

特別講演

□ 渡辺義介賞受賞記念

鉄道車両用車輪・車軸の安全と技術倫理

Safety of Wheels and Axles for Railway Vehicles and Engineering Ethics

野田忠吉

Tadayoshi Noda

住友精密工業(株) 社友

1 はじめに

このたびは「交通産業機械品の製造技術開発と近代化および新製品の開発」で栄えある渡辺義介賞をいただき、身に余る光栄であり厚く御礼を申し上げます。

また、これまで御指導いただいた産業界の多くの先輩の皆様や大学の先生方、いろいろと御支援をいただいた友人の皆様、それに私と苦勞をともにして下さった同僚・後輩の皆様方に心から感謝申し上げます。

演題の「鉄道車両用車輪・車軸の安全と技術倫理」にあるとおり、鉄道車両の車輪・車軸・台車、トラック・バス用のアルミニウム合金ホイール、航空機の脚など交通機関の足回り部品の製造・開発の経験の中から、本日は鉄道車両用の車

輪・車軸（以下車輪・車軸という）について、鉄道車両の高速化の流れの中でユーザーである鉄道の各部門とともに行われてきました製造技術、製品技術の開発・改善の歴史とその底に流れる倫理観についてお話をさせていただきます。

2 交通機関の発達と鉄鋼の貢献

近代の産業の発達や居住環境の向上を支え、近代社会の構築と発展に役立ってきた鉄鋼は、交通機関にも大きく貢献しています。鉄鋼需要の用途別シェアでは、土木・建築市場が合わせて約50%を占めていますが、自動車、鉄道、船舶、航空機を含めた交通機関も約25%と多く、これに自動車交通に不可欠な道路、鉄道の基礎構造物、船舶での港湾施設、

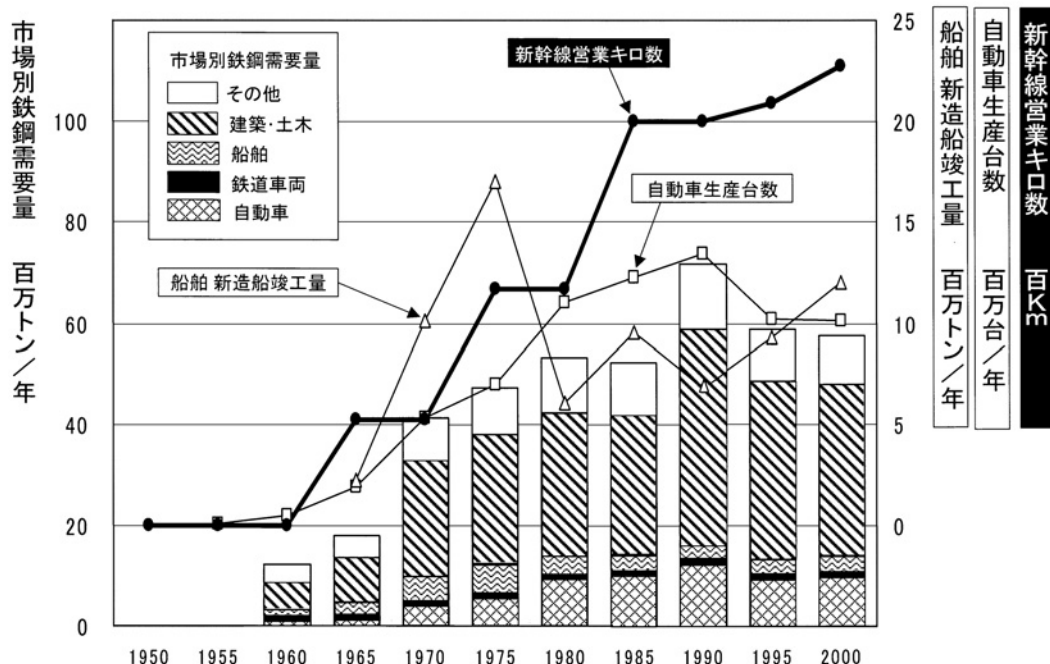


図1 我が国の市場別鉄鋼需要シェアと交通機関発達の歴史^{1, 2, 3, 4)}

航空機での空港などの土木建築用途を含めると鉄鋼需要の約3分の1を占めることになると考えられます(図1)。

また技術面においては、車体用鋼板での優れた薄板技術を筆頭に条鋼技術や鋼管技術、またそれらの塑性加工や溶接技術、エンジンや足回りでは鋳鍛鋼技術などが自動車産業のものづくりを支え、その普及発展と国際競争力の強化に貢献してきました。日本の自動車生産は1980年から連続して14年間世界第一位となり、現在もアメリカに次ぐ世界第二位の自動車大国です。造船産業においても船体用の厚板技術や溶接技術をはじめ船骨材やエンジン部材での鋳鍛鋼技術等が活用され、1963年以降20世紀後半はほぼ世界の造船竣工量で首位の座を占めてきました。航空機の機体には、アルミニウム合金、チタン合金、FRPが多く使われていますが、重要保安部品の脚(Landing Gear)には高強度鋼や高強度ステンレス鋼が欠かせません。

鉄道はその名のとおりのレールが鉄の道であり、その上を走る車輪も車軸も材料としては鉄しか使われていません。市場別にみれば鉄道における鉄鋼の使用量はそれほど多くはありませんが、これらの鉄鋼製品が鉄道の乗客・乗員の安全を守っている訳です。

3 鉄道の発展と高速化の歴史

3.1 鉄道の起源

1814年にジョージ・スチーブンソンが蒸気機関車を開発し、8台の貨車に30トンの積荷を積んで走った時には時速6.4kmであったと言われています。鉄道として完成したのはストックトン・ダーリントン鉄道で、1825年にジョージ・スチーブンソンの製作したロコモーション号が38両の車両を連結して時速16～20kmで走ったといわれています。1829年には当時開発されていた各種機関車の公開コンテストが行われ、ロバート・スチーブンソン(ジョージ・スチーブンソンの息子)のロケット号が時速56kmで勝利を収めたといわれています。

3.2 我が国の鉄道の発展と高速化^{7,11)}

我が国では1872年に新橋～横浜間に鉄道が開通し、その後東海道線(新橋～神戸間)が全通したのは1889年でしたが、この時はまだ時速30.1kmでした。その後も鉄道は発展を続けましたが、第二次世界大戦で大きな被害を受け、機材も基礎構造物も荒廃しました。鉄道復興への努力の中で新しい挑戦が行われたのは、1950年から運行開始した「湘南電車」

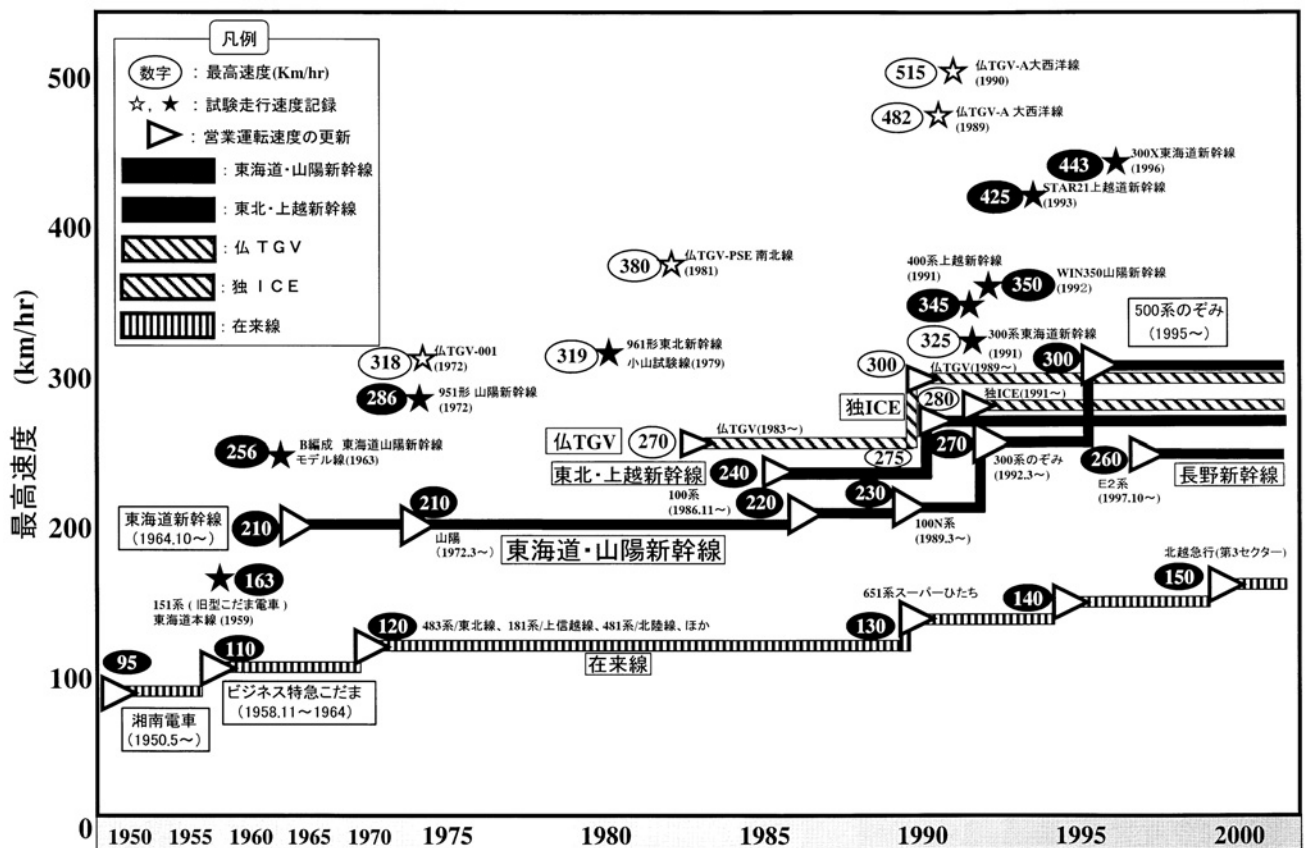


図2 世界の主要な高速鉄道のスピードアップの推移^{5, 6, 7, 8)}

でした。狭軌の16両編成で2時間半も連続して走る初めての電車列車として、後の新幹線につながる長距離電車列車の可能性を世界に示しました。しかしこの時でもまだ時速95kmでした。さらに1958年に狭軌のビジネス特急「こだま」が時速110kmで運転を始め、東京～大阪間の日帰り往復を可能にしました。1959年にはこの車両を使ってスピード記録に挑戦し、狭軌世界最高速の時速163kmを達成しました。そしていよいよ1964年に東海道新幹線が時速210kmで開通し、それ以後の目覚ましいスピードアップへとつながり、現在最も速い「のぞみ」では時速300kmで走れるようになりました(図2)。

3.3 新幹線の安全性

日本の新幹線は世界の高速度鉄道の先駆者となったばかりでなく、世界の鉄道の復権に大きく貢献しました。しかも、開業後の新幹線は乗客数がGDPの上昇とともに増加の一途をたどり、欧米諸国では見られない超過密ダイヤで運行されているにもかかわらず、きわめて高いオンタイム率を維持するとともに人命にかかわる車両事故が開業以来いまだに皆無という極めて高い安全性を誇っています(図3)。これはかつて、新幹線の実現を目標に置いた先述の「湘南電車」や「ビジネス特急こだま」などの長距離電車列車実現への挑戦の時代から、今なお発展を続けている「今日の新幹線」に至るまでの事業主体である旧国鉄、現在の各JRはもちろん、鉄道車両およびその部品メーカー、架線・レール・軌道・トンネル・橋梁などの構造物や列車運行制御システムなど、さまざまな分野の設計・製造・施工・運用・メンテナンスに従事する人たちが永年にわたりそれぞれの持ち場で安全確保に向けた努力を繰り返し積み重ねてこられた結果に他なりません。

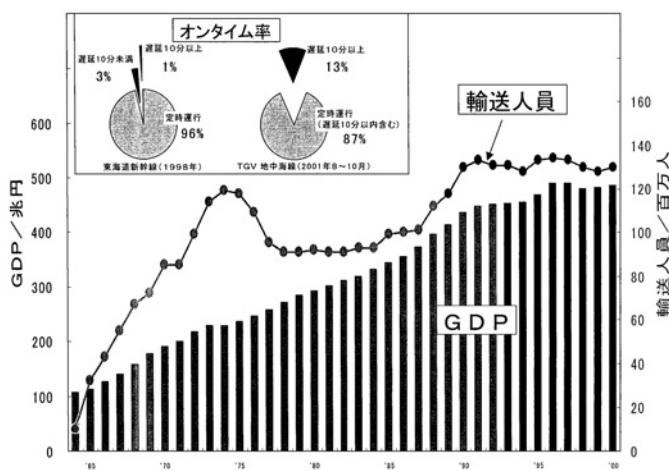


図3 東海道新幹線の輸送人員推移^{12, 13)}とオンタイム率^{12, 14)}

4 車輪・車軸の生産技術と製品技術の開発・改善の歴史

鉄道の初期における車輪・車軸の歴史については紙面の都合で省略し、第二次世界大戦後の生産技術と製品技術の進歩発展と製造設備や機能評価設備の充実について述べさせていただきます(図4)。

4.1 車輪の製造工程(鍛造・圧延と熱処理)

鉄道車両用車輪については磨耗したら取り替えることができる鋼のタイヤを輪心に焼き嵌めする「タイヤ焼き嵌め式車輪」が永らく使われてきましたが、車輪の使用条件が高速・高荷重・高制動と過酷になり、タイヤの弛緩や割損の危険が増したため「一体車輪」化のニーズが高まり、1959年に住友金属では一体圧延車輪製造設備を設置しました。

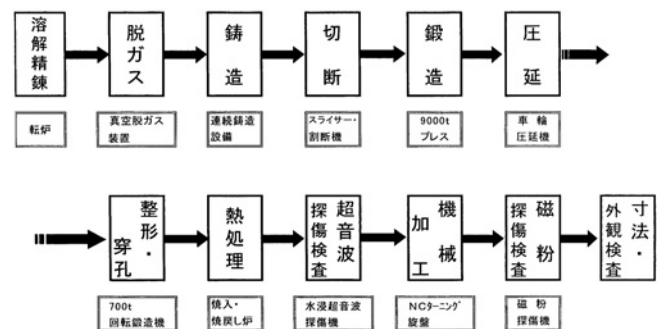


図5 車輪の製造工程

この工場は現在でもわが国の鉄道車輪を100%製造しています。設備構成は鋼片切断機、回転炉床炉、粗鍛造2工程プレス(9000トン水圧プレス)、圧延成形機(ホイールミル)、SIRD(Sumitomo Inclined Rotating Dies)整形プレス、徐冷炉、機械加工設備等で、円柱状の鋼片から一挙に車輪の形を作ることができ、特徴のある熱間成形機が揃っています(図5,6)。9000トンプレスとホイールミルは当時ドイツのシュレーマン社から導入したのですが、その後改良に改良を

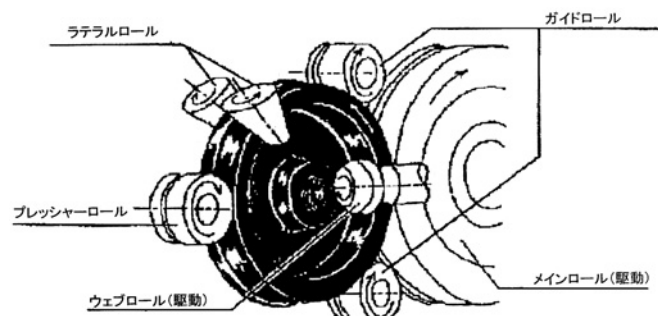


図6 車輪圧延成形機(ホイールミル)の概念図

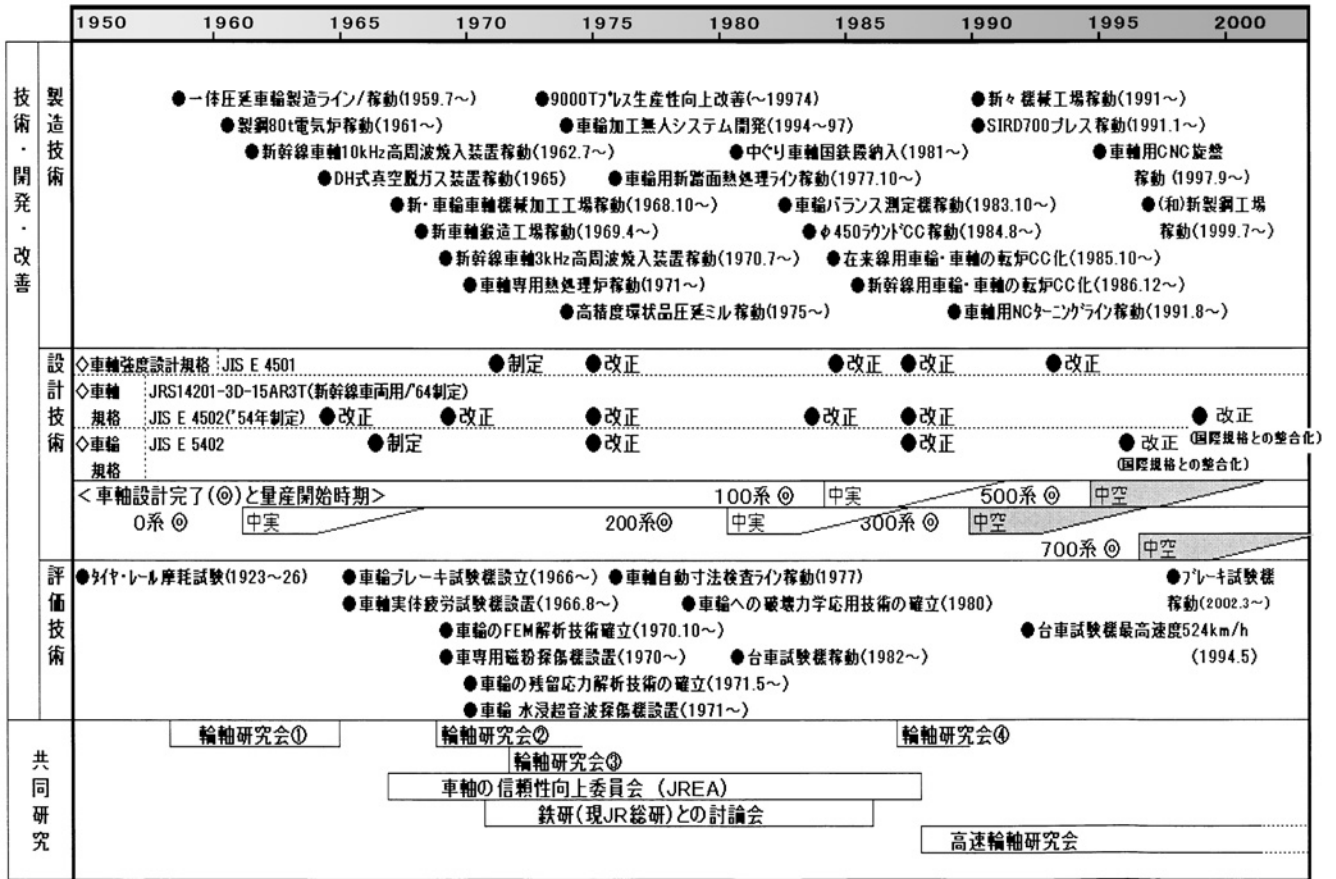


図4 車輪・車軸に関する開発・改善の歴史

重ね現在ではオリジナルの部品はほとんど残っていません。

SIRD プレスは車輪の寸法精度を向上させるとともに、車輪の機能向上のために車輪ディスク部(板部)の形状を設計的に工夫し複雑化した形状の車輪を実際に商品として具現化するため、住友金属が独自に開発・設計・製作し、従来使っていた2000トン+1000トンの水圧ダブル・アクティング・

プレスに置き換えて設置したものです(図7)。とにかく1959年の設備の誕生で国内の車輪の一体圧延車輪化が進み、1960年には新造の客貨車用にはタイヤ焼き嵌め式車輪の新製がなくなり、1969年には外径1120mmの機関車用車輪も一体圧延で作られるようになり車輪の安全性が高まりました。

ほとんどの車輪はレールと接触する踏面に熱処理が施されます。踏面は焼入れ焼戻しされた硬い組織が必要であり、ディスク部は靱性に富む焼準組織が適しています。車輪円周に沿った均一な組織を得るため、1977年に設置された車輪自身が自転と公転をしながら焼入れ前加熱をされる独特の回転炉床炉や、車輪のリム部・ディスク部の残留応力のバランスが最適となるように調整冷却できる焼入れ機等の特徴のある設備が揃っています。

4.2 車軸の製造工程(鍛造と熱処理)

車軸については従来ビレットを主としてハンマーで鍛造後機械加工して作られていましたが、1969年住友金属ではNC制御により高圧下で高精度の熱間鍛造ができ、しかも生産性の高いGFM社の高速精密鍛造機を導入しました。精密鍛造をすることで車軸材としてより良好なメタルフローを得るとともに、熱間鍛造・徐冷・熱処理の各工程を通して曲がり

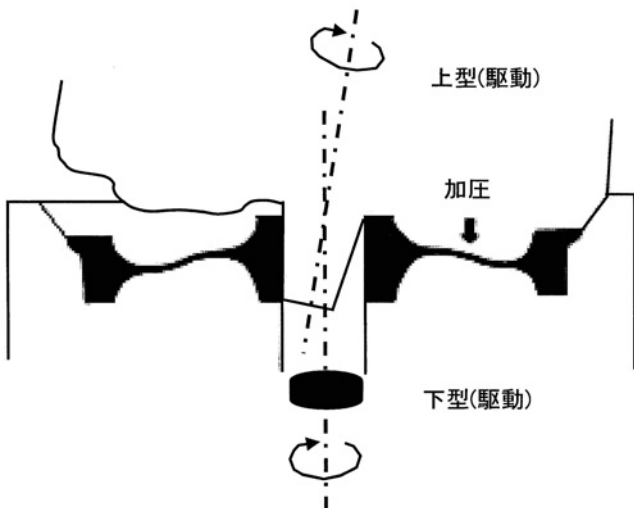


図7 車輪整形・SIRD プレスの概念図

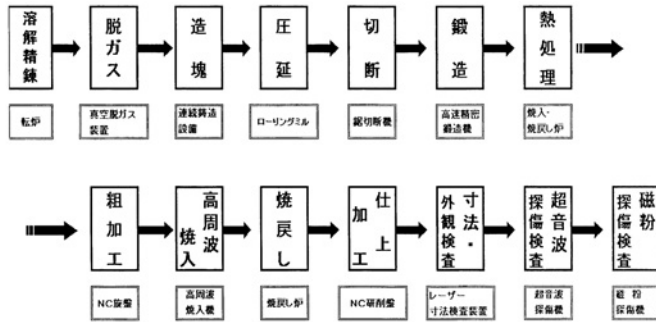


図8 新幹線用車軸の製造工程

少なく、機械加工代の均一な車軸が出来るような工夫が織り込まれた設備に一新されました(図8)。

4.3 高周波焼入れ車軸の開発

車軸について特筆すべきは車輪圧入部で低下する車軸輪座部の疲労強度を高める高周波焼入れ技術の完成です。この技術研究のスタートは1947年に遡り、1949年に電機子軸の折損対策として適用され、1950年に高周波焼入れ車軸の実用化研究として本格的に開始されました⁶⁾。1961年には貨車、電車、電気機関車に高周波焼入れ車軸が試験投入され現車試験が始まりました⁶⁾。そして1962年には住友金属に10kHzの本格的な高周波焼入れ設備が設置され、1964年開業の新幹線用車軸に全面的に採用されました。高周波焼入れ部の高硬度・高強度組織が疲労損傷を防ぎ、表面付近の大きな圧縮残留応力がその進展を抑制するというものです。更に1970年には3kHzの高周波焼入れ設備に更新されて、より深い硬化層とより大きな圧縮残留応力が得られるように改善されています。

この他、設計的な面で車軸の輪座部に圧入される車輪のボス端部を輪座部からオーバーハングさせて応力分布の改善を

図る¹⁵⁾などの工夫もあいまって、軽く、細く、強い車軸の脚注設計・製作が可能となり、車両のばね下重量を軽くして高速走行を可能にすると同時に車軸の安全性を大きく高めました(図9)。

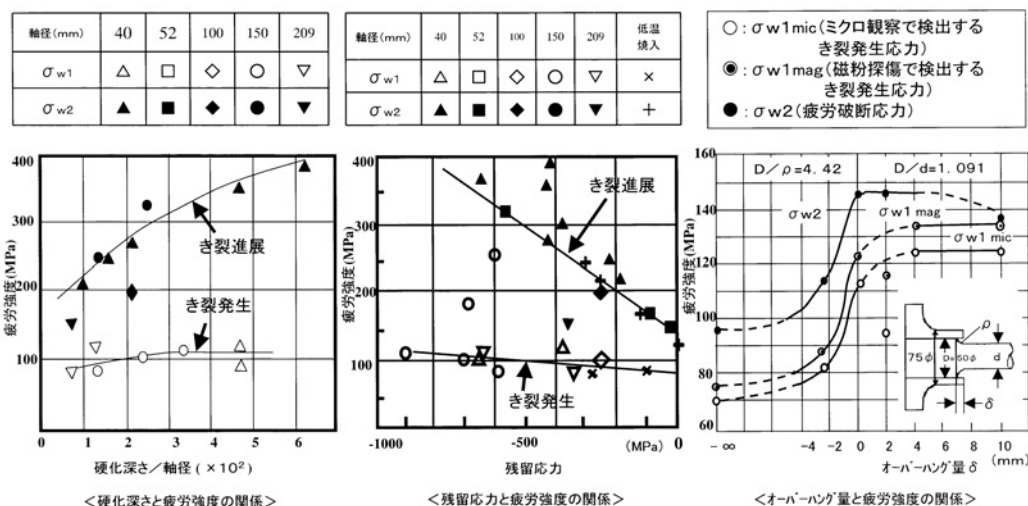
4.4 車輪・車軸の機械加工・検査設備

車輪・車軸の鍛造・圧延に続く機械加工・検査設備についても数次にわたり最新の工作機械や検査装置に置き換えられています。1968年には車輪・車軸の機械加工・検査、輪軸組み立て設備を集約し一貫生産ができるようにしました。その後も車軸の最終仕上げの研削盤に研削中の異常検出・記録装置を設置したり、車軸の更なる軽量化のために中空車軸(中ぐり軸)の加工設備やレーザー光を使った車軸の高精度寸法検査装置、車輪円周方向のアンバランス測定機の導入など客先のニーズに合わせて設備を増強しています。更に、1991年から再度、車輪・車軸のNC、CNC工作機械の最新鋭化・集約と車輪鍛造・圧延・熱処理工場と機械加工工場とを隣接化・一体化して一貫管理を強化しています。

4.5 車輪・車軸の材料

材料について述べますと、車輪には従来電気炉で溶製した2～3トンの小型丸断面鋼塊が、車軸にも電気炉溶製の6.5トンクラスのインゴットを分塊したビレットが使用されていましたが、車輪では1984年住友金属和歌山製鉄所で450mm外径のラウンドCCができるようになり、矩形の大断面のブルームCCからの分塊ビレットが使える車軸とともに、1985年には在来線の車輪・車軸が、1986年には新幹線用車輪・車軸についても客先から承認されて、転炉CC材へ全面移行となりました。

新幹線用車軸は仕上げ加工後の磁粉探傷検査において厳し


図9 高周波焼入れ・形状改善と車軸疲労強度の関係¹⁵⁾

い判定基準が要求されたため、かつての電気炉溶製の材料も特別に良質のスクラップを配合し、精錬についてもAl・Ti複合脱酸、DH処理、Arシール casting など当時としては最高の配慮の結果、清浄度のレベルは現在の転炉CC材と比べてもほとんど遜色のないものでした。

一方、車輪については通常の電気炉溶製・小型インゴット casting 材であったため、転炉CC化により大幅に清浄度が改善されました。これは最近の米国鉄道協会の調査で各国の車輪が比較されているのを見ても、住友金属の転炉CC材製車輪の清浄度は群を抜いており、米国における車輪の使用条件の過酷化に伴い、損傷の起点となり得る介在物の規制を強化しようという動きの中で高い評価を受けています(図10)。

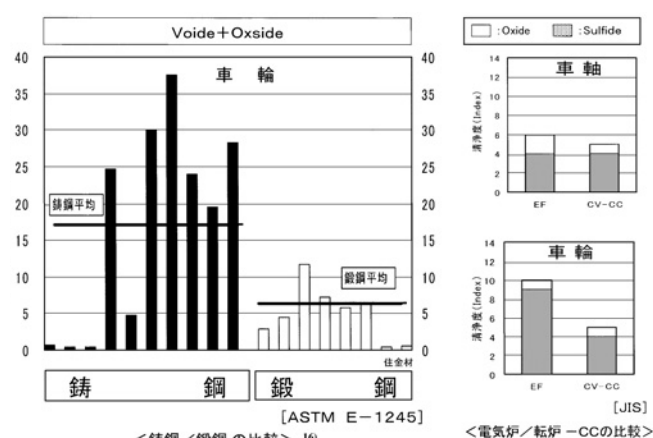


図10 車輪・車軸の清浄度比較事例¹⁶⁾

4.6 車輪・車軸の高性能化とその評価

車輪・車軸の製造に関してはシミュレーションを伴った設計力と、設計されたものの機能を実物で確認するという過程が欠かせません。さらには実車試験あるいはそれに準じた大型模型での長期にわたる試験による確認が必要です。

車輪については古くは1926年にタイヤの材質規格制定のため住友金属で大掛かりな実験が行われています。工場の構内に直径24mの円形の軌道を設置し、山手線を模した車両でレールと車輪の材質の組み合わせを色々変えて長期間走らせ、両者の磨耗量を測定しています。その結果は当初の予想に反して、タイヤの炭素含有量を上げるほどタイヤばかりでなくレールについても磨耗量が減るというもので、タイヤ材質規格制定の根拠となりました。

近年、車両のスピードアップや運行の過密化等により、車輪はレールとの摩擦に耐えて車体を支える機能に加え、ブレーキドラムとしても使用条件が過酷化しています。住友金属では1966年に実物大車輪のブレーキ試験機を設置し、車輪の形状や材質、ブレーキ条件や冷却条件を変えて試験をし、車輪が受けるダメージや残留応力の蓄積を測定することで事

実をつかむとともにFEM、破壊力学を応用して解析した結果と対比して精度アップを図り、的確に設計にフィードバックできるようになっています。この試験機を活用して、米国における貨車用車輪の使用条件の過酷化に対応、すなわち過酷なブレーキ条件下でも残留応力の蓄積が軽減できる低応力設計車輪(ハイトフネス車輪)を開発し、米国鉄道協会の車輪規格改定の一助となっています。また、この試験機では新幹線のように踏面ブレーキを使わず、車輪のディスク部にブレーキディスクを装着して制動するタイプのものについても試験が可能であり、近年車両の高速化・高制動化のニーズの高まりから車輪およびディスクブレーキの試験が増加していることから2002年3月に増設されています(図11)。

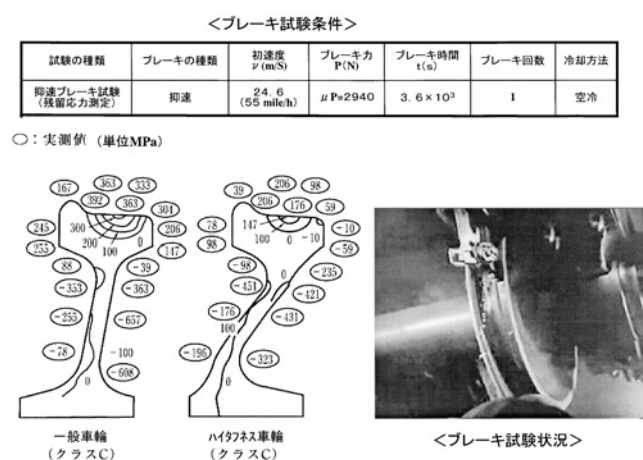


図11 一般車輪とハイトフネス車輪の残留応力比較¹⁷⁾

車軸の車輪圧入部の疲労強度に関する研究は古く1933年に始まっています⁶⁾。1947年には圧入部の疲労強度向上策として高周波焼入れの研究が開始され、1949年には直径50、100mmの縮小サイズで車軸での試験が可能な疲労試験機が製作されました⁶⁾。1952～53年には現車における車軸応力の測定方法も開発され、1958年にはビジネス特急「こだま」や寝台特急「あさかぜ」で大規模な車軸の応力測定が東京～大阪・博多間で行われました⁶⁾。また、1965～66年には鉄道技術研究所と住友金属に実物大の車軸に車輪を圧入した輪軸の疲労試験機が設置され⁶⁾、新幹線開業前の車軸の寸法形状や高周波焼き入れ仕様の決定や、その後のスピードアップを伴う新形式車両での車軸の設計、或いは定期的な品質管理データを蓄積するために大いに活用されてきました。スピードアップに伴う設計条件の変更で欠かせないのは車両の走行速度によって大きく変わる上下および水平方向の振動加速度的値です。1960年、当時国鉄の架線試験車による時速165kmの試験で求められた値が後の新幹線車軸設計の参考値になりました⁶⁾。これを基にして、スピードアップが計画されるたびに先行して実車試験を積み重ね、その試験結果を

基にJIS (JIS E4501 車軸の設計方法) の改定という形で上下および水平方向の振動加速度の値を見直し、新形式の新幹線車両の車軸を設計してきました。新しく設計される車軸は試作段階で実物の車輪を圧入した輪軸状態で実体疲労試験機による回転曲げ疲労試験が実施され、疲労強度が確認されます。また、鉄道会社側でも定期的な台車分解検査や車両の全面検査で車軸輪座部の磁粉探傷検査を行い疲労損傷がないことを確認しているのに加え、必要に応じ試験車両を走らせて車軸に発生する曲げ応力を実測して計算値と対比することで安全を確認しています。

車軸に車輪を圧入した輪軸は台枠に組み込まれ、ばね系、駆動装置、電動機、ブレーキ装置などが取り付けられ台車となります。そもそも車輪・車軸は台車の一部品であり、台車の構造・出来栄やその上にある車体の荷重アンバランスなどの影響を受けるとともに、レールや軌道の状態によっても影響を受ける、いわば、車両と軌道の境界領域の部品です。住友金属は車輪、車軸ばかりでなく台車そのものも設計・製造しており、実物大の台車の走行シミュレーションが可能な台車試験機も1982年に設置しています。これは大型の軌条輪(レールに相当)の上に台車を載せ、高速走行したときの台車の挙動を確認することが主目的ですが、軌条輪と車輪の相互挙動もモニターできるようになっています。現在、新幹線の営業運転の最高速度は時速300kmですが、試験車両による現車試験としては1996年JR東日本の300Xが時速443kmを記録しています⁸⁾。この台車試験機ではそれより前の1994年に時速524kmの走行試験に成功しています。

5 車輪・車軸の安全と技術倫理

車輪・車軸は鉄道が開発された当初から最重要保安部品でした。近年、世界的に旅客列車の超高速化が進み、貨車も大型・高積載化され、一度事故が起ると乗客・乗員や機材・積荷などの被害はもちろんですが、大量の危険物を積んで人口密集地域を通過するような場合は特に、その地域社会の安全や環境への影響が計り知れない大きなものとなります。一昨年のドイツ国鉄の超特急ICEが脱線転覆事故で多数の死傷者を出した例や、米国におけるLPGのタンク貨車が脱線転覆して周辺の町が大火災にみまわれた例を見ても明らかです。

私は住友金属に入社以来、常に諸先輩から「人命をあずかる大切な品物を作っていることを忘れるな」ということを繰り返し教え込まれてきましたし、後輩の人たちにもこれを引き継いできたつもりです。即ち、「製品の品質の安全」、これは言うまでもありません。次に「設備の安全」、大きな設備故障で長期間生産が休止するようなことになれば日本の鉄道が麻痺しかねません。そして3つ目が「人の安全」、従業員

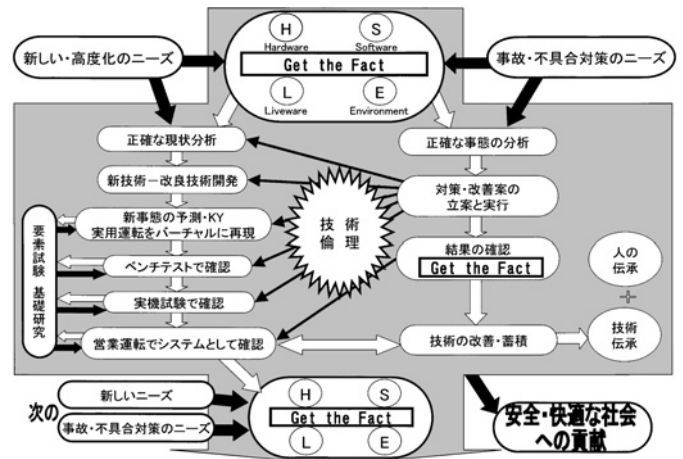


図12 技術者の使命と新技術開発のフロー

が怪我をするような職場で作られた製品が安全である訳がありません。ゆえに、この3つの安全を強調してきました。

最近リスクマネジメントという言葉がよく使われます。確かに人の作るもので100%完全なものというのは困難で、リスクをゼロにすることは不可能だと考えられます。ただそのリスクを限りなくゼロに近づけようと努力することは可能です。例えば、お客様のニーズを満足するために新技術の開発に取り組む場合、一般的に新しい技術には未知の問題や解決困難な課題が包含されることが多いのですが、こうした開発に取り組むことこそが技術者の使命であると思います。そうして開発や実用化の過程で次々と現れてくるこれらの課題を一つ一つ解決し、バリエーションを取り除いていく過程の中でその技術はRefineされ安全度を増すのです。しかもお客様のニーズには必ずタイムリミットがあります。時間がない。そこで課題解決の手を緩めることなく、手を抜くことなく、如何に早く基礎研究に立ち返って課題を解決し、如何に早く元の技術開発のスケジュールに戻すかが成否を分けるのです。ここは開発マネジャーなり、開発担当者なりの「人」が判断するところであり、技術者の良心に基づいて行動する「倫理観」が必要かつ重要です。これは新技術開発に限ったことではありません。ものづくりやメンテナンスの現場でもお客様の安全を確保するということは、リスクマネジメントの中でどれほどのリスクを許容するか、或いはコストマネジメントの中でどれだけのコストアップを許容するかとの葛藤になります。ここでも判断をするのは「人」です。矛盾と対決しながら、技術者として正しい判断をしなければなりません。しかも目先のことだけではなく、将来も含めて公衆の安全を最優先に考えて正しく判断し行動する「技術倫理」が必要不可欠です(図12)。事故は時間差を置いてやってくるからです。しかも組織の中で技術者は個人で仕事をするのは極めて少なく、チームを組んでその一員として仕事をするのが多

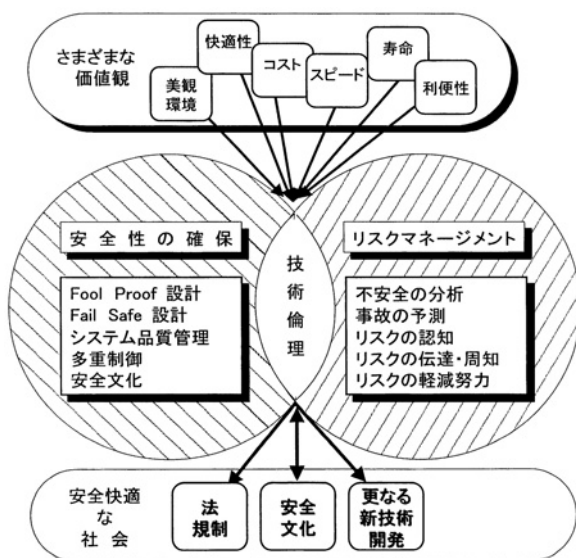


図13 製造業の技術倫理

い。このチームそのものが、さらに組織そのものが「倫理観」に基づく正しい判断と行動ができなければなりません。このことは一朝一夕で出来るものではありません。時間をかけて育て上げ、組織の風土として培われなければなりませんし、ためめ技術開発の連続という試練の中で維持され洗練されなければならないのです(図13)。

6 おわりに

鉄道車両の高速化と車輪・車軸の改善の歴史、その安全を守る倫理観について、鉄鋼材料との関わりをまじえながら申し述べてきました。21世紀に入り、交通機関は「省エネルギー、地球環境対応、快適性の追及」といったニーズへの対応が進む一方で、高速化も進み、安全の確保が益々重要になって来ると思われます。それらのニーズを満足するための新たな技術発展への鉄鋼材料の貢献を願うとともに、倫理観に基づいた正しい判断と行動が望まれるわけであります。産業の各分野で技術開発と課題解決に懸命に努力しておられる技術者の皆様に、本稿が何かお役に立てば幸いです。

最後になりましたが、日本鉄鋼協会が産官学の英知を結集

した「Center of Excellence」として益々発展することを切に希望致します。

参考文献

- 1) 鉄鋼統計要覧, 日本鉄鋼連盟
- 2) 自動車統計年報, 日本自動車工業会
- 3) 停車場変遷大辞典 国鉄・JR編, JTB出版, (1998)
- 4) 造船統計要覧, 運輸省船舶局
- 5) 田中真一: 鉄道の高速度化—歴史と課題, 機械学会総会特別講演, (1989)
- 6) 中村宏: 物と事と生の研究史 新幹線台車・金属疲労寿命・生命観, 永田文昌堂, (1997)
- 7) 小野純朗: 鉄道のスピードアップ, 日本鉄道運転協会, (1997)
- 8) 世界の高速鉄道, (株) グランプリ, (1998)
- 9) 鉄道辞典 上巻, 日本国有鉄道, 財団法人交通協力会, (1958), 772.
- 10) 日本塑性加工 I 歴史と進歩, 日本塑性加工学会, 日青工業 (株), (1986), 371.
- 11) 高橋国吉: 新幹線をつくった男 島秀雄物語, (株) 小学館, (2000)
- 12) 35-Years History of Safety, 東海旅客鉄道
- 13) 内閣府 経済社会総合研究所ホームページ (URL: <http://www.esri.cao.go.jp/index.html>)
- 14) La Vie du Rail, Nov.14, (2001)
- 15) 外山和男, 井上純: 新幹線電車用車軸の疲労安全性評価と30年の実績, 住友金属, 48, (1996) 2.
- 16) Daniel H. Stone, Geoffrey E. Dahlman: THE EFFECT OF DISCONTINUITY SIZE ON THE INITIATION OF SHATTERED RIM DEFECTS, RTD-Vol.19, Rail Transportation-2000, ASME, (2000)
- 17) 鈴木滋, 濱崎敦, 戸谷靖隆, 中瀬和夫, 平川賢爾, 坂本東男, 外山和男: 最近の鉄道用車輪について, 住友金属, 33, (1981) 3.

(2002年3月25日受付)