X 線による不均質金属材料の強度に関する研究*

(鑄鉄の X 線応力測定について)

平 修 二** 林 紘三郎*** 西野征規男***

X-Ray Investigation on the Strength of Inhomogeneous Metallic Materials

(X-Ray Stress Measurement of Cast Iron)

by

Shuji TAIRA, Kozaburo HAYASHI and Yukio NISHINO

(Faculty of Engineering, Kyoto University, Kyoto)

The X-ray method of stress measurement is taken as a unique method of non-destructive measurement of local surface stress. In the past few years, the experimental technique and theory of the stress measurement by X-rays have been remarkably improved, and the recent studies in this field have achieved the sufficiently accurate measurement of applied or residual stress for homogeneous metallic materials such as iron, steel, light metal, alloy and so on. However, the method of X-ray stress measurement is not established for inhomogeneous metallic materials such as cast iron, and there remain yet a few problems upon which there is much controversy.

One of the most important problems is to find out the suitable elastic constant for the practical X-ray stress measurement of cast iron.

In the previous papers, the authors discussed the effects of graphite on the deformation behavior of spheroidal and flake graphite cast iron from the lattice strain measured by X-rays. It was also suggested that the X-ray elastic constant obtained at after 3 to 10 stress cycles should be used for X-ray stress measurement of cast iron, and that its constant obtained by X-rays is different from the value obtained by the mechanical method. Besides, there is a wide difference in these values obtained by X-rays in cast iron from those obtained in wrought iron or steel.

In the present investigation, further experiments were made of the application of X-ray stress measurement to cast iron. The elastic constant of spheroidal and flake graphite cast iron was measured by the mechanical method and by X-rays in detail. The X-ray measurement of applied stress and residual stress induced by grinding was carried out using the obtained X-ray elastic constant.

The following conclusions were mainly obtained for these materials ;

(1) The macroscopic elastic modulus (E_M) decreased with the increase of stress. For flake graphite cast iron it decreased having a straight line relation with stress. On the other hand, the elastic modulus passed through two-stages for spheroidal graphite cast iron. It showed gradual decrease in a linear relation to stress to the stress of 25 kg/mm² and, after that, the rate of its decrease became larger until fracture occurred.

(2) The macroscopic elastic modulus (E_M) of flake graphite cast iron was markedly different from that of spheroidal graphite cast iron. It is believed that this wide difference is due to the effect of difference in the shape of the graphite on each deformation behavior.

(3) On the other hand, the X-ray measurement yielded almost the same elastic constant for the two materials. It is considered that the value of the X-ray elastic constant of cast iron is controlled not so much by the shape of graphite as by the volume ratio of graphite to matrix. Therefore, it may be said in conclusion that the elastic constant measured by X-rays should be used in the X-ray stress measurement of cast iron.

(4) If the X-ray elastic constant was used for stress calculation, the applied stress could be measured by the X-rays having a good correlation with mechanically applied stress.

(5) A good correlation between the value measured by the X-ray method and by the mechanical method was found for the residual stress induced by grinding.

(Received Aug. 14, 1968)

* 原稿受理 昭和43年 8月14日

** 正 会 員 京都大学工学部 京都市左京区吉田本町

*** 学生会員 京都大学大学院 京都市左京区吉田本町

1 緒 言

X線による応力測定法は、金属材料の残留応力を非破壊的に測定できる唯一の方法として、また局所的な表面応力の測定方法として、その応用の範囲はきわめて広い、最近では測定方法の向上、ならびに測定装置の著しい改良に伴い、鉄鋼や軽金属などについては、ほとんどいかなる場合についてもきわめて精度の高い応力測定が可能となっている。しかしながら、鋳鉄のように組織的に不均質な金属材料への適用については、そのX線応力測定法の確立が工業上非常に強く要望されているにもかかわらず、二、三の研究例を見るにすぎず、なおいくつかの問題が残されている。

鋳鉄についてのX線応力測定上の問題としては、まず黒鉛を含むこと、および鋳造による異方性をもつことから、その弾性定数としていかなる値を用いるべきかという点、および結晶粒子が大きい点があげられる。さらに、工業上の鋳造物の場合には寸法の過大さと形状の複雑さなども難点である。

これらのうち、測定法上の問題として、粗大結晶粒子に関しては、鉄、アルミニウムなど、また一方溶接部材などについても大きな問題となっており、最近いくつかの研究がすすめられているようであるので、ここでは取り扱わない。また寸法、形状から生ずる問題に関しては、X線測定装置の改良および取扱方法の向上などによってかなり解決されつつあるようである。したがって本報告では、鋳鉄の場合にX線応力測定の基礎式に用いる弾性定数としていかなる値をとるべきかという点に焦点をあわせて議論をすすめる。

前報において、機械的負荷応力とX線によって求めた格子ひずみをもとにして鋳鉄の変形機構を明らかにするとともに、鋳鉄のX線の弾性係数 E_x が、初期の応力の繰返しでやや減少し、数回の繰返しの後にある一定値に飽和することを報告した。また、このようにして求められる値は、機械的に測定した値とは大きく異なっているうえに、鋳鉄のマトリックスにかなり近いと考えられる0.86% C炭素鋼についての値、あるいはX線回折に直接関係するフェライト相に最も近いと考えられる鉄について、得られた値からも非常に離れているために、鋳鉄のX線応力測定に用いる弾性定数の選択には注意しなければならないことを示唆した。その場合に曲げ

試験片を用いて実験を行なったが、鋳鉄では引張りと圧縮とで変形挙動が異なるために、曲げでは純引張りや純圧縮とは異なった様相を呈している可能性がある。そこで、本報では単純引張りを与えた場合について前報と同様な実験を行ない、これよりX線の弾性定数を求め、これを用いて外部負荷応力および、研削残留応力の測定の可能性について実験的検討を加える。

2 実験方法

本研究に使用した材料は、Table I に示す化学成分をもつ球状黒鉛鋳鉄と片状黒鉛鋳鉄の2種類である。外部負荷応力を与える試験片のうち、機械加工材としては、直径 30 mm 長さ 600 mm の鋳込材から、Fig. 1 に示す形状寸法に旋削加工を施したものを用いた。さらにその後 550°C で2時間真空中に焼なましを施したものを焼なまし材とした。焼なまし材の組織をFig. 2 に、また単純引張試験結果をFig. 3に示す。組織は

Fig. 1. Shape and dimension of specimen.

(a) Spheroidal graphite cast iron. (b) Flake graphite cast iron.

Fig. 2. Microstructure of test materials ($\times 50$).

Fig. 3. Stress-strain relation.

Table I. Chemical composition of test materials.

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Mg
Spheroidal graphite cast iron	3.57	2.83	0.59	0.022	0.015	—	—	—	0.05	0.058
Flake graphite cast iron	3.29	2.40	0.66	0.068	0.010	0.01	0.17	0.02	0.20	—

球状黒鉛鑄鉄はブラスアイ組織であり、片状黒鉛鑄鉄では、マドリックスはすべてパーライトで占められている。また全断面積に対する黒鉛の面積割合は、それぞれ約20%および23%であった。

引張応力の負荷には島津製リーレー式万能試験機を用い、ひずみの測定には、機械的方法としてはマルテンス鏡を、またX線的方法としては試験機に特に設置したX線応力測定装置(東芝製構造物用応力測定装置)を用いた。採用したX線実験条件をまとめてTable IIに示す。なお格子ひずみの計算方法は前報の場合とまったく同様であるのでここでは省略する。また、応力の計算には次の式を用いた。

Table II. Measuring apparatus, method and condition of X-ray diffraction technique.

Measuring apparatus	Parallel beam type X-ray stress analyzer with GM counter tube
Characteristic X-ray	Co-K α , Cr-K α
Filter	Fe, V
Slit	2 $\times$ 2mm ²
Tube voltage	30 kV
Tube current	10 mA
Measuring method	1/8 height method

$$\sigma_x = -\frac{1}{2} \cdot \frac{E}{1+\nu} \cdot \cot \theta_0 \cdot \frac{\partial(2\theta_\phi)}{\partial(\sin^2\phi)} \quad (1)$$

ここで θ_0 は無ひずみ状態のブラッグ角であり、 θ_ϕ は試料表面法線方向に対して ϕ だけ傾いた法線をもつ格子面について測定されるブラッグ角である。 $E/(1+\nu)$ は弾性定数であり、緒言で述べたように本論文はこの定数に依る値を用いるべきかについて議論する。残留応力の測定用の試料としては $11 \times 30 \times 200 \text{ mm}^3$ の鑄込材に、切込深さを 0.2 mm とし、研削剤を多量に用いて板厚 8 mm まで研削加工を施したものを使用した。この場合に残留応力の機械的な測定は、平吉¹³⁾岡が用いた方法によった。

3 実験結果と検討

3.1 機械的弾性定数について

まず、片状黒鉛鑄鉄について、応力の負荷、除荷を繰り返しながら、各回の最大応力を段階的に増加させ、各回についてその最大ひずみと除荷後の永久ひずみ、およびそれらの差の回復可能なひずみを測定した結果をFig. 4に示す。図からわかるように、片状黒鉛鑄鉄の応力-ひずみ曲線には、応力の低い部分においても直線部分はほとんど存在せず、 7.5 kg/mm^2 というきわめて低い応力を与えた場合でもすでに永久ひずみが観察されている。また、回復可能なひずみを表わす曲線も、この応力値付近からはやくも湾曲しており、こ

Fig. 4. Change in total strain, permanent strain and recoverable strain of flake graphite cast iron.

Fig. 5. Change in mechanical elastic modulus of flake graphite cast iron.

のことは、その弾性係数 E_M が応力とともに変化することを示している。この点をより明確に示すために、各回について求められる弾性係数 E_M を、各回の大応力で整理した結果をFig. 5に示す。これより、片状黒鉛鑄鉄の弾性係数 E_M は、最大負荷応力 $\sigma_{\max}$ と次のような関係を有するものと考えられる。

$$E_M = E_{M0} - m \cdot \sigma_{\max} \quad (2)$$

ここで、 E_{M0} はFig. 5に表される直線を延長して求められる $\sigma_{\max}=0$ のときの弾性係数を、また、 m はこの直線の傾きを表わしており、 $E_{M0} \approx 13000 \text{ kg/mm}^2$ 、および $m \approx 300$ が得られた。

応力の繰返しによる影響を調べるために、 10 kg/mm^2 の応力値まで負荷、除荷を繰り返したときの応力ひずみ曲線の変化をFig. 6に示す。1回目の負荷、除荷の過程では大きなループを描いているが、繰返し数が増すにつれて全ひずみ、および永久ひずみはわずかなずつ増加するようであるが、3~10回の繰返しで飽和している。この場合、弾性係数 E_M は繰返し数によってほとんど変化せず、約 10000 kg/mm^2 であった。この値はFig. 5における $\sigma_{\max}=10 \text{ kg/mm}^2$ における弾性係数に等しいことがわかる。

球状黒鉛鑄鉄に関する同様の実験結果をFig. 7~9

Fig. 6. Stress-total strain relation of flake graphite cast iron in the case of the same stress cycles.

Fig. 7. Change in total strain, permanent strain and recoverable strain of spheroidal graphite cast iron.

Fig. 8. Change in mechanical elastic modulus of spheroidal graphite cast iron.

Fig. 9. Stress-total strain relation of spheroidal graphite cast iron in the case of the same stress cycles.

に示す。Fig. 7において、応力と全ひずみの関係がほぼ直線的とみなしうる低い応力段階においても、永久ひずみは徐々に増加しており、約 20 kg/mm^2 あたりから増加の程度が激しくなり、約 28 kg/mm^2 からは急激に増加していることがわかる。回復可能なひずみを表わす曲線は低い応力付近ではやや湾曲しながらもほぼ直線的であるが、永久ひずみが急激に増加する 28 kg/mm^2 あたりから湾曲の度合いが増加している。これより、その弾性係数 E_M は、Fig. 8 にみられるように、約 28 kg/mm^2 までは応力の増加にしたがって直線的にやや減少していき、その後は急減する傾向を示すことがわかる。したがって球状黒鉛鑄鉄においても、変形期間（あるいは応力段階）を二つの領域にわければ、それぞれについて(2)式が当てはまると考えられる。同一応力を繰返し負荷、除荷を施した場合に得られたFig. 9は、片状黒鉛鑄鉄についての場合と傾向的にはまったく同様である。

鑄鉄はその組織中に黒鉛を含むために、きわめて複雑な変形挙動を示すが、多結晶黒鉛の弾性係数 E が $300 \sim 700 \text{ kg/mm}^2$ であり、かつその破壊強度 σ_B が 2 kg/mm^2 程度以下と、いずれも炭素鋼にほぼ近いと考えられるマトリックスについてのこれらの値と比較して無視しうるほど小さい。また、前報の結果などをあわせ考えると、黒鉛は引張応力をほとんど分担せず、空孔と同様な役割を有するものと考えられることができる。したがって、鑄鉄の変形に及ぼす黒鉛の効果として考えられることは、まず、黒鉛の介在により、強度を決定するマトリックスの断面積が減少することがあげられる。さらに、このマトリックスが変形に対して有効に働きうるか否かが、黒鉛の形状、およびその分布状態などによって大きな影響を受け、これが、球状黒鉛鑄鉄と片状黒鉛鑄鉄において機械的弾性定数の値が大幅に異なる原因の一つであると考えられる。本実験においても、片状黒鉛鑄鉄と球状黒鉛鑄鉄とで、含有炭素量ならびにマトリックスが全断面積に対して占める割合がほぼ等しいにもかかわらず、(2)式で示される E_{M0} としてそれぞれ、 13000 kg/mm^2 、 17500 kg/mm^2 の値が得られている。

さらに、応力が増大するにつれて弾性係数 E_M が次第に減少するのは、G. N. J. Gilbert¹⁵⁾ が考えているように、黒鉛の応力集中効果により、黒鉛周囲のマトリックスに局所的な収縮が生じたり、き裂や空孔が発生することにより、マトリックスの有効断面積がしだいに減少し、したがってその弾性係数は減少するものと考えられる。

片状黒鉛鑄鉄と球状黒鉛鑄鉄とで、その変化の様相が異なるのは、含まれる黒鉛の応力集中効果が異なるためであると考えられ、非常に応力集中効果が高いと

考えられる片状黒鉛を多数含む片状黒鉛鑄鉄においては、きわめて低い応力値から黒鉛先端のマトリックス中に微小なき裂が発生するために、弾性定数は応力の増加につれて急激に減少する。一方、球状黒鉛鑄鉄では、含有黒鉛の応力集中効果は比較的少なく、局部的な塑性変形の進行、あるいはき裂の発生は、約 25kg/mm^2 以下の応力においては黒鉛突起のようなごく限られた領域においてのみおこるために弾性係数 E_M の減少の程度は小さいものとする。さらにこの応力以上になると、いずれの黒鉛においても塑性領域に入るとともにき裂などが顕著に発生するために、弾性係数 E_M が急減するものと考えられる。

3・2 X線の弾性定数について

Fig. 10 は、片状黒鉛鑄鉄について、抗張力の $\frac{1}{2}$ よりやや低い 10kg/mm^2 の応力を単純引張りによって繰返して加え、その1回めおよび10回めの引張変形中の機械的負荷応力と Co-K α 線が測定した格子ひずみとの関係を示したものである。第1回めの負荷、除荷過程では、やや開いたループを描くが、10回めでは閉じて両者の関係はほぼ直線的になることがわかる。また、ループの傾きは10回めまでは1回めに比べてやや減少している。これらの傾向は前報で述べた曲げ試験片を用いた場合とほぼ同様である。なお、各回についてその除荷過程より求めたX線の弾性係数 E_X は、それぞれ 17800kg/mm^2 および、 17000kg/mm^2 で

Fig. 10. Change in lattice strain of flake graphite cast iron.

Fig. 11. Change in lattice strain of spheroidal graphite cast iron.

あった。

一方、Fig. 11 に示される球状黒鉛鑄鉄の場合も片状黒鉛鑄鉄の場合とほぼ同様な傾向を示している。同様にして求められたX線の弾性係数 E_X は、 17600 および 17100kg/mm^2 であった。

ここで注目されるのは、前節で述べたように機械的弾性係数 E_M は、片状黒鉛鑄鉄と球状黒鉛鑄鉄とで大きく異なるにもかかわらず、X線的に測定すると、両者でほぼ等しい値をとることである。X線的に測定される弾性係数は試験片全体にかかっている公称応力（すなわち荷重を試験片断面積で除したものを）、マトリックス中のフェライト相のひずみで除したものに对应する。応力集中効果などのためにフェライト相におけるひずみは不均一であるが、実際にX線的に測定されるのはその体積的な平均値であるものと考えられる。したがって、適当なモデルに従って鑄鉄のX線的弾性係数 E_X を解析すると、含まれる黒鉛（あるいは空洞とみなしてよい）の形状のいかんにかかわらず、マトリックスに対して占める黒鉛の体積割合に関係してくる¹⁶⁾。しかるに、本実験で使用した片状黒鉛鑄鉄と球状黒鉛鑄鉄とは、第2章で述べたように、黒鉛の面積割合、したがって体積割合はほぼ等しいことから、X線的に測定する場合には両者でほぼ同じ値の弾性係数が測定されるのであろうと考えられる。

3・3 鑄鉄のX線応力測定について

前報において報告したように、鑄鉄のX線的弾性係数 E_X は、ある応力値まで繰返し負荷、除荷を施すと、初期の繰返しで減少し、3～10回の繰返しの後にある一定値に飽和するという結果が得られている。ここでは、曲げ試験片の引張側表面について測定を行なったが、前節で示したように、単純引張りを与えた場合においても同様な結果が得られるようである。

一般に、工業的に応力測定を行なう場合には、材料はなんらかの加工を受けたままの状態にあることがほとんどであり、X線の弾性係数 E_X としては、応力の繰返しによって飽和した値を用いるのが妥当であると考えられる。したがって本節の以下の議論においては、いずれも第10回めの除荷過程について求められた値を用いて検討をすすめる。そこでまず、10回めの除荷

Table III. X-ray elastic constant.

	$\frac{1+\nu}{E}$		Mechanical method
	Co-K α	Cr-K α	
Spheroidal graphite cast iron	0.781	0.595	0.744
Flake graphite cast iron	0.821	0.747	1.280

($\times 10^{-4}\text{mm}^2/\text{kg}$)

過程より求めたX線の弾性定数を, X線応力測定の基本式, (1)式に用いられる $(1+\nu)/E$ の形で整理すると, Table III が得られる. これには, Co-K α 線および Cr-K α 線を用いてX線的に測定した値と, 機械的方法により求めた値とをまとめて示してある.

Table III に示されるX線の弾性定数を用いて, 応力負荷履歴の不明な片状黒鉛鋳鉄および球状黒鉛鋳鉄の加工材について, 機械的負荷応力と, X線によって測定した応力との関係を, それぞれ Fig. 12 および Fig. 13 に示す. この場合, 最大負荷応力をこれまでの実験結果同様それぞれ10および 20 kg/mm² とした. 無負荷時の残留応力はそれぞれ, -40 および -7 kg/mm² である. 図に示されている実線は, 横軸と 45° をなす直線であり, この直線からのばらつきがかなり小さいことより用いた弾性定数が適当であることが知られる.

Fig. 12. Correlation of stress measured by X-ray and mechanical method of flake graphite cast iron.

Fig. 13. Correlation of stress measured by X-ray and mechanical method of spheroidal graphite cast iron.

次に, 研削加工によって生じた残留応力の深さ方向分布を測定した結果について述べる.

Fig. 14 は, 片状黒鉛鋳鉄について研削残留応力を Co-K α 線および Cr-K α 線で測定した場合, ならびに機械的な方法により測定した場合の, 板厚方向への残留応力分布を示している. 表面残留応力は -20 kg/mm² 程度であり, 50 μ 程度内部においては約 2 kg/mm² の引張応力に転じ, それより内部ではほぼ 0 に漸近している. これら三つの方法で測定した値はいずれもほぼよい一致を示している.

Fig. 14. Distribution of residual stress induced in grinding specimen of flake graphite cast iron.

Fig. 15. Distribution of residual stress induced in grinding specimen of spheroidal graphite cast iron.

一方, Fig. 15 は球状黒鉛鋳鉄に関する同様の実験結果である. この場合も残留応力分布の状態は片状黒鉛鋳鉄の場合とほぼ同様であり, やはりいずれの方法で測定してもかなりよい一致を示していることがわかる.

これらの実験結果より, Table III に示される弾性定数を用いることが残留応力測定についても適当であることがわかる. すなわち, 鋳鉄のX線応力測定に用いる弾性定数としては, マトリックスにほぼ近いと考えられる炭素鋼のX線の弾性係数に, マトリックスの全体に対して占める体積割合を考慮合わせた値を用いればよいことになる.

なお, このような不均質金属材料の機械的, およびX線の弾性係数についての詳しいモデル解析は別に述べる予定である.¹⁶⁾

4 結 論

以上の実験結果, および考察をもとにして本報告の要点を述べると次のとおりである.

(1) 鋳鉄の機械的弾性係数 E_M は, その最大負荷応力に依存し, 片状黒鉛鋳鉄では最大負荷応力が増加す

るとともに直線的に減少する。一方、球状黒鉛鑄鉄についてもやはり直線的に減少するが、漸減の領域と急減の領域の二つから構成される。この急激に減少する領域が、片状黒鉛鑄鉄についての弾性係数 E_M の減少の過程に対応する。

(2) 片状黒鉛鑄鉄と球状黒鉛鑄鉄とで機械的弾性係数 E_M は大きく異なる。これはマトリックスの変形に対して果たす役割が含まれる黒鉛の形状によって大きく異なるためであると考えられる。

(3) 鑄鉄のX線の弾性係数 E_X は、含まれる黒鉛の形状分布状態のいかんにかかわらず、マトリックスに対して占める黒鉛の体積割合に関係する。

なお、この点に関しては詳しいモデル的解析の研究を進めている。

(4) なんらかの加工を受けた鑄鉄材料についてX線応力測定法を適用する場合には、焼なましを施した処女材について応力を数回繰り返した後か、あるいは加工状態のままでX線的に求められる弾性定数を用いるのが適当である。あるいは、(3)で述べた点を考慮してマトリックスにほぼ近いと考えられる鋼についてのX線の弾性定数より換算した値を用いるのがよいようである。このようにして求められる値を用いてX線応力測定を行なった結果、外部負荷応力についても、また研削残留応力についても、機械的に測定した値とよい一致が得られた。

最後に、本研究実施にあたり、鑄鉄材料をご提供いただいた三菱重工(株)京都製作所の曾我美豊氏なら

びに服部満雄氏に深く感謝する。

(昭和43年5月22日 日本材料学会第17期総会講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) 西原利夫, 小島公平, 日本機械学会論文集, **4**, 110 (1938).
- 2) 青山威恒, 並川宏彦, 材料, **15**, 858 (1966).
- 3) Hauk, V., Arch. Eisenhüttenwes., **23**, 353 (1952).
- 4) Hauk, V., Arch. Eisenhüttenwes., **26**, 449 (1955).
- 5) 小島公平ほか, “X線応力測定法”(1966) 養賢堂
- 6) 細川智生ほか, 第4回X線材料強度に関する討論会前刷, p.70 (1967).
- 7) 英 崇夫, 福良二郎, 藤原靖夫, 材料, **16**, 948 (1967).
- 8) 平 修二, 松木健次, **17**, 1 053 (1968).
- 9) 平 修二, 林紘三郎, 材料, **15**, 851 (1966).
- 10) 平 修二, 林紘三郎, 西野征規男, 材料, **16**, 1 020 (1967).
- 11) Taira, S., and K. Hayashi, Proc. 10th Jap. Cong. Test. Mat., p.6 (1967).
- 12) Taira, S., K. Hayashi, and Y. Nishino, Proc. 11th Jap. Cong. Mat. Res., p.1 (1968).
- 13) 平 修二, 吉岡靖夫, 材料, **12**, 123 (1963).
- 14) 日本金属学会鑄造分科会編, “球状黒鉛鑄鉄の理論と実際”(1966) 丸善
- 15) Gilbert, G. N. J., B. C. I. R. A. J., **7**, 745 (1959); **9**, 347 (1961); **11**, 512 (1963); **12**, 170 (1964).
- 16) 平 修二, 林紘三郎, 西野征規男, 第12回材料研究連合講演会前刷, p.33 (1968).