

A2 Components

LuDeMa視点の問題解決

Solving a Problem with the LuDeMa* Viewpoint

*Lu-lubrication, De-design, Ma-Material.

Also LuDeMa is a person's name who established the LuDeMa viewpoint.

キーワード | 白層剥離・水素脆性・異物油中・低燃費・真空溶解材・潤滑設計・材料

軸受事業部

渡辺 孝一 Kouichi Watanabe

要 旨

転がり軸受は、歯車やボルトと並んで、動力伝達する機械装置には必ず使われているもので、機能部品として認識されている。言い換えると、軸受としての機能を発揮できないような状況になると、機械装置全体の機能が損なわれてしまうため、機械装置の信頼性には、軸受の信頼性確保は欠かせない。

軸受に不具合が発生したときの解決の目の付け所は、潤滑か設計そのものか材料しかない、という考え方があり、この視点での改善事例を紹介する。

Abstract

A roller bearing, along with a gear and/or a bolt, is usually used in mechanical equipment that transmits power, and is recognized as a functional part. In other words, if a bearing is unable to perform its function, the functionality of entire mechanical equipment will be damaged. Therefore, ensuring bearing reliability is critical in terms of securing the reliability of mechanical equipment.

When there is a problem with a bearing, the areas to be examined for resolving the problem are lubrication, design itself or material. Examples of improvement are introduced here based on this viewpoint.

1. はじめに

LuDeMaという言葉は、東大の木村先生が、何かの講演会ないしは学術会議で聞いてこられた言葉ということを直接お聞きしたことがある。軸受の設計製造は、そのときまでに得られている多くの知見を反映して行なわれるが、それでも予期せぬ不具合というものは発生する。そのときの解決方法の目の付け所は、潤滑か設計そのものか、または材料しかない、という考え方があり、それらの英単語の頭文字をとると、LuDeMaになる。そのような話をされていたのが、同じ文字の名前をしたルデマという人だった、といわれていた。名前と同一の不具合対策を説明されていたというのが印象に残っている。このような視点も有効な解決方法の一つになっていることを、事例をまじえて紹介する。

2. 潤滑 (Lu) での解決事例

1) 早期剥離の発生

転がり軸受の世界では、潤滑材を使用するというのは当然になっている。油が必要な理由は、外力を受けて接触する二つの金属でできた物体が直接的に触り(金属接触という)、その接触している部分(接触面積と呼ぶ)に、接触に伴う力が作用しながら、相対移動、ずれが発生すると、接触した部分に損傷が発生してしまう危険性を回避することにある。

このような問題は、相当以前から研究されてきている。今日では、弾性流体潤滑(EHL;Elasto-hydrodynamic lubrication)として一般的に知られていて、この理論計算方法に基づき、軸受使用条件に応じた潤滑剤の特性や軸受の表面仕上げ精度が論じられ、潤滑材の適用可否が決められている。このようにして、必要粘度や接触面の必要粗さなどの基準が決められてきたが、これに添加剤などの付加的な要素を取り入れることにより、ほとんどの潤滑問題は解決するようになった。

ところが、1980年代頃からか、自動車補器軸受に短時間で剥離が発生する問題が発生した。剥離の断面を診ると、これまで見たことのないような白い層が見られたので、白層剥離と呼ばれた。ちょうどその頃はエンジンベルトの一本化(サーペンタインと呼ばれていた)の影響であろうか、振動の大きい環境下でもよく見られたので、振動剥離とも呼ばれた。グリース潤滑されていた点では、似た部位なのだがほとんど発生しない軸受もあり、当時としてはとても不可解と思えることが生じていた。

今日では、この原因が水素にあることの方が主流になっているが、当時は振動によるもの、静電気によるもの、いろいろな説が出ていた。NACHIでは、特定のグリースでは白層剥離の生じていないことに着目し、早い段階から水素脆性の一つであろうという仮説を立て、対策を図ってきた。

2) 水素脆性のメカニズム

機械系の方ならご存じであろうが、水素脆性は、遅れ破壊(delayed fracture)とも呼ばれ、塗装の不十分な橋梁鉄骨などではよくみられ、今日では解明されたメカニズムになっている。雨などの水滴が鉄表面につき、水分から分解した水素が鉄内部に侵入すると、水素は原子サイズも小さく、拡散性が良いため、鉄内部に侵入して集積を繰り返す、そのときに微小亀裂を発生させてしまう。その空隙内で炭素が移動すると白層が生じてしまい、その亀裂が拡大していくと破断に至るメカニズムと考えられている。

従って、非核3原則ではないが、水素脆性を発生させないようにするには、水素のもととなるものを、持たない、造らない、持ち込まない、が必要になる。

3) 白層剥離のメカニズム

軸受周辺には、オイルであれグリースであれ、通常は潤滑材がある。潤滑材は、CやHの鎖の連続複合体だから、この時点で水素は必ず存在する。従って、潜在的ではあるが、「持たない」は成立しない。

では「造らない」はどうかと考えると、案外と容易に造られてしまう。金属の接触表面がすべりなどで活性化してしまうと、トライボケミカル反応といって、油分子が分解され、水素単体が形成されてしまうらしい。この形成された水素が、同じく活性化された表面を介して金属内部へ侵入してしまうのが、軸受の白層剥離の原因の一つと考えられている。この表面の活性化には、すべりの他に、軌道輪の周期的な繰り返し曲げ振動なども寄与するといわれている。白層剥離発生原因を水素脆性としたときの発生メカニズムの概略を図1に示す。

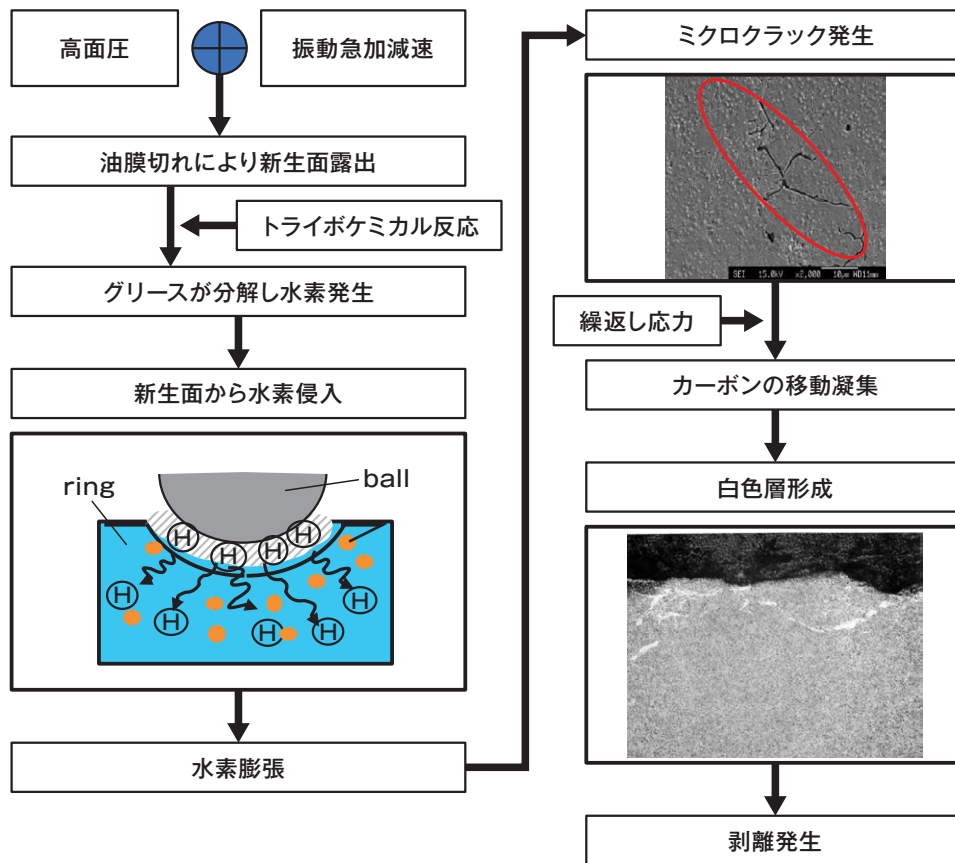


図1 白層剥離の概略発生メカニズム

軸受を潤滑環境で使う以上は、水素発生の可能性はかならず有していることになるので、白層剥離の危険性は等しくあることになる。されど、同じく、接触面迂りなどが生じてしまう振動環境下で使われても、白層の発生しないものもある。それはなぜなのかというと、水素ができてしまったとしても、それが金属内部に入らなければいいから、ということになる。それが「持ち込まない」になる。

当時は、RoHS指令がまだ適用されていなかった頃だったため、さび止め添加剤に亜硝酸ソーダが使われているグリースはまだ多く使用されており、これらのグリースでは白層剥離はほとんど生じていなかった。当時はその理由は解明できないでいたが、今日では、添加剤として入っていた亜硝酸ソーダが金属活性面に張り付き、発生した水素の金属内部への侵入を阻止したから、この添加剤を含むグリースでは白層剥離が出ていなかった

のだ、というのが定説になっている。NACHIでも早くからこの見解に達していて、対策に活かしてきた。当時は、どのメーカーも高温長寿命グリースの開発に専念していて、発生水素対策ということまでには思いが至っていなかったのだと思われる。

このようにして、1980年代頃から突如発生してきた軸受の白層剥離に対しては、これまで発生していなかったメカニズムの仮説を立て、これまでとは異なるグリースを開発しても、その開発グリースの成分は、上記と同等のメカニズムが成立しうる組成にすることにより、白層剥離を対策することができてきている。

一時は、軸受各メーカーは材料(Ma)にまで踏み込んだ対策をしていたが、今日ではそまでする必要はなく、潤滑(Lu)の対策範囲で納めていることが多い。

3. 設計(De)での解決事例

何かの問題が生じたときは、設計改善ができるのであれば、実はそれが一番効果的なことかも知れないが、通常は、そのことによる背反がないか、検証を行なう必要があるため、一旦でき上がって量産流動しているような部品では、設計変更ということは簡単に行なうべきではないと考えている。例えば、玉軸受を使用した機械部品で、目標時間よりも早く寿命に達してしまった事例があったとしたら、同一サイズでも負荷容量を大きくできるからと、ころ軸受に替えてしまえば良い、というような解決方法は安易に行なうべきではない。その理由は、変化点が多い場合に発生しうる背反事象の潰し不足を回避するためである。では、設変は全くダメかというそうではないが、変化点を極力少なくするというのが、流動品に対する設変の原則であり、機能部品に対しては、そのような思想をもつことがとても大切なことだと考えている。このような考え方で、設計により問題解決した事例は多くあるが、ここでは、自動車変速機の異物油中で短寿命となってしまった軸受について、設計改善により乗り切った事例を紹介する。

1) 密封性能は却って仇になることもある

1990年代の頃だが、マニュアルミッションはそれでもまだ多く使われていた。マニュアルだと、構造図を見れば、どんなギア同士が噛みあって動力伝達してくれるのかということがよく分かり、機械屋であれば目で見て動力伝達が理解でき安心できたものだが、それだけギア数が多いということであり、その摩耗粉などで変速機内部の潤滑油が汚れていくであろうということは容易に推定つく。

そのような摩耗粉や、あるいは、変速機の製造過程で侵入してしまうような異物が軸受内部に侵入すると、転動体の走る軌道面を簡単に傷つけ、早期に剥離に至ってしまうという事象が頻発した。この対策には初期の封入潤滑油だけを清浄にしても追いつかず、軸受負荷容量の設計改善でしのぐしかなかった。されど、周辺寸法の制約があり、大きい軸受サイズに変える程の寸法余裕はなく、どの軸受メーカーも苦労

していた。そのような中で市場に最初に現れたのが、クリーンベアリングといって、軸受内部に潤滑用グリースを封入し、接触シールで覆って外部からの異物侵入を防ぐ設計方式のものであった。

NACHIでもこのような思想のもとに試作評価してみた。シールがいつまでも機能を健全に果たしてくれていればクリーンベアリングになるのかも知れないが、ひょんなことでシールに損傷ないしは変形が生じてしまうと、シール性能が損なわれてしまい、軸受内部に異物が一旦入ってしまうと、異物が外に出ようとしても、損傷したシールが抱え込んでしまって、軸受内部に異物が残留し、却って軸受内部が傷付きやすくなってしまったことが分かってきた。まさしく、シールはロバストでないとシールにはならず、そうでなくなると却って仇になるということが分かり、徹底したシールとするか、シールということは一切あきらめるか、二者択一の設計しかない、ということになった。

2) シールの挙動特性

異物油中でも機能を果たせる材料というのは、その当時はまだ完成していなかった。なので、とられた方法は、完璧なシールをめざすということであり、まさしく設計行為となった。このため、シールリップの挙動解析は、軸シールメーカーも顔負けするくらいにすすんだように思われる。リップ先端の接触角度や接圧量の解析は正確な定量解析にまでは至らなかったかも知れないが、シールリップ挙動の見える化には大きく貢献した。軸受が軸方向に相対移動したときのシールリップ接触変形の見える化の事例を図2に示す。このようなことから、リップ追随性という視点が設計初期段階から定着してきており、シール性能は格段に向上してきている。

軸受シールには、接触リップで密封機能を果たすことの他に、密封内部の発生圧力の回避(ブリーザ機能という)能力も持たさなければならない。この機能が不足すると、軸受回転停止時に軸受内部の発熱による膨張空気が外へ逃げていき、常温に戻ったときには軸受内部の空気が不足しリップ接圧が異常に大きくなって、起動時の軸受トルクがとて大きくなってしまう(負圧現象という)。

これを回避するため、軸受シールには空気の流れを確保する溝(ブリーザという)が設けられるが、この溝形状、大きさ、位置が不適切になると、ここからも異物が侵入してきてしまう。NACHIでは、これらに適正値が存在することを確認しており、設計に反映することができている。

3) 油は通すが異物は通さないシール

以上のシール性能は、軸受のどんな姿勢、どんな環境に対しても、ほぼ永続して発揮するようになっていなければならない。このため、数多くの様々な要素解析を行ない、もし、シールを付けなかったとしたら、計算寿命の10～20%程度で剥離してしまうような高濃度の異物環境下でも、計算寿命の5～10倍程度の寿命を達成しうるシール構造として、軸受を構成することができるようになった。このシールを、MTシールと名付けて販売している。

異物は、その硬さ、大きさ、形状、そして濃度により、解放型軸受の寿命に与える影響の程度は異なるが、完成したこのMTシールは、これらの影響を受けることなく、軸受内部をクリーンな環境に保つことができ、油は通すが異物は通さないシールとして広く認知されるに至っている。

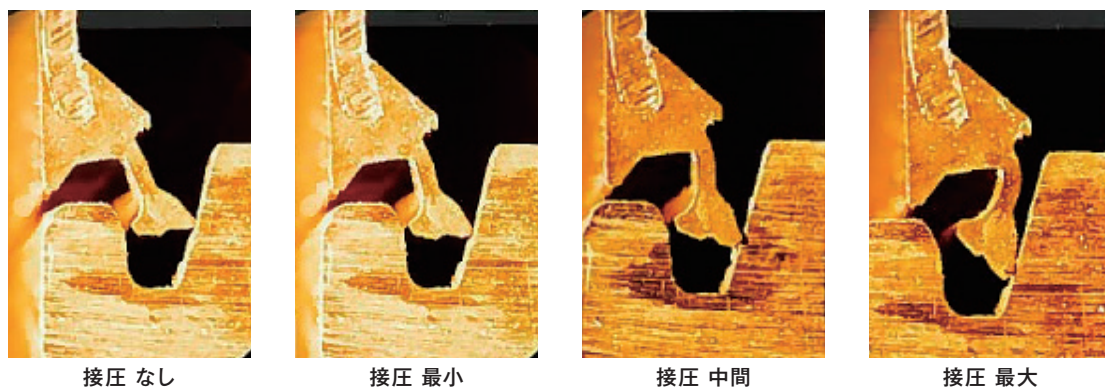


図2 MTシールの接圧量によるリップ変形(6206サイズ相当)

4. 材料(Ma)での解決事例

1) 対異物材料

前節では、車両内部に発生する異物により、軸受が想定外に短寿命になってしまうことの対策として、油は通すが異物は通さない、密封性能の優れた設計改善を行なった事例を説明した。異物油中環境での長寿命化を、密封設計の改善により達成したのだが、接触シールを装着しているので、開放型に比べて、どうしても軸受トルクは大きくなってしまった。

MTシールの量産流動が始まってまもなく、今度は米国でCAFÉ(Corporate Average Fuel Economy)規制の動きが高まった。元々はオイルショックを契機に始まったものだが、各自動車メーカーに燃費規制が義務付けられた。

これを軸受の特性に置き換えると、転がり抵抗を小さくしなければならないということになる。これに伴い、ころ軸受は玉軸受に置き換えられ、接触シール付き軸受は開放型へと置き換えられていった。シールを使わない異物対策が必要になってきたことになる。

NACHIでは材料部門を有しているので成分設計が可能であり、既存のSUJ2よりも耐異物に優れた材料を成分設計段階から開発することになった。異物による当時の標準材SUJ2での早期寿命は、NACHIでの標準試験では計算寿命の20%程度であったので、これを少なくとも計算寿命並みにまでもってくる、つまり、耐力を約5倍程度向上させる、というのが開発目標となった。

異物圧痕がつくと表面塑性盛り上がりが生じ、そこから亀裂が進展して短寿命に至ることが分かってくると、塑性盛り上がりの小さくなること、それでもできてしまったとしたら、そのクラックの進展を遅くすること、を狙いに、主にCr成分を増加し、耐熱性元素を追加し、さらには表面改質熱処理を取り入れて、これらの目標性能を多くの試行錯誤を経て達成することができた。材料変化は要素機械部品としては変化点が大いなので、既存材料からの変化点を極力すくなくする成分設計がとられた。そのため、配合元素はほとんど変えずに、主に量の適正化を図るようにし、とくにCrの量については、

それに応じて適正な焼入れ温度が変わるわけで、相当種類が評価され、量産安定性も考慮し、最終的にCr3%とした経緯がある。当時の材料試作者は、10種類程度までに開発鋼種を絞りこみ、異物油中環境で効果検証を行なっている。その当時の、開発鋼種ごとの寿命試験結果を図3に示す。このような開発過程の中で、当時の開発者は、ほとんど家にも帰ることはなかったと聞いている。頭の下がる思いがする。

こうしてできたのがMT21という鋼種で、現在でも自動車分野以外にも多くご採用いただいている。MTの命名は、Multi Tough という人もいれば、当時の軸受および鋼材の事業部長であった、前川幹夫、竹内淳の頭文字を採ったという人もいる。21は21世紀につながるという意味で、いずれにせよ当時の技術者の執念が成功へと導かせた材料だといえる。

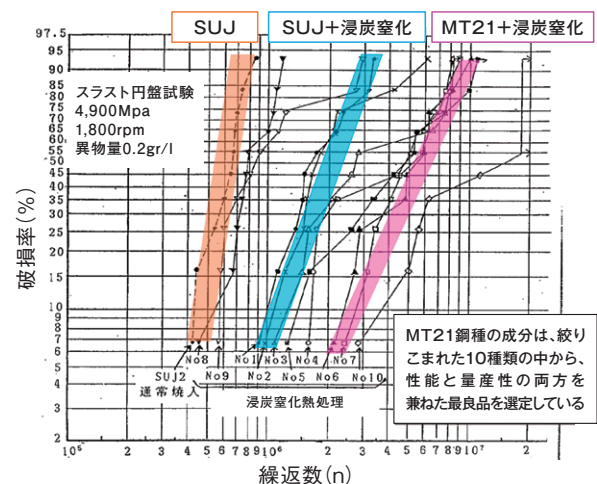


図3 MT21候補鋼種(10種類)と既存鋼種とのスラスト円盤による異物油中耐久試験

2) 真空溶解材

材料による問題解決とはいえ成分設計、つまり、単に材料設計ではないかと、いわれる方もいると思う。されど、NACHIには設計ではなくて、純粋に材料特性だけで問題を解決した事例がある。それは、1964年開業の0系新幹線の車軸に使われていたJC9という円筒ころ軸受のころの材料改善であり、業界では有名な話になっている。

開業当時のJC9のころは数万キロ走行で剥離に至り、軸受交換の頻度がとても高く、営業運転に大きい支障が出ていた。この改善に軸受各社がとり組んだが、NACHIでは、今日では重要部品への適用は当然になっている真空溶解材の適用を考えた。材料清浄度を向上することにより信頼性向上を図れることは、その当時の航空機軸受のとり組みから分かっており、また材料製鋼部門を自社内に有していたことから、当時は当然だった大気溶解材を、電極代わりにして再度、真空環境で再溶解する方法(VAR; Vacuum Arc Remelting)をとった。このことにより、ころの材料清浄度を各段に改善することができた。適用先であった車軸軸受JC9の軸受断面図を図4に示す。

この素材で作られたJC9は格段に寿命向上し、他の軸受メーカーの軸受よりも圧倒的に寿命向上した。そのため、当時の国鉄からは、全てのころをNACHIで製造するよう申し入れがあったと聞いている。それをお断りして、真空溶解法の技術を広く開示したことが、軸受各社の新幹線車軸軸受の寿命向上に大きく貢献したと聞いている。当時を経験された旧国鉄の方からは、今でも感謝の念をいただくことがある。

あまりにも寿命向上したため、当時の国鉄からはどこまで寿命が延びるのか試したいといわれ、途中で破損すると事故になるからと、当時のNACHI幹部は使用中止を申し入れたそうだが、100万キロ走っても剥離に至らず、やっとそこで交換してもらえた、と聞いている。

溶解法の改善に過ぎないといえばそれまでだが、当時の材料技術の優れた知見があったこと、材料部門を有していたNACHIだからこそなした功績だと考えている。

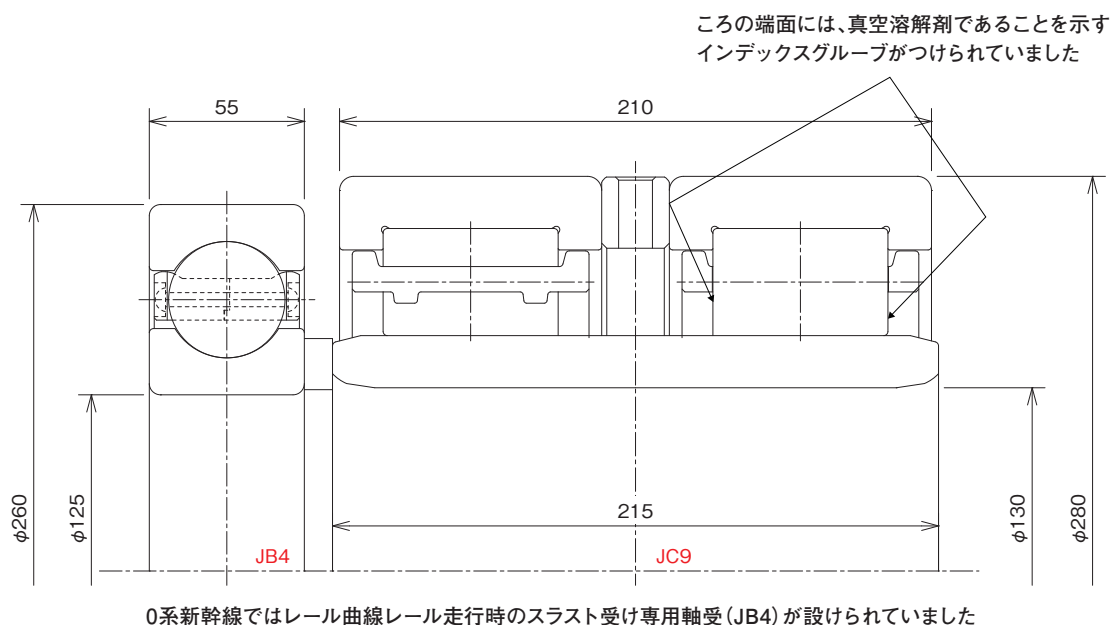


図4 0系新幹線車軸の軸受断面図

5. おわりに

ここで記したLuDeMaによる改善は、ほとんどが諸先輩方ないしは協力会社の方々の不断の努力の為せる結果だと考えている。ここに、その謝意を述べると同時に、その方たちの貢献であったことを、尊敬の念をもって記しておきたいと思う。

白層剥離のLuによる改善は、ENEOS、当時は日本石油であったが、その中央研究所にいらした木下広嗣さんたちとの協同成果に負っている。NACHIでの技術改善は、現在も現役の東一夫が担当していた。これ以降は、白層に影響を与える拡散性水素の特定などに進展していき、対策の妥当性が確認でき、白層剥離に対してさらなるグリース改善へとすすんだが、取り組みはここからスタートしている。

MTシールと名付けた異物油中接触シールの改善は、当時の軸受技術責任者であった中川修とその配下の竹内登志久の設計改善によるもので、変速機の実車模擬した多くの試験により効果検証がされている。また、MT21特殊材料は、当時の材料部門の今庄愈正による数多くの試作、実験検証に負うところが大きく、開発された特殊材料を不動のものにしてくれた。今日では、解放型の低トルク軸受化に、寿命補填する技術として欠かせない材料として認知されてきている。このようなことから、燃費改善のための自動車軸受材料として、多くの自動車メーカーにご採用いただいている。

最後の0系新幹線車軸軸受の功績はあまりにも有名で、軸受解析技術、文献に造詣の深かった、当時の軸受技術責任者の矢野勝雄の発案によるものと聞いている。非線形の偏微分方程式でも難なく解析される方で、当時の技術者は誰も、多くを教わり、尊敬の念を込めて先生と呼んでいた。NACHIには矢野がいる、という言葉は業界にもあつたらしく、多くの知見を有されていた方だった。その矢野先生が材料部門の同じく技術責任者だった川原蕃(親分肌の方で、蕃(ハン)さん、と呼ばれていた)に、真空溶解のことを伝えられたようで、蕃さんの知り合いのいらっしゃった神戸製鋼のコンセルーク溶解炉を使って、ころ素材を造られたと聞いている。

いずれの技術改善も、優れた技術屋さんが智慧を絞り、協力しあって成し遂げた成果だと思っている。残された我々は、その苦労の汗の一滴でも見習わなければならない。そうすることが、唯一の恩返しになる、そのように思えてくる。

NACHIの在る富山県は、越中、越の国で、万葉集には越の文字は、高い志「高志」とも書かれている。

これまでに在籍した、そして今でもいる多くの技術屋が、協力してなしてきてきた、きている技術改善の一例を、LuDeMaの視点でまとめてみた。NACHI技術員たちの高志をご理解いただければ嬉しく思う。