

「材料科学・工学におけるマルテンサイト変態」

モーリス・コーエン博士

私は、マルテンサイト変態のもつユニークな特性や、固相状態での定量的実験のしやすさのゆえに、ここ50年以上もの間、この変態に大なる関心をもちつづけてまいりました。このタイプの構造変化は、鋼の焼き入れ硬化で中心的な役割を果たしたため、当初は金属学の分野で注目を浴びておりました。しかし今日、マルテンサイト変態はより広義に定義されています。無拡散でせん断変形的に起こり、結晶格子をひずませるずれが大きく、したがって変態キネティクスおよび変態生成物の形態はひずみエネルギーに支配されるという特徴をそなえたものということになるでしょう。変態により生ずる結晶学的変化は、変態領域で形状変化をともしません。この形状変化は、系内で弾性変形、または塑性変形によって緩和されなければなりません。このような特徴をもつマルテンサイト変態は、金属材料だけではなく、非金属材料やいくつかのバイオ材料にもみとめられます。マルテンサイト変態は、熱力学的駆動力が引き金となって、母相が自然変形したとみなすことができます。したがって、転位論によって、マルテンサイト変態の主要な問題点を説明し、定量化することが可能ではありません。

マルテンサイト変態にともなう形状変化は均一核生成に対し、実際に核生成が起こっている条件下においても、異常に高いエネルギー障壁をもたらします。実際の核生成は、母相中の既存の格子欠陥で不均質に生じることがわかっております。現在では、このプロセスは、転位配列、応力場、移動度といった定量的方法で示すことができます。母相と変態生成相の接合する界面の構造と運動も同様に、転位の概念でモデル化することができます。それにより、実測された核生成速度と成長速度は両方とも、可動な界面運動の動力学によってコントロールされていると結論づけられます。また、界面の運動は、マルテンサイト変態の形状変化が弾性的に緩和されるならば、いくらかのヒステリシスはありますが、可逆的なものです。同時に、変態生成物は、変態に付随するひずみエネルギーを最小とするように板状の形態を呈し、晶癖面をもつようになります。現在のところ、マルテンサイト変態が結晶格子の不安定性によって生じているという証拠は得られておりません。もちろん、この種の特異なケースについては、今日なお研究がなされております。

ただし、マルテンサイト変態にみられるさまざまな興味深い特性は、変態が拡散をともしなわずにせん断変形的に起こり、しかもひずみエネルギーによって支配されるという性質と、いずれも矛盾しないものばかりです。これらの特性は、絶対零度近くの温度でも界面が転位のすばやい運動で移動することによって得られ、また、母相とまったく同じ組成と原子配列度をもちながら準安定相を形成するという、他の方法では決して生じないような状態をつくり出し得るのです。さらに、これらの特性は、弾性応力や塑性ひずみが作用する状態では、変形モードとしての機能も示します。これらの特性すべてが、鋼の焼き入れ硬化のみならず、熱弾性、擬弾性、変態塑性、強靱化、形状記憶効果等の諸現象の基礎となっているのです。

マルテンサイト変態は、その特徴がきわだっており、工業技術的にも重要であるため、固体熱力学、反応キネティクス、結晶学的関係、転位論、力学的挙動などの種々の分野が合流して一体となる、まれな場を提供してきました。このマルテンサイト変態の例にみられるように、社会の相互理解を深め、自然のプロセスの利用を高めるため、さまざまな考え方、解釈の流れが合流するという事は、材料科学・工学の分野からの力強いメッセージといえるでしょう。

"Martensitic Transformations in Materials Science and Engineering"

Dr. Morris Cohen

I have been fascinated by martensitic transformations for over fifty years in view of their unique features and accessibility to quantitative experimentation in the solid state. This type of structural change first came into prominence in metallurgy because of its central role in the quench-hardening of steel; but more generally, a martensitic transformation is now defined as being diffusionless, displacive, and displaying a large component of lattice-distortive shear such that the reaction kinetics and product morphology are dominated by strain energy. The resulting crystallographic change is accompanied by a shape-change in the transforming region, which has to be accommodated elastically or plastically within the system. Martensitic transformations, characterized by these features, are observed in nonmetallic as well as in metallic materials, and even in some biomaterials. A structural change of this kind can be regarded as a spontaneous deformation of the parent phase in response to operative thermodynamic driving forces, and so it becomes feasible to describe and quantify key aspects of martensitic transformations in terms of well-established dislocation theory.

The shape-change attending a martensitic transformation imposes an unusually high energy barrier for homogeneous nucleation even under conditions where nucleation actually occurs. The latter is found to take place heterogeneously at pre-existing defects in the parent phase - a process which can now be described in the quantitative language of dislocation arrays, stress fields, and mobilities. The structure and motion of the interface which couples the parent and product phases can likewise be modeled via dislocation concepts, and it is then concluded that the measured nucleation and growth rates are both controlled by the dynamics of glissile interfacial motion. Moreover, this motion is reversible (with some hysteresis) if the transformational shape-change can be accommodated elastically. At the same time, the transformation product is constrained to adopt plate-like morphologies and habits that tend to minimize the attendant strain energy. No evidence has yet shown that martensitic transformations are governed by impending lattice instabilities, although special cases of this sort are still being sought.

The intriguing properties exhibited by martensitic transformations are, nevertheless, entirely consistent with their diffusionless, displacive, and strain-energy-dominated nature. They can take place at temperatures approaching absolute zero, with interfaces that propagate at dislocation velocities; they can form metastable phases having exactly the same composition and degree of atomic order as does the parent phase, a state that may be impossible to achieve in any other way; and they can function as a deformation mode under the action of elastic stress or plastic strain. All these manifestations furnish the basis, not only for the quench-hardening of steel, but also for such phenomena as thermoelasticity and pseudoelasticity, transformation plasticity and toughening, and shape-memory effects.

Because of the distinctive features of martensitic transformations, along with their technological importance, this class of structural change has provided a focal point for the rare convergence of solid-state thermodynamics, reaction kinetics, crystallographic relationships, dislocation theory, and mechanical behavior. The coming together of such diverse streams of thought and interpretation in order to enhance society's understanding and utilization of nature's processes, as in the case of martensitic transformations, embodies a powerful message in the field of materials science and engineering.