

鑄鐵の顯微鏡組織と彈性係數との關係に就て

(昭和 26 年 10 月本會講演大會にて講演)

岡本正三*・鳥取友治郎*

ON THE RELATION BETWEEN THE MICROSTRUCTURE AND
THE MODULUS OF ELASTICITY OF CAST IRON*Masazō Okamoto, Dr. Eng., and Tomojirō Tottori*

Synopsis: The relation between the microstructure and the modulus of elasticity of cast iron has been studied. The modulus was measured by the flexure method, a mirror being used and the loading being increased step by step at the middle point of specimens held at two points. The results are as follows:

(1) The modulus of elasticity is changed mainly by the form and quantity of graphite contained in iron, and the value increases considerably as the form varies from flake to spheroid in grey iron, the concentrations of the common elements in it being held almost the same in each iron.

(2) The increase in quantity of graphite having the similar form reduces the modulus of elasticity, and the rate of the decrease is smaller in nodular iron than in flaky iron.

(3) The changes of the modulus due to the nodule numbers of graphite, the structures of the matrix and the increase in the concentration of Si, are markedly smaller than those due to the form and quantity of the graphite.

(4) With the temperature rise, the modulus decreases at first slowly and then rapidly at about 300°C. The decreasing rate is large in flaky iron compared with those in malleable iron and nodular iron.

I. 緒 言

鑄鐵が種々の用途に使用される場合その用途に應じた諸性質の吟味が行われるが鑄鐵の彈性係數の大小は鑄鐵を機械材料として取扱う上に検討すべき一つの重要な量である。こゝに云う彈性係數とは單位長さの歪 δ と單位面積に受ける應力 σ との間にフックの法則 $E\delta = \sigma$ が成立するとして求めた E の値であつて、嚴密にはかくして求めた E の數値が何を意味するかは論議のあるところである。鑄鐵は多相の多結晶合金であるのみでなく機械的に極めて脆弱な黒鉛を含有するのであるから近似的にフックの法則が成立するとするも既にマクロ的である。併し一般に用いられる鑄鐵の場合のマクロ的彈性係數に少しでもミクロ的因子を導入することは從來かような研究がないようであるところから、かなり重要であると考えて本研究を行つたものである。即ち鑄鐵は黒鉛の量、形狀、分布様式によつて種々機械的性質が變るがこれらの因子が所謂彈性係數に如何に影響するか又 Si 等の合金

元素が如何なる影響をもつかを明らかにしたのである。

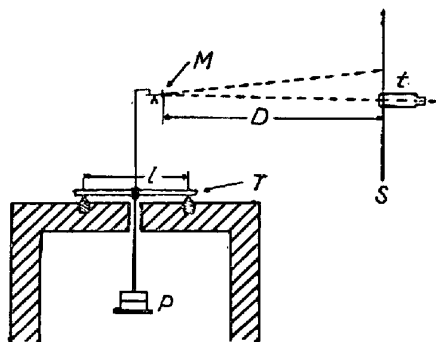
從來の研究のうち鑄鐵の組織と彈性係數の關係については、古く僅かに J. T. Mackenzie¹⁾氏、J. G. Rearce²⁾氏及び H. Schlechtweg³⁾氏によつて普通鑄鐵中の黒鉛量の減少につれ彈性係數の増加することが指摘されているのみである。一方、最近谷村博士⁴⁾等によつて黒鉛の形態と鑄鐵の機械的性質についての研究が報告されているが、これは主として球狀黒鉛の形態と機械的性質に關するもので、片狀黒鉛から片狀黒鉛に至る間の彈性係數の變化及び C, Si の影響についての系統的な關係はいまだ明確にされてない。著者等はこれらの關係を明らかにし、且つ温度に對する彈性係數の變化を調べて實際作業の基礎的參考資料を得たのである。

II. 測定装置と測定方法

測定装置は第 1 圖に示す如く試料の中央部に荷重を加

* 東京工業大學

え、この部分の撓み量をミラーの傾きによつて擴大して測定した。



第 1 圖

l = スパン = 100mm, P = 荷重, M = ミラー, S = スケール, t = 望遠鏡, D = ミラーとスケール間の距離 = 1300mm

圖中 T は試験片で高さ 3mm, 幅 4mm, 長さ約 120mm である。初荷重 0.2kg は装置に安定性を與えるために常に加えられている。この静荷重による試料の最大

應力は $\frac{M}{I} y$ (こゝに M = 曲げモーメント, I = 慣性モーメント, y = 中性軸から断面の兩端迄の距離) より求めると 0.83kg/mm^2 で現在の研究目的に對して充分小さいものである。荷重は段階的に 0.5kg 宛 3 回加え最大荷重 1.7kg とした。従つてこの場合の最大應力は 7.08kg/mm^2 である。周知の如く鑄鐵は Cu, Al 等の粘性金屬と同様に相當小さい荷重を用いた場合でも應力一歪線圖は直線的ではなく更に荷重増加の場合と荷重減少の場合とでは少しく異なり、線圖は僅かながら可逆的でなく一般のマクロ的弾性係数を求めることさへ困難である。依つてこゝでは便宜的に荷重を増加する場合と減ずる場合との平均の撓みを求めこの値より弾性係数なる數値を算出した。即ち 0.2kg (初荷重), 0.7kg, 1.2kg, 1.7kg の荷重増加に對應するスケールの読みを S_0, S_1, S_2, S_3 として次に荷重を減じた場合のそれぞれの荷重に對應するスケールの読みを S_2', S_1', S_0' とすれば 0.5kg の荷重に對する撓み a は

$$a = \frac{1}{6} \left\{ (S_1 - S_0) + (S_2 - S_1) + (S_3 + S_2) + (S_3 - S_2') + (S_2' - S_1') + (S_1' - S_0') \right\}$$

より求めることが出来る。依つて弾性係数 E は, $E =$

$$\frac{Pl^3}{48Iy} \text{ (kg/mm}^2\text{)} \text{ より算出される。こゝに } P = 0.5\text{kg,}$$

$$l = 100\text{mm, 慣性モーメント } I = \frac{4 \times 3^3}{12}; 0.5\text{kg の荷重}$$

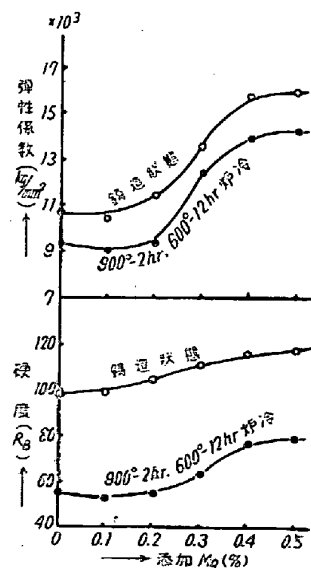
に對する平均撓み $y = \frac{a}{260}$ mm である。

III. 試料の調製

試料調製の原材料としては主として電解鐵と電極カーボンをを用いて高周波爐にて熔解した C 4.81%, Si 0.17%, Mn 0.12%, P 0.090%, S 0.019%, Cr 痕跡なる組成の過共晶鑄鐵と、酸性電氣爐にて可鍛鑄鐵用材料として熔解した C 2.89%, Si 1.12%, Mn 0.36%, P 0.103%, S 0.049% Cr 0.039% なる組成の白鉄とを用いた。之等の原料を種々に配合した後タンマン爐にて約 85gr 熔解し $7 \times 8 \times 130\text{mm}$ の乾燥砂型に鑄込んだ後その鑄造状態のまま及び種々の熱處理を行つて顯微鏡組織を調整した状態でサーフェイグラインダーを用いて $3 \times 4\text{mm}$ 角, 長さ約 110mm の試片に仕上げ弾性係数の測定に供した。なお球狀黒鉛鑄鐵の Mg 處理に當つては主として Ni-Mg(80-20) 合金を用い表面添加を行つた。

IV. 結果とその考察

(1) 黒鉛の形狀, 分布が弾性係数に及ぼす影響について黒鉛が片狀より球狀に變化することによる弾性係数の變化を調べるために鑄鐵中の C 及び Si その他 Ni 等の含量を一定にとつたもので Mg 處理量を 0.1% から 0.5% まで, Ni-Mg(80-20) の Mg 合金を用いて添加し第 1 表に示す如き組成の試料について鑄造状態と燒鈍状態に於ける弾性係数を測定した。第 2 圖はその結果を示す。



第 2 圖 Mg 處理量と弾性係数及び硬度との關係

第1表 試料の化學組成(%) 硬度及び組織

試料 番號	C	Si*	Mn	P	S	Cr	Ni	添加 Mg	鑄造状態		900°-2hr, 680°-12hr 爐冷	
									硬度(RB)	組織	硬度(RB)	組織
No.1	3.5	2.0	0.272	0.096	0.038	0.025	2.4	—	99	Gf+P +θ(1%)	56	Gf+F
No.2	3.5	2.0	0.271	0.096	(0.038)	0.025	2.4	0.1	99	Gf+P +θ(1%)	53	Gf+F
No.3	3.5	2.0	0.271	0.096	(0.038)	0.025	2.4	0.2	105	Gf+P +θ(3%)	55	Gf+F
No.4	3.5	2.0	0.270	0.095	(0.038)	0.025	2.4	0.3	111	Gq+Gs+ P+θ(10%)	63	Gf+Gs+F
No.5	3.5	2.0	0.270	0.095	(0.038)	0.025	2.4	0.4	116	Gs+P +θ(40%)	77	Gs+F
No.6	3.5	2.0	0.270	0.095	(0.038)	0.025	2.4	0.5	117	Gs+P +θ(40%)	79	Gs+F

* そのうち 0.6% 接種に用う

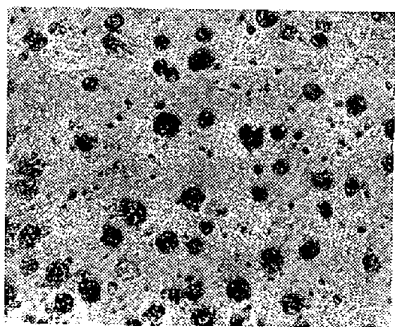
Gf=片状黒鉛, Gq=凝片状黒鉛, Gs=球状黒鉛, P=パーライト, θ=カーバイド, F=フェライト

S の行中括弧内数字は Mg 処理前の S 量を示す。

第1表及び第2圖から明らかな如く鑄造状態でMg處理量の増加するにつれて黒鉛は片状から球状へと變化し且白銑化の傾向が強くなり現われて硬度が高くなり、弾性係数が著しく高くなっている。焼鈍後の硬度及び弾性係数の變化も同様な傾向を示しているが、この場合の組織はフェライトと黒鉛であつて而も Si は凡てフェライトに固溶して且その濃度は一定とみてよから黒鉛の形状が異なるのみである。寫眞1は處理せざる場合、寫眞2は Mg0.5% 處理せる場合の黒鉛の形状を示す。



寫眞1 Mg 處理せず ×100



寫眞2 Mg 0.5% 處理 ×100

依つて Mg 處理の増加につれての弾性係数の増加は

主として黒鉛の球状化によるものであることが明らかである。Mg 處理量 0.4% と 0.5% の場合の如く、Mg 處理量は異なるが黒鉛としては何れも球状になる如き場合は弾性係数の値は殆ど變らない。鑄造状態に較べて焼鈍状態の弾性係数が低いのは、焼鈍處理のために片状黒鉛の鑄造にあつてはパーライトの黒鉛化をとめない、黒鉛の片状が發達し、且黒鉛量も増加するためであり、球状黒鉛の場合には炭化物及びパーライトの黒鉛化による黒鉛量増加と幾分黒鉛の形状の崩れるためと考えられる。

次に黒心可鍛鑄鐵について金型及び乾燥砂型に鑄造することにより焼鈍後の黒鉛の分布状態を變えて弾性係数を比較した。その結果を總括したものが第2表である。これから明らかな如く同じ組成のもので黒鉛粒の大小による弾性係数の變化は黒鉛の形状に對する程著しくなく強いて言えば黒鉛粒の大きい方がいくらか弾性係数が高いようである。

(2) C 量の影響について

普通鑄鐵及び球状黒鉛鑄鐵について、C 量が弾性係数に及ぼす影響を調べるために C2.5% から C4.0% までの種々の鑄鐵を熔製した、普通鑄鐵の鑄造状態及び焼鈍状態の硬度と組織は第3表に示す如くでC量の増加と共に硬度が減少し片状黒鉛も樹枝状及び小片状から複合状及び蕾薇状に近づいていた。一方球状黒鉛では第4表に示す如く鑄造状態でC量の少いものでは炭化物多くC量の多くなるにつれて炭化物が少くなり、硬度が減少する。又十分焼鈍した状態ではフェライト中の Si 含量はほぼ一定でありC量増加と共に硬度が低下する。

C 量と弾性係数の關係は第3圖、第4圖に示す如く、C 量の増加と共にほぼ直線的に弾性係数低下し、この低

第2表 可鍛鑄鐵の化學組成 (%) 及び黒鉛粒數と彈性係數の關係

試料 番號	C	Si	Mn	P	S	Cr	鑄造條件	熱處理	硬度(R _B)	組 織	1mm ² 中の黒 鉛粒數	彈性係數 (kg/mm ²)
No. 7	2.89	1.12	0.36	0.103	0.049	0.039	9×12mm の金型	900°—18hr 700°—40hr	65	Gn+F	157	14.8×10 ³
No. 8	〃	〃	〃	〃	〃	〃	13mm φ の砂型	950°—20hr 700°—60hr	63	Gn+F	35	15.0×10 ³

Gn=テンパーカーボン

第3表 普通鑄鐵の化學組成 (%) 硬度及び組織

試料 番號	C	Si	Mn	P	S	Cr	鑄 造 状 態		850°-20min, 700-1hr 爐冷	
							硬度 (R _B)	組 織	硬度 (R _B)	組 織
No. 9	2.5	2.0	0.311	0.089	0.042	0.033	99	Gf+P	73	Gf+F
No.10	3.0	2.0	0.342	0.101	0.047	0.036	95	Gf+P	68	Gf+F
No.11	3.3	2.0	0.314	0.099	0.042	0.030	90	Gf+P	60	Gf+F
No.12	3.5	2.0	0.278	0.098	0.039	0.026	85	Gf+P	48	Gf+F
No.13	4.0	2.0	0.217	0.093	0.031	0.016	82	Gf+P	25	Gf+F

鑄造状態で白鈍化を避けるために No.9, No.10, No.11, No.12, No.13 の鑄造はそれぞれ砂型の溫度約 100°, 100°, 70°, 50°, 40° にて行つた。

第4表 球狀鑄鐵の化學組成 (%) 硬度及び組織

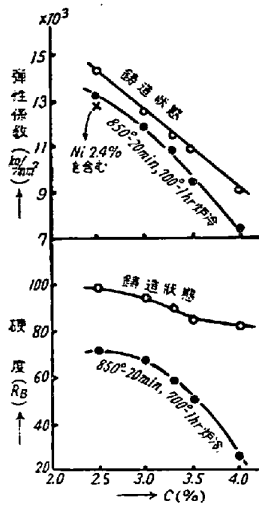
試料 番號	C	Si*	Mn	P	S	Cr	Ni	添加 Mg	鑄造状態		900°-2hr 爐冷		900°-2hr 爐冷 660°-15hr 爐冷	
									硬度 (R _C)	組 織	硬度 (R _B)	組 織	硬度 (R _B)	組 織
No.14	2.5	2.0	0.303	0.086	0.041	0.032	2.4	0.6	39	Gs+P+θ (40%)	105	Gs+P	92	Gs+F
No.15	3.0	2.0	0.332	0.097	0.046	0.035	2.4	0.6	45	Gs+P+θ (60%)	100	Gs+P	85	Gs+F
No.16	3.3	2.0	0.305	0.096	0.041	0.029	2.4	0.6	43	Gs+P+θ (50%)	98	Gs+P	83	Gs+F
No.17	3.5	2.0	0.270	0.095	0.039	0.025	2.4	0.6	42	Gs+P+θ (40%)	95	Gs+P	81	Gs+F
No.18	4.0	2.0	0.271	0.090	0.030	0.015	2.4	0.6	35	Gs+P+θ (10%)	92	Gs+P	76	Gs+F

* そのうち 0.6% 接種に用う。S の行中括弧内數字は Mg 處理前の S 量を示す。

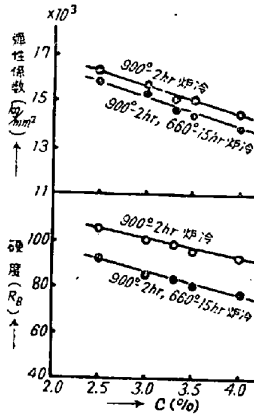
下率は球狀黒鉛鑄鐵に少なく普通鑄鐵に多い。これは球狀黒鉛鑄鐵ではC量に關せず一様に球狀黒鉛であり黒鉛粒の大きさが僅かにC含量と共に大となるのみであるのに對して普通鑄鐵ではC量の少いときは均一に分布せる片狀黒鉛(幾分樹枝狀に分布せるものもある)が多いがC量の多くなるにつれてこれが細長い片狀及び薔薇狀黒鉛に近づくためと考えられる。この現象は完全焼鈍したものに特に著しい、従つて普通鑄鐵で焼鈍した状態のものではC量の増加と共に彈性係數の低下が著しい。寫眞3は焼鈍後におけるC 2.5%の樹枝狀黒鉛を示し、寫眞4はC 4.0%の小片狀と薔薇狀黒鉛を示す。

セメントサイトを消失せしめた状態でC含量と彈性係數

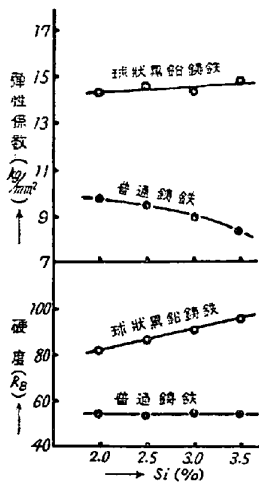
との關係をみるにこゝに示す如く鑄鐵中のC以外の諸元素の含有量をほぼ一定且少量にとゞめるときには、球狀黒鉛鑄鐵の場合C 1%の増加につきほゞ4/3×10³ kg/mm²だけの彈性係數の低下をみる。又これを普通鑄鐵の場合についてみるにC 1%の増加について約11/3×10³ kg/mm²程度の低下を認める。なほ第3表のNo.9即ち普通鑄鐵のC 2.5%の組成のものにNi 2.4%を添加してNiを含むものと含まないものとの彈性係數を比較したが、第3圖に示す通りNiを含むことにより大なる變化なく僅かに低下する程度であることを認めた。かような事實は球狀黒鉛鑄鐵についても當てはまると推測される。



第3圖 普通鑄鐵のC量と弾性係數及び硬度との關係



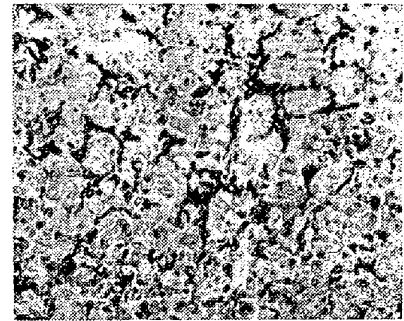
第4圖 球狀黒鉛鑄鐵のC量と弾性係數及び硬度との關係



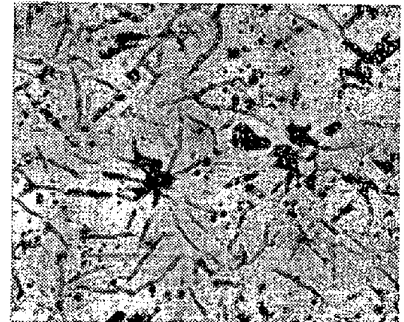
第5圖 Si量と硬度及び弾性係數との關係

(3) Si 量の影響について

弾性係數に及ぼす鑄鐵中 Si 量の影響については第5表、第6表に示す如く Si を 2.0% より 3.5% まで變



寫眞3 C 2.5% の樹枝狀黒鉛 $\times 100$



寫眞4 C 4.0% の片狀と薔薇狀黒鉛 $\times 100$

化して測定した。第5圖は Si 量と弾性係數及び硬度との關係を示す。

普通鑄鐵では Si 量の増加と共に黒鉛は均一な短い片狀より幾らか細長い片狀となり、それにつれて弾性係數は少しく低下する。これは Si 含量の變化による弾性係數の變化とみるよりは寧ろ Si 含量の變化が黒鉛の出現様式に與える影響の方が係數の大小に大きく響くとみるべきであろう。尙この場合 Si 含量の變化による硬度の變化は殆ど認められなかつた。球狀黒鉛鑄鐵では Si 量の増加と共に硬度が増加し幾らか黒鉛が小さく且多くなる。弾性係數は殆ど變化がない、因みに西山氏⁵⁾によれば Fe-Si 二元合金に於て、Si 量の増加(約 5% まで)による合金の弾性係數は殆ど變化しないと報告されている。

(4) 硬度を一定にした場合の弾性係數について

實用的見地から特に硬度を一定範圍(Rc 18~20)にとり素地の組織を球狀もしくは層狀のパーライトにする如く適當な熱處理を行つた黒心可鍛鑄鐵、球狀黒鉛鑄鐵及び普通鑄鐵について弾性係數を測定した。試料の化學組成と試驗結果を第7表に示す。

第7表より明らかな如く弾性係數は素地の組織や化學組成の變化に對して殆ど影響なく、先にも述べたように C 量と黒鉛の形狀により大なる變化を受ける、即ち片狀黒鉛を含む普通鑄鐵は弾性係數低く、同じ C 量でも球狀

第5表 普通鑄鐵の化學組成 (%) 硬度及び組織

試料番 號	C	Si	Mn	P	S	Cr	850°—2hr 爐冷	
							硬度 (R _B)	組織
No. 19	3.5	2.0	0.273	0.097	0.038	0.025	55	Gf+F
No. 20	3.5	2.5	0.270	0.097	0.038	0.025	54	Gf+F
No. 21	3.5	3.0	0.267	0.096	0.037	0.024	55	Gf+F
No. 22	3.5	3.5	0.264	0.095	0.037	0.024	55	Gf+F

第6表 球狀黒鉛鑄鐵の化學組成 (%) 硬度及び組織

試料番 號	C	Si *	Mn	P	S	Cr	Ni	添加 Mg	900°—2hr, 660°—15hr 爐冷	
									硬度 (R _B)	組織
No. 23	3.5	2.0	0.252	0.094	(0.035)	0.019	2.4	0.6	82	Gs+F
No. 24	3.5	2.0	0.248	0.093	(0.035)	0.019	2.4	0.6	87	Gs+F
No. 25	3.5	2.0	0.245	0.092	(0.034)	0.018	2.4	0.6	91	Gs+F
No. 26	3.5	2.0	0.242	0.092	(0.034)	0.018	2.4	0.6	96	Gs+F

* そのうち 0.6% 接種に用う。S の行中括弧内の数字は Mg 處理前の S 量を示す。

第7表 試料の化學組成 (%), 熱處理, 組織及び弾性係数

種類及び 試料番號	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Ni	Al	添加 Mg	熱處理	組織	弾性係数 (kg/mm ²)
黒心可鍛 鑄鐵 No. 27	2.89	1.12	0.36	0.103	0.049	0.039	—	—	—	—	600°-6hr 800°より 油冷, 700° -30min テンパー	Gn + 細い球狀 パーライト	15.8×10 ³
黒心可鍛 鑄鐵 No. 28	"	"	"	"	"	"	—	—	—	—	900°-6hr 800°より 300°の爐 中に投入 爐冷	Gn + ラメラ パーライト	15.8×10 ³
球狀黒鉛 鑄鐵 No. 29	3.47	3.0	0.55	0.042	(0.059)	0.024	0.90	0.73	0.26	0.6	900°-1hr 油冷, 600° -30min. テンパー	Gs+F+ 細い球狀 パーライ ト	15.2×10 ³
球狀黒鉛 鑄鐵 No. 30	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	900°-1hr 400°の爐 中に投入 爐冷	Gs+F+ ラメラ パーライ ト	15.0×10 ³
普通鑄鐵 No. 31	3.47	2.99	0.562	0.24	0.106	—	—	—	—	—	鑄造の ま	Gf + ラメラ パーライ ト	10.4×10 ³

* そのうち 0.6% 接種に用う。

S の行中括弧内の数字は Mg 處理前の S 量を示す。

Mg 合金は Fe 20%—Si 25%—Cu 20%—Ni 16%—Al 6%—Mg 13% を用い表面添加處理を行う。

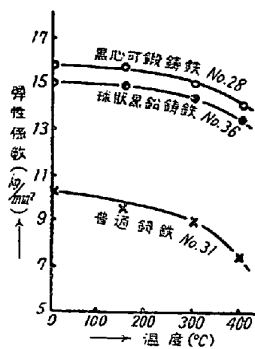
黒鉛鑄鐵であればそれが高い。更に C 量の少ない黒心可鍛鑄鐵はより高い弾性係数をもつ。

(5) 温度による係数係数の變化について

第7表の No.28, No.30, No.31 の試料即ち黒心可

鍛鑄鐵, 球狀黒鉛鑄鐵, 普通鑄鐵の3種について常温, 150°C, 300°C, 400°C の温度に於ける弾性係数を測定した。その結果を第6圖に示す。

第6圖より明らかな如く温度の上昇と共に弾性係数は



第6圖 溫度と彈性係數との關係

低下し約 300°C の附近で急にその低下が著しくなる。この低下の割合は普通鑄鐵で大きく球狀黑鉛鑄鐵及び黑心可鍛鑄鐵で小さい。蓋し片狀黑鉛を含む普通鑄鐵では黑鉛と素地との境界部の脆弱部が溫度の上昇につれて一層弱くなり、そのため測定の小荷重の範圍で容易に塑性變形を起すことになると考えられる。

V. 總 括

鑄鐵の彈性係數は嚴密な意味に於ては測定が困難であるが一應一般に使用される曲げ試験法により、彈性係數の數値を主として鑄鐵の顯微鏡組織及びC Si含量との關係に於て求めた。又溫度に對する彈性係數を検討した。次にそれを要約する。

(1) 鑄鐵の彈性係數は主として黑鉛の形狀と量により變化するものであり、黑鉛の形狀についてはこれが片狀より球狀に變ずるにつれて著しく増加する。

(2) 黑鉛の形狀が同じであれば黑鉛量の増加と共に彈性係數は減少し、この減少率は球狀黑鉛鑄鐵に小さく普通鑄鐵に大きい。

(3) 黑鉛の形狀及びその全量が殆ど變化しないで黑鉛粒數のみ變化する場合の彈性係數の變化は、黑鉛の形狀及び量の變化による影響に較べて少なく、強いて云えば黑鉛が少なく且大きい方が、多くて且小さいものゝ方よりも彈性係數が幾分高いようである。

(4) 硬度を一定にする如く、熱處理により素地の組織を球狀パーライト或は細い層狀パーライトにして各種鑄鐵の彈性係數を求めてみるに何れの場合も黑鉛の形狀と量が同じであれば彈性係數には殆ど變化がない。

(5) Si含量による彈性係數の變化は球狀黑鉛鑄鐵、普通鑄鐵とも殆ど變化なく、幾分普通鑄鐵ではSi量増加と共に減少するが、これはSiの増加が黑鉛の形狀を變化しその片狀が一層細長くなるためである。

(6) 溫度の上昇と共に彈性係數は低下するが約 300°C 附近でその減少が著しくなる。この低下率は黑心可鍛鑄鐵や球狀黑鉛鑄鐵に較べて普通鑄鐵の方が大である。蓋し黑鉛と素地との境界部分が溫度によつて弱められる場合は片狀黑鉛の場合が一層大であるとみられる。

(昭和26年11月寄稿)

文 献

- 1) J. I. Mackenzie, Proc. of Am. Soc. for Test. Material, **29** (1929) 2, 94~99
- 2) J. G. Rearce, Foundry Trade Journal. **51** (1934) 937, 76
- 3) H. Schlechtweg, Arch. für Eisenhütt., **6** (1933) 11, 507~510
- 4) 谷村熙, 吉田正人, 1951年4月日本鐵鋼協會春期大會にて講演
- 5) 西山善次, 東北帝大理科報告, **18** (1929) 354