多結晶黒鉛材料の諸物性間の相関性について

依田 真一*・藤崎 勝夫*

(昭和 56 年 11 月 14 日受理)

Correlation between Some Mechanical and Physical Properties
of Polycrystalline Graphites

S. Yoda and K. Fujisaki

Department of High Temperature Engineering,
Japan Atomic Energy Research Institute,
Tokai-mura, Ibaraki-ken, 319-11 Japan

Mechanical and physical properties of polycrystalline graphites, tensile strength, compressive strength, flexural strength, Young's modulus, thermal expansion coefficient, electrical resistivity, volume fraction of porosity, and graphitisation were measured for ten brand graphites. Correlation between the mechanical and physical properties of the graphites were studied. Young's modulus and thermal expansion coefficient of the graphites depend on volume fraction of porosity. The Young's modulus of the graphites tended to increase with increasing the thermal expansion coefficient. For an anisotropic graphite, an interesting relationship between the Young's modulus E and the thermal expansion coefficient α was found in any specimen orientations; $\alpha E = \text{constant}$. The value of αE was dependent upon the volume fraction of porosity. It should be noted here that the electrical resistivity increased with decreasing grain size. The flexural and the compressive strength were related with the volume fraction of porosity while the tensile strength was not. The relationships between the tensile, the compressive and the flexural strength can be approximately expressed as linear functions over a wide range of the stresses.

1. 緒 言

多結晶黒鉛材料の機械的、物性的性質は、その原料および製造法に著しく影響される。これは、原料および製造法の相違により黒鉛材料の内部組織、すなわち黒鉛化度^{1,2)}、結晶粒度、配向性、気孔率^{3,4)}等が異なることに起因する。そしてこれら微視的因子が、多結晶黒鉛材料の巨視的性質を決定する重要な因子となる。したがってこれら諸物性に及ぼす効果を正しく把握することは黒鉛材料の機械的、物理的性質を理解するために極めて重要となる。

本研究は、10 種黒鉛銘柄の機械的、物理的性質、すなわち、引張強度、圧縮強度、曲げ強度、ヤング率、熱膨張係数、電気抵抗などを詳細に調べ、上記因子の諸物性に及ぼす影響、および諸物性間の相互関係について検討

した結果をまとめたものである。

2. 実験方法

今回の実験に用いた黒鉛銘柄を Table I に示す。表中の IG-11 (R) と IG-11 (S) は同一銘柄であり、() 内の R は素材ブロックの形状が円柱状、S は角状であることを示している。これらの銘柄から以下に述べる各種試験の試料を採取した。なお Table I には黒鉛材料の銘柄別に記号を付した。この記号をもってこれ以後の結果を表わすこととする。

2.1 曲げ、引張、圧縮試験

これらの試験はすべてインストロン型引張試験機を用いて行なった。試験片形状は曲げ試験片が $6\phi \times 60$ mm、引張試験片がゲージ部で $6\phi \times 20$ mm、圧縮試験片が $6\phi \times 12$ mm である。曲げ試験は 4 点曲げで行なった。なおスパンの距離は、内スパン 19.6 mm、外スパン 38.2 mm であり、クロスヘッドの速度は 0.5 mm/min である。引

* 日本原子力研究所高温工学部：〒 319-11 茨城県東海村

Table I Various graphite materials used in the experiments.

BRAND	MAKER	FORMING METHOD	SYMBOL
IG-11(R)	TOYO TANSO	Isostatic Molding	○
H-451	GLCC	Extrusion	●
TS-1240	UCC	Extrusion	△
G140A	TOKAI CARBON	Vibration Molding	▲
ASR-1RG	SIGRI	Vibration Molding	□
P G X	UCC	Molding	■
A T J	UCC	Molding	X
ATR-2E	SIGRI	Extrusion	☆
P3JHA	PUK	Molding	*
IG-11(S)	TOYO TANSO	Isostatic Molding	⊗
V483T	SIGRI	Isostatic Molding	▽

張，圧縮試験における歪速度は各々，引張試験が $4.2 \times 10^{-4} \text{ sec}^{-1}$ ，圧縮試験が $6.9 \times 10^{-4} \text{ sec}^{-1}$ である。

2.2 ヤング率測定

ヤング率は，超音波伝播速度法により測定した。用いた発振子は 5MHz の水晶発振子であり，この超音波の縦波速度を測定し，次式により計算した。

$$E = \rho v^2 \times 10^{-6}$$

E : ヤング率 (GPa)

ρ : 密度 (g/cm^3)

v : 伝播速度 (m/sec)

2.3 電気比抵抗の測定

電気抵抗は，直径 $\phi 6$ ，長さ 60 mm 形状の試験片により，ポテンションメーターを用いて 4 端子法により測定した。

3. 結果と考察

Table II に本実験に用いた各種黒鉛材料の嵩密度，黒鉛化度，異方性因子を示す。この異方性因子は，黒鉛材

Table II A list of bulk densities, anisotropic factors and graphitization parameters by Warren for graphites used in the experiments.

BRAND	BULK DENSITY [g/cm ³]	ANISOTROPY FACTOR (CTE)	GRAPHITIZATION FACTOR P_1
IG-11(R)	1.748	1.08	0.8663
H-451	1.741	1.17	0.8663
TS-1240	1.760	1.10	0.8895
G140A	1.662	1.18	0.9186
ASR-1RG	1.804	1.15	0.8663
PGX	1.735	1.15	0.9070
ATJ	1.784	1.36	0.8779
ATR-2E	1.807	1.07	0.8721
P3JHA	1.729	1.09	0.9070
IG-11(S)	1.760	1.08	0.8663
V483T	1.773	1.15	0.8779

料内の結晶の層面が優先的に整列する方向，すなわち with-grain 方向 (//) と，これに垂直な across-grain 方向 (⊥) の 673 K における熱膨張係数の比より求めた。また黒鉛化度は，各黒鉛材料の層面間隔より Warren²⁾ の黒鉛化度の式を用いて求めた。なお以下の本実験結果では，特に異方性問題に注目する場合をのぞいては用いた試料が比較的等方的なために，with-grain, across-grain の物性値を区別せずに同一の図面上に示すこととした。

3.1 気孔率と諸物性

Fig. 1 は気孔率 ϵ と各銘柄のヤング率 E との関係を示したものであり，黒鉛材料の

Fig. 1 Porosity vs Young's modulus of graphites diagram showing decrease in Young's modulus with increasing porosity.

with-grain 方向と across-grain 方向のヤング率を区別せずに示してある。また気孔率は各黒鉛材料の嵩密度と理論密度より求めた。この図より明かなように，ヤング率は気孔率の増加とともに減少する傾向が見うけられる。この傾向は Hutcheon⁴⁾，Yamaguchi⁵⁾ らの結果と一致している。しかしながら彼等の結果が同一原料より作製された黒鉛材料のヤング率に及ぼす気孔率の影響を示すのに対し，本実験では原料すなわちコークス，その粒径，ピッチ，焼成温度，成形方法等の異なる材料間の比較であり，それにもかかわらず同様の傾向が認められるのは興味深い。さて，黒鉛材料内部における気孔は，粒内気孔と粒間気孔に分けられる。粒内気孔はフィラー中に最初から存在しているものと，後に述べる熱応力の緩和機構として生じる層面間でのデライミネーション(層面はくり)に因るものとがあり，粒間気孔はバインダーの炭化に際して生じるものである。したがって上記の粒

径、焼成温度、および成形時の加圧圧力の相違は、これら気孔量に影響することとなる。さらにヤング率は一般に物体内に含まれる介在物の量と形状⁷⁾に依存する。ここで気孔はヤング率が0の介在物と見なされるために、これら気孔率の増加とともにヤング率は減少するものと考えられる。また、後に述べるように黒鉛化度にも黒鉛材料のヤング率は関係する。なお Fig. 1 に示されるヤング率 E と気孔率 ϵ との相関関係を一次式で表わされるものとして最小二乗法により求めると、

$$E = 23.4 \times 10^9 \times (1 - 2.69\epsilon) \quad \text{Pa} \quad (1)$$

となる。ここで $\epsilon = 0$ のときのヤング率は 23.4 GPa となり、Price⁸⁾ が単結晶のコンプライアンスを用い、無気孔性多結晶黒鉛材料の弾性率を理論的に求めた式で、等方体とした場合のヤング率と良い一致を見ている。

Fig. 2 に 673 K における熱膨張係数 α と気孔率 ϵ の関係を示す。Fig. 2 より、気孔率の増加とともに熱膨張係数 α は減少する傾向、すなわち熱膨張係数が気孔率に対して負の傾を有することが判る。図中の同一銘柄黒鉛材料におけるデータのパラッキは、熱膨張係数 α の小さなものが with-grain 方向、大きなものが across-grain 方向の試料に対応する。熱膨張係数 α を支配する因子としては、結晶の結晶化度、配向性、およびバルク中に存在する気孔があり、これらが熱膨張係数と相関があることはすでに明らかとなっている^{5, 9~12)}。そしてこれらの結果は本実験の傾向と一致している。しかしながら先の報告が多くの場合その試料製造方法が同一のものどうして気孔率の効果を比較しているのに対し、本実験では各銘柄間で結晶粒度、バインダー量、成形法等が異なるにもかかわらず、熱膨張係数は気孔率の減少とともに増加するという傾向で整理できる点を強調したい。なお熱膨張係数 α と気孔率 ϵ との相関関係を一次式として

最小二乗近似を行なうと、

$$\alpha = 9.15 \times 10^{-6} \times (1 - 2.52\epsilon) \quad 1/K \quad (2)$$

となる。ここで $\epsilon = 0$ における α は 9.15×10^{-6} となり、等方体として平均化した熱膨張係数 9×10^{-6} ¹³⁾ に極めて良い一致を見る。

次に Fig. 1 と Fig. 2 の両者を比較すると次のことが明らかとなる。すなわち、大きな熱膨張係数を有する黒鉛材料は、比較的大きなヤング率を有するというのである。このことは同一の黒鉛成形品ロッドにおいて試料採取位置によりヤング率、熱膨張係数が異なり、ヤング率の大きなものほど熱膨張係数は大きい傾向にあるという報告⁶⁾と一致する。しかしながら各銘柄間で製造方法等が異なるにもかかわらず、先の報告と同様な傾向になることは黒鉛材料としての一つの特徴となろう。

ここでヤング率、熱膨張係数、気孔率の相関性について考える。多結晶黒鉛材料はほぼ 3000 K 近い温度で黒鉛化処理される。この時、成形時に生じた材料内部の残留応力は、高温におけるクリープによって緩和されるであろう。冷却時には、結晶の層面方向 (a 軸) とこれに垂直な方向 (c 軸) に熱膨張係数、および弾塑性変形特性に著しい差⁶⁾があり、しかも結晶がランダムに配列し互いに拘束しているため、熱応力が発生する。この熱応力を緩和するために層面でのすべりすなわち塑性緩和が生じ、さらには層面間でデラミネーションが起こる。これら層面でのすべりおよびデラミネーションの程度は黒鉛化度と密接に関係するものと考えられる。すなわち黒鉛化度の高いものほどその結晶はより完全結晶に近いものとなり、層面間は完全なファンデルワールス結合状態となる。したがって黒鉛化度の高いものほど層面間のすべりが容易なものとなり、またデラミネーションも生じやすくなる。そしてデラミネーションは微視的気孔と考えられるため、黒鉛化度の高いものほど気孔率は大きくなることが予想される。Fig. 3 に黒鉛化度を表わす Warren らのパラメーター P_1 ^{1, 2)} と気孔率の関係を示す。明らかに黒鉛化度の高いものほど気孔率は増大している。この結果は、黒鉛化処理温度が高いものほど気孔率が大きいという真田ら¹²⁾の結果と一致している。また彼等の水銀ポロシメトリーの結果によれば、黒鉛化処理により細孔の増加が認められると報告¹²⁾している。したがってこれらの結果も、熱応力の緩和機構として働くデラミネーションが、黒鉛化度の高い材料ほど黒鉛化処理後の冷却時に数多く生じることを示唆するものであると考える。ところで結晶子自身の格子熱膨張係数は Nelson ら^{17~19)}をはじめ多くの研究者により報告されており、完全な黒鉛結晶における c 軸方向の熱膨張係数は $27 \sim 30 \times 10^{-6}/K$ とみられている。一方黒鉛化度が低下

Fig. 2 Thermal expansion coefficients of graphites vs porosity diagram showing decrease in thermal expansion coefficient with increasing porosity.

Fig. 3 Volume fraction of porosity vs degree of graphitization diagram showing increase in graphitization with decreasing the volume fraction of porosity.

すると格子熱膨張係数は黒鉛結晶の値よりも小さくなり、Schiller ら²⁰⁾によれば $20 \times 10^{-6}/K$ 程度あるいはそれ以下になると思われる。したがって黒鉛化度の高い材料ほど結晶の c 軸方向の熱膨張係数が大きくなることを考えれば、バルクとしての熱膨張係数も黒鉛化度の高いものほど大きくなると考えるのが一見妥当性のあるように思われる。しかしながら実験事実には黒鉛化度の高いものほど熱膨張係数は小さくなる傾向を示している。これはすでに述べたように層面間でのすべりやデラミネーションが黒鉛化度の高い材料ほど容易となるため、 c 軸方向に比べて弾性係数の大きな a 軸方向の熱膨張挙動がバルクの性質へ顕著に表われるものと考えられる。一方ヤング率は、黒鉛材料においては各結晶の微視的塑性変形の影響を受ける。したがって、黒鉛化度の高い材料ほど層面間でのすべりが容易であるために、ヤング率は低下する。さらにデラミネーションにより生じた気孔やバインダーの炭化に際して生じた粒間気孔は欠陥⁶⁾とみなされるために、ヤング率の低下に結びつく。また気孔率は、黒鉛化度の高いものほど増大する。したがって、気孔率、ヤング率、熱膨張係数の間には黒鉛化度を介して相関関係が成立し、黒鉛化度の高い材料ほど気孔率は大きく、ヤング率、熱膨張係数は小さくなる傾向になる。さらに気孔率の多くを占める粒間気孔のヤング率、熱膨張係数に及ぼす影響も重要であり、このためヤング率、熱膨張係数の減少をまねく。したがって黒鉛化度、気孔率の二つの因子の相乗効果が、黒鉛材料のヤング率、および熱膨張係数の値を決定することになるものと考えられる。

Fig. 4 は熱膨張係数 α とヤング率 E の相関関係を両対

Fig. 4 Thermal expansion coefficient vs Young's modulus of graphites diagram.

数でプロットしたものである。次のことに注目したい。測定した点がかかなり広範囲に分散しているために相関関係が明確でないが、グラフ左下から右上への相関性がうかがわれる。すなわち熱膨張係数の小さなものほど左下方に、大きなものほど右上方にプロットされる傾向にある。また、この図で異方性を考慮すると、同一黒鉛銘柄での with-grain 方向と across-grain 方向のプロット点を結ぶ直線の傾きが、どの黒鉛銘柄でも等しく、ほぼ -1 となることである。つまり $\alpha E = A$ (定数) が成立する。このことを確認するために、比較的異方性の大きな ATJ 黒鉛材料を試料として用い、 $\alpha E = A$ (定数) が成立することを調べた。すなわち with-grain 方向から角度をつけて切り出した試料を作製し、これらの熱膨張係数とヤング率を測定した。この結果を Fig. 5 に示す。図か

Fig. 5 Thermal expansion coefficient vs Young's modulus of ATJ graphite diagram.

ら明らかなように測定点を結ぶ直線の傾きは-1となり、 $\alpha E = A$ (定数)なる関係が成立している。以上のことを整理すると、各黒鉛銘柄間では、気孔率の小さい材料ほど図中 (Fig. 4) で右上方に位置する。さらに異方性のある同一銘柄黒鉛材料では、その試料の切り出し方向に無関係に、 $\alpha E = A$ なる関係式が成立する。次に各種黒鉛材料の A について検討する。Fig. 6 は Fig. 4 より得られた各黒鉛材料の A の値と気孔率の関係を示したものである。図より、 A の値の大きなものほど気孔率の少ないことが判る。なお図中の曲線は、 E と α に関する (1), (2) 式より求めた。これは次式で示される。

$$E\alpha = 2.14 \times 10^6 \times (1 - 269\varepsilon) \times (1 - 252\varepsilon) \quad \text{Pa/K} \quad (3)$$

ここで ε は気孔率である。この実験式が意味することは、黒鉛材料の気孔率 (嵩密度) を知れば αE が求まり、 αE のうち一方を測定すれば他方のおおよその値を求めることができることである。

次に気孔率と電気比抵抗の関係を図 7 に示す。一般に電気比抵抗は内部欠陥に敏感であるため、気孔量、黒鉛化度などに関係するものと思われる。しかしながら Fig. 7 に示すように気孔率と電気比抵抗に明確な相関は認められない。また黒鉛化度と電気比抵抗の間には、Table II と Fig. 7 を比較してもやはり明確な相関関係は認められない。このことは、一般の黒鉛化度と電気比抵抗の関係が、本実験の様に各試料間で結晶粒径、バインダー量、成形法の異なる場合には成立しないことを意味している。

Fig. 6 The value of αE vs volume fraction of porosity diagram showing increase in αE with decreasing the volume fraction of porosity.

Fig. 7 Electrical resistivity vs volume fraction of porosity diagram.

次に電気比抵抗と各黒鉛材料の結晶粒径の関係について述べる。なお結晶粒径は、各黒鉛メーカーのカatalog データーを参考とし、軽いサーマルエッチ後の表面観察より決定した。

Fig. 8 に電気比抵抗と結晶粒径の関係を示す。次の様な傾向が認められる。すなわち粒径の小さなものほど電気比抵抗は大きく、粒径の大きなものは電気比抵抗が小さい。これは以下の様に説明できる。黒鉛材料の製造過程で混合されるバインダーの量は、ある一定の厚さで粒をとりかこむ様に配合される。したがって、結晶粒径の小さなものほどバインダーの結晶粒体積に対する相対量が大きくなる。このため結晶粒の小さいものほど諸物性にバインダーの性質がより現われることになる。一般にバインダーは炭素材料に近い性質を有するためその電気比抵抗は黒鉛化した材料に比べて大きい。すなわち炭素材料の電気比抵抗はほぼ $4 \sim 6 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{cm}$ と黒鉛材料に比べて 3~5 倍程度大きなものとなっている。このため結晶粒の小さなものほどこのバインダー量の体積率が

Fig. 8 Electrical resistivity vs grain size diagram showing increase in grain size with decreasing the electrical resistivity.

Fig. 9 Mechanical properties vs volume fraction of porosity diagrams, (a) bending strength vs volume fraction of porosity, (b) compressive strength vs volume fraction of porosity, and (c) tensile strength vs volume fraction of porosity.

大きいために、電気比抵抗は大きくなるものと考えられる。

次に気孔率と機械的性質について述べる。気孔率と曲げ強度についてはHutcheonら⁴⁾が実測値から経験的に導いた関係式；曲げ強度 σ_b は $\sigma_b \propto \epsilon^{-1.6}$ なる式を示している。Fig. 9 (a), (b), (c)に曲げ強度と気孔率、圧縮強度と気孔率、引張強度と気孔率の関係を示す。Fig. 9 (a)の曲げ強度と気孔率の関係には、先の $\sigma_b \propto \epsilon^{-1.6}$ なる式を直線で示してある。図よりx, ○, ∇で示した結晶粒の小さな黒鉛材料を除けば、この関係式は気孔率と曲げ強度の関係を良く表わしていると思われる。Fig. 9 (b)の気孔率と圧縮強度の関係にもやはり結晶粒の小さい黒鉛材料、x, ○, ∇, ∇で示したものを除けば、圧縮強度 σ_c と気孔率 ϵ の間には $\sigma_c \propto \epsilon^{-2}$ なる関係が成り立つことが判る。しかしながらFig. 9 (c)の気孔率と引張強度の関係には、明らかな相関は見い出せない。Fig. 10に引張強度と結晶粒径の関係を示す。これによると引張強度は結晶粒径に依存し、粒径の小さいものほど引張強度は増加することを示している。つまり引張強度は気孔の量に関係せずに、結晶粒の大きさに依存している。

以上より、本実験に用いた黒鉛材料の引張強度は気孔率と無関係である事が判った。しかしながらこの結果は引張強度が気孔量に依存するという従来の考え方を否定するものではない。すなわち同一粒径で気孔率のみを大きく変えた試料では、引張強度の気孔率依存性が認められるであろう。本実験ではTable IIに示されるように比較的気孔量の等しい黒鉛材料を用いたために、引張強度に対する粒度依存性が強く現われたものと考ええる。そしてこのことは黒鉛材料の引張破壊に対する内部欠陥の大きさが、結晶粒度に依存することを示唆するものである。

Fig. 10 Tensile strength vs grain size diagram.

3.2 機械的性質間の相関

Fig. 11 (a), (b), (c)に引張強度と曲げ強度, 曲げ強度と圧縮強度, 引張強度と圧縮強度の関係を示す。すべての図に良い相関関係が認められる。各々の関係式を求めると, (a)より引張強度 σ_t と曲げ強度 σ_b の間には,

$$\sigma_t = 0.87 \sigma_b - 5.82 \quad (4)$$

なる関係が成立する。また(b)より曲げ強度 σ_b と圧縮強度 σ_c の間には,

$$\sigma_b = 0.46 \sigma_c + 0.09 \quad (5)$$

また(c)より引張強度 σ_t と圧縮強度 σ_c の間には,

$$\sigma_t = 0.40 \sigma_c - 6.55 \quad (6)$$

なる関係式が成立する。なお単位はすべてMPaである。

(4), (5)式より引張強度 σ_t を求めると,

$$\sigma_t = 0.40 \sigma_c - 5.74$$

となり(6)式と比べて約0.8MPaの相違がある。このため正確な値は求まりにくい, 引張強度, 圧縮強度, 曲げ強度のうち一つを知れば他の二つのおおよその値が求まることになり, 実用上便利であろう。

3.3 異方性

Fig. 12は異方性黒鉛材料における基底面が優先的に並ぶ方向すなわちwith-grain方向(//)と, これに垂直なacross-grain方向(⊥)の物性値の比についてまとめたものを示す。(a)は熱膨張係数の比とヤング率の比, (b)に電気比抵抗の比とヤング率の比の関係を示す。多結晶黒鉛材料の異方性は結晶のa軸方向が材料成形過程で加圧軸に対し垂直方向へ優先的に配列すること起因する。したがって単結晶でa軸方向とc軸方向の物性値に差のあるものほど, 多結晶黒鉛材料の巨視的異方性を示すことになる。Fig. 12 (a)の熱膨張係数の比($\alpha_{\perp}/\alpha_{\parallel}$)とヤング率の比($E_{\parallel}/E_{\perp}$)の間には,

$$d(\alpha_{\perp}/\alpha_{\parallel})/d(E_{\parallel}/E_{\perp}) = 0.92$$

なる関係が成立する。このことは, 結晶のa軸方向とc軸方向の両者の物性の巨視的物性に現われる比が, ヤング率の異方性の方が熱膨張係数の異方性よりも顕著であることを示唆している。さらにFig. 12 (b)の両者の間には, およそ次なる関係が成立する。

$$d(\rho_{\perp}/\rho_{\parallel})/d(E_{\parallel}/E_{\perp}) = 0.76$$

この関係もやはりヤング率の異方性の方が電気比抵抗の異方性よりも, 巨視的異方性に強く現われることを示している。単結晶の電気比抵抗の異方性はa軸方向に比べてc軸方向が 10^4 倍¹⁵⁾ほど大きく, これは弾性率の異方比よりもはるかに大きい。しかしながら巨視的異方比には弾性率の異方性の方が顕著に現われているが, この原因については今のところ明らかでない。さらに $(\rho_{\perp}/\rho_{\parallel})$ と $(\alpha_{\perp}/\alpha_{\parallel})$ との関係を調べた他の報告¹⁶⁾と, 本実験より得られた結果は良い一致を示した。

(a)

(b)

(c)

Fig. 11 (a) Tensile strength vs bending strength, (b) bending strength vs compressive strength, and (c) tensile strength vs compressive strength diagrams showing good relationships between them.

(a)

(b)

Fig. 12 (a) Thermal expansion vs Young's modulus diagram and (b) electrical resistivity vs Young's modulus diagram, showing the effect of anisotropy on physical properties of graphites.

4. 結 言

多結晶黒鉛材料10銘柄の物理的、機械的性質、すなわち引張強度、圧縮強度、ヤング率、熱膨張係数、電気抵抗、気孔率、黒鉛化度、を調べ、これらの間の相関関係を明らかにした。本実験より得られた結果をまとめると、

(1) ヤング率および熱膨張係数は気孔の体積率に依存し、気孔率の増加に伴い減少する傾向にある。また、気孔率は黒鉛化度と密接に関係し、黒鉛化度の良いものほど気孔率が増加する傾向にある。

(2) ヤング率と熱膨張係数の間には、ヤング率の大きな黒鉛材料ほど熱膨張係数も大きい傾向にある。さらに同一黒鉛材料で異方性を有するものは、その切り出し方向によらず熱膨張係数 α とヤング率 E を用いて、 $\alpha E =$

一定なる関係が成立する。またこの αE の値は各銘柄黒鉛材料の気孔率に依存する。

(3) 電気比抵抗は、黒鉛材料の結晶粒度に依存し、粒の細かいものほどその抵抗値は大きい傾向にある。このことは、微粒黒鉛材料ほど電気抵抗におよぼすバインダーの影響が大きいと考えられる。

(4) 曲げ強度 σ_b 、圧縮強度 σ_c は、気孔率 ϵ と関係し、一部の微粒黒鉛材料をのぞけば経験的に、 $\sigma_b \propto \epsilon^{-1.6}$ 、 $\sigma_c \propto \epsilon^{-2}$ なる関係式で整理できる。

(5) 引張強度 σ_t 、圧縮強度 σ_c 、曲げ強度 σ_b の間には良い相関関係が認められた。したがってこの値のうち一つを測定すれば、他の二つのおおよその値は次なる経験的關係式によって求めることが可能である。

$$\sigma_t = 0.87 \sigma_b - 5.82,$$

$$\sigma_b = 0.46 \sigma_c + 0.09,$$

$$\sigma_t = 0.40 \sigma_c - 6.55$$

なお単位はMPaである。

文 献

- 1) C. R. Houska and B. E. Warren, *J. App. Phys.* **25** (1954) 1503
- 2) B. E. Warren, Proc. 1st and 2nd Conf. Carbon (1956) 49
- 3) S. Mrozowski, Proc. 1st and 2nd Conf. Carbon (1956) 195
- 4) J. M. Hutcheon and M. S. T. Price, Proc. 4th Conf. Carbon (1960) 645
- 5) 山口, 工業化学雑誌, **62**, 1719, (1959)
- 6) W. N. Reynolds, Physical properties of graphite, Elsevier Publishing (1968), p. 81
- 7) J. D. Eshelby, *Proc. Roy. Soc. (London)* **241A** (1957) 367
- 8) R. J. Price, *Phil. Mag.* **12** (1965) 561
- 9) S. Mrozowski, Proc. 1st and 2nd Conf. Carbon (1956) 31
- 10) L. D. Loch and A. E. Austin, Proc. 1st and 2nd Conf. Carbon (1956) 65
- 11) A. L. Sutton and V. C. Howard, *J. Nucl. Mater.* **7** (1962) 58
- 12) Sanada et al., *Tanso* **1972** [No. 70] 71
- 13) W. N. Reynolds, Physical properties of graphite, Elsevier Publishing (1968), p. 85
- 14) W. N. Reynolds, Physical properties of graphite, Elsevier Publishing (1968), p. 81
- 15) W. N. Reynolds, Physical properties of graphite, Elsevier Publishing (1968), p. 91
- 16) 松尾, JAERI-M, 8367, (1979) 35
- 17) J. B. Nelson and D. P. Riley, *Proc. Phys. Soc. London* **57** (1945) 477
- 18) 松山英太郎, 炭素 **1958** [No. 7] 12
- 19) 白石 稔, 他, 工化 **74**, (1971) 1331
- 20) C. Schiller, J. Mering, P. Cornuault et F. Du. Chaffault, *Carbon* **5** (1967) 385