

## 工学博士佐藤知雄君の「鉄鋼中の炭化物に関する研究」に対する授賞

### 審査要旨

工業用鉄鋼特に各種特殊鋼の複雑な性質の変化は、常にその中に存在する炭素が種々の化学式を有する炭化物を形成し、その量、形状および組成が処理加工によって変化し、これを固溶した基質が変化するによる。したがって鉄鋼の性質はその中の炭化物の変化によって支配されるので、炭化物の研究は鉄鋼物理冶金学上最も重要なものである。

佐藤知雄君は昭和二年東北大学卒業以来昨年現職(名古屋工業大学長)に転出するまで、物理冶金学の研究に従事すること三十余年、その間鉄鋼中の炭化物に関する研究報告は四十余編に達した。今これを分類すると次の通りである。

- 一、平衡状態図による炭化物の研究
- 二、炭化物の球状化の研究
- 三、炭化物の黒鉛化の研究——黒鉛鋼の実用化
- 四、電解分離による炭化物の研究
- 一 平衡状態図による炭化物の研究

鋼の相変態には炭化物の固溶と析出を伴う場合が多く、炭素原子の移動を要するので、過熱ならびに過冷の現象が起ころ。そのため平衡状態の真の変態または溶解度を知ることは困難である。佐藤君は純炭素鋼について加熱速度および冷却速度を種々変化させて変態温度を測定し、加熱および冷却速度が零の場合まで外挿して平衡状態の変態点および炭化物の溶解度を決定した。

また鉄・炭素・珪素系特に低炭素珪素鋼の範囲について変態点を測定し、黒鉛化し易い炭化物 ( $Fe_3C$ ) の存在範囲を明らかにした。

また鉄・炭素・硫化鉄系の平衡状態図を構成し、さらにこれに「マンガン」を添加した場合の状態変化を研究し、炭化物が球状に晶出する原因を明らかにし、硫化物による鋼の赤熱脆性の原因を金相学的に説明した。

## 二 炭化物の球状化の研究

鋼中の炭化物の球状化は工具鋼において特に重要な問題であり、特殊鋼における球状化は合金元素によって異なる。よって炭素量および合金元素を変じた多数の特殊鋼について種々の熱処理を施し、球状化の影響を研究した。その結果「コバルト」を例外として非炭化物形成元素を含む鋼では球状化が早く、炭化物形成元素を含む鋼では球状化が遅い。また熱処理条件による球状化の難易および生成球状炭化物の相違ならびに硬度の変化を明らかにした。

## 三 炭化物の黒鉛化の研究——黒鉛鋼の実用化

鋼中の炭化物は高温長時間加熱によって遂には分解して黒鉛を生ずるが、その遅速は合金元素の種類と量によって著しく異なる。よって種々の組成および処理条件による黒鉛化について研究した。

従来鋼に黒鉛が発生した場合にはその鋼は機械的性質が劣化して使用に耐えないものとされていた。しかるに黒鉛を適当に発生分布させた鋼は構造用鋼としては快削性に富み、工具鋼としてはダイスに用いて潤滑性を与えることを知り、適量の黒鉛を生じ適當なる性質を得べき合金元素の種類および量ならびに適當なる処理加工条件を決定し黒鉛鋼実用化の端緒を開いた。

#### 四 電解分離による炭化物の研究

これが佐藤君の最も優れた業績である。従来鉄鋼中の炭化物の研究は顕微鏡組織と物理的性質の測定により平衡状態の決定によつたもので炭化物自身の化学組成を知ることが出来なかつた。したがつて研究結果は必然的な定性的のものであつた。しかるに佐藤君は電解によつて鋼中の炭化物を分離するに比較的簡單なる装置と方法を考案し、これを利用して特に溶製した各種の鋼ならびに実用特殊鋼より炭化物を分離し、これを分析して定量的な化学組成および基質の組成を決定し、X線分析や電子回析によつて炭化物の結晶構造を確定し、また電子顕微鏡によつて炭化物の形状の立体的觀察を行ない、各種特殊鋼の熱処理による複雑な変化を解明し、劃期的業績を挙げた。以下その主要な結果を述べる。

##### (1) 低合金特殊鋼中の炭化物

一種の合金元素を添加した多数の特殊鋼を溶製し、焼鈍状態における炭化物ならびに基地鉄の組成を決定し、次の如き新事実を発見し学界の注目を受けた。(a)焼鈍状態の低合金鋼においては炭化物  $(Fe_3M)_3C$  と地鉄の合金元素濃度は正比例し、両濃度の比は鋼の炭素量や合金元素量には無関係で  $Neust$  の分配法則が成り立つことを知り、各種合金元素の炭化物と地鉄への分配係数を決定した。(b)炭化物形成元素 (Cr, Mn, V, Mo, W) はこの順に炭化物中に多く濃縮する。(c)非炭化物形成元素 (Si, Co, Ni) はこの順に地鉄に多く溶存し炭化物中の濃度は小である。等。

(2) 炭化物の磁気変態点 ( $A_0$ 点またはキューリー点)

炭化物  $(Fe_3C)$  の磁気変態点は合金元素の固溶によって昇降する現象を定量的に確かめた。すなわち種々の合金元素を加えた多数の特殊鋼から電解分離した炭化物  $(Fe_3M)_3C$  について新たに考案した石英スプリング型磁気分析装置を用いて磁気分析を行ない、一方炭化物の化学分析を精密に行なって合金元素の炭化物中の固溶量と磁気変態点との関係を明らかにし次式を導出した。

$$A_0(^{\circ}C) = 215^{\circ} + P \langle M \rangle$$

$\langle M \rangle$  は炭化物に固溶せる合金元素量

P は各合金元素についての定数で Co, Ni の如き磁気変態点を上昇せしめるものは正の値をとり降下せしめるものは負の値をとる

また Mo, W, V, Ti は磁気変態点を下げるがある固溶量で飽和し特殊炭化物を形成するために磁気変態点は一定温

度以下には降下しない。これによってその飽和量を推定した。

(3) 特殊鋼中の炭化物の不均一性

同一鋼中の同一種類の炭化物は常に平衡状態の組成を有すと考えられていたが、その熱処理履歴によって組成を異にすることに着目し、低合金鋼中の炭化物の組成の不均質性を電解分離した炭化物の磁気分析によって究明した。また初析炭化物と共析炭化物とは組成同一ではなく、 $A_1$ 点を上昇させる元素(Cr, Mo, W, V, Ti等)は初析炭化物に多く固溶し、逆に $A_1$ 点を下降させる元素(Mn, Ni等)は共析炭化物は多く固溶することを発見して従来の考え方を一変させた。

(4) 「タングステン」鋼中の炭化物

タングステン鋼の焼鈍組織中にはその組成に応じて  $(Fe,W)_3C$ ,  $(Fe,W)_{23}C_6$ ,  $(Fe,W)_6C$ ,  $(Fe,W)_{12}C$ ,  $WC$  なる炭化物の一または二種以上が現われる。これ等炭化物の存在する鋼の炭素および「タングステン」の組成範囲を決定した。古来タングステン鋼の $A_0$ 点と称せられたのは炭化物  $(Fe,W)_{23}C_6$  の磁気変態点であって、その温度は組成に従って四〇〇—一五〇度に変化する。しかるにこの炭化物は安定なる化合物でないために $A_1$ 変態点以下において長時間加熱すると安定なる化合物に変化するのであって、その分解過程が究明された。すなわち、 $(Fe,W)_{23}C_6$  の分解過程は単一ではなく、(i)  $(Fe,W)_{23}C_6 \rightarrow (Fe,W)_6C$  または (ii)  $(Fe,W)_{23}C_6 \rightarrow WC$  の二様に分解する。この分解過程に対し第三元素が著しい影響を与える。Si, Ti は (i) の反応を促進し、Co, Ni は (ii) の反応を促進する。また Cr, Mo, V は分解を抑制する作用がある。古来タングステン鋼の Spoiling 現象として

知られてきた過焼鈍による焼入性の劣化はこの炭化物の分解によることを明らかにした。

(5) モリブデン鋼中の炭化物

モリブデン鋼中の炭化物もその種類多くその変化複雑でなお不明な点が多い。よって組成異なる各種のモリブデン鋼をつくり七〇〇度における恒温変態および焼戻を行ない、また九〇〇度より焼入れた試料より炭化物を電解分離してその組成および結晶型を決定した。その結果鋼の Mo/C の原子比が増すに従って  $(Fe, Mo)_2C$ 、 $(Fe, Mo)_{23}C_6$ 、 $(Fe, Mo)_2C$  および  $(Fe, Mo)_2C$  の五種類が析出する。七〇〇度と二十四時間焼戻を行なったモリブデン鋼中には  $(Fe, Mo)_2C$  が広範囲に亘つて出現し、 $(Fe, Mo)_{23}C_6$  は消失する。モリブデン鋼中における炭化物相変化の速度は極めて遅いために遷移的な中間相とみなされる炭化物  $(Fe, Mo)_{23}C_6$  および  $(Fe, Mo)_2C$  が長時間に亘って存在し、最終の平衡状態に到達させるためには極めて長時間の熱処理を行なうことが必要である。

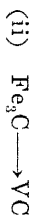
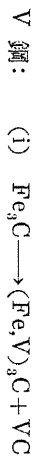
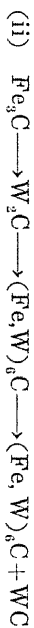
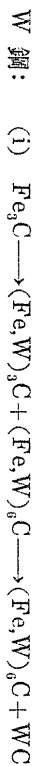
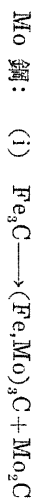
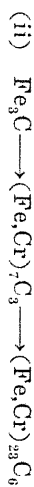
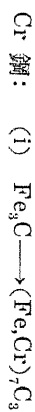
また  $(Fe, Mo)_{23}C_6$  は準安定系炭化物であるが少量のクロムを添加すると安定化され  $A_1$  点以上九〇〇度においてもオーステナイトと平衡して存在する。

(6) 特殊鋼の焼戻による析出炭化物の変化——炭化物反応

特殊鋼の焼戻による析出炭化物の温度と時間による組成の変化は全く劇期的の結果を与えた。すなわち四五〇度以下の焼戻においては特殊鋼も炭素鋼と同様に炭化物  $(Fe_3C)$  が析出するが、これは低温度であるため炭素原子のみが鉄格子中に侵入移動し合金元素は移動し難いため置換し得ないが四五〇度以上の高温焼戻においては金属原子が移動して  $Fe_3C$  と炭化物反応を行なって特殊炭化物を形成するのであってその過程を各種特殊鋼について明確に

した。

すなわち左の如き炭化物反応が起る。



#### (7) 実用特殊鋼中の炭化物

工業上実用されつつある特殊鋼(軸受鋼、ダイス鋼、強靱鋼、工具鋼等)について炭化物の本性と熱処理による挙動を研究し、多くの新事実を発見した。そのうち軸受鋼ダイス鋼等のクロム鋼においては焼入温度の上昇に従い未溶解炭化物中のクロム濃度が増大すること、また焼戻温度の上昇とその時間の延長により析出炭化物の結晶構造および組成が変化するところのいわゆる炭化物反応の過程を明らかにした。

また切削用高速度鋼は多量の合金元素を含有するため出現する炭化物の種類は多くそれ等の熱処理による挙動は

頗る複雑で未知の事実が多かったが、佐藤君は種々なる熱処理を施したる多種類の高速度鋼から炭化物を電解分離し、その化学組成、結晶構造、磁気変態点を明らかにした。そのうち特に注意すべき点は一八・四・一型高速度鋼にはWを主成分とする  $M_2C$  型、Cr を主成分とする  $M_3C_2$  型、V を主成分とする  $MC$  型の三種類の炭化物が存在するが、 $M_3C_2$  型が加熱の際一〇〇〇度附近からオーステナイトに固溶して鋼に焼入硬化性を与え、 $M_2C$  型は未溶解炭化物として残る。 $MC$  型も固溶し難いが、この型の高速度鋼では存在量が少ないため焼入の際はオーステナイトに固溶する。なお高速度鋼には焼戻硬化現象が起こるが、これらについても明確な解決を与えた。その他多数の高速度鋼について同様の研究を行ない、炭化物反応を明らかにしたが、特に注意すべき事項として高速度鋼を一、二五〇度以上より焼入れた場合にはいずれの高速度鋼もほとんど同一炭素量(約〇・五%)の基質であることを知った。

#### (8) 特殊白鑄鉄の炭化物

各種合金元素を加えたる特殊白鑄鉄中の炭化物を電解分離して化学分析を行なった結果、炭化鉄  $Fe_3C$  は合金元素を固溶し、特に急冷された白鑄鉄の炭化物は平衡状態よりも異なる値を有す。すなわち Cr, Mn 等の炭化物形成元素は平衡状態よりも少量を固溶し、Si, Ni 等の非炭化物形成元素は平衡状態よりも多量を固溶することを知った。

#### (9) 鉄鋼中の炭化物の硬度

炭化鉄 ( $Fe_3C$ ) ならびに特殊鋼中の特殊炭化物はいずれも高硬度であるが、前述の諸研究によって鋼中の炭化



物の組成ならびに結晶構造が明らかにされたので、それぞれの炭化物が鋼中に存在する状態にて硬度を測定した。その結果バナジウム炭化物 (VC) が最高硬度を示し、ウィッカース硬度数にて約二、八〇〇であった。

これを要するに佐藤君は鉄鋼中の炭化物について各種の方面より研究を進め、特に電解分離による方法を開拓し、これによって多くの未解決問題を解明し、鉄鋼物理冶金学の劃期的進歩をきたし鉄鋼の処理加工に寄与するところ甚大である。