

## 鉄鉱石のヤング率, ポアソン比の測定

論文

浅田 実\*・大森 康男\*\*

## Determination of Young's Modulus and Poisson Ratio of Lump Ores

Minoru ASADA and Yasuo OMORI

## Synopsis:

Mechanical properties of iron ores are measured under the compression test.

The results obtained are as follows:

- (1) Young's modulus of iron ores is proportional to the apparent specific gravity respectively. And the Young's modulus of the hematite shows considerably higher than that of the magnetite.
- (2) Young's modulus of iron ores can be expressed as a straight line, independent of the ore brand, when it is indicated against the porosity.
- (3) Poisson ratio of hematite and magnetite is 0.24 and 0.33 respectively.
- (4) There is a remarkable difference of Young's modulus between pellet and iron ore.

## 1. 緒 言

我が国の原料事情は、ほとんどすべてを海外に依存しており、しかも輸入鉱石の性状は、輸入元により常に変動し不安定であるため、成品焼結鉱の炉内における性状を一定ならしめるためには、これら原料の性状と焼結鉱の物理的・化学的性質の関係を正確に把握する必要がある。とくに最近では、焼結原料として使用の鉱石は、FeO(%)の低下、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(%)の増加等悪影響が増大しているため、炉内での還元粉率の増大を防止するため、種々改善策がとられている<sup>1)</sup>。

塊鉱石の強度は、常温強度、熱間もしくは高温強度、さらに低温還元強度、高温還元強度、荷重還元強度など、その環境条件によつて強度特性に相違がある<sup>2)~9)</sup>。現在多用されている焼結鉱は、粉鉱石の高温熔融結合を主体としているが、結合部の主体をなす主要酸化物CaO、SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MgO、FeO等の成分変動や原料の混合状態の良否、また焼結過程での熱履歴の相違、さらには冷却状況などにより、焼結鉱各部ともかなり不均一な組織となる。例えば、焼結原料が未反応のまま残る残留元鉱部の存在、冷却過程でのマグネタイトの再酸化によるヘマタイトの生成、さらにCaOとの反応によるカルシウムフェライトの生成など、局所的に不均一組織が存在する。このような塊成鉱は、常温における物理的・化学的性状が良好な場合でも、高温還元雰囲気下では、強度的にかなり不安定なものとなることが推察され、炉内での還

元強度が必ずしも満足すべきものとはいえないものがある。

現在、還元粉化に関する現象面での研究結果から、その発生源および発生機構等一部については、一致した見解もあるが<sup>10)~15)</sup>、まだ粉化とその原因の定量的な解明には至っていない。したがつて、各種酸化鉄の機械的特性値の測定を行い、実験的に合成した酸化鉄試料について、還元過程における崩壊応力を結晶学的に検討することは、焼結鉱の粉化機構の定量的解明に資するところがきわめて大きいものと考えられる。

本研究は、粉化の原因と考えられる再酸化ヘマタイトの残留応力の解明を目的として、まず、ヘマタイト鉱石の機械的性質、とくにヤング率、ポアソン比および圧潰強度等について一連の測定を行い、以下の知見をえたので報告する。

## 2. 実験装置および方法

## 2.1 実験装置

Fig. 1は実験装置の概要を示す。試料の圧縮は小型圧縮試験機にて行い、歪み測定は東京測器研究所製自動デジタル歪み測定器を使用している。本歪み測定器は、10<sup>-6</sup>ストレインまで測定可能なきわめて高性能の装置であり、試験装置全体の精度を検討するため、機械的特性値既知の軟鋼を使用して試験機の調整を行つている。

昭和56年11月本会講演大会にて発表 昭和57年5月14日受付 (Received May 14, 1982)

\* 富山工業高等専門学校 (Toyama Technical College, 13 Hongo-cho Toyama 930-11)

\*\* 東北大学選鉱製錬研究所 工博 (Research Institute of Mineral Dressing and Metallurgy, Tohoku University)

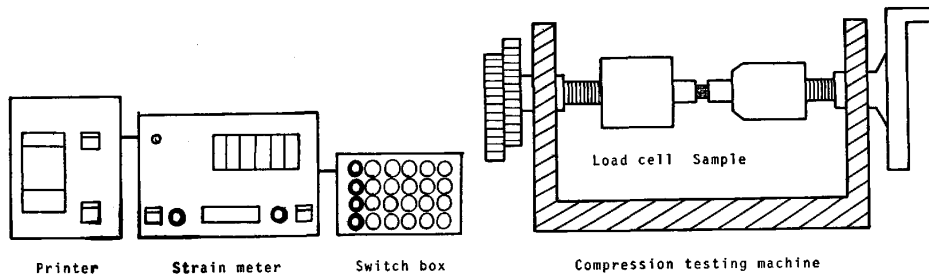


Fig. 1. Experimental apparatus used for the compression test.

Table 1. Chemical Composition of iron ores (%).

Brand	Fe	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	S	CaO	MgO	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
H*-Ore A	64.68	3.30	1.74	0.019	0.04	0.04	0.23	91.93
H*-Ore B	66.64	2.28	1.14	0.002	0.05	0.04	0.10	95.16
Magnetite Pellet	61.94	6.90	1.24	0.066	2.00	1.74	26.73	58.85
	63.25	5.23	1.69	—	0.62	0.80	0.36	89.17

\* Hematite

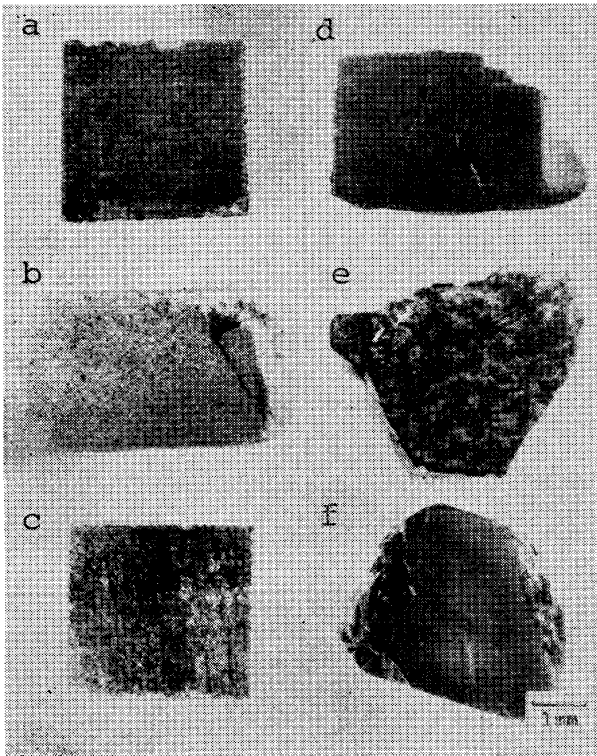
a) Dense b) Porous c) Lamellar d) Internal crack  
e) Gangue f) Limonite

Photo. 1. Appearance of a cross section of iron ore.

## 2.2 実験方法

### (1) 試料

本実験に使用の鉱石は、新日本製鉄(株)大分製鉄所より送付の赤鉄鉱、磁鉄鉱および(株)神戸製鋼所神戸製鉄所より送付のペレットで、化学分析値は、Table 1に一括表示する。

圧縮試験に供試の試料は、まず 10 mm 程度の鉱石粒をエメリー紙にて研磨し、所定の形状に仕上げる。この研磨段階で、鉱石の研磨面の肉眼観察を行った結果、鉱

石Aでは、研磨面にかなりの相違があることが認められた。いま試料研磨面の肉眼観察結果を分類すれば、Photo. 1 に示すごとく 6 種類に大別される。以上の分類で明らかなく、産地による特定銘柄を選定しても、その内容は必ずしも均質であるとは限らず、物理的に相違する性状を有する鉱石粒が多数混在する。この様に物理的に性状の異なる鉱石粒を任意に採取して機械的強度を測定した場合、えられる結果はかなりのばらつきを有し、その鉱石銘柄を代表する特性値とみなすことはできない。したがって、本実験では、脈石分や内部亀裂等を包含しない、緻密な試料について測定を行った。また、脈石やき裂の包含は、試料内部のきわめて微小領域で観察されることから、これらの影響を避けるため、試料形状は小さくすることが好ましいが、一方、本測定はゲージ法によるため、ゲージの大きさを考慮した結果、試料形状は、一辺を 4 mm の立方体を目標に作成している。また、圧縮面の平行は金属顕微鏡を用い、倍率 100 倍で試料全面の焦点観察により確認している。

多数の鉱石粒子から厳選して成形した試料のうち、最終仕上げで合格した試料について圧縮試験を行うが、強度特性は、一般に見掛け比重に依存することから、あらかじめ個々の試料について見掛け比重を測定するとともに試料重量、試料寸法を測定しておく。ついで、試料の圧縮面に平行および垂直面に歪みゲージを貼付し測定用試料とした。

### (2) 圧縮試験

一般に圧縮試験によりえられる曲線は、応力-歪み曲線であるが<sup>16)~20)</sup>、この曲線の形状とか再現性におよぼす因子として加圧速度が考えられる。加圧速度を種々検討した結果、鉄鉱石類の場合には、10~15 μ/min の速度がきわめて良好であることが明らかとなったため、本

実験では, すべて  $10 \mu/\text{min}$  の加圧速度で測定を行った。

まず  $10 \mu/\text{min}$  の速度で加圧し, 荷重が  $250 \text{ kg}$  に到達後除荷する.  $50 \text{ kg}$  まで除荷したのち再負荷を行い, この除荷-再負荷曲線の平均勾配が, ヤング率にほぼ等しい<sup>17)18)</sup>ことから, 次式によりヤング率, ポアソン比を算出する。

$$E = \sigma / \epsilon \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\nu = \epsilon' / \epsilon \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし,  $E$ : ヤング率,  $\nu$ : ポアソン比,  $\sigma$ : 応力,

$\epsilon$ : タテ方向の歪み,  $\epsilon'$ : 横方向の歪み

### 3. 結果および考察

#### 3.1 ヘマタイト鉱石の圧縮試験

##### (1) 鉱石Aのヤング率測定

すべての試料について, あらかじめ寸法, 重量を測定し, さらに見掛け比重を測定したのち, 見掛け比重が  $4.5$  以上で, しかも表面状態が良好なものを  $50$  個選出し, 試料表面に歪みゲージを貼付して圧縮試験を行った. 測定時, 歪みゲージの接着不良あるいは剥離等により, また試験時に試料の欠落または崩壊により, 良好な結果がえられなかつたものがあるため, 最終的には  $26$  個の試験結果をえている。

いまヤング率と見掛け比重の関係を図示すればFig. 2のごとくなり, さらにこれらの測定値から, 最小二乗法により算出した結果, (1)式の直線関係がえられた。

$$E = 5640 + 13150(A - 4.0) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし,  $E$ : ヤング率,  $A$ : 見掛け比重

ついで, 本実験結果の精度を試料の成形性により検討するため, ヤング率と計算により求めた見掛け比重の関係を図示すれば, Fig. 3 となり, その直線式は(2)式となる。

$$E = 4230 + 12690(A - 4.0) \quad \dots\dots\dots (2)$$

Fig. 1 と Fig. 2 を比較した場合, 計算法による見掛け比重は, 実測値よりわずかに小さく算出されているため, その直線はわずかに左方に偏移しているが, 両者の直線の勾配はほぼ等しい. この両者の見掛け比重のわずかのずれは, 試料体積の算出時の誤差に起因しているものと考えられる. 一方, ヤング率の誤差は,  $\sigma = 2000 \text{ kg}/\text{mm}^2$  であることを考えれば, この両者間のずれは測定誤差内に吸収されてしまうことから, 本実験結果は, 計算により求めた結果とほぼ良い一致が認められたといえる. したがって, 供試々料は, 立方体として十分に満足すべきものであることが確認されたことから, ヤング率, ポアソン比等の精度は, 信頼性がきわめて高いこ

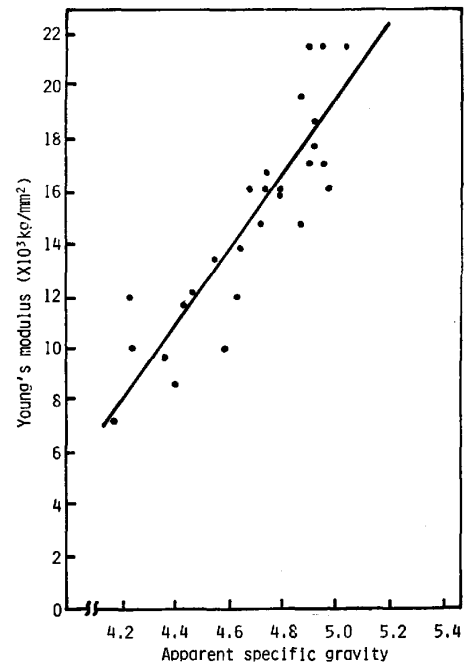


Fig. 2. Relation of apparent specific gravity on Young's modulus for Ore A.

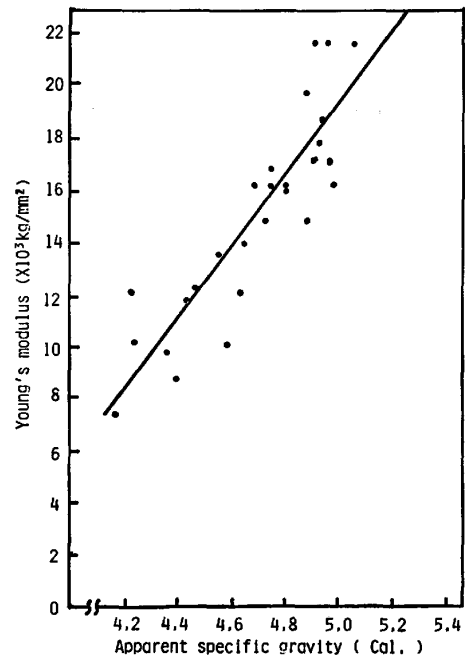


Fig. 3. Relation of apparent specific gravity on Young's modulus for Ore A.

とが確認された。

##### (2) 鉱石Bのヤング率測定

鉱石Aを使用して, 多数の試料による詳細な圧縮試験結果から, ヤング率を見掛け比重の関係で図示したが, この測定結果が, 他銘柄のヘマタイト鉱石に対して, 普遍的に適用可能であることが必要である. このため, 鉱石Bを使用して同様の試験を行い, その結果について比

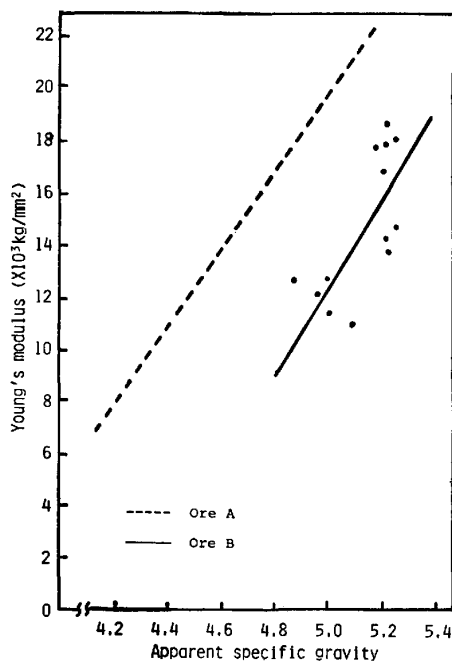


Fig. 4. Relation of apparent specific gravity on Young's modulus for Ore B.

較検討を行つた。

本鉱石の表面状態は、かなり緻密なものが多く、しかもすべての鉱石粒の見掛け比重が比較的近似している。一方、結晶の組織は、粒子の中には結晶の成長がかなり方向性を有しているものがあり、本実験では、試料は結晶の成長方向を圧縮方向と一致するよう試験機に装着して測定している。なお、圧縮方向に対して垂直方向に試料を装着した場合、強度がきわめて弱いことを確認している。いまヤング率-見掛け比重の関係を図示すれば、Fig. 4のごとく、鉱石Bの測定結果は鉱石Aに比し図のやや右方に偏倚している。このことから、ヤング率を見掛け比重でプロットした場合、えられる直線は鉱石銘柄によりそれぞれ独自の直線をとることが明らかで、ヘマタイトを代表するヤング率を得ることが困難となる。すなわち本実験では、ヤング率はすべて見掛け比重に対して図示しているが、酸化物のこれら機械的特性値については、従来から窯業関係で数種の物質について測定されており、いま鉄鋼製錬と関係の深い  $Al_2O_3$ 、 $CaO$  のヤング率について参照<sup>21)</sup>すれば、いずれも見掛け比重あるいは気孔率の関係で示されている。一般にこれら特性値の表示は、見掛け比重より気孔率に対して表示する場合が普遍的で好ましいと考えられるが、気孔率は(3)式に示すごとく、真比重と見掛け比重とから算出される。

$$P = \{(S - A) / S\} \times 100 \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 $P$ : 気孔率、 $S$ : 真比重、 $A$ : 見掛け比重  
 鉱石Aおよび鉱石Bの真比重を測定するため、鉱石をお

のこの 100 g 採取し、攪拌らい潰機にて微粉碎したのち JIS 法を参照して測定した。その結果、鉱石Aでは  $S = 4.97_2$ 、鉱石Bは  $S = 5.36_0$  がえられた。一方、鉱石の見掛け比重は、例えば鉱石Aの場合、ほとんどが 4.8~4.9 であるが、多孔質および多層の試料はこの値より低値を示し、緻密なものでは高く、とくに 5.09 の値を示したのものもある。見掛け比重が真比重より大きな値をとることは考えられないため、本試料について繰り返し測定を行つた結果、この値はきわめて再現性があることが確認された。したがって、上記真比重の測定方法のごとく、試料重量 100 g とある一定量を採取・粉碎した場合には、ある程度平均的な値をとることから、粒子個々の見掛け比重を測定した場合には、真比重より見掛け比重が大きな値をとることもありうると考えられる。なお、真比重測定用試料は、鉱石粒子個々について粉碎し、脈石分とかりモナイト系鉱石の混入を避け、かなり厳密に試料採取を行つたものである。

いま見掛け比重 5.09、真比重 4.97<sub>2</sub> を(3)式に代入すれば、気孔率は負の値となり算出されない。鉱石中に脈石分が含有する場合鉱石の機械的性質は大きく影響を受け、とくにこのような試料では、圧縮試験終了後、応力-歪み曲線図の作成は困難となり、ヤング率、ポアソン比の算出は不可能となる。したがって、鉱石のように試料内部に気孔とか脈石が局所的に偏在しているような試料では、機械的特性値を測定する場合、測定誤差の許容範囲内で、試料形状はできるだけ小さいことが望ましいと考える。このため本実験では、試料は一辺約 4 mm の立方体すなわち約 0.4 g としているため、個々の粒子について真比重を精度よく測定することは困難である。セラミックスでは試料内の成分が均一であるため、供試々料は任意の形状に比較的容易に成形でき、しかも得られる値は精度的にかなりよく、ヤング率は気孔率の関係式で報告されている<sup>22)</sup>が、鉱石の場合には上述のごとく、ヤング率を気孔率に対して表示することは精度的にやや疑義があり、したがって本報では、すべて見掛け比重の関係で表示している。

鉱石Bのヤング率は、見掛け比重に対してプロットした場合、前述のごとく図の右方にやや偏倚しているが、いま鉱石Aのヤング率とともに気孔率に対して図示すれば、Fig. 5のごとくである。気孔率による表示は、前述のごとく、精度的には必ずしも良好とはいえないものがあるが、図より両鉱石のヤング率はほぼよい一致がみられ、(4)式の直線関係がえられることが明らかとなつた。

$$E = 18\,100 - 710 P \dots\dots\dots (4)$$

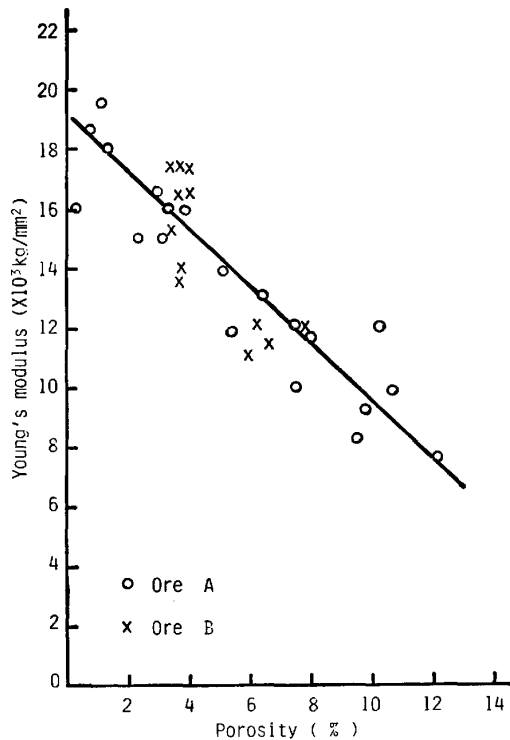


Fig. 5. Relation of porosity on Young's modulus for hematite.

Table 2. Poisson ratio of iron ore.

Kinds	Poisson ratio	Remarks
H*	0.25	Dense
"	0.32	"
"	0.26	"
"	0.21	"
"	0.18	"
"	0.25	"
"	0.22	"
"	0.20	"
"	0.19	" , Lamellar
"	0.22	"
H**	0.22	Dense
"	0.28	"
"	0.34	"
M***	0.36	"
"	0.41	"
"	0.25	"
"	0.32	"

H\* ; Hematite ore A  
H\*\* ; Hematite ore B  
M\*\*\* ; Magnetite

したがって、本実験結果から、精度的には多少問題はあ  
るが、ヤング率を気孔率に対して図示すれば、鉄石銘柄  
とは独立に一定の関係がえられることが確認された。

### (3) ポアソン比の測定

鉄石Aおよび鉄石Bについて、圧縮試験を行った場  
合、試料に貼付の横方向の歪みゲージにより測定された  
歪み量から、(2)式を用いてポアソン比を算出し、そ  
の結果を Table 2 に一括表示する。またえられたデー  
タから、その平均値および標準偏差  $\sigma$  を計算した結果、  
ポアソン比  $\nu=0.24$ ,  $\sigma=0.04$  がえられた。ポアッ  
ソン比は、圧縮方向の歪みに対する圧縮の横方向の歪みの

比で示されることから、試料内部の気孔とか脈石分等  
は、結果のばらつきの原因となり、ヤング率のごとく見  
掛け比重の相関関係では表示することが困難である。し  
たがって、鉄石のごとく内部状態が必ずしも均質でない  
試料については、結果の分散が大きくなり誤差を含む。  
本実験においても、多数の供試試料のうち、内部に  
包含の脈石や気孔のため、さらには歪みゲージ剥離等  
により、試料成形過程においてかまたは試験終了後に  
かなりの試料およびデータが割愛されたため、結果がえ  
られたのは 13 試料についてである。これらの試料は、表  
面の肉眼観察からは、きわめて緻密で均質と判断され  
たものであるが、 $\sigma=0.04$  が示すごとく、やや大きなば  
らつきとなつている。しかし、この程度のばらつきは、  
残留応力の計算にはオーダー的には大きな影響がない  
ものと考えられることから、えられたポアソン比の値は、  
今後応力計算に適用可能であると考えられる。

### 3.2 マグネタイト鉄石の圧縮試験

ヘマタイト鉄石の機械的特性を比較するため、マグ  
ネタイト鉄石を使用して同一条件にて圧縮試験を行つた。  
本鉄石は、鉄石粒子の表面状態がすべて類似の様相を  
呈しており、さらに見掛け比重も比較的近似している。  
また真比重の測定結果は、 $S=5.17$  をえている。いまヤ  
ング率-気孔率の関係を図示すれば Fig. 6 のごとくであ  
る。図より、各データについて次式(5)の直線関係がえ  
られた。

$$E = 14\,400 - 700P \quad \dots\dots\dots (5)$$

いま本図と Fig. 5 のヘマタイト鉄石のヤング率を比較  
した場合、同一気孔率では、マグネタイト鉄石のヤング  
率がかなりの低値を示す。またポアソン比は、 $\nu=0.33$   
とヘマタイト鉄石より高値を示していることから、両鉄

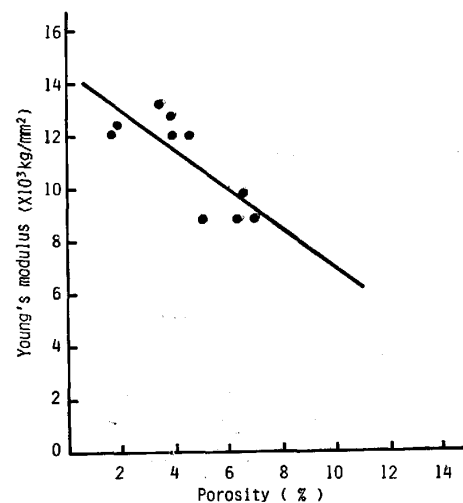


Fig. 6. Relation of porosity on Young's modulus for magnetite.

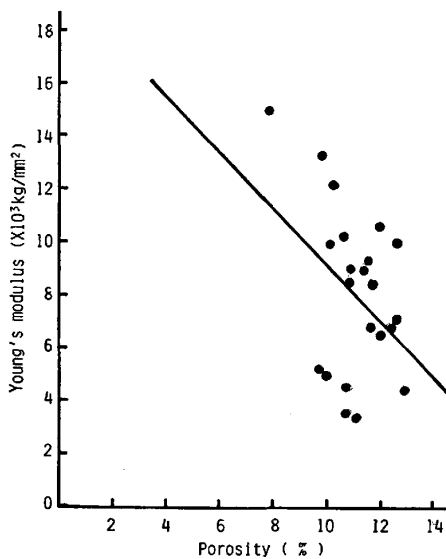


Fig. 7. Relation of porosity on Young's modulus for pellet.

石の機械的特性値にはきわめて大きな相違があることが明らかとなった。

### 3.3 ペレットの圧縮試験

ペレットの構成鉱物は、ほとんどすべてがヘマタイトであり、機械的強度についてヘマタイト鉱石と比較のため、ペレット試料について同様試験を行いその特性値を求めた。またペレットの真比重を測定した結果、 $S=4.31$ で、気孔率に対してヤング率をプロットすればFig. 7のごとくである。図から明らかのごとく、ペレットのヤング率はばらつきがかなり大きく、しかもすべてのデータが気孔率 10~12% 付近に集中しているのが特徴である。いまこのデータを統計処理した結果、(6)式の関係がえられている。

$$E=20\,400-1\,100P \dots\dots\dots (6)$$

本式とヘマタイト鉱石の式(4)とを比較した場合、(4)式からは  $E=18\,100\text{ kg/mm}^2$ 、(6)式からは  $E=20\,400\text{ kg/mm}^2$ 、またその勾配は 710 と 1 100 がえられた。データのばらつき、とくにペレットのデータのばらつきを考えれば、両式は比較的よい一致をみていると考えられる。いま気孔率 10% におけるヤング率を算出すれば、(4)式から  $E=11\,000\text{ kg/mm}^2$ 、(6)式から  $E=9\,400\text{ kg/mm}^2$  がえられ、これらの結果から、構成鉱物が同じヘマタイトのペレットでは、鉄鉱石でえられた結果の式を適用できるが、ペレットのごとく多孔質体の場合には、その気孔率を測定し、その気孔率におけるデータを使用すればよいことが明らかとなった。また、ポアソン比は Table 3 に示すごとく、鉄鉱石に比しかなり大きなばらつきを示しているが、いまこれらの算術平均をとれば  $\nu=0.36(\sigma=0.99)$  がえられる。

Table 3. Poisson ratio of pellet.

No	Poisson ratio	Remarks
1	0.51	Partially pore
2	0.28	"
3	0.34	"
4	0.24	"
5	0.33	"
6	0.53	Partially micro crack
7	0.51	"
8	0.26	Partially pore
9	0.25	"
10	0.37	"
11	0.31	"
12	0.36	"
13	0.33	"
14	0.39	"
15	0.52	"

## 4. 結 言

焼結鉄の還元粉化機構を解明するため、まず赤鉄鉱、磁鉄鉱等鉄鉱石類を試料として圧縮試験を行い、それらの機械的特性値を測定した。また比較のため、ペレットについても同様の試験を行い以下の知見をえた。

(1) ヘマタイト鉱石のヤング率の測定結果から、見掛け比重に対して直線関係がえられることが明らかとなった。また、マグネタイト鉱石も同様の傾向を示している。なお、ヘマタイト鉱石のヤング率は、マグネタイト鉱石に比しかなり大きいことが明らかとなった。

(2) 鉄鉱石のヤング率は、気孔率を横軸にとつた場合、鉄石銘柄とは関係なく、ヤング率-気効率の関係は一本の直線として表わすことができる。

(3) ヘマタイト鉱石およびマグネタイト鉱石のポアソン比は、それぞれ 0.24, 0.33 がえられた。

(4) ペレットのヤング率、ポアソン比は、鉄鉱石に比し大きく相違する値を示したことから、天然鉱物と人工鉱物の機械的特性の相違が明瞭となった。

## 文 献

- 1) 新日本製鉄，基礎研究所—君津製鉄所：学振 54 委-No. 1279 (昭和 48 年 7 月)
- 2) 三本木貢治，大森康男，浅田 実，安達春雄，高橋愛和：鉄と鋼，54 (1968)，S 295
- 3) 照井敏勝，高橋礼二郎，八木順一郎，大森康男：鉄と鋼，58 (1972) 11，S 334
- 4) 大森康男：第 33, 34 回西山記念技術講座 (日本鉄鋼協会編) (1975)，p. 93
- 5) H. E. N. STONE and B. L. DANIELL: JISI. 207 (1969)，p. 7
- 6) E. FORSTER, U. SCHIERLOH, and W. SCHMÜLLING: Stahl Eisen, 89 (1969) 26, p. 1473
- 7) J. O. EDSTRÖM: JISI, 175 (1953)，p. 289
- 8) H. BRILL-EDWARDS, B. L. DANIELL, and R. L. SAMUEL: JISI, 203 (1965)，p. 361
- 9) H. BRILL-EDWARDS, H. E. N. STONE, and B. L. DANIEL: JISI, 207 (1969)，p. 1565
- 10) 小島鴻次郎，永野恭一，稲角忠弘，高木勝博：鉄と鋼，55 (1969) 9，p. 757

- 11) 春名淳介，高崎 誠，鈴木章平：鉄と鋼，67 (1981) 4, S 47
- 12) 蟹沢秀雄，和島正巳，相馬英明，三国 修，伊藤幸良：鉄と鋼，67 (1981) 4, S 48
- 13) 小島鴻次郎，永野恭一，稲角忠弘，品田功一：鉄と鋼，57 (1971) 4, S 17
- 14) 城本義光，金山有治，奥野嘉雄，磯山 正：鉄と鋼，57 (1971) 10, p. 1606
- 15) 佐々木稔，榎戸恒夫，近藤真一，中沢孝夫：鉄と鋼，59 (1973) 9, p. 1209
- 16) 大久保肇：最新材料力学 (1975), p. 4[朝倉書店]
- 17) 山田良之助：材料試験 (1975), p. 73 [内田老鶴園新社]
- 18) 山口柏樹：弾・塑性力学 (1976), p. 190 [森北出版]
- 19) 中川 元，盛中清和，遠藤達雄，光永公一：新選材料試験法 (1976), p. 43 [養賢堂]
- 20) 中沢 一，長屋二郎，加藤 博：材料力学(1979), p. 23 [産業図書]
- 21) G. V. SAMSONOV: 最新酸化物便覧 (遠藤敬一訳) (1978), p. 25 [日ソ通信社]
- 22) 浜野健也：セラミックス，11 (1976), p. 565