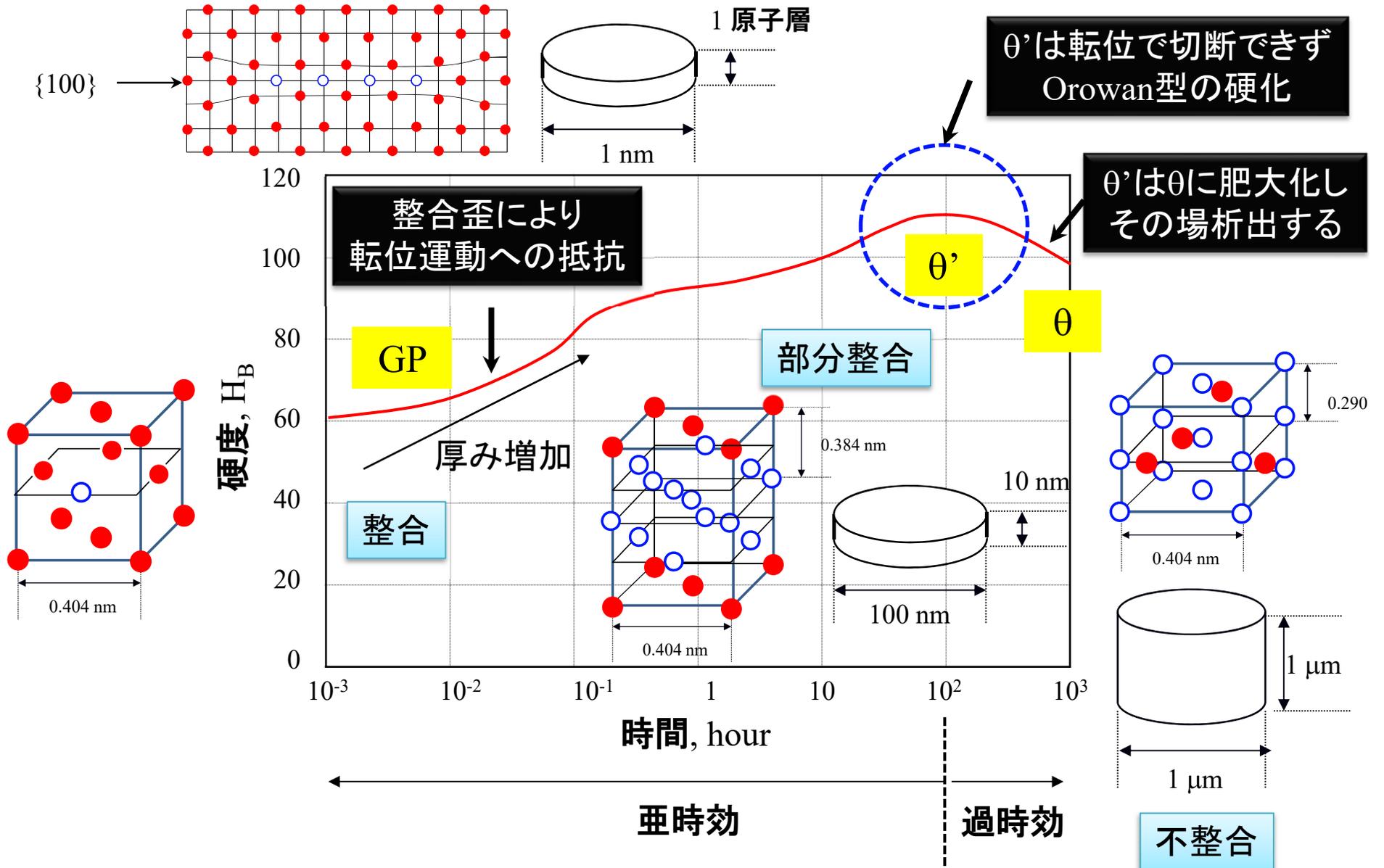
上の写真のように、50 nm程度の微細析出物を分散させると、転位は、微細析出物に引っかかって動けなくなるので、強度が上昇する。

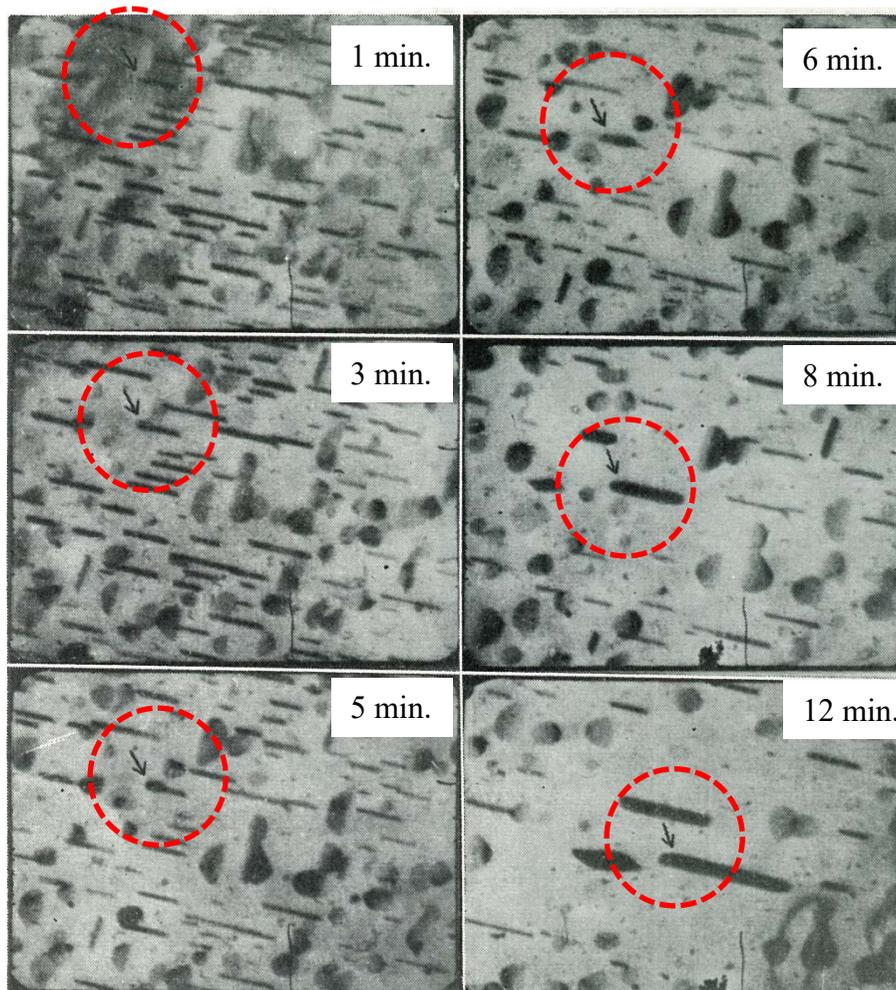
析出物の微細化がAl合金強化のポイント

析出物が生れた時は小さかったが、少しずつ成長する



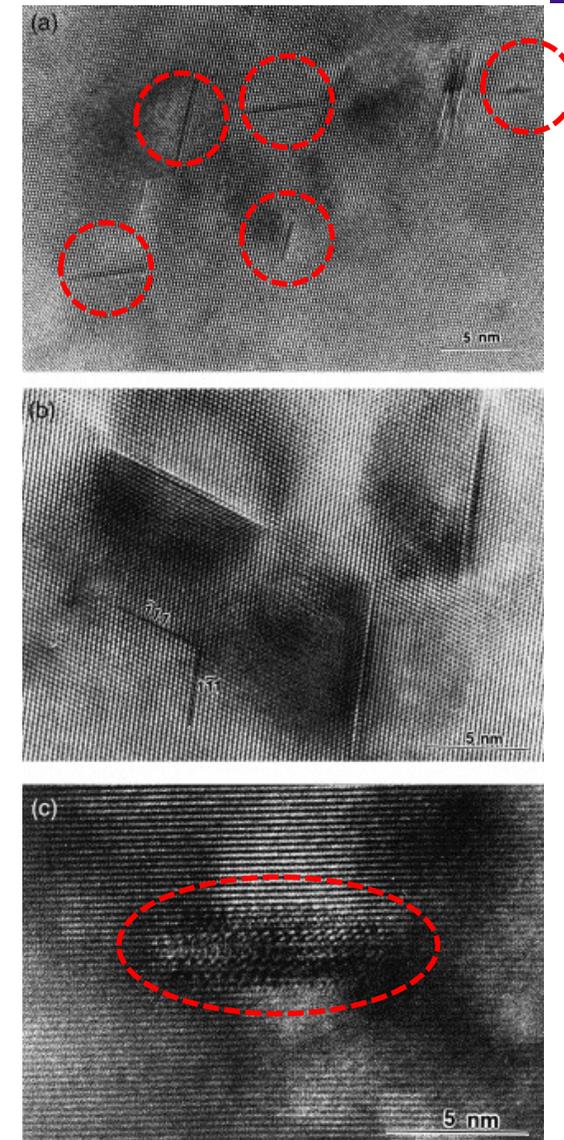
- ① 組成Xの合金を赤線のように急冷すると α 相の過飽和固溶体ができる(溶体化処理)。
- ② これを溶解度曲線以下の温度(緑線)で保持すると安定となり θ 相が析出する(時効)



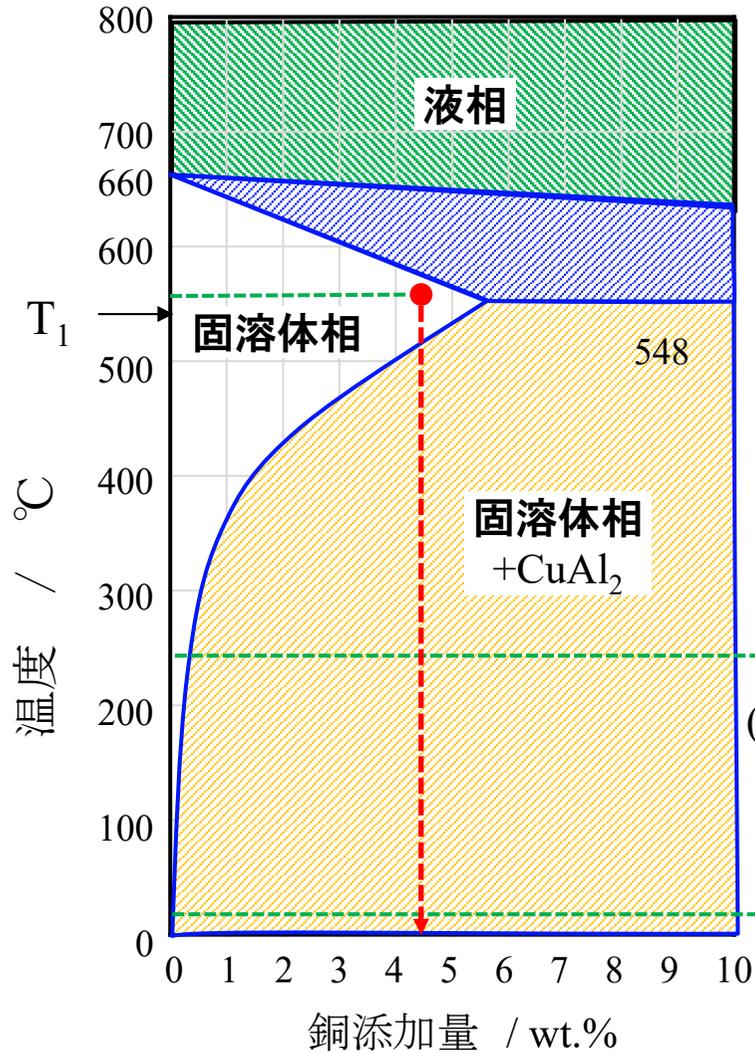


Al-4Cu合金の350°Cにおける θ' から θ への遷移
日本金属学会 金属工学シリーズ 構成金属材料とその熱処理より

L.K Berg et al., Acta Materialia 49 (2001) 3443



θ' の高分解電子顕微鏡像
Acta Materialia 49(2001)3443



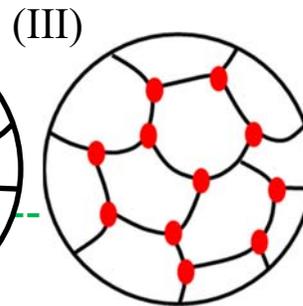
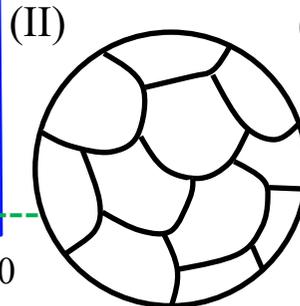
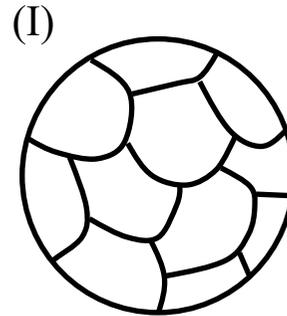
I: 高温保持で粗大粒

II: 高温急冷で組織が凍結されて粗大粒

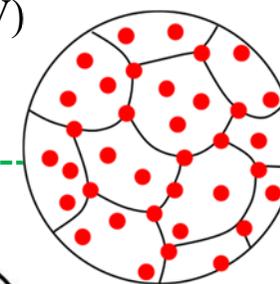
III: 高温徐冷で粒界に析出物

IV: 時効により粒内に微細析出物を形成

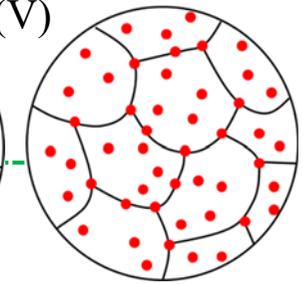
V: 時効時間が長いと析出物が粗大化



(IV)

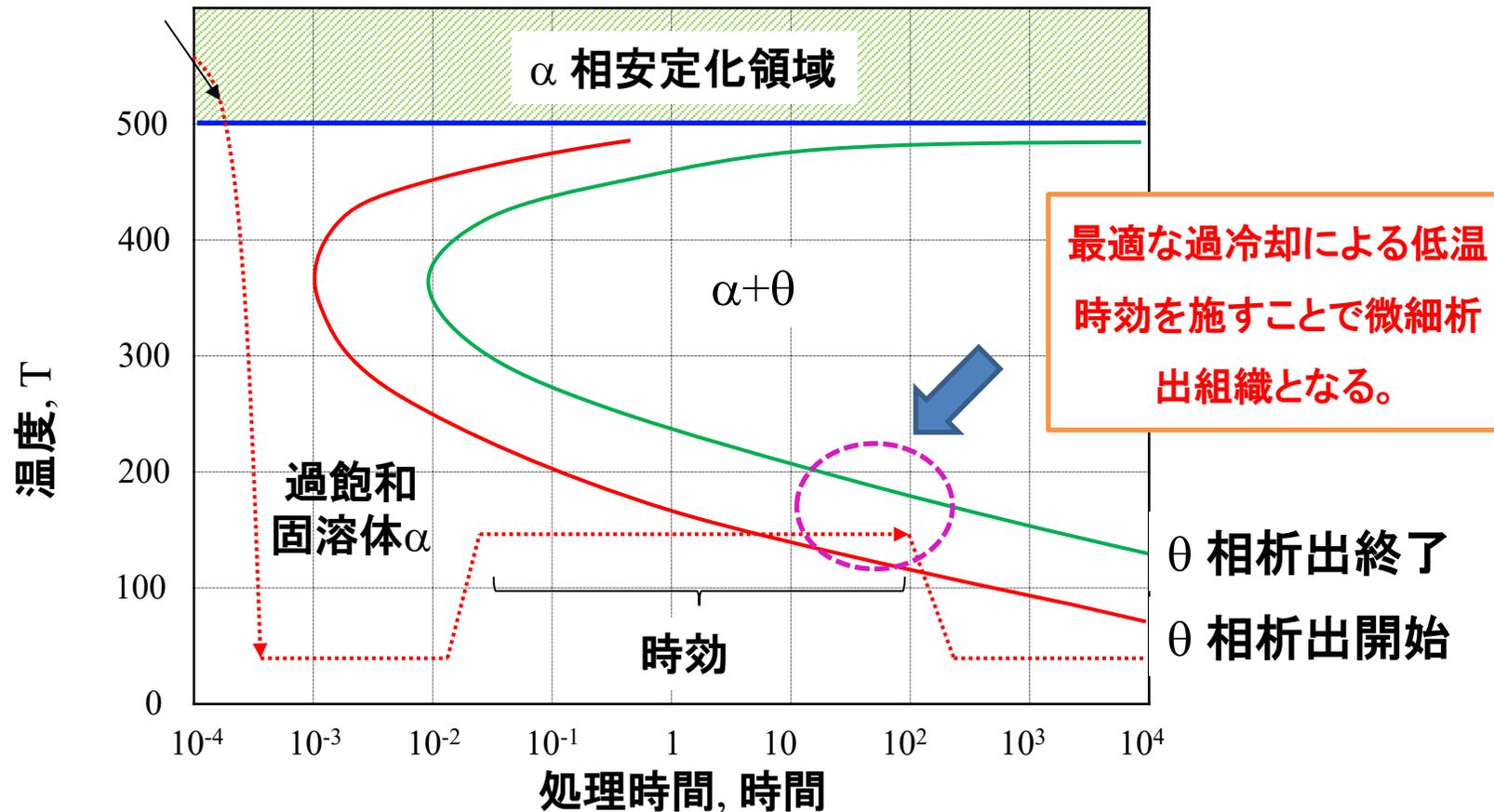


(V)



析出物(赤印)は微細に分散するほど強度が高い

☞ 適切な時効温度と時間を選ぶこと



- (a) 上図赤線のθ相の析出開始線より長時間、過飽和固溶したα相を時効することによりθ相を析出させる。
- (b) 上図緑線のθ相析出終了線に達するまでの間θ相は析出するが、更なる事項はθ相の粗大化を引きおこす。



航空機分野:軽量・高強度・高耐食性



一般産業分野:軽量・高強度・高耐食性



海洋土木分野:高耐食性・軽量



建築分野:軽量・高強度・高耐食性・着色性



自動車・二輪車分野:軽量・高強度・高耐食性・耐熱性



日用品分野:軽量・高強度・ファッション性・高耐食性・生体適合性



健康分野:無毒性・生体適合性・高耐食性・高強度

特性	数値	用途
軽い (ステンレスの6割)	比重 4.51 g/cm ³	航空機のエンジン
強い (ステンレスと同じ)	引張強さ 27 ~ 55 kg/mm ² (チタン合金 50 ~ 150 kg/mm ²)	
錆びない (塩気で錆びない)	10%HClで1mm/year以下の腐食率	熱交換器、建材
生体に優しい (イオン溶出小)	チタン製人工骨は細胞が生育	人工骨、歯根、心臓弁



航空機(B787)



ジェットfoil



熱交換器



インプラント

特性	数値	用途
しなやか (バネ性がある)	ヤング率 10850 kg/mm ²	ゴルフクラブヘッド、ばね
熱で伸縮し難い (ステンレス、アルミの半分)	線膨張率 $8.4 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	半導体製造装置、建材
熱がこもり難い (ステンレスの6割)	体積熱容量 0.12 cal/cm ³ ・°C	鍋、フライパン
完全非磁性 (磁気を感じない)	透磁率 $1.00005 \mu/\mu_0$	電子機器(ステッパー等)



フライパン



メガネフレーム



外装建材



オープンMRI

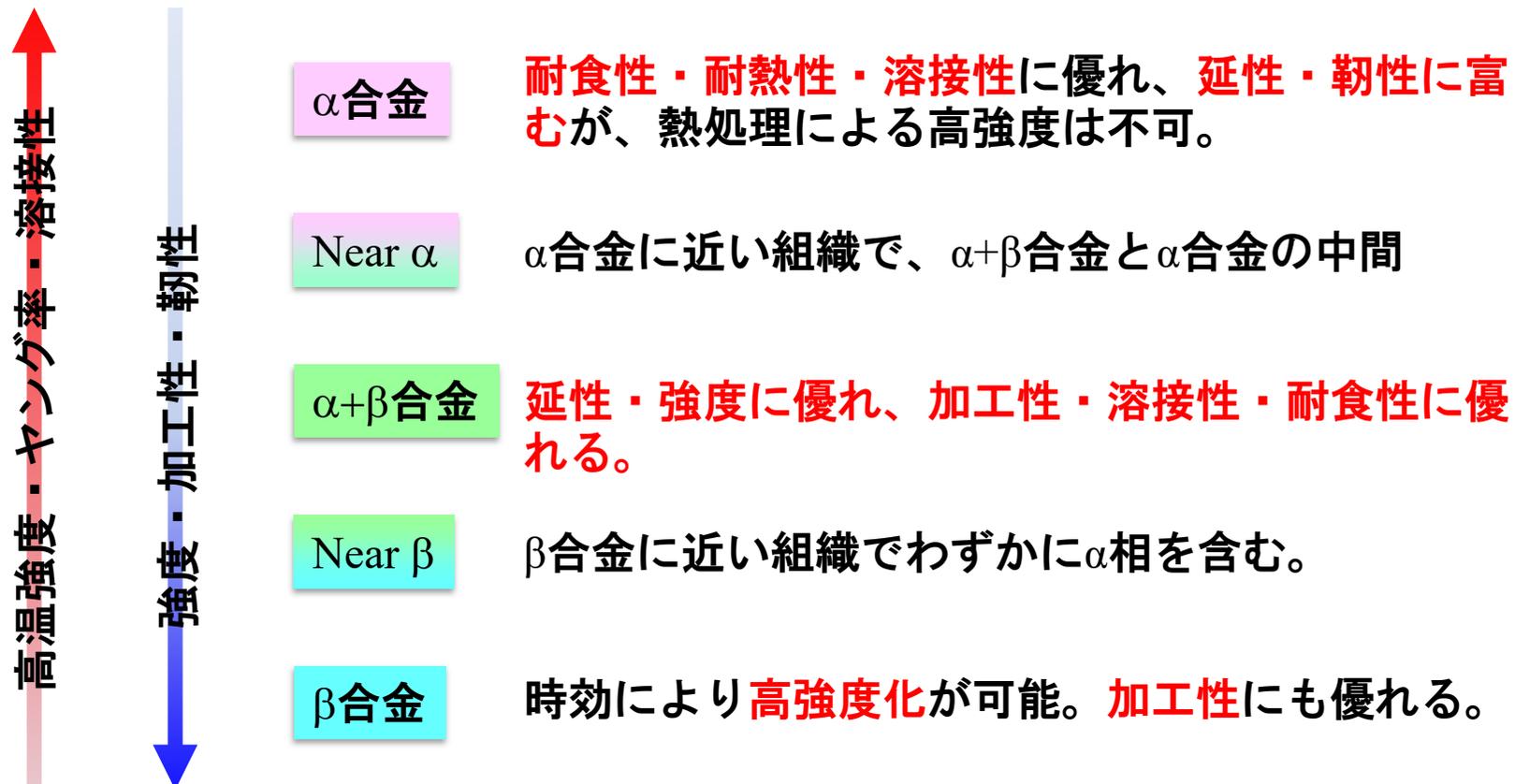
	合金名	熱処理	引張強度	耐力	伸び / %	
純Ti (CPTi)	JIS1種	加工材	275-412	>167	>27	数値幅は不純物の 強化効果を表す
	JIS2種	加工材	343-510	>216	>23	
	JIS3種	加工材	481-618	>343	>18	
耐食α合金	Ti-0.15Pd	焼鈍材	426			不純物が高いほど強度大
強力α合金 (near α)	Ti-5Al-2.5Sn	焼鈍材	850	820	18	
	Ti-8Al-1V-1Mo (811)	加工材	1000-1100	930-1030	15-18	高強度
	Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.1Si (6242S)	時効材	892		15	耐熱・加工性・成形性
	Ti-4Al-5Zr-0.5Mo-0.25Si (IMI585)	時効材	1061			α相の固溶強化大のAlを添加
α + β 合金	Ti-6Al-4V (6-4)	時効材	990	1100	10	汎用性大 展伸材・鍛造材
	Ti-6Al-6V-2Sn (662)	時効材	1166			β相安定化元素を添加し、 強度と熱間加工性を改善
	Ti-11Sn-5Zr-2.5Al-1Mo-0.25Si (IMI679)	時効材	1098			
β 合金	Ti-13V-11Cr-3Al	時効材	1270	1200	8	高温特性良
	Ti-11.5Mo-4.5Sn-6Zr (BIII)	時効材	1382	1212	11	高強度加工性良
	Ti-4Mo-8V-6Cr-3Al-4Zr (BC)	時効材	1440			更にβ安定化元素添加により 強度と加工性を改善
	Ti-15Mo-5Zr (15-5)	時効材	1664			
	Ti-15Mo-5Zr-3Al (15-5-3)	時効材	1470	1450	14	高強度加工性良

強度：滑り系が少なく、変形を担う転位の移動度が低い α が多い程、優れる。

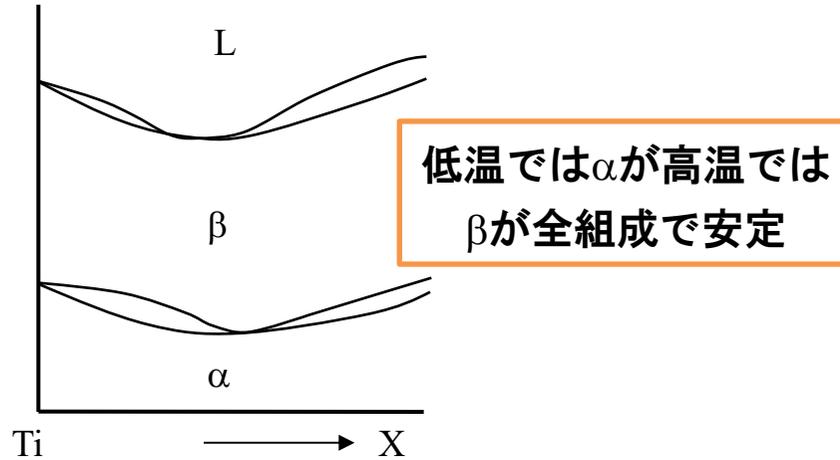
加工性・靱性：塑性変形をおこすべく滑り系の多い β が多い程、優れる。

ヤング率：強度が高い α が多い程、高い。

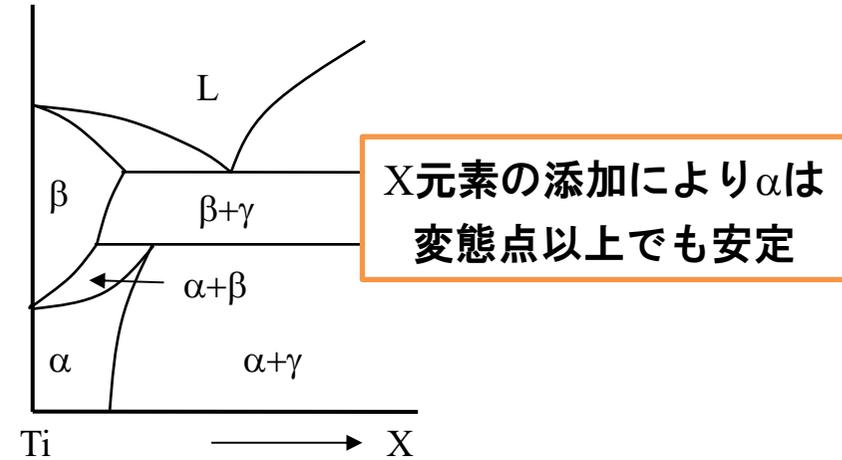
溶接性：機械的性質の劣化をまねくOやNの固溶度が低い α が多い程、優れる。



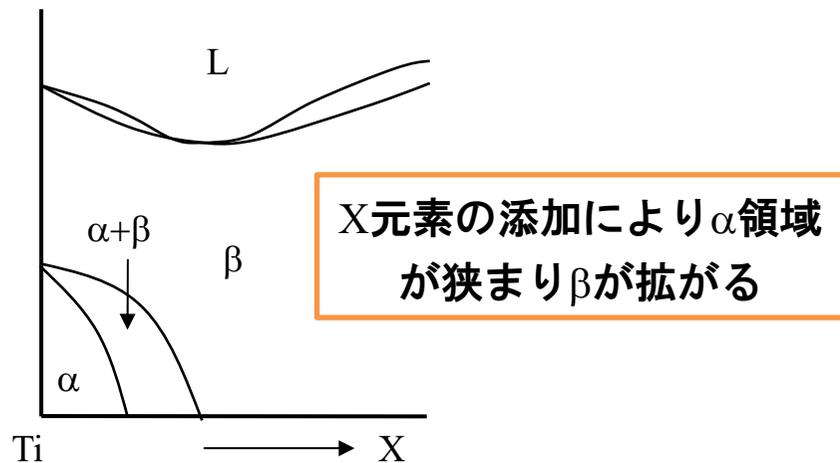
(a) 全率固溶型 : Hf, Zr



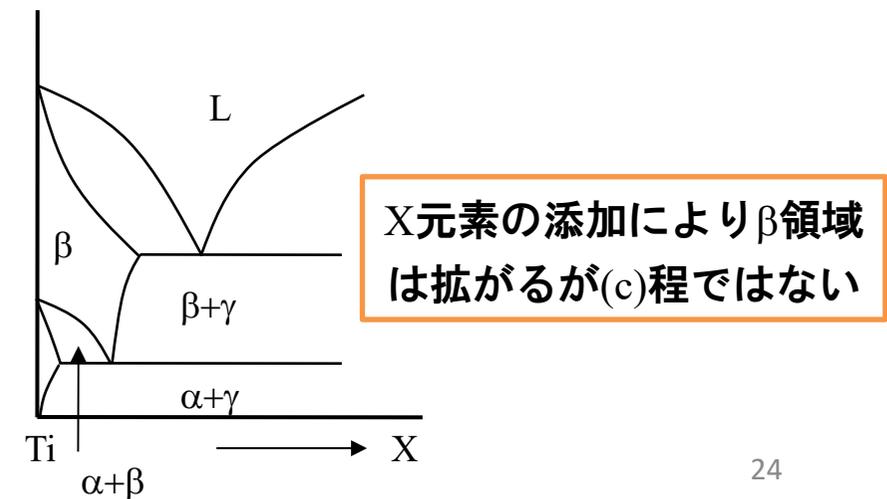
(b) α 相安定型 : Al, Ga, Sn, C, O, N

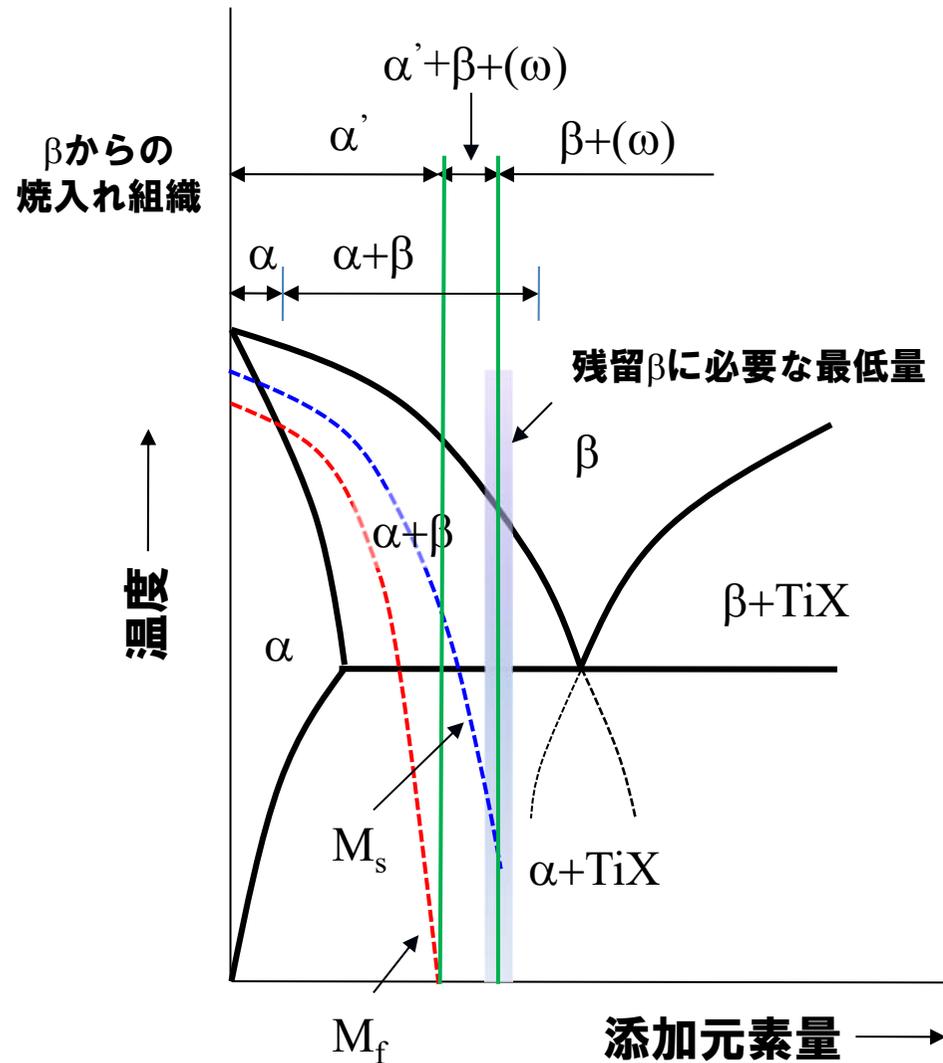


(c) β 相安定型 : Mo, Nb, Ta, V, Re



(d) β 共析型 : Ag, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, W





β相から焼き入れると α' か α'' 相となるが
形状記憶効果や超弾性効果は α''

- α相：Tiの低温相（hcp構造）
- β相：Tiの高温相（bcc構造）
- α'相：β安定化元素量が少ない時に生成するhcp構造
- α''相：β安定化元素量の増加と共に M_s 点が低下し、ある組成以上で生成する斜方晶構造
- ω相：hcp構造
- athermal ω：高温焼入れ時に生成
- isothermal ω：低温時効で生成
- ☞ athermal ω相はα''相と競合して生成

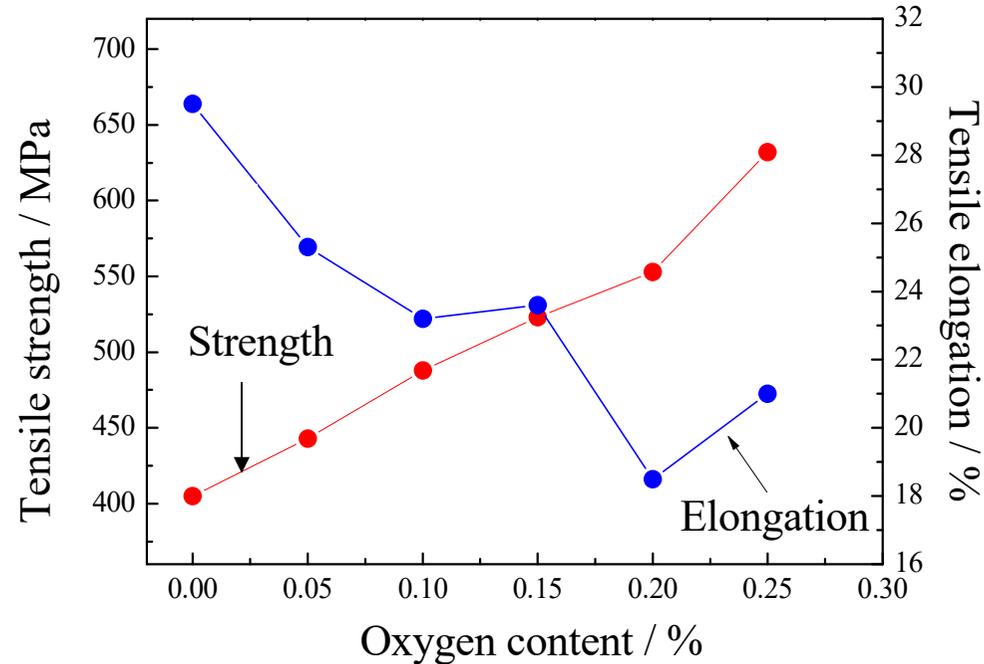
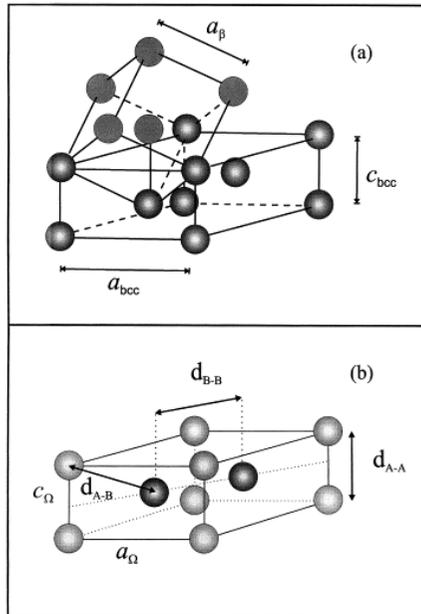
β相安定化には共析型元素の方が有利
だが、急冷中にω析出により脆化

↓

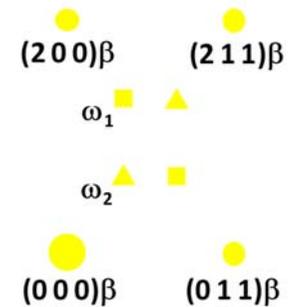
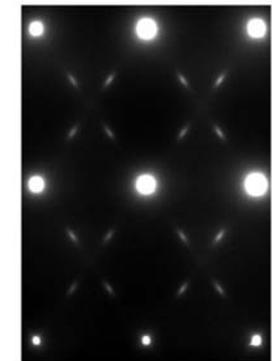
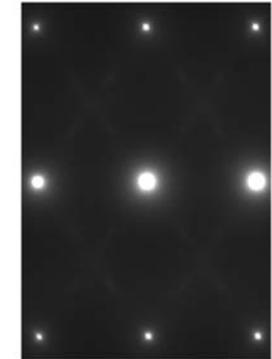
準安定β相（残留β相）が工業的に有利

ω 相：限られた組成範囲で濃度揺らぎを伴い数nm微細析出

- ① 高温 β 相を室温で残留させる過程で析出 (athermal ω)
- ② 準安定 β 相を400°C以下で保持すると析出 (isothermal ω)



ω 相析出 β 合金の室温引張特性とTEM像



β 相中に析出した ω 相の電子線回折図形

ω 相は加工性を劣化し、合金設計や熱処理に注意が必要。

基本的な考え方

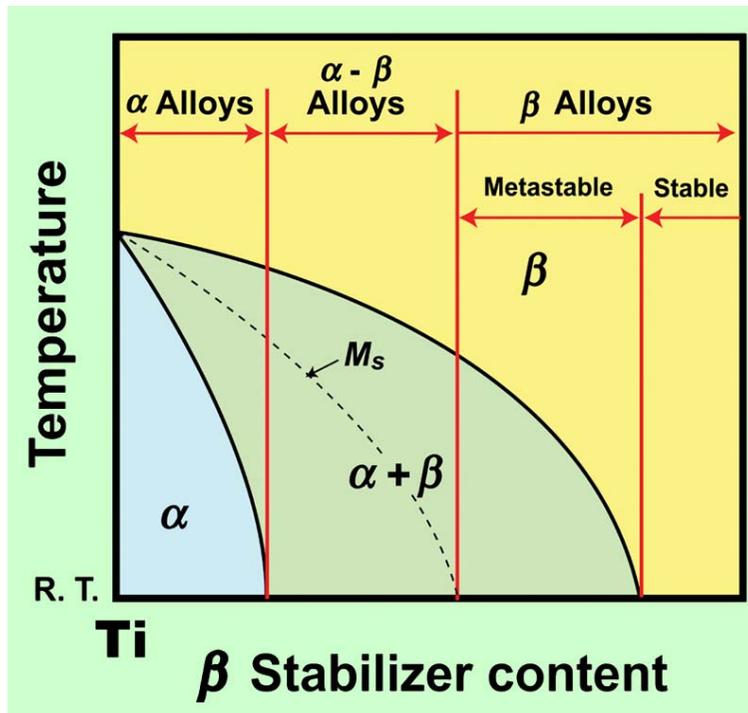
高温で固溶した添加元素を高温から急冷



低温で平衡濃度以上に固溶



時効により析出物の微細析出



① $\alpha + \beta$ 合金： $\alpha + \beta/\beta$ 温度（ β -transus）直上温度で加工（鑄造組織破壊）→

$\alpha + \beta$ 二相域で熱間加工により均一組織化

② β 合金： β を室温で残留させるために（準安定 β と称する）、添加量が室温でのマルテンサイト変態開始点組成以上にする（この組成以下ではマルテンサイト変態が起こり、 β 相残留不可）。 β -transus温度以上に保持後急冷し、時効により α 相析出。

（注意） $\alpha + \beta$ 合金も β 合金も時効温度や時間を適切に選択しないと、 ω 相が析出し脆化を引き起こす（ ω 脆性）

金属の中でアルミニウムは12番目に軽く、卑金属で一番軽い。一方、チタンは16番目に軽く、遷移金属中ではスカンジウムとイットリウムに次いで3番目に軽い。

◎ アルミニウム

① 固溶限が小さく析出強化が必須

微細析出物を分散させるために溶体化処理後に時効を行う。

② 時効温度と時間

時効時間が長いとか時効により析出物が肥大化し、短いと析出が起こらない。

また温度が低いと過冷度は大きいが拡散が遅く、高いと析出が起こらない。

◎ チタン

① 相制御

⓪相析出に注意して合金元素の種類と量を選択しbccとhcpを制御する。

② 組織制御

$\alpha + \beta$ は β -transus直下で加工後に二相域で熱間加工し、 β はマルテンサイト変態

開始点組成以上にて β -transus以上で保持後急冷し、時効 α 析出。