

UDC 662.815 : 539.217 : 539.32

論 文

不規則多孔体としてのコークスの力学的挙動に関する研究*

磯 部 光 利** ・ 鈴 木 吉 哉***

館 充**** ・ 北 川 英 夫****

Fundamental Study on the Mechanical Behavior of Coke as a Material with Randomly Distributed Pores

Mitsutoshi ISOBE, Kichiya SUZUKI,

Mitsuru TATE, and Hideo KITAGAWA

Synopsis:

A miniature bending test method was developed for measuring mechanical properties of coke with better accuracy. Mechanical properties of formed and conventional cokes at room temperature were measured by this method and the effects of pore on them were investigated, taking statistics into consideration. Deformation of a porous body was analysed by the finite element method combined with Monte Carlo method and an attempt was made to develop a method to estimate Young's modulus of coke matrix.

The results are as follows.

- 1) Linear correlation was found between Young's moduli of cokes and maximum bending stress and a possibility of estimating the strength from the measurements of elastic deformation was shown.
- 2) Young's modulus of coke decreased with increasing porosity. The decreasing rate of formed coke was different from that of conventional cokes.
- 3) Young's modulus of coke matrix was estimated by the new method from apparent Young's moduli including the effects of pores.
- 4) From a new viewpoint a comparison was made between the mechanical properties of formed coke and that of conventional one, using the Young's moduli of coke matrix obtained as above.

1. 緒 言

高炉用コークスの強度特性の評価は、従来ドラム強度試験のような冷間での試験法に基づいて行われてきたが、近年熱間における強度特性を直接評価する試みも行われるようになった。このためドラム強度を熱間あるいは熱間反応状態において測定する方法も開発されているが、現状では汎用の常温強度とこれら熱間強度との対応が必ずしも十分明らかにされていないなど、いくつかの問題点¹⁾²⁾がある。

また原料炭事情の悪化の見通しとも関連して、強粘結炭を節減し、弱粘結炭ないし一般炭を活用する技術の一環として成型コークス法が開発されてきているが、成型コークスの品質管理を従来のドラム強度だけで行うこと

には問題がある。この場合ドラム強度の値が従来の室炉コークスの水準を上回つたとしても、それは普通コークスとの形状差や成型時の加圧による硬化のためとも考えられ、高炉内で室炉コークスと同等またはそれ以上の強度を保障できるとは限らないからである。

総じて現行のコークス（冷間）強度試験法は、原料炭種やコークス製造条件が大きく変わらない場合には、歴史的に試された有用性をもっているが、条件の大きな変化のもとでは必ずしも十分とはいえない。こうして現行試験法の域をこえて、コークスの熱間強度を評価できる方法の確立が求められており、これにこたえるため、コークス強度についての基本的なアプローチが必要になっている。しかしコークスの強度指標ではなく、強度特性そのものの評価のための試験法としては、井上らの共鳴

* 昭和 53 年 10 月本会講演大会にて発表 昭和 54 年 6 月 5 日受付 (Received June 5, 1979)

** 東京大学大学院 (現: (株)神戸製鋼所) (Graduate School, The University of Tokyo, Now Kobe Steel, Ltd.)

*** 東京大学生産技術研究所 (Institute of Industrial Science, The University of Tokyo)

**** 東京大学生産技術研究所 工博 (Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, 7-22-1 Roppongi Minato-ku 106)

振動法によるヤング係数の測定³⁾、白石らのヌープ硬度の測定⁴⁾、PATRICK ら⁵⁾ や宮川ら⁶⁾ の間接的引張試験法などがあるだけであり、しかも宮川ら⁶⁾ のものを除いては、各種成型及び室炉コークスの材質比較の研究に適用された例は見られないようである。

本研究はコークスの静的強度ないし耐荷力を基本的に評価するという立場から、その冷間における基礎的な機械的性質を調べることに、およびそのための試験方法を開発することをめざしたものである。このためまず新たにミニチュア 4 点曲げ試験法を開発した。この試験法は、成型コークスから採取した小さな試験片についても基礎的な変形特性や強度特性を精度よく測定できること、共鳴振動法のような動的測定法ではなく、静的な荷重方法・測定方法を用いること、同一試験片についてヤング係数と最大曲げ応力を同時に測定できることを特長としている。この試験法により各種の成型及び室炉コークスの常温での最大曲げ応力とヤング係数とを測定し、これらと気孔率などとの相関を求めた。さらに宮本らの砥石などについての有限要素法による研究^{8)~10)}を参照して、気孔が不規則に分布する多孔体としてのコークスの弾性挙動の統計的シミュレーション解析を行い、その結果と実験的に求めたみかけの弾性係数とから、気孔を除いたコークスのマトリックス部（炭素基質部）の弾性係数を推定し、各種の成型及び室炉コークスの材質比較を行った。

2. 実験方法

2.1 試験片

試料としては 3 種類の成型コークス、4 種類の室炉コークス、1 種類の人造黒鉛電極（グラファイト）を用いた。Table 1 にその物性値を示す。成型コークスでは真密度の低下とともに気孔率が増加している。一方、室炉

Table 1. Physical properties of cokes.

Kind of Coke	True density (g/cm ³)	Porosity (%)		
		mean	s. d.	data
Formed Coke A	1.99	35.3	1.4	47
Formed Coke B	1.85	36.5	3.3	86
Formed Coke C	1.72	39.1	2.0	44
Conventional Coke A	1.91	45.5	1.5	31
C. D. Q.	2.00	48.4	1.8	44
Conventional Coke B	1.97	50.7	3.2	23
Conventional Coke C	1.97	59.2	2.1	5
Graphite	2.10	17.6	1.1	8

C. D. Q. - dry-quenched coke
s. d. - standard deviation

コークスでは成型炭（30%）配合コークス（A）を除いて、真密度はほぼ 2 g/cm³ に近い値を示している。

成型コークス試料は A（ピロー型）、B（マセック型）、C（ピロー型）の 3 種で、その寸法は A 種は 62×45×35 mm、B 種は 56×56×35 mm、C 種は 83×56×42 mm である。

これらの成型コークスから板状の試験片を切り出したが、その寸法は成型コークスの大きさの制限から長さ 41 mm、幅 9~11 mm、厚さ 3~5 mm とした。寸法関係からみて、1 個の成型コークスから、10 個程度の試験片を切り出せるはずであるが、内部に巣やクラックがあるため、実際には平均 4 個程度にとどまった。一方室炉コークスは 400×100×100 mm 大の大塊を 50×50×50 mm 大の小塊とした後、同様な試験片を作成した。この場合には気孔率が 50% 前後もあつて、試験片の切り出しにおける歩留りがきわめて悪く、1 個の小塊から 2~3 個の試験片しかえられなかつた。

以上のようにして切り出した試験片は、エメリー紙で磨いた後水洗し、150°C で 12 h 以上乾燥した。乾燥後試験片の重量と寸法を測定して、みかけ密度を算出し、曲げ試験に供した。

2.2 曲げ試験

Fig. 1 に今回開発したミニチュア 4 点曲げ試験法における試験片寸法と負荷方法の原理を示す。精度のよい一様分布の純曲げを与えるため、ミニチュアベアリングにより支持用ロールの摩擦抵抗を極力減らした。インストロン型万能試験機を使用し、一定のクロスヘッド速度で荷重をかけ、試験片中央のたわみ δ と荷重 W との関係求めた。ヤング係数 E を求めるのには次の式¹¹⁾を用いた。

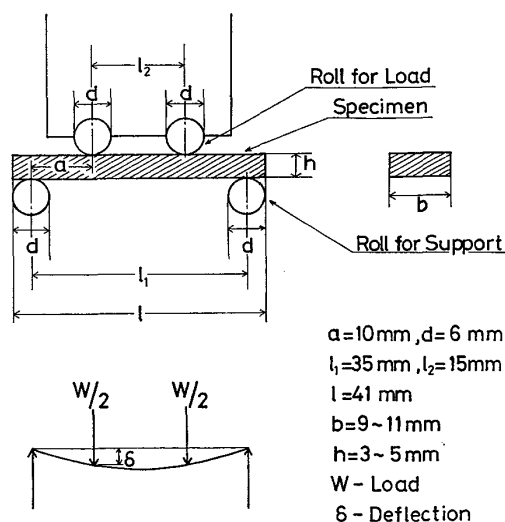


Fig. 1. Bending test.

$$E = \frac{3a^2}{bh^3} \left(l_1 - \frac{4}{3}a \right) \frac{W}{\delta} \dots\dots\dots (1)$$

試験機の剛性はグラファイト試験片の厚さ h を変化させることにより求めた。Fig. 2 にその結果を示す。各荷重点でのたわみ δ と $1/h^3$ との関係を下図のごとくプロットし、これらを連ねてえられる直線と縦軸 ($1/h^3 = 0$) との切片から試験機のたわみが測定される。これを荷重に対してプロットすれば、上図のごとく荷重-試験機のたわみ線図が求まる。この補正を施して求めたヤング係数の値には、 $h=2\sim 7\text{ mm}$ 、 $b=5\sim 20\text{ mm}$ の範囲では、寸法効果はみとめられなかつた。またクロスヘッド速度の影響も $0.1\sim 10\text{ mm/min}$ 範囲ではみられなかつたので、以後のクロスヘッド速度には 0.1 mm/min を採用した。

最大曲げ応力 $\sigma_{b\text{ max}}$ は、たとえば Fig. 3 に示すとき荷重-たわみ曲線における最大荷重 W_{max} を用いて、次の式¹¹⁾で求めた。

$$\sigma_{b\text{ max}} = \frac{3a}{bh^2} W_{\text{max}} \dots\dots\dots (2)$$

ポアソン比の測定は、試験片の下面に $7\text{ mm}\phi$ 円形ベースのクロスゲージをアロンアルファで接着し、曲げ試験中に行つた。

2.3 気孔率とモード気孔径

真密度は JIS K 2151 の蒸留水煮沸法により測定し、みかけの密度は試験片の重量と体積から求めた。この真

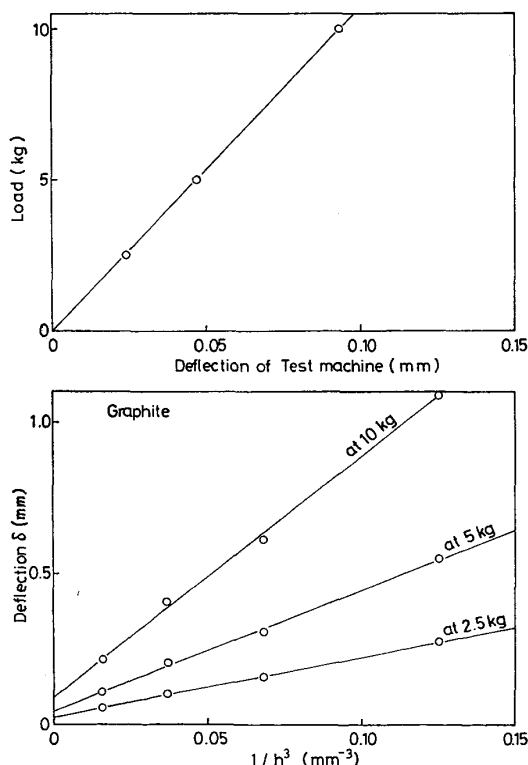


Fig. 2. Correction of Young's Modulus.

密度とみかけの密度から気孔率を求めた。

モード気孔径は、顕微鏡写真で個々の気孔径を測定し、この度数分布から求めた。顕微鏡用試料は曲げ試験片を半分に切り、樹脂に埋込んだ後、表面の気孔内にアロンアルファを含浸させ、固化後研磨した。Photo. 1 にその顕微鏡写真の例を示す。黒つぶくややぼけている部分(a)あるいは灰色に見える部分(b)が気孔である。灰色の部分のうち小孔群または不規則網目のような様相を呈するものはイナーート組織とみて気孔径の測定からは除いた。成型コークスC種の場合、この網目状組織はすべて微細な気孔であるが、個々の気孔径の測定はできなかった。それ以外の場合には気孔断面形状をまず楕円形に近似し、その長径と短径を測定した後、その楕円と同面積の円の半径を気孔径とした。測定は成型コークスA、B、室炉コークスA、C.D.Q. の4種について行い、各コークスについてそれぞれ2個の顕微鏡試料の、それぞれ56個所について顕微鏡写真を撮り、このうち任意の各5枚から気孔頻度を求めた。測定した気孔の総数は成型コークスで約1000個、室炉コークスで約500個である。

3. 実験結果

3.1 コークスの荷重たわみ曲線

Fig. 3 にコークスの曲げ試験によつて得られた荷重-たわみ曲線の代表的な測定例を示す。荷重は中央2荷重点での荷重の合計 W であり、たわみは支点に対する荷重点の相対変位 δ である。得られた荷重-たわみ曲線はA、B2種類の型に大別できた。A型は最大荷重以下の荷重

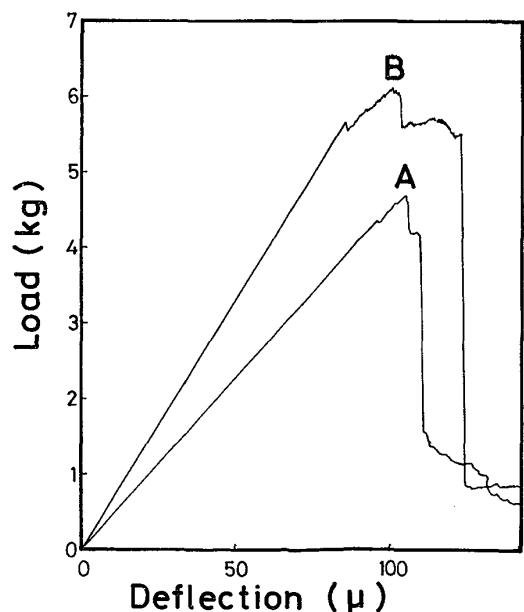


Fig. 3. Load-deflection curves.

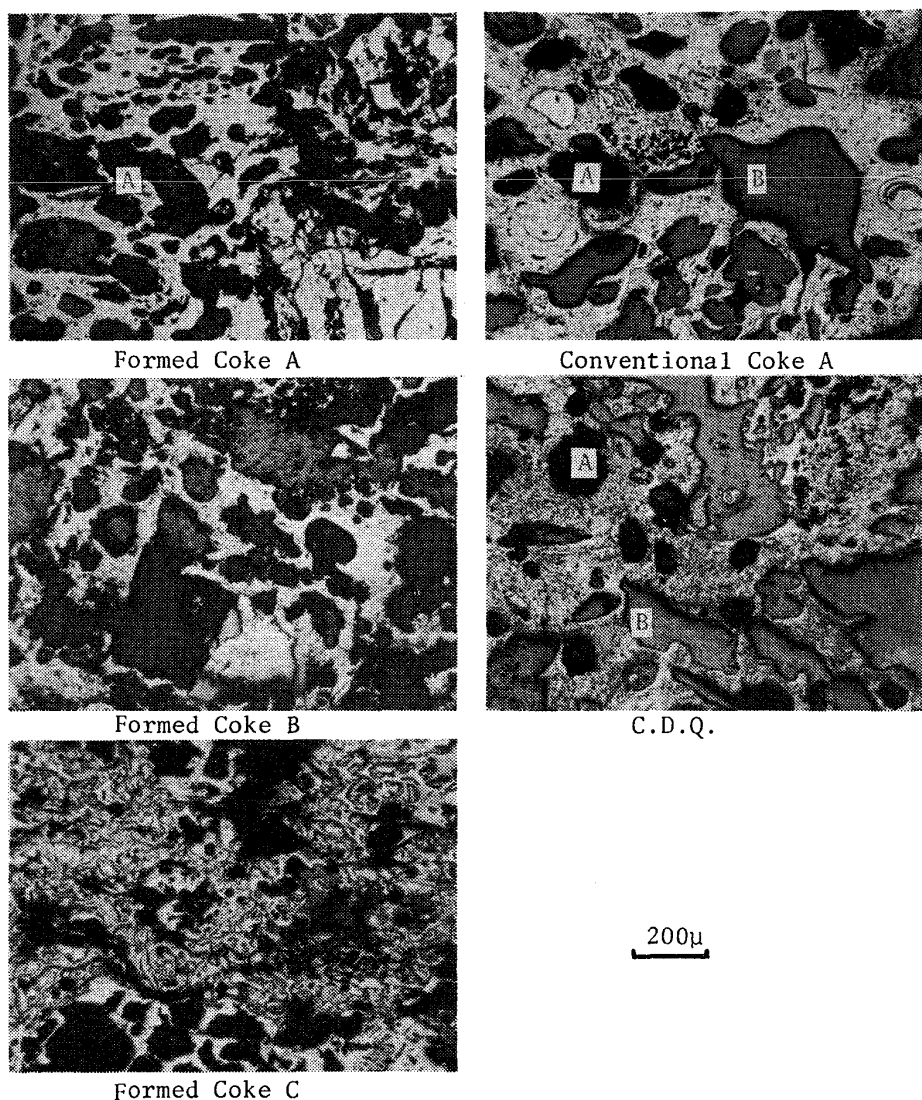


Photo. 1. Microstructures of formed and conventional cokes.

レベルで荷重の一時停滞あるいは降下（曲線上ではステップ）が起こり，その後最大荷重を経て，荷重の急激な低下を示した．一方B型は最大荷重の付近で脈動的な荷重増減の繰り返しが続く（曲線上では踊り場，プラトー），その後荷重の低下が見られた．A型とB型はどのコークス種にも見られたが，その割合は，気孔率のもつとも低い成型コークスAでA型曲線の出現率をもつとも多くなり，気孔率の増加とともにB型曲線の占める比率が多くなった．しかし成型コークスCの場合には，上記の一般傾向と異なり，ほとんどB型曲線であつた．このことは顕微鏡写真にも示唆されているように，このコークスの構造，組織が特殊なもので，局所的な小破壊が連続して生じた後，試験片全体の不安定を招くようなものであつたことを示す．

3.2 コークスのヤング係数と最大曲げ応力

Fig. 4 にヤング係数 E と最大曲げ応力 $\sigma_{b \max}$ との関

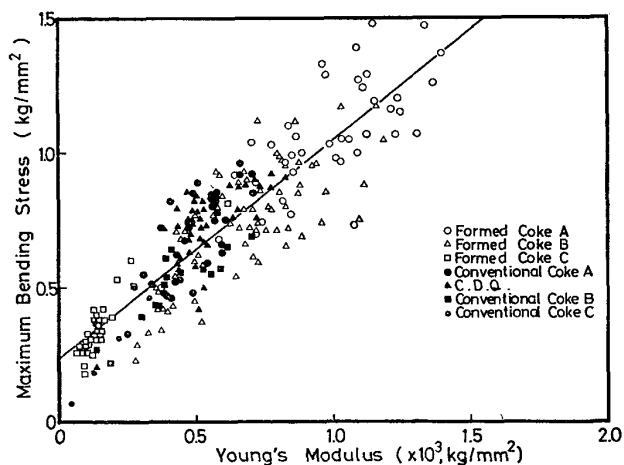


Fig. 4. Relation between Young's modulus and maximum bending stress.

係を示す．この図は，ヤング係数と最大曲げ応力との間に，コークス種によらず共通のかなりよい正の相関があ

ることを示している。すなわち右上から左下に向かつて成型コークス A, B, C, D, Q., 室炉コークス A, B, C, 成型コークス C の順に直線的に並ぶ。この回帰直線を次式と図中の直線で示す。

$$\sigma_{b \max} = 0.23 + 0.0008E [\text{kg/mm}^2] \\ (5 \text{ kg/mm}^2 < E < 1400 \text{ kg/mm}^2) \dots (3)$$

ただし標本相関係数; $r=0.89$, 標本数; $n=245$

同様にヤング係数と最大曲げ応力との関係が正の相関を示すものに鋳鉄などがある¹²⁾。鋳鉄は微小欠陥を内部に多数含んでいて脆性を呈する材料とされ、コークスと類似性が見られる。全体からみてコークスのみかけのヤング係数は成型コークスで 1000 kg/mm^2 , 室炉コークスで 500 kg/mm^2 前後の値を示し、一方最大曲げ応力は成型コークスで 1.0 kg/mm^2 , 室炉コークスで 0.6 kg/mm^2 前後の値となる。いずれにしても、コークスのヤング係数と最大曲げ応力との関係が正の相関を示すことから、ヤング係数から最大曲げ応力のある程度予測することが可能と考えられる。またヤング係数と最大曲げ応力とのこの関係は、コークスの耐壊が荷重ではなく、むしろ変形量によつて強く規定されることを示唆している。

Fig. 5 に最大曲げ応力と気孔率との関係を示す。この関係は負の相関を示し、成型コークスと室炉コークスとではやや異なつた関係があるように見られる。またグラファイトはコークスと比較してかなり高い最大曲げ応力を示している。

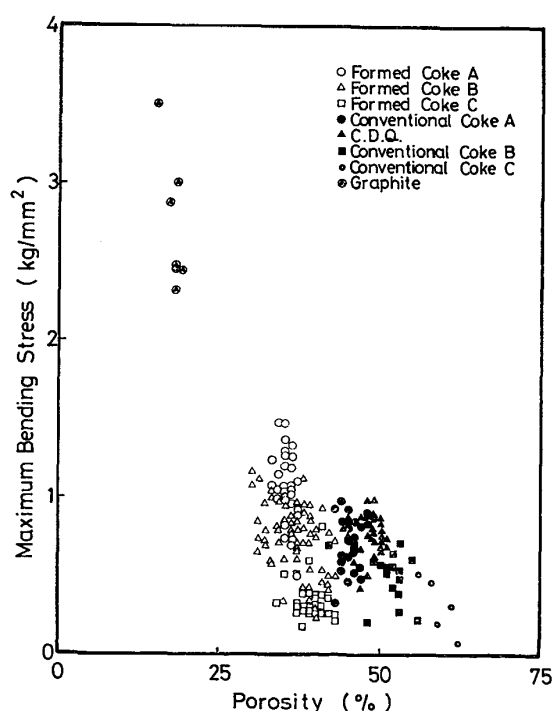


Fig. 5. Relation between maximum bending stress and porosity.

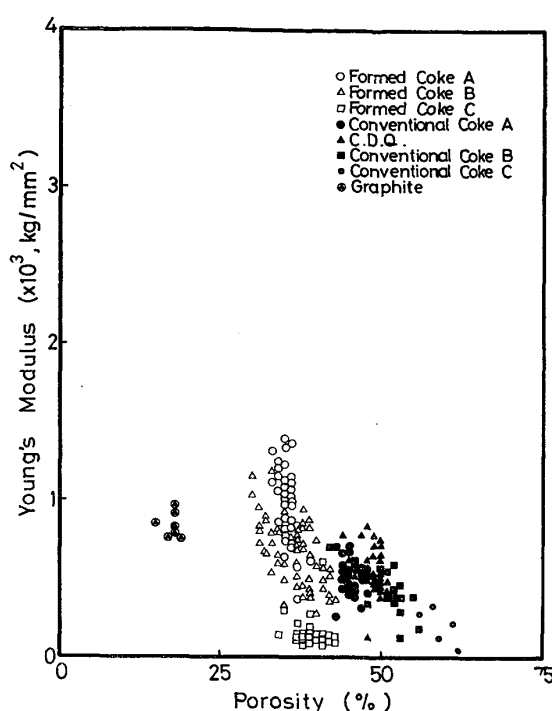


Fig. 6. Relation between Young's modulus and porosity.

Fig. 6 にヤング係数と気孔率との関係を示す。最大曲げ応力とヤング係数が正の相関を示すことから、Fig. 6 には Fig. 5 と同様な関係が見られる。

グラファイトの荷重-たわみ曲線には、荷重上昇時に高荷重部で非線形挙動がみられた。また Fig. 5, 6 の比較からも推定されるように、Fig. 4 の最大曲げ応力とヤング係数との関係では、グラファイトの実験値（図には示していない）はコークスにおける直線関係からかなりずれていた。このことは上記の結果がコークスとグラファイトの材質の違いによることを示唆したものとする。

3.3 コークスの気孔径分布

Fig. 7~8 に成型コークス及び室炉コークスの顕微鏡写真から測定した気孔径分布を示す。後述のコークスの弾性挙動のシミュレーションが2次元的事実であることと対応して、横軸に気孔径、縦軸に断面積の重みをつけた気孔径頻度(%)をとつた。気孔径分布は成型コークス A が一番鋭いピークを示し、気孔率の増加とともにしだいに平坦になりながら大気孔側に移行していく。モード気孔径は、気孔径分布の最大頻度を示す気孔径であるが、分布をヒストグラムで得たので、以下のように、ピークを示す区間の上下限値の2乗平均をとつた。

$$\text{Porosity (P)} = 35\% \quad \bar{r}_i = \sqrt{\frac{27^2 + 45^2}{2}} = 37(\mu)$$

..... (4)

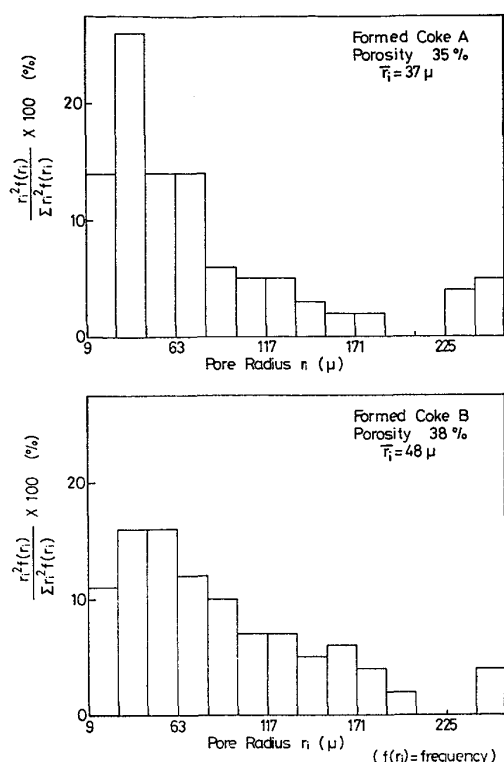


Fig. 7. Weighted frequency distributions of pore radius of formed coke.

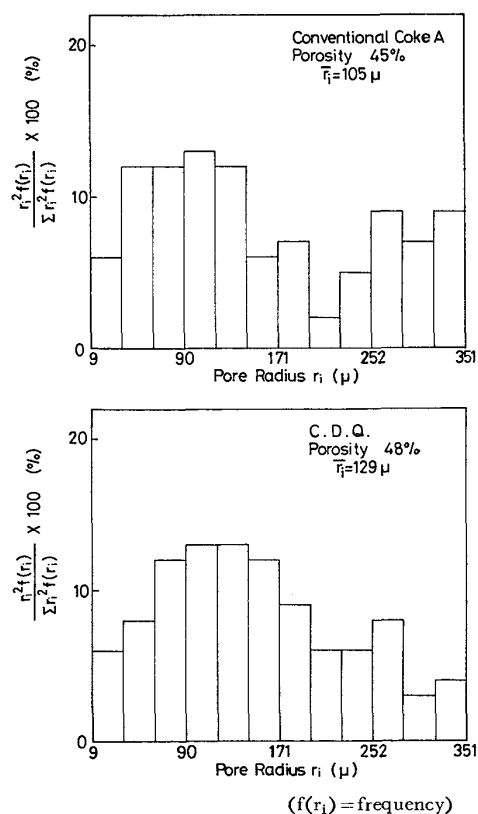


Fig. 8. Weighted frequency distributions of pore radius of conventional coke.

$$\text{Porosity (P)} = 38\% \quad \bar{r}_1 = \sqrt{\frac{27^2 + 63^2}{2}} = 48 (\mu) \quad \dots \dots \dots (5)$$

$$\text{"} = 45\% \quad \bar{r}_1 = \sqrt{\frac{36^2 + 144^2}{2}} = 105 (\mu) \quad \dots \dots \dots (6)$$

$$\text{"} = 48\% \quad \bar{r}_1 = \sqrt{\frac{63^2 + 171^2}{2}} = 129 (\mu) \quad \dots \dots \dots (7)$$

(6), (7)の示すように、室炉コークスの場合は、かなり幅広い区間で平均をとることになった。

4. コークスの弾性挙動のシミュレーション

4.1 コークスのモデル化

Fig. 6 に示されるように、多孔質構造体としてのコークスのヤング係数は、同一の気孔率において著しく変動する。この変動は気孔径、気孔の形状、気孔の方向性及び位置などがコークス内にランダムに分布することによって生じるものと考えられる。この考えをモデル化し、微視的構造モデル^{8)~10)}による解析法をコークスに適用する。モンテカルロ法によつてこの不規則多孔体を解析するためまずコークスを2次元構造体とし、これを構成する単位として気孔のないマトリックス部と気孔を含むポア部の2種を設定する。この2種の構造単位を2次元的にランダムに配置し、全体を有限要素法で2次元弾性応力解析を行うという操作をくり返すのである。

従来このような手法は、マトリックス部について既知であるとした弾性係数から、多孔体のみかけの弾性係数を推定するために開発されたようである。しかしながらコークスの場合はマトリックス部の弾性係数が不明である。したがつて本研究では、多孔体の弾性解析においてこの微視的構造モデルが十分成立するものと考え、コークスのみかけのヤング係数とポアソン比から、マトリックス部のヤング係数とポアソン比を推定するのにこの解析法を適用したのである。実用的にはコークスは多孔体のまま使用されるから、みかけのヤング係数が重要であるとも考えることもできる。しかし製造条件の異なる成型コークスと室炉コークスとを、単にみかけの物性値によつてのみ比較することには問題がある。たとえば Fig. 6 に示されているように、成型コークスと室炉コークスとは気孔率の水準によつて二つのグループに分かれているように見える。これは成型コークスでは、成型の直接的効果としての気孔率の著しい低下と原料炭種にも依存する材質の変化があり、この両者の影響がみかけの物性値に現われることを示唆するものである。したがつて気

孔の影響を除いたコークスのマトリックス部のヤング係数を推定できるならば、成型コークスと室炉コークスとの材質の機械的性質に関する比較を、また別の視角から行うことが可能になると考えられる。このような理由によりコークスの弾性挙動のシミュレーションを行つたのである。以下にその解析手法を示す。

4.2 計算方法

Fig. 9 に本研究でのシミュレーションの方法を示す。まずコークスを2次元構造体として考え、その構造単位としてマトリックス部要素と気孔を含むポア部要素とを設定する。次にマトリックス部のヤング係数とポアソン比を仮定する。ポア部要素については、ある気孔率でのモード気孔径は前述のように測定されているのでこれを使えるが、この要素の大きさの決定に任意性が残る。そこでここでは一つのポア部要素の気孔面積率を72%と仮定し、これとモード気孔径とからこの要素の大きさを決定した。ポア部の気孔面積率が72%という仮定は、この部の1/4モデルの有限要素解析における要素数60とのかねあいから導入したものであり、要素数をこれより多くすれば、72%より大きくとることもできる。ポア部のこの気孔面積率は気孔壁の厚みにも関係し、また系全体の有限要素解析において気孔率の上限界を72%とすることにも対応するものであり、Fig. 5, Fig. 6の測定値の範囲を十分に包含する。以上により与えられた気孔率でのポア部の有限要素解析に必要なデ

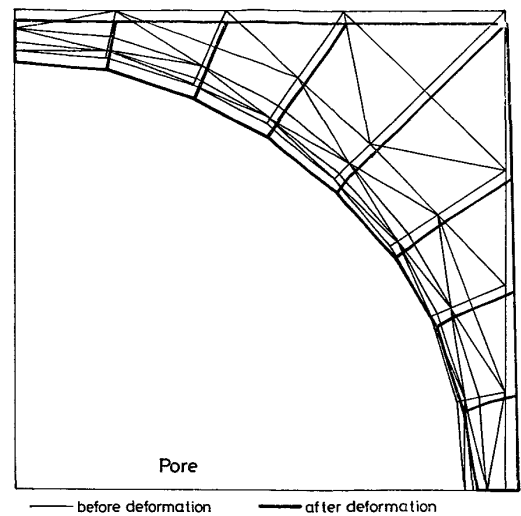


Fig. 10. Deformation of pore element.

ータがそろつたので、これを使つて解析することによりポア部のみかけのヤング係数とポアソン比を決定した。

Fig. 10 にポア部の有限要素解析の結果の一例を示す。この図は4分割したポア部の変形状態を示すもので、変形をやや誇張して示した。境界条件は一様分布変位の一軸圧縮とし、細い線が変形前、太い線が変形後を示す。気孔の形状は円形としたが、これを楕円形にして、気孔断面形における方向性を考慮することもできる。ヤング係数は上下端の荷重方向変位とそこでの反力との比より求め、ポアソン比は横方向変位の平均値と荷重方向変位との比より求めた。Table 2に使用したデータを示す。ポア部の気孔面積率を一律に72%としたため、そのポアソン比はマトリックス部と同様に一定値を示した。もしマトリックス部のヤング係数を同一にしたならば、ポア部のヤング係数も同一の値を示したはずである。このことから次に行う系全体の解析には、気孔率によつて決定されるマトリックス部要素数とポア部要素

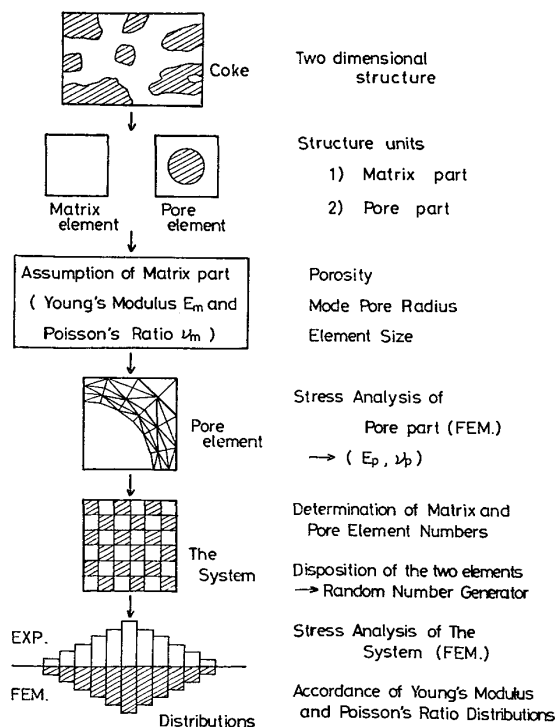


Fig. 9. Simulation method.

Table 2. Data of computer simulation.

Number of elements		Pore part the system 60 7×7=49			
Matrix part	$E(\text{kg/mm}^2)$	3 000	2 100	2 000	2 300
	ν	0.01			
Porosity, P (%)		35	38	45	48
Mode pore radius (μ)		37	48	105	129
Element size (μ)		77	100	220	270
Porosity of pore part (%)		72			
Pore part	$E(\text{kg/mm}^2)$	280	200	210	240
	ν	0.36			
Number of matrix elements		25	23	18	16
Number of pore elements		24	26	31	33

数との比が重要であることがわかる。

次に系全体の解析の手順を述べる。まず気孔率からマトリックス部とポア部との要素数を決定する。ここでは系全体の要素数を $7 \times 7 = 49$ とした。次に乱数に従ってマトリックス部あるいはポア部の配置を決定する。以上のデータを用いて系全体の有限要素解析を行うことにより、みかけのヤング係数とポアソン比が決定される。

Fig. 11 に系全体のシミュレーションの結果の一例を示す。ポア部要素と同様に境界条件は上下端で一様分布変位の圧縮とした。図中の細い線が変形前、太い線が変形後を表す。図中で変形が特に大きいところにポア部要素が位置しているはずである。

なお、実験法が曲げ試験であるのに、シミュレーションは圧縮で行っているが、これは、弾性領域内では、曲げ、圧縮のいずれも同じヤング係数、ポアソン比を用いてよいと考えたからである。

以上のようにして、ある配置でのみかけのヤング係数とポアソン比を計算し、次に別の配置についてこのような計算を繰り返す。こうして、同一気孔率について各 25 の異なった配置についてそれぞれ計算し、系全体のヤング係数とポアソン比を統計的に決定するのである。このさい計算値の分布と実測値の分布とが一致するように、マトリックス部のヤング係数とポアソン比をパラメータとして変化させることによって、マトリックス部のヤング係数とポアソン比を決定することができる。解析には成型コークスの 2 種と室炉コークス 2 種、計 4 種を用いた。Table 2 において気孔率 $p=35, 38, 45, 48\%$ は、それぞれ成型コークス A、成型コークス B、室炉コークス A、C. D. Q. に対応する。マトリックス部とポ

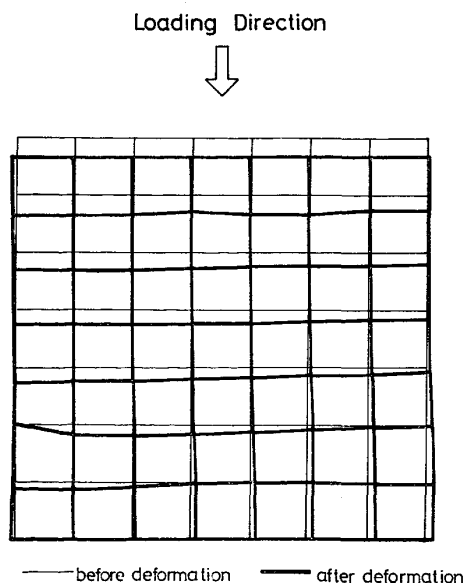


Fig. 11. Deformation of the system.

ア部の要素数の比は気孔率 35% ではほぼ 1:1 となり、気孔率の増加とともにポア部の要素数が増加する。気孔率 72% の時すべてがポア部要素となり、一方気孔率 0% の時にはすべてがマトリックス部要素となる。

4.3 計算結果

計算の実行にあたっては、各コークス種（すなわち各気孔率）ごとにマトリックス部のヤング係数をパラメータとして変化させ、系全体のヤング係数の計算値の頻度分布形をなるべく実測値のそれに近づけるようにした。一方ポアソン比については、その実測値の精度に不安があるので、各コークス種ごとに頻度分布形を接近させることを考えず、さしあたりマトリックス部のポアソン比を一定とし、その値は計算した全コークス種を通じて計算値のばらつきが実測値のばらつき内に入るように選んだ。Fig. 12 と Table 3 はマトリックス部のヤング係数とポアソン比の値を Table 2 のようにとつたときの計算結果である。

このようにして得られた系全体のヤング係数の計算値の平均値は、Table 3 に示すように、実測値のそれよりわずかに小さいが、両者はよい一致を示しているといえよう。標準偏差の計算値は気孔率の増加とともに急速に減少しているが、実測値は必ずしも同じ傾向になつていない。またポアソン比の計算値の平均値は実測値のそれとよく一致しているとはいえないが、前述した計算上の

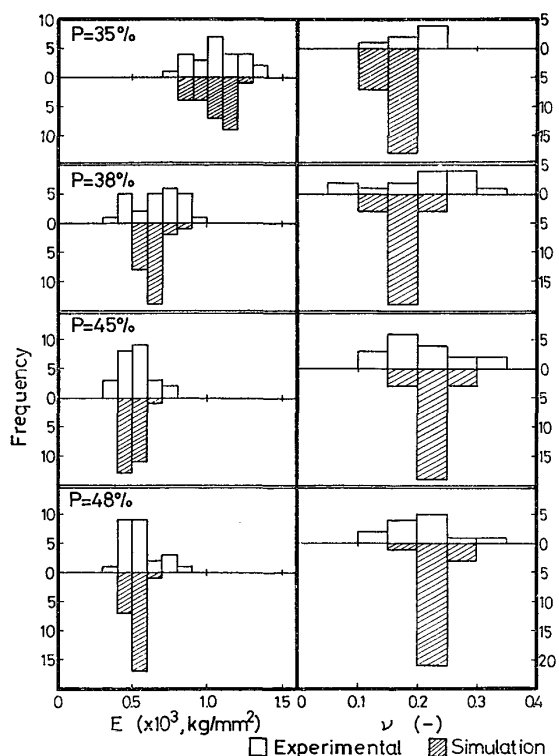


Fig. 12. Simulation result of young's modulus (E) and Poisson's ratio (ν).

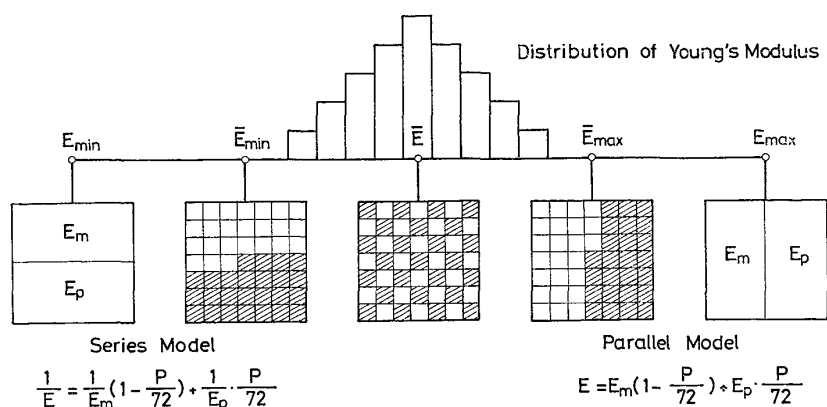


Fig. 13. Series model and parallel model.

Table 3. Young's modulus E and Poisson's ratio ν of coke.

Porosity (%)			35	38	45	48
E (kg/mm ²)	EXP.	Mean	1 070	660	530	540
		s. d.	160	160	100	120
		n. s.	25	25	25	25
	CAL.	Mean	1 040	640	500	520
		s. d.	110	70	50	30
		n. d.	25	25	25	25
	Series model		500	360	320	350
	Parallel model		1 610	1 010	830	870
ν	EXP.	Mean	0.20	0.21	0.22	0.21
		s. d.	0.30	0.07	0.07	0.05
		n. s.	7	14	17	13
	CAL.	Mean	0.16	0.18	0.22	0.24
		s. d.	0.02	0.02	0.02	0.02
		n. d.	25	25	25	25

s.d.—standard deviation

n.s.—number of specimens

n.d.—number of different dispositions

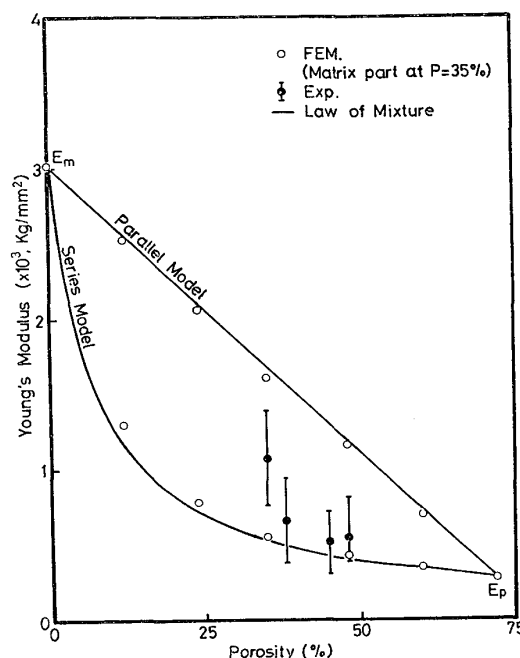


Fig. 14. Law of mixture.

考慮条件は満足しており、計算値が実測値を逸脱することはない。

4.4 考察

4.4.1 複合則

計算結果ではマトリックス部のヤング係数はコークス種によつて異なるということになったが、マトリックス部のヤング係数が同一で、気孔率が変化したときのコークスのみかけのヤング係数の変化を、複合則¹³⁾を用いて考えてみる。

複合則によれば、一般に分散型複合材料の弾性係数の上下限は、それぞれ並列モデル、直列モデルによつて与えられるとされている¹³⁾。Fig. 13 にこれらのモデルを示した。この複合則をマトリックス部要素とポア部要素から成る系としてのコークスに適用する。Fig. 14 はマ

トリックス部のヤング係数として、気孔率 35% の場合の値を用い、Fig. 6 のヤング係数と気孔率との関係に適用した例である。実線は Fig. 13 に記入した式による計算値で、複合則によると上・下限値を与えるはずである。白丸が有限要素法による解であるが、これらの点はすべて上述の上・下限曲線よりやや内側に落ち、複合則にくらべて、有限要素法による解が若干狭い上・下限幅を与えることがわかる。これは、シミュレーションと有限要素法による解析では、Fig. 13 に示したヤング係数の最大値 ($E_{\max}$) および最小値 ($E_{\min}$) に対応する要素配列に、2 種の要素が共存する行または列が存在することによるものである。また実測値は平均値および最大・最小値で表示してあるが、気孔率 35% の場合は上・下限曲線の間に完全におさまっている。気孔率が

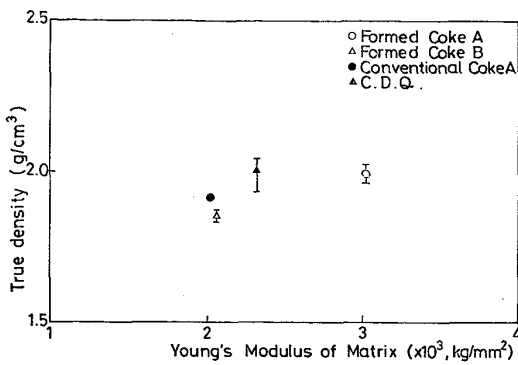


Fig. 15. Relation between Young's modulus of matrix and true density.

35% 以上の場合も平均値は同じ上・下限曲線の間にあるが、平均値以下の部分は下限曲線からはみ出している。これはマトリックス部のヤング係数の値を一定と仮定したことによるものと考えられる。以上の結果はこの統計的シミュレーションと有限要素法による計算の合理性を示し、あわせてマトリックス部のヤング係数をコークス種ごとに変わるものとして評価することの必要性を補足説明するものと考えられる。

4.4.2 マトリックス部のヤング係数と真密度

Fig. 15 にマトリックス部のヤング係数と真密度との関係を示す。両者の間に正の相関の傾向があるようにも見られる。さらに成型コークスと室炉コークスとでは、その相関に違いが見られるようである。

4. 結 言

ミニチュア4点曲げ試験法を開発し、各種成型及び室炉コークスについて基礎的な機械的性質を測定し、その気孔率依存性を調べた。さらに多孔体の弾性挙動のシミュレーション解析を行い、上記の結果を用いてマトリックス部のヤング係数を推定した。その結果次のような知見を得た。

(1) ミニチュア曲げ試験法は、従来のドラム試験法と比べて、成型コークスと室炉コークスとの常温における相違を材料強度の差で直接示すことができる。

(2) コークスのみかけのヤング係数は、コークス種によらず、最大曲げ応力との間で共通の正の相関を示した。これはヤング係数の大小から強度を予測する可能性を示したものとえよう。

(3) コークスは強度値にばらつきの大きい多孔体で

あるが、その寸法、配置が不規則に分布する気孔の影響を考慮したモデル化が可能であり、そのシミュレーション解析から強度値のばらつきも理解でき、かつマトリックス部のヤング係数を推定できる。

(4) このマトリックス部のヤング係数の差に着目するという新しい観点から、各種の成型および室炉コークスの材質を比較することが可能になる。

本研究はコークスの常温における機械的性質を対象としたが、その結果、この研究の延長線上にあつて、しかも熱間強度という究極的な目的に迫るための研究課題もあきらかになつたように思われる。高温曲げ試験によるマトリックス部の高温における機械的性質の調査や、高温反応による気孔状態の変化とその影響の調査などがそれである。

終りに本研究の遂行にあたり有益な御助言をいただいた千葉大学 井上勝也教授、電気通信大学 本間恭二助教授、東京大学生産技術研究所小倉公達助手、ならびに早稲田大学大学院寺沢優一の諸氏に深謝する。

文 献

- 1) 城本義光, 松岡 宏, 本場崇一, 米沢賢一: コークスサーキュラー, 18 (1969), p. 126
- 2) 井田四郎, 西 徹, 仲摩博至: コークスサーキュラー21 (1972), p. 252
- 3) 井上勝也, 谷 秀夫: 燃協誌, 33 (1954), p. 587
- 4) 白石 稔, 熊井順二郎, 木村英雄, 吉田雄次: 燃協誌, 46 (1967), p. 483
- 5) J. W. PATRICK and A. E. STACEY: Fuel, 51 (1972), p. 81, p. 174, p. 206, 52 (1973), p. 27, 54 (1975), p. 213, p. 256
- 6) 宮川重夫, 藤嶋一郎: 燃協誌, 54 (1975), p. 983, 55 (1976), p. 30
- 7) 永井文雄, 佐藤和郎, 神田忠泰: 材料科学, 12 (1975), p. 56
- 8) 宮本 博, 本間恭二: 材料科学, 12 (1975), p. 12
- 9) 宮本 博, 尾田十八, 坂田信二: 機械学会誌, 77 (1974), p. 146
- 10) 宮本 博, 尾田十八, 坂田信二: 機械学会論文集, 41 (1975), p. 748
- 11) 日本機械学会編: 機械工学便覧改訂第五版 (1968), 4分冊, p. 42
- 12) 沖 進, 加山延太郎: 溶解鑄造・鑄物 (1962), p. 176, [朝倉書店]
- 13) 藤井太一: 材料, 25 (1976), p. 199