

工業用鉄鋼の品質に関する考察*

Dr. Prof. ヴェルナー・ケスター**

(翻訳) 増田良道***

Betrachtungen über die Qualität des Technischen Eisens.

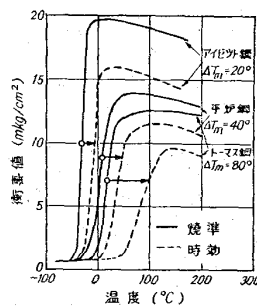
Dr. Prof. Werner Köster

皆さん、本日日本鉄鋼協会の皆様の前でお話しできることは、私にとりまして大変光栄であり嬉しく存じております。またこのたび皆様の御親切な御招待にあずかり、日本滞在のため種々御便宜をお与えいただきましたことに対して会長の三島先生をはじめ会員の皆様方に厚くお礼を申し上げます。

私は皆様からの御招待を喜んでお受けいたしました。と申しますのは私は 1927 年から 1934 年の間、ある鉄鋼工業の研究所で仕事をいたしましたし、またこの金属に対して特別な愛着を感じているからであります。特に鋼の品質の問題や、また英国の冶金学者達が“*The body of Steel*”と呼んでおりますところの、あの容易に理解し難い鋼の組織や構造の問題については、特に興味をもっているからであります。工業用鉄鋼の場合、これらの問題はいずれも次に挙げるような製法と関連があります。例えば、錬鉄と溶鉄、転炉鋼と平炉鋼、すなわち Bessemer 鋼や Thomas 鋼と Siemens-Martin 鋼、それから酸性ないし塩基性鋼、また最近では酸素上吹製法によつてつくつた Thomas 鋼や、また Izett の名でよく知られている特殊鋼などがあります。なおこの Izett 鋼ではアルミニウムの添加が大変重要な役割を果しております。

さて、これらの工業用鉄鋼の品質特性がどの程度のものであるかということにつきましてはこれらの鉄鋼についてのいろいろな性質、例えば歪み時効、赤熱および青熱ぜい性、あるいは磁気的な時効性などがどの程度にあらわれるか、ということからわかるのであります。そこでまず、これらの現象のうち 2, 3 のものについて一寸と思い出してみたいと思います。

切欠き衝撃値と温度の曲線におきまして靱性領域からぜい性領域へ移っていく状況は、ぜい性破壊に対する一つの手がかりとなりますが、純粋に経験的立場からみますと、それはまた鋼の品質を判定するための一つのよい目安となります。また鋼を冷間加工してから、それを常温でしばらく放置したり、あるいは比較的低い温度にそれを加熱しますと、衝撃値が急に低下する温度がずれて



第1図 切欠衝撃値と温度の曲線(W. Köster), Izett 鋼, 平炉鋼 (SM), 転炉鋼 (Thomas) について、焼準、および時効状態の遷移温度を比較

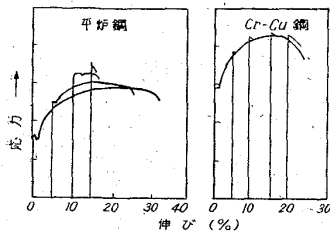
まいります。これは鋼の時効性に対する一つの目安でありまして、これもまた鋼の品質を判定する一つの資料となります。第1図は3種の鋼について焼ならした状態(実線)と、時効させた状態(破線)における切欠き衝撃値と温度の曲線を示したものです。すなわち、その優劣は Izett, Siemens-Martin 鋼, Thomas 鋼の順になります。御覧のように焼きたらした試料における脆化温度もまた時効させたときの脆化温度とのずれ ΔT_m も、皆この順に高くなつてまいります。

しかし、われわれはまた応力-伸び曲線を引き合いに出すこともできます。例えば 5% 引張つてから短時間、100°C に加熱し、ふたたびそれを 5% 引張りますと応力-伸び曲線が変つてくるのがわかります。第2図は塩基性平炉鋼 (Siemens-Martin) および Cr-Cu 合金鋼についてのこのような性質を比較したものであります。SM 鋼の場合、引張り試験の際によく認められる歪み時効の影響があらわれております。すなわち、降伏点が上昇し、新たに容易すべり領域が形成されておりますし、また引張り強さは高くなり、伸びは減少します。そ

* 昭和38年9月26日東京都ブリヂストンホールにおいて開催の特別講演会におけるヴェルナー・ケスター氏の講演

** マックス・ブランク金属研究所長、シュツットガルト工科大学正教授

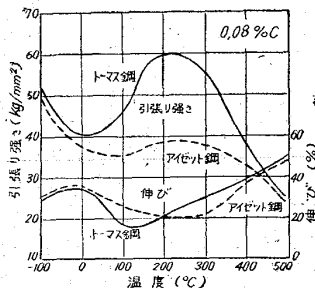
*** 東北大学工学部教授



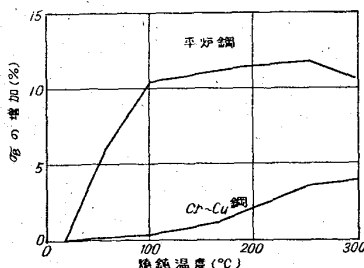
第 2 図 5%づつ引張り変形を与えたのちにおける応力-伸び曲線 (W. KÖSTER, Hv. KÖCKRITZ), 平炉鋼 (SM) と Cr-Cu 合金鋼との比較

して3回目の引張りで試料は破断しております。この場合焼ならした状態の伸びは 34% ですから、もし時効しなければ、5%づつ6回変形することができたはずで、一方、Cr-Cu 合金鋼はもともと 24% の全伸びがありますから、5%づつ4回引張ることができます。そしてこの場合の伸び曲線は焼ならした鋼のものと同様になります。すなわちこの合金鋼は 100°C ではほとんど時効いたしません。

また転炉鋼 (Thomas鋼) と Izett 鋼の高温強度を比較してみますと、第3図に示したように転炉鋼は常温から 200°C にかけて引張り強さが急激に増大し、Izett 鋼に比べて時効性はるかに大きいことがわかります。なおこのような時効性に関する鋼の品質の差は、鋼にあらかじめ5%の引張り変形を与えたのち、その後の焼鈍温



第 3 図 0.08% C を含む 2 種の鋼における引張り強さおよび伸びと温度の関係 (W. KÖSTER, W. KNORR) 転炉鋼 (Thomas) とアルミニウム添加平炉鋼 (Izett) の比較



第 4 図 5%引張り変形を与えたのちにおける焼鈍温度と引張り強さの増加率の関係 (W. KÖSTER, Hv. KÖCKRITZ) 平炉鋼 (SM) と Cr-Cu 鋼との比較

度によつて引張り強さがどのように増加するかをプロットすることによつてもはきつり認めることができます。例えば第4図をみますと平炉鋼 (SM) に比べ Cr-Cu 合金鋼の方が時効性の点でより好ましい性質を示すことがわかります。

さて塩基性溶解の鋼を普通に焼鈍いたしましたものをさらに 60°C から 100°C の温度でかなり長い時間加熱いたしますと、その保磁力が増加いたします。このように磁気履歴曲線の幅が広がることは磁気的な時効現象としてよく知られていることですが、珪素鋼板が発電機や変圧器に使われるようになる前から好ましからざる現象としてすでによく知られております。しかし酸性ライニング中で融かした鋼や、Izett 鋼のような材料は、このような性質を示しません。また同様に塩基性鋼では、試料が局部的に変形した場合、降伏点が明瞭にあらわれず。そしてその結果、容易すべり領域が拡がり、それに対応するすべり模様を生じます。そしてこのすべり模様は銅を含む Fry 試薬によつて黒く着色されますが、しかし酸性転炉鋼や合金鋼の場合にはそのような現象は認められません。

以上に申上げたような特長や、またここではとくに引用しなかつたその他の特長も、これまではすべて鉄鋼中に含まれている種々の随伴元素のせいであるとされてまいりました。しかしこれに対する見解も時代とともに移り変わってきました。もちろん、それぞれの時代の考え方は当然その当時の知識の程度や、また実験技術の制約をうけております。しかし、それら各時代の見解についてお話することもあながち当を得ないことではないと存じます。例えば極く初期の時代には窒素が非常に害をおよぼすと考えられていたこともあります。またある時代には、燐や硫黄の害を主張した人もあります。またあるときは酸素が歪み時効に対して、よくわからないけれども、何かそれをおこす役割を果していると考えられたこともありました。このようにいろいろな意見が出たのですが、いずれもそれを裏づける実験的根拠に欠けていました。しかしわれわれの見解は、鉄鋼中における個々の随伴元素が、鉄鋼の性質に対してどのような影響を示すかということの数値的なデータによつて示し得たとき、はじめて、確かに根拠のあるものとなるはずであります。

さて、そこで磁気的な時効現象についてみますと、保磁力の増加が析出した窒素の量に比例することは、ずっと以前からわかつております。また、したがつて塩基性鋼には窒素が溶けていて、それが析出することや、また一方、酸性鋼や合金鋼には窒素が結びついていないとい

つたことなどがそれぞれの鋼の品質の違いに関連しているということも大分前からわかっていることであります。しかしこれに反して、機械的な性質、例えば歪み時効にもとづくぜい化現象などにつきましては現在未だ完全な見解をのべうるほど、はつきりいたしておりません。しかし、いずれにしても、炭素や窒素などの侵入原子が、この場合決定的な役割を演じていることは確実と申せましょう。

さて、このように結晶格子中に侵入した原子や、格子欠陥などによつて引きおこされる状態の変化とか、また性質の変化などを追究する方法として、内部摩擦の測定がもつとも優れていることはすでに20年来、認められております。すなわち、この方法で α -鉄から炭素や窒素が析出する速度を追跡することができますし、また、安定ないしは不安定な炭化物とか窒化物の溶解度を決定することもできます。またさらに、これら2つの随伴元素の拡散係数を測定することもできますし、その他、多くのものをこの方法で決定することが可能であります。さて私が次に申し上げたい問題は、低炭素鋼の時効性について緩和速度を測定すると、一体どのようなことがわかるかということであります。

また私が皆様の前であえて工業用鉄鋼の内部摩擦の測定についてお話ししようと思ひましたのは、実は日本鉄鋼協会の多くの会員の方々がすでにこの問題についていろいろの観点から仕事をされ、多大の成果をあげておられることをよく承知いたしているからであります。例えば青木・関野・藤島の諸氏の研究や杉本・茨木氏あるいは市山氏とその協同研究者、例えば今井・川崎・工藤・脇・高階・吉見氏らの研究などがあります。これらのうち英語で書かれているものは全部読みました。また日本語で発表されているものも図を頼りにして結構理解することができました。しかし、いずれにしても、もし私が皆様の研究結果を適切に評価せず、私自身の経験を主張いたすようなことがありましてはどうぞ気を悪くなくさらないでいただきたいと思ひます。

一方では、それゆえにこそ、私は皆様の御理解ある関心を期待しうると存じております。

ただ今申し上げたような方向における実験は、次に申し上げるような考えから出発しております。すなわち、変形した鉄における歪時効と200°C付近にあらわれる内部摩擦のピーク(極大)との間にはある一定の関係が存在するはずであるという考え方があります。

いま炭素ないし窒素を含む α -鉄の加工した試料について1C/secの振動数でその内部摩擦を測定いたしますと格子間隙に侵入した(interstitialに)炭素ないし、窒

素原子のために、-39°Cないし22°CにおいていわゆるSnoekピークと称する極大 θ_1 があらわれますが、その他に約220°Cのところに第2の極大 θ_2 があらわれます。このピークはいわゆる加工ピーク(Verformungsmaximum)とよばれているもので、すでにJ. L. SNOEKがその最初の論文において、このピークは体心立方格子中に侵入した異種原子が歪応力の影響をうけて都合のよい位置に分布することに起因するものであることを指摘しております。なおこの加工による内部摩擦のピーク θ_2 は歪み量や、またもともと侵入していた原子の量に依存いたします。すなわち、 θ_2 は侵入している異種原子の量がある臨界量に達するまでは、歪み量とは無関係に、異種原子の量に比例して増加いたしますが、異種原子の量がその臨界量を越すと一定になります。そしてこの臨界値 θ_3 は加工度とともに増加していきます。

ただこの220°Cにおける緩和現象の原因と考えられる基本過程については現在未だ厳密にはわかつておりません。しかしおそらく結晶格子中に侵入した原子と塑性変形によつて生じた格子欠陥の相互作用によるものと考えられます。したがって内部摩擦の最高値は転位の数に依存し、また転位が異種原子によつて完全に充たされたとき、内部摩擦が最高値に達するものと考えられます。したがって、このときの内部摩擦の値 θ_3 に相当する侵入原子の量はちようどその場合の飽和濃度であるということができます。そこで次の関係式

$$L = \frac{C_s}{\lambda^2}$$

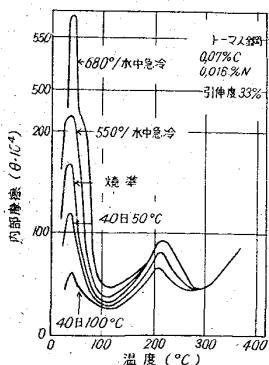
から転位線の密度 L が計算されます。ここで、 L は1cm²あたりの転位線の数であり、 C_s は原子百分率であらわした侵入異種原子の飽和濃度であります。またこの C_s は内部摩擦の飽和値 θ_3 から計算される値であります。さらに λ は格子定数の平均値で2.28Åであります。したがって各格子面ごとに1箇の異種原子がそれぞれ1本の転位線の中に組み込まれるものと仮定いたしますと、このようにして求めた転位線の密度は他の方法で求めた値とよく一致いたします。

一方岡崎氏は、加工による内部摩擦ピークがあらわれる温度は面心立方の鉄合金において内部摩擦ピークのあらわれる温度と一致することを指摘しておられます。またその上、この2つの現象に対する活性化エネルギーはほぼ同じ程度で大たい3,300 cal/molとなりますので、岡崎氏はこの結果から体心立方の鉄において220°Cにあらわれる内部摩擦のピークは、加工によつてその結晶構造が部分的に α から γ へ移行することが原因ではないかといつておられます。一方これに対して村・田村お

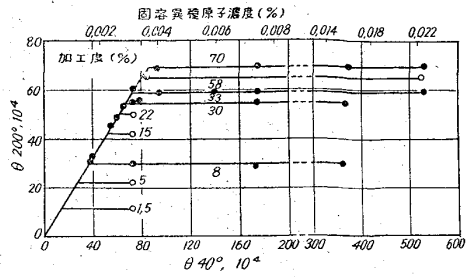
よび J. O. BRITAIN らは、やはり加工した鋼と、マルテンサイト鋼とにおける活性化エネルギーが一致することから、次のような見解をとつておられます。すなわち 200°C における極大は、析出した炭化物や窒化物の雰囲気と、振動している転位の相互作用によつてあらわれるものであると考えています。

以上種々の見解を引用いたしました。実はこれから申上げるように私も、このようにいろいろの方が支持しておられる考え方、すなわち転位と侵入異種原子の相互作用という考え方を支持したいからであります。そしてまず第一に、この加工による内部摩擦の極大が、鋼の品質の判定に対して実際に利用できると思えます。

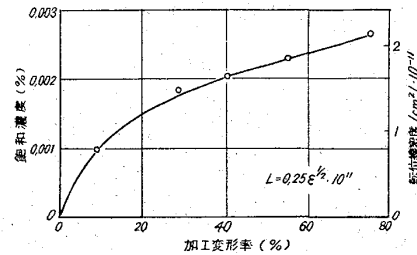
さて、次にわれわれはまず内部摩擦におけるこの2つの極大の間に、どんな関係が存在するかを示す一つの実験結果について調べてみることにいたします。第5図は転炉鋼にいろいろな前処理を施し異種原子の溶解量を変えたものを 33% 加工し、それらについて内部摩擦と温度の関係測定した曲線であります。この場合異種原子の溶解量は 40°C にあらわれる Snoek ピークの高さから求められます。また α 鉄の中に侵入している異種原子の濃度が増加いたしますと、それにともなつて 200°C にあらわれる加工ピークの値は最初は増加いたしますがある値に達しますとその後大きくならず、一定になります。すなわち、この 200°C のピークには一定の飽和値が存在いたします。そこで種々の歪み量を与えたものについて同様な実験をいたしますと、第6図がえられます。この図は内部摩擦の第一極大 θ_1 の値(下の目盛)ないしはその値から求めました異種原子の濃度(上の目盛)に対して内部摩擦の第2極大 θ_2 の値をプロットしたものです。この図をみますと内部摩擦の第2極大の値



第 5 図 200°C における内部摩擦の極大値におよぼす炭素および窒素固溶量の影響 (W. KÖSTER, L. BANGERT, R. HAHN), 0.07% C, 0.016% N の転炉鋼について、水焼入れ、焼準、時効など種々の前処理を施したのち、33%冷間引抜き加工を行なった試料についての比較



第 6 図 200°C における内部摩擦の極大値におよぼす固溶異種原子濃度の影響 (W. KÖSTER, L. BANGERT, R. HAHN), 加工度による内部摩擦極大値の飽和値の変化

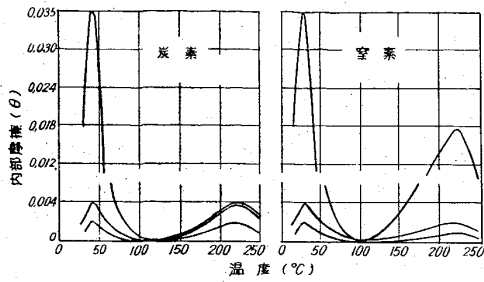


第 7 図 加工変形率と炭素原子の飽和濃度および転位線密度との関係 (W. KÖSTER, G. KAMPSCHULTE)

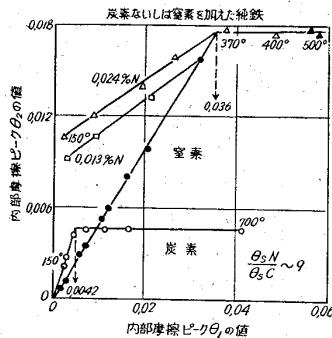
には一つの飽和値が存在することがわかりますし、またその値は加工度とともに増加することがはつきり致します。そこで、この飽和値に対応する炭素原子の飽和濃度を求め、その値と前に示しました関係式を用いて、転位線の密度 L を計算いたしますと第7図のようになります。すなわち、転位密度 L と加工度 ϵ との間には図のような放物線的関係がえられます。そして実験式として $L = 0.25 \cdot \epsilon^{1/2} \cdot 10^{11}$ が得られます。

ところで、工業用鉄鋼は炭素を含んでいると同時に窒素も含有しております。したがつて、この種の元素のうち、それぞれ一方だけの影響を研究するためにはそのうち一方だけを含む鉄の試料を必要といたします。そこで炭素や窒素を添加した純鉄についてそれぞれ実験を行いました。またその場合加工度は40%といたしました。

次の第8図は、これらの2つの実験結果を示したものです。図から次に申上げるような二つのことがわかります。まず、異種原子の量が同じ場合には、200°C の極大に対する炭素の影響は、窒素の影響に比べて大きいということです。すなわち異種原子量が同じ場合には θ_2 極大は、窒素よりも炭素を含む場合の方が大きくなります。また炭素を含む試料では窒素を含む試料に比べて先に飽和値に達します。例えば、ここに選んだような条件の場合でありますと、炭素を含む試料ではすでに飽和に達しておりますが、窒素を含む試料の方は未だ飽和に達



第8図 純鉄に炭素ないし窒素を添加した場合における内部摩擦の Snoek ピーク θ_1 と加工ピーク θ_2 との比較 (W. KÖSTER, G. KAMPSCHULTE)



第9図 内部摩擦の加工 θ_2 ピークにおよぼす固溶異種原子量の影響 (W. KÖSTER, G. KAMPSCHULTE) 試料は純鉄に炭素ないし窒素を添加したもの

しておりません。

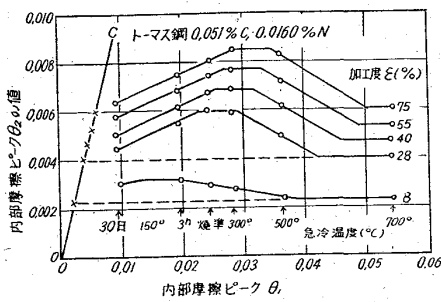
また第9図からわかりますように、炭素を添加した鉄は、窒素を加えた試料に比べますと、その θ_2 は θ_1 の増加にともなつていちじるしく増大することがわかります。また、 θ_2 と θ_1 の間の比例定数は炭素の場合、1.0 となり、窒素の場合は 0.5 となります。さらに窒素原子の飽和値は炭素原子の飽和値に比べて大きくなります。すなわち、炭素の飽和値は、 $C_{s(C)}=0.0042$ のところ、すなわち重量%ならば 0.0016% C のところに存在いたしますし、一方窒素の飽和値は $C_{s(N)}=0.0360$ 、すなわち、重量%で 0.0150% N のところに存在いたします。このように固溶窒素の飽和量は、固溶炭素の飽和量に比べて9倍も大きいことがわかります。一方、加工ピークの最高値は窒素を加えた純鉄の場合、炭素を加えた鉄に比べ4倍半も大きいことがわかります。

さてそこで、これらの実験事実を説明するには2た通りの方法が考えられます。まず、われわれは、この加工による内部摩擦のピークが転位と、その周囲に密集した侵入原子との相互作用によつてあらわれるものであると仮定いたしましょう。また、この場合も前と同様、1格子面あたり1箇の異種原子が1本の転位線の中に組みこまれると仮定いたしますと、窒素を加えた試料について求めた飽和濃度 $C_{s(N)}$ から、その場合の転位の数が計算

できることとなります。そのようにして窒素を含有する鉄試料について転位の数を求めますと、その数は炭素を含む鉄に対して求めた転位の数よりもはるかに大きな数になるはずでありましょう。ところが事實はそうならないのであります。またその上、転位線の密度は鋼の種類にはほとんど無関係であると申上げてよいでしょう。したがつて、結局、転位線は1格子面あたり、単に1箇だけではなく、多数箇の窒素原子を取り込むということになります。しかし炭素の場合は、やはり1格子面あたり1箇だけが転位線にとり込まれると仮定いたしますと、窒素を含む試料について測定した内部摩擦の飽和値 $\theta_{s(N)}$ を、炭素を含む試料について測定した飽和値 $\theta_{s(C)}$ で割ることによりまして、1本の転位線にとり込まれる窒素原子の数を求めることができます。その結果窒素を加えた純鉄におきましては、1本の転位線と相互作用する窒素原子の数は1格子面あたり約9箇ということになります。したがつてこの場合は文字通り Cottrell 雰囲気が1本の転位を取り囲んでいるということができましよう。

先ほど示しました窒素に対する曲線は、試料に含まれる全窒素量が焼入れによつてすべて α 鉄中に固溶した状態に相当するものであります。したがつて、それらの値はいずれも原点を通る1本の直線に乗つております。しかし、窒素を比較的少量に含有いたします試料では、しばらく放置いたしますと、 θ_1 の値については同じ測定値がえられますが、もし、その場合窒化物が析出いたしますと、その試料の第2極大 θ_2 の値は予期される値よりも高くなりますので、第9図に示したように、その直線は上の方に移り、原点を通らなくなります。そこでも θ_2 の極大の緩和 (relaxation) の程度が転位によつてとり込まれた原子の数に依存するものといいたしますと、はじめ α 鉄の格子間隙に侵入していた窒素原子が加工によつて転位の中にとり込まれるのではなく、どこか別のところにあつた窒素原子がやつて来るものとみなければなりません。また、そのような源泉としては析出窒化物が考えられると思います。ところで、転位の中心における窒素原子の結合エネルギーは約 $0.8 eV$ でありませんが、鉄の窒化物における窒素原子の結合エネルギーは $0.4 eV$ 程度にすぎませんから、窒素原子が析出物から転位の方へ移行することは当然考えられると思います。

さて、それではふたたび工業用鉄鋼の問題にもどることにいたしまして、まず最初に 0.05% C および 0.016% N の転炉鋼の挙動を考察いたしましょう。ところでこの場合は窒素含有量が比較的高いために前に示しました平炉鋼の場合に比べますと多くの点において異なつてお



第10図 内部摩擦の加工ピーク θ_2 におよぼす固溶異種原子量および引張り変形率の影響 (W. KÖSTER, G. KAMPSCHULTE) 試料は 0.051% C, 0.016% N を含む転炉鋼

ります。すなわち、内部摩擦における二つの極大 θ_1 と θ_2 との間の関数関係が変つてまいります。第10図は引張り変形率をパラメータとした場合の曲線群を示したものです。この図におきまして 150°C で放置した場合、 α 鉄中に侵入した原子の飽和濃度が低い値となりました。この試料に炭化物や窒化物の析出物が含まれていたからであります。したがつて、飽和以前における加工ピークの最高値は増加直線となりますが、それらの直線は原点を通りません。この直線は θ_1 のある一定の臨界値すなわち、飽和値 θ_s に相当する値からはじまつて θ_2 の最高値に達しますが、この最高値は θ_1 の第2の臨界値までそのまま変化いたしません。しかし最終的には異種原子量がさらに増加するにもなつてこの加工ピークの最高値 θ_2 は θ_1 の第3の臨界値まで減少し最終値まで落ちますが、それ以上変化いたしません。すなわち、このような傾向が窒素を含む鋼の特徴であります。

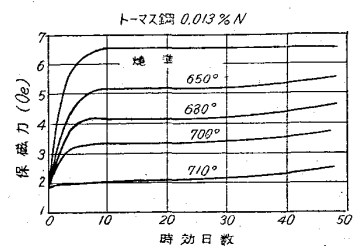
さて、この現象を理解いたしますために、次のことをご注意いただきたいと思ひます。それは、この曲線におきまして増加している部分と、最初にあらわれる水平の部分に、34°C から 38°C においてみられる Snoek ピークが存在することです。したがつて、このことは異種原子の濃度が小さい場合は窒素の影響が支配的になることを意味しております。また先程申しましたように緩和のピークが約 36°C のところにあるということも別にいたしますと、このことからまた、これらの曲線が原点を通らないことが結論されますし、またさらに、加工度や熱処理を同じにした場合、直線が縦軸を切る高さは窒素の含有量とともに大きくなるということが結論されます。

一方、異種原子濃度が比較的高い場合は A_1 変態点の直下、すなわち、700°C あたりの高い温度から焼き入れますと、今度は炭素の影響が段々強くなつて参ります。と申しますのは高温から焼き入れることによりまして α

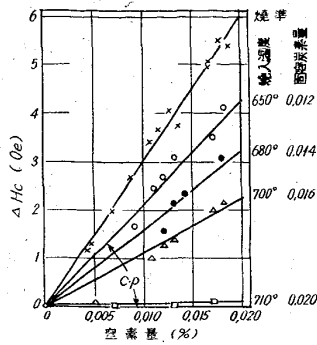
鉄中に固溶する炭素原子と窒素原子の割合が、炭素原子の多い方へずれてくるからであります。また、このことは Snoek ピークの温度が 36°C から 43°C へ上つてくることから明らかに認められます。さて、それでは異種原子濃度が比較的高い場合、加工ピークの緩和の程度が減少するのは、一体何に起因するものでありましようか？

今、このデータをもう少し詳細に検討してみますと、この曲線の第2の水平部分の θ_2 値は炭素のみを含有する鉄の値に該当しているということがわかります。

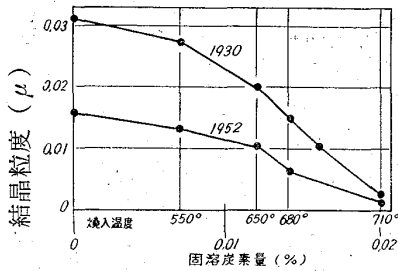
炭素原子の供給量が多いときは炭素原子がまず最初に転位の中に飛び込んでいきます。したがつてそれと同じ方向への窒素原子の拡散がさまたげられます。なお、このことは窒素の析出が固溶炭素量によつてどのように変化するかを調べてみますとはつきりいたします。そこでいまある鋼の試料を A_c 、変態点よりわずか上の温度から炉中冷却をいたしまして、引き続き 100°C で焼鈍いたしますと、鋼の中に溶け込んでいた窒素がある程度析出いたしますと、その結果保磁力が増加いたします。なおこの現象、すなわち磁気時効がおこることについてはすでに申し上げました。いまこの試料を高い温度から焼入れて、炭素の固溶量を段々多くしてまいりますと、それらを 100°C で焼鈍いたしますと、第11図に示したように炭素の固溶量が増加するにもなつて保磁力の変化量が段々減少してまいります。この図に示した測定結果は 0.07% C, および 0.03% N の転炉鋼について求めた結果でありまして、この場合、710°C から焼入れたものでは、もはや保磁力の増加はほとんど認められません。ところで、鋼の窒素含有量の増加にともなう保磁力の増加と焼き入れ温度との関係をプロットいたしますと、第12図に示しますように種々傾斜角の異なつた直線がえられます。また、よく知られている次の関係式からわかりますように、この直線の勾配は析出窒化物粒子の分散度に対する一つの目安となります。



第11図 100°C における時効日数と保磁力の関係、(W. KÖSTER), 試料は 0.013% N を含む転炉鋼を種々の温度から焼入れたものおよび焼準したもの



第12図 固溶炭素量の異なる種々の鋼を100°Cで焼鈍した場合における保磁力の増加量 ΔH_c に対する固溶炭素量の影響 (W. KÖSTER, L. BANGERT)



第13図 析出窒化物粒の大きさにおよぼす固溶炭素量の影響 (W. KÖSTER, L. BANGERT)



焼 準 710°Cからの焼入

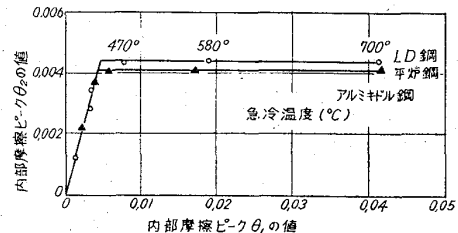
写真1 窒化物粒子の大きさにおよぼす固溶炭素量の影響 (W. KÖSTER, S. MADER), 0.07% C, 0.016% Nを含む転炉鋼を焼鈍した試料(左)と710°Cから焼入れてのち100°Cで70日間時効した試料の電子顕微鏡組織 ×10000

$$\Delta H_c = C_p \sqrt{\Delta \% N}$$

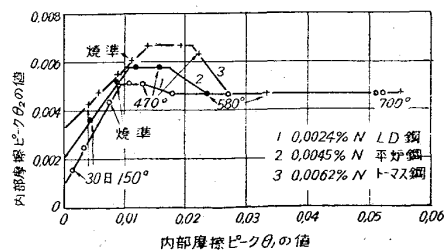
すなわち、写真1に示しましたように、この析出粒子の大きさは固溶炭素量の増加にともなつて減少いたします。またこれらの値はいずれも、同じように変化する内部摩擦と保磁力の測定から求めたものでありますが、炭素のこのような作用が事実存在するということは次に示す第13図の二つの電子顕微鏡組織からもおわかりになると思います。左側の写真から普通に焼鈍した試料の中に存在する針状の窒化物の長さがわかりますが、右側の写真は710°Cから焼入れてのち、100°Cで70日間時効した試料中の窒化物であります。右側の写真にある粒子の

大きさは左側のものに比べますとはるかに小さくなつております。これはおそらく、最初に顕微鏡ではみえないような微小なセメント粒子が沢山析出した結果、そのあとでできる窒化物粒子の成長がさまたげられた結果であると想像されます。なお、この現象は変形しない試料を550°C以上の温度から急冷した場合にも認められます。一方変形を与えた試料においては500°Cから600°Cの間で焼入れますと、 θ_2 の値は最初の一定値から、第2の一定値まで減少します。

さて、次に、種々異なつた溶解法でつくつた鉄試料についての測定結果に移りましょう。私も、種々のリムド鋼について研究いたしました。すなわち、平炉法や、酸素上吹転炉法、転炉法などで行つたものを研究しました。また平炉鋼の場合も酸素上吹き転炉法の場合と同様0.2から0.4%のアルミニウムを添加しております。したがつて、もしこの場合窒素がアルミニウムによつて固定されるといたしますと、炭素原子だけが固溶状態で存在いたすこととなりますので、もし異種原子の量が少なければ θ_2 の値はすべて勾配の等しい直線となるはずであります。すなわち第14図に示しましたように、この直線はほぼ原点を通りますし、また、すでに申し上げましたようにその勾配は1となります。また700°Cから焼入れたのちにおける異種原子の量は炭素0.017%となりますが、この値は別の測定によつて求め



第14図 アルミニウムでキルドしたLD鋼および平炉鋼の内部摩擦加工ピーク θ_2 におよぼす固溶異種原子量の影響 (W. KÖSTER, G. KAMPSCHULTE)



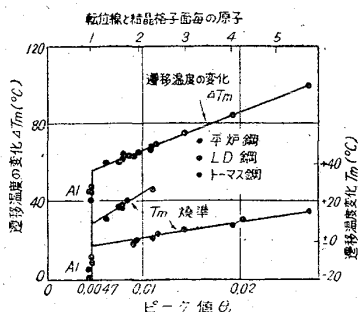
第15図 各種のリムド鋼における内部摩擦の加工ピーク θ_2 におよぼす固溶異種原子量の影響 (W. KÖSTER, G. KAMPSCHULTE)

られた 700°C における α 鉄中の炭素の飽和濃度とよく一致しております。

リムド鋼の場合、第15図に示したようにその増加していく直線は原点を通りません。そしてその直線が θ_2 軸を切る点は窒素の含有量の増加とともに高くなります。また、それと同時にその増加直線の上端、すなわち、飽和値 θ_2 に相当する値は高い方へずれていきます。したがって、窒素量の増加にともなつて θ_2 の極大値が大きくなりますので、前に転炉鋼の場合について示しました第10図のような形になります。すなわち、 θ_2 の極大の最高値は異種原子の量が増加してもはじめはそのまま変わらず同じ値をとりますが、窒素の含有量が高いほど、その領域が長くなります。一方炭素の影響が段々強くなつてくると、それにともなつて θ_2 の値が下つてきますがその場合も窒素含有量が高いほどその下がり方が遅くなります。

以上に述べました実験結果の中でとくに注目すべきことは次の事実であります。すなわち、いろいろの種類の鋼は、それらに同じ変形量を与えた場合、内部摩擦の加工ピークの値を一定値にするのに要する異種原子の量は鋼の種類によつて違つてくるということです。したがつて、このことからその飽和値 θ_2 を鋼の品質に対する目安として使うことができるわけです。そこで、このことを確認いたしますために、これまで研究した鉄試料の時効性について検討してみました。すなわち、ある一定の時効処理を施した試料について切欠き衝撃値と温度の曲線が急激に低下する温度のずれ、 ΔT_m を測定しました。

その結果、物理的な測定法によつて求めた飽和値 θ_2 と切欠き衝撃試験などの工学的的方法によつてえられた時効の傾向との間には非常にはつきりした関係が存在することがわかりました。すなわち第16図に示したように、こ



第16図 各種の鋼におけるぜい性遷移温度 T_m と時効によるそのずれ ΔT_m に対する内部摩擦の Snoek ピークの飽和値との関係 (W. KÖSTER, G. KAMPSCHULTE)

の両者の量の間には直線関係が成立します。またさらに、この実験結果を検討してみますと、飽和値 θ_2 と衝撃値が急に下る温度のずれ ΔT_m は鋼の窒素含有量と比例いたしますのでここに示しました図の θ_2 軸を窒素の重量%で目盛り直すことができます。そういたしますと次のような関係式がえられます。

$$\Delta T_m (^{\circ}\text{C}) = 23 \cdot 10^3 (\theta_2 - 0.0042) + 55$$

また、この式の中の値で、 0.0042 と 55 とは、この増加直線がはじまる点の座標ですが、これらの値は工業用鉄鋼中に含まれる炭素量から予め求められる値であります。すなわち、この 0.0042 はリムド鋼の飽和値 θ_2 でありまして、 55°C という値は、リムド鋼の衝撃値の遷移温度のずれ ΔT_m であります。なお、そのほか加工しないで焼準した鋼の場合には、衝撃値の遷移温度も窒素の含有量に比例するというを申し上げねばなりません。

一方、低炭素のリムド鋼についての実験からは次に申し上げるような三つのことがいえます。まず第一にこの場合、鋼の時効性はその製造法によつては決まらないでむしろその化学的な組成によつて決まるといふことあります。しかし、一定の製造法によつて一定の化学組成の鋼がえられるという場合に限り、その製造法がその鋼の時効性に対してある一定の役割を果します。たとえば平炉鋼の窒素量は転炉鋼のそれに比べますと非常に少ないわけですが、こういう場合は製法の違いが鋼の時効性にはつきりあらわれます。しかし、その他の場合は一般にその窒素量だけが鋼のぜい性に対して決定的役割を果します。すなわちこれが第二にいえることであります。また切欠き衝撃値の遷移温度は加工しない鋼の場合と同様加工した鋼でもその窒素量に依存します。したがつてこのことはまた、以前からいわれております見解を裏付けるわけでありまして、すでに 1910 年 C. E. STROMEYER が鋼の時効性は磷の影響をうけるばかりでなく、窒素量と比例することを認めていることが思い出されます。ただ、それと比較して、ここに掲げました研究結果は、一つの物理的な量を決定することによつて、一定の量的関係をえているという点がよく点であるといえましょう。

さて、これに対して第三にいえることは、この関係から次のような知識がえられるということでもあります。すなわち、転位の周囲における異種原子の平均密度は窒素の含有量とともに増加するというであります。

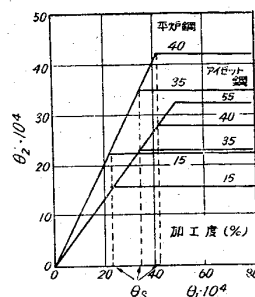
なお、このことについては、第16図の上辺に記載いたしました。すなわち、この平均密度は異種原子の飽和量に対応する内部摩擦の飽和値 θ_2 を $\theta_{s(c)} = 0.0042$ で割

ることによつて求められたものであります。すでに申し上げましたように、この値は炭素の飽和量に対応するものでありまして、この値はまた1本の転位線について、各格子面あたり1箇の原子が捕獲される場合に該当いたします。しかし、窒素を0.016%含む転炉鋼の場合においては、窒素を含有するためにその異種原子密度は約5~6原子まで増加しうるのでございまして、このことから鋼の工学的性質をよく理解することができます。すなわち転位が異種原子によつて強く拘束されていなければならない、またそれだけ一層衝撃値の遷移温度が高くなります。このように窒素の方が炭素に比べて転位を拘束する作用はるかに強いということは、鋼の降伏強度が結晶粒度に依存するという点にもあらわれております。例えばPetchの関係式 $\sigma = \sigma_0 + kd^{1/2}$ (σ = 降伏強度, d = 結晶粒径) における比例定数 k は J. Codd や N. J. Petch によりますと、窒素の場合炭素に比べて50%大きいのであります。

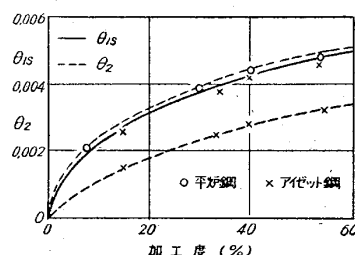
さて、以上に申し上げました第三の事柄は、あらゆる種類の鋼に対して同一の変形を行なつたとき、その転位密度が等しくなる場合にのみ通用いたします。御承知のとおり、焼入れ温度を比較的高くしたときにえられる θ_2 の値があらゆる種類の鋼において等しくなるような場合がすなわち、以上に申し上げた場合になるわけでありませぬ。また、この場合の観測値 0.0047 は、炭素だけの作用による値すなわち 0.0042 という値と正確に一致してあります。

さて最後に、アルミニウムで鎮静した鋼や、低合金鋼の挙動につきまして2, 3の事柄を申し上げたいと存じます。まず、平均結晶粒度 $500 \mu^2$ の2種類の平炉鎮静鋼について求めました $\theta_1 - \theta_2$ 曲線は第17図に示したように炭素を加えた純鉄についての曲線とよく一致いたしました。また、分析で求めた窒素量とは無関係に飽和を示す析点は $\theta_s = \theta_2 = 0.0042$ のところに存在いたします。そしてこの二つの値が炭素原子による内部摩擦の緩和現象の特長でありまして、この場合窒素は全部除去されております。

ところで、Izett 法でつくりました平炉鋼の場合、平均結晶粒度 $300 \mu^2$ のものではいささか異なつた様相を呈します。この場合、増加直線の勾配は従来測定されております値より小さくなりました。すなわち、この場合溶けている原子の量が同じでも、内部摩擦の加工ピークの緩和の程度は、これまで考察してまいりましたいわゆる普通の平炉鋼の場合に比べますと、小さいということになります。また、これに反しまして、変形度に依存す



第17図 2種の平炉キルド鋼における内部摩擦の加工ピーク θ_2 におよぼす固溶炭素原子量の影響 (W. KÖSTER, W. HORN), アルミニウムキルド平炉鋼とアルミニウム添加平炉鋼アイゼット鋼の比較



第18図 2種の平炉キルド鋼における内部摩擦のピークと加工率の関係 (W. KÖSTER, W. HORN) アルミニウム・キルド平炉鋼とアルミニウム添加平炉鋼アイゼット鋼における内部摩擦の Snoek ピーク飽和値 θ_{1s} および加工ピーク θ_2 の比較

る飽和値 θ_s の方は第18図に示したように普通の平炉鋼の場合の値と正確に一致いたします。したがつて、この2種の鋼における転位線の密度もまた一致することになります。しかし、それにもかかわらずこの2種の鋼における θ_2 極大の緩和の程度は明らかに違つております。また、変形度40%に対する飽和値はこの場合も $\theta_s = 0.0042$ でありましたが、もう一方の内部摩擦のピークの値 θ_2 は第18図に示したように変形率40%に対して 0.0026 程度にすぎませんでした。さらにこの場合切欠き衝撃値と温度の曲線における遷移温度は -20°C であり、またその温度のずれ ΔT_m はわずか 10°C にすぎませんでした。以上のようにリムド鋼における窒素の作用につきましてはある程度数値的な裏づけによつて理解しようということを申し上げたわけですが、さてここで、われわれはまたわからない問題にぶつかつたわけでありませぬ。すなわち、飽和値 θ_s が同じ場合でも、鋼の機械的性質は全く違つてくることありうることでありませぬ。そして、このような場合には、鋼の品質判定に対して、われわれは未だ何らの準拠ももたないのであります。

さて、これまでお話し申し上げたことは工業的につく

られた鉄についての研究結果でありまして、工学的事実のみに限ってお話いたしました。また一方、その研究方法は現在の金属に関する研究方法に準じて行なつたものでありますが、このような取り合せにはとくに優れた点があると私は考えます。ただし、このようにクローズアップされた窒素というものが、果して鉄の品質を本質的に決定する要素であるかどうかということには、未だ当然疑問が残されているわけでありまして。すなわち、先ほど示したように、炭素もまた決定的な役割を果しておりますので、鉄の性質の基本的水準はむしろ炭素によつて決まるわけでありまして。したがつて窒素の影響は、それを土台として、その上に重なつてくるわけでありまして。さてそれでは、炭素の影響は定量的には一体どのようなものでありましようか？。またもつとも純粋な鉄は一体どのような性質を示すのでしょうか？。またさらに一層純粋な金属について研究し、それによつて一層微量な不純物の作用を研究することは、まさに今日の科学が要求しているところではないのでしょうか？また化学的な成分のほかに、なお鉄鋼の品質に影響をおよぼすものは存在しないでありましようか？。このような多くの疑問は未だ答えられておりません。したがつて将来もなお研究すべき多くの分野が残されているわけでありまして。

私はここでいま申し上げた方向における 2, 3 の問題を指摘してこの講演を終わりたいと思ひます。私はまずその一つとしてマックス・プランク鉄鋼研究所の W. FISCHER の研究をとり上げます。すなわち、彼の研究によりますと、今日認められている限りでは、非常に高純度の鉄は必ずしもとくに強靱ではなく、また切欠き衝撃値の遷移温度もとくに低いわけではありません。純鉄に対して炭素を約 0.008% 加えたとき、その遷移温度ははじめて低下し、窒素を含まない工業用鉄鋼における通常の遷移温度、すなわち約 -20°C まで下がります。しかし、これをさらに詳細に考察いたしますと、これは炭素含有量自体によつて決まるのではなく、炭素はむしろその結晶粒度に影響をおよぼしていることがわかりました。すなわち、炭素量が増加いたしますと鑄造組織や普通に焼純した状態における結晶粒の数が減少いたします。したがつて純鉄のぜい性は鉄のこのような一次組織によつて決まることがわかります。しかし、それでは鉄が凝固する場合に、その核の形成や成長が微量の炭素によつてどのような影響を受けるかということになりますと、それは未だわかつておりません。

しかしながら鑄造状態における結晶粒度が炭素の影響を受けるということから、当然その化学的性質が重要な意味をもつと想像せざるをえません。したがつて、融け

た鉄を凝固させたり、あるいは冷却したりいたしますと結晶粒界にある種の間層が生じ、それがその後の熱間加工や熱処理によつて変化せずそのまま保持されると考えなければならないと思ひます。なおこのような中間物質の存在やその意義については、すでに何十年も前に私の恩師 GUSTAV TAMMANN 先生が指摘しておられますが、それは今日の知識から申せば鉄中に存在する酸素によつて形成されるものであります。すなわち酸素含有量を 0.005% 以下から、0.006 ないし 0.010% まで増しますと、すでに指摘したように遷移温度が上昇いたします。

さて最後に見かけ上は硫黄の影響も存在するという事実にも言及する必要があると思ひます。すなわち、硫黄を 0.004% から 0.005% 程度含んでいる鉄の遷移温度は、それを 0.003% まで含有する鉄のそれに比べるとはるかに高くなります。なお純鉄中で酸化物の間層が形成されるのに硫黄が関与するということが当然考えられ、組成いかんによつては硫黄もまた鉄のぜい性に影響することが考えられるわけでありまして。したがつて製鋼作業の際、いわゆるあと吹き (Nachblasen) によつて硫黄の量を 0.002% から 0.003% 程度まで落すように努めるのは、おそらくここにその理由があると思ひます。

以上のような次第でわれわれはふたたびわれわれの考察の出発点に立ち戻りました。われわれはとくに工業用鉄鋼の品質におよぼす窒素の影響を明らかにいたしましたし、またそれと炭素の影響を関連づけたのであります。しかし、われわれがもしガスの問題に眼を向けるとすれば、その他酸素、硫黄、燐の作用も見逃すわけにはいきません。また、そのほかにも凝固過程、再結晶過程それに結晶格子欠陥などの影響も見逃すわけにはいかないでしょう。つまりある一つの材料の品質というものはちようど生物における体質と同様、常に全体の化学的および物理的な様々な現象の相互の兼ね合いによつて決まるものであります。

(訳者附記) この翻訳は日本鉄鋼協会を通じていただきました講演原稿にもとづいて行なつたものであります。翻訳にあつて詳細に読み直してみますと附図と本文が一致しない箇所がありました。本来、そのような箇所は KÖSTER 先生に伺つて十分検討いたすべきところですがお忙しい旅行のため、ついに果すことができず申訳けないと思つております。そのため、やむをえず私の責任で訂正したり、また不明のまま訳した箇所もありますが、翻訳上の誤りはないつもりでありますので御了承いただきたく存じます。