

0. 序論

— 社会環境と機械技術者の基本的態度 — (Basic attitude of mechanical engineer)

古典的な機械要素設計やそのトラブルシューティングをやっていると、近頃の世の中の声は「何百年も前からある機械技術を対象にしているなんて、まだやることってあるの？時代に合っていないよね。」と陰ではいつも言われている。このことは、技術というものは、基盤技術の上に先端技術が構築され、そのバランスで現実には有用なものとして機能するものであることが理解されていない状況を示すものである。近年、先端技術と基盤技術のバランスが極端に崩れてきているようであるが、それを正しく認識できていないのが現状と思われる。

現在のマスコミや政治家、あるいは、多くの社会の指導的立場にある人には、一旦できた技術は永続的であると信じている人が多いようである。しかし、人に依存した技術は、維持の努力をし、正しく伝承しなくては、人と同じ寿命しか持ちえない。基盤機械技術は長年の経験と実績の上でできているものであり、その内容は極めて複雑であって、如何にIT技術が進歩しても、IT技術という機械技術にとっては仮想現実の世界のみには移行ができないような部分が多くを占めている。すなわち、基盤機械技術には、熟練技能者の経験に基づく、設計、製造、運用に関するノウハウが技術の中核をなしているものが多くある。そのため、「基盤機械技術は人間に依存したものである」という本性は避けられない。そして何も手が打たれない現状では、この現在の社会の豊かさを支えてきた機械技術の寿命は、すでに高齢化している熟練技術者と同じ寿命しかないのである。

歯車技術は3000年ぐらいも昔からある基盤機械技術である。それであるにも関わらず、今でも常に実用面でトラブルが絶えない。現状はすでに、人が豊かで幸福な生活を過ごすのに支障をきたしている状況に近いようである。

産業革命以後、その技術が飛躍的に進歩し、50年以上も前に世界的に認められた歯車強度計算法もでき、例えば、歯車歯面の耐力についてはヘルツの接触応力が最大となる歯面の箇所が損傷していくことが定説化し機械技術者の常識になっていて、誰も疑うことをしなくなった。定説とされている知識にもその有効範囲がある、すなわち、適用限界があるという当たり前のことが、一般には認識されていない状況になってしまった。この分野の技術者は何も考えなくなり、規格化された計算法に数値を放り込み、数値出力を得るだけが設計作業になってしまった。企業経営者や購買部門は技術の詳細は分からないので、そんな設計でことが済むならば、もっと合理化が可能であろうという考えに当然になってしまう。出来上がった式を計算するだけならば、電子計算機の最もお得意とするところなので、歯車技術には素人であるがコンピュータープログラムに長けたプログラマーが作成したグラフィックやアニメーションが会社経営者や購買部門の人の心を捉え、これが技術だと勘違いするような綺麗なソフトウェアを提供するビジネスが生まれ、法外な値段であるにもかかわらず、このような外部業者が作ったその種のソフトウェアを購入するだけで、自社の技術が向上し、良い製品ができると誤解した。こんなに高価な素晴らしいソフトウェアを買ってあげたのだから、もう試作実験なんぞをしなくても、直ぐに世界最高の製品ができ、開発期間もごく短くなるはずであると。

このようなソフトウェアを進化した紙と鉛筆、単なる設計の道具であると認識して使えるようなレベルの技術者がこれを使うのであれば、分かっていることの集合が複雑であって状況が見え難いものを見える形にしてくれるこれらのソフトウェアの有用性は大きく、本当に役に立つ道具なのであるが、これは導入した企業トップの思惑とは大抵ちょっと違う状況である。

経験のないグリーンエンジニアがこれらソフトウェアを、あたかも宗教的聖典と誤解し、本当の未知のことに対する答えを告げてくれる神の声を聴くように、そのプログラムの有効範囲に対する認識もなく使うのが一般的で、これではろくなことはない。自社になんら技術向上、技術蓄積はできず、製品のトラブルは増えて、クレーム対策費が増加している例も結構ある。クレーム処理に払う金には糸目はつけないが、ものの設計、製造には1円のことにも金を出し渋り、機械装置の信頼性を落としている。トラブルが起こってから必要な金は保険会社が払うが、設計・製造に要する金は自社で払わなければならない経済構造の矛盾がもた

らしている状況である。この例のように、信用を失うことよりも、その場の「1円」が大事な状況も、現在、数多く見られるように感じられる。

アカウントビリティー、エビデンスばかりを重視する現在のマスコミの風潮の影響の問題もある。一番典型的なのが風力発電の分野である。風力発電設備はほとんどの場合、税金等公共の金で買われる。この場合、購入する担当者が最も気にするのは、金が有効に使われ、税の使途に無駄がないことのエビデンスをどう確保できるかである。一番一般的なやり方は、カタログに明示されている性能、仕様が良く、見積価格の低いもの、すなわち、この観点でのコストパフォーマンスの一番良いものに決定することである。エビデンスはすべて揃うし、金の有効利用の点で、文句をつけるのが難しい状況になるからである。

このようなコストパフォーマンスが良い製品でなければ市場参入すらできない経済状況が形作られている。技術者の良心に従い良い製品を作ろうとすると、どうしても手抜き商品よりも高つくつので、上の意味でのコストパフォーマンスが悪くなり、市場性がなくなる。面白い社会経済構造である。すなわち、この分野は本質的にまともな機械製品が使われないことがないマーケット領域なのである。どんな似非コストパフォーマンスが良い製品でも稼働に入ってすぐに壊れることはほとんどないが、例えば、15年以上の寿命があるはずの製品が2、3年経つと壊れ出すことがあるようである。しかし、壊れた時にはこの製品の購入した人たちは元の部署にいないことも多く、元々購入を決定したのは会議体で、エビデンスとしてはまともな決定をしたことになっているので責任の所在は全く不明になる。その結果、現在、作られた風力発電設備の23%程が壊れているのにそれを重大な問題だと取り上げられることがない状況が作られている。市場に出る機械で事故率が23%にもなるのに、まともな機械ですよと胸を張っていられるのは、面白いことである。

エビデンス、エビデンスというマニュアル至上主義的運営は、日本で、学会、大学を含め、至るところを支配し、金と労務の浪費を生んでいる。その害悪は国の活力を失わせるところまできているようである。いくらでも例は挙げられるが、また、多くの方は「私も例を挙げられる」と言われるであろうが、上記のような短期利益至上の経済におけるコストパフォーマンスの正論的議論には勝てないと言うので、みんな口をつぐむ状況が現実である。

今、機械産業に係る世界の現状、機械部品の品質性能を見ていると、近年、材料の冶金学的並びに製造品質、部品の製造各工程の処理前の残留応力状態、形状精度の品質は、じりじりじりじりと低下していつているのが体感される。熱処理をすると材料の欠点がよく見えるのであるが、ある時間断面のみで材料を調べたのでは分からない程度にうまく手抜きがされていつているようである。

なぜ、このような状況になるのかを我々は考えなくてはならない。大手メーカーは自分の利益を確保するため、下請けに低価格の納入を強要する。古き良き時代の大企業は下請けを育てることを考えたのであるが、近頃は長期的なことを考えず短期的に自分の利益を上げることしか物事を考えさせないのである。マネーゲームをする人が短期的な業績の向上を求めるためである。ところが、下請けも生きていかねばならないのでバレないように手抜きをして製造コストを下げる努力をするのが人間の本性である。材料についても、会社の購買部署は、規格名が同じでミルシートでも付けさせれば同じ品質の材料が手に入ると思ってグローバル調達をするが、紙に書いたものなどどうにでも書けるし、規定されている検査項目だけでは品質の低下をチェックできないこともあるなど認識されていないようである。マニュアル絶対社会になって、人間がものを自分で正しく見、自分の責任で判断することなどすることすら許されなくなった結果である。

人間が HOMO-SAPIENCE（理性的人間）ではなくなり、HOMO-INSCITUS（無知蒙昧的人間）に退化してきている、あるいは、させられていることを認識することすら許さない社会雰囲気は誰が演出しているのだろうか。

まあちょっと難し過ぎることはさておき、工業の根幹をなす鉄鋼材料についても、国内メーカーも外国メーカーとの競争に負けないよう製造コストを削減して材料を提供しようとしている。そのためには特に製造過程におけるエネルギーコストの低減が重要と考えられているようである。その結果として、上に述べたような状況になるのは、人間の本性から当然の帰結である。技術者として良い品質、良い性能のものを提供するのだという美学はもはや存在を許されず、法律的に違反がない範囲でできるだけ安いものを提供するの善になったようである。エビデンスが常に言われるマニュアル至上主義的経営で短期的企業利益の確保が絶対必要の点から、これが善と言われて、世界が動くようになってきたのである。日本も悪い坂を転げ落ちだし

ているのかも知れない。これは、日本の産業や機械技術についてのかなり根本的な問題である。

ギリシャの昔より、科学は森羅万象を綿密に観察することから興っているが、近年は全てシミュレーションで先ず状況を再現し、そして考えるようになってきている。まるで神の声を聞くようにである。しかし、所詮、シミュレーションは仮想現実の世界で、それを作ったコンピュータプログラマーが、分からないところやできないところには適当な仮説をおいてごまかし、ユーザの目に見える結果が出るようにした産物であって、すでに分かっていることを再現しているだけである。もっとも、分かっていることの集合が複雑であって状況が見え難いものを見る形にしてくれる有用性は大きいのが、本当の未知のことを告げてくれる神の声では決してない。

本歯車損傷大全は、世の中の思想や状況がどう変わろうと壊れるものは壊れる物理世界の機械技術の根幹としての歯車に起こる各種損傷を客観的に観察した資料に、今、かなりの確実さでおそらくこのような物理現象の結果であろうと思われる意見を解説として付けて紹介していく。歯車技術に係る人々が歯車損傷に出くわし、自分の目でそれを見て評価しようとするとき、先人にはこのように見てきた人もいるのですよということを知って、自分の頭で考えて理解し、判断を下して知見を広げていくのが、歴史が証明している人間の知的進化の正しいあり方である。本書がそのための何らかの参考になれば、これに勝る喜びはない。そのような態度が日本の技術立国を支えていくのである。

歯車の損傷名は、歴史的にその外見から決められてきたと思われる。現場の機械技術者の実務的な会話において、状況の相互理解を助けるための専門用語として生まれてきたものである。例えば、「スクラッチング」というのは、歯面に引っ掻き傷がついている状態の総称で、その原因とかには関与しない概念であり、「スコーリング」とは、熱帯のスコール（大雨）のように歯面に縦方向の傷が付く状態を指しているのが大元である。その原因について云々する議論が出てきたのは後世、機械工学の研究が盛んに行われるようになってからである。「ピッチング」とは、歯面に小さな穴凹（ピット）ができる状況を言ったものであり、「スポーリング」とは、歯面がズルッと剥ける状態を言っていたのに過ぎないと思われる。ところが学術的に、摩耗や表面接触疲労の基礎研究とかが進むにつれて、各種損傷につき、その発生原因と損傷進展の状態から分類する学術的な損傷名が与えられるようになっていった。これに伴い外見に依って付けられていた歯車の損傷名と学術的な損傷名との関係が検討され、その生まれの違う両方の名前が共に混在して残るようになってのが現状であると思われる。その結果、損傷用語の定義において、学問的な発生メカニズムから付けられた損傷名と見かけから付けられた損傷名との間にどうしても不整合性が存在するようになってしまった。例えば、軽度のスクラッチングのほとんどは潤滑油中の摩耗粉とかの異物のかみ込みで起っているもので、これは「異物のかみ込み」の一形態であるとするのが損傷原因と対策を立てる上からは有効である。しかし、もう少し酷いスクラッチングにおいては歯面の「凝着」、あるいは、「凝着摩耗」が起こっていることが多い。そうするとこれは「スコーリング」と何が違うのかということになるし、「凝着摩耗」と「スカuffing」とはまた何が違うのかといったことにもなる。

もう一つの問題は、損傷の形態は歯車の運転時間の経過に伴い変化していく物理的状況がもたらすものである。例えば、本書の各章節にまとめられている損傷名の大見出しを、運転時間の経過に伴い進展する歯車損傷、そして歯車寿命に至る一過程として捉えたと、その状況は、図0-1のように表現できる。損傷の説明をしようとした時、必然的にその原因と損傷の進展の経緯について述べるべきであろうが、そうすると、ある損傷名についての説明と、その損傷の進展過程の各所に存在する損傷名に関し、本書の他の箇所に書かれている説明との間で多くの内容が重複記述してしまうことになる。しかし、一方には、重複記述はできるだけ避けたいという編集上の強い希望があるので、これを尊重すると、ある損傷について、その原因や進展経緯について理解するにも、本書のあちこちに分けて書かれている多くの他の損傷についての記述を合わせ読まないという理解ができなくなるという問題を生じる。

本質的にこのような状況を回避できない矛盾の中にいる状態であるにもかかわらず、本歯車損傷大全は機械技術者が歯車損傷に出くわした時、その外観から原因究明と対策の立案の助けとなる情報を、過去の経験からある程度与えることができればという希望から編集されている。各々の損傷名のところの説明において、若干の内容的不整合性、あるいは、不備があると思うが、上記のような理由の結果であり、何卒、少し大目に見ていただければ幸いである。

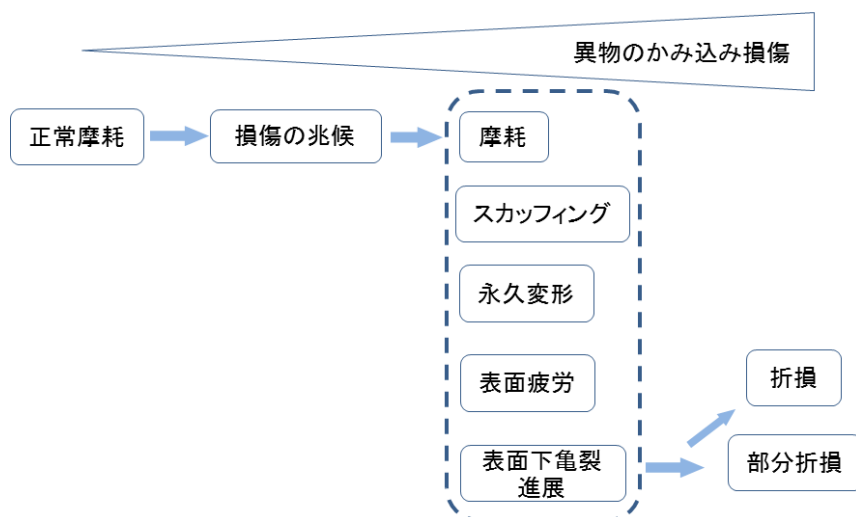


図 0-1 歯車損傷が起こる経緯, 損傷名と損傷進展の継時変化

0.1 トラブルシューティングの手順 (Procedure of gear trouble shooting)

機械装置に歯車損傷のトラブルが起こり、その原因の究明と対策の立案をしなければならない状況を考える。まず持ち込まれるのは、損傷部位の写真、それが使われている機械・装置の種類、問題の歯車装置の図面、歯車諸元等の情報である。トラブルシューティング作業の第一歩としては、事故を起こした歯車装置の同定が必要である。駆動機・被動機は何であって、そのメーカーはどこか、連成振動といった装置全体の動的適合性に問題はなかったか、事故装置のシリアルナンバーと問題歯車・軸・軸受の情報、図面番号、歯車装置設置場所・環境の情報、さらに、トラブルを起こしたユーザに問題点はなかったか、などの情報を集める。同種の歯車装置が何台生産され、何台出荷されていて、その内、何台が同種のトラブルを起こしているか、製品の保管時に錆の発生等の問題はなかったか、メンテナンス状況はどうであったか、設計寿命と実績寿命との対応はどうか、開発・試運転された時期と問題品が製造された時期の関係はどうか、負荷のデューティーサイクルは分かっているか、起動停止の頻度は如何であったか、前回のメンテナンス時の状況は如何であったか、などを明らかにしておく必要がある。

歯車装置の設置環境については、設置場所が環境的に汚いか綺麗なかの状態並びに近辺の温度状態、煙や腐食性ガス等の状態、水や湿度の状態についてチェックしなくてはならない。また、運転については、ランニングインが正当になされたか、仕様通りの運転条件が守られていたか、通常、目につき難い瞬時過大負荷が働くような可能性がなかったか、装置起動時に問題はなかったか、歯車装置の設置環境から歯車に電流が流れる可能性はなかったか等のチェックが必要である。トラブルを起こした歯車装置のメーカー側では、そのユニットは誰が設計し、誰が製造したか、試運転の結果はどうであったかも調べなければならない。

通常、分からない情報は、歯車に働いていた実際の荷重の大きさと、実働状態における歯車のアライメント状態である。歯車の強度的信頼性の設計は歯車にかかる荷重の大きさが分かっているとされているのに、現実には実働荷重は分からないというのは基本的大問題である。しばしば事故調査時に、設計時に与えられた荷重値をそのまま用いて検討している例もある。このような場合には、実働荷重の大きさに問題がないかを検討することが必要である。例えば、横置き遊星歯車装置では、各遊星歯車への荷重等配のため浮遊支持されている要素部品は、停止時には全て下に着座している。装置が起動すると歯面力でこれらが持ち上げられ、力のつり合いの位置に移動するのであるが、歯面荷重の少ない状態で回転速度が速くなると歯面分離振動が起こり、部品がバックラッシュ間で踊ってぶつかり合う。この時に発生する動的荷重は駆動機の発生トルクから推定される荷重値より大きくなるのがしばしばあるが、この大きさを設計段階で推定することはかなり難しい。特に大型の歯車装置では、歯車の質量が大きいので問題になる。例えば、縦置きのかさ歯車装置では、軸推力のためピニオン軸が持ち上げられ軸方向振動が起こると、ピニオンと軸の合計質量が餅つきの杵のような動きをして大質量の衝突が起こり、想定外の大荷重が働く。やまば歯車やダブルヘリカルギヤでは左右のはずば歯車間で分担荷重が動的に変動する軸方向振動(シャトルリングアクションと言う)が起こった場合も、ピニオンの軸方向の衝突で想定外の大荷重が働くことがあるのも同様である。また、平行軸歯車装置で3次元空間的に軸配置がなされているものでは、強度の検討をしている歯車対と異なる段の歯車の受ける荷重が、当該歯車軸のアライメントを大きく狂わせることもある。通常の歯車対のみを扱う強度計算式でこの状況を取り扱う際には、十分な注意が必要である。

歯車損傷トラブルが持ち込まれた時、まずなすべき質問、あるいは依頼事項は、損傷の現物を見させてもらうことである。見せてもらえなければ、調査結果は2割程度しか当たらないであろうというような表明をしても良い。次いで、運転条件の把握と、損傷に至る現場の状況と設置環境、そして現物の状況を可能な限り知らせてもらうことである。また、問題の歯車装置の歯車以外の部品のチェックも不可欠である。例えば、歯車軸、軸受、カラー、スペーサー等に事故の原因や経過の情報が残っていることはしばしばあり、損傷原因を推定する調査は極めて重要である。費用をかけても追加調査をして損傷原因究明のために把握したい情報には、損傷部位の材料や熱処理状況の検査結果がある。鉄鋼材料は決して均質なものではないことについても留意してはならない。製造工程上の異常が起こった可能性の有無の調査も必要である。

具体的作業としては、①歯面の当たり状況を精密に観察する必要がある。②軸、軸受、カラー、歯車ケーシングも同様にチェックする。機械部品のすべり・ころがり接触面を如何に正しく観察できるかの能力が歯

車装置のトラブルシューティングを遂行する際の基本の基本である。損傷面の観察には、面の正しい状況が見える光の状態を得るために、難しいものでは数日を要することもある。この際に留意すべき事柄については「0.14 写虚」を参照されたい。ここまでの調査で、損傷原因は歯車対のみで考えられるものか、装置構造絡みかを判断する必要がある。

損傷原因が装置構造絡みの時には、駆動機、被動機、設置状態、環境から見て、アライメント、動的（振動）状態、温度状況等々の検討が必要である。そして、負荷状態のチェック、放熱性のチェック、軸受配置のチェック、使用軸受の種類（クリアランスチェックを含む）のチェック、軸設計のチェック、潤滑法のチェックをし、設計時、図面から推定していた状態との相異があるかどうかを検討することも必要である。この段階で、③駆動機、被動機、設置状態、環境から見て、静的なアライメントの問題か、動的（振動）問題か、④温度の問題か、等々を判断する必要がある。そして、損傷原因に片当たりがあるときには、それに対処するよう軸受配置の変更を含む装置構造の変更を指示する必要がある場合もある。アライメントの狂いの影響が大きいと考えられる時や動的問題の時には、駆動機、被動機、軸、軸受、継手等々を含むシステム解析を必要とすることも多く、トラブルの対処として、構造変更、図面変更を指示することになる。温度上昇が問題の時には、外的熱源を除くことや装置冷却性能の向上のための図面変更を指示する。

歯車の調査としては、損傷状態、歯当たりの全歯における変化の状況を確認する。この際、歯当たりはかみ合う全ての歯の対の組み合わせの累積結果であるので、歯数比の影響を考慮し、観察される歯当たりと、ある時間断面における歯面の接触状態の差異を正しく認識する必要がある。歯端部のチップングのチェック、歯元のトロコイド干渉のチェック、歯先のチップングの調査も不可欠である。そして、⑤チップングがあれば、対策を検討しなくてはならないし、⑥トロコイド干渉量の妥当性を判断し、問題があれば、⑦歯先修整量やクラウニング量、片当たり量のみならず、歯面修整曲線形状も検討してみなくてはならない。また、⑧歯側端面の面取り作業は丁寧にされていないことも多く、面取り時に付けられた微細な切欠きが損傷亀裂の引き金となるマイクロ亀裂の発生起点となっているようなこともしばしばある。このようなマイクロ亀裂は、通常、殆ど認識できないほどの微細なものである。歯面への異物のかみ込み状態もチェックしなくてはならない。また、薄肉歯車では、リムの弾性変形、リムの止め方のチェックも必要である。これらの調査の結果、歯車の損傷原因が歯車対独立で考えられるものではなく、やはり装置構造絡みの問題として検討しなくてはならなくなることもある。

損傷の発生原因は一般に極めて複雑であるので、シミュレーションでストレス状況を推定することもトラブルシューティングの有効な一手段である。しかし、シミュレーションは真実を告げるものでもないし神の声でもない。あくまで、ある前提条件のもとで、分かっている知識を組み合わせ形式論理を進めればどうなるかを示してくれる道具にすぎない。そのことを十分にわきまえて、シミュレーション出力を理解しなくては大きな間違いを犯す。そして、⑨ヘルツ応力、フラッシュ温度（図0.1-1）が妥当なのに、歯面損傷が起

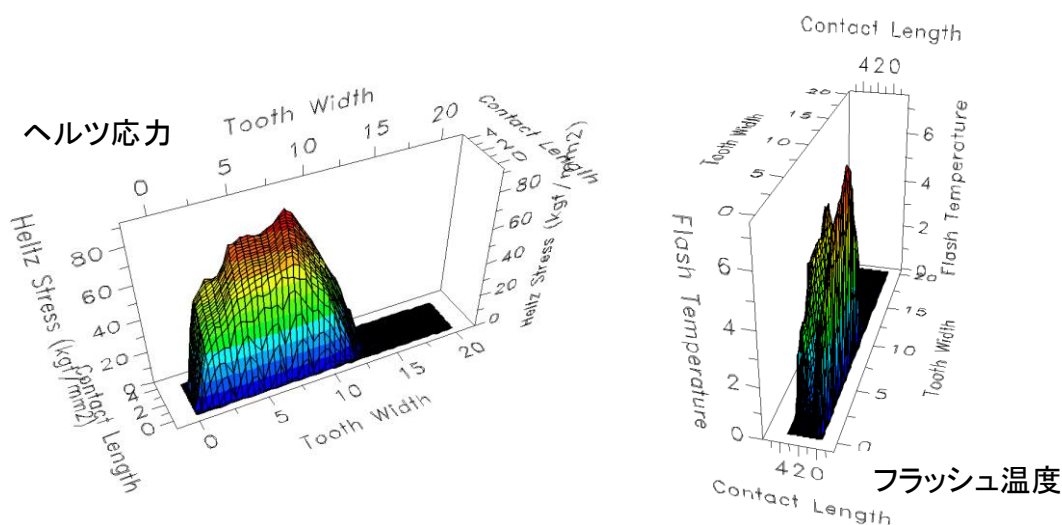


図 0.1-1 シミュレーションによる作用面上の接触応力とフラッシュ温度の例

0.1 トラブルシューティングの手順

こっているならば、潤滑油や歯面のサーフェスインテグリティの調査を指示し、⑩応力状態が妥当であるにもかかわらず、例えば、歯の折損事故が起こっていたのならば、原因は歯元応力とは考えず、材料や熱処理にも疑いの目を向けると同時に、折損亀裂の大きな破断面に目を奪われ過ぎることがないように十分気を付けながら、亀裂の起点がどこであったかを詳細に遡り、トリガーとなったマイクロクラックの発生箇所を見つける必要がある。そのためには歯元の接触限界部付近のトロコイド干渉傷や、歯の側端のチップング等も詳細に観察する必要がある。その結果として、最終損傷は歯の折損であるが、事故防止のためには歯のエッジ処理や歯面損傷対策をする必要のある場合もある。

歯車の荷重伝達特性のシミュレーションは、多くの前提条件のもとにプログラムされているものであり、不明な物理現象についてはシミュレーション出力を得るために無理やりの数値処置が施されているのが一般である。また、シミュレーションの入力データとして与えなければならない。例えば、実働状態における歯車の実トルクの値や軸アライメントの正確な値を知るとはほとんど不可能なことが多い。このような場合には、設計時に用いた原動機のノミナル出力値などを用いることも一般的である。シミュレーションの出力結果はこのような不確定因子の影響を大きく受けているものであるため、シミュレーション結果をそのまま鵜呑みに信じることは厳に慎むべきことで、事故品の実状とシミュレーション結果の対比による検討が不可欠である。歯面の接触応力やフラッシュ温度は残念ながら現物で見ることができない。現物で見ることができるのは歯当たりの状態と、歯元応力が計測されている場合には歯元応力の実機における状態である。

歯当たりのチェックは歴史的に最も有効に使われている実機の稼働状態の確認方法である。歯面のどの部分が負荷を受け持っているのかは、歯面粗さの状態が変化しているとか若干の摩耗らしき状態が確認できるとかの歯面状況の変化からある程度推定できることが多い。この実際の歯当たりと、シミュレーションが示す、例えば、図0.1-2のような歯当たりを比較検討することは有効なる情報を与えてくれる。実機稼働中、あるいは、実機と同じ製品の全負荷運転において、歯車回転に伴う歯元応力の変化や歯すじ方向分布が計測されている場合には、より正確に実機稼働中における歯車軸のアライメント状態と発生応力の状態を知ることができる。多くの場合、シミュレーションで歯車軸のアライメント量を振るパラメータスタディーをし、現物と合う歯当たりを得る作業により、あるいは、例えば、図0.1-3に示すように歯すじ方向の歯元応力分布を比較することにより、昔はどうしても不明であった、実機の稼働中における歯車軸のアライメント状態をかなり正確に知ることが最近では可能になった。歯当たりや歯元応力のシミュレーション結果が実機の状態と合えば、同時にシミュレーションされている接触応力やフラッシュ温度の状態、さらに伝達誤差や歯のかみ合いに起因する振動起振力の予測値（図0.1-4参照）の信頼性も少し高いものになる。

このようなトラブルシューティングを行った結果として提案される対策は、まず、(i)リーズナブルミニマムの歯面形状修整である。歯車に最適歯面形状修整を与え、実際と対応しているようなアライメント状態を与えて、頻繁に働くピーク荷重に対し、かみ合い状態シミュレーションの応力値が実績許容値を超えていれば、歯車諸元の変更などを含む基本対策が必要であると指導を渡す。この場合、(ii)装置の構造・諸元に基本的な問題がないかを検討し、問題があれば、それを先ず正すことが必要になることもある。しかし、これには多くの金と時間がかかり大事にもなる。もし、前記シミュレーションの最大応力値が実績許容値内に収

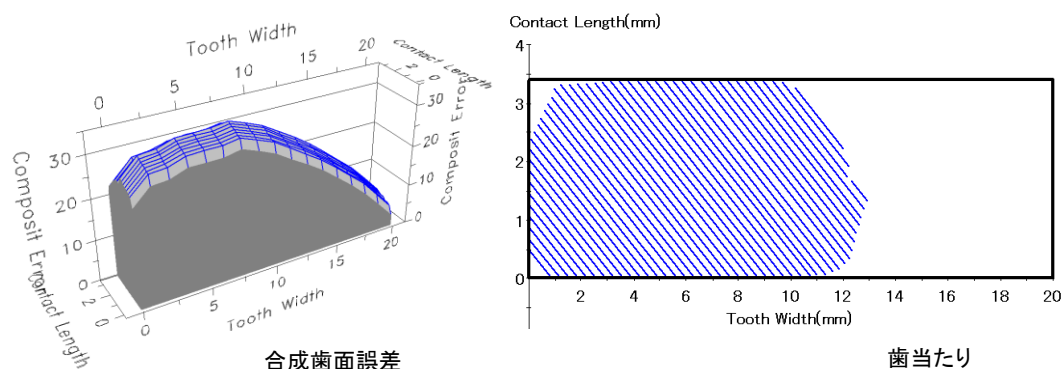


図0.1-2 シミュレーションによる作用面上の合成誤差曲面と歯当たりの例

まっているならば、現状諸元で歯面に最適修整を施し、応力状態をシミュレーションで確認してこの対策が可能であるかどうかを判断する。また例えば、歯面損傷の場合には、(iii)温度低減法、潤滑法変更等を提案する。(iv)必要な場合には、ギヤボックスを変更しない範囲内の、中心距離、歯幅の小幅な変更を含む、歯車諸元の変更、あるいは、材料・熱処理変更を提案する。(v)そして、前記(iii)、(iv)の場合について、最適歯面形状修整と安全へのマージンを回答する。

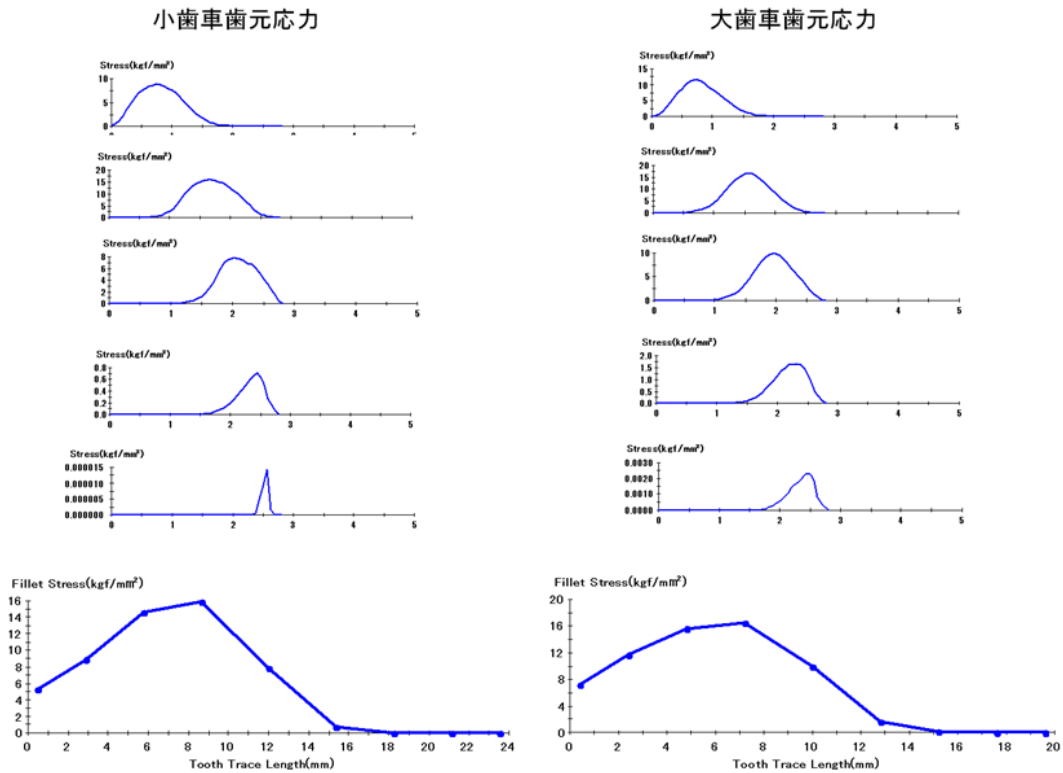


図 0.1-3 歯すじ方向数か所の歯元応力の経時変化とその最大値の歯すじ方向分布 (シミュレーション)

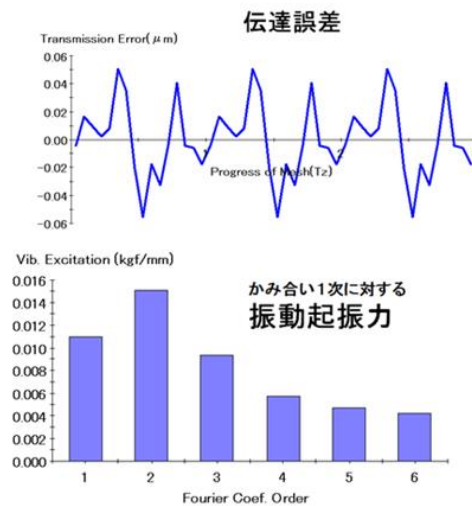


図 0.1-4 シミュレーションによる伝達誤差と振動起振力の予測

0.2 強い鉄を作るための基本的な方法と現実の問題 (Principle to make strong steel and practical problems)

材料研究者によると、鉄の弾性変形とは結晶格子がそのままの配置を保ちながら変形していくことで、塑性変形とは結晶格子のつながりが多くの転位の発生によってぶち切られ、元の形状に戻れなくなった状態であり、壊れるとはこの転位の発生が爆発的になって、材料が分離する状態らしい。だから、強い材料とは転位がこのような発生しない材料、すなわち、塑性変形をしない硬い材料ということになる。したがって、材料研究者は材料の強さとは硬さである、と言い切る。しかし、この主張と機械技術者が求める材料の強さ、すなわち、機械部品として壊れることとの概念との間にはかなりの乖離がある。材料の強度値を考える場合、研究者が取り扱う材料は常に均質であり、その比較的小さな単純形状の試験片に、単純で明快な応力が与えられ、一つの決まりきった損傷モードで破壊する場合の応力値をもってその材料の耐力としている。しかし、現実の機械部品では、材料は均質でなく、応力場は複雑で、温度条件などの環境条件も正確には分からず、また、不可避免的に何がしかの異物をかみ込んで表面に塑性変形や微小切削部を生じ、接触面のごく局所では表面の鋼材が溶融して次の瞬間に凝固するような状態で稼働され、また、潤滑油の極圧添加剤と接触表面材との化学反応を伴う状況の中で、複数の損傷モードが関連を持ちながら存在し、継時的にその損傷のモードが変化していくという損傷のポジティブフィードバック系の安定問題の結果として壊れることに至る。その経過の時間の長さや加えた負荷の大きさによって、機械屋はこの材料は強いとか弱いとかの判断をしている。

鋼を強化する方法としては、基本的に以下の4つの方法しかない（研究者によっては表0.6-1のようにもう少し対象範囲を広げて6つの方法にする意見もあるが、本質的に以下の議論には関係ない）。

1. 結晶粒を小さくする、
2. 固溶強化（転位の移動を妨げるように微細粒子を結晶格子レベルで分散させる）
3. 析出強化（転位の移動を妨げるように共析物をうまく析出させる）
4. 加工硬化（転位を多くする）

この4つの方法のうち、結晶粒の微細化以外の方法は、材料を強くすると亀裂伝播速度が上がる宿命を持つ。したがって、高強度材料は亀裂伝播速度が大きくなり、衝撃値が下がるのは仕方のないことである。これが上に述べた機械技術者が求める材料の強さと、材料研究者の言う材料の強さの違和感ができてくる原因にもなっている。より詳しい説明は、「0.6 材料屋の材料強度と歯車屋の材料強度」を参照されたい。

鋼の強度を考える場合、この4つの原理が如何に適用されて強い鋼が作られているかを、製造工程との関係において理解している必要がある。より詳しくは、「0.4 鋼並びにギャブランクの製造工程」をも参照されたい。

図 0.2-1 は、鋼の製造工程を模式的に示している。まず、鋼の材料として高炉から出てきた銑鉄を使うか資源回収で得られたスクラップを使うかで、原材料が持っている元素成分にかなりの差が出てくる。近年の鉄鋼メーカー、特に特殊鋼メーカーでは、原料のほとんど全てがスクラップになってきている。スクラップにも

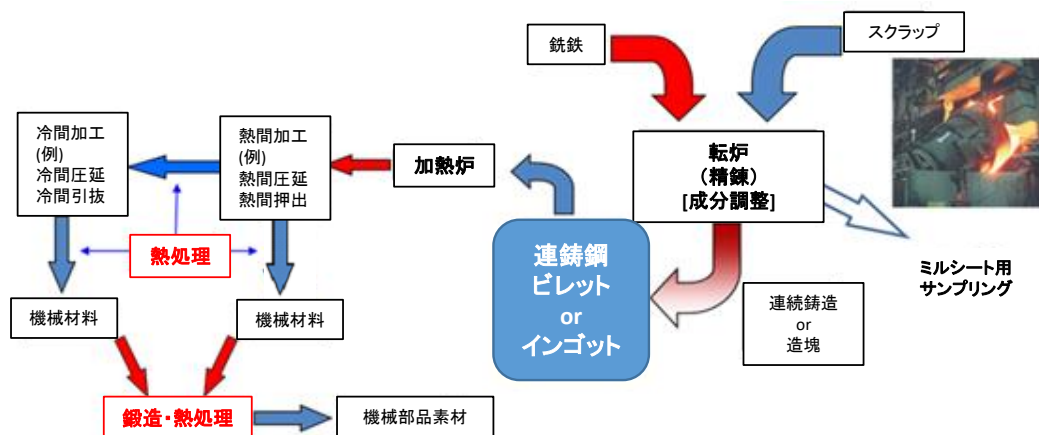


図 0.2-1 鋼の製法，ミルシートの鋼組成サンプリング

品質の良いものと悪いものがあり、それによって鋼材原料中に紛れ込む不純物や異物の性質と量が大きく変わってくる。スクラップ等を転炉で融解して不純物を取り除き、適切な元素成分を加えて成分が安定したところで連続鋳造をし、鋼のブルームやビレットが作られる。当然ながらこれまでの工程で不純物がどの程度取れたかは、製造業者の技術レベルとコスト計算、技術者の良心の関数である。しかし、溶融鋼の中には何がしかの不純物が残存していることは避けられず、それらはビレットの中に残る。不純物はビレット中に均一に分布することはできず、凝固過程でビレットの表面と中心部に集まる傾向がある（図 0.2-2、図 0.4-4、図 0.4-11 参照）。連続鋳造の速度を変化させると、組織の結晶状態や不純物の分布状態が変化する。製造効率を高めるため連続鋳造の速度を早くし過ぎると問題を起すことが多い。また、不純物を減らすには、別工程で、真空溶解など特殊な処置が必要である。しかし、このように製造された鋼は高価になり、産業用材料としては一般的ではない。

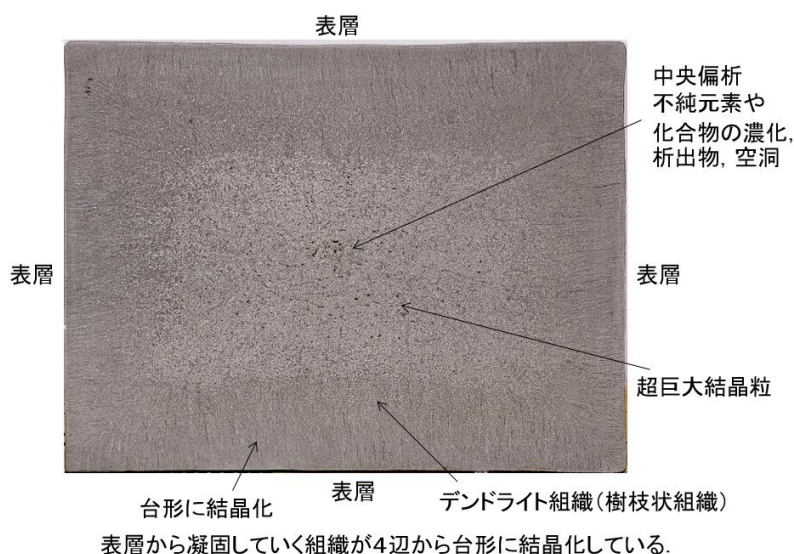


図 0.2-2 連続鋳造された鋼ビレットの一般的組織例

不純物、異物は鋼中にある程度は避けられず、全て悪者かと言うとそうでもない。上記の鉄の強化法の「析出強化」からも類推できるように、これらが細かくうまく分散してくれると、鋼を強化する働きをする。すなわち、これらが如何に細かくなって、うまく分散しているかが重要なことである。例えば、鋼の丸棒を機械部品の材料として使う場合、製造された鋼のビレットに如何に強く大きな塑性変形が与えられて、組織が微細化され、不純物や異物が細かく破碎されて材料中に均一に分散されているかが、同じ元素成分の鋼であっても機械部品材料としての品質の善し悪しにつながる。棒鋼製造過程で材料内部に発生している残留応力の状態は、部品の機械加工後や熱処理後の変形にも大きな影響を与えるので、機械部品の加工に入る前の素材の段階で残留応力除去並びに組織微細化のための熱処理がされていることが望ましいが、これらすべてのことは棒鋼の製造コストの上昇に直結する問題であるので、激しい国際競争の中で鉄鋼メーカーがともすれば手を抜きたがる傾向にあることには留意すべきである。棒鋼でも、圧延丸棒と鍛造丸棒で何が違うのですかということにも関連した話である。また、ミルシートに記載される元素成分は通常、鋼の溶湯からサンプリングされて分析された結果であるので、製造された、例えば、棒鋼中の特定箇所の組織や残留応力の状態を示すものではない。ところが、機械部品の損傷は、材料中の最弱箇所から壊れるので、その箇所の極めてローカルな材料特性が問題になるのであって、平均の材料特性は損傷発生とは直接の関係はない。材料内部の特定箇所の組織や残留応力の状態が、材料の強度的信頼性や製造時の歪みなどに大きな影響を持っていることが問題なのである。組織が均質でない材料はその内部にかなり弱い箇所が存在しているので、その弱い箇所が機械稼働中の部品の発生応力の高いところに偶然あれば損傷が起るし、偶然なければ何も起らない。損傷発生は「当たるも八卦、当たらぬも八卦」という設計技術とは別次元のものになってしまう。

損傷事故を起こした機械部品の材料は、一般に材料検査に回される。その材料検査を見てみると、どんどんどんどん倍率を上げて材料内部を調べ、「ここに不純物が見つかりましたので、これが損傷事故の原因で

0.2 強い鉄を作るための基本的な方法と現実の問題

す」という報告書を目にすることもしばしばある。その返答が正しいかどうかを理解するためには前述の鋼の強化法の基本を理解している必要がある。上記のような材料検査からの回答は、「私には原因を見つけられなかったもので、材料中の異物にその責任を押し付けておきます。」という場合が多い。なぜならば、まともな鋼でも高強度鋼は、その強化法の原理からして、拡大していくと必ず異物の存在を見つけることができるからである。また、近年は鋼の損傷原因を「水素」に押しつける例も一般化している。水素が原因かどうか、真犯人かどうかを確定する証拠を誰の疑問も含まないような形で立証することは極めて難しいため、疑わしきは罰するに犯人にされているケースも多々あると思われる。

高強度鋼を理解するには、鋼というものは決して均質な材料ではなく、粘土に玉砂利を混ぜたような構造、すなわち、軟らかい鉄の素地の中に硬い析出物や介在物等の粒子が混ざっているような構造になっていることを理解していなくてはならない。力が加わった場合には硬い粒子が力を支え、また、摩耗をも抑制するのである。析出物や細かい介在物がこの材料のマクロな塑性変形抵抗である「硬さ」を上げ、材料を強くしているのである。材料の強さに関係する硬さとは、硬い粒子を軟らかな鉄の素地の中で塑性変形移動させるときの抵抗値なのである。例えば、材質のビッカース硬度を測るということは、ダイヤモンドの角錘で素地の中の硬い粒子を押し動かし、対象鋼 TP 表面を塑性変形させていくときの塑性変形抵抗を測っていることになる。マイクロインデントなどでごく微小領域の硬さを測る場合には、そこが素地であるか硬い粒子であるかにより、その硬度の値が大きくばらつくのは当然の結果である。

また、材料の強さとは、マイクロクラックが素地の間を漸進していくときの時間と関連しているものかもしれないが、硬い粒子が内部に色々な形態で存在する鋼材について、あまり明快に説明された資料にはお目にかからない。硬い粒子が細かく均等に材料中に分散してくれれば良いのであるが、製造工程が悪いと材料の組織が均一ではなく、偏析したり、硬い粒子がクラスターになったりしている。このような場合、また、玉砂利に相当する析出物や異物の径も大き過ぎたりする場合には、その箇所からマイクロ亀裂が入り、装置使用時間の経過に伴いそれが進行して、大きな損傷や事故につながることも多い。このような場合には、硬い粒子は鋼を強化するのでなく、そこでの応力集中で材料強度を弱めるのだという理解が必要である。関連事項として、「1.5 材料欠陥」、「3.4.6 材料欠陥起点疲労亀裂」、「7.8 材料の組織変化型剥離と水素攻撃」、「7.9 材料欠陥起点剥離」、「8.4.3 材料欠陥起点折損」を参照されたい。

図 0.2-3 は、高荷重で使い込まれた歯車歯面を示す。この歯面の損傷を起こしていない箇所（図中の黄色枠内）を拡大してみると、図 0.2-4 の状態が確認された。アセチルセルロースのレプリカで見た SEM 画像で

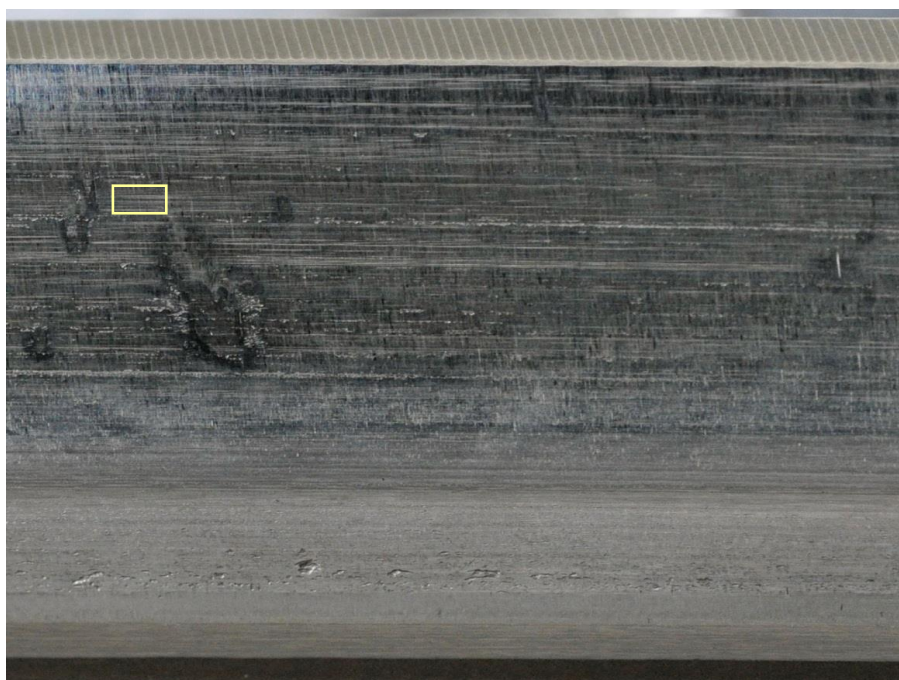


図 0.2-3 高荷重で長期間運転されて損傷した歯車歯面

ある。写真中の細かい球状の粒が凹んでいるように見えるが、レプリカで引っ込んでいるのだから、現物表面では微細粒子が飛び出している状態である。すなわち、柔らかい素地の中に硬い粒子が存在している状態が認められる。微細粒子がないところでは素地が塑性変形、あるいは、摩耗しているのだが、微細粒子が連なったところでは、それが頑張って素地の摩耗や塑性変形を防いでいるようである。

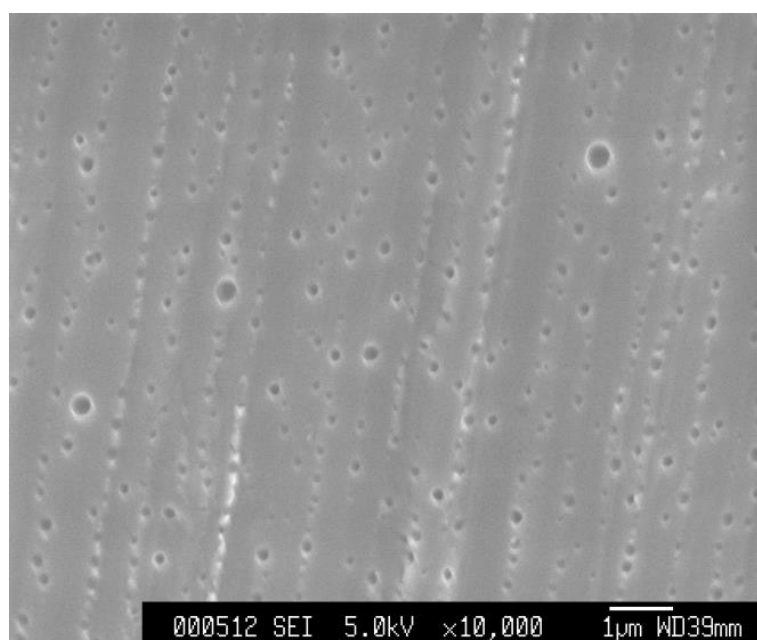


図 0.2-4 図 0.2-3 の損傷を起こしていない歯面部分（黄色の四角部分）の SEM 写真

鋼の製造工程から考えると、このような硬い微細粒子は素地中にランダムに分布しているはずであるが、図ではそれが接触面のすべり方向に並んで存在している。このことは、①接触面での摩擦力により、柔らかい素地が塑性変形して、材料中にランダムに存在していた硬い微細粒子が接触面のすべり方向に再配列した、②接触面の激しいすべり仕事のためにごく表面は材料の変態温度を超し、微細粒子がすべり方向に析出してきた、の2つの可能性のあることを示している。どちらが真実に近いかは不明であるが、ともあれ、高荷重を伝達する歯車の歯面は、このような材料変化が起こるほどの過酷な状況にあることは確かである。

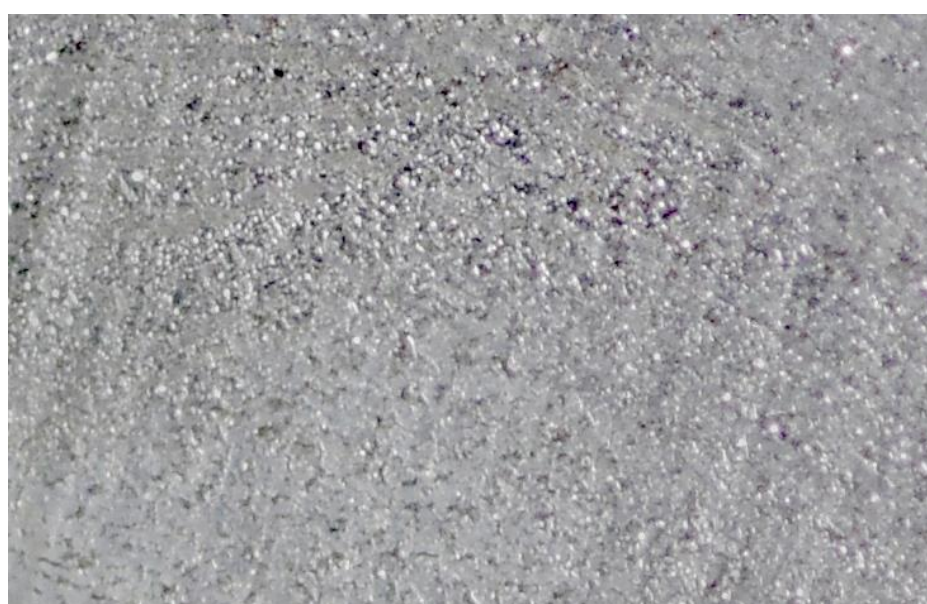


図 0.2-5 歯面材質中の介在物（写真上部中央付近）18CrNiMo67

0.2 強い鉄を作るための基本的な方法と現実の問題

前ページの図 0.2-5 は、スカuffingを起こし歯表面が除去された大形ベベルギヤのピニオン歯面に現れた材質中の介在物（写真上部中央付近の黒い球状物質）の例を示す。このように直径が $100\mu\text{m}$ 程度以上に大きい介在物はおそらく材料の強度を増すより、その箇所における応力集中のために材料強度を低下させる影響の方が大きいであろう。また、当然ながら材料の靱性は大きく低下しているはずである。

図 0.2-6 は、図 0.2-5 と同じ歯面の若干異なる位置の写真である。介在物はまだ歯面に現れていないが、もう少し歯表面層が除去されると図 0.2-5 のように介在物そのものが見えてくるはずである。

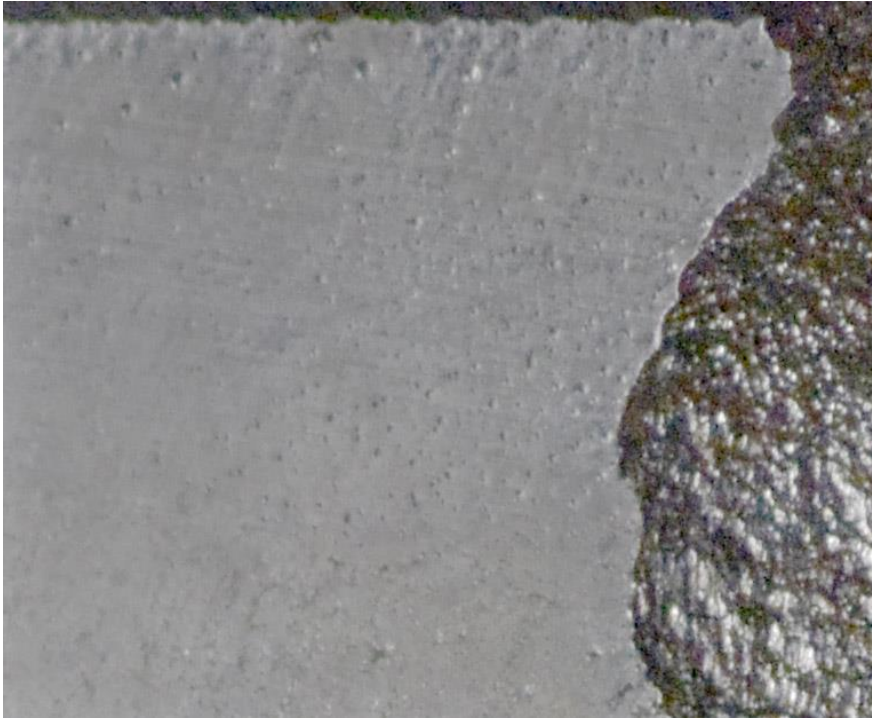


図 0.2-6 露出直前の歯面材質中の介在物

図 0.2-7 は、歯車用鋼である SCM420H 丸棒から回転曲げ試験 TP を製作し、浸炭焼入れ後に 2000rpm で耐久運転試験し、 3.527×10^5 回転で壊れた破断面を示す。破断面に多く認められる黒い球状物質は、この材料

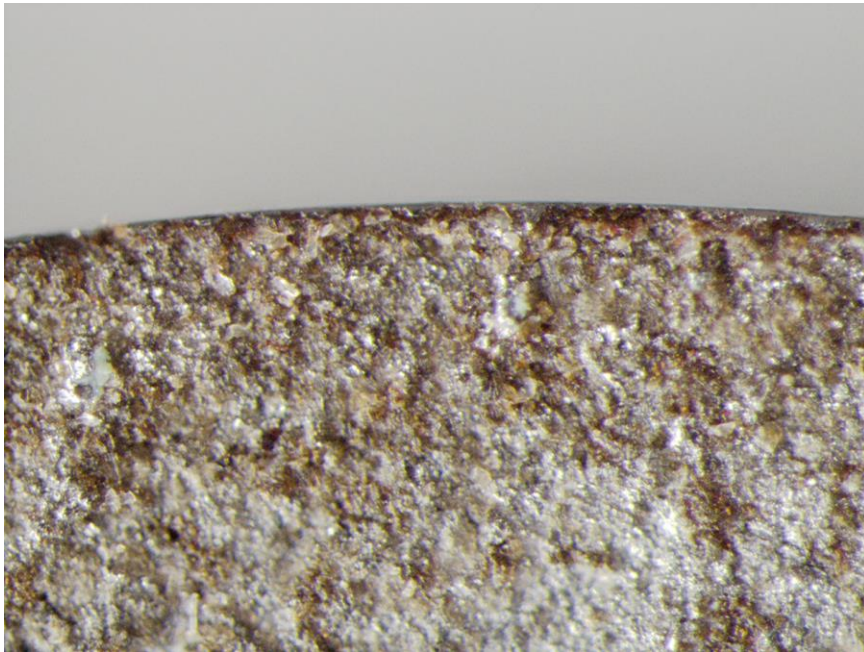


図 0.2-7 SCM420H 浸炭焼入れ TP の回転曲げ試験による破断面

の強度を上げるための析出物と思われる。このような析出物は、面を磨いてエッチングして見る組織写真からは存在の判別が困難である。同様の例として、図 0.4-9 も参照されたい。

このような析出物、あるいは、介在物がクラスターになって存在していると材料強度を著しく低下させる。関連事項として以下も参照されたい。「0.4 鋼並びにギャブランクの製造工程」、「1.5 材料欠陥」、「7.9 材料欠陥起点剥離」、「8.4.3 材料欠陥起点折損」。

図 0.2-8 左図は、おそらくマイルドな使用条件であったと思われるが約 20 年間使用された小形エレベータ駆動用ウォームホイール歯面の摩耗状態を示すが、全く問題にならないほどしか摩耗していない。潤滑管理も良かったと思われるが、ともかくも摩耗が並はずれて少ないように思われた。このホイールのリム部が疲労破損したのでその断面を調べた結果が右図である。この高強度黄銅は耐面圧・耐摩耗性を上昇させるためかなり多くの介在物を材料内部に散りばめた組織になっていた。本章の最初に述べた鋼の強化法と同じ手法が採用されていた訳である。硬度を測定すると 150HV 程度あり、黄銅としては高かった。これには材料内部の介在物の存在の他、黄銅の加工硬化の影響もあるはずである。しかし、ネガティブな側面として材料の靱性はかなり失われているものと常識的には想像される。

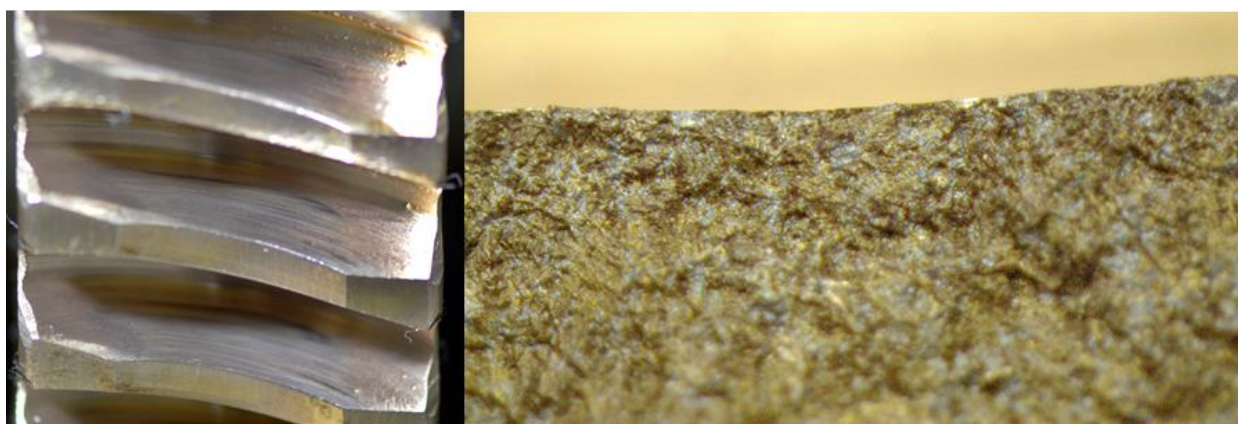


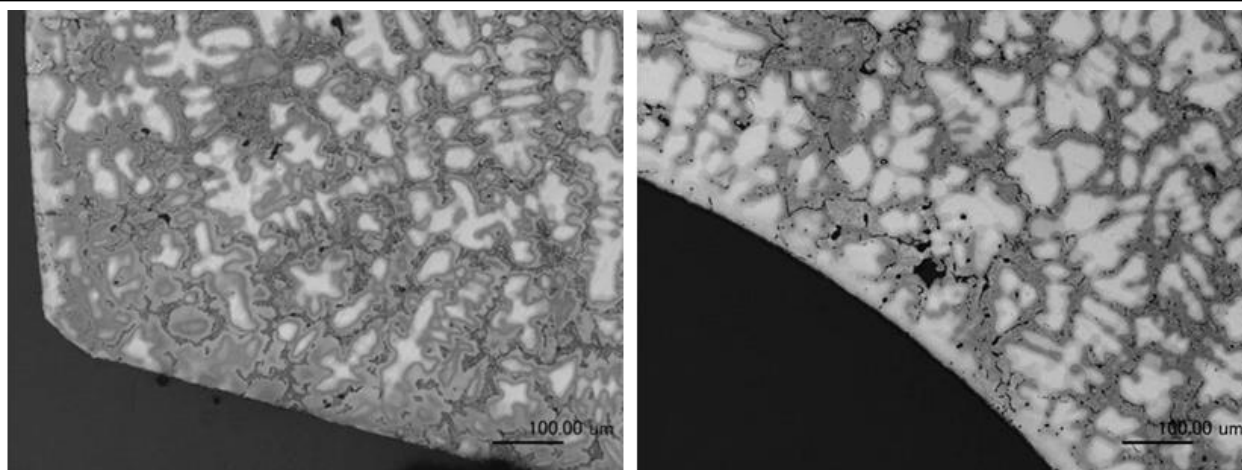
図 0.2-8 高強度黄銅製ウォームホイールの歯面摩耗状態（左）とリム部破断面（右）

表 0.2-1 は、この材料の元素成分を調べた結果である。注目すべきは Ni の含有量が高いことである。析出物を材料内部に作ることによる材料の靱性低下を Ni の添加で防いでいるものと推定される。

表 0.2-1 ウォームホイール材の元素成分（蛍光 X 線分析）

試料	化学成分 (mass%)									
	Cu	Sn	C	Ni	P	Pb	Cl	Fe	Si	S
黄銅リム部	83.798	11.246	1.888	1.864	0.267	0.055	0.026	0.020	0.018	0.007

図 0.2-9 は、前図のウォームホイール用高強度黄銅の塩化第二銅の 2% 塩酸溶液によりエッチングして調べた組織を示す。この黄銅は鑄鉄の心金の外周にリム部として鑄造で作られ、そこに機械加工で歯が切られている。黄銅歯部直角断面の歯先側では、粗いデンドライト組織が明瞭に観察されるが、歯元側ではその形態が異なり、歯元 R 部には大小の鑄巣の集積も観察された。しかし、鋼材の歯車に比べて絶対的な負荷レベルの低いウォームでは、この程度の鑄巣があってもそこが歯の折損の起点になる兆候は認められなかった。また、この組織観察において、エッチングの腐食度合いが場所により異なっていることがあり、析出物の網目状の出方にも差異が見られる。リム部の場所により黄銅鑄物の凝固速度に違いがあるようである。



歯先部

歯元R部

図 0.2-9 ウォームホイール用高強度黄銅の組織

図 0.2-10 は、この高強度黄銅製ウォームホイールの長期負荷運転後の歯中央部断面の組織を示す。歯欠損部より離れた位置で採取したこの試料の観察によると、黄銅部内部では凝固速度の違いによりデンドライト組織は大きくなり、外縁部とは異なった断面組織を呈していたが、黄銅リム部の歯部外縁は細かいデンドライト組織を示し、微細な析出物が見られた。写真の上辺になる接触歯面断面は、長期間の使用による発熱とせん断応力・接触圧力の作用により組織が潰され流されているようである。関連事項として、図 8.4.4-5～図 8.4.4-12、「7.9 材料欠陥起点剥離」、 「10.1 リムやウェブの亀裂」も参照されたい。

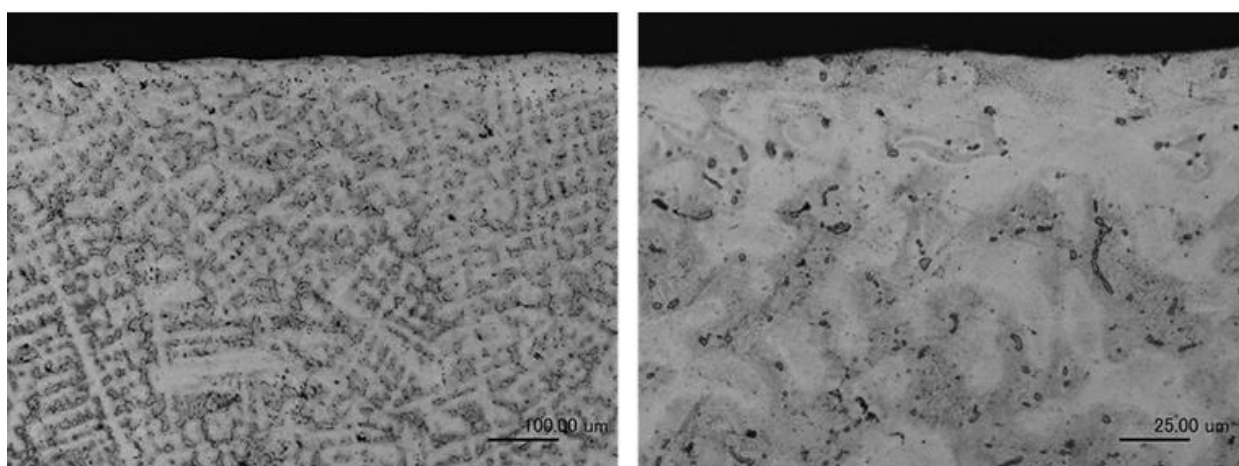


図 0.2-10 高強度黄銅製ウォームホイールの長期負荷運転後の組織

鉄鋼材料は、鉄の多結晶体の中に介在物や析出物の混ざったものである。その組織の状態が、鋼の強さやその他の特性に大きな影響を与えている。その組織の状態は、鋼の元素成分パーセントのみによって決まるのではなく、鋼の製造過程で鉄にどのような温度でどのような塑性変形を与えたかによって大きく変わってくる。昔から刀鍛冶は、鉄は鍛錬しなければ強くならないと言ってきたが、そのことには製造過程が鋼の特性に大きな影響を与える冶金学的理由の昔流の表現であろう。

鉄を鍛錬する、すなわち、鉄に高温で大きな塑性変形を様々の方向から与え、組織を微細化し、介在物や析出物がクラスターにならないように均一に分散させるには、大きなエネルギーと時間が必要であり、製造コストの増加に直結する。そして、鋼の唯一の品質保証書として現在売り手買い手の間で取り交わされるミルシートの内容には通常反映されない。すなわち、できる鋼材の品質は向上するが、製品の品質証明書には反映されず、製造コストは増加する。商売的には面白くない状況で、必然的に製造コストを下げるため、鍛錬が疎かにされた鋼材が市場を占めることになる。このことは現在の世界経済の基本構造上どうしようもない問題である。

図0.2-11は、現在一般的に入手できる炭素鋼S25Cを通常行われるような焼きならし(電気炉にTP挿入後、昇温900°C×5.4ks(1.5Hr)保持し、その後、大気放冷)したものと、セイコーミュージアムが所蔵する三代目津田助左衛門信貫が貞享五年(1688年)に製作した二挺天符櫓時計の歯車の材料組織を比較したものである。和時計歯車材料の成分を調べた結果、炭素鋼でカーボンパーセントはかなり低く、現在の材料に対応させるとほぼS8C相当材であった。左側コラムの2枚の写真が現在のS25C材、右側コラムの2枚の写真が和時計歯車のS8C相当材で、10%ナイトルエッチングによる組織写真を示している。上の2枚が100倍画像、下の2枚が400倍画像である。

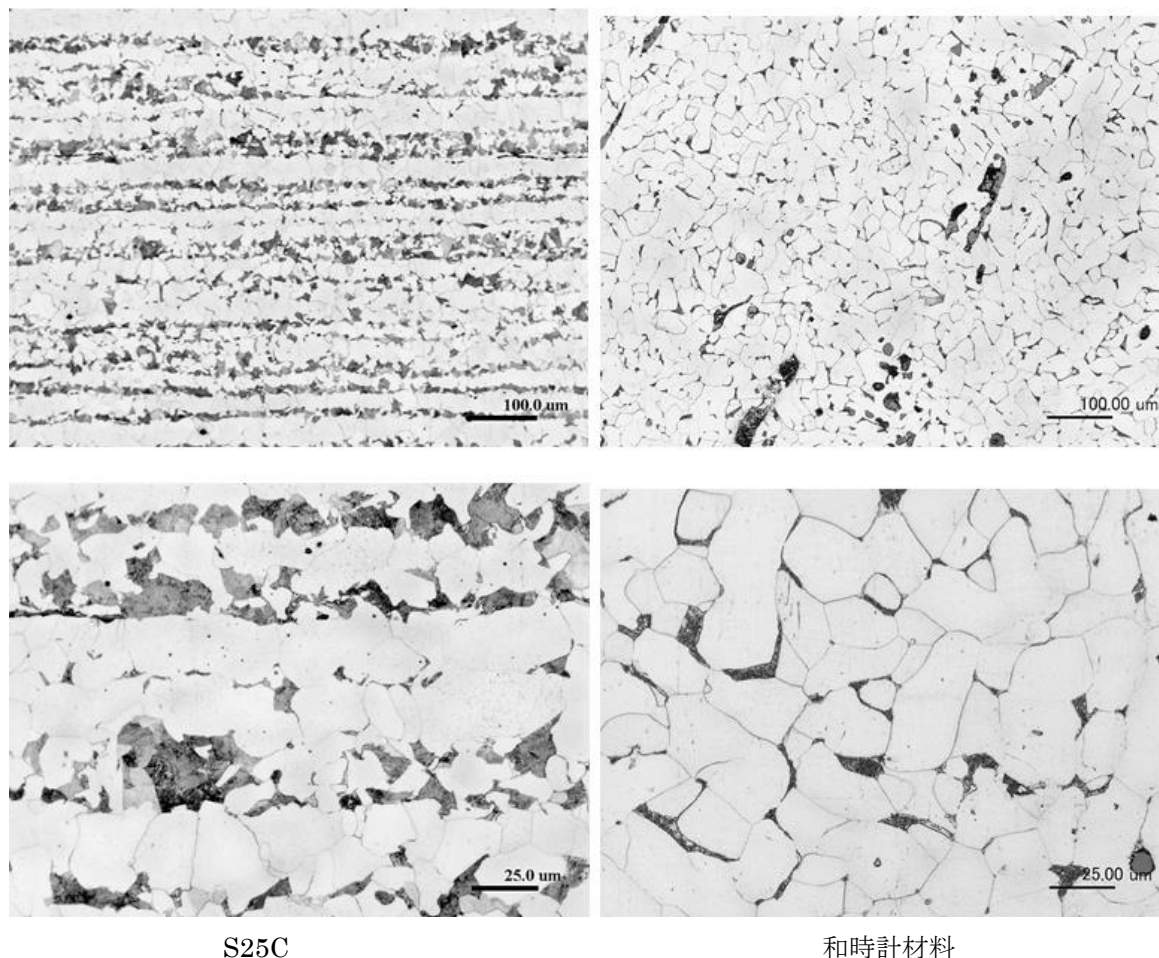


図0.2-11 S25C 圧延鋼棒焼きならし後組織と 1688 年製和時計歯車材料 (S8C 相当) の組織の違い
(上田, 渡邊, 宮寄, 久保, 松岡, 機論 Vol.83, No.847,2017)

現在のS25C丸棒は圧延で作られるため、その組織はバウムクーヘンのような層状になっている(左上図参照)。この組織状態は素材熱処理をしてもあまり変化しない。これに対し右コラムの昔の鋼は、おそらく槌で激しく鍛錬されていたため組織にこのような方向性は全く認められず、結晶粒がきっちりと絡み合っている。結晶粒の大きさは下の2枚の写真に見られるように、むしろ昔の鋼材の方がわずかに大きい。また、昔も鋼材には結構多くの介在物が紛れ込んでいるが、それは小さく破碎されて組織の中にランダムに分散されている。

図0.2-12は、これら材料の硬さを調べた結果である。S25Cは焼き戻しされているためか、炭素量の少ない和時計歯車の材料の方の硬度が高い。和時計の歯車は手作業のヤスリ掛けで製造されているので、加工がし易いように焼き戻しをされていると推定していたが、もしかしたら、加工後何らかの熱処理が施されている可能性も否定できない。この状態で材料の強さを推定すると、S8C相当の和時計歯車の材料の方が炭素量の多いS25Cより強いことになる。介在物の分散状況並びに組織の状態が材料強さに及ぼす影響は、図0.2-11の写真に見られるように、和時計歯車の材料の方がはるかに材料を強くさせる方向である。

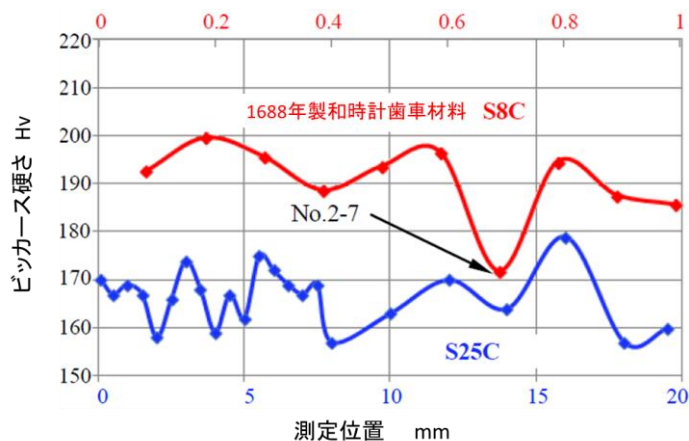


図 0.2-12 S25C 圧延鋼棒焼きならし後と和時計歯車材料 (S8C 相当) の硬さの違い

加工硬化を積極的に利用して強い材料を実現している鋼もある。溶断したままで土木関係機械等の Cutter 一部に使用される C%0.27, Si%0.70, Mn%1.60, P%0.025, S%0.01, Cr%1.00, Ni%0.25, Mo%0.27, B%0.004 といった鋼種を例にとる。

図 0.2-13 左図は、この鋼材の未使用状態で、所用の形状に板材を溶断した箇所のビッカース硬度を測定した結果である。材料内部の硬さ、したがって、おそらく素材の硬さは 470HV 程度であり何らかの熱処理がされて売られている材料である。溶断面から 0.2~0.25mm の範囲の材質は熔融再凝固の過程を経ていると考えられるが、硬さはほぼ心部硬さに戻っている。表面に近く、変態点を超える温度まで加熱された部分は、溶断後の冷却速度が早いため若干焼入れがされた状態になって、硬度が 500HV 程度にまで上がっている。端面から 0.3mm ほど内部の部分から硬さが低下し始めているが、この箇所ぐらいに深くなると溶断後の冷却速度が遅くなり材料は焼き戻しされている。0.4mm 辺りの組織は明らかに他の部分と異なっており、0.5mm 付近で最も低い 300HV 以下の硬さまで低下している。硬さ低下の範囲が 2mm 近くの深さにまで及んでいる。

図 0.2-13 右図は、この材料が疲労破損した後に、溶断面から内部に向かっての硬さを測定した結果である。両図の比較より分かるように、激しい応力状態を経験した外周端から 0.15mm 程度は、硬度が 470HV から 580HV 程度にまで上昇している。右図の溶断時には、端面から 0.5mm 辺りにあったと推定される硬さが最も

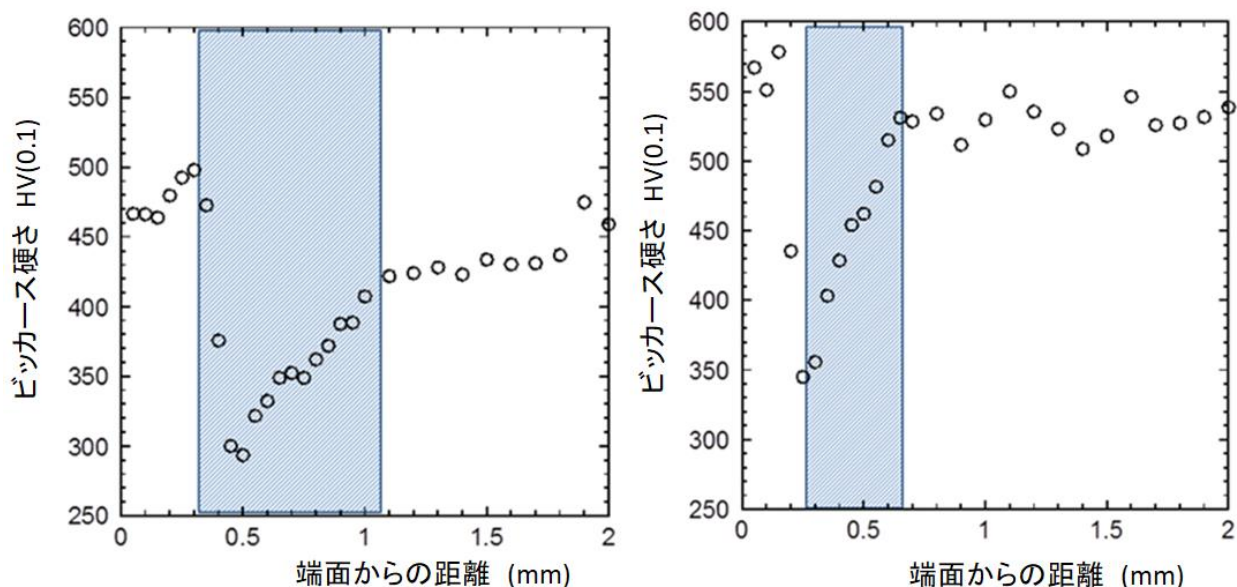


図 0.2-13 使用前と疲労破損後の加工硬化鋼材の溶断面からの硬さの変化

低くなっている箇所が、この TP では 0.2mm ほどの位置になっている。これには溶断の条件が異なり、硬さが最も低くなった位置が浅かった可能性と、稼働中にこの刃物の表面がアブレーション（異物による摩耗）ですり減っている可能性も加わっている。この内部の最も硬さが低くなった部分についても、硬度は 300HV から 350HV 程度に上昇している。深部の硬さも 470HV から 550HV 辺りにまで上昇している。この材料は、激しい応力履歴を受けた結果、全体にかなり激しく加工硬化を起こした模様である。

図 0.2-14 は、 $\phi 35$ の SK4 棒鋼から $\phi 25$ の試験片を切り出し、軸直角断面の HV 硬さを多点で調べた例である。明瞭に中央偏析が認められ、この材料は中心付近がまともでなく、強度部材として用いた場合、軸の中心付近に大きな応力の発生する箇所のある時には注意をしなければならない。例えば、内歯車をこの棒鋼を素材として作るとか、軸付き歯車の素材を旋削してこの棒鋼の中心部近くが軸材になるとかの場合がそれに該当する可能性がある。硬さの測定からこのようなことをいうことができるためには、バラツキ分布が得られるだけの多数点について硬さを測定することが必須である。

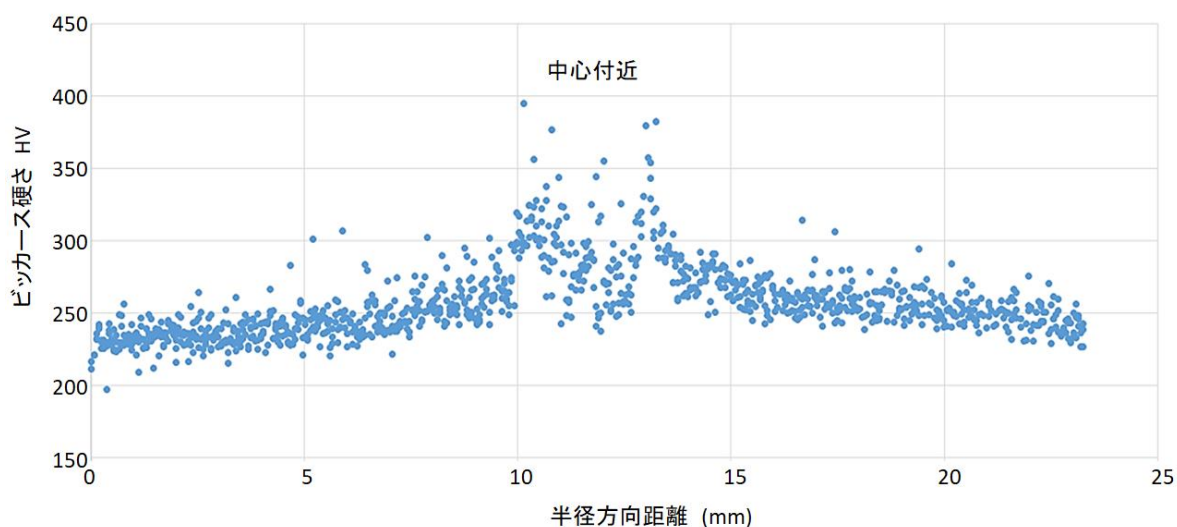


図 0.2-14 SK4 棒鋼 ($\phi 25$) 軸直角断面に認められた中央偏析

図 0.2-2, 図 0.4-4, 図 0.4-11 にも説明しているが、鉄鋼材料に中央偏析ができるのはある意味不可避であって、その程度が問題となる。一般に Cr や Mo 等の重い合金元素は熱処理でほとんど拡散しないので、極めて大きい塑性変形を材料に与える鍛錬で、はじめて、このような偏析をなくすることができることに留意すべきである。

SCM435 棒鋼の生材からリング状の機械部品素材を製作する時、割れ発生の問題が起こった。図 0.2-15 は、その生材と対策品である調質材の棒鋼から取った試験片の軸直角断面につき、マクロエッチングをして調べた組織と直径方向の HV 硬さのバラツキ分布を測定した結果を示す。マクロエッチングした組織にはこの棒鋼の原料である連続铸造ビレットが角形であった痕跡が、圧延で外観を円形にしても残っていることが認められる。また、生材中央部にはビレットが凝固する時に生じた中央偏析やボイドが認められ、硬さ測定値のバラツキの状態にもそれが良く反映されている。調質（焼入れ後、焼戻しを行い組織を改善する熱処理）を行った結果、組織はかなり拡散し、ビレットの中央部にあった四角形状に組織が変わっていた領域もかなりぼやけた状態になった。それに伴い、硬さ測定値のバラツキの状態にも中央偏析やボイドが殆ど認められなくなっている。今日、供給される棒鋼のほとんどすべては連続铸造で作られ、ややもすると製造能率を高め製造コスト削減をするため、不純物除去目的の溶湯の静止保持時間が十分長く取られず、ビレットの引き抜き速度も速くされる傾向にあるので、棒鋼から機械部品を作る際には、素材を十分に調質処理することや素材材を鍛造により製作することが必要になるのであろう。また、図 1.5.2-3 に一例を示したように、調質鋼として売られている市販鋼材の中には、材料内部まで十分調質ができていないものもあるので、注意が必要である。

0.2 強い鉄を作るための基本的な方法と現実の問題

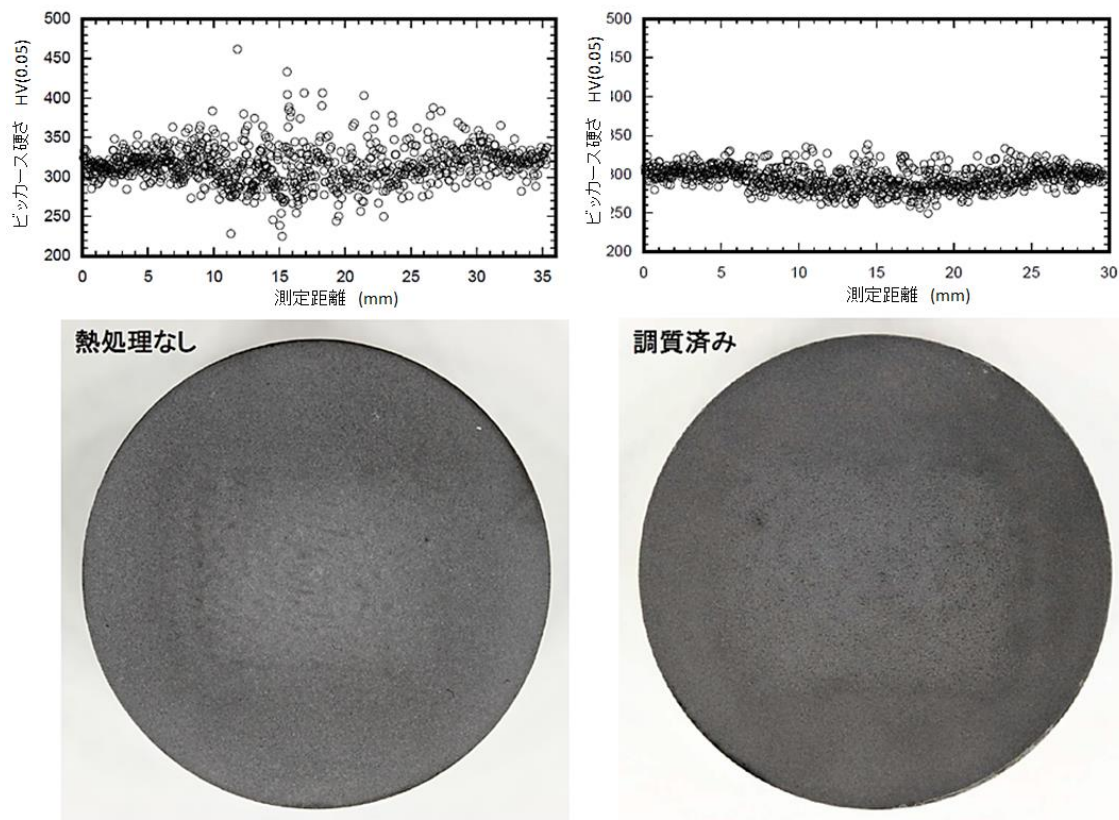


図 0.2-15 SCM435 棒鋼生材と調質材の組織と直径方向 HV 硬さのバラツキ分布

図 0.2-16 は、SCM415 棒鋼生材の軸直角断面の HV 硬さを直径方向に測り、その硬さのバラツキ状態を調査した時に経験されたおかしな一例である。この棒鋼は圧延でビレットから棒鋼に加工されているが、外周部の硬さ分布の状態が直径の右側と左側でかなり異なる状態になっていたものである。おそらく棒鋼への圧延加工時に塑性加工状態が棒鋼の部分により異なった結果、このような状態が生まれたものと推測される。

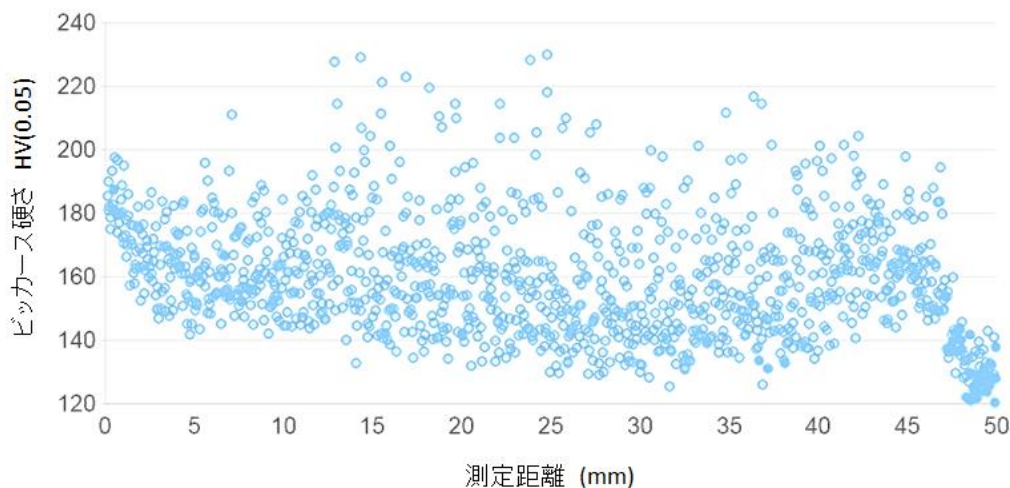


図 0.2-16 SCM415 棒鋼生材の直径方向 HV 硬さのバラツキ分布

図 0.2-17 は、稼働 1 年半で破損した高周波焼入 SCM440 製歯車軸の軸直角断面の硬さ分布、図 0.2-18 は、その金属組織並びに EPMA による元素成分の分布測定結果を示す。良くない材料の歯車が、良くない（下手くそな）熱処理をされた典型的な結果である（図 0.17-22～図 0.17-27, 図 0.19-14 参照）。硬さ分布を見た

ころ、本来焼きが入らないはずの軸の心部にまで硬いところが多く存在しており、正常とは考え難い。材料はミルシート付き規格鋼種であるがエッチングをして組織を調べると、組織は金太郎飴のような層状のブチになっており、鋼を硬くする Mo, Cr, Si, C の成分が縞状に偏析し、また、同じ縞の中に軟らかい硫化マンガも層状に認められた。この鋼材のこの結果は、焼入れ以前からすでに心部に硬度の高い介在物が存在していたか、焼入れ性を高める元素成分が偏在していたか、あるいは焼入れ時の心部の高温保持時間が極めて短かったかを示している（「0.19 高周波焼入れの難しさ」参照）。

この鋼材は製造工程上方の熔融状態の成分を調べれば、鋼材全体の平均値としてその組成元素成分はミルシート合格品となっているのであるが、機械部品用材料（棒鋼）として、その材料中の局所、局所を見てみると全く違う鋼種の集合体となっているのである。歯車の設計者はそんなことに気付かずこの材料の疲労強度は何々だと言って強度設計した結果、事故にあってしまった。そして、このような事実に対しても鉄鋼メーカーは、「規格合格品の材料で問題ないはずですよ」ということもある。

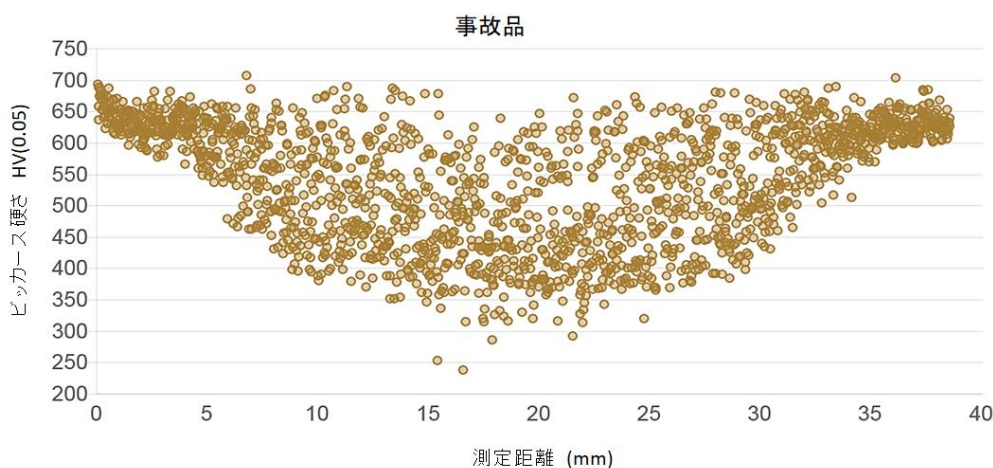


図 0.2-17 不良歯車軸の軸直角断面硬さ分布と軸断面偏析

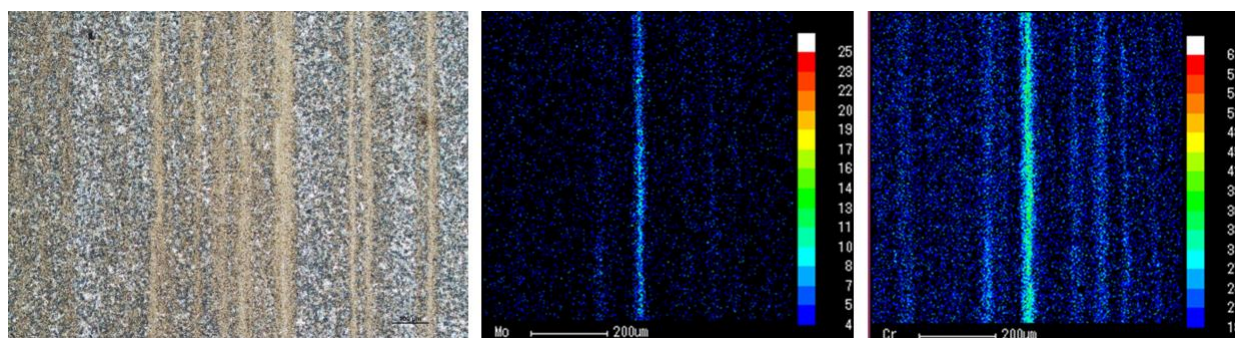


図 0.2-18 ミルシート付き規格鋼種での偏析（ナイトルエッチ組織と EPMA による Mo と Cr の偏析）

直径 1.7m 程度の大形内歯車が、稼働 2 年後に歯面に多くの亀裂が発生するトラブルを起こした（図 0.20-6～図 0.20-10, 図 1.5.1-1～図 1.5.1-8 参照）。図 0.2-19 上図はその亀裂のまだ歯面剥離に至っていない箇所の拡大写真で、偏析に沿って亀裂が見事に発生している。図 0.2-19 下図は、この歯車材の偏析の様子とその箇所の硬さ分布を示す。大形歯車の素材は製鋼時にこの程度の組織の不一樣さは通常存在するものである。偏析で硬さが硬くなった介在物等の存在する箇所では発生応力は設計時の計算を上回る値が介在物周辺の応力場の歪で局所的に発生し、近傍にある硬さの低い材料の弱い点に疲労損傷の起点となるマイクロ亀裂が発生するのが通例である（「0.3 疲労と損傷起点の発生の取り扱い」参照）。同じ規格名の鋼種であっても、直径 2m のギヤブランクと直径 10cm のギヤブランクとでは、例えば、鋼材の耐力は全く異なる。避け得ない中央偏析のある箇所に大きな応力の働く歯を切らねばならない大形内歯車素材では、これは特に留意しなくてはならない問題である。

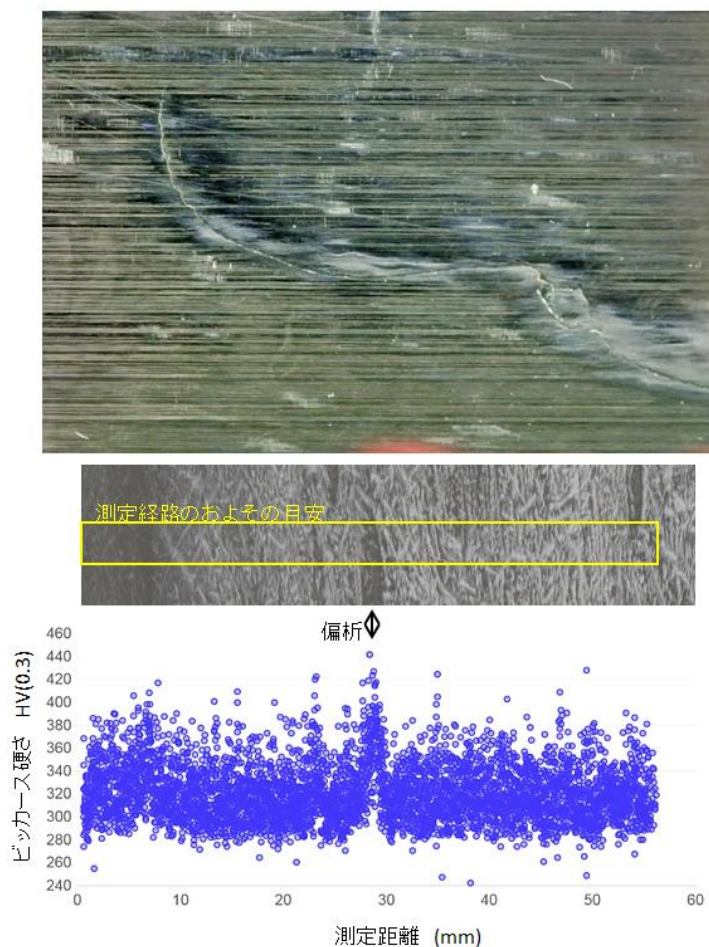


図 0.2-19 稼働 2 年後に、偏析に沿って発生した歯車歯面の亀裂と偏析部の硬さ分布

図 0.2-20 は、溶接ビードに存在した空隙から発生した疲労破損の引き金となるマイクロ亀裂を示す。左図は SEM 画像、右図はナイトルエッチングをして組織を観察できるようにした画像である。溶接ビードは凝固する時、均質な材料になっておらず、偏析が起こって組織が斑になっている。マイクロ亀裂は白くなっている。

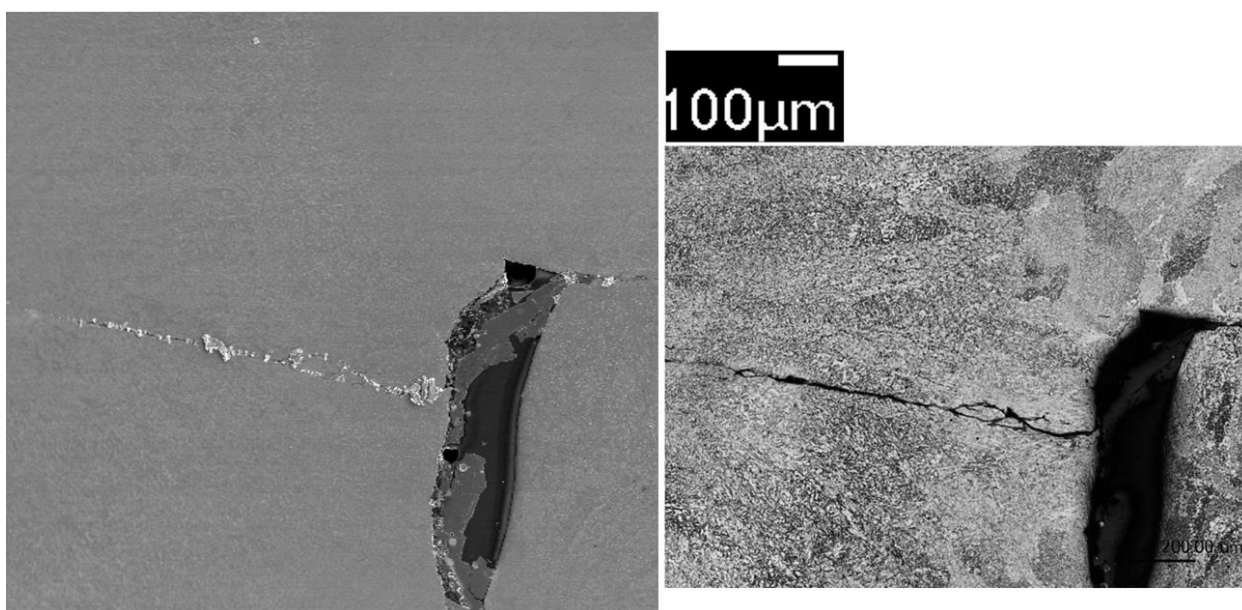


図 0.2-20 溶接ビードに発生した疲労破損引き金となるマイクロ亀裂 (左 : SEM 画像, 右:エッチング画像)

るフェライト、あるいは、セメンタイトの析出している帯に沿って発生し、進行していつているようである。これも組織が均質でない場合には、金属疲労の引き金となるマイクロ亀裂が発生し易いことを示す一例である。

図 0.2-21 は、SCM420 浸炭焼入れ歯車耐久試験で歯の折損面に現れた介在物のクラスターと MnS 含有部の破損形態である。このような介在物のクラスターがあるとクラスター内の介在物の間にあるフェライト素地に容易に損傷の引金となるマイクロ亀裂が発生し、疲労折損を誘発することがある。



図 0.2-21 SCM420 鋼浸炭焼入れ歯車の歯の折損部に現れた介在物のクラスターと MnS 含有部の破面状態

写真右下の心部破断面に右斜め上方向（歯車差材の軸方向）に洗濯板のような段々の波模様が認められるが、このような破断面は組織中に硫化マンガンが層状に存在している時の典型的な外観である。綿密に見てみると、硬化層内部においてもこのような硫化マンガンの存在を示す組織が確認できる（図 0.2-22 参照）。

高強度鋼材は材料中に硬い粒子を析出させて硬さを高め、強い鋼材にしていることが多い。本来、これらの硬い粒子は細かく、鋼材中に均等に分布しているべきものであるが、それを市販鋼材で実現することはかなり難しいことで、現実には図 0.2-18 のように偏ってブチ文様に分布していたり、例えば、図 0.2-21 のように集まってクラスターになっていることも多くある。鋼材の疲労破壊は材料中の一番弱いところからマイク

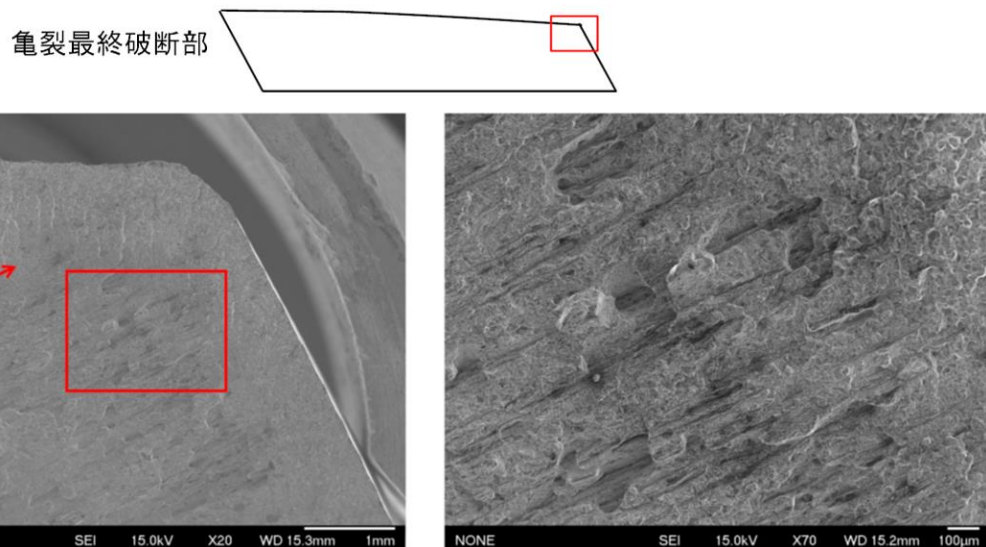


図 0.2-22 SCM420 鋼浸炭焼入れ歯車の歯の硬化層遷移部に認められた MnS 含有部の破面状態

0.2 強い鉄を作るための基本的な方法と現実の問題

口亀裂が入り、それが成長して損傷に至るものであるので、これは大きな問題である。図 0.2-22 のようにこのような析出物、あるいは、介在物のクラスターが歯面の直下にある場合には、そのクラスターの内部の素地に発生したマイクロ亀裂が内部で進行し、ある時突然、一歯のみに図 0.2-23 に示すような歯面の深い剥離が現われるという疲労損傷になることもある。

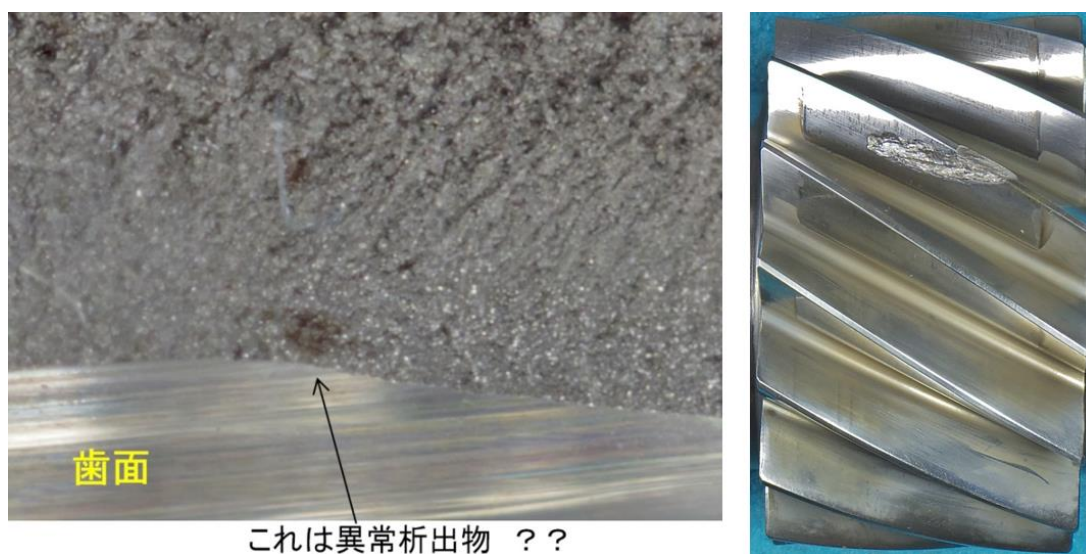


図 0.2-23 一歯のみに起こった歯面の異常剥離と剥離歯面直下に存在した介在物クラスター

歯車用鋼材の硬さのバラツキとその品質については、0.17節により詳しく解説しているので、この節の説明と合わせて理解されたい。