金属の加圧処理による品質の改良

河 合 伸 泰* 滝 川 博**

1. 緒 言

温度とならんで物質の状態を条件づけるものは圧力である。とくに、金属に圧力[†]を加えた場合の影響については古くから研究がなされており、たとえば Bridgman⁽¹⁾は、もし変形の際、引張応力に加えて大きな圧力が作用する場合には、市販の材料でも引張延性は1桁以上大きく増加することを示している。また、Kulin ら⁽²⁾は金属の変態点に及ぼす圧力の影響を調べて、たとえば Fe-30Ni 合金^{††}の Ms 点は圧力が 100 MPa 増すごとに 8 K 低下すると報告している。このように、金属を加圧することによって、その性質を変えうることがわかっているが、一般の工業生産規模で実際にこのような加圧処理によって品質の改良が行われているのは、2, 3 の例を除いて極めて少ない。この理由の大きなものの1つに、装置面での制約をあげることができる。しかし、近年 HIP 装置^{†††}と呼ばれる高圧力下で処理できる装置が開発され、多方面で実用化されるようになってきている。この HIP による加圧処理は、工業化に成功した数少ない技術の1つといえる。

(1) HIP 装置

HIP 装置に関しては数多くの報告がなされているが^{(3)~(5)}、一言でいえば処理品を高温高圧のガス雰囲気下に一定時間保持するためのもので、図1に装置系統図を、図2に装置の外観を示す。HIP 装置の主要なものは、(a) 高圧ガスを保持する高圧容器、(b) 高圧容器に高圧ガスを供給する圧縮機などの高圧発生装置、(c) 高圧容器に内蔵されるヒータ、断熱層などの炉内構造物、

(d) ヒータに電力を供給する加熱電源および制御装置から成立っている。

図1 HIP 装置の全体系統図。

図2 HIP 装置。
(炉内：φ200 mm × 1500 mm, 2273 K-200 MPa)

* 株式会社神戸製鋼所技術開発本部中央研究所
主任研究員

** 株式会社神戸製鋼所技術開発本部中央研究所研究員

Improved Properties of Metals under the Application of Pressure; Nobuyasu Kawai, Hiroshi Takigawa (Central Research Lab., Kobe Steel Ltd., Kobe)

Keywords: hot isostatic pressing, defect healing, castings, nickel base superalloy, titanium alloy, aluminum alloy, hot tensile strength, creep rupture, fatigue

1982年8月3日受理

† 以後ことわりがない場合は「静水圧」を意味する。

†† 数字は質量%を表わす。以下の成分表示も同じである。

††† 熱間静水圧加圧装置(Hot Isostatic Pressing 装置)。

自由世界における HIP 装置は 1981 年の時点で約 200 基あり、そのうちの約半数がアメリカに設置されている。日本では 1982 年末には 32 基が設置される予定で、この 1, 2 年の間に急増している。最近の HIP 装置は大型化、高温化、高能率化される傾向にあり、大型のものは処理室の直径が 1235 mm、高さでは 3658 mm の装置が稼働しており、また温度では 2273 K、圧力は 200 MPa までの装置が使われている。

(2) HIP の応用技術

HIP は、1955 年に Battelle 研究所 (アメリカ) において核燃料要素集合体の拡散接合の手法として考案されたのが最初である。その後、各方面で HIP の研究開発が進められた結果、機械的性質のすぐれた物品を製造することが可能となり、1970 年に入ってから表 1 に示す分野で精力的に工業化が推進されるようになった。HIP の特徴は、高温下で被処理体に等方的な高圧力を加えて拡散を進行させる点にあり、高性能材料の製造を可能にした。また、省力化、材料歩留りの向上によってコスト低減も可能になったため、その応用範囲は航空機産業を中心に拡大しつつあり、近い将来は自動車産業へも適用されるものと示唆されている⁽⁶⁾。

ここでは、金属の加圧処理による品質の改良という観点から、とくに casting 品に対する HIP 処理をとりあげる。

表 1 HIP の応用技術。

応 用 技 術	企業化されている製品
粉末の加圧焼結	高速度鋼, 超合金, Ti 合金
焼結欠陥の除去	超硬合金, セラミックス, フェライト
鑄造欠陥の除去	超合金, Al 合金, Ti 合金, 17-4 PH
疲労クリープ損傷部品の再生	超 合 金
拡 散 接 合	B 繊維-Al 合金, 核燃料要素集合体
C/C 複合材の製造	カーボン複合材

表 2 Al 鑄造合金に対する HIP 処理効果。

合 金 名	状 態	疲労寿命(サイクル) 応力: 138 MPa	耐 力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸 び (%)
C355 (砂 型 鑄 造)	鑄造+T6 HIP+T6	147 500 2 905 000	223 243	236 276	0.8 1.8
A356 (金 型 鑄 造)	鑄造+T6 HIP+T61	452 000 4 650 000	199 210	265 291	7.5 11.1
142 (金 型 鑄 造)	鑄造+T4 HIP+T4	709 000 10 346 000	200 204	225 248	— —

(T6, T61, T4 は JIS で定める熱処理条件を表わす)

2. 鑄造品に対する HIP 処理の歴史的経緯

鑄造品は通常、その内部にシュリンケージ、ガスポロシティなどの欠陥を有しており、このために生じる延性の低さ、信頼性の低さはある程度宿命的なものと考えられてきた。これらの欠陥を本質的に除去するためには何らかの外力を加えることが必要であり、長年にわたって鑄造技術分野では種々の改善がなされてきた。そして、最近では高い静水圧と高温との相乗効果によって、鑄造品中の欠陥を押しつぶし、かつ欠陥表面を拡散によって強固に接合する HIP が理想的な方法であることが認められるようになってきた。

HIP による鑄造欠陥の除去は、1965 年頃に Alcoa 社 (アメリカ) によって初めて研究が開始された。Alcoa 社の目標はディーゼル・エンジン用 Al 鑄造ピストンの疲労強度の改善であり、表 2 に示すように HIP によって疲労寿命が 1 桁増加するという結果が得られた⁽⁷⁾。1967 年には、Howmet 社 (アメリカ) が X 線検査で規格外になった Ti および耐熱超合金の精密鑄造品の改善に関する研究を実施し、1972 年には General Electric 社 (アメリカ) によって、HIP による鑄造欠陥除去の大きな可能性が示され⁽⁸⁾、アメリカ空軍のプログラムも開始された。これらの研究において、Ti および耐熱超合金の機械的特性が、HIP によって顕著に改善されることが統計的に示され、精密鑄造に関わる多くの企業が HIP に新たな興味を示すようになった。そして、1975 年に Howmet 社は、世界で初めて HIP による精密鑄造品の加圧処理を工業化し、たとえば General Electric 社の CF6-6 エンジン (DC-10 用) の高圧タービン・ブレードに対しては HIP 処理を規格化するようになった⁽⁹⁾。なお、現在すでにアメリカでは Pratt and Whitney Aircraft, General Electric, AiResearch, Lockheed, Detroit Diesel Allison, Howmet, Kawecki Berylco, Industrial Materials Technology などの各社が鑄造品に対して HIP 処理を行っている。

3. HIP による鑄造品の加圧処理による品質の改良

(1) HIP プロセス

図3に示すように、一般に HIP による鑄造欠陥除去プロセスではカプセルは不要であり、被処理体を直接高温高压のガス雰囲気(通常は Ar ガス)にさらす方法が用いられる。

しかし、たとえば後述の Mg 合金のように、欠陥が表面につながっている場合には何らかの表面シールが必要であり、この対策の一例としては表面孔を溶接で塞ぐ方法、あるいはコーティングを施す方法などがある⁽⁸⁾。いっぽう、内部欠陥が多くても表面が気密であるような HIP 処理に適した鑄造も有効である。

HIP プロセスの問題点としては2つあり、1つは被処理体に直接高温高压の雰囲気ガスが触れることに基づくガス中の不純物(とくに H_2O , O , N) による被処理体表面の汚染である。この現象は、Ti, Al を多量に含有する Ni 基耐熱超合金、あるいは Ti 合金の処理を行う場合に問題となり、防止法としては、表面コーティング⁽¹⁰⁾あるいはガス浄化装置の導入による圧媒ガスの純度維持⁽¹¹⁾などが行われている。

もう1つの問題点は、HIP 処理後の熱処理に関するものである。つまり、HIP は1つの熱サイクルであるため、従来の熱処理条件をそのまま適用するよりも、少し修正した条件で熱処理を行った方がより特性が向上する場合があり、後熱処理も含めた HIP 条件を検討せねばならない。

図3 HIP 処理プロセス。
(a) カプセルを用いた粉末の HIP 焼結。
(b) HIP による閉塞空隙除去の状態。

鑄造品の HIP 処理による効果としてはつぎの5つの項目があり、これらについて詳述する。

- (i) 機械的特性の向上
- (ii) 組織の改善
- (iii) 溶接性の向上
- (iv) 加工性の向上(切削加工, 化学的研磨)
- (v) 非破壊検査性能の向上(X線, 超音波)

(2) 機械的特性の向上

(i) Al 合金

AC7A (Al-4.5Mg) 合金の引張強さ、伸び、衝撃値に及ぼす結晶粒、および HIP 処理の効果を図4⁽¹²⁾に示す。鑄造ままの材料はミクロ結晶粒が粗くなると、とくに $100\mu m$ 以上になると急激にそれぞれの特性は低下し、なかでも伸びの低下が著しい。いっぽう、HIP 処理を施すと引張強さ、伸び、衝撃値はすべて改善され、とくに引張強さは結晶粒の大きさにかかわらず 280 MPa 一定となる。なお、鑄造したままの材料に HIP 処理と同じ熱履歴を与えた材料の機械的特性は鑄造材とほぼ同様の値しか示さない。このように、AC7A 合金鑄造材の HIP 処理による機械的特性の改善は、温度だけによるものでなく、加圧効果による欠陥の除去が大きく影響することが認められる。

図4 AC7A 合金の機械的性質に及ぼす組織、HIP 処理の影響。

Al 合金鋳物の HIP 処理研究は前述のように 1960 年代に Alcoa 社によって行われ、HIP による鋳造欠陥除去の最初の対象となったにもかかわらず、実用化がほとんど行われていない。これは、主として経済的な理由によるものと考えられるが、表 2、図 4 に示すように HIP 処理は疲労寿命をはじめとして機械的特性に対して顕著な効果を発揮するため、今後 Al 合金鋳物に要求される規格が強化され、また HIP プロセスのコスト低減の努力がなされれば、実用化が進んでいくものと考えられる。

(ii) Mg 合金

Mg 合金鋳物に存在するポアーは Al 系、Fe 系、その他の材料と異なり、表面に開口して、その発生原因としては以下の諸項が指摘されている。(a) 溶解時の H_2 吸収量が大いいため、凝固時にポロシティを形成しやすい。(b) 密度が低いため押湯効果が小さく、凝固収縮によるマイクロ・ポロシティを生じやすい。(c) 熱容量が小さいので温度が下りやすく、凝固収縮時に流動性が低下してマイクロ・ポロシティを生じやすい、などである。このように、Mg 合金は健全な鋳造品を製造するのがむずかしく、かつ Al 合金よりも高価であるため、HIP 処理の対象としては有望である。機械的特性に及ぼす HIP 処理の一例を表 3⁽¹³⁾ に示すが、HIP 処理によって引張特性が向上していることが認められる。なお、この合金を処理する場合には、欠陥が表面連通孔であるため、表面のシール法が主要課題となる。

表 3 Mg 合金 (AZ90) の機械的性質。

状 態	引張強さ (MPa)	耐 力 (MPa)	伸 び (%)
鋳 造	228	152	3
鋳造+HIP	269	179	4.5

(HIP : 643 K, 80 MPa)

(iii) Ni 基耐熱超合金

この合金は航空機産業のなかでも、とくにガスタービン用材料として多量に使用されている。そして、最も苛酷な高温かつ高応力の条件下で作動するタービン・エンジンの動翼は精密鋳造で作られるのが一般的である。

最近のエネルギー危機によって航空機用燃料の価格も大きな影響を受け、低燃費で効率の良いエンジンの開発が以前にも増して急がれている。このためには、タービンの入口ガス温度を高くする必要があり、その値は年々上昇する傾向にある。これに対処するために、動翼は益々複雑な内部冷却孔をもつ形状に変わりつつあり、材質面でも Ti, Al 含有量を高めたり、耐酸化性を増すために大量の Hf を添加するようになってきている。このため鋳

造性が著しく損われ、マイクロ・ポロシティなどの欠陥のない製品を作ることが極めて困難になってきている。また、検査技術面でも、複雑な冷却孔を有する動翼は次第に薄肉化されているため、この部分に存在する微小ポロシティを現状の非破壊検査技術では検出することが困難になってきている。このような面からも、ポロシティなどのない鋳造品の製造が望まれ、特性の向上とともに、信頼性の面でも近年 HIP 処理が積極的に取り入れられるようになってきた。

HIP 処理効果を示す一例として、図 5 に精密鋳造で作った IN713C 合金 (12.5Cr-4.2Mo-2Nb-0.8Ti-6.1Al-0.012B-0.1Zr-残り Ni) の動翼のルート部断面の浸透探傷検査写真を示す。HIP 処理前に存在していたマイクロ・ポロシティは、1473 K-100 MPa-3.6 ks の HIP 処理によって完全に消滅したことがわかる。表 4⁽⁸⁾ には、主として航空機用エンジン材料として用いられている各種 Ni 基耐熱超合金のクリープ破断特性に及ぼす HIP の効果を示す。HIP 処理によって、破断寿命、伸び、絞りが向上している。

ところで、このような航空機用材料だけでなく、最近では陸上で使われる産業用のガスタービン材料に対しても HIP 処理が行われ、品質の向上と信頼性の改善がなされるようになってきた⁽¹⁴⁾。一例として、工業技術院のムーンライト計画の 1 プロジェクトである「高効率ガスタービン」(発電用)において開発中の HIP 処理について述べる。新しく開発された TM185 合金†(5Cr-8Co-

図 5 ガスタービン動翼ルート部の浸透探傷写真。
(a) HIP 処理前, (b) HIP 処理後。

† 科学技術庁金属材料技術研究所の開発合金。

表 4 Ni 基超合金のクリープ破断特性.

合 金	状 態	試 験 条 件		寿 命 (ks)	伸 び (%)	絞 り (%)
		温 度 (K)	応力 (MPa)			
IN 738	鑄造 鑄造+HIP	1253	152	68.4	11.8	20.0
		1253	152	189.0	20.5	20.6
René 77	鑄造 鑄造+HIP	1253	152	183.6	19.4	37.0
		1253	152	244.8	22.0	55.0
IN 792	鑄造 鑄造+HIP	1143	310	630.0	9.2	6.5
		1143	310	1018.8	12.1	22.0
René 80	鑄造 鑄造+HIP	1143	310	149.4	2.5	2.5
		1143	310	507.6	11.5	17.0

図 6 TM 185 合金のマイクロ組織.

- (a) 鑄造 (マイクロ・ポロシティの存在).
 (b) HIP 処理.

13W-3.5Ti-4.5Al-3Ta-1Hf-0.01B-残り Ni) のマイクロ組織を図 6 に示す. 鑄造状態ではマイクロ・ポロシティが認められるが, 1523 K-100 MPa-3.6 ks の条件で HIP 処理するとポロシティは完全に消滅する. 最適 HIP 処理温度は, 一般にその合金の融点あるいは析出物の固溶温度などを目安に, それらの温度よりいく分低い温度が選択されるが, 少なくとも組織的に重大な弊害を及ぼさないで, かつその合金の強度は十分に低下し, ポロシティが変形しやすい温度でなければならない. しかし, 最近の新合金は, コンピュータによる合金設計手法の進歩も手伝って, その高温強度は融点直下までなか

図 7 TM 185 合金の引張り試験結果.

なか低下しないものも出現しており, 最適 HIP 温度は極めて狭い範囲内に存在し, HIP 処理時の温度コントロールにはとくに注意しなければならない. TM185 合金の高温引張特性を図 7, クリープ破断特性を図 8, 高温疲労特性を表 5 に示す. 図 7 より, 伸び, 絞りにはばらつきがあるものの引張強さ, 耐力はともに HIP 温度が高くなるにしたがって向上する傾向にある. HIP 処理によりクリープ破断寿命も向上し, とくに伸び, 絞りは 2 倍から数倍向上する. また, 表 5 に示す 1273 K の高温疲労試験の結果, HIP 処理によって寿命は 2 倍以上改善されることが判明した.

このような HIP 処理効果のために, アメリカでは Ni 基超合金に対しては実用化が積極的に進められており, たとえば General Electric 社の CF6-6 エンジン用 René 80 製のタービン・ブレードをはじめとして, F101 エンジン, Pratt and Whitney Aircraft 社の F100 エンジン, そして Avco Lycoming 社の LTS101 エンジンな

図8 TM185合金のクリープ破断特性に及ぼすHIP温度の影響(熱処理はなし)。

表5 TM 185合金の高温疲労試験結果(1273 K, $\dot{\epsilon}=0.1\%/s$)。

材 料 の 状 態	全歪幅 $\Delta\epsilon_t(\%)$	塑性歪範囲 $\Delta\epsilon_p(\%)$	$N_f/2$ の応力範囲 $\Delta\sigma$ (MPa)	疲 勞 寿 命 N_f (サイクル)	破断位置
鑄 造	0.507	0.088	716	191	A
鑄造+熱処理	0.507	0.090	736	189	A
鑄造+HIP	0.507	0.104	768	460	A
鑄造+HIP+熱処理	0.507	0.096	810	237	A

熱処理：図7と同じ HIP：1473 K-100 MPa-3.6 ks

どの部品に HIP 処理製品が用いられている。しかし、いっぽうでは HIP 処理効果の認められない Ni 基合金もあり⁽¹⁴⁾、また TRW 社(アメリカ)では、むしろ合金によっては HIP 処理が高温、長時間にわたるため、それによって組織が損われ、熱処理によっても回復しないこともあるなどの理由を挙げて批判的な場合もある⁽¹⁵⁾。これらの点に関して、1つには HIP の緻密化の機構が極めて複雑であり、これに関する報告もいまだ少なく、緻密化の定量化については今後の研究に待たねばならない点があげられる。

(iv) Ti 合金

HIP 処理の Ti 合金 鑄物への応用研究は、1970 年に Battelle 研究所で開始されたのが最初である。現在では Pratt and Whitney Aircraft 社の F100 エンジン用 Ti-6Al-4V 製品などに適用されており、前述の Ni 基合金とともに実用化されているものの1つである。Ti 合金 鑄物に対する HIP 処理の一例を図9†に示す。HIP なしの場合、 10^7 サイクル時の平均応力は 400 MPa であるが、HIP 処理によって 500 MPa に向上している。とくに注目すべき点は、 -2σ の値が HIP なしでは 320 MPa であるのに、HIP 材は 500 MPa であり、このように HIP 材の直線が横軸に平行であることは、HIP した Ti-6Al-4V 鑄造品の信頼性が高いことを示している。

† Howmet 社カタログ「Titanium Castings」より。

以上のほかに HIP 処理によって効果が認められている合金 鑄物としては、Cu 合金⁽¹⁶⁾、Co 合金⁽¹⁷⁾、17-4PH ステンレス鋼⁽¹⁸⁾、マルエージング鋼⁽¹⁹⁾、センダスト合金(Fe-Al-Si 系)⁽²⁰⁾などがある。

(3) 組織の改善

西山ら⁽²¹⁾は、HIP 処理中における均質化の影響を Ni 基耐熱超合金 Mar-M246Hf 合金(9Cr-10Co-2.5Mo-10W-1.5Ti-5.5Al-1.5Ta-0.015B-1Hf-残り Ni)について調べたところ、HIP 処理によりシグマ層の発生を防止、あるいは発生を遅らせ得ることを

図9 Ti-6Al-4V 鑄造品の高サイクル疲労強度に及ぼすHIP処理の影響。

確認し、将来通常の製法では有害な TCP 相^{††}が発生するような化学成分を有する合金により 鑄物を製作することの可能性を示唆している。また、Battelle 研究所においても原子炉用のステンレス鋼 鑄物を HIP 処理したところ、マトリックスへの残留フェライトの溶体化が通常の熱処理よりも促進したと報告している⁽⁷⁾。

HIP のように高温高压下で処理をすると、普通の熱処理に比べてその材料の組織が改善しやすいという理由は、現在のところ明確にはわかっていない。しかし、たとえば Hanes⁽⁷⁾はつぎのような可能性が HIP 処理時に起りうると報告している。つまり、ある材料においては

†† TCP(Topologically Close Packed) 相。Ni 基合金では、 σ , μ , Laves などの金属間化合物に相当し、靱性あるいはラプチャー強度を低下させる。

析出物とその周りのマトリックスの拡散係数が異なるために、大気圧下の通常の熱処理では溶体化時にマイクロ・ポロシティが発生する場合がある。しかし、加圧下ではこのようなカーケンダル・ボイドの生成が防止できるため、良好な組織がえられる。

(4) 溶接性の向上

良く知られているように、ポーラスな材料を溶接するのは非常に困難で、場合によっては溶接ができない。このような場合も、HIP 処理は非常に有効であり、一例として General Electric 社の結果⁽²²⁾をつぎに示す。Ni 基超合金 Inconel 718 合金 (18.5Cr-3Mo-5.1Nb-0.9Ti-0.5Al-18.5Fe-残り Ni) 製の大型エンジン・リングは個々の精密鍛造部品を TIG で溶接して組み立てられているが、極端な場合には TIG 溶接のビード 122.5 mm (5 in) 当り 15 から 30 のクラックが発生する。いっぽう、HIP 処理した場合には溶接後クラックの発生はまったく認められない。そして、圧力と熱処理の効果を分離するために、HIP 処理と同じ熱履歴 (1473 K-14.4 ks) を真空炉中で鍛造品に与えたところ、やはり 122.5 mm (5 in) のビード当り約 15 のクラックが発生し、この熱処理材の組織は均質化されていたが、まだかなりのポロシティが残っている。このことから、均質化のための熱処理はクラック感受性の低減には寄与しないことが示され、圧力によってポロシティが除去されたために溶接性が向上することが確認されている。

ところで、溶接によって生じた溶融部分は一般にデンドライト組織を示し、一種の鋳物と考えることができるため、やはり HIP によって品質を改良することができる。最近のエネルギー転換システム、たとえば原子炉、石炭液化プラント、あるいは電磁流体 (MHD) 発電などの装置においては、そのシステムの信頼性と安全性を向上させるためには、溶接箇所の欠陥はできるだけ少なくせねばならない。そのために、種々の方法がとられているが、その 1 つとして最近 HIP 処理が提案されており、一例としてこれらの装置に最も多量に用いられている 304 ステンレス鋼の場合について述べる⁽²³⁾。ステンレス鋼の溶接部を HIP 処理すると、生成していたボイドが消滅し、また大半のデルタ・フェライトがオーステナイトに変態して組織が均一となり、平均フェライト数が 12.3 から 1.7 と少なくなり、延性が向上する。もっとも同じ温度でも熱処理だけでは平均フェライト数は 11.1 と、溶接ままとあまり変わらないという結果が得られている。溶接材の破壊箇所は、一般に熱影響部 (HAZ) あるいは溶融部であり、この箇所での衝撃試験結果を図 10 に示す。HIP 処理は溶接部の衝撃エネルギーを増加させるが、これは HIP 処理による平均フェライト数の減少に起因していると考えられる。

図 10 304 ステンレス溶接部の衝撃試験結果。
(衝撃試験：落重方式、V-ノッチ付き)
(HIP : 1343K -105 MPa-7.2 ks)

(5) その他の特性の向上

HIP 処理をすると Inconel 718Ni 基合金鋳物の切削加工特性が向上するという報告があり⁽⁷⁾、また化学的研磨 (Chemical Milling) 特性についても、Inconel 718 合金、Ti-6Al-4V 合金、あるいは 17-4PH ステンレス鋼などに対して HIP 処理効果が認められている⁽²²⁾。つまり、化学的研磨の場合、鋳物のポロシティあるいは不均一な組織は均一な金属の除去加工の大きな弊害となるが、HIP 処理によってこのような要因が取り除かれて、研磨特性が大きく改善するものと思われる。

さらに、HIP 処理によって X 線および超音波による非破壊検査特性も向上し、一例として超音波検査特性を図 11⁽²³⁾ に示す。304 ステンレス鋼をベースメタルとし、308 タイプのフィラーメタルを用いて TIG 溶接した場合、1313 K あるいは 1368 K の HIP 処理によって、超

図 11 溶接部の超音波検査特性に及ぼす HIP 処理の影響。

音波の伝達が溶融部分では47%増加し、逆にベースメタルでは37%低減し、全体として振幅変動は25%から30%と小さくなり、微小欠陥に対する検査特性が向上する。

4. 結 言

金属の加圧処理による品質の改良の1つの例として、最近実用化が進んでいる鑄造品に対するHIP処理を採りあげて概要を述べた。HIPは次第に精密鑄造業界にも受け入れられつつあり、最近では不良品のサルベージ技術というよりも、むしろHIPを導入することによって鑄造プロセスのデザインを改良する方向での検討が開始されている。HIP処理によって鍛造材に近い機械的特性も得られており、近い将来、低価格で最終形状製品を製造するために鍛造/機械加工から、鑄造/HIPプロセスに置換わる可能性もある。

文 献

- (1) P.W.Bridgman : *Studies in large plastic flow and fracture*, McGraw Hill, New York, (1952).
- (2) S.A.Kulin, M.Cohen and B.L.Averbach : *J. Metals*, **4** (1952), 661.
- (3) E.S.Hodge : *Metals Eng.Quart.*, **1** (1961), 3.
- (4) F. Zimmerman : *Proc.1st Int. Conf. Isostatic Pressing*, (1978), 19.
- (5) 河合伸泰, 滝川 博 : 塑性と加工, **20** (1979), 971.
- (6) H.D.Hanes and R.M.Rex : *SAE Tech. Paper Series No.800311*, (1980), 1.
- (7) H.D.Hanes : *Proc. 12th Natl. SAMPE Tech. Conf.*, Oct., (1980), 1074.
- (8) G.E.Wasielewski and N.R.Lindblad : *Proc. 2nd Int. Conf. Superalloys*, (1972), D-1.
- (9) *Turbomachinery Int.*, Nov.-Dec., (1977), 8.
- (10) J.C.Bittence : *Materials Eng.*, Oct., (1978), 54.
- (11) R.Widmer : *Proc.1st Int.Conf.Isostatic Pressing*, (1978), 30.
- (12) 原田雅行, 鈴木敏夫, 福井 泉 : 鑄物に投稿中.
- (13) E.S.Hodge : *Proc. 22nd Natl. SAMPE Symp.*, (1977), 146.
- (14) 河合久孝, 辻 一郎 : 日本学術振興会, 耐熱金属材料第123委員会, **23** (1982), 215.
- (15) 西山幸夫 : 日本ガスタービン学会誌, **9** (1981), 33.
- (16) D.A.Seifert and H.D.Hanes : *AFS Trans.*, (1976), 571.
- (17) R.Hollander and J.Wulff : *Eng. Medicine*, **3** (1974), 8.
- (18) R.M.Conaway : *Precision Metal*, Apr., (1977), 39.
- (19) W.R.Freeman Jr. : *Metal Progr.*, Aug., (1977), 33.
- (20) 公開特許公報, 昭53-47320.
- (21) 西山幸夫, 上村隆夫, 永井修造, 森川美広 : 日本金属学会講演概要, (1978・10月), 305.
- (22) P.G.Bailey and W.H.Schweikert : *Proc.3rd Int. Symp. Superalloys*, Sept., (1976), 451.
- (23) R.K.Malik : *Metal Prog.*, Mar., (1981), 86.

<新刊案内>

ザイマン 乱れの物理学

米澤富美子 渡部三雄 訳

本書は、固体論、物性論の分野の仕事で著名な英国の物理学者、J.M.Ziman 教授の *Models of Disorder* の訳書である。標題にある“乱れ”という言葉の意味は、本書の第1章の冒頭で説明されているのでそれを引用することにしよう。

“乱れ”とは、単なる混沌ではない。欠陥をもった不完全な秩序のことである。乱れた状態について考えるには、まず秩序の理想像が頭の中に描けていなければならない。この秩序がこわれたものが乱れであるといえる。……

さて、従来の固体物理学はほとんど単結晶だけを対象にしてきたが、現実には存在する物質は鋼やガラス、土や水など“乱れた”状態にあるものが大部分であり、学問的興味の対象も液体の分子構造、アモルファス金属・半導体、ガラス状態、乱れた合金などへと広がってきている。完全結晶の物理の場合にはブロッホの定理という数学的な統一原理があるが、乱れた系の物理についてはこれに匹敵する統一原理は見出されていない。しかし、一見異なった物理的問題に対してまったく同じ手法が使われる場合もしばしばある。だから、従来発表されている関連の仕事を広く批判的に概観してみよう、物理の対象となる現象が、種々の簡単な理論的モデル系を特徴づけている諸性質からどのよ

うに導かれるかを示してみよう……という狙いで本書が書かれた。各章の表題は以下の通りである。

- 1.セル型の乱れ, 2.トポロジー型の乱れ,
- 3.連続体の乱れ, 4.乱れの観測,
- 5.置き換え型乱れの統計力学,
- 6.トポロジー型乱れの熱力学,
- 7.巨大分子の乱れ, 8.乱れた一次元系での励起,
- 9.乱れた格子上的励起, 10.乱れた金属中の電子,
- 11.トポロジー的に乱れたネットワークの励起,
- 12.希薄磁性体とアモルファス磁性体
- 13.“気体”の中の電子

対象とする読者は“適当な教育を受けた理論物理屋”で、“量子力学, 統計力学, 確率論……などの基本定理や基礎原理については、いちいち説明したり文献をあげたりせずに引用”してあるし、“畢竟、乱れた系の理論は初等的な学問分野ではなくて、かなりの予備知識なしには入門できないものなのである”というのがZiman 先生の御託宣であるから、本書を読むには相当の覚悟が必要である。

拾い読みしたかぎりでは、訳文はこなれた日本語になっており、まず合格点をつけてもよからう。

(M.K.)

〔A5判 558頁 1982年 5,800円 丸善(株)〕