

平成15年10月30日(木), 31日(金)の2日間, 職業能力開発総合大学校において第11回職業能力開発研究発表講演会が, 「創造性の向上を目指した職業能力開発」をメインテーマに開催されました。本号では, 「特別講演」および「研究発表」を特集して紹介いたします。

特別講演

# ドイツ新幹線事故の真相 — ものづくり技術者の責任 —

九州ポリテクカレッジ 校長 平川 賢爾  
(九州職業能力開発大学校)



### 1. はじめに

本日は, 「ドイツ高速鉄道事故の真相—ものづくり技術者の責任—」というタイトルで講演をいたします。話の前に, この事故で亡くなった101名の方々のご冥福を, 改めてお祈りしたいと思います。亡くなった方のためにも真相を明らかにする必要があると思います。それでは, スライドを用いてお話を進めてまいります。

#### 1.1 ドイツ鉄道事故の概要

1998年6月3日に14両編成のドイツ高速鉄道ICE-1が時速200km/hにて, ミュンヘン~ハンブルク間を走行中, エシエテ駅の手前550mにて脱線し, 跨線

橋の橋脚に激突して, 101名の死者と105名の負傷者をもたらす大惨事になりました。

事故後の救援活動状況です。列車がくの字に折れ曲がっており, 跨線橋が崩れ落ちているのと, 事故の後に救援に向かった赤い服を着た人が見えます。

私は, 1998年11月ドイツ鉄道会社(当時ドイツ国有鉄道)から, この刑事裁判において専門鑑定人として出廷し, 中立・公正な立場から証言することを求められました。それ以後, ドイツ鉄道の視察や国内で, 実験・計算・解析など多くの研究を行いました。2003年1月15日からドイツのハノーバーの地方裁判所で行われた延べ25回の裁判に出廷し, 朝の9時から夕方の5時, 6時まで陳述なり反論なりを行



いました。13人の専門鑑定人という方が同じ席におりました。そのなかに検察側の鑑定人としてドイツの有名な教授陣7名がいました。

事故で死亡した人のなかにはドイツ鉄道の方もたくさんおられて、ドイツ鉄道のなかにもこの事故に対して多くの非難の声があったようです。そのために私が専門鑑定人としてドイツの鉄道の視察に参りましたが、ドイツ鉄道の社員には知られないように、必ず土曜、日曜の休日に工場見学や質問をさせていただいたわけです。

ドイツの地方裁判所は、正面に裁判長、その左右に裁判官が2人並んでいて、その外側に陪審員が2人います。ドイツは、陪審員が2人なのです。アメリカでは陪審員は12人の州が多いようですが、2人でした。検察側が右端にいて、弁護団が左側に並んでいます。われわれ鑑定人はその真ん中に座席がありました。検察側のドイツの教授陣と、弁護側といますか、ドイツ鉄道側に依頼された専門鑑定人は、日本からの私とスウェーデンやスイスなどの外国の教授たちと1名のドイツの教授でした。

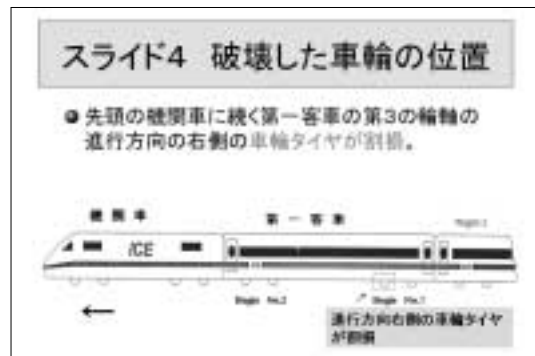
事故が起きましたICE-1というドイツの高速鉄道ですが、これは1991年8月に時速280kmの最高速



度が認可されて、16両編成で走っております。ドイツの鉄道の特徴ですけれども、日本と違いまして、前後の先端に機関車があって牽引する構造で、客車はモーターがなくて牽引されるトレーラーカーです。14両の客車と機関車の16両編成なのです。ただ、事故が起こったときには14両編成で走っていたそうです。



この鉄道路線の青い線で示してあるミュンヘンからハンブルクまで行く路線の高速鉄道です。エシェデ駅がハノーバーとハンブルクの間にあります、ここで事故が起きました。



破壊した車輪は、機関車の次の1番目の客車の後方の台車に付いている車輪です。枕木と軌道を損傷

した痕跡から、エシェデ駅の手前5.5kmで破壊したものと推定されています。

ICEの1両の客車は2個の台車に支えられていますが、その台車の写真です。台車には4枚の車輪とブレーキディスクが4枚、前後に付いています。日本の新幹線と違って空気ばねを使っていません。

### 1.2 ゴム弾性車輪の導入



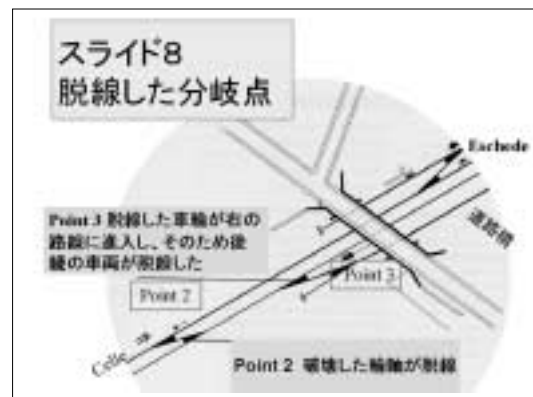
空気ばねを使っていないので振動、騒音が大きく、食堂車が特に揺れるということで、ドイツ鉄道の技術者は、事故の6年前にゴム付き弾性車輪という新型車輪を採用しました。日本やフランスの高速鉄道の車輪のように、普通の車輪は鍛造で作られた、全部が一体となっている一体車輪ですが、ドイツの技術者が考えたのは、ゴム弾性車輪といってゴムを入れた分割型の車輪です。車輪の中心部の円盤状のものを輪心といいます。その外側にゴム・ブロックを入れて、その外側にタイヤが嵌合されている構造です。タイヤには、曲線路を走行するときに脱線しないようにフランジがあります。

ゴム弾性車輪は、1992年にドイツ国鉄によって採用されました。ドイツ鉄道の技術者と車輪メーカーでは、最高時速285kmの走行試験や、3年間にわたって時速200kmでの走行試験もやっていますし、クルップとかエッセンでは実物のゴム弾性車輪で繰返しの荷重を加える疲労試験の結果、損傷のないことが報告されているわけです。6年間無事故で使用されて、約1,000枚の車輪が寿命を全うして廃棄されています。しかし、裁判では、これらの試験が十分であったかどうか論点の1つとなりました。

高速で走っていてタイヤが割損したため、事故現場にはこのように伸びきったタイヤがありました。



写真の上部が破損した車輪タイヤの断面ですが、専門の方は金属疲労だとおわかりだと思います。破面には貝殻模様があり、これは繰返しの荷重による疲労で壊れたということです。



すでに述べましたように、タイヤの破壊はエシェデ駅の5.5km手前で起こっていますが、その後5kmほどはタイヤがずれたまま輪芯でレール上を走行しています。この路線図にありますように、その後の走行でポイント2のガードレールに接触して脱線し、ポイント3で分岐機を破損して方向を切り替え、待避線側に逸れて進行しました。不運なことに、そこに跨線橋があったために、4両目の客車はその橋脚に激突し大惨事になったのです。5両目は落下してきた200tのコンクリートスラブに押しつぶされました。

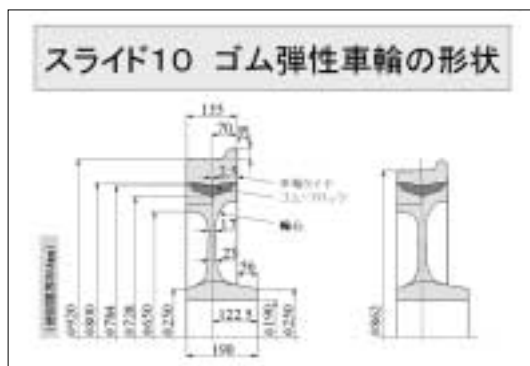
先頭の機関車は橋脚の間を通り抜けていってしまったものですから、機関車の連結器が自動的に外れて2kmほど進んで、機関車の運転士が振り向いたら、だれもついてこないのびっくりしたということがいわれております。前後の機関車の損傷はほとんどなく、再使用されています。

### 1.3 車輪タイヤの破壊状況



事故原因は車輪タイヤの破壊であったといいましたが、これがその破断面の写真です。破断面には明瞭な貝殻模様が見られ、典型的な疲労破壊の破面です。疲労破壊というのは、荷重が繰り返されてひずみが繰り返されると、そこに小さなき裂ができて、そのき裂が半円状に進展していくのですから、貝殻模様はその進んでいった痕跡です。貝殻模様の外側のフランジには貝殻模様と違って、ボツボツがあるように見えます。これは脆性的に壊れた面で、最後はこの部分だけで荷重を支えて走ったわけです。それで、ある大きな荷重に耐えられずに衝撃的に、一瞬にここから壊れたということです。このように貝殻模様になるのは、それぞれで繰り返された荷重の大きさが違うためにき裂の進行速度が違って、そのために酸化の程度や、破断面の粗さが違うから貝殻模様になるわけです。ですから、通常、荷重振幅が変動する実物部材の破壊は貝殻模様が出ます。われわれが疲労試験機で一定荷重振幅のひずみを繰り返しますと、貝殻模様にはなりません。

ゴム弾性車輪の形状です。新製時にはタイヤの直



径は920mmですが、走行によって摩耗していき、タイヤの厚さは減少していきます。また、摩耗が進みますとフランジなどの形状が変化しますので、走行性能の点から形状を整えるために削正します。どこまで摩耗して使用可能かという使用限界というのが854mmです。この使用限界を決定するのも設計に当たって重要な仕事です。854mmになったときのタイヤの応力を解析・実験して、安全性を確認する必要があります。事故時のタイヤはすでに4回削正されていて、直径は862mmでした。

また、2万4,000km走行ごとに超音波探傷試験によって、き裂がないことを確認するための保守、点検をすることになっていました。

事故の後で使用限界を880mmにしてゴム弾性車輪を使用することが検討されましたが、やはり一体車輪に全部取り換えて運行再開をしています。事故が起こったのはICE-1ですが、ICE-2というのが1997年に出ました。これには日本の新幹線のように空気ばねを採用して、しかも車輪は一体車輪です。ですから、6年間にわたってドイツではゴム弾性車輪が使われたのですが、現在では過去の車輪となりました。

### 1.4 ドイツ鉄道技術者の信念

事故の5日後の1998年6月8日にドイツの運輸大臣が、新聞・テレビで「ただ一度の重大事故は、技術の革新の流れを押し止めることはあり得ない。高速鉄道は、それでも他の輸送機関に比較すれば安全である」ということを述べています。ゴム弾性車輪という新形状車輪を高速鉄道に採用するということにも、ドイツ鉄道技術者の技術に対する自信を感じますが、この大臣の発言にも、ドイツ人の技術革新



に対する信念を感じました。

1998年にはICE-3 がデビューして時速300kmで走行しています。これは日本と同じように機関車方式でなく、全車両がモーターカーです。このように、ドイツ鉄道の技術陣は、事故にもくじけずどんどん革新を進めていったということです。

## 2. 刑事訴訟の概要

### 2.1 技術者の責任

#### (1) 訴因

ドイツ鉄道の技術者2名と車輪メーカーの技術者1名が、殺人罪で告訴されました。

**スライド12 技術者の責任(1)**

- ICE884の1986年6月3日の事故はゴム弾性車輪の破壊が原因である。
- 車輪タイヤの破壊は、タイヤ内面の最大応力が発生する場所を起点とする典型的な疲労破壊である。
- タイヤは製造時の直径920mmから862mmに減少しており、動的応力と繰返し数(1900万km)は疲労強度を超えていた。

その結果 ↓

過失によって101名の死亡をもたらした。  
過失によって105名の負傷をもたらした。

告訴された原因、すなわち技術者の責任について説明します。この事故はゴム弾性車輪のタイヤの破壊が原因であること。タイヤの破壊は、荷重に対して最も大きな応力の発生するタイヤ内面を起点とする典型的な疲労破壊であること。タイヤ製造時の直径920mmから862mmに減少していて、その使用期間中の繰返し応力の大きさと、1,900万km走行していますから1億回以上の繰返し回数は、疲労強度を超えていたこと。材料は、もともと疲労強度という強さを持っているわけです。それを超える荷重と回数がかかったといっているわけです。その結果、過失によって101名の死亡者と、105名の負傷者を出したということが訴因です。

#### (2) State of the Art

1992年にゴム弾性車輪を導入するのに、「当時の技術水準 (State of the Art)」に従って十分な強度解析を行わなかったということです。私は、20年近くも前に、アメリカにおける鉄道車輪の事故の裁判に証人として出廷しましたが、そのときも、「当時の技術

**スライド13 技術者の責任(2)**

当時の技術水準 (State of the Art) にしたがって十分な強度解析を行わなかった。

- さらに、一体車輪と異なってゴムとタイヤ内面の摩擦 (Fretting) により疲労強度が低下していたのを考慮しなかった。
- タイヤ内面の定期的なき裂の検査と検出を行わなかった。

水準の設計」ということが問われました。「当時」というのは、製造したときではないのです。事故が起こる直前までなのです。ですから、技術者は設計・製造してうまく走っているからと安心したらだめで、技術が進歩したら改良をしなければならないということです。

#### (3) フレッシング疲労

**スライド14 フレッシングによるピットの形成**

図14 フレッシングによるピットの形成

(a) 金属粒子

(b) 車輪縁の磨耗と応力

(c) 応力のばらばらへの粒子の侵入

(d) Fretting によるピットの形成

これもちょっと専門的になりますが、金属と金属が接触していて繰返し荷重を受けると、そこで摩擦します。摩擦すると、表面に凹凸ができます。これが原因となって強度がどんどん下がっていくわけです。これをフレッシングといいます。フレッシングには、膝をかきむしるとか、あるいは退屈するとかイライラするという意味もあります。フレッシング疲労とは後で何回も出てまいります。摩擦が疲労強度を低下させるということです。ゴムの上にタイヤが乗っていますから、タイヤとゴムの間は絶えず摩擦が起こっているわけで、これが強度を低下させた。これをドイツ鉄道の技術者は考慮しなかったということが論点の1つになりました。

フレッシング疲労は金属疲労のなかでも特殊な金属疲労ですが、これは私が最も得意としたといい

ますか、35年以上にわたって研究をしてきた課題がこれであります。この裁判に出て初めて検察側の訴因の1つがフレット疲労であることがわかったのですが、私の土俵での論争になりました。

**スライド15  
技術者の責任(3)**

彼らの専門知識と経験および知りうる情報によって、被告らの疲労試験の数と繰返し数と試験荷重では、そのタイヤ厚さでは疲労に耐え得ることの証明にはならないことを知るべきであった。

フレット疲労をもう少し説明しますと、金属の表面は、どんなにきれいに磨かれていてもこのように凹凸があります。金属と金属が接触して、そこで互いに滑り、摩擦があると摩耗粉ができて、繰返し摩擦していると、金属の接触面には丸いくぼみができます。微小な振幅の滑りですが、そういうくぼみ、ピットといいます。できてきます。そのピットの影響で疲労強度が低下することが知られています。

そこで、被告らはこのフレットの影響を考慮していなかった、被告らの専門知識と経験および、知りうる情報によって、被告らの疲労試験の数や繰返し数と試験荷重では、そのタイヤの厚さでは、疲労に耐えうることの証明にはならない、ということドイツ鉄道の技術者は知るべきであったということでもあります。

#### (4) 動的荷重

被告は、State of the Art による応力計算と疲労強度の推定によって、摩耗限界が車輪直径880mmであ

**スライド16  
技術者の責任(4)**

- 被告は、当該時の技術水準による応力計算と疲労強度の推定によって、摩耗限界が880mmであることを、知るべきであった。
- 被告は弾性車輪の投入初期に、動荷重が予想以上に高いことを認識していたにもかかわらず、実際の動荷重スペクトルを求めなかった。

ると知るべきであった。862mmで壊れたのですが、880mmで取り換えるべきであったと、検察側の教授陣は証言しているわけです。

もう1つは、車両は走行中の振動や、ポイントとかカーブなどを通過することによって、車輪に加わる力が変動します。それを動的荷重といいます。そのスペクトルを求めなかったといっております。

**スライド17 技術者の責任(5)**

保守・検査基準

- 被告は1992年2月11日250,000km毎に超音波探傷試験を行うことに同意してにもかかわらず、適切な検査を行わなかった。
- 被告は弾性車輪の系統的な検査システムを構築しなかった。
- 被告AとBは弾性車輪の楕円度・偏芯度を的確に計測するための保守点検基準を作らなかった。
- 以上は、ドイツの刑法により、刑罰に値する過失を構成する。

被告は、1992年2月11日に、24万km走行ごとに超音波試験を行う、ということに同意していたのにやっていた。それから、系統的な検査システムを構築しなかった。被告AとBというのはドイツ鉄道の技術者ですが、弾性車輪の真円度、偏芯度を的確に計測するための保守、点検基準を作っていない。“以上は、ドイツの刑法により刑罰に値する過失を構成する”といわれて訴えられたわけです。

告訴状によれば、事故原因となった車輪の走行キロは188万9,000km、その間に4度削正されているのですが、最期の削正後の車輪径は865mmでした。

#### (5) 破壊原因

事故車輪は、Fraunhofer Institut Betriebsfestigkeit というドイツの中立機関の研究所、LBF（実動強度

**スライド18 車輪の破壊原因**

車輪タイヤは、Fraunhofer-Institut Betriebsfestigkeit (LBF) において調査された。

- 車輪タイヤの破壊は、ゴムブロックと接触するタイヤ内面の最も応力の高い場所に生じた。き裂の起点の位置は、ゴムブロックのほぼ中央である。
- き裂の発生した部分には、材料欠陥または製造欠陥は認められない。

の研究所)に持ち込まれて調査されました。

疲労き裂はタイヤ内面の最も応力が高い所から、すなわち荷重が集中する所から発生し、そこから繰返し荷重により疲労で進みました。これは大事な話なのですが、走査型電子顕微鏡で調べた結果では、き裂の発生した部分には、材料欠陥または製造欠陥がないということを検察は報告しております。私は、裁判に出る前は、きっと材料欠陥があったに違いない、あるいは、加工のミスであるとか、へこみがあるとか、そういうものがあるに違いないと思って出かけたのですが、これは「ない」という主張をしております。私は事故原因の1つに材料欠陥があると考えていたのです。

**スライド19 車輪タイヤの材質**

- 最終の検査による(1998年6月2日)車輪の直径は862mmであった。
- 車輪タイヤの材料はB5T(規格のC60)

化学成分 (WT%)					機械的性質		
C	Si	Mn	P	S	引張り強さ (N/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)	衝撃値 (KJ/m <sup>2</sup> )
0.52	0.30	0.30	0.015	0.015	820-840	14 (min)	75 (min)

車輪材料はドイツの規格ですが、炭素量が0.52%の炭素鋼です。炭素量がこのように高いということは非常に硬い、もろい材料であって、世界中の車輪というのはこのようなものでできております。引張り強さが820~840MPaという規格です。

これは、耐摩耗性と強度を考慮して歴史的に最適材料と考えられています。

材料の組織はフェライトパーライトで、これは普通の世界中の車輪の金属組織であります、組織も規格どおりだったということです。


(6) 多角形摩耗 (Out of Roundness)

事故の後、日本の新聞にも出ましたけれども、ドイツの車輪は真円でなくて楕円になって、車輪にかかる荷重の変動が大きくなったといえます。車輪が摩耗して楕円状になることは、日本の新幹線ではほとんどみられない現象ですが、ドイツでは軌道条件が日本と違うために、しばしばみられる現象です。

**スライド20 車輪の多角形摩耗**

- Out of Roundness はき裂の発生に関係しているとの専門家の見解があるが、保守・点検部門は乗り心地の観点から検査しているのみであって、き裂の発生と関係しているとの認識はなかった。
- したがって、保守の関係者の罪を問うことはできないので、これに関する調査は中止した。

新製時 0.1mm  
耐震限界 0.5mm



この楕円になる現象のメカニズムについては私の考えがあるのですが、ここでは説明する時間がありません。この問題は、裁判ではこういうことになりました。“楕円に摩耗したことは、き裂の発生に関連しているとの専門家の見解があるけれども、ドイツ鉄道の保守、点検部門は、乗り心地の観点から検査しているのみであって、き裂の発生と関係しているとの認識がなかった。だから、保守の関係者の罪を問うことができないので、これに関する調査は中止した”ということで、これは論争になりませんでした。新製時には、この振れが0.1mm以下で、0.5mmになったら作成するという基準があったようです。

2.2 検察側教授陣の鑑定

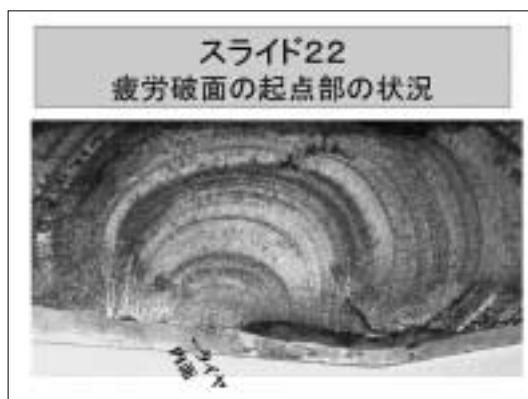
ドイツの検察がLBFに送った事故車輪に関する教授陣の鑑定書です。ドイツでも有名な教授達が(私も知っている方でしたが)、次々に陳述を行いました。その過程で私も絶えず反論をしたわけですが、激論になったり、あるいは私が発言すると検察は私に対して徹底的に尋問するような質問をしたりということで、朝9時から夕方6時、7時まで25回の激論をしたわけです。

裁判長は、その激論をする前にこう申しました。

**スライド21 裁判長の開始宣言**

- 内容に関係ないことは、述べないように。偽りの供述は罰せられる。
- 13人の専門家が、State of the artに従って陳述し、鑑定人によって理想的な議論ができるように期待する。フェアに議論してくれるように要求する。
- 皆さんが理解するのは難しいかもしれないが、用語もわかり易く説明してください。
- 国際輪軸会議のような審議は辞めてください。

「内容に関係のないことは述べないように、偽りの供述は罰せられます」と。「13人の専門家が当該時の技術水準に従って陳述しなさい。鑑定人によって理想的な議論ができるよう期待します。フェアに議論してください」と。この裁判長は、金属疲労というのは初めて聞くような話だと思いましたが、あるいは検察も弁護士もそうですが、驚くほど勉強をされておりまして、うちの学生みたいに日ごとに成長していくのです。びっくりしました。用語も難しい。先ほどフレットングといいましたが、これもちゃんと理解されていました。すごい裁判長だと思いました。頭のいい人がドイツにはいるな、と思った裁判長でありましたが、ともかくいい加減な判断はしたくないし、裁判が長引くのは難しいのだ、国際会議のような議論はやめてくれといいました。25回にわたって盛んに議論したのです。それでも専門家は細かい議論をしてしまいます。裁判は公開で行われましたので、BBCとかCNNの記者も傍聴にきていました。この日のドイツの夕刊には、「裁判長、専門鑑定人を叱りつける」との見出しの記事が出ていました。



検察側の教授陣は、フレットングによって疲労強度が下がっているのを、ドイツ鉄道の技術者は見逃していたのだと主張しました。私が裁判に出るまでは、検察は壊れた車輪を見せてくれなかったのです。裁判に出たら、裁判長の目の前に破断した車輪が展示してありました。初めてゆっくり見たのが、スライドにありますように壊れたタイヤの破断面とタイヤの内面です。この横に出っ張りがありますが、これはゴムが脱落しないようになっている突起です。疲労き裂の起点（矢印）がここにあります。下のタ

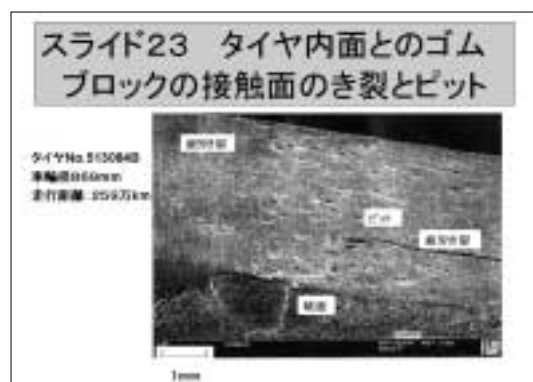
イヤ内面を見ますと、フレットングで摩耗した跡がありません。タイヤ内面は旋削していますが、その旋削跡がそのまま起点の所に残っているのです。フレットングの摩耗はないのです。

それで、「裁判長、私が見る限り、フレットングの影響で破壊したと、検察、あるいは検察側の教授は主張しているけれども、フレットングの損傷はここにはありません。それでもあるというのなら、教授は裁判長の前に私と一緒に出て、これがフレットングだといって指し示してくれ」と申し上げました。検察側の教授は立ち上がらないで、「フレットングはありません」と言いました。これで彼らの告訴した原因の1つがないのです。こういうことを平気で主張するのは許せないと思いました。

検察側の教授陣は、ベルリンからハノーバーまで飛行機で通ってくるのですが、土日に帰って、私の主張に反論する資料を持ってくるのです。私は日本に帰ってくる暇がない。だから、反論する資料も新たな計算もできないのですが、彼らは、研究所の教授陣が背景に控えているから有利です。

#### (1) 腐食疲労

フレットングが影響する疲労をフレットング疲労といいましたが、水中あるいは酸化雰囲気の中ですと腐食の影響を受ける疲労で、腐食疲労という現象があります。フレットング疲労とか腐食疲労というのは、金属疲労のなかのある特殊な分野です。腐食疲労やフレットング疲労は、部材が個々に持っている疲労強度よりもはるかに低い応力でき裂が発生します。通常、鋼は繰返し数が数百万回でそれ以上強度が低下しない疲労限度がありますが、フレットングや腐食の作用のもとでは疲労限度が





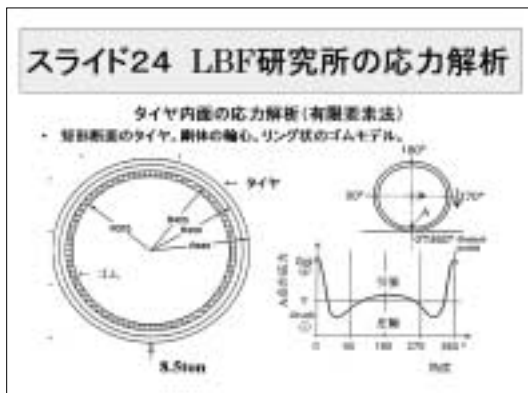
存在しない。1,000万回以上の応力繰返し数でも疲労強度が低下していくことが知られています。

その次の週になって、彼らは、検察の力を使ってドイツ鉄道から強制的に持ってこさせたかどうかは知りませんが、長期間使用された車輪の超音波試験データを持ってきました。このスライドは破壊した車輪とは別の車輪ですが、5個の車輪に超音波探傷でき裂が見つかりました。そのき裂の深さは1.4mmでした。だから、超音波探傷で1.4mmのき裂は見つけることができるという証拠にもしたかったのです。

1.4mmのき裂が超音波で見つかったという電子顕微鏡写真がこのスライドです。上半分がゴムと接触した面、下半分が強制的に破断した面です。深さ1.4mmという楕円状のき裂が見つかりました。ほかにも疲労き裂があります。ピットが見られます。

検察側の教授はこのスライドを見せて、これは典型的なフレット疲労の破面であると主張しました。フレット疲労というのは、フレット摩耗のピットに応力集中が生じ、そこに疲労き裂が発生します。これを見ると、疲労き裂の所にはピットがないのです。ですから、フレット疲労ではないのです。おそらく先ほど説明した腐食疲労だと思います。ゴムとタイヤの間に水が入って、そして腐食によって生じたピットの跡です。裁判長からの書面による質問に対して私は次のように答えました。「これはフレット疲労とは異なり腐食疲労だと考えられる。使用された何万個の車輪のなかの5個の車輪のタイヤとゴムの間に水がたまたま入ってこういうことが起こったのであって、しかも事故の車輪とは全く関係がありません」。

## (2) LBF研究所の応力解析と疲労強度評価



ドイツのLBF研究所においても応力解析が行われました。そのモデルがこのスライドです。設計時の車輪にかかる荷重、輪重8.5 tで計算をしているのですが、これをご覧くださいますと、フランジが付いていない矩形断面のタイヤです。すなわちリング状のタイヤで、内側にゴムがあります。ゴムも各ブロックではなくて、リング状です。輪心は剛体と仮定しています。このような仮定のもとに計算をしました。右側の図にありますように、車輪が一回転するとともに、タイヤ内面には荷重点直下ではまず引張りの応力がかかり、60度回転した場所で圧縮に、そして180度回転した所で引張りになるという繰返し荷重を受けています。応力変動の傾向は大略正しいでしょうが、単純な仮定で計算したためこの絶対値は問題があります。

当該車輪の静的輪重は8 tで設計しています。それに対して、実際の走行時の荷重は静的輪重より大きくなり変動します。変動が静的輪重の何倍になるかというのを動的荷重係数といいますが、ドイツの検察陣は、直線走行で1.8倍、ポイント通過時に2倍になるということをいっています。

そうしますと彼らの計算では、直線路ではタイヤに185MPa応力が、ポイント通過時には206MPa（キログラム単位では20 kg/mm<sup>2</sup>）となります。

スライド25 LBF 報告書 疲労強度の推定(まとめ)			
最大実働応力 (MPa) 車輪径858mm		疲労限度 (MPa)	
Static = 80kN	±110	Guideline	±90
直線路	±185	ORE Report	±112
曲線路	±145	LBF Report	±120
ポイント	±206		
ORE Load	±139		

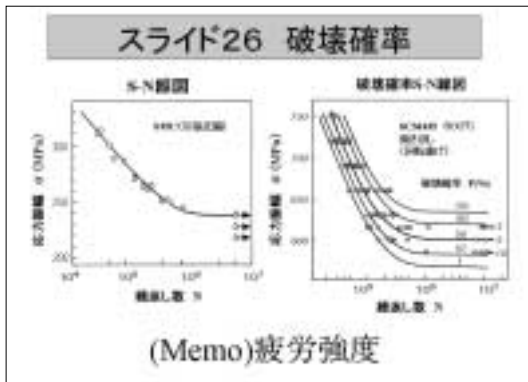
材料はもともと耐えられる疲労の強度があります。その疲労強度を推定して、実際の荷重から生じる応力がその強度を超えていたかどうか強度評価です。それを議論するわけですが、彼らの主張をまとめたのがこのスライドです。疲労限度は、教科書のガイドラインから90MPa、ヨーロッパ規格から112MPa、

LBFのデータから120MPaとっています。

ともかくLBFの考えは、直線路では185MPa、ポイント通過時は206MPaの応力が生じており、それに対してタイヤ材料の疲労強度は90, 112, あるいは120MPaしかない、だから破壊したという主張です。タイヤの持っている疲労強度を超える繰返し応力がかかったら壊れます。これで彼らは証明したと思ったのです。

これに対して、私は裁判所に専門鑑定人見解書を提出しました。「何万本もの車輪が走っていて、破壊せずにしかも寿命を全うした車輪は1,000本ある。き裂がなくて、タイヤが薄くなって取り替えた車輪は1,000本ある。もしLBFの見解が正しいのであれば、1,000本の車輪は全部破壊しているはずである。破壊する理由を説明するのは容易であるが、同様に使用されていた1,000本の車輪が破壊しなかった理由を説明するのは難しい」と。

(3) 破壊確率

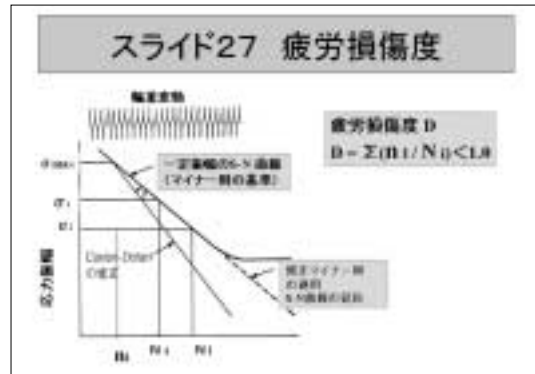


金属疲労のご専門でない方に説明するために、グラフをお見せします。繰返し応力振幅を縦軸にとりまして、横軸に繰返し数をとりますと、鉄鋼材料ですとこのような曲線が得られます。丸印はこの荷重で試験するとこの繰返し数で破壊する所です。これをS-N曲線と呼びますが、こういう曲線以下になるように機械・構造物は設計する。これですと10の7乗回、あるいは200万回超したら無限の繰返しでも破壊しない荷重が鉄鋼材料にはあります。これを疲労限度というのですが、これ以下になるように設計をするべきなのです。

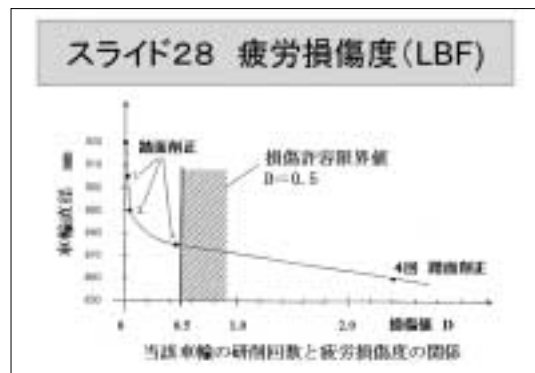
ところが、金属疲労というのはものすごくバラつくのです。ここにありますように破壊確率を1%,

あるいは10%, 99%としたらこれぐらいデータがバラつくものなのです。したがって、疲労限度設計をしても、そこに安全率を入れないといけないわけです。何パーセントの破壊確率で許容するかということです。

(4) 疲労損傷度



もう1つの疲労設計の理論があります。先ほどの説明のように10の7乗回で鉄鋼材料は無限に破壊しない荷重があります。ところが、振幅が変動する荷重に対しては、疲労損傷度Dというのを計算しなさいという理論があります。これはマイナーの法則といいますが、先ほどいった疲労試験結果をずっと延長していったら、10の7乗回を超しても点線のように強度が下がっていくという仮定です。これで設計しようというのが疲労損傷度設計です。例えば、図で $\sigma_i$ の応力がかかりますと $N_i$ 回で破壊するのですが、この応力が $n_i$ 回しかかからなかったとしたら、疲労強度は $(n_i/N_i)$ 消費されたと考えて、それを変動する荷重振幅のすべてにわたって積算します $(\sum n_i/N)$ 。この積算値Dを疲労損傷度といって、 $D=100\%$ で破壊するという理論です。通常、Dを0.2あるいは0.5以下になるように設計されています。これも議論になりました。



LBFの教授陣が彼らの荷重スペクトルと計算応力から疲労損傷度を計算した結果です。疲労損傷度を横軸にとっていますが、損傷度が1になると50%の確率で破壊です。車輪の直径が920mmから使われていて踏面が摩耗しますから、1回削正、2回削正、3回削正したデータです。今回の破壊した車輪は4回削っています。疲労損傷度は、計算したら1をはるかに超していた。だから、破壊したというのです。そして、車輪の使用限界が880mmだったらDは0.5以下だから破壊しなかった。これが最初に申し上げた車輪径880mm以下で使ってはならないと彼らが主張した理由です。

私の証言では、この疲労損傷度評価を否定しました。航空機のように有限寿命設計ではこの理論は適用されているが、鉄道車両用部材は世界中で無限寿命設計が行われており、疲労損傷度評価手法はState of the Artではないことを陳述しました。

### 3. 平川の証言

**スライド29 平川の証言**

- \* この専門鑑定書は当該時の State of the Artの観点から記されたものである。
- \* 鑑定書は私の知識と経験とそして信念に基づいて、全く客観的に、公正に書かれたものである。
- \* この見解書の目的は、車輪の破壊原因を明らかにすることに貢献することである。

私の証言の番が4週間目か5週間目に回ってきまして、陳述を始めたわけです。

私の陳述は私の知識と経験と、そして信念に基づいて全く客観的に、公正に行いますと、またState of

**スライド30 鑑定課題 (1)**

03.06.1998 以前のState of the art (技術水準)から見て、064型弾性車輪 (VSG社製造)は全般に、ドイツ鉄道会社(旧ドイツ国鉄)の高速車両の客車に使用されるのは適切(Suitable)であったか。

the Artに従っています、と宣誓しました。また、鑑定の目的は、「車輪の破壊原因を明らかにするためであって、被告を弁護することよりも、破壊原因を明らかにすることが重要であり、これが亡くなった人の冥福を祈ることだ」と申し上げました。

裁判所の私に対する課題の1つ目は、このゴム弾性車輪は、ドイツの鉄道の高速度輸送に客車として使用されるのが許されたか、という課題です。

### 3.1 応力解析

**スライド31 安全性の評価試験**

(1) 応力解析  
疲労き裂が発生したタイヤ内面の応力状態の評価。

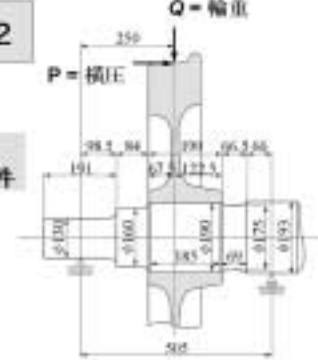
(2) 疲労強度  
タイヤの疲労強度の評価  
実体疲労試験

(3) 安全性の評価  
動的荷重係数  
安全率

この課題を解決するために、応力解析と疲労試験を行い、安全性の評価を行いました。応力解析にはABAQUASの有限要素法による3次元弾性解析を行いました。

**スライド32**

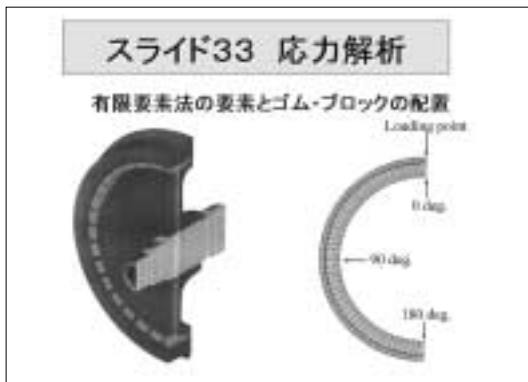
応力計算  
荷重と支持条件



The diagram shows a cross-section of a wheel with a central hub and a flange. A vertical force Q is applied to the top of the wheel, and a horizontal force P is applied to the flange. Dimensions are given in millimeters: 150, 28.1, 84, 178, 26.2, 256, 191, 100, 181, 500, 172, 87.7, 61.3, and 510.

これは計算の境界条件です。曲線路を曲がるときはこのフランジに横圧Pがかかります。こういう条件で解析をいろいろやりました。

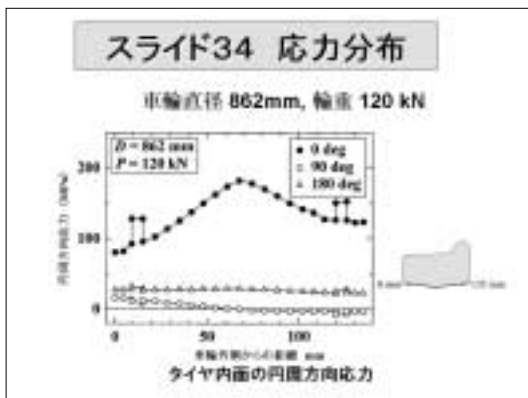
ここでご覧いただきたいのは、私の計算は、ゴムがリング状でなくて32個のゴム・ブロックです。ドイツの専門家のように1枚のリングの仮定ではありません。それから、私の計算にはタイヤにフランジもちゃんと付いています。輪心はドイツの検察陣は



### スライド36 応力解析結果

円周方向応力の計算結果  
車輪径 862 mm

輪重 (kN)	$\sigma_{max}$ (MPa)	$\sigma_{min}$ (MPa)	$\sigma_{amp}$ (MPa)	$\sigma_{mean}$ (MPa)
80	122.7	-16.3	69.5	53.2
(LBF)	(163)	(-25)	(105)	(69)
100	152.7	-25.3	89.0	63.7
120	182.4	-33.6	108.0	74.4



ロックで、フランジも付けて計算したら、フランジだって荷重を支える力があるのだからこんなのですよ。私の計算は、State of the Artで計算できる最新の結果です」と申し上げました。

### 3.2 疲労試験

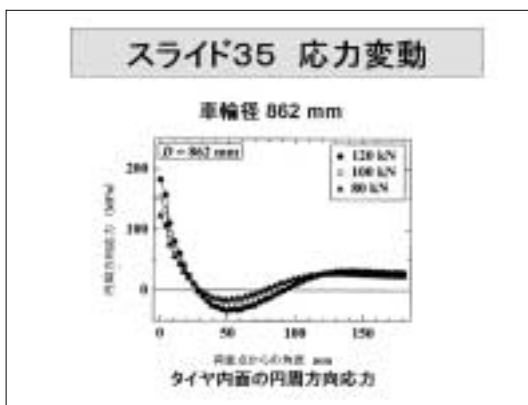


剛体としましたが、私は弾性体。裁判長でもどっちがいいかわかるではないですか。

細かい計算は省略しますが、タイヤ内面の応力分布を示します。タイヤの内側の中央部で応力がいちばん高くなっています。この高い所からき裂が進んでいます。

ドイツから車輪を空輸してもらって、車輪タイヤから試験片を取り出して疲労試験をしました。

また、実物車輪の疲労試験により、き裂の発生を再現する試験を行いました。先ほど疲労限度は10の7乗回の繰返しで得られるといたしましたが、フレットングの影響をみるためにその倍の2,000万回までの繰返し、最大荷重280kNという、静的輪重の3.5倍という信じられないような荷重で疲労試験をやりました。

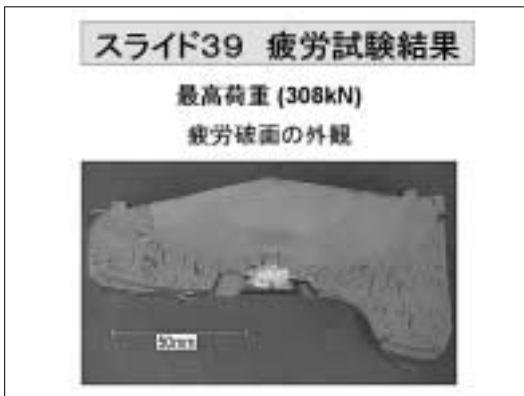


このスライドはMTSの最大荷重2,500kNの大型疲労試験機で、私が住友金属工業（株）にいたころに購入した試験機です。

タイヤの荷重点直下で最大の応力が生じます。分布はドイツの専門家と似ております。

計算結果をまとめました。私の計算の結果、最大応力は輪重が8 tかかったときに122.7MPa、ドイツの研究者は163MPaです。全然違います。「裁判長、こんなに違いますよ。私のようにちゃんとゴムもブ

2,000万回の繰返し回数後の車輪タイヤ内面の写真です。丸印が荷重点の直下ですが、ゴム・ブロックの端部と車輪内面が摩擦した跡があります。しかし、実際に破壊したのはこの中心ですから、ここには何もありません。フレットング摩耗の痕跡も認めら



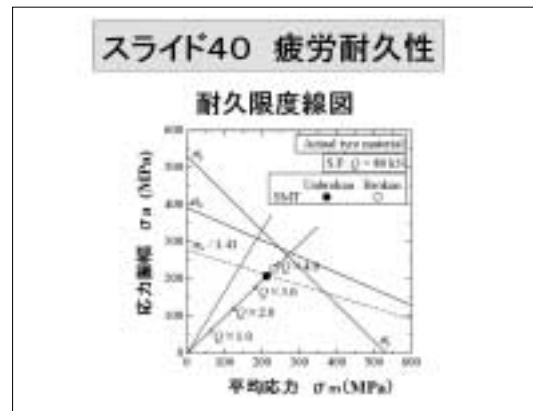
れません。

さらに最大荷重を308kNに上げて疲労試験を行いました。その結果156万回で破壊しました。そのときの疲労破面です。ここに貝殻状模様がちょっとあります。実際の事故はタイヤ内面の中央からき裂が入っていますが、これも同じように再現することができました。この破面は、あるいは先ほどの車輪は、いま九州能開大ポリテクカレッジに飾ってあります。ポリテクビジョンという学校紹介のイベントが平成16年2月行われましたので、そのときに展示しています。

### 3.3 耐久限度線図

耐久限度線図は疲労設計線図ともいいますが、横軸に平均応力をとって、縦軸に応力振幅をとってそのグラフ上に耐久限度、すなわち疲労限界の線を描いたものです。この線図以下になるように設計応力を決定します。小さい試験片により求めた疲労限度は、タイヤのように大きな寸法の実物疲労強度は低下します。これは、寸法効果として知られています。この低下割合を日本の車輪では0.7としますが、ヨーロッパでは1.41で割ります。両者はほとんど同じです。

これが耐久限度線図です。右下がりの実線はタイヤから採取した小型試験片のデータで、それを（1

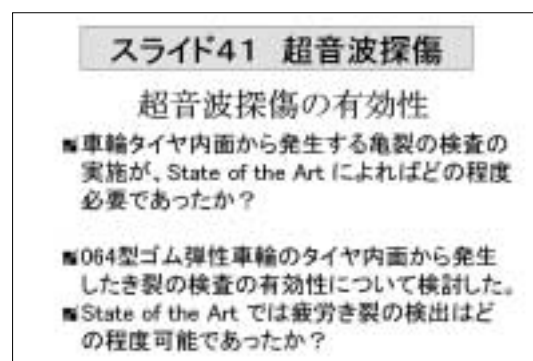


/1.41) にした線図が点線です。そこに実物の車輪で試験をした結果をプロットしますと、黒丸が破壊せず、白丸は破壊したデータです。よく一致しています。

この $\Delta Q=1.0$ は静的輪重80kNのときの繰返し応力です。 $Q=2.0$ は輪重が2倍になった160kNで安全率が2.0を示します。図に見られるように安全率が4.0になると破壊する。だから、静的輪重の3.5倍の動的応力が加わらないと疲労破壊しないタイヤなのです。それを、実物車輪で実証したわけです。

スウェーデンやスイスからも専門鑑定人が証言しましたが、彼らも全く独立に疲労試験を行い、その結果もこれを支持するものでした。ですから、このゴム弾性車輪は、十分に安全に設計されているということです。

### 3.4 超音波探傷試験の有効性



次の課題は、超音波試験が必要であったかということです。ドイツ鉄道の技術者はどの程度の検査をしたのかは私にはわかりません。したがって、State of the Artから考察して、最新の超音波探傷がき裂の検出にどの程度有効であったか、について実際に超音波探傷をやってみました。

**スライド42 超音波探傷**

疲労き裂の探傷

- ↓ 疲労き裂の破面は通常互いに密着されており、また破面は凹凸がある。
- ↓ したがって、疲労き裂の超音波に対する反応は基本的に規格などで定められている機械加工された円孔に対す反応とは異なっている。

**スライド43 超音波探傷**

車輪径860mmのタイヤに放電加工により人工き裂を加工し超音波探傷を行った

疲労のき裂というのは貝殻模様ができるように進んでいくわけですが、両面がぴったり合っているのです。その面は、貝殻模様があるように凹凸があります。ですから、超音波探傷で超音波を当てて返ってくる、機械加工したきれいな面の探傷を基準に作られた規格とは違うのです。例えば、世界の超音波探傷の規格では、ドリルで開けたきれいな穴に対して超音波を当てて、返ってくるエコーをみて感度を決める。ところが、疲労のき裂ですと、き裂面はぴったり閉じています。

車輪径620mmのタイヤの一部を用いて、放電加工により深さの異なる人工き裂を作り、超音波探傷を行いました。さらに、疲労試験により深さの異なる疲労き裂をタイヤ内面に発生させて超音波試験を行いました。

**スライド44 超音波探傷**

人工き裂の超音波探傷

- 探傷条件
- JIS G 0587
- 5MHz
- 45° 斜角探傷
- 1mmのき裂は検出が難しい

人工き裂でも、反射エコーの強さは、き裂の深さが1mmですと非常に小さくなって、き裂が5mmに比べて何十分の一になります。5mmぐらいですと見つかりますが、1mmになると非常に難しくなります。

**スライド45 超音波探傷**

疲労き裂の探傷結果

これは、実際に疲労き裂を入れたときの試験結果です。疲労き裂を入れるために、き裂発生のきっかけを作るための切欠きを機械加工してありますが、それを削除して疲労き裂のみを探傷しました。このスライドに見られるように、疲労き裂ですと深さ1.5mm-2.0mmのき裂を検出するのはきわめて困難であることが明らかになりました。

営業運転中超音波探傷検査を行っていたら、き裂が発見され事故が防げたかもしれない。しかし、すでに述べたように、応力解析と安全率の考察から、タイヤ内面に疲労き裂が発生することはほとんど予期されなかった。したがって、技術者は定期的な非破壊検査が必要とは考えなかったでしょう、と陳述をしました。

### 3.5 事故原因

私の事故原因についての陳述としては、「事故の原因は、タイヤ内面から疲労き裂が発生して進展した結果であることは十分認めました。しかし、きわめて低い確率で、何億分の一とか、そういう確率で起こる現象がたまたま起こった、きわめてまれな不幸な事故でした」と申し上げました。

## 4. 判決

2003年5月に出された裁判長の声明文です。裁判所は、3名の技術者に対する裁判を刑事訴訟法に基づき、各人が国家に1万ユーロ、日本円で約120万円を支払うことを条件に中止する。被告は、少なくとも

#### スライド46 裁判長の声明文

- 裁判所は3名の技術者に対する裁判を刑事訴訟法に基づき、国家に10,000ERを支払うことを条件に中止する。
- 被告は少なくとも重大な過失を犯したとは言えない。この金銭の支払いは過失の成立によるものではない。検察側の公共の費用を支払うことで結審する。

も重大な過失を犯したとは言えない。この金銭の支払いは、過失の成立によるものではない、ということです。

#### スライド47 裁判長の声明文

- Fraunhofer 研究所の主張は
- 車輪の設計の基準に用いた動荷重は他の専門鑑定人よりも著しく高い。
- 実動荷重でタイヤ内面に生じる応力振幅は他の専門鑑定人が決定した値よりもかなり高い。
- タイヤ内面の許容応力は他の専門鑑定人の仮定よりも著しく高い。

検察側の教授陣の主張については、彼らの評価に用いた疲労強度、動的応力、応力計算はいずれも他の専門鑑定人と異なっている。

#### スライド48 裁判長の声明文

- ゴム弾性車輪の保守・検査は不完全であったとの主張は、
- タイヤが検査する必要がある、効果的なき裂の検知が可能でなければならない。
- しかし、専門鑑定人は、完全でかつもっともな証拠により、超音波試験によって小さなき裂の位置を検出するのは基本的に難しく、不確実であると証言した。

検査が不十分であったというのは、タイヤを検査する必要がある、効果的なき裂の検知が可能でなければならない。しかし、専門鑑定人は、完全でかつもっともな証拠によって、超音波試験によって小さなき裂の位置を検出するのは基本的に難しく、不確実であると証言したと、私の陳述を認めました。

本件の複雑さ、内容の広範さを考えれば、非難すべき事柄があったとしても、相対的に重大な過失は

なかった。したがって、本件は刑法に則り無判決の方法により結審する、ということになりました。

## 5. ものづくり技術者の責任

事故原因は車輪タイヤの疲労破壊であったのですが、タイヤが破壊した後も車両はレールの上をそのまま走っている。そして、ポイントがあったので脱線した。たまたまそこに橋梁があったから橋脚に激突して大事故になったのです。設計責任者がポイントや橋梁の存在まで責任を問われるべきなのかという問題があります。不運なことが重なって生じた大事故でした。

#### スライド49 技術者の責任

- 技術者は全能の神ではない。したがって、将来起こりうるすべての状況を予知することは出来ない。
- 当該時の State of the Art の最新の技術によって、安全を確保しなければならない。
- しかし技術者は、それでも未来技術を革新する勇気と意思を持ち続けなければならない。

いずれにしても、技術者は全能の神ではありません。したがって、将来起こりうるすべての状況を予知することはできないのです。しかし、大事故が起こりうるとしても、技術者というのは、それでも未来技術を革新する勇気と意思を持ち続けなければならないとつくづく思います。ただ、大事なのは、それが何年使われてもそのときの最新の技術 (State of the Art) で安全を確保しなければなりません。ものづくりの技術者というのは、いつも最新の技術を勉強して、しかもそれに沿って対応していかなければならないのです。生涯教育といいますが、自分を教育しなければならないという意味では、技術者の責任というのは非常に重いと思います。ですから、そういうものづくりの技術者を育てる先生方も本当に State of the Art の技術を知っていますか、それを教えていますか、ということが問われると思います。絶えず研鑽しないと技術の進歩についていけません。これが技術者の責任だと、しかもものづくりを教育する者の責任だと思います。