

フリーゲージトレインの技術開発を巡る経緯

平成10年 1次試験車両完成

平成11年 4月～ 米国コロラド州プエブロ試験線で高速耐久試験等

- ・最高到達速度246km/h、耐久走行約60万km、軌間変換約2000回を達成

平成17年 5月 国土交通省の見解

- ・「フリーゲージトレインの目標最高速度としては、新幹線区間で270km/hであるが、現在の技術開発状況としては、220～240km/hまでの実用化の目途がついているので、フリーゲージトレイン（の導入）を強く言ってよい」

平成17年 6月 国土交通省の見解

- ・「既に220km/h～240km/hの実現化の目途は立っているので、今後は270km/hまでの開発についても引き続き行っていく方針であり、国としては責任を持って実現化を推進していく」

平成21年 8月～ 九州新幹線（新水俣～川内）にて速度向上試験（最高到達速度270km/h）

平成22年 9月 軌間可変技術評価委員会

- ・軌間変換性能、新幹線及び在来線直線区間における走行性能については目標を達成している
- ・在来線の急曲線部等の走行性能について課題がある

平成23年 6月～ 在来線（予讃線）にて走行試験（急曲線部における目標速度での安全・安定走行を確認）

平成23年10月 軌間可変技術評価委員会

- ・軌間可変電車の実用化に向けた基本的な走行性能に関する技術は確立していると判断される

- 平成24年 4月 JR九州が九州新幹線（武雄温泉・長崎間）の建設着工に同意
- 平成24年 6月 フリーゲージトレインの導入を前提に、工事実施計画（武雄温泉ー長崎間）認可
- 平成26年10月～ 九州新幹線や鹿児島本線等にて耐久走行試験開始
- 平成26年11月 車軸の摩耗（最大230 μ m）が確認されたため、耐久走行試験を休止
- 平成28年12月～ 車軸の摩耗対策を講じたうえで検証走行試験
- 平成29年 7月 軌間可変技術評価委員会
- ・車軸の摩耗対策が相当の効果を有することが確認された（最大230 μ m→最大2.5 μ m）
 - ・新たな対策（車軸のメッキ厚の増加等）を検討
- 平成30年 3月 軌間可変技術評価委員会
- ・新たな対策（車軸のメッキ厚の増加等）の影響を検証。最終的に確認するが特に問題はないと評価。
 - ・耐久走行試験に移行する場合は、検証走行試験などにより耐久性を検証するなど、その効果を
確認する必要がある
- 平成30年 3月 与党検討委員会
- ・技術開発が順調に推移した場合、西九州ルートへの導入は2027年度半ば（9年後）となる見込み

（注）軌間可変技術評価委員会：フリーゲージトレインの技術開発に関する技術的な評価を行う有識者委員会

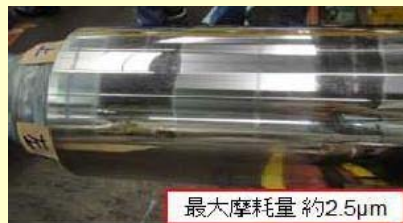
与党検討委員会：与党整備新幹線建設推進プロジェクトチーム九州新幹線（西九州ルート）検討委員会

μ m（マイクロメートル）：1ミリメートルの1000分の1

軌間可変技術評価委員会(H29.7.14)の評価結果について

車軸の摩耗対策

1. 検証走行試験(約3.2万キロ(標準軌走行距離約2.9万キロ)走行)後、3台車(6軸12箇所)を分解調査。
2. 平成26年度の耐久走行試験時は最大約230 μ mの摩耗が確認されたが、今回は最大で約2.5 μ m。摩耗対策が相当程度の効果を有することを確認。
3. これらの測定値から、車軸を交換することなく走行可能な距離を予測したところ、12箇所のうち10箇所において、60万キロ以上と推定(各部位の摩耗量から求められる走行可能距離は別表のとおり)。
4. 従って、耐久走行試験に移行する場合は、車軸メッキ厚の増加、すべり軸受の加工精度の向上など、車軸の交換周期を延伸するための新たな対策を立案し、その効果を確認することが必要。

検証走行試験後の車軸
(標準軌走行距離: 約2.9万キロ)参考: H26耐久走行試験時の車軸
(標準軌走行距離: 約2.5万キロ)

経済性の検討

1. FGT特有の高価な部品(歯車付外筒、車輪スリーブ)の再利用について検討。^{がいたう}
2. 現時点において、少なくとも、歯車付外筒については3回まで(車軸の交換周期を60万キロと設定すると、交換周期240万キロ)、車輪スリーブについては1回(同じく交換周期120万キロ)の再利用が可能と確認。
3. 以上を踏まえて、FGTの経済性について試算した結果、一般の新幹線と比べたFGTのコストは約2.3倍と見込まれた。さらに、歯車付外筒及び車輪スリーブが、車両の供用期間中(15年間600万キロ走行)は交換不要と仮定した場合は、約1.9倍と見込まれた。

FGTの経済性の検討結果(一般の新幹線との比較)

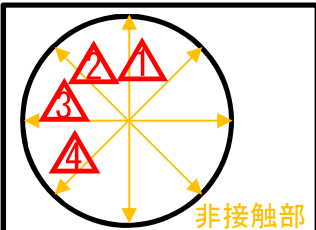
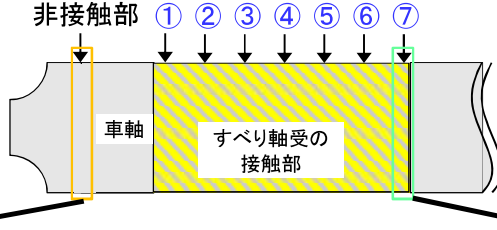
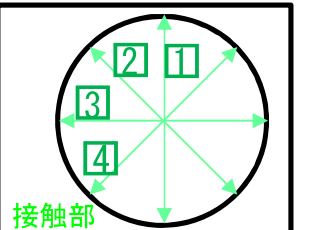
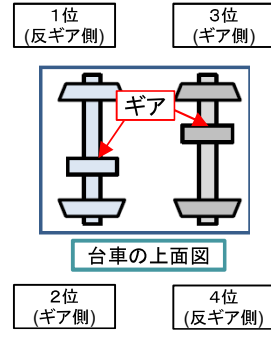
	前回評価委員会時(H28.11)	コスト削減を反映 (供用期間中は当該部品交換不要)
トータルコスト	約3.1倍	約2.3倍(約1.9倍)
製造コスト	約2.0倍	約1.9倍
メンテナンスコスト	約4.6倍	約2.7倍(約1.8倍)

※) 参考までに、車両の供用期間中に車軸の交換が不要であると仮定した場合のコストは約1.7倍と見込まれた。

※)「高速走行安定性」については、検証走行試験の結果をもとに、必要な高速走行安定性を維持できる走行距離を予測したところ、約50万～約100万キロと見込まれたことから、耐久走行試験に移行する場合には、走行試験中に適切な頻度で回転ガタの測定等を行う必要がある。1

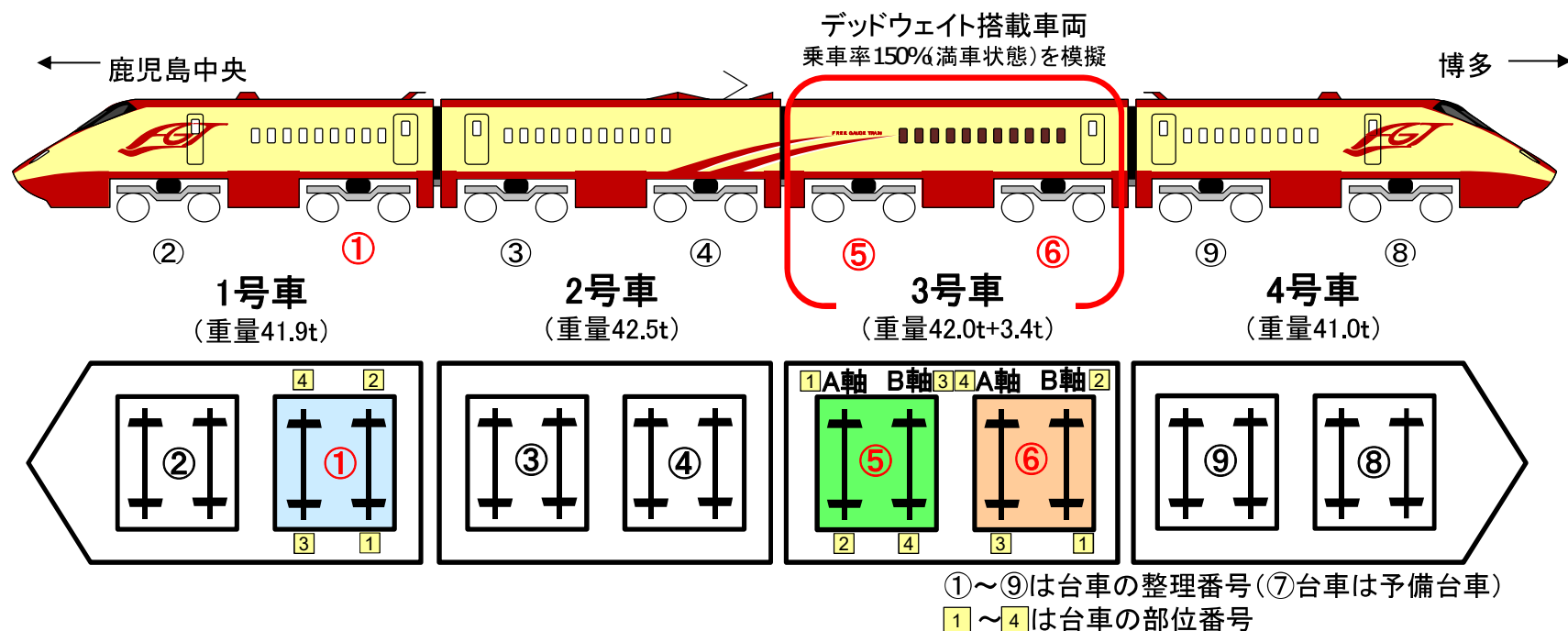
車軸の摩耗量と走行距離の目安について

別表

	摩耗平均値（半径）と走行距離の目安				備考
	部位	摩耗量	走行距離推定		
			標準軌	（新在換算）	
⑤台車 （150%乗車）	1位	0.6 μ m	約94万km	（約141万km）	
	2位	—※	—		—※：摩耗は確認されず
	3位	—※	—		—※：摩耗は確認されず
	4位	2.5 μ m	約23万km	（約35万km）	すべり軸受の形状不整による応力集中を確認
⑥台車 （150%乗車）	1位	0.2 μ m	約356万km	（約534万km）	
	2位	0.9 μ m	約66万km	（約98万km）	
	3位	1.6 μ m	約36万km	（約54万km）	
	4位	—※	—		—※：摩耗は確認されず
①台車 （空車状態）	1位	—※	—		—※：摩耗は確認されず
	2位	0.7 μ m	約78万km	（約117万km）	
	3位	0.6 μ m	約97万km	（約146万km）	
	4位	0.5 μ m	約124万km	（約185万km）	
【参考】 算出方法等	※各台車の1～4位（右図）の各部位について、非接触部と接触部の差を算出 接触部：軸方向7点（①～⑦）における各円周方向4点（①～④）の合計28点の平均値 非接触部：軸方向1点における円周方向4点（①～④）の合計4点の平均値				
	   				

車軸の摩耗量を測定した台車について

○車両重量、車軸の潤滑油の種類及び給脂頻度の異なる3台車について車軸等の摩耗測定を実施
(すべての車軸について、外観(目視、触診)により異常な摩耗がないことを確認済)



		①台車	⑤台車	⑥台車
車両重量		空車状態	乗車率150%相当	
車軸の潤滑油	種類	タイプ I (従来型)	タイプ II【A軸】 タイプ I (従来型)【B軸】	タイプ I (従来型)
	給脂頻度	3千km走行毎		6千km走行毎【A軸】 9千km走行毎【B軸】

※ タイプ I : アルバニアグリス(従来からの潤滑油)、タイプ II : スタミナグリス(今回試用した潤滑油)

コスト削減策の検討結果について



FGT台車

軌間可変輪軸(車軸+車輪)

※平成28年11月時点の前提

【車輪スリーブ】
・車輪の交換時に廃棄する前提

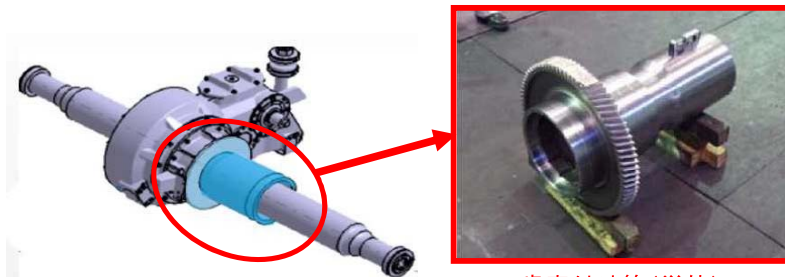


【歯車付外筒】
・車軸の交換時に廃棄する前提

その他、中間歯車、ギヤケース等も車軸交換時に廃棄する前提

歯車付外筒の再利用

車軸を定期的に交換する場合でも、駆動装置(歯車付外筒等)を再利用することを検討し、3回まで(車軸の交換周期を60万キロと設定すると、交換周期240万キロ)の再利用が可能と確認。



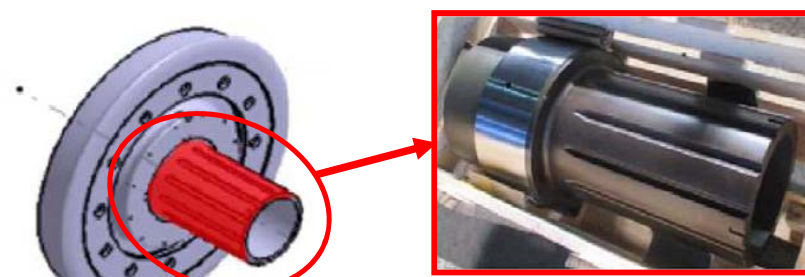
車軸(駆動装置付)

※) 駆動装置付: 歯車付大筒、ギヤケース等)

歯車付外筒(単体)

車輪スリーブの再利用

車輪を定期的に交換する場合でも、車輪スリーブを再利用することを検討し、1回(車軸の交換周期を60万キロと設定すると、交換周期120万キロ)の再利用が可能と確認。



車輪(スリーブ付)

スリーブ(単体)

※中間歯車、ギヤケース等については、車軸を定期的に交換する場合でも、車両の供用期間中(15年間、600万キロ走行)の再利用が可能と確認

車軸の摩耗対策について

1. 前回委員会(H29.7)において、耐久走行試験に移行する場合は、車軸のメッキ厚の増加など、車軸の交換周期を延伸するための新たな対策を立案し、その効果を確認することが必要と評価を受けた。
2. これを受け、車軸のメッキ厚を増加(20 μ m $\Rightarrow$ 50 μ m※)した場合の影響を検証した。その結果は以下のとおり。

① 車軸とすべり軸受との間の圧力(接触面圧)

数値解析を行った結果、メッキ厚を50 μ mに増加しても接触面圧は変わらないことを確認した。

② メッキ厚増加の施工状態

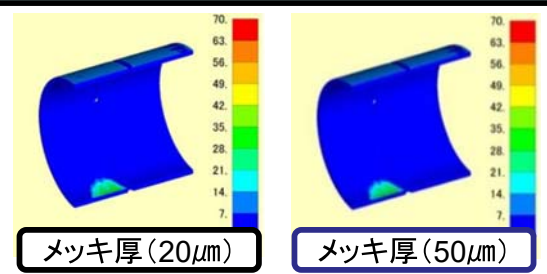
増厚後の車軸の寸法やメッキ表面の粗さを計測した結果、良好に施工できることを確認した。

③ 疲労強度

文献調査や過去の試験結果に基づく検討からは、必要な疲労強度を有していた。引き続き、現在製作中の試験軸を用いた回転曲げ疲労試験により疲労強度を最終検証する。

※ メッキ厚を50 μ mとする理由: 前回の検証走行試験の結果、最も摩耗が生じた台車でも60万キロの走行を可能とするためには、約50 μ mのメッキ厚が必要と推定。

数値解析結果



経済性について

F G Tの経済性については、前回委員会での評価のとおり、一般の新幹線に比べ、製造コストは約1.9倍、メンテナンスコストは約2.7倍、トータルコストは約2.3倍、歯車付き外筒及び車輪スリーブを車両の供用期間中は交換不要と仮定した場合のトータルコストは約1.9倍と見込まれる。

FGTの経済性の検討結果
(一般の新幹線との比較)

【軌間可変技術評価委員会(H29.7.14)資料再掲】

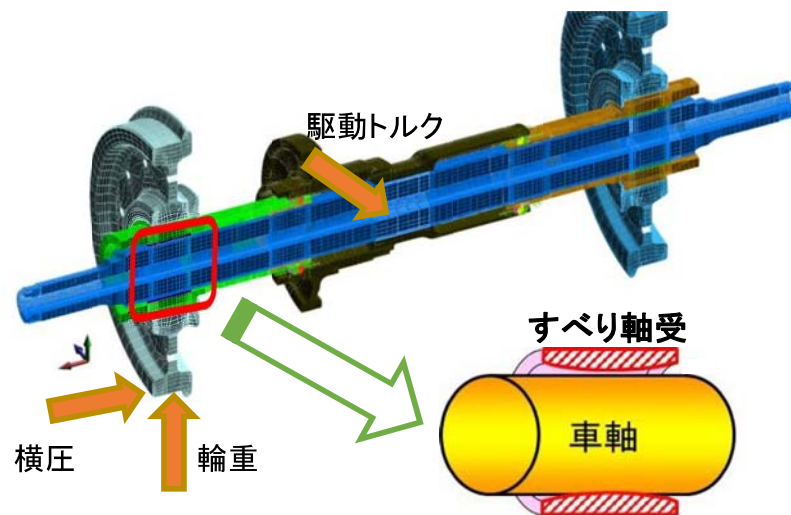
	前回評価委員会時(H28.11)	コスト削減を反映 (供用期間中は当該部品交換不要)
トータルコスト	約3.1倍	約2.3倍 (約1.9倍)
製造コスト	約2.0倍	約1.9倍
メンテナンスコスト	約4.6倍	約2.7倍 (約1.8倍)

- 車軸のメッキ厚の増加に係る影響については、上記のとおり回転曲げ疲労試験を行い最終的に確認するが、これまでの検討・検証の結果、特に問題はないと評価。
- 耐久走行試験に移行する場合は、上記の回転曲げ疲労試験後に、メッキ厚50 μ mとした実際の試験用車軸を製作し、検証走行試験などにより耐久性がどの程度なのかの検証をするなど、その効果を確認する必要がある。

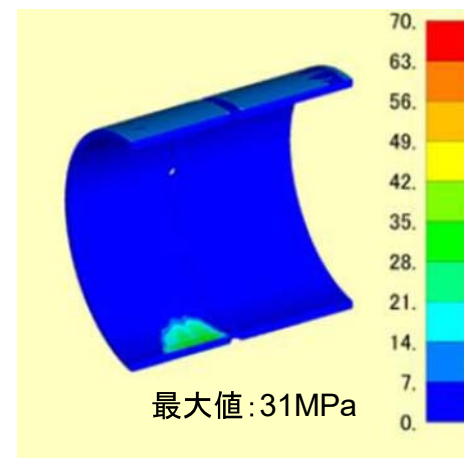
①車軸とすべり軸受との間の圧力の検証結果

検証内容・結果

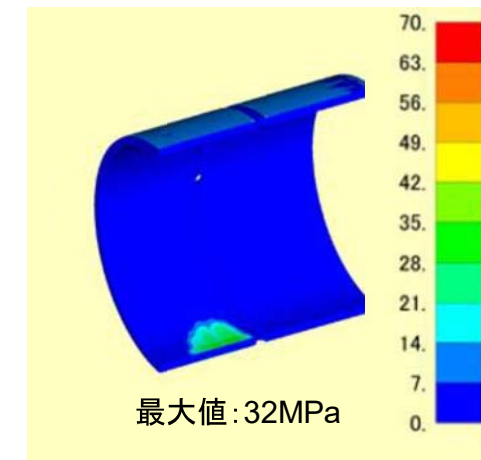
- 車軸のメッキ厚を増加することにより、すべり軸受との接触状態が変わると、走行時の摩耗の状況に影響を及ぼす可能性がある。
- このため、数値解析により、メッキ厚を増加した車軸とすべり軸受との間の圧力（接触面圧）の変化を、メッキ厚（ $20\mu\text{m}$ 、 $50\mu\text{m}$ ）、車輪位置（標準軌側、狭軌側）、輪重の大きさ（静止状態、輪重変動状態）の条件を変えて検証。
- その結果、メッキ厚を $50\mu\text{m}$ に増加しても、 $20\mu\text{m}$ と比べて、接触面圧の最大値や面圧の分布状況は変わらないことを確認した。このため、走行時の車軸とすべり軸受の接触状態は、メッキ厚を増加しても変わらないものと推定。



解析モデル（車軸、車輪等をモデル化）



メッキ厚 $20\mu\text{m}$



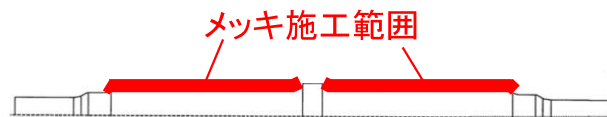
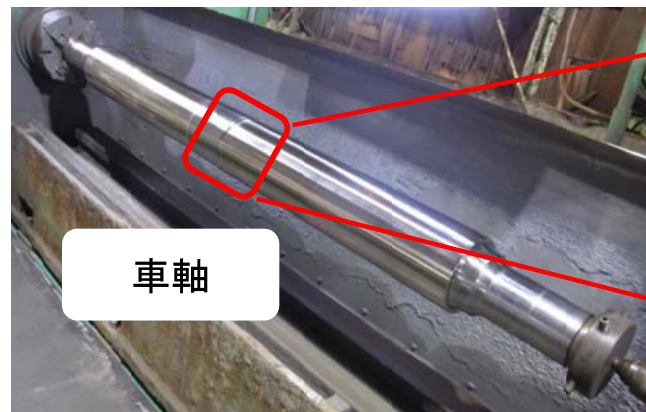
メッキ厚 $50\mu\text{m}$

すべり軸受の面圧分布の一例（数値解析結果）

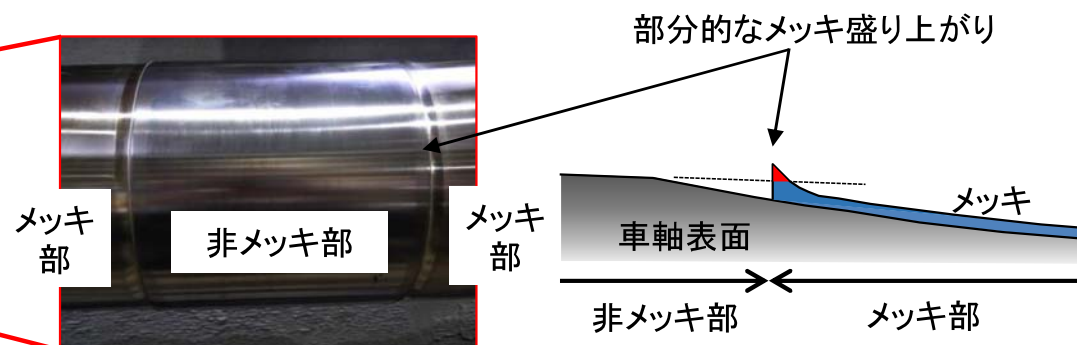
②メッキ厚増加の施工状態の検証結果

検証内容・結果

- FGT用の実物大のモデル車軸を用いて、 $50\mu\text{m}$ のメッキ処理（ニッケルボロンメッキ、施工管理値 $50\sim 60\mu\text{m}$ ）を行い、メッキ後の車軸の寸法やメッキ表面粗さ（表面の凹凸）を計測してメッキ増厚の施工状態を検証した。
- その結果、メッキ厚は施工管理値（ $50\sim 60\mu\text{m}$ ）の範囲内にあり、また表面粗さも基準値内にあったことから、良好に施工できることを確認。
- なお、メッキ部の端部において、部分的なメッキ盛り上がり認められたため、実際の車軸にメッキ施工を行う場合には、メッキ部と非メッキ部の位置の調整等を行い、当該盛り上がりの影響がでないようにする必要がある。



メッキ施工後（メッキ厚 $50\mu\text{m}$ ）の車軸の状況



メッキ境部のメッキ盛り上がりの状態



メッキ部と非メッキ部の位置の調整（マスキング位置の見直し）や補助電極の追加※等により対応

※車軸のメッキ施工に用いている電解メッキでは、電流が集中する部分でメッキが厚くなりやすいため、補助的に電極を追加して電流を制御しメッキの厚さを抑制する。

検証内容・結果

- 金属材料の回転曲げ疲労強度は一般にメッキ厚の増加に伴い低下する傾向があるため、FGTの車軸のメッキ厚を増加する場合においても、車軸が必要な疲労強度を有するかどうか確認する必要がある。
- 現在のFGTの車軸については、過去の疲労強度試験※¹に基づき、 $20\mu\text{m}$ のメッキ施工により、疲労強度がメッキがない場合に比べて11%低下することを考慮して設計、製造されてきた。

※¹ 軸径 7.8mm の試験軸を用いた試験(小野式回転曲げ疲労試験)。実際のFGTの車軸径は 187mm であり、軸径の小さい試験軸での試験では、メッキ厚の増加の影響を過大に評価している可能性あり。

- このため、メッキ厚を $50\mu\text{m}$ に増加しても、疲労強度の低下が11%以内であることを確認する必要があり、文献調査等による検討や、より精度の高い疲労試験(軸径 45mm の試験軸※²)による検証を行う。

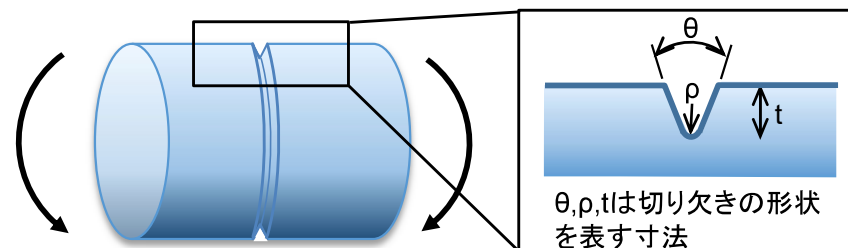
(現在、試験機の改修および試験軸の製作中であり、準備出来次第、疲労試験を実施。)

※² 既往の研究によれば、試験軸の軸径が 45mm 程度あれば、実際の車軸(軸径 187mm)に近い疲労強度の評価が可能。

- 文献調査に基づき、一般的な金属材料(丸棒)の切り欠きによる疲労強度の低下率に関する算定式を用いて、試験軸および実際の車軸でのメッキ厚の影響を試算した。

その結果、軸径 45mm の試験軸のメッキ(厚さ $50\mu\text{m}$)の疲労強度の低下率は、軸径 7.8mm の試験軸のメッキ(厚さ $20\mu\text{m}$)とほぼ変わらない結果であった。

また、車軸(軸径 187mm)のメッキ(厚さ $50\mu\text{m}$)では、疲労強度の低下率はさらに小さい結果であった。

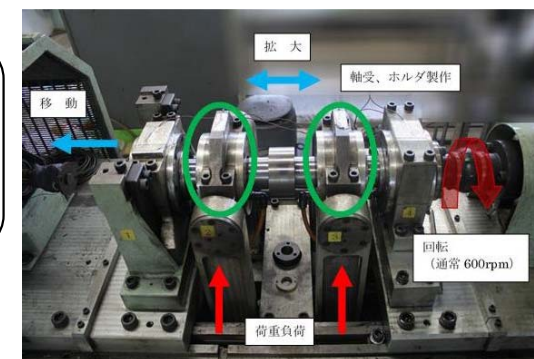


切り欠き詳細図

切り欠きをメッキにき裂が発生した状態とみなして、メッキによる疲労強度の低下率を試算。

回転曲げを受ける切り欠きを有する丸棒

(金属材料:疲労強度の設計資料(1)(日本機械学会)を参考)



回転曲げ疲労試験装置

- 引き続き、現在製作中の試験軸(軸径 45mm)を用いた回転曲げ疲労試験により疲労強度を最終検証する。

FGT	フル規格	ミニ新幹線
現時点で、安全性の観点では車軸のメッキ厚の増加等の新たな摩耗対策を進める必要がある。 ※技術開発が順調に推移した場合、西九州ルートへの導入は平成39年度(2027年度)半ばとなる見込み。 ※JR九州は、技術評価委員会の評価結果を踏まえ、コスト面で収支採算性が成り立たないため、西九州ルートへの導入は困難と表明している。	JR5社で運行実績あり	JR東日本においては運行実績あり

<FGT技術開発の今後の想定スケジュール>

H29年度 (2017)	H30年度 (2018)	H31年度 (2019)	H32年度 (2020)	H33年度 (2021)	H34年度 (2022)	H35年度 (2023)	H36年度 (2024)	H37年度 (2025)	H38年度 (2026)	H39年度 (2027)
★軌間可変技術評価委員会			★軌間可変技術評価委員会							
	検証走行試験等									
		★軌間可変技術評価委員会								
		耐久走行試験								
				★軌間可変技術評価委員会						
		耐久走行40万km			FGT量産先行車設計・製作		走行試験 訓練運転			
							FGT量産車設計・製作、 訓練運転			