

# 本邦鐵鋼科學の進歩

理學博士 本多光太郎\*

## 緒言

本邦鐵鋼科學最近の進歩は實に目覺ましく、研究論文の數に於てのみならず、質に於ても、毫も歐米先進に劣る所なく、局部的には却つて凌駕してゐると思はれる方面もある位である。顧みるに鐵鋼學の研究が本邦に於て創められたのは、漸く明治末期から大正初期にかけての頃であつたと思ふ。それ以前に、製鐵事業は起され、鐵冶金學は各大學に於て研究されたのであるが、主に製鐵及び製鋼に関する方面に限られ、鐵鋼の材質の方面、即ち金相學の研究は極めて寥々たるものであつた。當時、鐵鋼學に關し、歐米先進は既に確乎たる存在を示し、着々研究の實績を擧げてゐた。斯かる時機に際し、遅れ駈せながら起つた本邦鐵鋼學の研究は、當初は先進諸外國に追從して行くに汲々たる状態であつたが、大戰前後から急激に擡頭し始め、其後日進月歩、遂に今日の地位を占むるに至つたのである。其間僅かに 20 年餘、實に驚くべき發達振りと言ふべく、邦家のため誠に同慶の至である。

研究機關は官公立各大學の冶金學教室、金屬材料研究所、理化學研究所、陸海軍工廠の研究部の外、八幡製鐵所、其他民間各會社の研究室等で、年々數多の研究論文が、鐵と鋼、金屬の研究、水曜會誌、機械學會誌、其他、民間各會社の研究報告に發表されてゐる。

以下、本邦鐵鋼科學の諸方面に就き、その進歩の趨勢を述べやう。

## I. 研究方法の進歩

20 年前迄は、鐵鋼の冶金學的研究方法としては、主に化學分析、熱分析と顯微鏡的研究に據つたのであるが、其後に至り、色々な物理的方法が應用されるやうになつた。例へば、磁氣分析法、電氣抵抗法、熱膨脹法及び X 線分析法等である。その内でも最後の X 線分析法は冶金學に劃時代的の發達をもたらした、即ち従來の顯微鏡的方法では合金の表面だけしか見えず、而かも適當な腐蝕剤がないと各相を區別するのに相當困難を感ずるのであるが、X 線分析法

\* 東北帝國大學總長

は金屬の内部に於ける原子配列を知ることが出来るので、相の區別は勿論のこと、内部歪の有無及び量迄も知ることが出来、それだけ研究が精密に行はれる理である。

又熱分析では熱効果の小さい變化は現れない、且つその性質上、加熱及び冷却速度に一定の制限があるので、假令變化點が觀測されたにしても、眞の溫度を示さない。然るに、他の物理的性質の測定に由ると、熱効果の小さい變化でも大きく現れることがあり、又加熱、冷却速度は幾らでも緩にやれるので、眞の變態點を知ることが出来る。而も之等物理的性質の測定に據ると、状態圖が知られると同時に實用上有用な合金が見付かると云ふ便利がある。例へば熱膨脹、磁氣分析により、鐵鋼の變態及び焼入、焼戻現象が著しく明瞭となり、又  $Co$  の新變態が発見された。更に歐米先進國を後に、最近、本邦人に由つて陸續として決定された特殊鋼の状態圖も凡べて之等物理的測定法に負ふ所大で、之等の研究は又 K. S 磁石鋼、M. K 磁石鋼、新 K. S 磁石鋼、超パーマロイ、超不變鋼、センダスト、等世界に誇る幾多有名な合金の発見をもたらした。

以上の外、最近早川數馬氏は熱電子現象を金屬の變態の研究に應用して成功した。即ち熱電子衝擊に依り金屬より發散する 2 次電子を測定する方法で、 $Fe$ 、 $Co$  の變態及び鐵の  $A_2$  變態は之に依り著しく明瞭に現れる。

蓋し、本邦鐵鋼科學の研究が一躍世界の水準線に到達したに就いては幾多の原因あらんも、就中、上述の如き諸物理的性質の測定法を應用したことが與つて力あるものと考へられる。因みに、之等の方法は専ら金屬材料研究所で創案若しくは改良したものである。

## II. 鐵鋼の性質

鐵鋼の變態點に關する以前の研究は何れも熱分析に據つたので、甚だ不正確であつた。然るに、上記物理的諸測定法が應用されるに及んで始めて正確なものが得られた。即ち佐藤清吉氏は示差熱膨脹計によつて鐵の  $A_3$  及び  $A_4$  變態點を測定して  $\alpha$ -鐵と  $\delta$ -鐵とが同一の相であることを確め、筆者、石原寅次郎、茅誠司、等の諸氏は熱膨脹法、磁氣分析法及び電氣抵抗法により鋼の  $A_3$ 、 $A_2$ 、 $A_1$  及び  $A_{cm}$

變態點及び固相線を精確に決定した。更に佐藤知雄氏は同様の方法に據り、純粋な鋼に就き、種々の加熱、冷却速度に於ける變態點を測定し、外挿法により最も平衡に近い變態點を決定した。又鐵の  $A_2$  變態が單なる磁氣的變化で、普通の變態の如き相の變化でないことは 20 年前から筆者によつて提唱され來つた所であるが、其後 X 線分析の結果その事實なることが證明され、今や世界中誰しも之に就き疑問を持つ者が無くなつた、即ち此變化に際して鐵原子の配列は變化せず、強磁性の消失は分子磁石の複素體の熱的攪亂に因るのである。

鋼の焼入理論に就きては従來種々なる學説が唱へられてゐたが、最近 X 線的研究により此問題は解決された。 $A_1$  變態の内容は、オーステナイト  $\rightleftharpoons$  パーライト  $\equiv$  地鐵 + セメントイトなる變化で、之を原子的に考へると 2 つの變化から成立つ。即ち  $A_1$  點以上に於て安定なオーステナイトは鐵原子に就ては面心立方型の配列を有し、炭素原子はその單位格子の體心の位置に公算の法則に従ひ、此所彼所に散布されてゐる、之が  $A_{F1}$  點以下に於ては變化して鐵原子は體心立方型の配列を取り、炭素は鐵と化合してセメントイトを作つて鐵格子から析出する。従つて  $A_1$  變態はこの 2 つの變化、即ち鐵原子の配列が面心立方型から體心立方型に變化すること、次に炭素原子が鐵格子内から析出してセメントイトを作ることから成つてをる。所で、高溫度から緩冷すれば此 2 段の變化は完全に進行するが、水焼入の場合の如き急速冷却に於ては、第 1 の變化は起るが、第 2 の變化は阻止されて鐵格子が體心型になつたまま、炭素はまだその格子内に残留する、此状態が所謂マルテンサイトで非常に硬い。却ちマルテンサイトは  $\alpha$ -鐵と炭素との強制固溶體で、 $A_1$  變態の一部分が進行した中間體である。而して今より 10 年前、松下徳次郎氏は焼入鋼の焼戻現象の研究結果よりマルテンサイトに  $\alpha, \beta$  の 2 種があり、前者は後者より不安定であることを發見したが、其後、筆者及び關戸信吉、西山善次の諸氏の X 線的研究によつてこの事が確證された。之によると  $\alpha$ -マルテンサイトは焼入後の新試料に存在し、 $\beta$ -マルテンサイトは之を  $80 \sim 100^\circ\text{C}$  に數分間焼戻せる試料に存在し、前者は軸比  $1.03 \sim 1.07$  (炭素量に由り異なる) なる體心正方格子を有し、後者は體心立方格子 (或は軸比 1 なる體心正方格子) を有する。従つて  $A_1$  變態は

X 線的には

正方晶系 ( $c/a = \sqrt{2}$ )  $\rightleftharpoons$  正方晶系 ( $c/a = 1.03 \sim 1.07$ )  
 $\rightleftharpoons$  正方晶系 ( $c/a = 1$ )  $\rightleftharpoons$  セメントイト + 地鐵  
 組織的には

オーステナイト  $\rightleftharpoons$   $\alpha$ -マルテンサイト  $\rightleftharpoons$   
 $\beta$ -マルテンサイト  $\rightleftharpoons$  パーライト

なる順序に起ることが容易に考へられる。而して焼入は上の變化の一部分が阻止されたものである。

更に、マルテンサイト内に於ける炭素原子の位置に關しては筆者及び西山善次氏の研究がある。即ち炭素原子はマルテンサイトの鐵格子内に入り、 $\alpha$ -マルテンサイトでは  $(1/2, 1/2, 0)$  即ち面心、 $\beta$ -マルテンサイトでは  $(1/2, 1/4, 0)$  の位置に在るを妥當と考へられる。

上式から判るやうに、オーステナイト  $\rightarrow$  マルテンサイトの機構は、結果から見て  $\gamma$ -晶がその長軸の方向に收縮し、それと垂直の方向に一樣に膨張し、逆に軸比 1 なる體心正方晶、即ち  $\alpha$ -鐵の示す如き體心立方晶に變化することに歸着する。此學説は米國の Bain が提唱したもので、 $\gamma \rightarrow \alpha$  の變化を考へるのに甚だ便利であるが、實驗上證明されたわけではない。獨逸の Kurdjumow 及び Sachs は寧ろ次の如く説明してゐる、即ち  $\alpha$ -晶の  $(111)$  面で  $[211]$  方向に亘つて此面が  $\gamma$ -晶の  $(011)$  面となり、それと同時に亘り面内に於て  $\gamma$ -晶の  $[\bar{1}01]$  方向が  $\alpha$ -晶の  $[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$  方向となる様に亘ると云ふのである。この機構は一見複雑に見えるけれども原子の相對的移動のみからすれば Bain の機構と一致する。又西山善次氏が  $Fe-Ni$  合金に就いて最近研究せる結果によるに、Kurdjumow 及び Sachs のそれと類似してゐる、即ち  $\gamma$ -晶の  $(111)$  面を亘面として  $[211]$  方向に  $19^\circ 28'$  だけ亘り、之と同時に  $[01\bar{1}]$  方向に  $13.3\%$  の膨張、 $[211]$  方向に  $7.5\%$  の收縮、之等に垂直の方向に  $1.9\%$  收縮して  $\alpha$  に變化する。併し、以上の機構は何れも猶多少實驗結果と一致しない點がある。

次に焼戻に就て述べる。マルテンサイトは  $A_1$  變態の途中の組織であるから常溫に於て不安定である。従つて之を焼戻する時は阻止された上記の諸變化が相次いで進行し、安定状態に復歸する。松下徳次郎、永澤清兩氏は焼入鋼の焼戻に伴ふ電気抵抗、體積及び磁氣的變化を、又佐藤清吉氏は發熱量を測つて、その機構を明にした。それによると焼戻に伴つて四段階の變化が起る。第 1 は  $100^\circ\text{C}$  附近に於て生ずる  $\alpha$ -マルテンサイトより  $\beta$ -マルテンサイトへの變化で、抵抗の減少、體積の收縮、磁氣並に硬度の増加及

び微量の發熱を伴ふ。第2は 250°C 附近に於て極大を有する  $\beta$ -マルテンサイト及び残留オーステナイトの分解で、抵抗及び硬度を減少し、磁氣を増し、異常發熱を生ずる。尙  $\beta$ -マルテンサイトの分解は 100°C 以上に始まり 300°C 附近で終り漸次的に行はれる。第3は 380°C 附近に起るもので、ツルースタイト中のセメントタイトの結晶完成に相當し、抵抗、磁氣、體積、硬度何れも減少して發熱を伴ふ。第4は 500°C 以上に起り、物理的性質は變化しないが著しく硬度を減じて靱性を増す、之はツルースタイトのソルバイト化及び内部歪の消失に因る。

以上の如く、鋼の焼入、焼戻理論に關して、本邦は早くから独自の學説を唱へ、その解決に貢獻せる所甚だ大である。又焼入、焼戻に伴ふ諸現象に就きても幾多有益な研究が發表されて、世界の學界を賑してゐる。例へば佐藤清吉氏は氏獨特の巧妙なる焼入自記膨脹計を創案し、之を用ゐて種々の冷却條件の下に於ける焼入状況を研究し、Ar' 變態と Ar'' 變態の區別を明にし、前者は結節状ツルースタイト、後者はマルテンサイトを生ずることを示した。同氏は又焼入試料の表面に施す塗付物の焼入効果に及ぼす影響を研究し、實際の焼入操作に大なる貢獻をもたらした。

焼入鋼には普通少なからざるオーステナイトが残留するものであるが、之に關して田丸莞爾、關戸信吉兩氏の磁氣及び X 線的研究、及び三上美和吉氏の磁氣的研究がある。田丸氏は又焼入、焼戻鋼の硬度を測り、オーステナイトよりパーライトに至る諸組織及びセメントタイトの硬度を決定した。焼入鋼は不安定であるから常溫に於ても徐々に變化し、所謂時效を生ずることは古くより知られて居たが最近、横山均次氏の電氣抵抗及び硬度測定に由る研究がある。西山善次氏の X 線的研究に由ると  $\alpha$ -マルテンサイトは容易に  $\beta$ -マルテンサイトに變化して時效硬化を起すが、オーステナイトは常溫では殆ど變化せず、60°C 以上に於て變化し始める。又加工に由てオーステナイトが容易にマルテンサイトに變化することに就いては筆者及び岩瀬慶三氏の研究がある。

マルテンサイト様の針状組織は鋼に限らず、Fe-Ni、Fe-Cr 等の炭素を含まない鐵合金に於ても、之を  $\gamma$  の範圍から焼入すると、この組織が現れて硬くなる。X 線分析によれば、體心立方晶系である。従つて此場合の針状晶は外見がマルテンサイトに似てゐる 丈で普通の  $\alpha$ -鐵と變りない。併し之に炭素の加つた特殊鋼の焼入組織は矢張り正

方晶系のマルテンサイトから成つてゐる。之等に就きては西山善次氏の X 線的研究がある。即ち特殊鋼のオーステナイト及び正方晶系マルテンサイトの格子常数は特殊元素が入つた炭素鋼のそれより膨脹してゐるが、炭素量との關係は炭素鋼に於けると大體同様である。但し高マンガンオーステナイト鋼を焼入、焼戻して得られる針状晶は例外で、之は主として Fe-Mn 系の六方晶固溶體で、研磨の際オーステナイトが變化して生じたものである。

オーステナイトのマルテンサイト化には著しき膨脹に伴ひ、その部分的不同は焼割の原因となる。此の異常膨脹に關して、曩に松下徳次郎氏は炭素鋼に就き自記膨脹計に據つて研究し、最近、村上武次郎、八田篤敬兩氏は松下氏の裝置に改良を加へ、種々の特殊鋼に就きて同様の研究をなし、焼入膨脹速度に及ぼす特殊元素の影響を明にした。

焼入鋼は常溫加工せる鋼と同じく、マルテンサイト化に基く急激な異常膨脹のためにその内部に大なる歪力が存在する。關戸信吉氏は X 線的研究により常溫加工及び焼入せる鋼の内部歪を測定し、何れの場合にも最高内部歪はその抗張力より少しく小さい位であることを見出した。

焼戻に由つて得られるツルースタイト及びソルバイトは優秀な機械的性質を有し、且つ球状セメントタイトの點在せるものは切削能率が良いので好んで双物に用ゐられる。之に就いて石垣豊三氏の研究がある。鋼を高溫度に長時間熱するときはセメントタイトは球状化し、鋼は著しく靱性を増す、此球状化の成生機構に關しては曩に筆者及び齋藤省三氏の研究がある。又蒔田宗次氏は特殊の熱處理に由り球状セメントタイト成生の焼鈍時間を短縮した。即ち焼入せる鋼を  $A_{c1}$  點より少しく高溫度に熱したる後、 $A_{r1}$  點以下に冷却し、更に  $A_{c1}$  變態範圍に加熱し徐冷する。斯くして微細な球状セメントタイトが均一に分布せる鋼が得られる。此方法は特殊鋼にも應用され、鋼の靱性と延伸を増し、而も降伏點の相當高いものを作ることが出来る。更に球状化に及ぼす諸元素の影響に就きては石原富松氏及び横田清義氏の研究がある。

鋼の表面硬化法として現在廣く行はれてゐるのは滲炭法と窒化法である。滲炭法は鐵を木炭末と共に高溫度に熱して滲炭せしめた後焼入するもので、其際木炭末に炭酸バリウムの如き鹽類を加へると著しく滲炭速度を増すことはよく知られたことである。岩瀬慶三氏は Fe-CO 系の平衡圖を理論的に研究し、鋼の滲炭、脱炭の機構を説明した。次

いで高橋源助氏はオーステナイトと酸化炭素間の平衡を研究して滲炭の諸現象を明にし、更に種々の滲炭剤に就いて研究した結果、鹽類が滲炭を促進する作用は、結局、滲炭瓦斯を分解して原子状の微細な炭素を鐵の表面に附着せしめ、此の發生機状態の炭素が速に鐵中に擴散するに由ると結論した。同氏は又滲炭に及ぼす諸元素の影響を研究した。滲炭に關しては、他に石澤命知氏及び井上克己氏の研究がある。前者は種々の固態滲炭剤の滲炭力及び其の減衰に就いて研究し、後者は滲炭に及ぼす鋼中の酸素の影響を研究した。

窒化法では 500~600°C に於て  $NH_3$  瓦斯中で鐵鋼を熱し、その表面に焼入鋼より遙かに硬い窒化鐵層を生ぜしめるのである。此方法は焼入を要せず。仕上げてから窒化するので、焼入の場合の如き變形が起らず。磨耗に強いのが特長である。窒化鋼材としては、窒化が速く、且つ出來た窒化層が硬く、安定なものと、内部の材質が強靱であると云ふ理由で専ら  $Cr-Al-Mo$  鋼が用ゐられる。村上武次郎岩泉修次郎兩氏は粉末試料につき  $Fe-N$  系状態圖を研究し、 $Fe_4N$  及び  $Fe_2N$  なる窒化鐵の存在を認め、大澤與美氏は X 線分析に由つて之等窒化鐵の結晶構造を明にした。其後、錦織清治氏は棒状試料に就き同様の研究を行ひその状態圖を改訂した。窒化鋼材に關しては、石澤命知氏は鋼の窒化に及ぼす諸元素の影響を研究し、實用上價值ある窒化層の組織及び窒化鋼材の組成を明にした。又伊丹榮一郎氏は  $Al-Cr$  鋼其他種々の特殊鋼に就き窒化を行ひ、窒素硬化の状況、窒化層の耐蝕及び耐熱性、及び窒化前後に於ける抗張力の變化等を研究し  $Al$  0.7~1.2%,  $Cr$  0.8~1.5% が窒化層の硬度を高め、且つ脆弱ならしめない點で最良組成であるとした。更に最近、錦織清治氏は種々の組成の特殊鋼に就き、窒化層の組織及び硬度に及ぼす諸特殊元素の影響を系統的に研究し、窒化鋼材として適量の  $C, Cr$  及び  $Al$  が必要な所以、及び特殊鋼の窒素硬化の機構等重要なる諸問題を解決した。例へば微量の  $C$  は窒化層の組織を微細化して之に靱性を與へ、 $Al$  は主として窒化層最硬部の硬度を高め、 $Cr$  は窒化層の深度を増す。又硬化層中、ビッカース 1,000 以上の硬度は  $Fe_2Al_3N_2$  なる三元化合物に歸因し、深部のビッカース 850 程度の硬度は上記化合物が  $\alpha$ -格子中に成生するために生ずる  $\alpha$ -格子の格子歪が其の硬化の主因であることを確めた。

迅速滲炭剤として熔融青化鹽は現在已に特殊方面に使用されてゐるが、最近、山田良之助、横山均次兩氏の研究に由て、肥料用の石灰窒素、即ち  $Ca(CN)_2$  は滲炭剤として木炭と同等の滲炭能力を有するばかりでなく、窒化剤としてもよく利用し得ることが判つた。即ち 500°C 附近の低温度では窒化が起り、900°C 以上では滲炭が起る。

炭素、窒素以外に所謂セメンテーションに由つて金屬を鐵鋼中に滲入せしめる方法は近時歐米工業家の注目する所であるが本邦に於ても加瀬 勉氏が之を研究中で、既に  $Zn, Sb$  のセメンテーションを發表した。金屬粉末をその酸化物又は砂、鹽類と混じ、水素氣流中でその熔融點以下の温度に熱するもので、鐵と固溶體を作るものは容易に鐵中に滲入して合金し、鐵鋼に耐蝕性を與へる。

腐蝕に由つて失はれる鐵鋼の量は相當多く、その腐蝕と防蝕の研究は近時の重大問題の一つである。遠藤彦造氏は鋼の腐蝕に及ぼす炭酸瓦斯、酸素、鹽類の影響を系統的に研究し、又鋼は加工に由つて著しく腐蝕を増すことを明にした。更に同氏及び關口春次郎氏は鋼の腐蝕に及ぼす光の影響を研究した。鋼を磷酸鹽と共に處理して鋼の表面に緻密な磷酸鐵の皮膜を密着せしめる方法はパーカライジングと稱し防蝕法として廣く應用されてゐるが、遠藤氏は之を改良して完全な防蝕皮膜を發明した。

### III. 鑄鐵の性質

鑄鐵、鑄鋼に現れる樹状組織は鑄物の強度に關係し、特に鑄鋼塊に於ては其の鍛鍊性の難易を支配する。石原寅次郎氏は鑄鋼に於ける樹状組織の生成及び焼鈍に由るその消失に及ぼす諸元素の影響を研究した。

鑄鐵の凝固に際する收縮は鑄造上並に學術上重要な問題である。從來歐米に於ける測定結果は測定方法に遺憾な點があり、何れも不完全なものであつた。曩に筆者及び遠藤彦造氏は熱天秤を用ゐて諸金屬の凝固の際の收縮を測定したが、其後、筆者及び加瀬 勉氏は鑄鐵に付いて凝固の際の體積變化を測つた。而してこの研究の結果、黒鉛は一旦凝固したセメントの分解に由つて二次的に生ずるものにして、融體より一次的に生ずるものでないことを確め、 $Fe-C$  系二重状態圖を否定した。

鑄鐵の鑄造上密接な關係を有する他の問題は、その熔融状態に於ける粘性である。之に關して齋藤大吉、松川達夫兩氏は圓筒廻轉法に由り詳細に研究し、炭素量、其他諸元

素の影響を明にした。

鼠鑄鐵を 800~900°C に繰返し加熱、冷却するときは著しき非可逆膨脹をなし、遂には龜裂を生ずるに至る。この鑄鐵の生長に關しては曩に大河内正敏及び菊田多利男兩氏の熱膨脹計に據る兩研究がある。其後、菊田氏は再びこの研究を試み、生長の機構に關する舊説に多少の改訂を加へると共に、諸元素の影響を研究した。同氏に由ると生長の主因は高温度に於ける共晶及び初析セメンタイトの黒鉛化、 $Ac_1$  及び  $Ar_1$  點に於ける變態の狀況の差及び  $Ar_1$  點に於けるパーライト・セメンタイトの黒鉛化等によるもので酸化物の生成は二次的原因であると云ふ。

可鍛鑄物に於ける白銑の黒鉛化に就きては菊田多利男及び澤村 宏兩氏の廣汎なる研究がある。兩氏は熱膨脹計に據つて黒鉛化の進行狀況及び黒鉛化速度に及ぼす諸元素、瓦斯及び充填材料の影響を研究し、大體一致した結果を得たが、それに由ると白銑の黒鉛化は  $A_1$  點以上と以下の二段に於て生ずる。而して之等の研究の結果は單に焼鈍時間を短縮し得たのみならず、鑄物の性質を改善し、黒心可鍛鑄物工業に一大進歩をもたらした。又齋藤大吉、澤村 宏兩氏は第一段即ち  $A_1$  點以上に於ける黒鉛化の進行速度は焼入後の焼鈍に由り著しく促進されることを發見した。

鑄物に於ける黒鉛の分布と強さの關係及び諸元素の影響に就きては濱住松二郎氏の研究がある。氏の結果によれば黒鉛の形状と分布は冷却速度及び化學成分により粗大な片狀から微細な渦狀に變化する。而して渦狀黒鉛は冷却速度急にして初晶と共晶との面積相半する程度のものに於て現れるもので、其の機械的性質も亦優良である。此研究は今日の強力鑄鐵即ちパーライト鑄鐵の基礎をなす。

冷硬鑄物の冷硬に及ぼす諸元素の影響に就きては本間幸治郎及び淺田長平兩氏の研究がある。又谷口光平氏はチルドロールに關する多くの有益な研究を發表してゐる。

工業上耐熱鑄物を要する場合甚だ多く、從來適當なものなかつたが、深川庫造氏は之に就きて研究し、 $Al$  及び  $Si$  を適量加へることにより耐酸化性極めて強き鑄鐵を得ることに成功した。

#### IV. 特殊鋼及び鐵合金の 状態圖と性質

特殊鋼及び鐵合金の平衡状態圖並に變態點の研究に關する最近 10 年間に於ける進歩は殊に著しく、今や實用鐵合

金の状態圖は大體研究し盡されたかの觀がある。而もそれ等の多くが本邦人に由つて解決されたことは愉快に堪えない。歐米でも就中獨逸は相當此方面の研究が進んでゐる方であるが、猶且つ正確さに於て到底吾國の比ではない。

10 年前迄は鐵合金の状態圖と云へば二元系のみで、三元系も少しは研究されてはゐたが、簡單なものが、極めて不完全なものに過ぎなかつた。それには三元系状態圖に關する理論的研究が進んでゐなかつたことが大いに原因してゐる。然るに、其後、岩瀬慶三氏により三元金相論が研究されるに及んで、三元系の研究に對する理論的方面の行詰が解消し、爾來續々として多くの三元系状態圖が決定されて來た。此意味に於て晩近の金相學、特に状態圖の進歩は同氏に負ふ所甚大と云ふべきである。

特殊鋼には三元鋼もあるが、多くは四元以上の多元鋼である。而してそれ等の内には擬三元系と見做すも、その組織や性質の説明に大して差障を來さないものもあるが、是非とも四元系として取扱はなければならぬものも少くない。然るに四元系状態圖は何しろその表現が困難なので、從來實例的には勿論、理論的にも殆ど研究されてゐなかつた。之を遺憾として最近武田修三氏は之が理論的研究を企てた結果、四元系も亦三元系と略同様の様式で研究し、表現し得ることを確め、特殊鋼、其他四元合金の状態圖の研究に一道の光明を與へた。

村上武次郎氏は 10 數年以前に於て既に  $W$  鋼、 $Cr$  鋼、 $Si$  鋼、及び高速度鋼の變態點、組織、冷却條件に由るその變化、及び自硬性等に就き系統的に研究し、本邦に於ける特殊鋼の物理冶金學的研究の基礎を成したのであるが、其後も引續き之が研究を續け、工業上並に學術上有益な數多の論文を發表してゐる。耐熱合金、ダイナモ用薄板及び鑄物として用途の多い  $Fe-Si$  及び  $Fe-Si-C$  系合金の状態圖も亦同氏の研究に成るもので、更に  $Si$ -鋼の變態點に關して佐藤知雄氏は村上氏の後を受けて詳細に研究した。

$Cu$  鋼は耐蝕性が強いので有名である。 $Fe-Cu-C$  系状態圖は石原寅次郎氏に由り決定された。

$Fe-Ni$ 、 $Ni-C$  及び  $Fe-Ni-C$  系状態圖は加瀬 勉氏に由り決定され、之に由り  $Ni$  鋼及び隕鐵の組織が明になつた。又構造用  $Ni-Cr$  鋼の組織及び變態點に就きては吉川晴十氏の研究がある。同氏は更にその機械的性質及び熱處理に由る變化をも研究した。又  $Ni-Cr$  鋼の焼入温度、冷却速度と硬度の關係に就きては佐々川 清氏の研究、炭素量

と變態點及び硬度の關係に就きては村上武次郎、三上美和吉兩氏の研究がある。又筆者及び竹前源藏、渡邊直の兩氏は特殊の装置を考案して小銃彈に對する防盾鋼の抵抗測定を研究し、防彈鋼板の性能比較上に貴重なる參考資料を提供した。且つこの結果 *Ni-Cr* 鋼及び *Cr-Mn* 鋼の熱處理を施せるものが最優秀なることを發見した。斯くの如く *Ni-Cr* 鋼は工業上並に軍事上極めて重要であるが、遺憾ながら本邦には *Ni* の産出少なく、専ら輸入に待つ状態である。従つて *Ni-Cr* 鋼の代用鋼の研究は國策上緊要な問題で、之に關しては各方面で鋭意研究中である。例へば渡邊三郎氏は *Cr-Mn* 鋼を、又尾藤加勢士、石田四郎兩氏は *Cr-Mo* 鋼を研究し、或程度迄その目的を達したが、猶完全とは云ひ難い。

増本量氏は *Co* の新變態を發見し、*Fe-Co*, *Ni-Co* 系状態圖に改訂を加へた。又 *Fe-Ni-Co* 系状態圖に就きては加瀬勉氏の研究がある。又増本氏は *Fe-Ni-Co* 系及び *Fe-Cr-Co* 系合金の磁性並に常溫附近に於ける熱膨脹率を測定し、各系に於て在來のアンバー ( $1.2 \times 10^{-6}$ ) より一層小なる熱膨脹率 ( $10^{-7}$  以下) を有する新合金を發見し、且つ其の小膨脹性の原因を磁氣理論で説明した。前者を超不變鋼と命名し、後者は又不銹性を有するにより不銹不變鋼と命名した。

電熱用抵抗線は *Ni-Cr* 或は *Ni-Cr-Fe* 系合金で、後者は又不銹鋼としても知られてゐる。松永陽之助氏及び濱住松二郎、錦織清治兩氏は夫々 *Ni-Cr* 系状態圖を決定した。松永氏は又 *Fe-Ni-Cr* 系合金の状态圖及び熱酸化電氣抵抗、熱電力等の諸性質を研究した。同氏は更に *Co-Cr*, *Ni-Co-Cr* 系状態圖をも決定した。又不銹鋼に關しては川上義弘氏、絹川武良司氏等の廣汎なる研究がある。

低 *Mn* 鋼は高張力鋼として、又高 *Mn* 鋼はオーステナイト水靱鋼として著名である。石原寅次郎氏は *Fe-Mn* 系状態圖を研究し、*Mn* 20% 附近に六方晶系の包析化合物の存在することを發見した。*Fe-Mn-C* 系状態圖は未決定であるが、*Mn* 鋼の變態點、組織及び熱處理に由るその變化に就きては村上武次郎、三神正苗及び初田數衛三氏、又高 *Mn* オーステナイト鋼の加熱に由る組織、硬度其他諸性質の變化に就きては村上武次郎、三神正苗及び矢島忠和三氏の研究がある。又濱住松二郎氏は低 *Mn* 鋼の機械的性質を研究した。

*W* 鋼は工具鋼、磁石鋼、銃身鋼等用途が甚だ廣い。武

田修三氏は *Fe-W* 系及び *Fe-W-C* 系状態圖を完成し、*W* 鋼の複雑な組織を明にした。或種の鐵合金に於ては  $A_3$  點と  $A_4$  點とが合致してループを作り、 $\gamma$  の存在範圍が限定される。従つて之に *C* の加はつた特殊鋼の状态圖は極めて複雑になるが、之の關係は同氏の研究に由り始めて明になつた。又本系には不安定な  $Fe_3W_3C$  なる複炭化物が存在し、焼鈍すると分解して安定な炭化物 *WC* に變化する。高速度鋼に於ける炭化物は此の  $Fe_3W_3C$  に *Cr* の溶けたものである。

ウィディア系統の焼結 *WC* 工具は、本邦に於ても數年前より作られ、舶來品に匹敵する優秀な成績を擧げてゐる。芝浦製作所のタンガロイ、住友電線のキゲタ、ハードアロイ、東京電氣のダイヤロイ等がそれである。武田修三氏は *Co-W*, *Co-C*, *Co-W-C* 系及び *Ni-W*, *Ni-W-C* 系状態圖を決定し、之により焼結硬質合金ウィディアの焼結機構及び焼結 *WC* 合金の膠結劑として *Co* が *Ni*, *Fe* 等に比し遙かに優る所以を明にした。又炭化物を含まない硬質焼結合金にセンダロイがある。之は *W-Cr-Mo* 及び *Mo-Cr-Ta* 系合金で、筆者及び加瀬勉、渡邊直の兩氏の研究に成る。其他ステライト系の鑄造工具合金に就ては最近、絹川武良司氏が研究し、優秀な新工具を發見した。*Mo* 及び *Cr* を含む白銑である。

炭素鋼及び特殊鋼に少量の *V* 或は *Mo* を加へると、其組織が極めて微細となり、構造用鋼に於ては抗張力及び降伏點を高め、工具鋼に於ては切削能力を増すことは周知のことである。*V-C*, *Fe-V*, *Fe-V-C* 系状態圖は大屋正吉氏に由り、*Fe-Mo*, *Mo-C*, *Fe-Mo-C* 系状態圖は武井武氏に由り完成された。

特殊鋼中、*Cr* 鋼程用途の廣いものはなく、單味又は他元素を配して用ふ。例へば構造用鋼としての *Ni-Cr* 鋼、*Cr-Mn* 鋼、*Cr-Mo* 鋼、*Cr-V* 鋼、工具鋼としての *Cr* 鋼、*Cr-W* 鋼、耐蝕、耐熱鋼としての高 *Cr* 鋼、高 *Cr-Ni* オーステナイト鋼の如きである。其状態圖は久しき間未決定であつたが、最近漸く完成した。即ち *Cr-C* 系状態圖は初田數衛氏に由り、*Fe-Cr-C* 系状態圖は村上、初田兩氏に由り決定された。村上氏は又 *Cr* 鋼の廣汎なる組成範圍に亘り、熱處理に由る變態點、組織及び硬度の變化を研究した。又 *Si-Cr* 鋼に就きて村上武次郎、横山均次兩氏の研究、*Di* 鋼に關して村上武次郎、八田篤敬兩氏の研究、航空機用 *Cr-Mo* 鋼に就きて絹川武良司氏の研究

等がある。

鐵材に亜鉛鍍金又は  $Al$  を被覆すると、之に耐蝕性又は耐酸化性を與へることは古くより知られたことで、之等被覆物の状態は夫々  $Fe-Zn$ ,  $Fe-Al$  系状態圖に由つて知ることが出来る。前者は小川芳樹、村上武次郎兩氏により決定され、後者は伊澤正宣、村上武次郎兩氏研究の後を受けて大澤與美氏が改訂した。

鐵鋼中の  $S$  は  $O$  と共に赤熱脆性を與へるので有害である。佐藤知雄氏は  $Fe-Fe_3C-FeS$  系状態圖、及  $Mn$  の添加に由るその變化を研究し、鋼に於ける  $S$  の存在状態及び  $Mn$  に由る脱硫の機構を明にした。

耐久磁石鋼として普通歐米では  $W$  鋼、 $Cr$  鋼、 $Co$  鋼等が使用され、その保磁力は 50~70 ガウス位で、永續性に乏しかつた。然るに今より約 20 年前、筆者は強力なる  $K-S$  磁石鋼を發明した。之は  $Co-W-Cr$  鋼で 200~270 ガウスの保磁力と 12,000 ガウスの残留磁氣感應度を有し、耐久磁石に最も適する鋼である。爾來  $K-S$  磁石鋼は久しく磁石鋼の王座を占めてゐたが、最近に至り更に保磁力の大なる磁石鋼が二、三發明された。即ち三島徳七氏の  $M-K$  磁石鋼、筆者、増本量、白川勇記三氏の發明にかゝる新  $K-S$  鋼、及び加藤與五郎氏の酸化金屬製磁石がそれである。 $M-K$  磁石は  $Fe-Ni-Al-Co$  系合金、新  $K-S$  磁石は  $Fe-Ni-Ti-Co$  系合金で、何れも金型に鑄造後、600~650°C に焼鈍せるもので、從來の磁石鋼の如く焼入を要しない。前者の保磁力は約 700 ガウス、残留磁氣感應度は 7,500 ガウスで、後者のは夫々約 900 及び 8,000 に達し、何れも世界に誇るべきものである。尙武田修三氏は  $Fe-Ni-Al$  系状態圖を決定し、 $M-K$  磁石の強力性原因は強磁性過飽和  $\alpha$ -固溶體より  $\gamma$ -固溶體が時効析出するに因ることを明にした。又加藤氏の磁石は磁鐵礦 ( $Fe_3O_4$ ) と亞鐵酸コバルト ( $CoFe_2O_4$ ) の粉末を等量に混じ、型につめて壓縮せる後、1,000°C に焼結せるもので、その保磁力は約 600 ガウス、残留磁氣感應度は 3,000 ガウスである。

次に耐久磁石とは反對の性質を有する電磁器機用材料に關しては金屬材料研究所及び逓信省電氣試驗所の共同研究に成る超パーマロイ及びレヂストパーマロイ、及び古河電氣工業の發明に成るものがある。前者は  $Fe-Ni$  合金に少量の  $Co$ ,  $Si$  又は  $Sn$ ,  $Cr$ ,  $Si$  を加へたもの、後者は矢張り  $Fe-Ni$  合金に少量の  $Ti$ ,  $Cu$ ,  $Mn$  を加へたもので何れも在來のパーマロイに比し、初導磁率、電氣抵抗が大

きく、履歴損失が小さく、より優秀な材料である。又裝荷線輪用の壓粉鐵心としては逓信省電氣試驗所と共同研究になる増本量、山本達治兩氏のセンダストがある。之は  $Fe-Si-Al$  系合金で世界に誇るべき優秀な材料である。

## V. 鋼の機械的性質

鋼は常溫附近は比較的強靱であるが零下 5~60°C で極めて脆くなる。又鋼を高溫に熱すれば一般に強靱であるが 300~400°C 附近に脆い所がある。前者を低温脆性、後者を青熱脆性と稱する。低温脆性は極寒地方に於ける鋼材の破損に重大なる關係を有する。之に關しては山田良之助氏の研究がある。同氏は種々の熱處理を施せる炭素鋼及び特殊鋼につき常溫以下-185°C迄の單一屈曲並に牽引衝擊及び繰返衝擊試験を行へる結果、鋼の脆性は溫度の降下と共に増加し、且つ各溫度を通じてソルバイト鋼はパーライト鋼より、又  $Ni$  鋼及び  $Ni-Cr$  鋼は炭素鋼より靱性に富むことを見た。

常溫以上 1,200°C に至る高溫度に於ける鋼の機械的性質に關しては井口武英氏及び佐々川氏の研究がある。前者は炭素鋼の牽引試験を行ひ、後者は炭素鋼及び特殊鋼に就き衝擊屈曲、衝擊牽引及び靜的牽引試験を行つた。それによると青熱脆性は靜的試験に於ては 300~400°C 附近に起り、動的試験では 500~600°C に於て起る。井口氏は青熱脆性の原因を試験の際の變形に由つて鋼が加工硬化を受けるためと結論し、同様の研究を非鐵合金に就ても行ひ之を立證した。又濱住松二郎氏は炭素鋼及び特殊鋼に就き鋼球落下法に由つて其の高溫硬度を測定し、衝擊青熱脆性點にその極大が現れることを確めた。

各種機械、特に兵器の進歩に伴ひ、強靱なる鋼が益々要求される様になつた。而して靱性の測定には一般に衝擊試験が採用せられ、試験片が打折られる際の吸收エネルギーを衝擊値として比較してゐる。然るに、靜的試験に於けると同様に衝擊試験の際の應力對變形線圖を求めて見ると、衝擊値が同一であつても最大應力が大きく變形の小さい材料もあれば、その反對の材料もある。衝擊試験の際の應力對變形線圖の研究は漸く 10 年程前に始まつた。本邦に於ては曩に山田良之助氏が炭素鋼及び  $Ni-Cr$  鋼に就いて  $Körber$  及び  $Storp$  兩氏の裝置に改良を加へて低溫度の衝擊試験を行ひ、衝擊速度、試験片の寸法の影響、最大應力と吸收エネルギーとの關係を明にし、次で壽時富彌氏は同

様の方法により鋼の靱脆性を詳細に吟味した。其後室井嘉治馬氏は主として上述の如き衝撃應力對變形線圖の實用價値を検討する目的を以て、不銹鋼、*Ni-Cr* 鋼、高 *Ni* 鋼及び高 *Mn* 鋼等に就き研究し、鋼の種類、熱處理の影響、衝撃値、最大應力、變形相互の關係、及び硬度と最大應力との關係等重要なる諸結果を發表した。

以上の研究は専ら衝撃屈曲或は牽引に就いての結果であるが、衝撃振り試験に就いては市原通敏氏の研究がある。同氏は高速度に振り切る際の抵抗力對振り角線圖を得る装置を創案し、之に據り炭素鋼、特殊鋼及び非鐵合金の種々熱處理を施せるもの及び加工後時効せしめたものに就き  $1,300^{\circ}\text{C}$  より  $-195^{\circ}\text{C}$  に至る溫度範圍に於ける衝撃線圖及び靜的線圖を求めて兩者を比較検討し、更に前者に於ける低温脆性及び靱脆性點が後者のそれより高溫度に移動する機構を明にした。

*Cr* 鋼、*Ni-Cr* 鋼、其他或種の特殊鋼を高溫度より焼入後、 $600^{\circ}\text{C}$  附近に焼戻し、一は之を常溫迄徐冷し、他は焼戻後、水中冷却するとき、前者の有溝衝撃値は後者のそれに比し遙かに小である。この現象を焼戻脆性と稱し、その原因に關しては従來種々の學說が唱へられてゐたが、先年筆者は山田良之助氏と共に之に就いて研究の結果、強靱及び脆化兩試料の間に磁氣の強さ及び電氣抵抗の差のあることより、焼戻脆性の原因は  $A_1$  點以下に於いて炭化物の  $\alpha$ -鐵への溶解度の變化に由るもので、焼戻後急冷すると過飽和固溶體が得られるが、徐冷すれば  $\alpha$ -鐵粒境界に炭化物が析出して鋼に脆性を與へるとした。又藤田宗次氏は焼鈍溫度及び焼入溫度と焼戻脆性との關係に就いて研究し、焼鈍溫度が高いものは低いものより脆く、又焼入溫度が高いと焼戻脆性を増すことを見た。焼戻脆性に關しては更に永澤清氏の詳細なる研究がある。同氏は5年の長期に亘り多數の炭素鋼並に特殊鋼に就きて焼戻脆性の有無、特徴を統計的に研究し、その原因及び防止法を明にした。氏に由ると鋼の焼戻脆性は第一義的に其の化學組成と關係し、*Cr* 鋼に於て最も著しく現れ、*Mn* 鋼、*Si* 鋼、*Ni* 鋼、*P* 鋼之に次ぎ、*W* 鋼、*Mo* 鋼、*V* 鋼、*S* 鋼、等は之を示さない。又焼戻脆性にその實2種類あり、一は焼戻溫度  $450\sim 550^{\circ}\text{C}$  に起り、焼戻後の冷却速度に關係せず、他は  $550^{\circ}\text{C}$  以上の焼戻溫度で起り、焼戻後の冷却速度に關係し、従來知られたものである。焼戻脆性の原因に對しては矢張り炭化物説を支持し、第一焼戻脆性(低温)はセメントイ

トを主成分とし之に特殊元素の溶けた炭化物固溶體がマルテンサイトより析出するに因り、第二焼戻脆性(高温)はこの炭化物の  $\alpha$ -鐵に對する溶解度の溫度に由る變化に歸した。而して特殊元素に由る焼戻脆性の増減は、結局、炭化物の溶解度曲線の彎曲度の相違に因るもので、*Ni*、*Cr* 等は彎曲度を大ならしめて焼戻脆性を助長し、*Mo*、*W* は之を小ならしめて焼戻脆性を防止又は輕減する。従つて焼戻脆性と同様の現象は焼鈍鋼を  $A_1$  點以下に加熱する場合にも現れる。

常溫加工に由つて鋼は硬化し、諸性質も亦變化する。石垣豐三氏は鋼の常溫加工による硬度並に比重の變化を測定し加工硬化は加工により結晶粒が碎けて微細化するに因るとした。同氏は又加工後の焼鈍の影響を研究し、再結晶及び軟化の機構を明にした。又従來、鋼の彈性率は加工により増すと云はれてゐたが、筆者及び山田良之助氏の實驗的研究は反對に減少することを明にすると共に、その理由を原子力の法則により説明した。其他、上田太郎氏は振り加工が鋼の比重並に電氣抵抗に及ぼす影響に就いて研究し、河合匡氏は加工に由る彈性率及び剛性率の變化を研究した。同氏は又常溫加工を施せる炭素鋼及び特殊鋼の時効、即ち低温焼鈍による新降伏點の増加に就いて研究し、その原因に關して従來唱へられた溶解瓦斯又は炭化物の析出説を斥け、入り面の癒着に歸せしめた。

材料が絶へず繰返し應力を受くるときは其の彈性限以下の應力に由つても變化し、遂には破壊するに至る。この現象を疲勞と稱し、材料が無數の繰返しに對しても破壊しない最高限の應力を疲勞限界と呼ぶ。疲勞限界の値は實際上重要な恒數であつて此方面の研究は甚だ多い。藤井寛氏は炭素鋼の疲勞度と機械的性質の變化との關係及び焼鈍による疲勞恢復を研究し、松下徳次郎、永澤清、小松桂之助の三氏は種々の熱處理を施せる炭素鋼並に特殊鋼に就き疲勞試験を行ひ、疲勞と鋼種、焼戻溫度、打撃エナジー等の關係を研究し、彈性履歴曲線により疲勞の機構を明にした。又淺川勇吉氏は磁氣的性質を利用して炭素鋼の疲勞度と焼鈍による疲勞恢復を研究し、重要な多くの結論を導いた。鋼の疲勞限界と疲勞恢復に就いては以上の外、山田良之助氏、池田正二氏、大柴文雄氏等の研究がある。又池田氏は電氣抵抗の測定によれる疲勞限界の迅速決定法を考案した。疲勞限界を求める普通の方法は所謂 *S-N* 曲線を求めて決定するのであるが、之には多くの試験片と長時間



を要する。池田氏の方法によれば試験片は少數で且つ僅々3時間内で決定し得る便利がある。但し氏の方法で求めた疲勞限界はS-N曲線より求めたものよりも一般に少しく低い。

磨耗は實際上極めて重要な事柄で、歐米でも盛に研究されてゐる。併しそれ等の研究の結果は區々であるが、その原因は摩擦係数を一定にしないで、單に二つの物體を摩擦してその磨耗量を比較したからである。磨耗を論ずるには摩擦面の状態、即ち摩擦係数を一定にしなければ意味をなさない。此點に鑑み、先年筆者は山田良之助氏と共に摩擦係数を一定にして鋼の諸組織とエメリー盤間の磨耗を研究した。又鈴木益廣氏は軌條の磨耗を研究する見地より、同様の方針の下に特殊の試験機を創案して種々の炭素量及び組織を有する鋼の磨耗量を測定した。それに由ると磨耗抵抗はマルテンサイト大きく、ツルースタイト、ソルバイトパーライト之に次ぎ、壓延したもの、磨耗抵抗は最も小である。鈴木氏は又種々の鋼の比磨耗量に關する簡單なる二つの法則を發見した。即ち

$$W_{Nm} = K (W_{Nm}/W_{Nn}) \quad \text{及び} \quad K = a\mu^2$$

茲に  $W_{Nm}$  及び  $W_{Nn}$  は夫々炭素鋼  $m$  及び  $n$  の炭素量に對する比磨耗量である。又  $\mu$  は摩擦係数で、 $a$  は炭素鋼の如き互に類似せる性能を有する物質間には共通の恒數である。この法則によれば、二つの物質の第三の物質に對する比磨耗量を知ればこの二つの物質間の比磨耗量を知ることが出来る。

又齋藤省三氏は實際に近き規模の磨耗試験機を準備して軌條と車輪の間の磨耗量を研究し、種々の重要な結果を得た。例へば同一の軌條上を相異なる鋼より成る2個の連結せる車輪が走るとき、軌條或は車輪の磨耗量は同一の鋼より成る2個の車輪の走るときに比して著しく異なり、二つの鋼の種類によつては磨耗量の比が十數分の一に減少することがある。又鋼の車輪の一を鑄鐵の車輪にて置換れば磨耗量の比の減少は一層大となる。又2種の鋼より成る數多の軌條を交々に連結し其の上を1個の車輪が走るとき、軌條或は車輪の磨耗量は軌條全部が同一の鋼より成る場合に比して著しく減少する。以上は車輪、軌條、ブレーキシユウ等の磨耗の減少を謀るに参考とすべき重要な事實である。