

産業科学研究所—金属結晶部門



研究室紹介

清水 謙 一*

本部門は1940年に金属材料（物理的）部門として発足したが、1963年に金属結晶部門と改名して、現在に至っている。本部門発足時の担当教授であった西山善次先生は、わが国における金属物理学の創始者本多光太郎先生の学風を継承して、金属の相変態、熱処理、結晶塑性などの結晶物理学的研究、とくにX線回折および電子顕微鏡による研究を行い、多くの業績を挙げた。これらの研究は常に漸新かつ先駆的なもので、世界的にも高く評価され、1973年には学士院賞が授与された。

西山先生が1965年に停年退官されたあと、1966年に筆者が本部門の担当教授となり、本多先生と西山先生の輝かしい伝統に傷をつけないよう務めつつ、以下に紹介するように、機能材料ならびに極限材料の開発に向けて、相変態およびそれに付随する諸特性の基礎研究を結晶学的立場から行い、多くの業績を挙げている。

1. 研究部門における研究の概要

はじめにも述べたように、本部門では相変態およびそれに付随する諸特性の基礎研究を行っているが、相変態のなかでも特にマルテンサイト変態（以下M変態と略）の研究に重点をおいている。M変態は鋼の焼き入れ時に出現する構造相変態として古くから知られ、鋼の強靱化に欠くことのできない基本現象として研究の対象となってきた。最近では、鋼以外の非鉄金属合金、金属間化合物、セラミックス、超電導材、強誘電材などの各種材料にも、さらには蛋白質材料においてすら出現することが分かり、それらの材料の機能性と深くかかわりあっていることが

明らかになりつつあるため、M変態は新素材開発における重要な現象の一つとして注目され、世界的規模で活発な研究が展開されている。

しかしながら、研究室の人的構成（現在は、唯木助教授、掛下助手（外出）、中田教務職技官の研究スタッフと数名の大学院学生および研究生）からみても、それらすべての材料のM変態を研究することは困難なため、現在は鉄系合金、貴金属基（金、銀、銅）合金、チタン—ニッケル合金および一部の金属間化合物のM変態とそれに付随する諸特性について研究を行っている。

貴金属基合金およびチタン—ニッケル合金は形状記憶合金でもあるので、M変態だけでなくそれに付随する形状記憶効果と超弾性効果ならびにそれらの熱処理および熱サイクル特性などについても研究を行い、多くの成果を得ている。M変態は冷却時だけでなく、強磁場（鉄系合金の場合）および静水圧や一軸応力を負荷しても生成することが知られているが、強磁場および静水圧誘起M変態の研究は多くない。そこで、本学には幸にも優れた超強磁場や超高静水圧の発生装置（いずれも極限物質研究センター）があるので、理学部伊達教授、基礎工学部藤田教授および上記研究センター遠藤教授の協力を得て、それら極限環境下でのM変態についても系統的に研究し、極限材料の探索に有効な基礎資料を蓄積している。

そのほか、他の相変態、なかでも恒温保持時に出現するベイナイト変態や析出型変態において問題にされている極微小領域の構造変化や組成変化を、超高压電子顕微鏡の極微小領域（本研究所のもので最小25nm）電子回折能および電界放射電子銃付分析電子顕微鏡の極微小領域（最小5nm）元素分析能を駆使しながら調べ、それらの変態の素過程に関しても多くの成果を

*清水謙一 (Ken'ichi SHIMIZU), 産業科学研究所, 金属結晶部門, 教授, 理学博士, 金属物理学

得ている。それらの成果の一部を項を改めて概略説明する。

2. 研究成果の概要

A. 形状記憶合金とM変態： 形状記憶合金が21世紀における夢の新素材の一つとして脚光を浴び、新聞記事になったりテレビに放映されていることはご存知のとおりである。チタン-ニッケル合金に形状記憶効果が見い出されて、その機構解明および応用開発研究が始まった直後から本研究部門でも研究を開始し、その数年後に、形状記憶効果は規則格子合金の熱弾性型M変態に付随して発現する一般的な現象であること、ならびに超弾性効果も必然的に発現することなどを世界に先駆けて明らかにした。この成果が、その後多くの合金系で形状記憶効果が見い出され、形状記憶合金および他の合金のM変態研究が活発になる契機になったと自負している。

その後も精力的な研究を続け、応力-温度空間における状態図の概念を導入することにより、応力誘起M変態ならびにそれに付随する超弾性効果を統一的に説明することに成功した。そのほかに、形状記憶合金におけるM相の結晶構造におよぼす原子の規則配列および一軸応力の影響を明らかにしたり、それらの基本特性におよぼす合金組成、焼き入れや時効などの熱処理ならびに熱サイクルの効果なども明らかにして、形状記憶合金の開発に多大の貢献をしている。

B. 鉄系合金における磁場誘起M変態： 変態開始温 (M_s 点)よりも高い温度で強磁場を印加すると、応力誘起M変態と同様の理由で、磁場誘起M変態を起こさせることができ、合金によっては M_s 点が100K程度も上昇する。 M_s 点上昇の磁場依存性を、多結晶と単結晶合金、インバーと非インバー合金、熱弾性型と非熱弾性型合金について、また母相が強磁性、常磁性および反強磁性の合金について系統的かつ精密に調べ、従来ソ連の研究者によって提唱されていたゼーマン効果以外に、高磁場帯磁率ならびに強制体積磁わい効果のあることを明らかにした。

さらに、熱弾性型M変態をする鉄系合金に強磁場を印加した場合には、応力誘起変態とその逆変態によって超弾性が発現したと同様に、磁場が印加されている間だけM変態が起き、磁場を除去するとそれが消失する“磁気弾性型M変態”の存在することを見出した。これらの成果は超強磁場環境下の材料および磁気センサを具備した鉄系形状記憶合金の開発に貴重なデータを提供するものと期待されている。

C. 静水圧誘起変態： この種の研究は僅かであるが従来も行われていた。しかし、それらの研究における圧力は0.5GPa以下であった。阪大には数GPaの圧力発生装置があるので、5GPaまでの圧力を印加して、静水圧誘起M変態の研究を行っている。

その結果、 M_s 点の圧力依存性は鉄系合金と貴金属基形状記憶合金とで大きく異なることが明らかになった。前者の合金の M_s 点は1.0GPaまでは圧力の上昇にほぼ比例して、1.0GPa以上の圧力では加速度的に低下し、従来の理論値から大きくずれる。一方、後者の合金においては圧力の大小にかかわらず、圧力に比例して上昇し、理論値とも一致する。鉄系合金における M_s 点の低下および貴金属基形状記憶合金におけるものの上昇はM変態時の体積変化がそれぞれ印加圧力と逆向きの膨張および同じ向きの収縮になっているからである。鉄系合金における1.0GPa以上の圧力下での加速度的低下の原因は、反磁性あるいは非磁性の形状記憶合金および常磁性の鉄合金にそれが見られないことから、強磁性に由来するインバー効果にあると結論づけることができた。

D. バイナイト変態の極微小領域分析： 鋼の恒温保持時に出現する典型的な相変態として知られているが、最近では、他の多くの貴金属基合金においても見い出されている。その素過程に関して、まずM変態が起きてから組成が変化し、最初から組成変化を伴った析出現象に過ぎない、など幾つかの異なる説が提唱されている。本研究部門においても電界放射電子鏡付分析電子顕微鏡によって研究した結果、バイナイト板の幅が20nm以下の生成初期から、その組成が周囲の地と異なって最終生成物の組成に

生産と技術

なっていること、およびベイナイトがM変態生成物と同じ結晶構造および内部組織であることを明らかにした。この結果から、まず地のなか

で組成変化が起きて M_s 点が上昇したためM変態が起き、そのあと成長と拡散を起こした生成物がベイナイトであると結論できた。

