

コンピュータシミュレーション解析を利用した 難燃性マグネシウム合金の砂型鑄造への適用に関する研究

園田正樹*・高橋芳朗*・吉松研一**・瀬戸一郎**

*機械・金属担当・**木本機器工業株式会社

Study of Sand Mold Casting of Non-combustible Magnesium Alloy Analyzed by Computer Simulation

Masaki SONODA*・Yoshiro TAKAHASHI*・Kenichi YOSHIMATSU**・Ichiro SETO**

*Mechanical and Metallurgical Engineering Gr.・**Kimotokikikougyo Corp.

要 旨

我々は、平成 17 年度より実施している地域新生コンソーシアム研究開発事業「難燃性マグネシウム合金の高機能組織制御と鉄道車両用部材の開発」の分担課題である「凝固シミュレーション解析を援用した鑄造部材の低コスト製造技術」の中で、難燃性マグネシウム合金の鑄造技術を確立し、コンピュータ解析を利用した鑄造試作工数の低減による低コスト化を進め、鉄道車両用部材への事業展開を図ることを目的として研究を推進した。昨年度は、砂型鑄造試験片を用いたコンピュータ解析とその実証試験を行うことにより、鑄造特性の把握とコンピュータ解析の有効性を検討した。今年度は、コンピュータ解析の精度向上を図るとともに、難燃性マグネシウム合金砂型鑄造材の機械的性質等の確認を行なった。また、鉄道車両用部材をコンピュータ解析に基づき試作し、実体強度試験等により評価した。

1. はじめに

難燃性マグネシウム合金は、従来のマグネシウム合金にカルシウムを約 2mass%添加した合金であり、(社)日本鉄道車両機械技術協会から鉄道車両用材料として不燃材の認定を受けた唯一のマグネシウム合金である。同合金は、エネルギー効率の観点から、大幅な重量削減が課題とされている次期新幹線の内装部材としての利用が期待されている。

難燃性マグネシウム合金は、大気中でもシールドガスを使用せずに溶解が可能であり、燃えにくいという点で扱いやすい材料であるが、使用実績が少ないことによる信頼性不足とコスト高、従来のマグネシウム合金と比較して機械的強度が低いという課題があり、まだ広くは利用されていない。

そこで、難燃性マグネシウム合金の鉄道車両用部材への事業展開を図るため、(独)産業技術総合研究所や九州大学が中核となり、九州内の公設試や九州・関西の企業がコンソーシアムを形成し、機械的強度の向上と溶解・鑄造、塑性加工、溶接、疲労強度評価等の総合的な生産技術の確立による大幅なコストダウンを目指している。

本プロジェクトにおいて、当センターは地場企業である木本機器工業(株)と連携し、難燃性マグネシウム合金の鑄造技術を確立し、コンピュータ解析を利用した試作工数の低減による低コスト化を進め、鉄道車両用部材への事業展開を図ることを目的として研究を推進した。

本研究では、鑄造用難燃性マグネシウム合金 (AZX912:

Mg-9mass%Al-1mass%Zn-2mass%Ca) の砂型鑄造試験片を用いたコンピュータ解析の精度向上を図り、AZX912 合金砂型鑄造材の機械的性質等の確認を行なった。また、鉄道車両用部材をコンピュータ解析に基づき試作し、実体強度試験等により評価した。

2. 実験方法

2.1 コンピュータ解析の精度向上

昨年度の研究において、コンピュータ解析の実証試験を砂型鑄造試験片で行ない、溶湯の鑄型内の充填は背圧(鑄型内部の溶湯を押し返そうとするガス圧)に大きく影響されることが確認された。したがって、解析精度を向上させるには、鑄型内の背圧の考慮が不可欠となる。

そこで本研究では、背圧を考慮したコンピュータ解析とその実証試験を砂型鑄造試験片で行った。

Fig.1 に実験に用いた階段型鑄造試験片の鑄造方案と形状を示す。ただし、コンピュータ解析には、クオリカ(株)製湯流れ・凝固解析システム(JSCAST2004i)を用いた。

また、Fig.1 の鑄造方案に対して、ベント(ガス抜き孔)の設置位置や断面積を検討し、ベントの有無による鑄型内部に発生する背圧を計算及び比較した。Table 1 にベント設置条件を、Fig.2 にベント設置位置を示す。

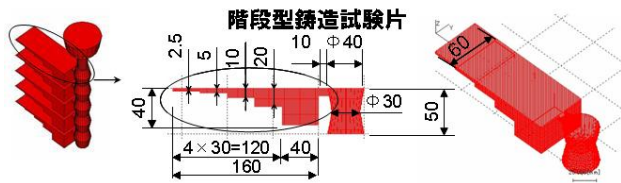


Fig.1 階段型鑄造試験片の鑄造方案と形状

Table 1 ベント設置条件

ベント設置条件	ベント設置数
A	各段とも 0ヶ所
B	各段とも 4ヶ所

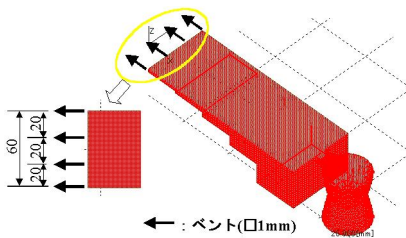


Fig.2 ベント設置位置(設置条件 B)

2.2 砂型鑄造材の材料特性評価

AZX912 合金砂型鑄造材の機械的性質、金属組織等を評価するため、砂型鑄造試験片を作製した。ただし、試験片は、高周波誘導電気炉及び減圧処理装置を用いて、AZX912 合金を大気中で溶解するとともに、約 0.01MPa の減圧下で 2 分間保持し、介在物を除去して溶湯を清浄化した後、953K または 993K まで溶湯を加熱し、さらに 10 分間保持して鑄型内に鑄造し作製している。

Fig.3 に引張型鑄造試験片の鑄造方案と形状を示す。本試験片では、主に機械的性質(引張強度、伸び、硬さ)、金属組織に及ぼす溶湯温度と熱処理(T4 処理:683K、20 時間、水冷)の影響について調査した。また、前項の Fig.1 に示した階段型鑄造試験片では、結晶粒径、硬さに及ぼす肉厚の影響について調査した。

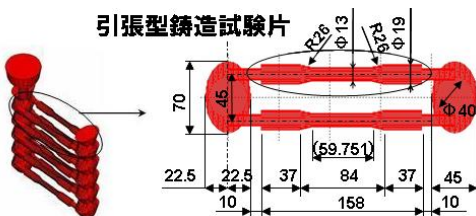


Fig.3 引張型鑄造試験片の鑄造方案と形状

2.3 車両部材の試作

Fig.4 に鉄道車両内部の概略図を示す。本研究では、鑄造法を用いた試作部材として荷棚受け、腰掛けの台枠中央

支えと肘掛けの 3 点に絞って設計を行った。特に、荷棚受けの設計は、先端部における耐集中荷重が仕様として求められるため、サイバネットシステム(株)製 ANSYS5.6 を用いた応力解析を行い、その結果を反映させた。

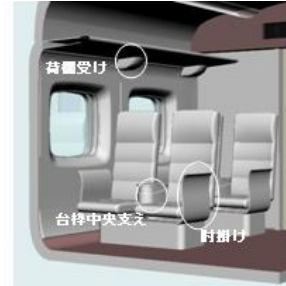


Fig.4 鉄道車両内部の概略図

一方、試作部材の鑄造方案は、湯回り不良、凝固収縮等による鑄造欠陥を抑制し、試作工数や試作時間の低減による低コスト化を図るため、これまでの研究結果をもとに湯流れ・凝固解析を援用して検討した。

なお、応力解析と湯流れ・凝固解析を行うために必要な試作部材とその鑄造方案の 3 次元モデルの作成は、木本機器工業(株)に設置したアンドール(株)製 3 次元 CAD ソフト (DESIGN FLOW) を用いた。CAE 解析結果と CAD による設計の両者をすり合わせることによって、試作部材とその鑄造方案を決定した。

決定した鑄造方案をもとに、鑄型となる砂型の造型に必要な金型と木型を作製し、各鑄型を造型後、所定量の AZX912 合金を溶解及び鑄造することで試作部材を得た。得られた試作部材は、湯口や湯道の切断、バリ取りをした後、アルゴンガス雰囲気中で T4 処理を行うとともに、X 線 CT による非破壊検査を行い、湯流れ・凝固解析結果と比較した。

さらに、荷棚受けについては、実際の使用を想定して先端部へ集中荷重を負荷した実体強度試験を行い、Table 2 に示す項目について測定するとともに、応力解析結果と比較した。

Table 2 測定項目と実体強度試験方法

測定項目	実体強度試験方法
破壊荷重	荷棚受け先端部へ集中荷重を負荷し、荷棚受けが破壊した時の荷重を測定する。

3. 実験結果及び考察

3.1 コンピュータ解析の精度向上

Fig.5 に各ベント設置条件における鑄型内最薄肉部の背圧変化を示す。本結果から、ベントの設置により、背圧が低下することが分かる。しかし、全ての鑄型内で背圧は無くなら

ず、背圧が残っている部分もあり、実際の铸造時には湯回り不良を引き起こす可能性が高いと予想される。

また、Fig.6 にベント設置条件 B における実証試験後の階段型铸造試験片を示す。本結果から、溶湯が最薄肉部に一部充填していないことが分かる。これは、ベントの排気能力が十分でなかったためと考えられる。階段型铸造試験片の長さ(160mm)に比べ、試作部材の寸法は荷棚受けの例で約500mm と長大なため、更に排気能力を向上させなければ、背圧により溶湯が铸型内に完全には充填しないと予想される。したがって、試作部材の铸造方案には、ベントの役目を兼ねた開放押湯を用いることとした。

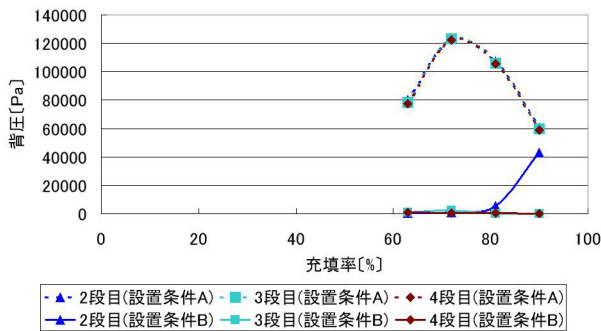


Fig.5 铸型内最薄肉部の背圧変化



Fig.6 実証試験後の階段型铸造試験片 (設置条件 B)

3.2 砂型铸造材の材料特性評価

Fig.7 と Fig.8 に铸造試験片の引張強度と伸びを示す。本結果から、T4 処理による引張強度の向上が見られる。また、伸びについては、T4 処理による伸びの増減は 1%程度であり、大幅な変化は見られない。

また、Fig.9 に铸造試験片のブリネル硬さを示す。本結果から、T4 処理によりブリネル硬さのわずかな低下が見られる。これは、金属組織において平衡状態で晶出した金属間化合物が T4 処理で一部溶体化されることに起因すると予想される。

Fig.10 に結晶粒径と肉厚との関係を、Fig.11 にロックウェル硬さと肉厚との関係を示す。ただし、本試験に用いた階段型铸造試験片の铸造温度は 953K である。本結果から、結晶粒径は肉厚が増すにしたがって大きくなり、ロックウェル硬さは肉厚が増すにしたがって小さくなる傾向が見られる。したがって、結晶粒径とロックウェル硬さとの関係は反比例にあ

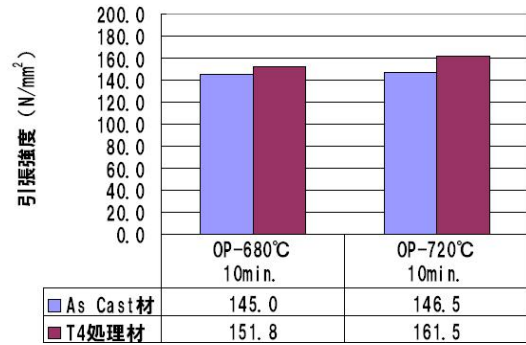


Fig.7 铸造試験片の引張強度

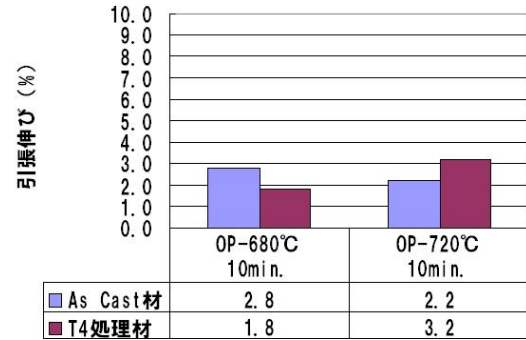


Fig.8 铸造試験片の伸び

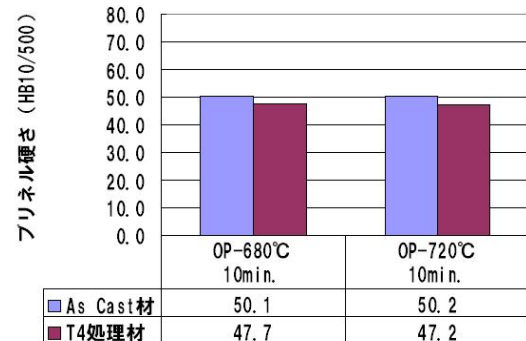


Fig.9 铸造試験片のブリネル硬さ

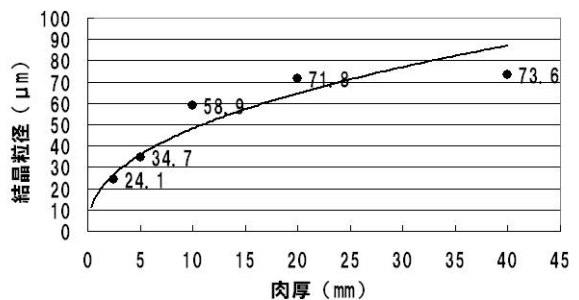


Fig.10 結晶粒径と肉厚との関係

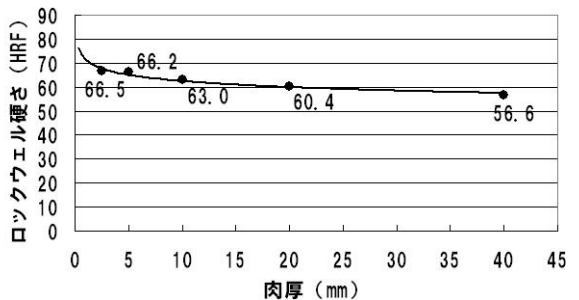


Fig.11 ロックウェル硬さと肉厚との関係

り、以下に示す Hall-Petch の関係が成り立つ¹⁾。

$$\sigma_y = \sigma_0 + kd^{1/2} \dots (1)$$

ただし、 σ_y は降伏応力、 σ_0 は単結晶の平均降伏応力、 k は定数、 d は結晶粒径とする。

一般的に、引張強度と硬さは比例関係にあることから、結晶粒径を微細化することで引張強度の向上が期待できる。また、薄肉鋳造部材では結晶粒径が微細であるため、引張型鋳造試験片で得られた引張強度よりも強くなることが予想される。

3.3 車両部材の試作

3.3.1 試作品の設計

荷棚受けの設計は、初期モデルをベースに応力解析による検討を進め、鋳造性や軽量化にも配慮した最終モデルを提案及び決定した。

Fig.12 に荷棚受け最終モデルの応力解析結果を示す。ただし、本解析は、車体取付け板を全面拘束し、先端部に 3.43kN の荷重を負荷した条件(ヤング率:45GPa, ポアソン比:0.35, 要素タイプ:SOLID92, 要素数:37,940 個)で計算している。本結果から、R 部の応力集中は 159N/mm² となっている。したがって、AZX912 合金の T4 処理材の引張強度が 162N/mm² であることから、本モデルは 3.43kN の先端荷重に耐える可能性があると考えられる。

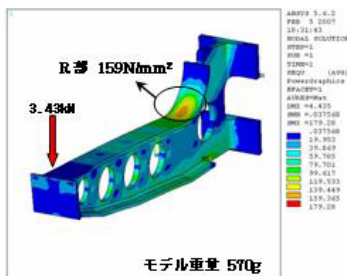


Fig.12 荷棚受け最終モデルの応力解析結果

Fig.13 に腰掛けの台枠中央支えと肘掛けの 3 次元モデルを示す。

台枠中央支えは、腰掛けを構成する部品の一つで、腰掛けの中央に位置してフレーム等と組み合わせて使用される。したがって、腰掛け全体の設計に応じた検討が必要であり、鋳造性も考慮したモデル設計を行った。

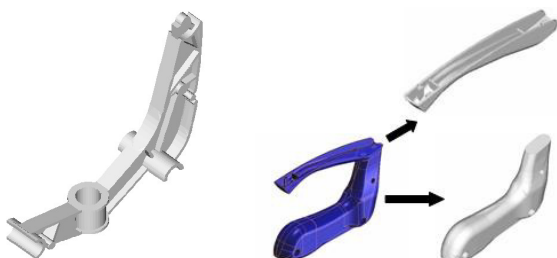


Fig.13 3次元モデル(左:台枠中央支え, 右:肘掛け)

また、肘掛けも、腰掛けを構成する部品の一つで、腰掛けの両側面に取り付けられる。今回の試作では上下 2 分割とし、それぞれについて鋳造性も考慮したモデル設計を行った。

3.3.2 試作品の鋳造方案の設計

検討した試作品の鋳造方案に対し、鋳型内へ溶湯が充填する過程を確認するため、鋳型内を移動する溶湯の温度変化をコンピュータ解析により算出した。ただし、溶湯の流動可能温度は、液相線温度近傍の 863K とし、鋳型内の試作品本体部分へ溶湯が充填した時に、863K 以上であることを充填完了の判断基準とした。

Fig.14 に荷棚受けにおける鋳型内の溶湯充填完了時の温度分布(1003K で鋳造)を示す。本結果から、検討した鋳造方案は流動可能温度の範囲内で、短時間に鋳型内の荷棚受け本体部分へ溶湯が充填することが分かった。

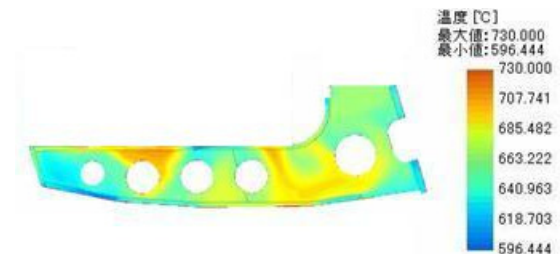


Fig.14 鋳型内の溶湯充填完了時の温度分布(荷棚受け)

また、試作品内部に発生する引け巣(溶湯の凝固収縮時に溶湯が周囲から補充されず発生する空隙)を減らすため、コンピュータ解析により引け巣発生位置を予測した。ただし、引け巣発生位置は、凝固過程における隣接要素との温度差が 0.5K/cm 以下の要素から予測した。

Fig.15 に荷棚受けの引け巣発生予測位置を示す。本結果から、荷棚受け内部にわずかに引け巣が発生していることが分かる。その他の試作品(台枠中央支え, 肘掛け上, 肘掛け下)も同様に確認し、引け巣の発生を抑制するため、押湯を増設及び拡張する等の鋳造方案の修正を行い、実際に鋳造試作を行った。

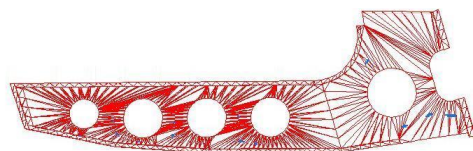


Fig.15 荷棚受けの引け巣発生予測位置(青色表示)

3.3.3 鋳造試作

Fig.16~Fig.19 に完成した試作品を示す。いずれの試作品も外観上は欠陥もなく、良好な結果が得られた。



Fig.16 荷棚受け



Fig.17 台枠中央支え



Fig.18 肘掛け上



Fig.19 肘掛け下

3.3.4 荷棚受けの非破壊試験

前述したコンピュータ解析による引け巣発生位置の予測結果を検証するため、荷棚受けの X 線 CT による非破壊検査を行った。

Fig.20 にコンピュータ解析による引け巣発生位置の予測結果と 3 次元 CT 像を示す。本結果から、コンピュータ解析により予測された引け巣発生位置と同位置に空隙が存在していることが、3 次元 CT 像から確認された。したがって、コンピュータ解析による引け巣発生位置の予測は、難燃性マグネシウム合金の砂型鋳造に有効であることが分かった。

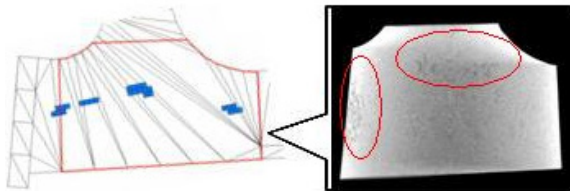


Fig.20 引け巣発生位置の予測結果と 3 次元 CT 像

3.3.5 荷棚受けの実体強度試験

Table 3 に実体強度試験の結果を、Fig.21 に実体強度試験後の破壊部を示す。本結果から、破壊荷重は 3.05 ~ 3.25kN ということで、設計時に目標とした 3.43kN には到達しないことが分かった。しかし、破壊箇所を見ると、上部車体取付け板周辺となっており、上部取付ボルトの塑性変形や破壊も見られ、設計時に予想された破壊箇所と異なる結果となった。これは応力解析をする際に、車体取付け板を全面拘束して計算したこと起因しており、今回の結果は取付ボルトの塑性変形や破壊が大きく影響していると考えられる。そこで、取付ボルトの影響を考慮するため、車体取付け板を部分拘束することで再解析を試みた。

Table 3 実体強度試験の結果

試作品 No.	破壊荷重(kN)
荷棚受 22	3.05 ^{※1}
荷棚受 23	3.25
荷棚受 24	3.10

※1 本体が破壊する前に取付ボルトが破壊

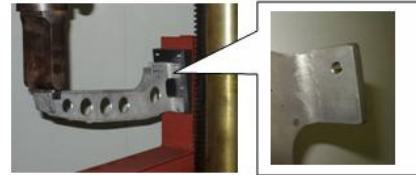


Fig.21 実体強度試験後の破壊部

Fig.22 に荷棚受け最終モデルの再応力解析結果を示す。ただし、本解析は、車体取付け板を部分拘束し、先端部に 3.43kN の荷重を負荷した条件で同様に計算している。また今回は取付ボルトの変形は考慮していないことを付記する。本結果から、車体取付け板の応力は 145N/mm^2 であり、R 部 (166N/mm^2) よりも低くなっている。しかし、実際には車体取付け板周辺で破壊しており、取付ボルトの塑性変形や破壊も見られたため、この取付ボルトの塑性変形が応力集中へ影響を与え、破壊に至ったと考えられる。したがって、取付ボルトの設計等を変更することで、荷棚受けの破壊強度が 3.43kN に到達する可能性はあると考えられる。

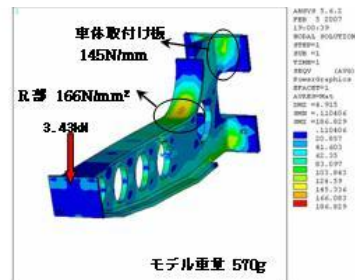


Fig.22 荷棚受け最終モデルの再応力解析結果

以上のことから、境界条件の設定による多少の違いはあるが、応力解析の結果と実体強度試験の結果は類似しており、設計時の応力解析の導入は試作品開発に有効であることが確認された。また、設計の最適化を図ることで、軽量化に配慮しつつ、先端部への 3.0kN 以上の集中荷重に耐える荷棚受けを試作することができた。

4. まとめ

難燃性マグネシウム合金の砂型鋳造技術を用いた試作品開発において、湯流れ、凝固、応力等の CAE 解析を援用し

た設計技術と実際の鑄造試作による現場検証の組み合わせは、ものづくり現場における設計の最適化、開発期間の短縮等を可能とし、非常に有効であることが以下のとおり実証された。

- (1) 難燃性マグネシウム合金の砂型鑄造技術を用い、荷棚受け、台枠中央支え、肘掛けを試作した。
- (2) 荷棚受けは応力解析を用いて設計し、3.0kN 以上の先端荷重に耐えるものを試作し、応力解析の有効性が確認された。
- (3) 試作品の鑄造方案は、湯流れ・凝固解析を用いて設計し、鑄造試作、非破壊試験の結果から湯流れ・凝固解析の有効性が確認された。

謝辞

本研究の遂行にあたり、貴重なご助言を頂きました難燃性マグネシウムプロジェクト研究推進委員会の委員とアドバイザーの皆様にご心より感謝の意を表します。

本研究では物性等の測定に、競輪の補助により設置した精密万能試験機(H7 導入)等を使用しました。

参考文献

- 1) C.R.バレット, W.D.ニックス, A.S.テテルマン共著(岡村弘之, 井形直弘, 堂山昌男共訳):材料科学 2, 培風館, (1980), P.80