ひずみ誘発マルテンサイト変態

田村 今男*

18-8 オーステナイトステンレス鋼を室温あるいは少し低温で加工するとマルテンサイト変態がおこることはよく知られている。私たちは同様の現象が積層欠陥エネルギーの高い Fe-Ni-C 系オーステナイトの場合にも起こることを見出し、この現象を日本語では加工誘発(マルテンサイト)変態と呼んだ⁽¹⁾。しかし英文では strain-induced martensite という言葉を使った⁽²⁾。これは 1970 年のことである。これに対し Maxwell らは 4 年後の 1974 年に彼らの論文⁽³⁾の中で、田村らは strain-induced といっているけれどもあれは stress-assisted と考える方が好ましいと主張した。これが 1 つの問題点である。ところが、彼らの研究にさきだち 1972 年に Olson と Cohen⁽⁴⁾は Fe-Ni-C 系合金における加工誘発変態についてかなり突込んだ考察を行なった結果、オーステナイトが塑性変形後に生成するマルテンサイトは strain-induced nucleation にもとづくものと考え、単に弾性的な負荷応力に助けられて起こる stress-assisted nucleation と区別した。この中でかれらは「塑性変形中に導入された核生成位置に優先的に核生成した場合を strain-induced nucleation と呼ぶ」と定義している。さらにもう 1 つの問題は Md 付近で強加工することによって生成されるマルテンサイトはときどき羽毛状を呈することがあり、私たちの研究⁽⁵⁾では引張よりも圧縮変形でこの組織が現われやすいものであるが、Maxwell ら⁽³⁾はこの組織を strain-induced martensite と呼んだ。

すなわちここに 3 つの問題が発生した。加工によって誘発されるマルテンサイト変態は主として応力によって誘発されるということは多くの人々によって支持されているが、ひずみ(strain)が少しは寄与するのかしないのかということが第 1 の問題点であり、第 2 は羽毛状組織の本質(マルテンサイトではないのかも知れないが)、第 3 は名称(terminology)の問題である。

先日(5月10日~12日)開催された第 1 回日本金属学会国際シンポジウム(JIMIS-1)「マルテンサイト変態の新しい観点」においては応力またはひずみ誘発変態関係

の論文が最も多く、熱弾性マルテンサイトと形状記憶効果に関連するものも含めると、実に全体の 1/3 にも達するように思われるほど多くの論文が発表された。世界的に重要な問題として研究されていることがわかる。それと同時に、上述の問題点の根源である Dr. Maxwell と、彼と同じ観点に立っている Dr. Guimarães もこのシンポジウムに参加してくれた。いずれも 3,4 年前までアメリカ Stanford 大学の Prof. Shyne を中心とするマルテンサイト変態の研究グループに属していた人たちである。私たちのグループの立命館大学の時実教授や小野寺君たちが連日彼らとホットな討論を展開した。双方の意見の一致はいまだ得られていないが、互いに理解を深めたと同時に、私たちは私たちに考えをまとめ、今後の研究の方向を発見できたように思っている。その討論の内容の要点を簡単に述べてみよう。

図 1 はオーステナイトとマルテンサイトの自由エネルギーの温度変化を示す。普通に冷却するときにはオーステナイトとマルテンサイトの自由エネルギーの等しくなる温度(T_0)より過冷されて、化学自由エネルギー差による駆動力がある大きさに達した温度でマルテンサイト変態が開始する。その温度が M_s である。 M_s 以上の温度でも応力がかかると、その応力による機械的駆動力の付加によってマルテンサイト変態がおこるわけである。Patel と Cohen⁽⁶⁾によれば、この機械的駆動力 W は

$$W = \tau \gamma_0 + \sigma \epsilon_0 \quad (1)$$

図 1 オーステナイトとマルテンサイトの化学自由エネルギー関係説明図。

で示される。ここに τ は晶癖面に働く剪断応力で、 γ_0 は晶癖面での変態剪断量、 σ は晶癖面に垂直な方向に働く引張(正)または圧縮(負)応力、 ϵ_0 は晶癖面垂直方向の変態時の膨張(正)または収縮(負)量である。すなわち γ_0 、 ϵ_0 は合金が決まれば決まってしまう量で、 τ は外力によって発生する剪断応力であり、 σ は外力の分力である。応力を付加する温度が M_s 点より高くなるほど大きな W を必要とするので大きな応力が必要となってくる。

* 京都大学教授；工学部金属加工学教室
Strain-Induced Martensitic Transformation; Imao Tamura
(Department of Metal Science and Technology, Faculty of Engineering, Kyoto University, Kyoto)

図2 マルテンサイト変態開始応力と応力付加温度の関係説明図。

その様子を図2⁽⁴⁾⁽⁷⁾に示す。Msよりある程度以上高温となるとマルテンサイト変態をおこす前にオーステナイトは降伏してしまう。その限界の温度をMs'という。Ms'以上ではオーステナイトが塑性変形してからマルテンサイト変態をおこす。たとえば図2の温度T₁におけるマルテンサイト変態を観察すると、T₁で引張応力を次第にかけてゆくとオーステナイトは先ずaで降伏して塑性変形をおこし、加工硬化して、bでマルテンサイト変態がおこりはじめる。

この現象に対し、純粋に応力だけがマルテンサイト変態を誘発するものと考え、オーステナイトがcまで加工硬化して応力がσ₁に達したときはじめて変態を開始しなければならないはずであるが、現実にはbで開始する。このように塑性変形をおこすと変態を誘発しやすくなる(低い応力で誘発する)わけである。この(c-b)で示される応力差(駆動力の差)がひずみ(strain)によって与えられるものであるから、これをひずみ誘発(strain-induced)変態と呼ぶというのがひずみ誘発説の立場であり主張である。私たちはこの立場に立っている。しかしその内容は双晶境界や結晶粒界における局所的な応力集中⁽⁷⁾あるいは塑性変形の進行した時点における転位網、セル構造などの生成によって至るところに応力集中場所ができ、そこがマルテンサイトの核発生場所となると考えられ、その応力集中によって変態を誘発すると考えるものである。これらの応力集中がstrainによって生成されるからstrainを強調するわけである。

しかし、あくまでもstressのみがきくという立場に立てば、式(1)のτやσを内部応力と考えることによって局所的に応力集中部では内部応力は図2の温度T₁でσ₁の大きさに局所的に容易に達しているものと考えることができる。Suzukiら⁽⁸⁾はこの立場をとっているようである。

前述のMaxwellはもっぱらマルテンサイトの形態のみについて考えており、Fe-Ni-C合金の場合MsとMs'の間で生成したマルテンサイトの形態とほとんど同じマルテンサイトがMs'以上でも生成されるので、同じ形態である範囲内は同じstress-assistedでなければならないと主張し、Mdにさらに近付けば羽毛状の変態生成物が生成され、その晶癖面は(111)_rとなるから、このような変態をおこすようになればこれがstrain-inducedであると主張している。そしてステンレス系の鋼では容易に(111)_rのマルテンサイトが加工によって生成されるのでMs'付近でもstrain-inducedであるといっている。また、MaxwellはFe-Ni-C合金の場合でも図2におけるMs-Ms'とMs'以上とで何らかの相違のあることは認め、Ms'以上をLecroiseyとPineau⁽⁹⁾の示したようにdeformation-inducedと呼ぶ方がまぎらわしくなくてよいと主張している。

GuimarãesらはMaxwellとほぼ同様の観点に立っており、図2のMs'を境として、それより高温側と低温側で生成するマルテンサイトは、その生成機構においても生成位置においても明確な相違があるとは考えられない。そしてMs'以上の温度でマルテンサイト変態が著しく促進されるのは内部応力の増大にもとづく、いわゆる“mechanical sensitizing”⁽¹⁰⁾によるということを今回の講演⁽¹¹⁾においても強調していた。この点ではSuzukiら⁽⁸⁾と同じような考え方である。

OlsonとCohen⁽⁴⁾は変形帯の交切によってマルテンサイト(bcc)の芽ができることを述べ、集中応力にあまり重点をおいていないので、strainを重視する点で私たちに似ているが、機構の上では大きな相違がある。彼らの機構はMaxwellらの羽毛状マルテンサイトの生成の説明に都合がよいかも知れない。

私たちはMaxwellの考えと異なり、stress-assistedとstrain-inducedとでマルテンサイトの形態が必ずしも変わる必要がないと考えている。strain-inducedであってもオーステナイトのすべり面と同じ晶癖面をもつ必要はないはずである。また、羽毛状変態生成物の本質を明らかにすることが当面の重要問題で、これを解明することが1つの大きな研究目標であろう。さらに、まぎらわしい言葉の使い方を整理してゆく必要があるように思われる。

なお、種々な合金におけるマルテンサイト変態において次の諸条件の大部分を満足するような場合には、Ms点以上のある温度範囲内では応力の付加によって容易に変態が進行し、また除荷によってその逆変態もおこる。このような変態を熱弾性マルテンサイト変態という。その条件とは⁽¹²⁾、(1)変態の駆動力が小さい、(2)変態剪断量が小さい、(3)変態時の体積変化が小さい、(4)

そのため Ms-As の温度差が小さい, (5) 母相の降伏応力が比較的高い, これらを満足するような変態においては当然のことであるが式(1)の第2項はほとんど無視され, もっぱら第1項のみの議論ですみ, また母相の塑性変形がおこるような大きな応力に至らないうちに変態が進行し完了に至るので strain-induced については全く議論とはならないようである。

文 献

- (1) たとえば, 田村今男: 鉄と鋼, **56**(1970), 61; 田村今男, 牧 正志, 波戸 浩: 金属学会誌, **33**(1969), 1376; 牧 正志, 下岡貞正, 梅本 実, 田村今男: 金属学会誌, **35**(1971), 1073.
- (2) たとえば, I. Tamura, T. Maki and H. Hato: Trans. ISIJ, **10**(1970), 163; T. Maki, S. Shimooka, M. Umemoto and I. Tamura: Trans. JIM, **13**(1972), 400.
- (3) P. C. Maxwell, A. Goldberg and J. C. Shyne: Met. Trans., **5**(1974), 1305.
- (4) G. B. Olson and M. Cohen: J. Less-Common Metals, **28**(1972), 107.
- (5) H. Onodera, H. Goto and I. Tamura: マルテンサイト国際シンポジウム (JIMIS-1), 日本金属学会, (1976年5月)発表.
- (6) J. R. Patel and M. Cohen: Acta Met., **1**(1953), 531.
- (7) M. Tokizane: マルテンサイト国際シンポジウム (JIMIS-1), 日本金属学会, (1976年5月)発表.
- (8) T. Suzuki, H. Kojima, K. Suzuki, T. Hashimoto, S. Koike and M. Ichihara: マルテンサイト国際シンポジウム (JIMIS-1), 日本金属学会, (1976年5月)発表.
- (9) F. Lecroisey and A. Pineau: Met. Trans., **3**(1972), 387.
- (10) J. R. C. Guimarães and J. C. Shyne: Scripta Met., **4**(1970), 1019.
- (11) J. R. C. Guimarães, J. C. Gomes and M. A. Meyers: マルテンサイト国際シンポジウム (JIMIS-1), 日本金属学会, (1976年5月)発表.
- (12) D. P. Dunne and C. M. Wayman: Met. Trans., **4**(1973), 147.

新 刊 案 内

Solidification Processing

M. C. Flemings 著

本書は, McGraw-Hill の Materials Science and Engineering Series の一冊として 1974 年に出版された。著者は米国 M. I. T. の教授である。

金属の凝固に関する研究はベテルブルクの鋳鋼工場の技師 D. Tschernoff が 1878 年発表した「鋳鋼塊の組織に関する研究」において樹枝状晶の顕微鏡組織をはじめて示した時点までさかのぼることができる。しかし, その後の発展は金属学の他の分野にくらべて遅々としており, 系統的な研究の緒についたのは 1949 年頃といわれる。1953 年には J. W. Rutter, B. Chalmers によって Constitutional Supercooling の概念が確立され 1957 年には ASM の年次大会において「Liquid Metals and Solidification」のセミナーが催された。1964 年, B. Chalmers はそれまでの 15 年間の成果をまとめて, 凝固に関するはじめての単行本「Principles of Solidification」を著わし, また W. C. Winegard も「An Introduction to the Solidification of Metals」を 1966 年に著わしている。本書はその後, 約 10 年を経て世に出たことになるが, その内容は M. I. T. における著者の研究室で挙げられたこの 10 年間の研究成果に主としてとづいてと序文で述べられている。以上の三著の題名を比較すると, 前二著はいずれも凝固現象の解析に重点が置かれているが, 本書の題名は「凝固加工学」とでも訳すのであろうか, 凝固現象の解析で得られた知見を積極的に実際の造塊, 鋳造作業に応用し, さらにそれらの鋳塊が鍛

造, 圧延された後に最も望ましい性質を持つためにどのような凝固法が適しているかという問題にまで迫ろうとしている。

第一章は凝固における熱の移動を熱伝導論にもとづいて取扱っている。第二章は単結晶の成長における物質移動(溶質の再分布)について述べ, 第三章で平らな固液界面は如何にして維持されるかという重要な問題と, これが崩れてセルを形成した場合の溶質再分布について述べている。第四章は共晶および共晶組成から偏った多相合金の平らな界面による凝固を扱い, 凝固法によるコンポジットの製造にも触れている。第五章と第六章は普通の鋳物や鋳塊の凝固現象について, 樹枝状成長, ミクロ偏析, 介在物の生成, 気泡巣の形成などを微視的観点から単相および多相合金について扱っている。第七章は最近その重要性が注目されている凝固時の溶湯流動の役割について整理している。第八章は凝固界面における熱力学的な平衡, 非平衡について述べ, 第九章は核形成の問題を含めて固液界面の運動論を扱っている。最終の第十章は改良された機械的あるいは物理的性質を有する組織を得るためにはこれまで述べた諸原理をどのように適用すべきかについて例を挙げて説明している。

各章ごとに豊富な引用文献と応用問題が挙げられており, 大学院修士課程のテキストとしても極めて適していると思われる。(K. I.)

[17.5×23.5 cm 364頁 1974年 定価 7,580円 (丸善)]

McGraw-Hill Book Company)