The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	マルテンサイト変態とフラクタル
Author(s)	金道, 浩一
Citation	大阪大学低温センターだより. 1990, 71, p. 6-9
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/4235
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

マルテンサイト変態とフラクタル

理学部　金　道　浩　一（豊中4156）

1．マルテンサイト変態とは

我々の研究室では、磁場誘起マルテンサイト変態の研究を阪大産研の清水研との共同研究で行なっている。マルテンサイト変態という言葉は専門家以外の人々には耳慣れない言葉と思われる。まずマルテンサイト変態がどういう物かを説明してから話を進めよう。

マルテンサイト変態は合金における典型的な構造相転移として良く知られており、物理的な興味からだけでなく、金属学的視点からも多くの研究がなされている。歴史的に見ると、初期の研究は3 d 遷移金属やその合金に集中していた。最近になって対象があらゆる合金や化合物へと拡がり、形状記憶合金などの新しい概念も生まれている。[1] その他にもマルテンサイト変態は Nb_3Sn の様なA－15化合物の超伝導にも深く関わっている。[2]

マルテンサイト変態は典型的な拡散を伴わない一次の構造相転移としても知られている。例えば鉄系合金で温度を下げてゆくと、ある温度M_sで高温相のオーステナイト相（fcc）から低温相のマルテンサイト相（bcc）へと原子の拡散を伴わずに転移が起こる。変態駆動力は各原子に働く微視的な剪断力と考えられる。変態後は自発磁化の増加とともに体積増加が起こる。体積の増加は結晶内における局所的なストレスを高めるため、結晶全体がマルテンサイト相に変わる前に変態が止まってしまう。従って試料の表面には、オーステナイト相の中にマルテンサイト相が入り混じったパターンを見る事ができる。

マルテンサイト変態は外部磁場によって促進される。図1の概念図に示す様にマルテンサイト相の自

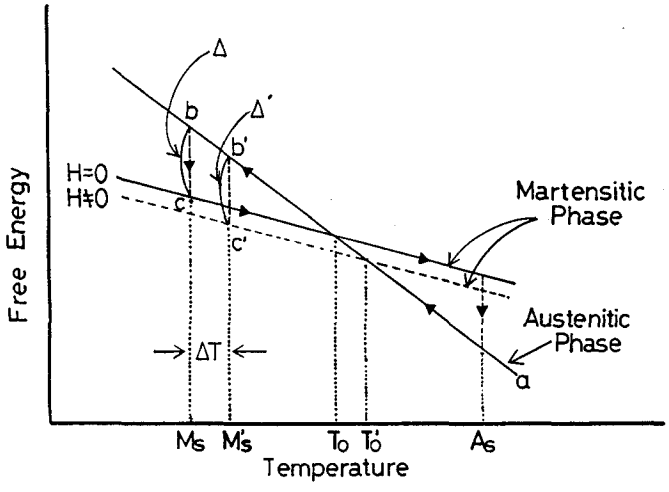

図1　マルテンサイト変態の概念図

発磁化がオーステナイト相のそれよりも大きい時、変態は増長される。外部磁場が0の時のフリーエネルギーを考えると、a点（始点）でマルテンサイト相に対してオーステナイト相が十分低い。温度を下げると、熱力学的転移点T_0で両相がクロスする。しかし、ここで転移は起こらず、M_s点まで下がって初めてb→cの転移が起こる。ここでギャップΔは駆動エネルギーと呼ばれており、温度にはほとんど依存しない。次に磁場Hをかけるとマルテンサイト相のフリーエネルギーはゼーマン効果のため図1の破線の様に相対的に下がってくる。従って温度をM_s'点で固定しておき磁場をかけてゆくと$\Delta=\Delta'$となる磁場の時にb′→c′の転移が起こる。[3] 磁場効果については最初ソ連のKrivoglazとSadovsky[4]によって報告されている。その後、阪大産研の掛下等[5-8]によってFe−Ni、Fe−Pt、Fe−Mn合金の系統的研究が、阪大極限物質研究センター超強磁場部門のパルス磁場を用いて行なわれている。これらの研究から磁場誘起変態はとても速い現象で、約1msecのパルス幅よりも速い事や、母相であるオーステナイト相の約半分が図2の様な独特なパターンを作りながら、マルテンサイト相へ変態する事が分かった。図2の顕微鏡写真は変態後の試料を薬品で表面処理して得られたものである。黒い部分がマルテンサイト相、白い部分がオーステナイト相を表わす。

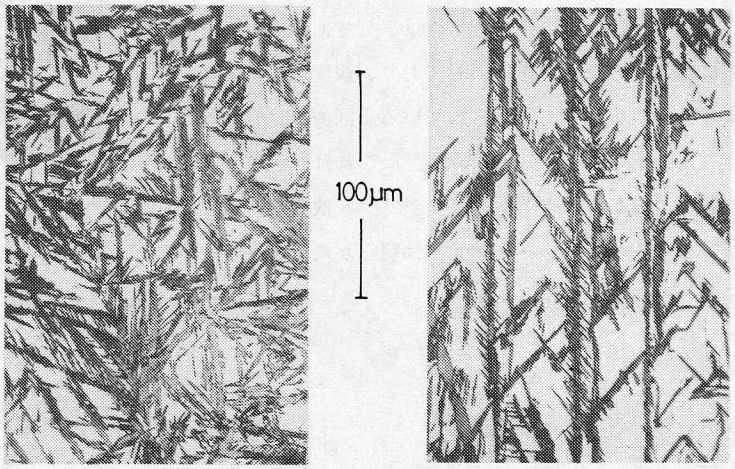

図2　マルテンサイト変態後の試料表面の顕微鏡写真
左が熱誘起マルテンサイト、右が磁場誘起マルテンサイト。
右の方が磁場方向にマルテンサイト相がそろっている。

2．フラクタル登場

我々の研究室では年に一度セミナー旅行がある。その年、偶然フラクタルに関する本が数多く出版されていた事もあって、私はフラクタルをテーマにセミナーを持つ事になった。「フラクタル」とは数学者マンデルブローによる造語である。[9] その概念の影響は今では、数学の世界にとどまらず、物理の分野にも及んでいる。フラクタル的視点から凝集体や結晶成長を対象とした研究が多くなされている。フラクタルは自己相似性と呼ばれる、スケール変換に対して不変な性質を持っている。分かり易く言えば、全体の一部分を取り出し、拡大コピーを繰り返し、元の大きさにした時どちらがオリジナルか区別がつかない性質とか、顕微鏡で見ている時に、倍率を変えてもいつも同じパターンしか得られない様なもの

が自己相似性である。

マルテンサイト相が母相の上に描くパターンが自己相似性を持っている事に気付き、フラクタル次元を測定してみた。測定に際してはスケーリング法を用いた。詳しくはマンデルブローの著作を御覧いただきたいのだが、手短かに言うと、この方法は意図的に解像度を変化させて対象を観測する事に対応する。顕微鏡で得られたパターンを一辺が r の正方形に分割する。マルテンサイト相を一部でも含む正方形の数 $N(r)$ を数えあげる。r を変化させた時に、

$$N(r) \propto r^{-D} \qquad (1)$$

の関係を満たせばマルテンサイト相は D 次元の拡がりを持つ事になる。図3にはスケーリングの過程が描かれている。r を4 μmから40 μmまで変化させた時の $N(r)$ と r の関係は図4に示しており、良いフラクタル性を表わしている。Fe－Mn－CとFe－Ni－C合金のデータをプロットしてあるが元素の前の数字は重量パーセントを表わしており、炭素原子は適当な変態条件を満たすために入れられている。図中には比較のため $D=1.65$ の直線も示されているが、これは拡散律が支配する凝集体（DLA）の典型的なフラクタル次元を表わし、マルテンサイトのフラクタル次元とは明らかに傾きが異なっている。

図3　スケーリング法の過程

3．結　果

フラクタル次元は多くの試料について測定され以下の様な結果が得られた。[10]

$D=1.83\pm0.02$; Fe－Ni－C*

$D=1.79\pm0.03$; Fe－Ni－C　　(2)

$D=1.84\pm0.02$; Fe－Mn－C

Fe－Ni－C*はマルテンサイト相の微視的な形状がレンズタイプと呼ばれる、普通とは異なった形のものだが、得られたフラクタル次元は他のものと同じである。

熱誘起マルテンサイト相についても同様に調べたところ、

$D=1.80\pm0.02$; Fe－Ni－C

$D=1.81\pm0.02$; Fe－Mn－C　　(3)

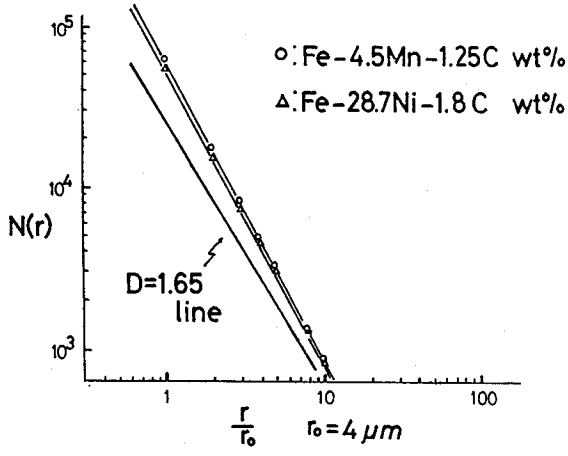

図4　$N(r)$ と r の関係。

となった。この様に、マルテンサイト相のフラクタル次元はサンプル依存性がなく、1.81±0.02となる。

この結果をＤＬＡの場合と比較して定性的な考察を試みる。ＤＬＡについては、実験的に松下等[11]の行なったZnの金属樹について得られた$D=1.63$、理論的にWitterとSander[12]の行なったコンピューターシュミレーションによる$D=1.67$がある。マルテンサイトがＤＬＡよりも大きなフラクタル次元を持つ事は次の様にして理解できる。ＤＬＡは結晶成長の確率が先端程大きく、一次元的な成長をする。マルテンサイトとの比較は三次元空間での広がりを考察に入れなければならず、単純には考えられないが、ＤＬＡはその成長過程から低次元性を示すと思われる。それに対して、マルテンサイト相の拡がり方は、無拡散で二次元的あるいは三次元的なローカルストレスが変態を支配しているため、高次元性を持っていると考えられる。マルテンサイトのフラクタル性についてはドイツのHornbogen[13]も手法は異なるが、パターンの自己相似性について議論している。

最後に、試料をこころよく提供して下さり、マルテンサイト変態について色々と御教えいただいた、阪大産研の掛下知行博士と清水謙一教授に、また有益な助言をいただいた理学部の伊達宗行教授に感謝いたします。

参考文献

(1) K. Otsuka and K. Shimizu: Int. Metals Rev. **31** (1981) 93.

(2) B. W. Batterman and C. S. Barrett: Phys. Rev. Lett. **13** (1964) 390.

(3) J. R. Patel and M. Cohen: Acta Met. **1** (1953) 531.

(4) M. A. Krivoglaz and V. D. Sadovsky: Fiz. Met. Metalloved. **18** (1964) 502.

(5) T. Kakeshita, K. Shimizu, T. Sakakibara, S. Funada and M. Date: Scr. Met. **17** (1983) 897.

(6) T. Kakeshita, K. Shimizu, S. Funada and M. Date: Acta Met. **33** (1985) 1381.

(7) T. Kakeshita, K. Shimizu, S. Funada and M. Date: Trans. JIM. **25** (1984) 837.

(8) T. Kakeshita, K. Shimizu, S. Kizima, Z. Yu and M. Date: Trans. JIM. **26** (1985) 630.

(9) B. B. Mandelbrot: *The Fractal Geometry of Nature* (Freeman, San Francisco, 1982).

(10) K. Kindo, K. Hazumi and M. Date: J. Phys. Soc. Jpn **57** (1988) 715

(11) M. Matsushita, M. Sano, Y. Hayakawa, H. Honjo and Y. Sawada: Phys. Rev. Lett. **53** (1984) 286.

(12) T. A. Witten and L. M. Sander: Phys. Rev. B **27** (1983) 5686.

(13) E. Hornbogen: Z. Metallkde. **78** (1987) 352.