

## 技術資料

### 最近の鑄鐵材料

飯 高 一 郎\*

#### CAST IRONS TO-DAY

Ichiro Iitaka, Dr. Eng.

#### I. 鑄鐵材料の進歩

鑄物技術は今や革命のさ中にあるといつてよい。が、こゝには鑄物技術全般には亘らず、只鑄鐵材料についてだけ述べよう。

鑄鐵の顕微鏡組織は Matrix (地鉄) と黒鉛とから成る。そこで鑄鐵の機械的性質を向上させるには、Matrix を改善するか黒鉛を改善するかの方途がある訳で、これまでの研究歴史を見ても其通りになつてゐる。Matrix 改善の方向を辿つた成果としては、フェライト地の黒心可鍛鑄鐵及びパーライト鑄鐵があり、已に広く使用されている。オーステナイト鑄鐵も發明されているがその用途は未開拓である。第4章に述べるパーライト鑄鐵は種々の特長を有し将来を期待される。黒鉛改善の方向を辿つた成果としては、片黒鉛の適當の大きさのものに均等に揃える事が先ず提唱され、微細の黒鉛にする事が考えられ、黒鉛を少量にする事が採用され、最後に黒鉛を球状化して大發明を完成した。

以上の研究思想の筋道と成果とを表示すれば次の如くである。

鑄鐵材料の進歩	Matrix (地鉄) の改善による進歩	(1) フェライト可鍛鑄鐵
		(2) パーライト鑄鐵
		(3) オーステナイト鑄鐵
		(4) パーナイト鑄鐵
	黒鉛の改善による進歩	(5) 片黒鉛鑄鐵
		(6) 微細黒鉛鑄鐵
		(7) 少量黒鉛鑄鐵
		(8) 球黒鉛鑄鐵

フェライト可鍛鑄鐵(1)、パーライト鑄鐵(2)、彎曲した片黒鉛が均等に分布した鑄鐵(5) の3つは一般に使用されて来た材料であり、(3) と (6) は未知数である。本講に於いては主として(8) の球黒鉛鑄鐵、(延性鑄鐵、ノヂュラー鉄)と(7) の少量黒鉛鑄鐵(メーハナイト鉄)とに就いて述べ、(4) のパーナイト鑄鐵 (Acicular cast iron) にも少し触れて見ようと思う。

#### II. 球黒鉛鑄鐵

ま え が き

球黒鉛鑄鐵は Nodular Iron, Ductile Cast Iron などと呼ばれているが、正確には Globular (Spherulitic, Spheroidal) Graphite Cast Iron と称すべきである。

Mg-添加と接種 (Inoculation) とによつて總ての黒鉛を球状化したもので、普通鑄鐵の3倍も引張強さが大きく、20%位も伸びのある展延性の鑄鐵である。鋼のような性質を持つこの鑄鐵の發明は金屬材料界の革命ともいえよう。

#### 1. 球黒鉛鑄鐵發明の歴史

鑄鐵中の黒鉛が極めて稀に球状を呈する事は以前から知られていたが、全部の黒鉛を球状化して見ようという企図は誰も抱かなかつた。また可鍛鑄鐵は焼鈍に長時間を要するから何とかして短時間焼鈍で済ませようとする研究は外国でも日本でも盛に行われて来たが、鑄放しのまゝで展延性を持たせようとする研究は Görens (1925) の発表がある位のものであり、しかも彼は成功しなかつた。

黒鉛の形状を改善して鑄鐵の機械的性質を向上させようとする理想はイギリスに於いて執拗に追求されて来た。まず黒鉛を悉く微細化する (共晶黒鉛) 研究が1937年に発表されたが、実用的には成功しなかつた。次に球状化を志したものであろう。1947年まず Ni-C, Co-C 系合金に就いて球状化に成功した H. Morrogh 等は1948年遂に Ce-処理と接種とに依つて鑄鐵中の黒鉛を球状化する事に成功したのである。これは人類の科学史上特記すべき業績である。他方アメリカに於いては1949年 A. P. Gagnebin 等が Mg-処理と接種とに依つて球状化に成功した。これは今日ノヂュラー鑄鐵として工業界に騒がれている發明である。

#### 2. 球黒鉛鑄鐵の製造法

A. 溶解, 鑄込法: 高炭素, 低硫, 低磷を目標とする關係上ライニングを塩基性とした電弧炉, 高周波炉で溶解するのが適當である。但し良い原料を選び注意して操業すれば酸性炉またはキューポラで溶解しても差支ない。

添加剤を直接溶解炉に入れることは爆発の危険から見てもライニングの侵蝕から見ても不可である。トリベに移された熔湯に添加するのである。Mg-添加剤を入れると Mg の気化潜熱のために熔湯の温度は 100°C 以上も降下するから高温の熔湯を必要とする。

Mg を添加すれば爆発するからホスホライザーを使用

\* 早稲田大學教授, 附屬鑄物研究所長, 工博

し、遮蔽防護の設備を工夫して安全を期すべきである。爆発しないで Mg-添加の目的を達する色々の合金が造られているが、それ等に就いては後に述べる。

添加剤を加えそれが良く溶解したら、直ちに接種剤 (Inoculant) を加え (0.4% Si が添加されるように計算する)、良く攪拌して直ちに鑄込む。接種剤はフェロシリコン、カルシウム・シリサイド等である。接種後しばらく (例えば30分) 放置すれば、鑄込んでも球状黒鉛は得られない。製品中に 0.03% 以上の Mg が含有されないと黒鉛は球状化しない。大体 0.05~0.10% の Mg が含まれることを目標とする (Mg 添加量は例えば 0.35~0.80% である)。湯流れは普通鑄鉄と変りないが凝固時の収縮は大きいから押湯を鑄鋼やマレープルの場合のように大きくする必要はある。

**B. 添加合金:** 純 Mg を添加すれば爆発を起し、歩止りは悪く且つ一定しない。これ等の欠点を除くために種々の添加合金が利用される。第1表に高炭素、低硫、低磷鑄鉄を酸性ライニングの高周波炉で溶解し、接種剤として 75% Si のフェロシリコンを用いて 0.4% Si を加えた場合の実例を示す。これは黒鉛を完全に球状化し且つ十分に材料を強力化するに足るだけの Mg を添加した場合であり、その時の Mg 歩止り (%) 及び鑄物中に残つた Mg 含有量をも示してある。

第1表 Mg 添加用合金と歩止り

添加合金	Mg の添加量 (%)	鑄物の Mg 含有量 (%) (分析値)	Mg の歩止り (%)
50% Ni 50% Mg	0.63	0.045	7
82% Ni 18% Mg	0.22~0.42	0.058, 0.085 0.094, 0.084 0.118	26, 28, 22, 30 30
70% Cu 30% Mg	0.40~0.60	0.068, 0.056 0.053	17, 10 9
80% Cu 20% Mg	0.22~0.40	0.044, 0.035 0.058, 0.065	20, 12 16, 16

80% の Ni または Cu を合金すれば Mg の爆発性は完全に抑制されて歩止りはよいが、鑄物中の %Ni, %Cu は返し層の使用のために次第に増加して作業に困るようになる。70% の Ni 又は Cu に 30% Mg を合金したものは安全に使えるがそれ以上 %Mg の増したものは危険である。50%Si フェロシリコンに 8%Mg を加えた添加合金は全く安全であり、35~65% の歩止りで 0.08% 位の Mg を鑄鉄に含ませれば黒鉛が充分球

状化する。

**C. 使用地金:** Mg に依る黒鉛球状化に際しては、鑄鉄の化学組成について制限というほどのものは無いと一応考えられている。%C は 2.5% でも球状化するが 3.5% 近い共晶組成の辺が良い。%Si は 1.8% 以上ならよいが、Mg は黒鉛化を妨げるから、Si は少々多いもの、2.5% 辺がよからう。%S は少いほどよく処理後の鑄鉄は 0.03~0.04%S であることが望ましい。但し 0.10% S のケボラ熔湯でも球状化する場合もある。%P は 0.7% あつても差支ないが、P が多いと引け巣を生じ、延伸率、衝撃値を害するなら、0.15% 以下が望ましい。Mn は 0.8% あつても差支ないが、0.5% 辺がよからう。

化学組成が以上の通りであつても、実際にはなかなか球状化しない銑鉄が多い事は現在の大きい悩みである。

高炉銑、電気銑の中には Mg を充分多量に添加しても黒鉛の球状化しない銑鉄が相当多い。何故球状化しないかの原因は未だ明瞭でない。スエーデン木炭銑を使うか又は鋼屑に加炭して使えば良く球状化する。

### 3. 黒鉛球状化の理論

鑄鉄中の黒鉛が Mg-処理 (又は Ce-処理) によつて球状化する現象の機構に就いては筆者の理論<sup>1)</sup>があるだけだから次に該理論のあらましを述べよう。

**A. 鑄物としての黒鉛の形と鑄鉄中の黒鉛の形:** 黒鉛が鉱物として自然界に産出する際にどんな色々の形状を呈するかを Dana の "A System of Mineralogy" から転載、分類すれば次の 8 形状である。なほ同書に記載してある黒鉛の基礎的性質を初めに述べておこう。

結晶系 Hexagonal (Rhombohedral); 格子常数  $a = 2.46\text{\AA}$ ;  $c = 6.79\text{\AA}$ ;  $c/a = 1.3859$ ; 劈開面、滑り面 basal plane (0001); Moh's 硬度 1~2; 比重 2.09~2.23; 非弾性的 (Inelastic) で曲り易い (Flexible)。

(1) 6 辺形の平板状 (Tabular), 条があり、面の明瞭な場合は稀である。スレート状 (Slaty) も之に属する。その切断面は帯状 (Band) である。

(2) しばしば葉状 (Foliate) を成して埋つている。鱗片状 (Scaly) とか薄片状 (Thin laminae) も之に属する。その切断面は片状 (Flaky) である。

(3) しばしば柱状 (Columnar) を成して埋つている。その切断面は帯状又は四辺形である。

(4) しばしば放射状 (Radiated) を成して埋まつている。その切断面は放射状である。

(5) しばしば緻密質の粒状 (Granular) を成して埋まつている。その切断面は不定形の塊状である。筆者思う不

定形の粒状のものを塊状 (Lumpy) または瘤状 (Nodular) と名付けて (5) とし球状 (Globular) のものは之を区別して (7) に入れるがよい。

(6) しばしば土状 (Earthy) を成して埋つている。その切断面は不定形粒状の集合体である。

(7) 稀に球状凝結物 (Globular) と成り、放射状組織を持つ。隕鉄中にはしばしば瘤状 (Nodular) として存在し、Sevier Iron 中に1個の瘤状物で 92gr もあるものが発見された。その切断面は円形である。筆者思う瘤状のものは (5) に入れるがよい。

(8) 隕鉄中にはしばしば脈状 (Vein) のものがある。その切断面是一群の小粒である。

鑄鉄中の黒鉛の形状は主として片状と塊状 (Flake Graphite, Lump Graphite) とである。すなわち上述の (2) と (5) とである。しかし著者が二十余年間に撮影した各種鑄鉄の顕微鏡組織写真及び Haneman の Atlas Metallographicus を注意して検べたところ、他の6種の形状を呈する黒鉛も稀ではあるが、悉く存在する事を発見した。かようにして自然界に鉱物として産出する黒鉛のあらゆる形状が鑄鉄中の黒鉛にも存するという事実を確認し得たのである。大自然の現象も実験室の現象も鑄物工場の現象も全く同一であるのである。

**B. 鑄鉄中の黒鉛の形に就いて:** (1), (3) のような自形結晶 (Idiomorphic Crystal) で、完全の結晶に近い形状は明かに金属中では形成され難い。(4) は結晶軸の方向へだけ特に発達したもので、やはり自形結晶だから金属中には形成され難い。(6), (8) は“黒鉛の粒は液相の存在下に於いては容易に合一して成長する”という著者の仮定<sup>3)</sup>により鑄鉄中には少い筈だ。

以上の如く考えれば鑄鉄中に片黒鉛と塊黒鉛とが主として現われる事は全く当然である(球黒鉛を発生する条件は普通の場合には存在しない)。

片黒鉛は共晶黒鉛すなわち塊黒鉛の小粒が成長したものである<sup>4)</sup>。従つて塊黒鉛は総ての黒鉛中で最も根本的というべき形状であつて、小塊黒鉛を結晶の核と考えても差支ない。そこで塊黒鉛の小粒から片黒鉛、塊黒鉛、球黒鉛に成長する過程を考えて見れば球黒鉛生成の条件が明かになるであろう。

鑄鉄には共晶黒鉛と呼ばれるものがあるが、之は小塊黒鉛の集合体である。また薔薇黒鉛と呼ばれるものがあるが、之は小塊黒鉛と片黒鉛との集合体である。蝸黒鉛と呼ばれるものは塊黒鉛と片黒鉛との集合体である。個々の黒鉛の形状としては前述の片状、塊状、球状の3つきり無いのである。

**C. 片黒鉛、塊黒鉛の成因:** まず鑄鉄中の片黒鉛はいかにして生成するかを考えよう。何の障害もなく自由に結晶が成長するならば6角柱になるか又は黒鉛の量が不足の場合には6本の放射状結晶になるであろう。凝固過程の進行と同時に黒鉛が析出して次第に成長するのであり、その間熔鉄及び結晶は静止することが出来なくて絶えず動いている。すなわち黒鉛と熔金との間には絶えず相対的運動が行われている。一方かよりの高温では黒鉛の強度が小さい事は明かであるから、たとい6角柱に出来上つた後といえども結晶はこの運動のために劈開面または滑り面の底面 (0001) に沿つて分割される。まして6角柱に出来上らんとする途中に於いては、容易に結晶の分割が行われ、柱状にならずに6角の薄い板状結晶が出来上る。そして相対的運動のために角隅が欠け落ち且つ表面張力の関係もあつて円形または不定形の薄い板状結晶が出来上る。かゝる結晶の切断面は帯状である。また黒鉛片は常温でも曲り易く (Flexible)、非弾性的 (Inelastic) だと Dana の本に書いてあるから、高温では全く容易に曲げられる筈である。従つて相対運動のために薄い曲板状を呈することは明かで、その切断面は彎曲した片黒鉛となる。

次に塊黒鉛の成因を考えよう。結晶の底面であまり滑らなかつたものは厚さが増して柱状 (Columnar) や粒状 (Granular) に成長し、それ等の切断面は塊黒鉛となるのである。

**D. 球黒鉛の成因:** 最後に黒鉛球状化の理論を述べよう。まず考えられることは水中の油が表面張力のために球状化する事や泡が球状を呈する事である。黒鉛は液体でもガス体でもないけれど、高温に於いては前に述べた如く非弾性的であつて、非常に曲り易いものだから、表面張力或はそれに近い現象のために球状化するのだと考える。但しこれだけの事なら一般鑄鉄の黒鉛も球状化する筈だから、この外になにか重大の原因が伏在する訳である。

Mg- 処理と接種とによつて熔金の表面張力が少しでも変化すれば湯流れに影響するだろうが、実際にはかゝる事は無いから熔金の表面張力は黒鉛球状化の原因ではない。また球状化に必要な Mg 量は 0.06% 位に微量であるから表面張力が変化する筈はない。そこで筆者は Mg が黒鉛に吸着されて黒鉛の表面張力 (表面の變形性) を変化させるものと考えた。0.06% の Mg は微量ではあるが全炭素量 (例えば 3.0%) に対すればその 2.0% に当るから、黒鉛表面の性質を変化させるには充分の量である。

熔鉄が凝固すれば Mg の溶解度が減るから大部分の Mg は析出する。その時の温度 1150~1200°C では Mg は蒸気である (Mg の沸点は 1100°C)。この析出した Mg 蒸気がその時析出する黒鉛片に吸着されて、その変形性を著しく増す。著しく変形し易くなつた黒鉛片は周囲からの外力のために圧されて球状を呈するのである。団子は表面張力で球状になるのではなくて、塑性の著しい物質の塊を周囲から万遍なく圧するから球状になるのである。それと似た作用によつて黒鉛が球状化するものと考える。

清潔の板にのせた水滴は拡がるに反して、ホコリや媒の多い板にのせた水滴は球状を呈する。また鋼鑄物中の微量の As, S のために球状封包物 (Inclusion) を形成する<sup>5)</sup>。かように表面張力或はそれに近い原因で球状を呈する場合は相当多い。この著者の理論に対するいくつかの実験的証明を次に述べよう。

(1) Mg- 処理を行つた熔湯を何十分間も放置すればそれを鑄込んで球黒鉛にならず、片黒鉛になる。これは放置の間 Mg が酸化または蒸発して減少するため、凝固に際して黒鉛が充分の Mg を吸着できないからである

(2) 一旦球黒鉛に凝固したのもも再溶解すれば片黒鉛に凝固する。これも Mg が酸化または蒸発するためである。

(3) 筆者の理論だと沸点の低い金属はとにかく黒鉛球状化の第一条件を備えているのだが、実験の結果 Zn (沸点 906°C) と Cd (沸点 770°C) も Ca (沸点 1240°C) も多かれ少かれ確かに球状化を示した。Ce (沸点 1400°C) が球状化を起す事は誰でも知っている。

(4) “黒鉛が Mg 蒸気を吸着する” という筆者の理論に於ける根本仮定を実験で証明しようとして企てた。Mg で処理した熔鉄を Si で接種すれば良く球状化するのであるが、Si の代りに黒鉛または木炭で接種すれば、著者の仮定に従えば、凝固に際して析出する Mg 蒸気はまず之等の接種剤に吸着される故、熔鉄から結晶、析出する黒鉛は充分の Mg を吸着できないこととなり球状化しないで片黒鉛になるであろう。この理論的予想は実験によつて完全に証明された<sup>6)</sup>。

(5) 異物を吸着した為に表面張力とか変形性 (Deformability) とかが変化するという事は、考え易い事であり、実例もある。

4. 球黒鉛鑄鐵の組織、性質、熱処理

黒鉛の形は写真 1 に示す如くである。これは Mg- 処理と接種とを行ふ前に鑄込めば普通の片状に凝固する鑄鐵なのである。Matrix (地鉄) はフェライトにもなり、

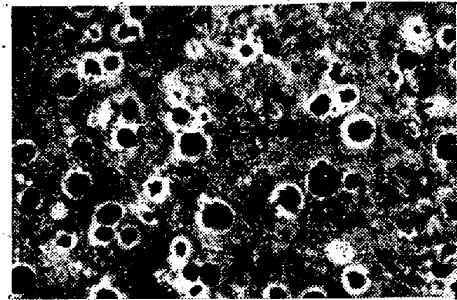
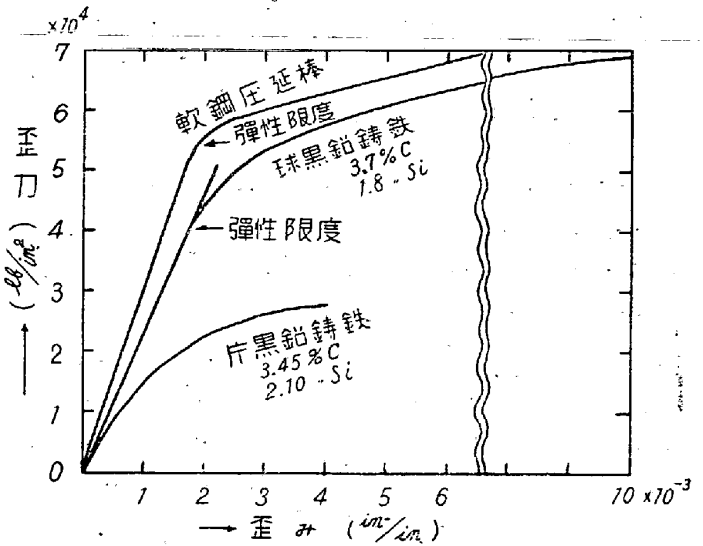


写真 1 球黒鉛鑄鐵の顯微鏡組織 ×100(2/3縮寫)  
スエーデン木炭鉄に Ni-Mg(50-50) を 0.6% Mg に相当するだけ添加し、0.4% Si 接種

(そういう鑄鐵は展延性に富み、伸びが 20% もある) フェライトにもなる。(そうなる鑄鐵は硬くて耐磨耗性である)。球黒鉛の周囲だけフェライト化したものは (写真に示したもの) ブルス・アイ (Bull's eye) 組織と呼ばれる。900°C で 1 時間焼鈍した後 700°C で 5 時間焼鈍する程度の熱処理を施せば地鉄は全体がフェライト化してしまう。

片黒鉛の鑄鐵は破面が黒味を帯びた灰色で、平面に沿つて折れるに反し、球黒鉛の鑄鐵は破面が鋼のそれに似て白味を帯び曲面に沿つて折れ結晶が滑つて (Flow) 折れた事を示している。破面を見たゞけで球状化の程度を判定できる。

引張試験に於ける歪力—歪み曲線を第 1 図に示す。ヤ



第 1 図 球黒鉛鑄鐵の歪力—歪み曲線  
ング率が大きく、弾性限が著しく高く鋼に似ている。片黒鉛鑄鐵に比して硬度は少し高いけれど切削性は良好であり、疲労限も高く、減衰能はその 1/4 位である。4.14% C, 2.67% Si, 0.40% Mn, 0.027% P, 0.01% S のスエーデン木炭鉄に Ni-Mg 合金 (50-50) を添加し、0.6% Si で接種したものの機械的性質を第 2 表に示す。これはバ

ーライト地で黒鉛は良く球状化した組織のものである。

第 2 表 球黒鉛鑄鐵の機械的性質<sup>7)</sup>

符號	引張試験				
	抗張力 (kg/mm <sup>2</sup> )	眞の抗張力 (kg/mm <sup>2</sup> )	降伏點 (0.2%) (kg/mm <sup>2</sup> )	彈性係數 (kg/mm <sup>2</sup> )	延伸率 (%)
G4	52.3	56.3	32	9,040	13.2
G5	59.4	62.0	35	10,120	10.2
G6	55.8	59.8	35	10,040	10.8

符號	壓縮試験				
	壓縮應力* (kg/mm <sup>2</sup> )	破壊應力 (kg/mm <sup>2</sup> )	降伏點 (kg/mm <sup>2</sup> )	彈性係數 (kg/mm <sup>2</sup> )	壓縮比 (%)
G4	118	195	66	2,350	48.2
G5	98	168	107	3,160	50.0
G6	84	145	71	1,750	52.0

\* 壓縮應力は Hair crack 發生の直前の應力を示す

この結果を見れば抗張力、降伏點、延伸率は 0.3% C の炭素鋼に近く、彈性係數はやゝ低い。局部収縮は起つていたが、それはパーライト地のためである。

700~800°C で鍛造、圧延することが出来る。これは鑄鉄としては未曾有のことである。

耐酸、耐蝕性に就いては述べるほどのことはない。耐熱性は頗る優秀である。高温度に於ける耐酸化性もよいけれど、A<sub>1</sub> 変態点を上下して加熱、冷却を繰返した際の成長 (Growth) の少い事は特筆に値する。筆者の実験によれば普通鑄鉄の 1/7 程度である。

### 5. 球黒鉛鑄鐵に関する結論

商業的生産品として 50~60kg/mm<sup>2</sup> の抗張力と数% の延伸率とを有する。その他の機械的性質も良好で、鋼に近いような驚くべき優秀な鑄物材料である。耐熱性極めて良好、耐磨耗性の良いものも造れる。熔接性、切削性も良好である。鑄造性は引けが大きいだけで、質量効果その他に欠点は無く、どんな複雑な鑄物も造れる。熔解法、鑄物砂等に別にむずかしい事は無く、慣れれば不良品を出さないで済む。別に高価の原料を必要としないから (Mg 使用量は僅少で足りる) コストも高くない。

将来は鑄鋼やマレーブルを駆逐する運命を持つといわれるが、筆者は思う、高級鑄鉄や普通鑄鉄をさえ駆逐するに至るであろう。何となれば強力だから薄肉や細い物で間に合う結果、鑄物の重量を減らし従つて安価にすることになるからである。また勿論鍛造品をも駆逐するで

あろう。かようにしてあらゆる機械の構成材料に革命的進歩をもたらすであろう。

数十トンの大物から数十グラムの小物に至るまで、何にでも使われ得るのだが次に実例のいくつかを挙げて見よう。

本邦で製造されているのを筆者が知つている製品に、耐熱鑄物、電気機械部品、シリンダー・ライナー、水道鉄管等がある。アメリカ其他では次のような製品が造られている。

Hammer anvils, steam forging hammers, hydraulic press cylinders, compressor head, crank shafts, cam shafts, bevel gear, worm and wheels, gear carriers, strap, machine tool parts, automotive dies, die for forming steel pipe, conveyer brackets, clutch plates, commutator-end, jordan plugs, mandrel and cavities for rubber mold, hydraulic heads for billet conditioners, hoist drums, clamps, piston rings, cylinders, slack adjusters, fly wheels, plough shares, farm equipments.

### III. メーハナイト鑄鐵

#### ま え が き

メーハナイト鑄鉄\* は一種類の鑄鉄の名称ではなく、また強力とか耐酸とかいうような一種類の特定性質を具備する鑄鉄の名称でもない。メーハナイト会社のいうところに従えば一般工業用 7 種、耐熱用 6 種耐磨耗用 7 種、耐蝕用 4 種、合計 24 種類の鑄鉄の総称である。

一般工業用と称しているものを見るに、引張強さ及びブリネル硬度 21.1kg/mm<sup>2</sup>, >174 から 38.5kg/mm<sup>2</sup> >207 の間に亘つて居り、大体に於いて所謂高級鑄鉄の部類に属し、あまり珍しい材料とはいえない。但し“均一的に健全で、信頼できる材料”という同会社の理想は傾聴に値するものである。

メーハナイト鑄鉄操業法といつても一種の特定操業法ではなく、いろいろの操業法に依つていろいろの用途に適する鑄物を製造するのである。

#### 1. メーハナイト鑄鐵の發達

1920 年イギリス人 G. J. Stock と H. H. Blackburn とが、緻密な強力な鼠鑄鉄を造る目的で、鋼屑を加炭、熔解し、その熔鉄に黒鉛化促進剤として Si を添加するという特許を得た。1922 年 A. F. Meehan が実際には内容の同じである特許をとつた。それは凝固すれば白鉄に

\* メーハナイト会社は Meehanite metals と呼んでいる。

なるような熔鉄に“鉄を含まない珪化物”(EisenfreiのSilizid)を添加して鼠銑に凝固させる方法である。それ等の珪化物の一例としてカルシウム・シリサイド(Ca~Si)を挙げてある。これはアメリカ、イギリス、フランスの特許である。メーハナイト会社はドイツの特許を1928年にとつたが、それはCa, Mg 或は其他のアルカリ土族金属を熔鉄に添加して黒鉛化を促進するという特許である。

こんなに古い発明が何故もつと早く実用化されなかつたかといえば、炭素の少ない鑄鉄にカルシウム・シリサイドを添加しても強くならず、高炭素鑄鉄へ添加すれば反つて弱くなるという具合だからであろう。

白銑か又は班銑に固るような鑄鉄に添加すれば著しく強さを増すのである。少くとも3.0%以下、できれば2.8%以下の炭素含有量の鑄鉄でなければ強さは増さない。そして、かような低炭素鑄鉄を造るには鋼屑を沢山使わねばならぬ。キューボラ熔解で鋼屑を多く使うようになったのは近年のことであるから、従つてメーハナイトの発達が遅れたのであろう。

1938年 V. A. Crosby & A. J. Herzig は合成鑄鉄に就いて、熔湯をトリベへ移してから後でSiを添加する操作が機械的性質及び組織にどんな影響を及ぼすかを実験した。高周波炉で鋼屑、黒鉛、フェロアロイを装入して熔解したのであつて、化学組成は3.04~3.11% C, 2.07~2.17% Si, 0.80~0.89% Mn のものであつた。トリベ添加のSiを全Siの0%, 25%, 50%, 75%, 100%と変化して見たところ、硬さは皆同一であつたが引張強さは27kg/mm<sup>2</sup>位から34kg/mm<sup>2</sup>位まで増加した。引張試験でも曲げ試験でも、50~75% Siをトリベで添加したものが最優秀であつた。これは黒鉛の形状が帯状から円味あるものに変化し、均一に分布した為である。

1944年 G. Itam は鋼屑を多くしてキューボラで1550~1600°Cに過熱し、Ca~Si やフェロシリコンやフェロマンガンを添加して細かい結晶粒の高級鑄鉄を造ることを研究し、添加物を投入したら約5分間放置して鑄込むが良く、15~20分間も放置すれば添加物の効果は弱くなつて駄目だと述べている。

## 2. メーハナイト鑄鐵の製造法

メーハナイト操業法では50~80%の鋼屑を使い、%Cと%Siとを低い値にコントロールして、熔湯は白銑か班銑に固るようにして置き、その熔湯にトリベの中で1トンに付2.5~3.5kgのカルシウム・シリサイド(Ca~Si)を添加して鼠銑に固らせるのである。Ca~Si

添加後数分間放置し、スラッグを除去して鑄込む。普通使われるCa~Siの組成は33~35% Ca, 58~65% Siである。鑄物製品の%Siの増加は0.40%以下、Ca含有量は痕跡に過ぎない。Ca~Siを添加すれば発熱反応が起り、局部的の温度上昇がひどい。

化学的組成をコントロールする事も勿論大切であるが、物理的条件を正確に一定するようにコントロールする事は一層大切である。即ち顕微鏡的の組織要素特に黒鉛の形状、分布状態、分量などを正確にコントロールするのである。

キューボラでも電気炉でも平炉でも造れるが、キューボラが一番多く使われる。今日では一番良い黒鉛組織はキューボラで得られると広く信ぜられている。そこでメーハナイト会社ではキューボラ熔解法を多年に亘つて綿密に研究し、いろいろの特許をとつて技術を発展させたのである。原材料は充分選別し、操業は厳重に監督し、トリベ毎に鑄込む前に組織を検査して黒鉛化程度をコントロールする。このように注意して製造しなければ均一の強さを持ち、信頼性に富む製品は造れないのである。

## 3. メーハナイト鑄鐵の組織

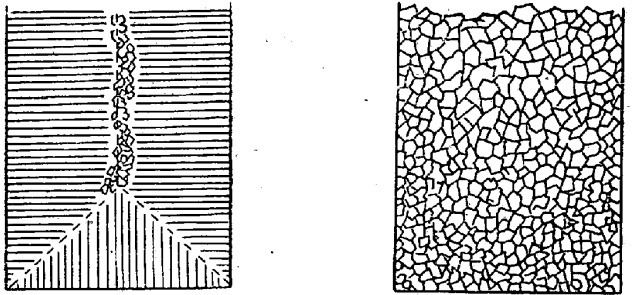
メーハナイト鑄鐵の組織を記述するに当り、これをMatrix (Ground mass, 地鉄)と黒鉛と鑄造組織(一次組織, Primary structure)とに分けて考へることによろ。

**Matrix:** メーハナイトの地鉄はフェライトの無い(No free ferrite), 完全のパーライトである。耐磨耗性と靱性(Toughness)とを必要とする場合にはソルバイト又はソルバイト的パーライトにする。即ちメーハナイトはパーライト鑄鐵に属する。

**黒鉛:** 普通鑄鉄では黒鉛は全体積の10%以上の体積を占め且つ互に連結する傾向がある。それ故黒鉛が相当粗大ならば低圧でも水洩れを起し易く、機械的性質も劣るのである。鑄物の肉厚が増すに従つて特にそういう欠陥を生ずる。メーハナイトGAに於いては黒鉛の体積は全体積の8.3%, GMに於いては7.0%に過ぎない。(第1章に述べた少量黒鉛鑄鉄はメーハナイトである)。その上これ等の黒鉛は小さい片状として均一に分布している。また各小片状黒鉛は互に連結しないようになつて居り、パーライトMatrixを弱めないから、材質は強力で、緻密で、耐水圧性が良く、全体的に均一なのである。それでいて余り硬くなくて切削できる。

**鑄造組織:** 熔湯にCa~Siを添加して接種するから極微の黒鉛粒を無数に析出し、触媒的(Catalytically)に黒鉛化が進行する。これ等の微粒子が核となつて結晶

(Grains) が発達するから、柱状組織 (Columnar structure) にならずに各結晶粒は任意の方向に向う (Equiaxed crystals). しかもそれ等の結晶粒は数が多いから、全体として細かい緻密の組織 (Grain structure) になる (第2図参照). かようにして柱状組織に由来する脆弱線 (Weak line), 脆化及び収縮亀裂 (Shrink cracks) は存在しないことになる. これもメーハナイトの特長であると称している.



Columnar crystals (点線は Weak line)      Equiaxed crystals (Weak line がない)

第2図

4. メーハナイト鑄鐵の性質

**A. 鑄造性:** メーハナイト鑄物は肉厚の如何に拘らず均一に緻密で結晶粒が細かいといつて居る. 比重は鼠鑄鉄の 7.00 に対して 7.02~7.48 と幾分大きい.

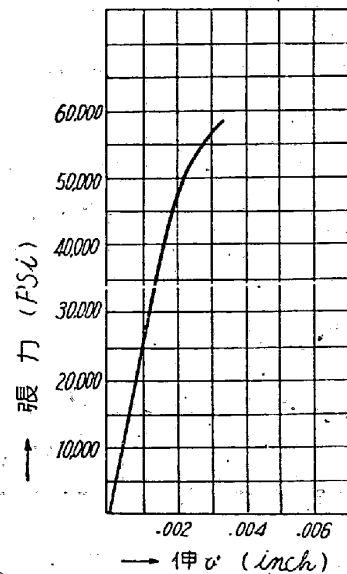
鑄物は一般に肉が厚ければ冷却速度が遅いから組織が粗く、黒鉛は大きくなり、引張強さは減る. メーハナイトにも此の傾向はあるが、その程度が著しく少い. 肉厚の中心部は硬度低く、周辺に行くほど硬度が高くなるのが普通鑄鉄の例であるがメーハナイトはそれと異り、中心部も周辺部も至るところ硬度が同一である. メーハナイト GM, GA, GB は 3/8" 以下の薄肉では白鉄化して硬くなり、GC, GD, GE は 2/8"~1/8" の薄肉でも鼠鑄であつて、切削性を失わない. かように或種類のメーハナイトは質量効果 (Mass influence) の小さい点でも優秀である.

**B. 機械的性質:** 第3表に一般工業用メーハナイトの鑄造のままの (As cast) 引張強さ, 弾性率 (ヤング率), 衝撃値, ブリネル硬度を示す (メーハナイト会社発表のデータ). 或書物に依ればブリネル硬度 160~280, 引張強さ 28~50kg/mm<sup>2</sup>, 弾性率 12,000~18,000kg/mm<sup>2</sup>, 熱処理を施せば一層良くなる. 例えば GA を 850~875°C に加熱して空冷すれば 65kg/mm<sup>2</sup> の引張強さ 20,850kg/mm<sup>2</sup> の弾性率, ブリネル硬度 245 になると記載してある.

第3図の張力—伸び曲線に於いて, 0.2% 塑性伸び

第3表 一般工業用メーハナイト鑄鐵の機械的性質 (As cast)

符號	GM	GA	GB	GC	GD	GE
引張強さ (kg/mm <sup>2</sup> )	38.5	35.1	31.6	28.1	24.6	21.1
弾性率 (kg/mm <sup>2</sup> )	15,500	14,100	12,700	11,900	10,500	8,450
衝撃強さ (kg-m)	1.1	0.99	0.80	0.62	0.44	0.29
ブリネル硬度	>217	>207	>196	>192	>183	>174



第3圖 メーハナイト GA の張力—伸び曲線

の張力を降伏点として次の値を示してある.

メーハナイト GA (As cast)

- 比例限 (kg/mm<sup>2</sup>) 15.2
- 降伏点 ( " ) 33.2
- 引張強さ ( " ) 39.7
- 弾性率 ( " ) 14,100

一般構造用鋼では (降伏点) < (引張強さの 50%) の関係であるが、メーハナイトでは (降伏点) = (引張強さの 80%) 関係であるから、メーハナイトは鋼より大きい静荷重に堪えるともいえる.

普通鑄鉄は 0.7kg/mm<sup>2</sup> 以上の張力を加えれば張力—伸び関係が直線でなくなるから (Hooke's law に従わない), A.F.S. の Handbook には鼠鑄鉄の "有効弾性率" (Effective modulus of elasticity) として引張強さの 25% を採用している. それに反してメーハナイト GA の (張力—伸び) 曲線は第3図に示すように可なりの高張力まで直線であつて、弾性限及び比例限が明瞭に現われて居る. 即ちメーハナイトは設計上信頼性があるとしてメーハナイト会社では主張する.

メーハナイトの圧縮強さは引張強さの3.5~4.0倍あり、鉄鋼材料中で一番強力であるという。それ故 Press tools, Stamping dies, General machinery parts 用に適する。試験棒を圧縮したところ、体積で10%以上の黒鉛を含む普通鑄鉄は脆くて破壊したけれど、黒鉛を7%きり含まないメーハナイトは遙かに大きい荷重を加えても鋼やマレーブルのように只変形しただけで破壊しなかつた。

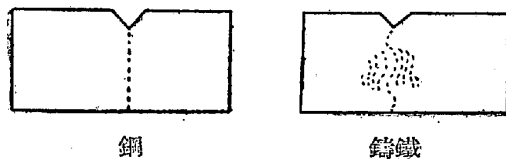
メーハナイト GM, GA は鑄鋼やマレーブルに比肩するくらいな衝撃値を、Charpy 式でも交番打撃式でも示す。

メーハナイトの疲労限はその引張強さの凡そ45%である。例えば GA の疲労限は

16.2kg/mm<sup>2</sup> 無溝試験片 (Unnotched)

14.1 " 有溝試験片 (Notched)

であつて、凹みをつけたものとつけないものとの差が少い。延性のある鋼の有溝試験片は第4図の点線に示すように恰も脆い材料であるかの如く直線的に破壊する。



第4図 疲労試験片の破壊の通路

メーハナイトは黒鉛が分布しているから直線的に破壊が進行し得ないで、屈曲して進行し、破壊通路が拡がって巾を持つ。それ故“Unnotched specimen の疲労限”と“Notched specimen の疲労限”との差が鋼や非鉄合金では50%にも及ぶに反してメーハナイトでは非常に小さいのである。但しこの事は鑄鉄一般に就いての特長である。鑄鉄試験片では仕上面に黒鉛が存在するから(黒鉛は強さ零と見做される)、特に凹みをつけなくても之をつけたと同じことであり、疲労限は低いのである。それに更に Notch をつけたところで、大して疲労限は減らない訳である。兎に角“Notch sensitivity”が小さくて、Keyways, grooves, sharp fillets, defective machine finish 等に原因する疲労限低下の極めて少い事は設計上鑄鉄の有利の点である。

メーハナイトは鋼より減衰能 (Damping capacity) が大きい。減衰能の大きいことは一般鑄鉄の特長であるが、メーハナイトは引張り、圧縮等に対して強力であるから精密機械の材料 (Precision machinery construction) に適する。減衰能の大きい材料は振動が早く止まるから、耐疲労性の成績もよい訳である。

メーハナイトは組織の Matrix が完全にパーライトであつて、その間に黒鉛を含むから耐摩耗性が良い。

メーハナイト鑄物は製造に極めて注意を払つてあるから white corners, hard edges, free cementite 等が存在しない。従つて切削性が良い。

C. 化學的性質: 濃硫酸, 弱酸, 有機酸等に対して耐酸性のもの、耐アルカリ性のもの及び塩類に耐えるメーハナイト鑄鉄等として推奨しているものもある。

耐熱メーハナイト鑄鉄として推奨しているものも色々あり、その中には成長 (Growth) が普通鑄鉄の十数分の一以下に過ぎないようなものもある。それ等は耐酸化性も良好である。

### 5. メーハナイト鑄鐵の熱處理

A. 鑄造歪力を除去する目的で行う熱處理は次の如くである。

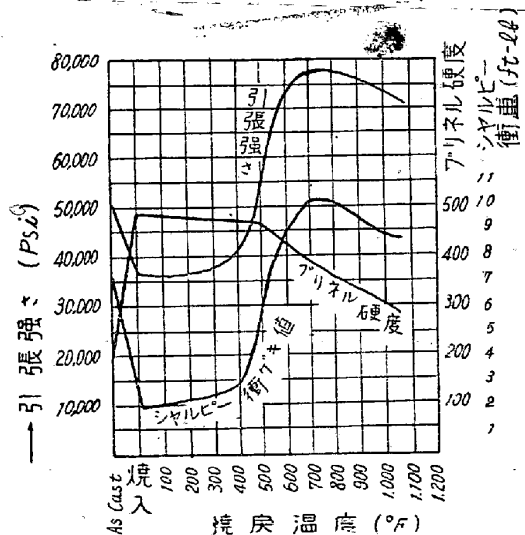
GE, GD 510~538°C に焼鈍して極めて徐々に冷却

GC, GB 565~593°C " "

GA, GM 593~620°C " "

強力の種類ほど高温に加熱するのである。

B. 硬くする目的の焼入、焼戻は高力メーハナイト GM, GA, GB に於いては炭素鋼と同じ要領で行う。ブリネル硬度 320 位でも切削できる。引張強さ、硬度、衝撃値に及ぼす焼入、焼戻効果を第5図に示す。



第5図 メーハナイト GA の熱處理と機械的性質

C. オーステンパー (Austempering) を行うには鑄物を変態点以上、860°C に加熱して均一の温度に達したものを熔融塩または熔融金属の槽に移す。槽中に凡そ30分間置いてパーナイトになつたら出して空中冷却する。この熱處理を行えばパーライトにもマルテンサイトにもな



らずしてペーナイトになる。大きい鑄物には効果的でない。靱性を減らさないで引張強さと硬度とを著しく増すことが出来、又油や水へ焼入する操作と異り亀裂を発生しない。槽の温度は 400°C である。著し引張強さを少し増すに止め靱性、衝撃抵抗を増大する目的ならば槽の温度は 455°C である。

**D. マルテンパー (Martempering)** は焼入してマルテンサイトにするのであるが、其際硬化歪み (Hardening strain) をできるだけ少くする操作である。860°C に加熱した鑄物を 205~260°C の熔融塩槽中に焼入し、1~2 分の後出して空冷するのである。肉厚物ならば 860°C から直接水中に焼入し、凡そ 260°C に冷えたら出して 205°C の槽中に移し、均一の温度に達したら出して空冷するのである。その原理は次の如くである。

260°C まで急冷する間に著しい収縮が起るが、その収縮は材質が未だ延性に富むオーステナイトである間に起るから、発生する歪みは直ちに消散して歪力は残らない。其後の空冷に際してマルテンサイトを発生して体積を増すけれど、それは歪みの存在しない材質中で起ることになる。複雑の鑄物を硬くせねばならず、普通のように油や水へ焼入したのでは亀裂を発生する患ある場合にマルテンパーは特に必要である。マルテンパーした後に低温焼戻すれば亀裂発生患は一層減る。普通焼入に比して引張強さは変らないが靱性は増す。

**E. 表面硬化 (Hard surfacing)** を行うに三つの方法がある。チル (Chilling) に依る方法では表面硬度がブリネル 525 位までになる。深い硬化層を欲する場合、強く靱性に富むことを欲する場合等それぞれに適當する種類の鑄鉄を推奨している。高周波または火焰 (Induction or Torch) に依る表面焼入法はチル法のように深くは入らないが硬度は一番高く、ブリネル数 600 位にも達する。また切削仕上を済ませてから表面を硬化させることが出来る。鑄物の表面に硬い合金を熔接する方法もある。ステライト、高クロム合金等を被覆したり、磨耗する角や点 (edge, point) に熔着するのである。この方法は耐酸、耐蝕の目的でも実施される。

#### 6. メーハナイト鑄鐵に関する結論

メーハナイトは組織の Matrix が完全にパーライトで、黒鉛は小片状のものが均一に分布し、且つ %C が少いから黒鉛同志が互に連結しないようになっている。この組織によつて耐水圧、高力、耐磨耗、耐熱等の優秀な性質を具備するのである。

大発明という材料ではなく、所謂高級鑄鐵の部類に属するものである。但しメーハナイト会社は“均一的に健

全で、信頼できる鑄物”、“いつも同じ性能を持った鑄物”という理想をもつて製造法にいろいろ注意を払っているようである。

キューボラ熔解法から鑄造法まで詳細に研究して技術を集積し、實際作業の指導ができるようになってきているらしい。色々の性質を入念に実験して、沢山のデータを揃えてあるから製造者も使用者も安心できる。強力、耐熱、耐磨耗、耐酸等いろいろの目的に適する品種を揃えてあり、しかも製造法から用途まで調査してあるから非常に便利である。

## IV. ペーナイト鑄鐵 (Acicular cast iron)

### まえがき

この材料は鑄鐵に熱処理を施し、その顕微鏡組織の Matrix をペーナイト化して強力と靱性とを与えたものである。第二次世界大戦の直前から主として英国で研究され、大戦中に発達して相等使われた。

#### 1. ペーナイト鑄鐵の製造法

之はパーライト鑄鐵を熱処理しても造れるが、多くは Ni, Cu, Mo, Cr 等を合金して造る。但しマルテンサイトやオーステナイトになる程多量にはこれ等元素を添加しない。そして添加量を加減して 480~260°C の間でオーステナイト→ペーナイト (Acicular structure) の変態が起るようにするのである。

全炭素量は 2.3~3.1% に保つべきで、なるべく 2.5% 以下が望ましい。2.8% 以上の高炭素のものはキューボラ熔解であり、低炭素のものは電弧炉、高周波炉またはルツボ炉熔解である。P は 0.12% 以下に保たねばならぬ (特に薄肉物では)。

高炭素のものゝ標準組成は次の如くである。

2.7~3.1% C, 1.6~2.6% Si, 0.6~0.9% Mn,  
<0.15% S, 0.15% P

トリベの中で 75% Si のフェロシリコン等を用いて接種 (Inoculation) する事が必要であり、接種によつて 0.3~0.6% Si が熔鉄中に増加するように計算する。

又合金元素の添加は次の如く行う。

Ni: 肉厚 40mm まで	0.5~1.5%
45~75mm	1.5~2.5%
75~100mm	2.5~3.0%
100~200mm	3.0~4.0%
200mm 以上	>4.0%

装入配合に加えてもよく、またショットの形でトリーブ中へ加えてもよい。

Cu: 1.5% までは Ni の代りに同量の Cu を使う。1.5% 以上の場合は、1.5% だけ Cu を使い、残りは Ni を用いる。Cu の切片を装入配合に加えるか、又は温めてトリベ中で添加する。

Mo: 0.7~1.0% の粒または粉をトリベ中で添加する。

Cr: 0.3% 以下

装入配合は鋼屑、 $\alpha$ -マタイト又は合成銑、フェロシリコン、フェロマンガソである。鑄造性は同じ % C, % Si の普通鑄鉄と似ている。厚肉物より薄肉物の方が造りにくい。

## 2. ベーナイト鑄鉄の熱処理, 組織, 性質

鑄物には熱処理が必要である。即ち 300~350°C に 5 時間保持して徐々に冷却するのである。但し肉厚 50mm 以上のものは 25mm 毎に保持時間を 1 時間延長する。この熱処理を施せば硬さを余り害することがなくて加工性を良くし且つ強力と靱性とを与えることが出来る。

組織はマルテンサイトに似て居り、針状のフェライトが析出したベーナイトである。但しマルテンサイトと違って加工性が良く、又ベーナイトと違って強力で靱性がある。

鑄放し (As cast) では機械的性質は余り優秀でないがそれでも屈曲 (Bending) は大きい。260~370°C に 5 時間以上焼鈍すれば著しく強力になる。もつと低温焼鈍でも有効であり、例えば 2.3~2.7% C, 0.5~0.7% Mo, 2% までの Ni の接種したものを 205°C で 15 時間まで焼鈍すれば 45~65kg/mm<sup>2</sup> の引張強さを持つ。ベーナイト鑄鉄はベーナイト鑄鉄より靱性に富み Izod 値は後者の 3~4 倍に達する。ブリネル硬度 300 位もあるに拘らず切削加工ができる。また Matrix に残留

オーステナイトが存在するために耐摩耗性が良い。

## 3. ベーナイト鑄鉄の用途

以上の性質から、どんな応用が可能かは略々分るであろうが、次に用途の數例をあげよう。

ディーゼル又はオットー・エンヂソのクランク軸及びカム軸、齒車、工作機械の部品、シリンダ・ライナー、コンプレッサー、砲彈製造用の型 (Dies), スタンプング又はパンチングの工具、プレス又はハンマー部品

要するに強力で衝撃抵抗が大きくて且つ減衰能も大きい事を必要とする場所に使われるのである。又焼鈍するから鑄造歪力は除かれてあり、そのため歪みを生ずる心配なしに加工できる。一例を挙げれば砲彈の型に使つた場合に鑄鉄の良質のもの 4~10 倍の寿命があつた。即ち鼠鑄鉄の型が 8,000 回の打撃で使えなくなつたのに比して 62,000 回の打撃に堪えたのである。

(昭和 28 年 8 月寄稿)

## 文 献

- 1) 飯高一郎: 日本鑄物協會誌 “鑄物” 1950 年 2 月號  
Rep. Cast. Res. Lab., Waseda Univ. 1950;  
Foundry Trade Jour. Nov. 1951.
- 2) 同 : 日本鑄物協會誌 “鑄物” 1953 年 7 月號;  
Rep. Cast. Res. Lab., Waseda Univ. 1953.
- 3) 同 : “合金學新論”, 1953, 第 V 章, 第 1 節,  
第 2 項 A. 實驗的に證明された假定である。
- 4) 同 : Sci. Pap. I.F.C.R. 33, 273 (1937).
- 5) 同 : “理論合金學”, 第 137 頁.
- 6) 同 : Rep. Cast. Res. Lab., Waseda Univ.  
1953; “鑄物” 1953 年 7 月號.
- 1) 松浦佑次: “球狀黒鉛鑄鉄の研究”, 昭和 27 年日刊  
工業新聞社發行, 第 58 頁.