

鉄道事故調査報告書

株式会社ゆりかもめ 東京臨海新交通臨海線船の科学館駅構内 列車脱線事故

東日本旅客鉄道株式会社 川越線指扇駅～日進駅間 列車火災事故
(踏切障害に伴うもの)

東日本旅客鉄道株式会社 川越線日進駅～指扇駅間 列車脱線事故

弘南鉄道株式会社 弘南線平賀駅構内 列車脱線事故

平成20年2月29日

航空・鉄道事故調査委員会

本報告書の調査は、本件鉄道事故に関し、航空・鉄道事故調査委員会設置法に基づき、航空・鉄道事故調査委員会により、鉄道事故の原因を究明し、事故の防止に寄与することを目的として行われたものであり、事故の責任を問うために行われたものではない。

航空・鉄道事故調査委員会

委員長 後藤 昇 弘

I 株式会社ゆりかもめ東京臨海新交通臨海線
船の科学館駅構内 列車脱線事故

鉄道事故調査報告書

軌道経営者名：株式会社ゆりかもめ

事故種類：列車脱線事故

発生日時：平成18年4月14日 17時05分ごろ

発生場所：東京都江東区

東京臨海新交通臨海線 船の科学館駅構内

平成20年 1月31日

航空・鉄道事故調査委員会（鉄道部会）議決

委員長 後藤昇弘

委員 楠木行雄（部会長）

委員 中川聡子

委員 松本陽

委員 宮本昌幸

委員 富井規雄

1 鉄道事故調査の経過

1.1 鉄道事故の概要

株式会社ゆりかもめの東京臨海新交通臨海線^{とよす}豊洲駅発新橋駅行き6両編成の第1612列車は、乗務員が乗務しない自動運転により、平成18年4月14日（金）、テレコムセンター駅を定刻（17時00分）に出発し、次の船の科学館駅に到着する際に所定停止位置の手前で停止したため、指令員によって所定停止位置に移動させるための遠隔操作が行われ、同駅に定刻より約3分遅れて到着した。列車は、同駅を出発した直後に電車線が停電するとともに非常ブレーキが作動して停止した。

その後、現場に到着した係員が確認したところ、列車は4両目（車両は前から数え、前後左右は列車の進行方向を基準とする。）が左に傾き、車体が走行路左側壁に設置されている電車線に接触しており、4両目第1軸の左車輪が車軸から外れて脱線していた。

列車には乗客約230名が乗車していたが、死傷者はなかった。

1.2 鉄道事故調査の概要

1.2.1 調査組織

航空・鉄道事故調査委員会は、平成18年4月14日、本事故の調査を担当する
主管調査官ほか2名の鉄道事故調査官を指名した。

また、委員長、委員及び鉄道事故調査官を事故現場に派遣した。

関東運輸局は、本事故調査の支援のため職員を事故現場に派遣した。

本事故調査を行うにあたり、独立行政法人交通安全環境研究所の協力を得た。

1.2.2 調査の実施時期

平成18年4月14日、15日、17日	現場調査、車両調査及び口述聴取
平成18年5月2日、9日、16日	
19日、24日	現場調査及び車両調査
平成18年7月26日	車両調査
平成18年8月7日、29日	車両調査
平成18年9月29日、30日	車両調査

1.2.3 原因関係者からの意見聴取

原因関係者から意見聴取を行った。

2 認定した事実

2.1 運行の経過

事故に至るまでの経過は、株式会社ゆりかもめ（以下「同社」という。）の運行管理装置、ATO（Automatic Train Operation）車上モニタ装置及び電力遠隔監視装置の記録並びに指令員及び事故後に現場に駆けつけた複数の同社係員（以下単に「係員」という。）の口述によれば、概略次のとおりであった。

(1) 運行管理装置、ATO車上モニタ装置及び電力遠隔監視装置の記録

同社の豊洲駅発新橋駅行き第1612列車（以下「本件列車」という。）は、平成18年4月14日（金）、乗務員が乗務しない自動運転により、豊洲駅を定刻（16時47分30秒）に出発した。

本件列車はテレコムセンター駅を定刻（17時00分30秒）に出発し、次の船の科学館駅に到着する際、回生ブレーキを使用中に4両目の車輪空転が検

知されたことにより「主制御器軽故障情報」（2.5.4参照）が指令所に送出され、17時02分40秒ごろ、同駅の所定停止位置手前のインチング域（インチングに関しては2.4.4参照）で停止した。

本件列車は、指令所からの3回のインチング指令を受けた後、定刻から約3分遅れて17時04分50秒ごろに同駅の所定停止位置に達して停止し、17時05分20秒ごろに自動制御により同駅を出発した後の17時05分30秒ごろに電車線が停電するとともに車内の非常停止スイッチが操作されて非常ブレーキが作動し、17時05分40秒ごろに、出発位置から約50m先（新橋駅起点8k360m。以下「新橋駅起点」は省略）に停止した。

なお、時刻は各記録装置に記録されていた時刻を補正したものである。

(2) 指令員の口述

17時02分ごろ、指令所では警報が鳴動し、制御卓モニターには本件列車にかかる「主制御器軽故障」及び「インチング域停止」の警報メッセージが表示された。駅ホーム監視モニターで状況を確認したところ、本件列車は船の科学館駅ホームで停止し、ホームドアは開いていないことを確認したが、停止位置が所定位置かどうか判別できるほど停止位置はずれていなかった。

まずは、本件列車を所定停止位置に停止させてドアを開けることが優先と考えて、本件列車に対してインチング操作を行い、3回目の操作直後に、本件列車は所定停止位置に達して、ドアが自動制御により開いた。また、列車が「主制御器軽故障」で駅に停止している場合はリセットの操作を試みることと規定されているので、規定に従いリセットの操作を行ったところ「軽故障回復」が表示された。

乗客の乗降が終了して本件列車は自動制御によりドアが閉じられて同駅を出発した後、事故現場を含む上り線のお台場海浜公園駅～青海駅間の電車線が停電となって本件列車は停止した。

船の科学館駅には係員はいないので、最初の17時02分ごろの警報のときにお台場海浜公園駅及び台場駅の係員に対して、船の科学館駅に向かうよう指示したが、インチング操作により本件列車が所定停止位置に停止したこと及び制御卓モニターに「軽故障回復」が表示されたことから、係員にはいったん待機を指示していたが、17時06分ごろ、再度、係員に対し同駅に向かうよう指示した。

その後、現場に到着した係員から、4両目が左に傾いている旨の連絡が入ったことから、現場の係員に対して、台場駅～船の科学館駅間は停電になっていることを伝え、乗客を駅に誘導するよう指示した。

(3) 現場に駆けつけた複数の係員の口述

17時10分ごろに最初の係員が事故現場に到着した。係員は、乗客に負傷者のいないことを確認し、また4両目が左に傾いて3両目と4両目の間の貫通路に大きな段差があったので、これらのことを指令に報告した。

指令から、台場駅～船の科学館駅間は停電になっていることの連絡と乗客の誘導の指示があったことから、その後駆けつけた係員とともに乗客を駅に誘導することとした。

電車線が停電となっていて感電する恐れはないことから、約230名の乗客には本件列車の最前部及び最後部の貫通路から降車して走行路を歩いてもらい、台場駅及び船の科学館駅まで誘導することとした。

また、車両の床下を点検した係員は、本件列車の4両目第1軸の左車輪が車軸から外れて走行路左側の溝に落下して脱線していることを確認した。

なお、本事故の発生時刻は17時05分ごろであった。

(付図1、2、3、4参照)

2.2 人の死亡、行方不明及び負傷

なし

2.3 鉄道施設及び車両の損傷に関する情報

2.3.1 鉄道施設の損傷状況

事故現場付近左側の側壁に設置されている電車線、走行路左側の溝に設置されているケーブルラック等が損傷した。なお、電車線は電車線同士が短絡した状態であった。

(付図4参照)

2.3.2 車両の損傷状況

4両目第1軸左側のハブ（車軸にホイールを接続する部品。2.5.6参照。以下「本件ハブ」という。）が破断し、本件ハブとこれに締結されているホイール（以下「本件ホイール」という。）が分離していた。

本件ハブは、ホイールとの接続部であるフランジ部（付図7参照）が、付け根部分において円環状に破断してボス部から分離して本件ホイールに締結されたまま残っていた。

4両目前台車（以下「本件台車」という。）の案内バー¹下面等に擦過痕が認め

¹「案内バー」とは、案内装置の一部で、左右の案内輪を接続して案内軌条に沿って左右に動く案内輪の動きを走行輪の操舵機構に伝える部品である。

られた。

(付図4、7、9、10参照)

2.4 鉄道施設に関する情報

2.4.1 概要

同社の東京臨海新交通臨海線の本線は全線が複線の高架式構造である。鉄道の種類は案内軌条式鉄道、電気方式は三相交流600V、集電方式は側方集電式で走行路の側壁に電車線が設置してある。

運転方式は、列車に乗務員（運転士及び車掌）が乗務しない自動運転方式であり、運転中は指令所で指令員により各列車の運行状況及び各駅プラットフォームの状況が監視されている。列車に異常が発生した場合には、状況に応じて指令所の警報が鳴動したり、指令所の制御卓モニターに異常内容が表示され、指令員が対応することとされている。

駅のプラットフォームにはホームドアが設置されており、列車が所定停止位置に停止した場合にホームドア及び車両の旅客乗降口のドアが自動的に開閉する構造となっている。

2.4.2 事故現場付近の線路の概要

事故現場付近は直線で、勾配はなく平坦（0%）であり、上り線の電車線は線路の左側壁に設置されている。

走行路はコンクリート製で、走行路の左側は溝となっており、溝には電線を収納するケーブルラックが敷設されている。

船の科学館駅のプラットフォームは長さ54mであり、プラットフォームの線路方向の両端には走行路に通じる階段と、通常は施錠されている非常用のドアが設置されている。

2.4.3 記録装置等の概要

指令所に設置されている運行管理装置には、各列車の運行状況のほか、各列車から送出される故障情報等が時刻とともに記録される。

また、指令所に設置されている電力遠隔監視装置には、変電所の主要な装置の動作状況が時刻とともに記録され、電車線の停電が発生した場合には指令所で警報が鳴動する。

2.4.4 インチング機能の概要

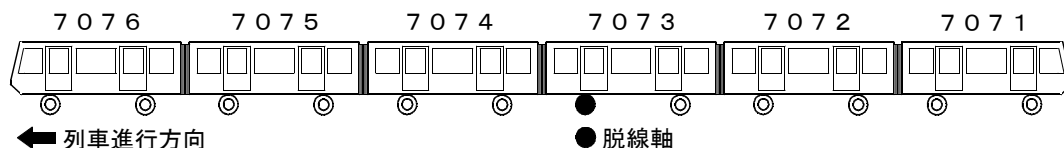
プラットフォーム所定停止位置の手前10mの区間をインチング域といい、列車が

何らかの原因によりインチング域で停止した場合には、指令所に警報が鳴動するとともに指令所の制御卓に「インチング域停止」情報が表示され、指令員は指令所でインチング操作を行う。インチング操作が行われると指令所から列車に対して「インチング指令」が送出され、列車は低速で走行し所定停止位置に停止するように自動制御される。

2.5 車両に関する情報

2.5.1 概要

車種	交流電車（三相交流600V）
編成両数	6両
編成長	54m（先頭から4両目第1軸までの距離29m）
編成定員	352名（座席定員170名）
記号番号	07編成



車両質量及び定員

質量 \ 番号	7076	7075	7074	7073	7072	7071
空車質量 (t)	10.8	10.6	10.5	10.5	10.6	10.8
定員(座席定員) (人)	57(27)	59(28)	60(30)	60(30)	59(28)	57(27)
定員乗車質量 (t)	13.9	13.8	13.8	13.8	13.8	13.9

(付図5参照)

2.5.2 車両の検査等に関する情報

本件列車の各車両に対する検査等の状況は以下のとおりである。

新造	平成6年
営業開始	平成7年11月
全般検査	平成17年1月28日
月検査	平成18年1月27日

なお、本件列車の各車両に対する直近の各検査記録には、走行装置に関する異常は記載されていなかった。

2.5.3 記録装置の概要

車両には、列車の速度、駅からの走行距離や車輪の空転等の異常情報を時刻とともに記録するATO車上モニタ装置が設置されている。

2.5.4 運転制御装置

力行運転中や回生ブレーキ使用中に車輪の空転が検知された場合には、「主制御器軽故障情報」が、ATO車上モニタに記録されるとともに指令所の運行管理装置に送出される。

2.5.5 台車に関する情報

製造事業者 台車製造当時（平成6年）は株式会社新潟鐵工所、平成15年以降に事業を新潟トランス株式会社（以下「台車製造社」という。）

型 式 N T S - 5 2 A

車 軸 数 1 軸

案内方式 側方案内式

操舵方式 2案内輪式走行輪ステアリング方式

ハ ブ 車軸の左右端には車軸とホイールを接続するためのハブが装着されている。

事故後の4両目の車体台枠及び本件台車には、事故の要因となるような異常は認められなかった。

（付図6、7、8参照）

2.5.6 ハブに関する情報

2.5.6.1 材質及び形状に関する情報

(1) 材質

材質は球状黒鉛鋳鉄のFCD45である。

FCD45は、本件ハブ製造当時（平成6年）のJIS-G-5502に規格が定められており、主な規格値（以下「JIS規格値」という。）は以下のとおりである。なお、この規格値は別鑄込み供試材²から切り出した試験片に対するものである。

引張り強さ 441MPa以上

²「別鑄込み供試材」とは、製品と同種の鑄型を用いて製品と同一の条件で鑄造する供試材をいい、供試材の形状及び寸法が規定されている。

耐力 ³	284 MPa以上
伸び	10%以上
硬さ（ブリネル硬さ ⁴ ）	143～217（参考値）
黒鉛球状化率 ⁵	70%以上

(2) 形状

ハブは、ホイールと10組のハブボルトとホイールナットによってフランジ部（付図7参照）において締結され、ハブボルトはハブボルト穴に圧入される構造となっている。フランジ部は、外径335mm、厚さ17mm（ボス部（付図7参照）からの立ち上がり部は22mm）、ハブボルト穴径は22mm、ハブボルト穴中心線の直径は285.75mmとなっている。

フランジ部のボス部からの立ち上がり箇所の断面形状は、外側（ホイールと接触する側）は半径1mmの円弧形状、内側は半径15mm及び半径5mmの2段階の円弧形状となっている。

詳細形状を付図7及び付図8に示す。

(3) ハブの製造方法に関する情報

台車製造社によれば、本件ハブについては溶鉄を鋳型に流し込み、自然冷却によって鋳造した後、そのまま旋盤による切削加工を行っており、鋳造時に凝固速度の違いによって発生する残留応力⁶を除去するための焼きなまし処理は行っていないとのことであった。

2.5.6.2 ハブの強度計算に関する情報

台車製造社から提出された、本件ハブに関する強度計算書では、以下の前提条件で車両の振動加速度等を考慮した安全率は、破断箇所付近では、降伏安全率は2.68、疲労安全率は2.92とされ、いずれも社内基準としている1.3を超えているというものであった。しかしながら、同計算書には、計算の前提条件として、ホイールをハブに装着する際に、ホイールナットの締め付けによって発生する応力に関する記載はなかった。

なお、台車製造社によれば、ハブとホイールとの接触面には隙間が生じないよう

³「耐力」とは、明確な降伏点を示さない材料において、0.2%の永久歪みを生じるときの応力をいい、降伏応力と同じ意味で用いられる。

⁴「ブリネル硬さ」とは、球形の圧子を試験材料に一定の力で押し付けて窪みを付け、窪みの直径から測定した硬さの値である。

⁵ 球状黒鉛鋳鉄は鋳造時に析出する黒鉛を球状化することにより強度を高めた鋳鉄であり、「黒鉛球状化率」の増加に伴い引張り強さや靱性の程度を示す伸びが増加する。

⁶「残留応力」とは、物体が外力の作用を受けた後、外力を取り除いても物体内に残留する応力をいう。

な加工精度を製作時に確保しており、設計においてはホイールナットの締め付けによる変形によって発生する応力は想定していなかったとのことであった。

前提条件	材料強度	引張り強さ	4 4 1 MPa
		耐力	2 8 4 MPa
		疲労限度	2 2 6 MPa
荷 重	満車質量		1 8 t

2.5.6.3 本件ハブの使用状況等に関する情報

同社によれば、本件ハブは平成7年11月の開業前の試運転から使用され、本事故発生時の累積走行キロ数は899,909kmとのことであった。

同社では、ハブについては3年に1度の定期検査時に、ホイールを取り外して目視検査を実施しており、本件ハブについては平成17年1月の定期検査時に、本件ハブの累積走行キロ数787,222kmの時点で実施され、このときの記録に異常は記載されていなかった。

同社では、他社の案内軌条式鉄道においてハブのき裂が発見されたという情報を得て、平成17年11月以降、ハブの定期検査時には、上記の目視検査に加え探傷検査を行うこととしていた。しかし、本件ハブについては平成17年1月に定期検査を終えており、探傷検査については次回（平成20年）に予定している定期検査から行うこととして、本事故発生時までには実施されていなかった。

2.5.7 タイヤ及びホイールに関する情報

2.5.7.1 タイヤに関する情報

形 式	3 1 5 / 7 0 R 2 0
外 径	9 4 0 mm
幅	3 2 6 mm
荷重時タイヤ半径（空車時）	4 4 5 mm

(付図6参照)

2.5.7.2 ホイールに関する情報

形 式	2 0 × 8 . 5 0
形状寸法	付図6及び付図8のとおり
材 質	S M 4 0 0

2.5.7.3 同社におけるホイールのハブへの脱着に関する情報

同社における、ホイールのハブへの脱着の状況については、同社によれば概略以

下のとおりであった。

走行距離が約7万～10万km（タイヤメーカーにより異なる）ごとにホイールをハブから取り外してタイヤの位置を交換している。ホイールをハブに装着するときのホイールナットの締め付けは、トルクレンチを使用して540N・m（55kgf・m）のトルクで締め付けることとしている。

また、ホイールをハブから取り外したときにはホイール内側（ハブと接する側）に錆が認められることがあるが、ホイールを再度取り付けるときに錆を落とすまでの取り扱いとはしていない。

なお、本件ホイールが本件ハブに装着されたのは平成17年11月であった。

2.6 気象に関する情報

当時の事故現場付近の天気 曇り

2.7 事故現場等に関する情報

2.7.1 本件列車の停止位置及び脱線状況

本件列車は先頭位置が8k360m付近（船の科学館駅上り線台場駅方ホーム端8k411mから先へ約49m）、脱線した4両目第1軸左車輪が8k389m付近（同ホーム端から先へ約22m）、最後部が8k414m付近（本件列車後端部が同ホームに約3m掛かった状態）で停止していた。

4両目第1軸左車輪は車軸からはずれ、走行路左側の溝に落下して脱線していた。なお、タイヤはパンクしていなかった。

本件台車の案内バーが走行路に接触していた。

4両目車体の前端部が左に約30cmずれて、車体は左側壁に設置されている電車線に接触しており、電車線が損傷していた。

（付図3、4参照）

2.7.2 事故現場付近の痕跡の状況

- (1) 8k480m付近から8k439m付近の走行路に、車輪1回転分に相当する約3mピッチで車輪が蛇行したと見られる痕跡が認められた。
- (2) 8k439m付近に車輪が走行路から左に外れて溝に落下したと見られる痕跡が認められ、そこから8k389m付近にかけて溝に敷設されたケーブルラックが連続して損傷していた。
- (3) 事故現場付近の走行路上には、列車の走行に支障を及ぼすような異常はなかった。

（付図3参照）

2.8 本件ハブの調査

同社は、本件ハブの材料試験及び電子顕微鏡撮影、走行試験による応力測定等を実施した。本報告書中2.8.3及び2.9～2.11で記述する調査にあたっては、同社から提出された測定結果等の資料を参考とした。

2.8.1 本件ハブの破断状況

本件ハブのフランジ部及びボス部において円周方向の位置を特定するため、10ヶ所のハブボルト穴にNo.1～10の番号を付した。以下、各部位を単にNo.1、No.2のように記述する。

本件ハブのフランジ部は本事故時には2.3.2で記述したとおり、ハブボルト及びホイールナットで本件ホイールに締結された状態であったが、ハブボルト及びホイールナットを外したところ、No.10～1～3、No.4、No.5、No.6～8、No.9の5個の破片に分断されていた。

本件ハブは、フランジ部外側（ホイールと接触している側）の半径1mmのフランジ立ち上がり部（以下「R1部」という。）付近とフランジ部内側の半径5mmの立ち上がり部（以下「R5部」という。）とを結ぶ面で破断していた。

（付図9、10参照）

2.8.2 破断面の目視観察

本件ハブの破断面について目視による観察を行った。

本件ハブのボス側破断面には、No.1～4付近において、いずれもR5部付近にのみ錆の発生が認められた。

ハブ円周方向の破断面全体については、No.9～10～1～5付近の各破断面は10角形を構成するように直線的であり、対峙するNo.6～8付近の破断面は連続した円弧のようになっていた。

（付図9、10参照）

2.8.3 破断面の電子顕微鏡による観察

本件ハブのボス側破断面についてNo.1付近、及びNo.1と相対峙するNo.6付近を、走査型電子顕微鏡を用いて観察した。

(1) No.1付近

破断面は事故後に分断した破断面同士が擦れたと見られる損傷に覆われて観察が困難な箇所が多かったが、観察が可能であった箇所は以下のとおりであった。

R 5 部付近の破断面に、疲労破壊の特徴とされるストライエーション（縞状模様）が観察された。

R 1 部付近の破断面は、低倍率では延性破壊⁷の特徴のように観察されたが、高倍率では延性破壊か疲労破壊かは明確に識別することができなかった。

(2) No.6 付近

破断面は全体的に破断面同士が擦れたと見られる損傷で覆い尽くされており、R 5 部では特徴的な模様は観察されなかったが、R 1 部においては延性破壊の特徴とされるディンプル破断面（多数の小さい窪みが見られる破断面）が観察された。

(付図 1 1 参照)

2.9 ハブの材質調査

2.9.1 化学成分分析

本件ハブ及び健全ハブ（本事故発生時に本件列車の 4 両目に使用されていて、累積走行キロ数が本件ハブと同程度であったハブ）の化学成分分析結果については以下のとおりであり、いずれも異常は認められなかった。

	炭素	ケイ素	マンガン	リン	硫黄	(単位:質量%)
本件ハブ	2.86	2.58	0.40	0.013	0.008	
健全ハブ	2.23	2.74	0.30	0.009	0.007	

2.9.2 黒鉛球状化率の測定

本件ハブのNo.1 付近破断面の R 5 部付近及び健全ハブの同一部位における黒鉛球状化の状況を付図 1 2 に示す。

本件ハブについては球状黒鉛が少なく粒径も粗大化していた。一方、健全ハブについては球状黒鉛が多く粒径も細粒化していた。

黒鉛球状化率を測定したところ本件ハブでは 5.5%、健全ハブでは 7.5%であった。FCD 45 の黒鉛球状化率の JIS 規格値は 70%以上とされており、本件ハブについては規格値を満たしていなかった。

2.10 ハブの材質の機械的性質に関する調査

2.10.1 引張り試験

本件ハブ及び健全ハブの各ボス部から試験片各 2 片を切り出して実施した引張り

⁷「延性破壊」とは、断面全体がかなり大きく永久変形した後に破壊することをいう。

試験の結果は以下のとおりであり、耐力はいずれの試験片も J I S 規格値を満足していたが、引張り強さ及び伸びについては、本件ハブの 2 片とも J I S 規格値を満たしていなかった。

試験片	耐力 (MPa)	引張り強さ (MPa)	伸び (%)
本件ハブ 1	3 0 4	4 2 7	8. 7
本件ハブ 2	3 0 1	4 1 3	7. 4
健全ハブ 1	3 1 3	4 4 3	1 7. 4
健全ハブ 2	3 0 7	4 4 8	2 0. 3
(J I S 規格値	2 8 4 以上	4 4 1 以上	1 0 以上)

(付図 1 3 参照)

2. 10. 2 硬さ測定

本件ハブ及び健全ハブについて、測定点をそれぞれ 5 点選定して実施したブリネル硬さ測定の結果、本件ハブについては 1 4 9 ~ 1 5 2、健全ハブについては 1 4 6 ~ 1 5 0 であり、いずれも J I S 規格値 (1 4 3 ~ 2 1 7) の範囲内であった。

2. 1 1 応力測定

2. 11. 1 残留応力測定

2. 5. 6. 1 (3) で記述したとおり、本件ハブは casting 後に casting 時の残留応力を除去するための焼きなまし処理を行っていないこと、及びフランジ部のような切削加工面には、切削によって残留応力が発生すると一般的に言われていることから、健全ハブのハブボルト穴近傍の R 5 部表面における残留応力を測定したところ - 1 9 9 MPa の圧縮応力が測定された。(応力は、プラス側が引張り、マイナス側が圧縮を示す。以下同じ。)

2. 11. 2 走行試験による変動応力測定

列車の走行によってハブに発生する応力を測定するため、本件列車と同一型式車両で編成した試運転列車により、新橋駅 ~ 豊洲駅間及び有明駅 ~ 車両基地間を営業時と同じ速度で 2 日間にわたり、営業終了後に走行試験を行った。1 日目は空車によって、2 日目は測定車両に 1 両あたりの乗車定員に相当する荷重 3 5. 3 k N を積載して行った。(以下 1 日目の測定を「空車時」、2 日目の測定を「定員乗車時」という。)

応力測定箇所は 4 両目第 1 軸左側ハブの R 5 部、R 1 部等の主要箇所とした。

なお、走行試験における応力測定では、ホイールナット締め付け後の状態で応力の 0 点校正を行ったことから、測定結果にはホイールナットの締め付けによってハ

ブに発生する初期応力は考慮されておらず、走行に伴って発生する変動応力のみを測定したものである。

また、変動応力の大きさは車輪1回転ごとに発生する変動応力の1/2の値（以下「応力振幅」という。）で評価することとした。

測定データは、車輪1回転ごとの応力振幅を1データとし、走行試験において採取した全てのデータを振幅別に分類して頻度解析を行い、この中から特異なデータを除外するため、95%点の値（全てのデータのうち95%がこの値以下に収まる値）を応力振幅の代表値とした。

定員乗車時の応力振幅は、R5部では102MPa、R1部では112MPaであった。

定員乗車時のR5部の測定波形の例を付図14に示す。

2.11.3 本件ハブと本件ホイールの摩耗状況

ハブとホイールのようにボルトで締結された接触面同士には、外部からの振動による微少な相対すべり振動によってフレッチング（fretting）摩耗が発生することがあり、この摩耗が大気中で発生した場合は、微細な酸化摩耗粉が発生すると言われている。

本件ハブ及び本件ホイールは、それぞれの接触面が摩耗しており、本件ハブ及び本件ホイールのいずれも外周側の摩耗量が大きかった。（付図15参照）また、本件ホイール内側（本件ハブに接触している側）には、ハブボルト穴付近から放射状に鉄錆様の粉が付着していた。（付図10参照）

さらに、同社で保管していた多数の使用中のハブ及びホイールにも本件ハブや本件ホイールと同様な摩耗や鉄錆様の粉の付着が見られた。

そこで、本件ハブ及び本件ホイールについて、車軸中心側から外周方向に10ヶ所の各ハブボルト穴中心を通過する断面における摩耗状況を測定した。

ハブについてはハブボルト穴周辺でホイールとは接していない部分（ハブボルト穴径は、ハブ側が22mmであるのに対しホイール側は接触面で28mmであり、ハブ側のボルト穴周囲約3mmはホイールと接しないこととなる。付図8参照）があるため、本件ハブについてはハブボルト穴周辺部と外周側の高低差を測定し、摩耗量とした。本件ホイールについてはハブと接触しない部分とハブと接触する部分との高低差を測定し、摩耗量とした。

本件ハブの摩耗量は0.46～0.66mmであり、平均値は0.56mmであった。本件ホイールの摩耗量は0.13～0.37mmであり、平均値は0.30mmであった。

（付図15、16、17参照）

2.11.4 ハブとホイールの締結によって発生する応力の測定

摩耗によってハブとホイールの接触面に隙間が発生した場合、それらをホイールナットで締め付けると、その隙間を密着させるようにハブ及びホイールが変形し、ハブ及びホイールに応力が発生するものと想定される。

このため、摩耗によって発生する隙間とホイールナットの締め付けによって発生する応力の関係を調査することとし、同社で保有しているハブ及びホイールを使用して、摩耗量の定量的な測定を行った後にホイールナットで締め付けることによって発生する応力を測定した。

2.11.4.1 ハブとホイールの摩耗量の定量的な測定

測定するハブは、新品ハブ及び使用中ハブをそれぞれ1個ずつ選定した。

新品ハブを以下「HN」とし、使用中ハブについては、摩耗量が大きいと見られるものを選定し、以下「H1」とした。

測定するホイールは、新品ホイールを1個、使用中ホイールを任意に2個選定した。新品ホイールを以下「WN」とした。

使用中ホイールのうち1個はハブとの接触面の錆を落としたもので、これを以下「W1」とし、もう1個はハブとの接触面の錆を落としていないもので、これを以下「W2」とした。

上記のハブ2個及びホイール3個を定盤上に水平に置き、各10ヶ所のハブボルト穴周辺において、摩耗が大きいと見られる外周側の高さ及び摩耗が小さいと見られる内周側の高さを測定し、外周側と内周側の高さの差を摩耗量とした。

(付図18参照)

2.11.4.2 ハブとホイールの隙間と応力の関係に関する調査

摩耗によって発生するハブとホイールの隙間と、ホイールナットを締め付けることによって発生する応力との関係を調査するため、2.11.4.1で記述したハブ2個及びホイール3個を使用し、表の6通りの組合せについて、同社で使用しているトルクレンチを使用し、トルクレンチとホイールナットの間にはトルク計を挿入して、トルクレンチの指示が同社で通常締め付けているトルクである $540\text{ N}\cdot\text{m}$ ($55\text{ kgf}\cdot\text{m}$)となるように、ホイールナットを締め付けたときの各10ヶ所のハブボルト穴近傍のR5部の応力を測定した。なお、今回の測定におけるトルク計の指示値はトルクレンチの指示値より約10%小さくなっており、トルクレンチの指示値が約 $540\text{ N}\cdot\text{m}$ ($55\text{ kgf}\cdot\text{m}$)のときはトルク計の指示値は約 $500\text{ N}\cdot\text{m}$ であった。本報告書でのトルクの記述には、以下、特に記述しない限りトルク計で指示された値

を使用した。

ハブとホイールの隙間は、2.11.4.1で記述した方法により測定したそれぞれの摩擦耗量から算出したものであり、マイナスとなる場合もあるが、あくまで実際に発生している隙間の目安として示したものである。

各組合せごとのハブボルト穴ごとのハブとホイールの隙間（合計摩擦耗量）と応力の関係を付図18に示した。測定された応力は組合せ6（H1、W1）において隙間（合計摩擦耗量）が0.51mmの箇所でも最大の431MPaを示したほか、FCD45の耐力のJIS規格値の最小限度である284MPaを超えるものもあったが、耐力を超えたことによる塑性変形⁸は見られなかった。

これらの各測定値を取りまとめると付図19のようになり、隙間（合計摩擦耗量）とホイールナットの締め付けによって発生する応力には強い相関関係が見られた。

なお、ここで記述した応力の測定値は、ホイールナットを締め付ける前の状態を0としたものである。（2.11.4.3についても同じ。）

表 ハブとホイールの組合せ

組合せ番号	ハブ	ホイール	備 考
組合せ1	HN	WN	
組合せ2	HN	W1	
組合せ3	HN	W1	組合せ2のホイールをハブに対してボルト穴2穴分（72°）回転させたもの
組合せ4	H1	WN	
組合せ5	H1	W2	
組合せ6	H1	W1	

2.11.4.3 ホイールナットの締め付けトルクと締め付けによって発生する応力の関係に関する調査

2.11.4.1で記述したハブ2個及びホイール3個を使用し、表の6通りの組合せについて、ホイールナットの締め付けトルクを変えてハブボルト穴近傍のR5部の応力を測定した。各組合せにおいて10ヶ所のハブボルト穴近傍のR5部の応力のうち最大のを付図20に示した。

⁸「塑性変形」とは、変形を引き起こしている荷重を取り除いた後も元に戻らずに残っている変形をいう。

いずれの組合せにおいても、締め付けトルクが増加するに従い応力の値も増加していた。

組合せ別の応力については、組合せ6（H1、W1）の場合が最も大きく、締め付けトルク500N・m（トルクレンチの指示は55kgf・m）では431MPaを示した。また、組合せ1（HN、WN）の場合には、締め付けトルク500N・mで113MPaであった。

組合せ5（H1、W2）及び組合せ6（H1、W1）における測定では、締め付けトルクが290N・m以上の場合に、FCD45の耐力のJIS規格値の最小限度である284MPaを超える引張り応力が計測されたが、耐力を超えたことによるハブの塑性変形は見られなかった。

3 事実を認定した理由

3.1 脱線の状況に関する解析

2.7.2(1)で記述した痕跡から、本件列車では、4両目第1軸左車輪が8k480m付近（本件列車の先頭位置は8k451m付近）で蛇行を始めたものと推定される。左車輪が蛇行が始めたことについては、本件ハブのき裂が進展したことによって左車輪が車軸に対して傾いたまま走行したことによるものと推定される。

その後、2.1(1)で記述した記録から、本件列車が船の科学館駅に到着する際の回生ブレーキを使用中に車輪空転が検知されたが、これは、本件ハブのき裂が大きく進展したことにより、本件ハブが破断して、4両目第1軸の左車輪が車軸から分離したことによるものと考えられる。

さらに、2.7.2(2)で記述した痕跡から、本件列車は船の科学館駅を出発直後に、4両目第1軸左車輪が8k439m付近（本件列車の先頭位置は8k410m付近）で走行路左側の溝に落下して脱線したものと推定される。

本件列車は、脱線した左車輪によって溝に敷設されたケーブルラックを損傷させながら走行し、2.1(1)、2.3.1及び2.7.1で記述したとおり、左にずれた車体の接触等によって電車線を短絡させて停電させるとともに、乗客により車内の非常停止スイッチが操作されたことによって非常ブレーキが作動して、先頭位置が8k360m付近で停止したものと推定される。

3.2 本件ハブの破断状況の解析

2.8.3(1)で記述したとおり、本件ハブのボス側破断面において、No.1付近のR5部

破断面に、疲労破壊の特徴とされるストライエーション（縞状模様）が観察されたこと、及び2.8.2で記述したNo.1～4付近のR5部付近の破断面に認められた錆の状況から、き裂は、No.1～4付近のR5部近傍を起点とする金属疲労を原因とするものであり、このき裂が本件ハブの全周に進展して破断に至ったものと考えられる。

金属疲労によるき裂が発生してから破断に至るまでの経過時間については、破断面に錆の発生が認められたことから、ある程度の時間が経過していたものと推定されるが、破断面同士が擦れたと見られる損傷が多く、破断面については詳細な確認が困難であったこと、過去において本件ハブの探傷検査が行われたことがなかったことから、具体的な経過時間については明らかにすることはできなかった。

3.3 本件ハブの材質及び強度に関する解析

2.10.1で記述したとおり、本件ハブから切り出した2片の試験片に対する引張り試験の結果は、2片とも、引張り強さについてはJIS規格値（441MPa以上）に満たない413～427MPaであり、伸びについてもJIS規格値（10%以上）に満たない7.4～8.7%であった。

また、2.9.2で記述したとおり、R5部付近における黒鉛球状化率は、健全ハブではJIS規格値（70%以上）を満たす75%であったのに対し、本件ハブでは規格値を満たさない55%であり、黒鉛の粒径も粗大化していた。

これらの結果から、本件ハブは、鑄造時の不具合による材質不良に伴って強度が低下していたものと推定される。

3.4 本件ハブの摩耗に関する解析

2.11.3で記述したとおり、本件ハブ及び本件ホイールは、それぞれの接触面が本件ハブについては平均0.5mm程度、本件ホイールについては平均0.3mm程度摩耗していた。また、本件ホイール内側（本件ハブに接触している側）にはハブボルト穴付近から放射状に鉄錆様の粉が付着していた。これらのことから、本件ハブ及び本件ホイールの摩耗は、フレットング摩耗であり、列車の走行に伴って発生した本件ハブと本件ホイールの接触面における微細な相対振動によって発生したものと推定される。

（付図21参照）

3.5 応力解析

2.11.2で記述したとおり、走行試験における定員乗車時のR5部の変動応力の応力振幅は102MPaであった。

また、2.11.4.3で記述したとおり、ホイールナットの締め付けによってR5部に発生する応力は最大で431MPaを示し、これはFCD45の耐力のJIS規格値の最

小限度である284MPaを大きく超え、引張り強さのJIS規格値の最小限度である441MPaの98%に相当する値であった。

しかしながら、2.5.6.1(3)で記述したとおり、ハブの製造時には残留応力を除去する処理が行われていないこと、2.11.4.2及び2.11.4.3で記述した測定では、耐力を大きく超えたことによる塑性変形は見られなかったこと、及び2.11.1で記述した残留応力測定では、-199MPaの圧縮の残留応力が測定されたことから、ハブのR5部には、製造時において圧縮の残留応力が発生していたものと考えられる。

2.11.4.3で測定された最大431MPaの引張り応力が加えられても測定に使用したハブには塑性変形が見られなかったことを考えると、実際に発生した応力は耐力(284MPa)以下であったものと推定されることから、当該測定に使用したハブには-150MPa程度より大きい圧縮の残留応力が発生していたものと考えられる。

そこで、ハブのR5部において、圧縮の残留応力を仮に-150MPaと仮定し、これに2.11.4.3で測定されたホイールナットの締め付けによって発生する引張り応力に相当する0~430MPaが加わるとすれば、変動応力による疲労を考える場合の平均応力は-150~280MPaの範囲となるので、2.11.2で測定された変動応力の値(102MPa)を応力振幅として疲労限度線図に記入すると付図22のようになり、平均応力が180MPa程度以上となれば疲労限度を超えることとなる。

なお、疲労限度線図の限度値は、FCD45のJIS規格値を用いて引張り強さを441MPa、耐力を284MPa、疲労限度を引張り強さの1/2の220MPaとした。

3.6 本件ハブの破断に関する解析

3.4で記述したとおり、本件ハブ及び本件ホイールのそれぞれの接触面には、本件ハブについては平均0.5mm程度、本件ホイールについては平均0.3mm程度のフレットング摩耗が発生しており、本件ハブのR5部には、ホイールナットの締め付けによって、3.5で記述した製造時に発生していたと考えられる圧縮の残留応力を上回る相当大きな引張り応力が平均応力として発生していたものと推定される。

列車の走行に伴ってR5部に発生する応力振幅は、2.5.5で記述したとおり、本件台車に異常は認められなかったことから、3.5で記述した走行試験で測定された値(102MPa)と同程度であったものと推定される。

本件ハブにおいては、これらの平均応力と応力振幅が3.5で記述した疲労限度を超えたことから、3.2で記述したとおり、R5部において金属疲労によるき裂が発生し、それが進展して本件ハブが破断したものと推定される。

なお、本件ハブにおける破断に至るまでの変動応力の繰り返し回数は、2.5.6.3で記述した本件ハブの累積走行キロ数(約90万km)及び2.5.7.1で記述した荷重時タ

イヤ半径（445mm）から、約3億回（ 3×10^8 回）と推定される。

本件ハブにおいて、応力が疲労限度を超えたことについては、2.5.6.2で記述したとおり、本件ハブの設計において、接触面に隙間のある状態でホイールナットの締め付けによって発生する応力が想定されていなかったこと、及び3.3で記述したとおり、本件ハブに材質不良に伴う強度低下が発生していたことによるものと推定される。

（付図21、22参照）

3.7 ハブの設計、製造及び保守に際して考慮すべき事項

3.7.1 ハブの設計に際して考慮すべき事項

3.4及び3.6で記述したとおり、本件ハブにはフレットング摩耗と推定される摩耗が認められ、この結果、ハブとホイールとの接触面に隙間が発生し、この状態でホイールナットを締め付けた場合にR5部には相当大きな引張り応力が発生していたものと推定される。しかしながら、2.5.6.2で記述したとおり、台車製造社によれば、設計においては、隙間のある状態でホイールナットの締め付けによってハブに発生する応力については想定していなかったとのことであった。

このため、台車製造社は、今後、ハブの設計に際しては、ハブとホイールの接触面にはフレットング摩耗が発生し、これによって生じたハブとホイールの隙間をホイールナットで締め付けることにより、隙間を密着させるようにハブが変形して応力が発生することを考慮する必要がある。

また、現在使用されているハブが、摩耗が生じた場合にホイールナットの締め付けによって発生する応力が設計において想定されていないものである場合には、摩耗量管理値の検討を行ったうえで強度の検討を行い、その結果、強度が不足する場合には十分な強度を有するものに交換する等の対策を講ずるべきである。

（付図21参照）

3.7.2 ハブの製造に際して考慮すべき事項

3.3で記述したとおり、本件ハブの強度低下は鋳造時の不具合によるものと考えられる。さらに、3.5で記述したとおり、ハブのR5部には圧縮の残留応力が発生し、今回は安全側に作用していたものと考えられるが、残留応力は引張り応力として発生する場合もあり、この場合には疲労強度が低下することとなるので注意が必要である。

このため、ハブの製造に際しては、鋳造時の不具合により強度が低下しないように適切な品質管理を行うことが重要である。

3.7.3 ハブの保守に際して考慮すべき事項

鉄軌道事業者は、ハブの保守に際しては、ホイールとの接触面には摩耗が発生することを前提として、摩耗量管理を行うなどの保守方法とするべきである。

また、現在使用しているハブが、ホイールナットの締め付けによって発生する応力が設計において想定されていないものであって、3.7.1で記述した検討を行った結果、強度が不足する場合においては、十分な強度を有するものに交換するまでの間、摩耗量管理のほか、適切な時期に探傷検査を行う等の対策を講ずるべきである。

4 原因

本事故は、本件ハブが破断したため、4両目第1軸左車輪が車軸から分離し走行路左側の溝に落下して本件列車が脱線したことによるものと推定される。

本件ハブが破断したことについては、本件ハブにおいて、ホイールとの接触面にフレットング摩耗による隙間が発生したことから、ホイールナットの締め付けによって応力が発生し、これに列車の走行に伴う変動応力が繰り返し加わって、応力が疲労限度を超えたため、金属疲労を原因とするき裂が発生して、そのき裂が進展したことによるものと推定される。

応力が疲労限度を超えたことについては、ホイールナットの締め付けによって本件ハブに応力の発生することが、本件ハブの設計において想定されていなかったこと、及び材質不良に伴って本件ハブの強度が低下していたことによるものと推定される。

5 建議

航空・鉄道事故調査委員会は、本事故の調査結果に基づき、以下のとおり国土交通大臣に建議する。

案内軌条式鉄道におけるハブの設計及び保守に関する建議

本事故は、本件ハブにおいて、ホイールとの接触面にフレットング摩耗による隙間が発生したことにより、ホイールナットの締め付けによって応力が発生し、これに列車の走行に伴う変動応力が繰り返し加わって応力が疲労限度を超えたため、本件ハ

ブが破断して本件列車が脱線したことによるものと推定される。

応力が疲労限度を超えたことの主たる要因は、ホイールナットの締め付けによって本件ハブに応力の発生することが、本件ハブの設計において想定されていなかったことによるものと推定される。

したがって、国土交通省は、次の事項について所要の措置を講ずるべきである。

- (1) 案内軌条式鉄道で現在使用されているハブが、ホイールとの接触面にフレッシング摩耗による隙間が発生し、この状態でホイールナットの締め付けによって応力の発生することが設計において想定されていないものである場合には、摩耗量管理値の検討を行ったうえで強度の検討を行い、その結果、強度が不足する場合には、十分な強度を有するものに交換する等の対策を講ずること。
- (2) 案内軌条式鉄道におけるハブの保守に際しては、ホイールとの接触面の摩耗量の管理を行うなど、摩耗を考慮した保守方法とすること、及び現在使用しているハブが、(1)で記述した応力が想定されていない設計によるものであって、検討の結果、強度が不足する場合には、十分な強度を有するものに交換するまでの間、摩耗量管理のほか、適切な時期に探傷検査を行う等の対策を講ずること。

6 参考事項

6.1 同社の対応

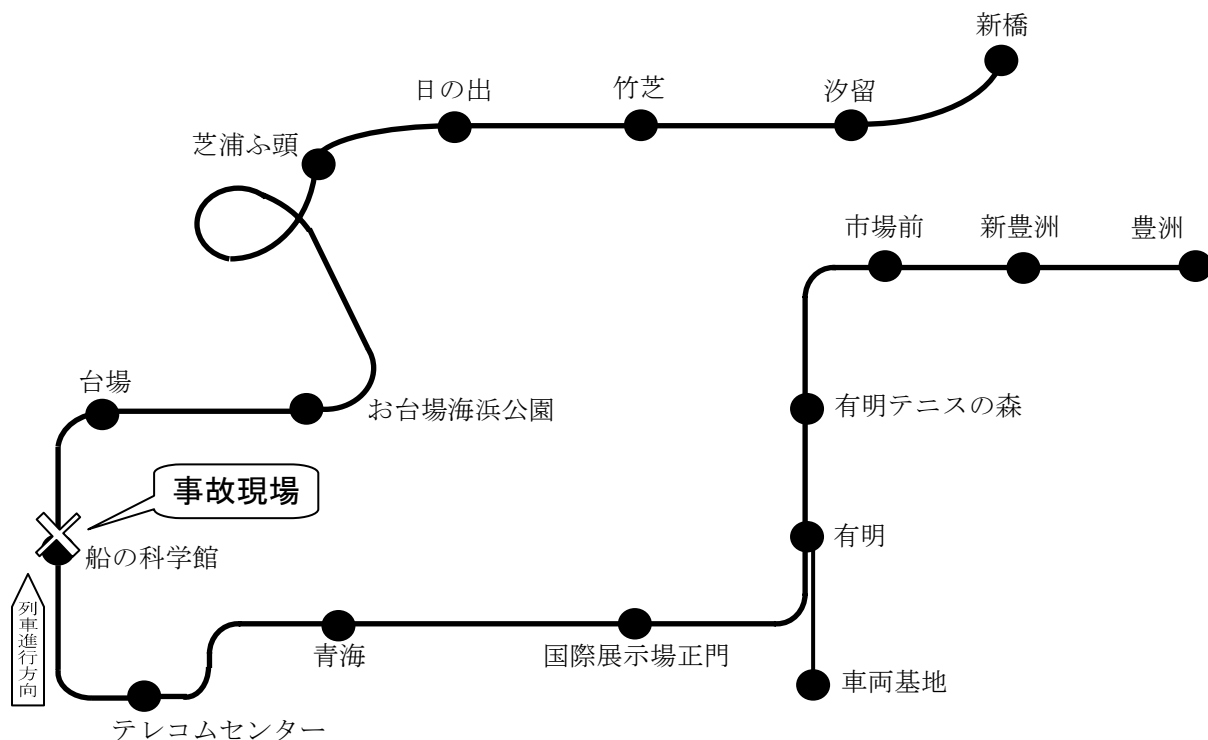
同社は、平成19年9月までに全車両のハブを新品に交換した。また、新品ハブの納入時に材料試験成績書の添付を求めるとともに、新品ハブに対して探傷検査を実施した。なお、新品ハブに交換するまでの間は、使用中のハブに対して6ヶ月ごとに探傷検査を実施した。

6.2 国土交通省の対応

国土交通省鉄道局は、事故後、案内軌条式鉄道を運行する全国の鉄軌道事業者に対して、重要部検査等においてハブの探傷検査を実施していない車両については順次探傷検査を実施するよう通達した。

付図1 東京臨海新交通臨海線路線図

東京臨海新交通臨海線 新橋駅～豊洲駅間 14.8km (複線)



付図2 事故現場付近の地形図

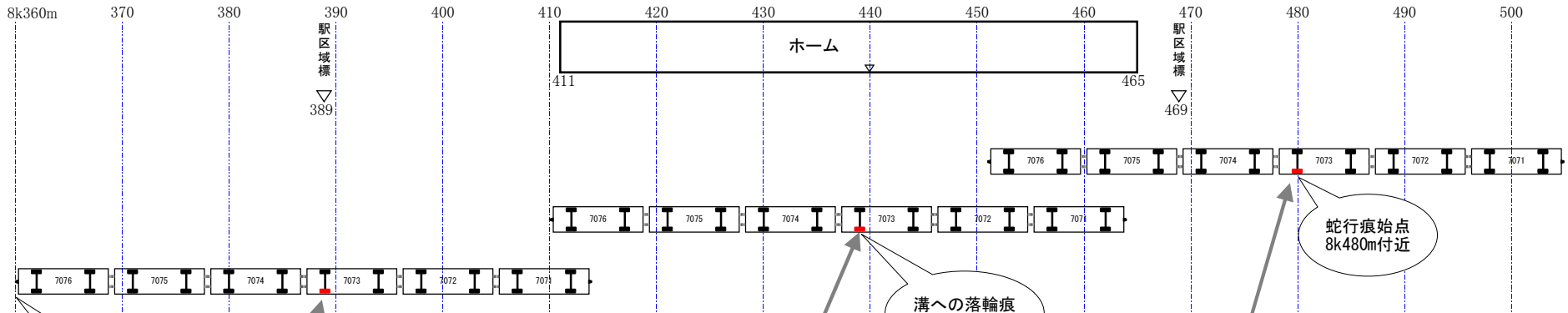


付図3 事故現場付近略図

←新橋駅・台場駅方

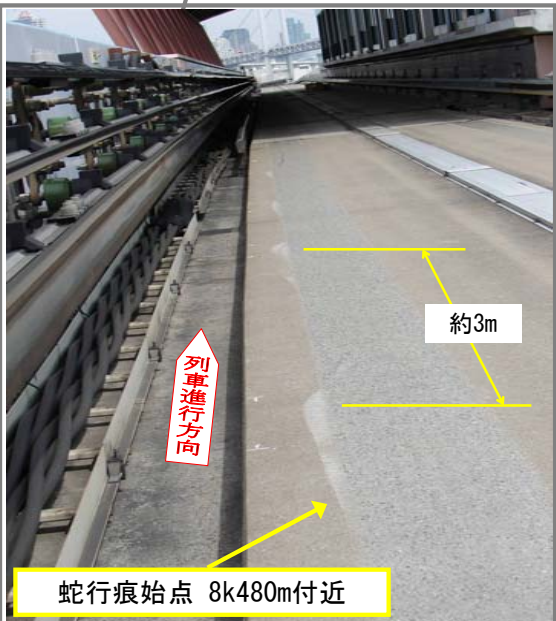
船の科学館駅

テレコムセンター駅・豊洲駅方→

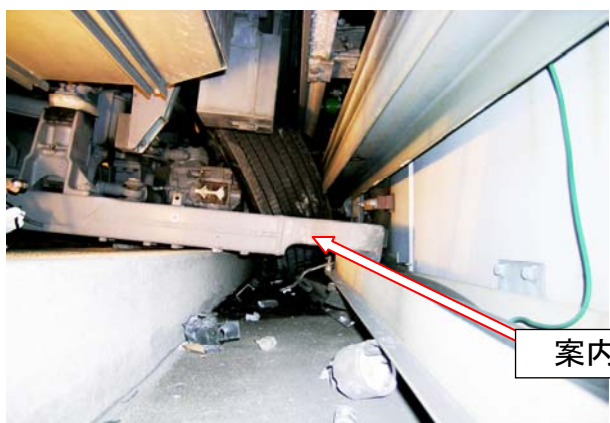


最終停止位置
先頭8k360m付近
脱線軸8k389m付近

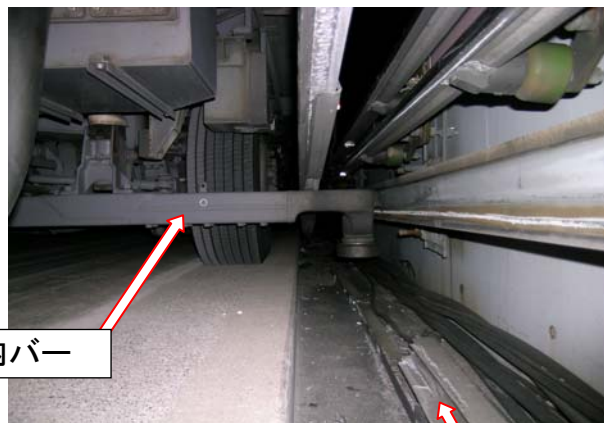
脱線状況 8k389m付近



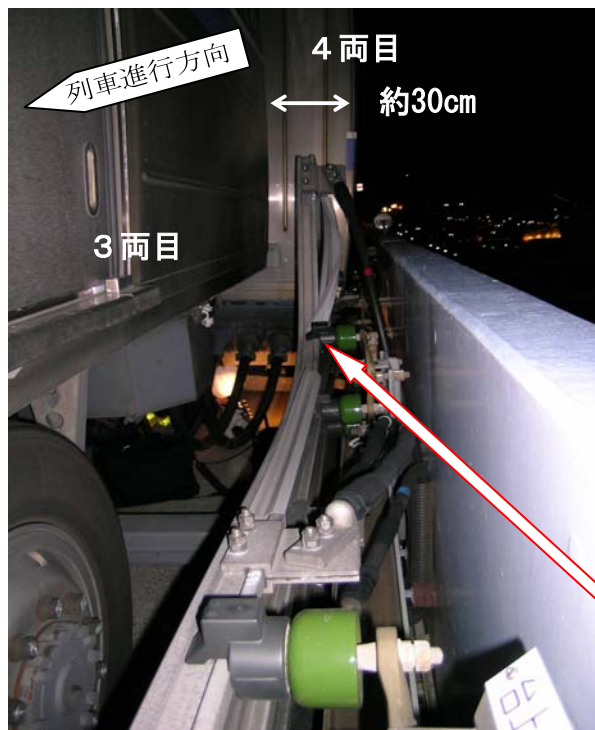
付図4 鉄道施設の損傷状況等



4両目第1軸左車輪の脱線状況

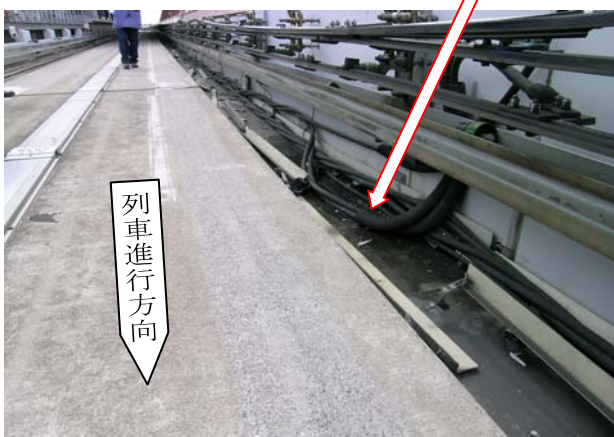


5両目第1軸左車輪

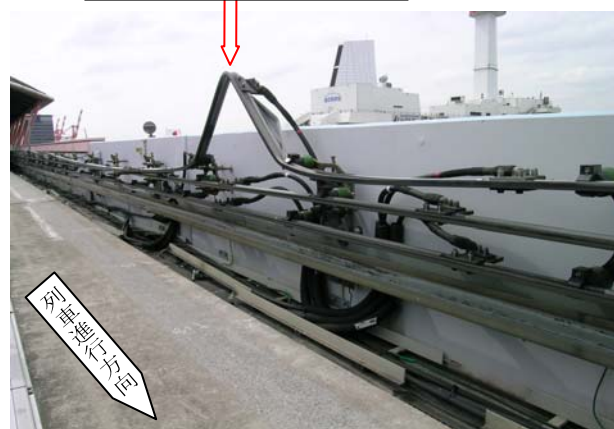


4両目車体の状況

損傷したケーブルラック

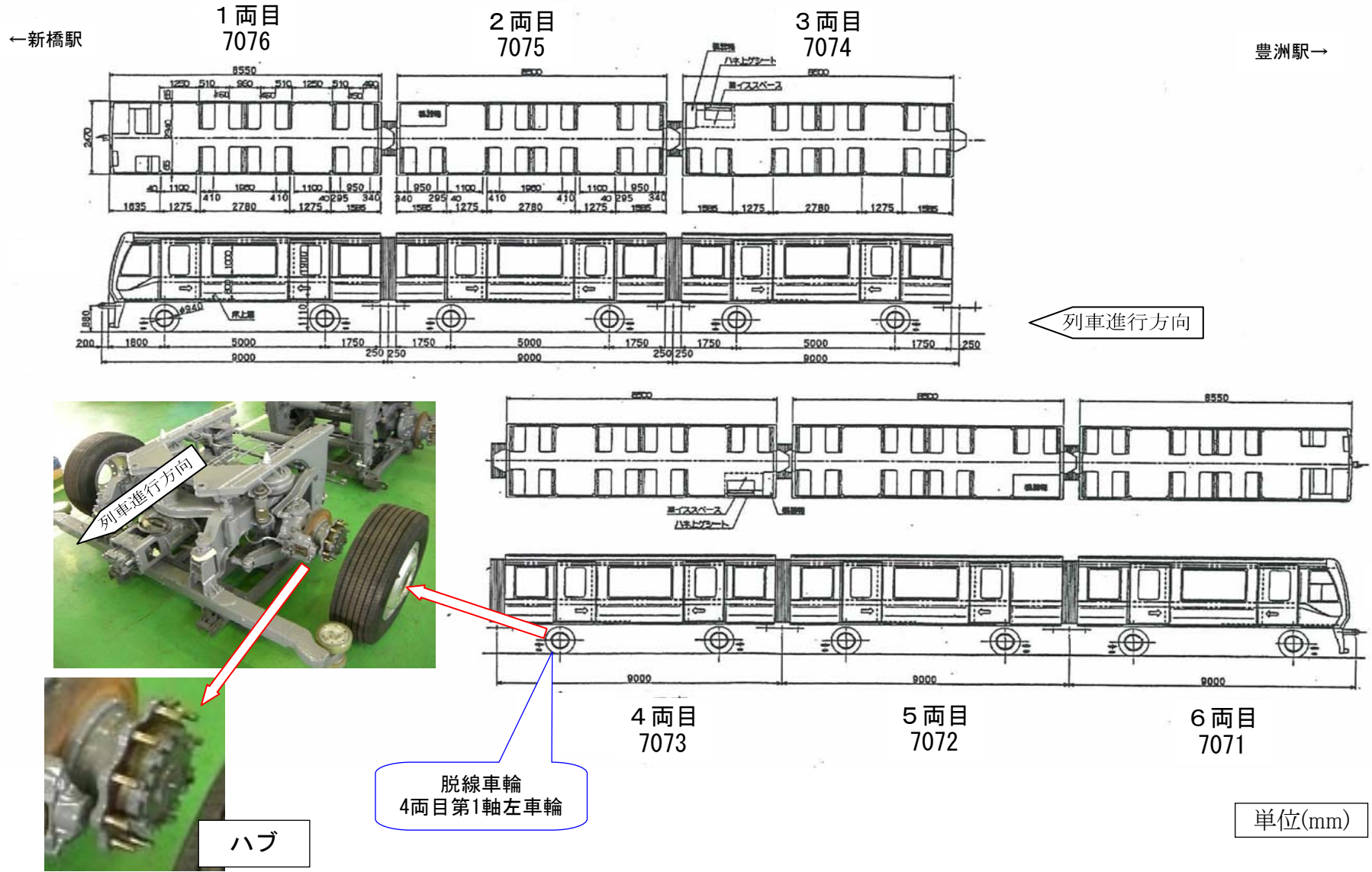


損傷した電車線

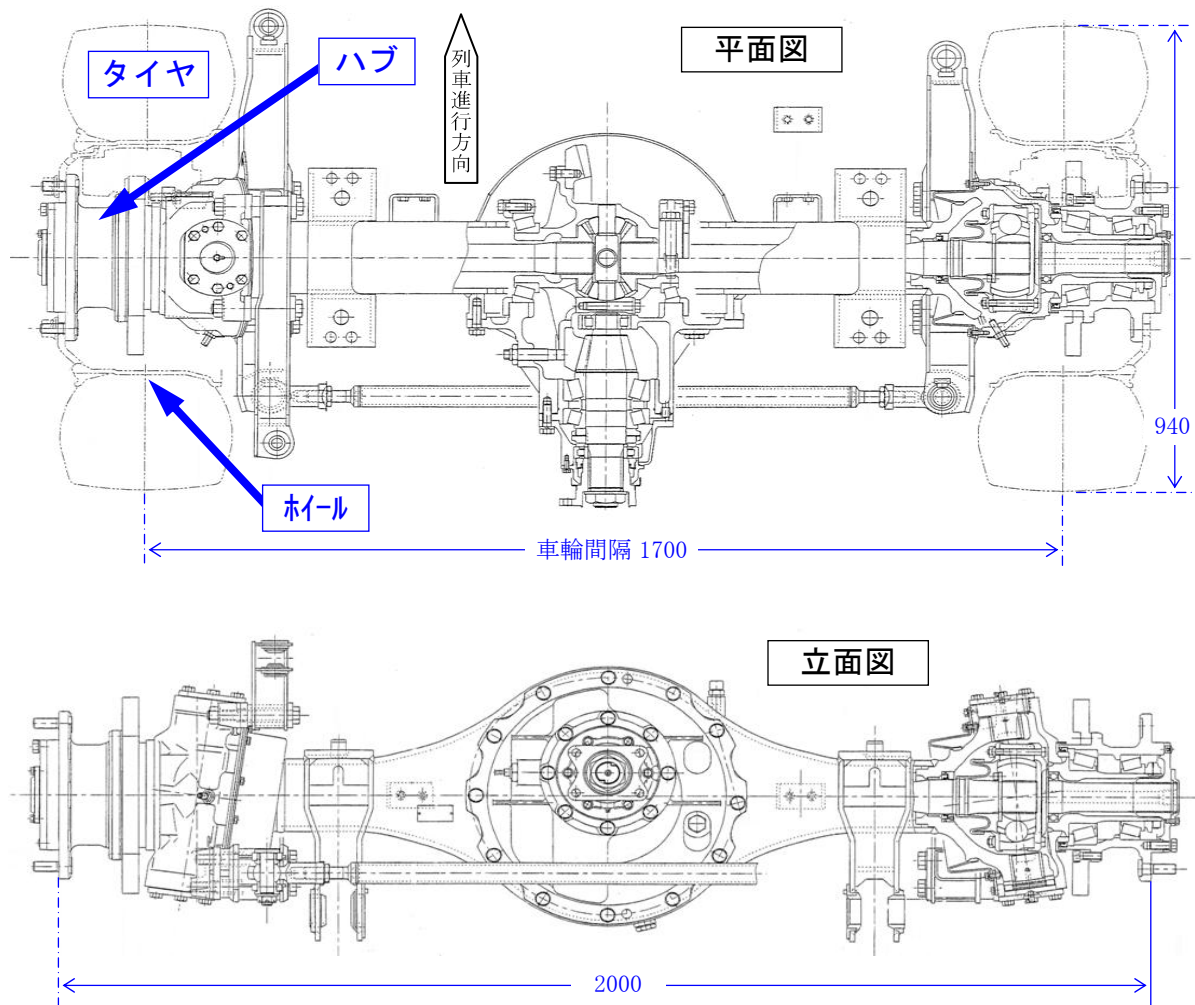


4両目車内の傾斜状況
(4両目より前方を撮影)

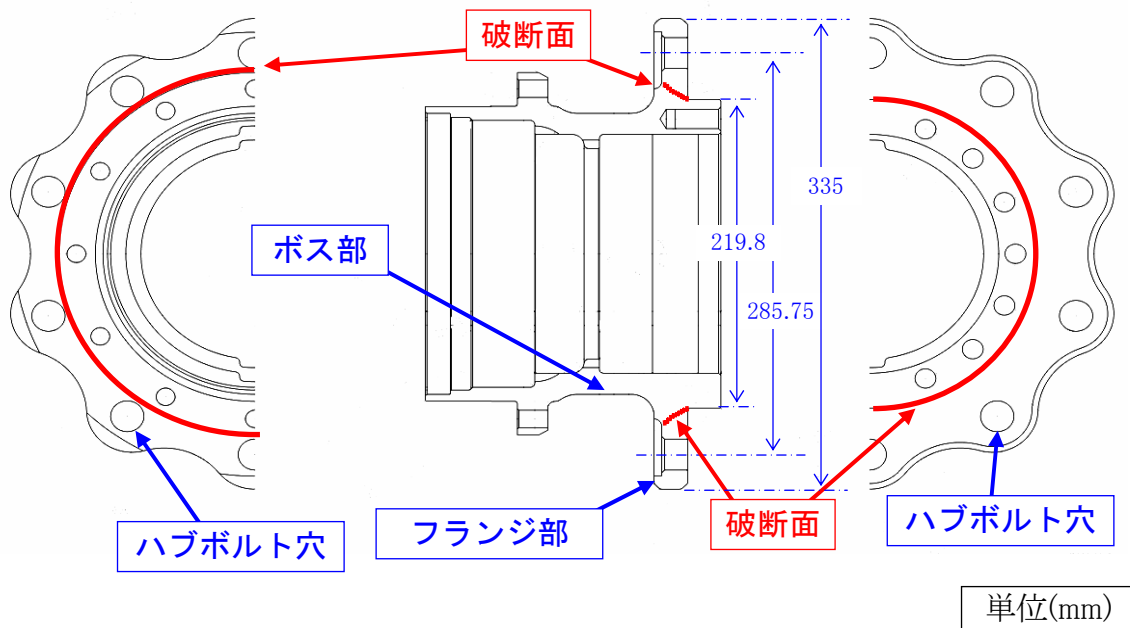
付図5 車両編成図



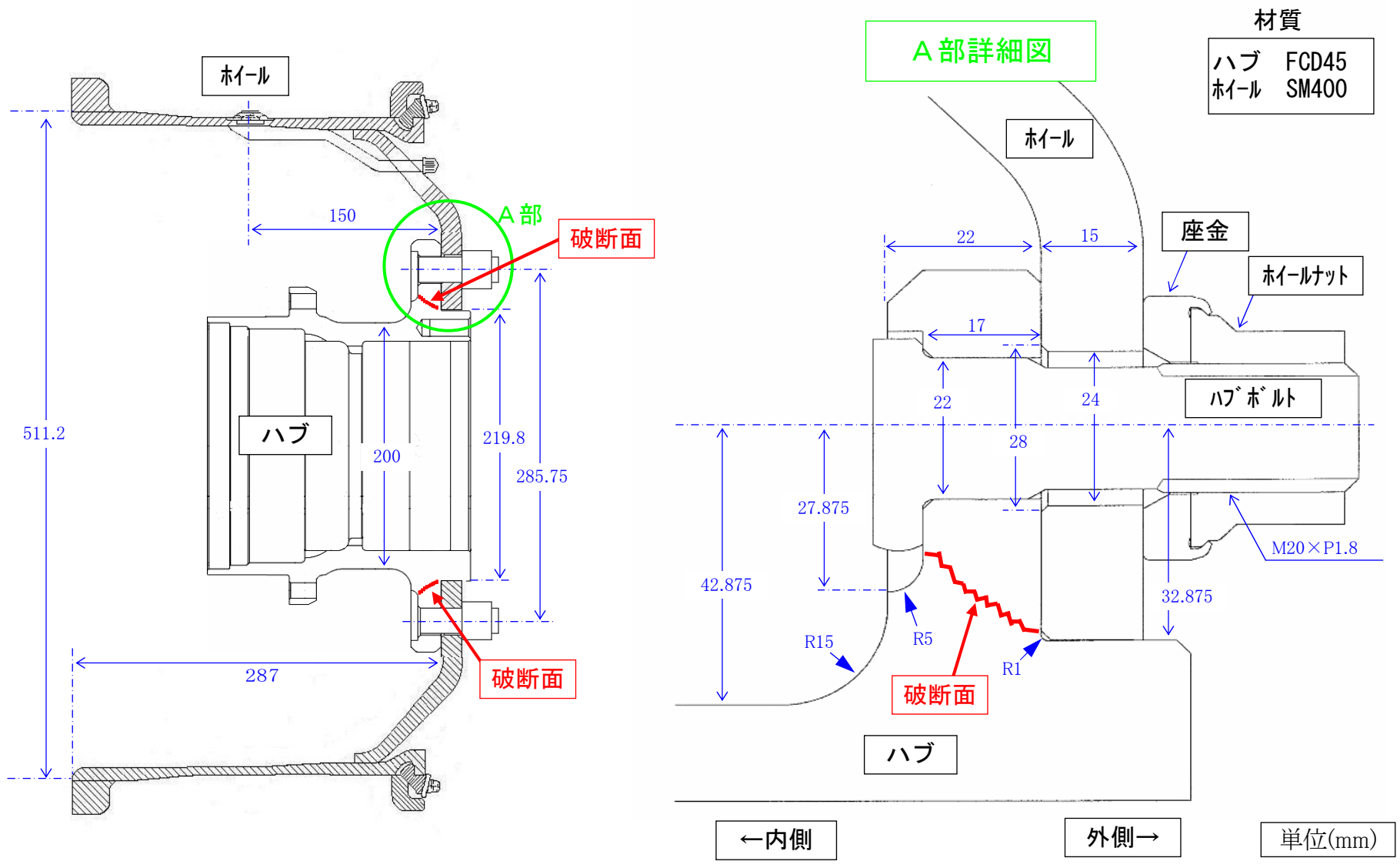
付図6 車軸組立図



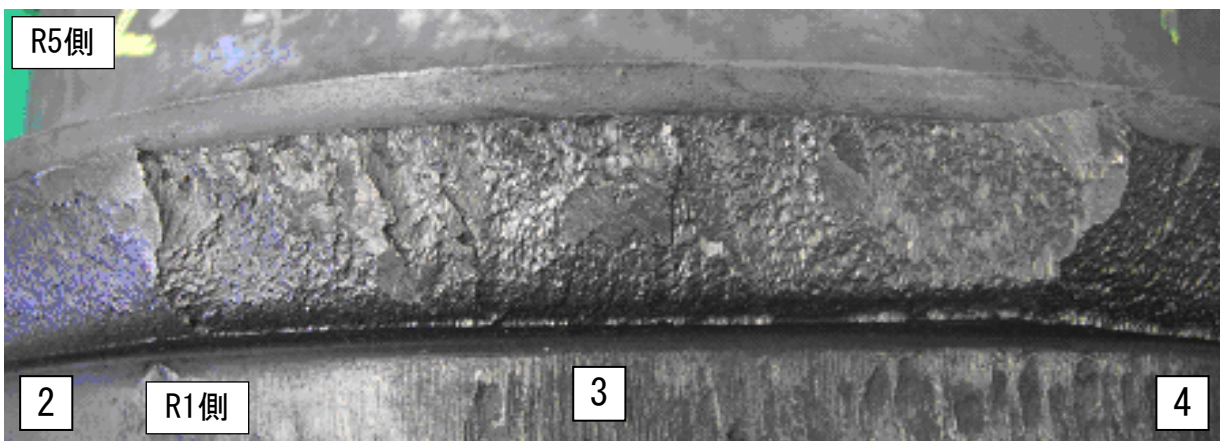
付図7 ハブ形状図



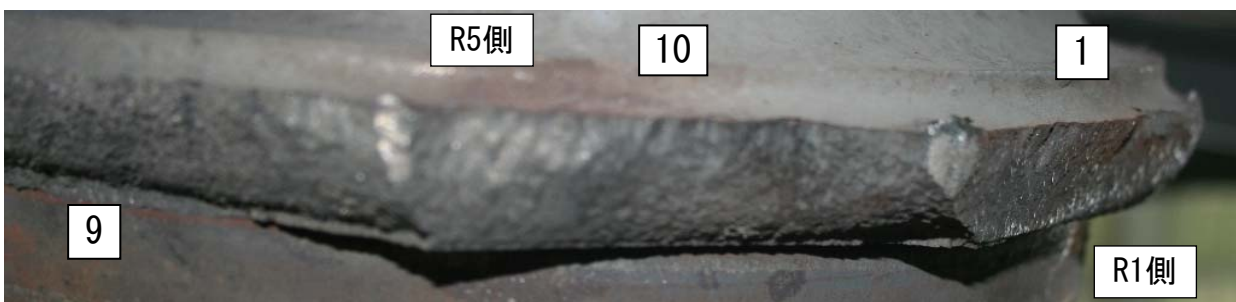
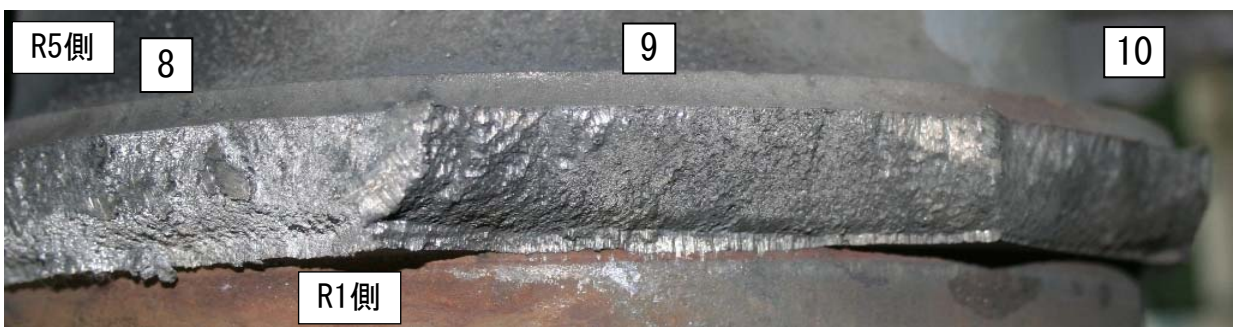
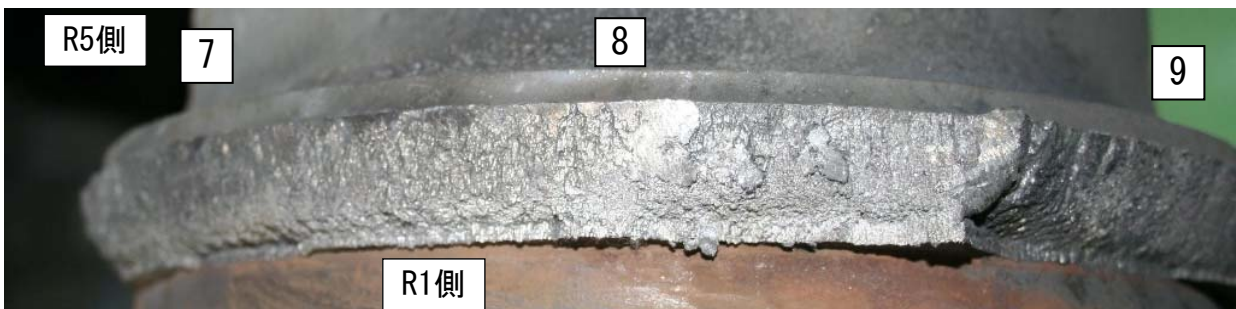
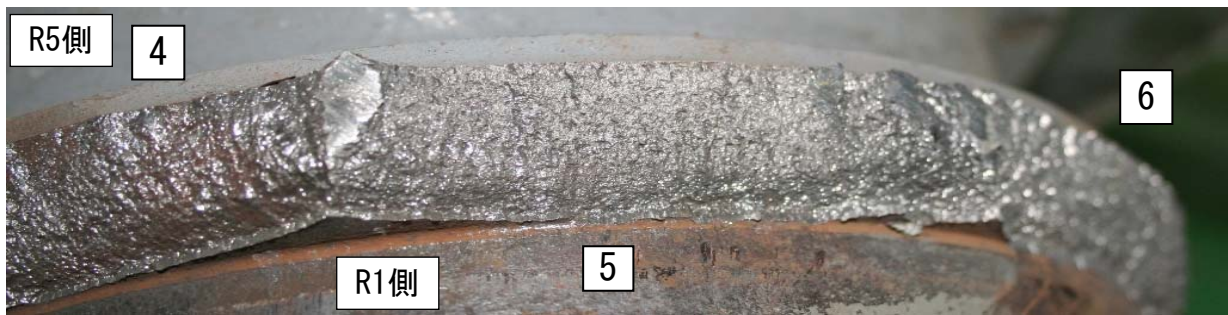
付図8 ハブ・ホイール組立図



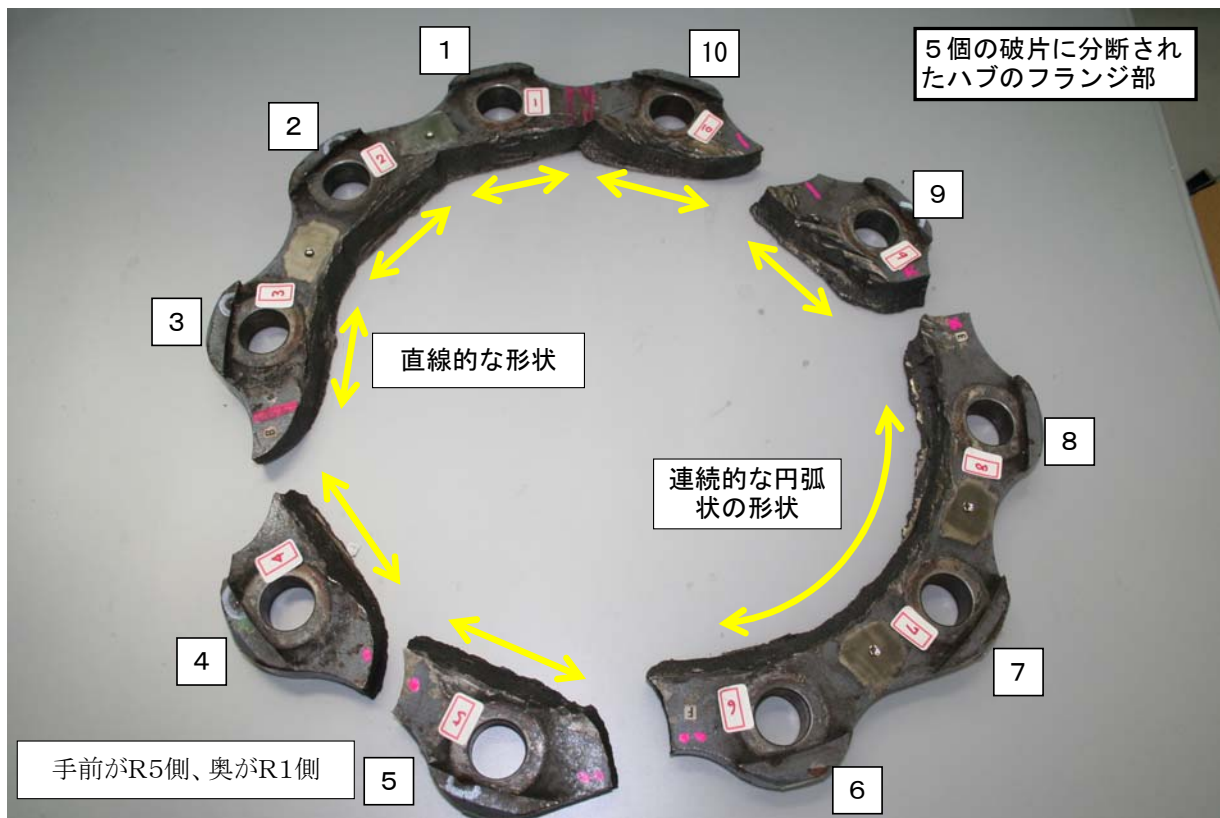
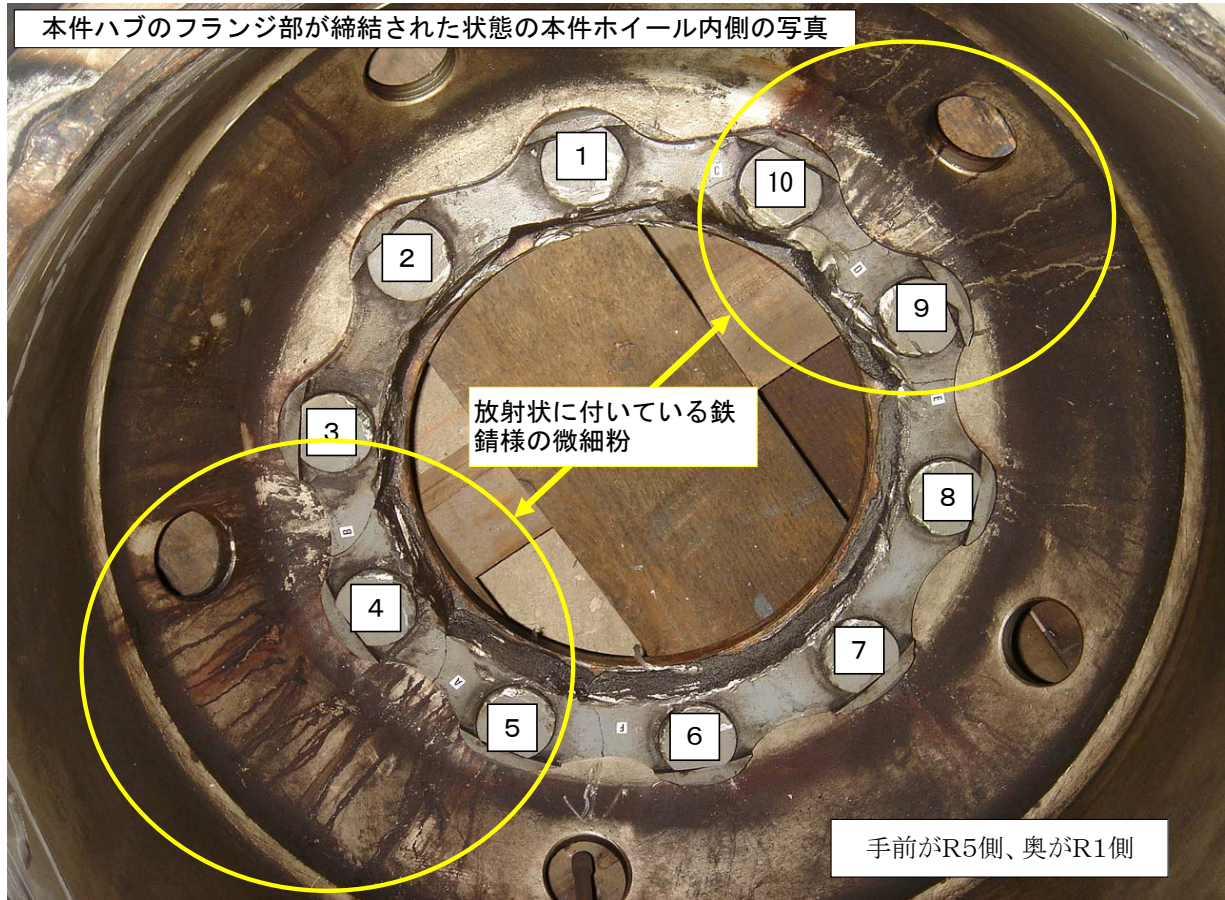
付図9 本件ハブの状況・ボス側（その1）



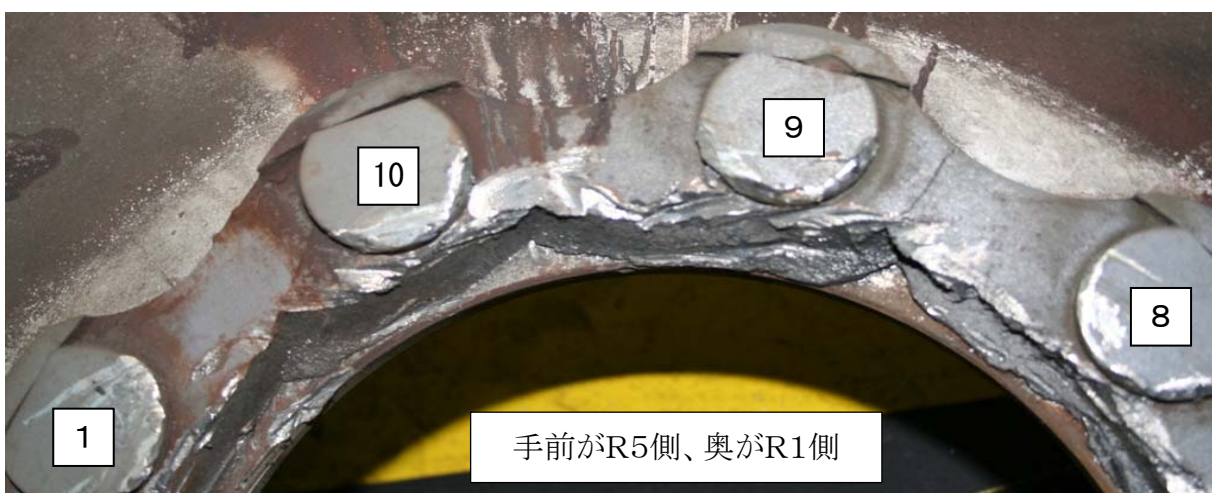
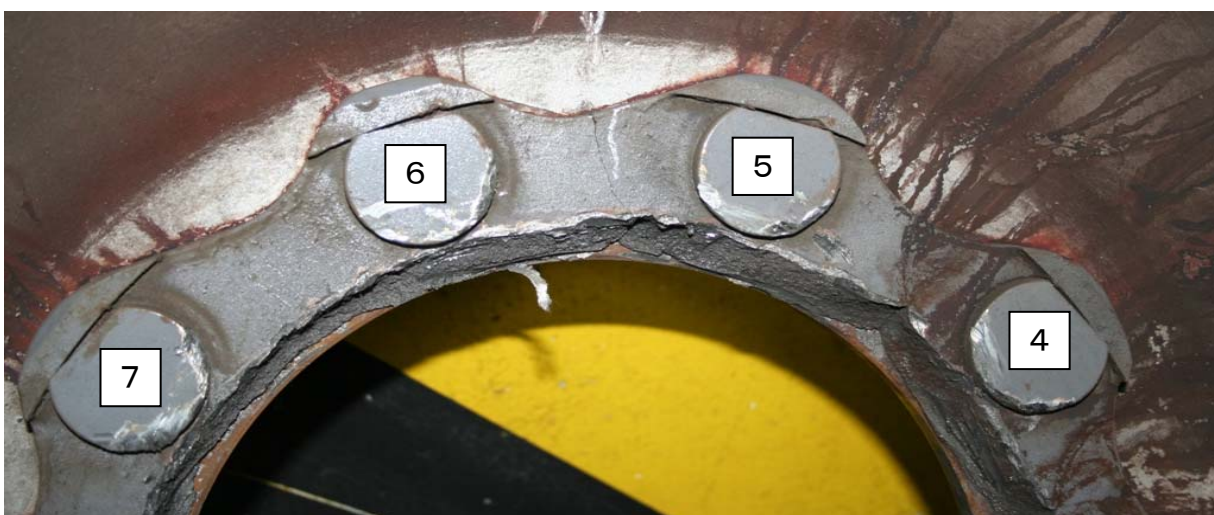
付図9 本件ハブの状況・ボス側（その2）



付図10 本件ハブの状況・フランジ側（その1）

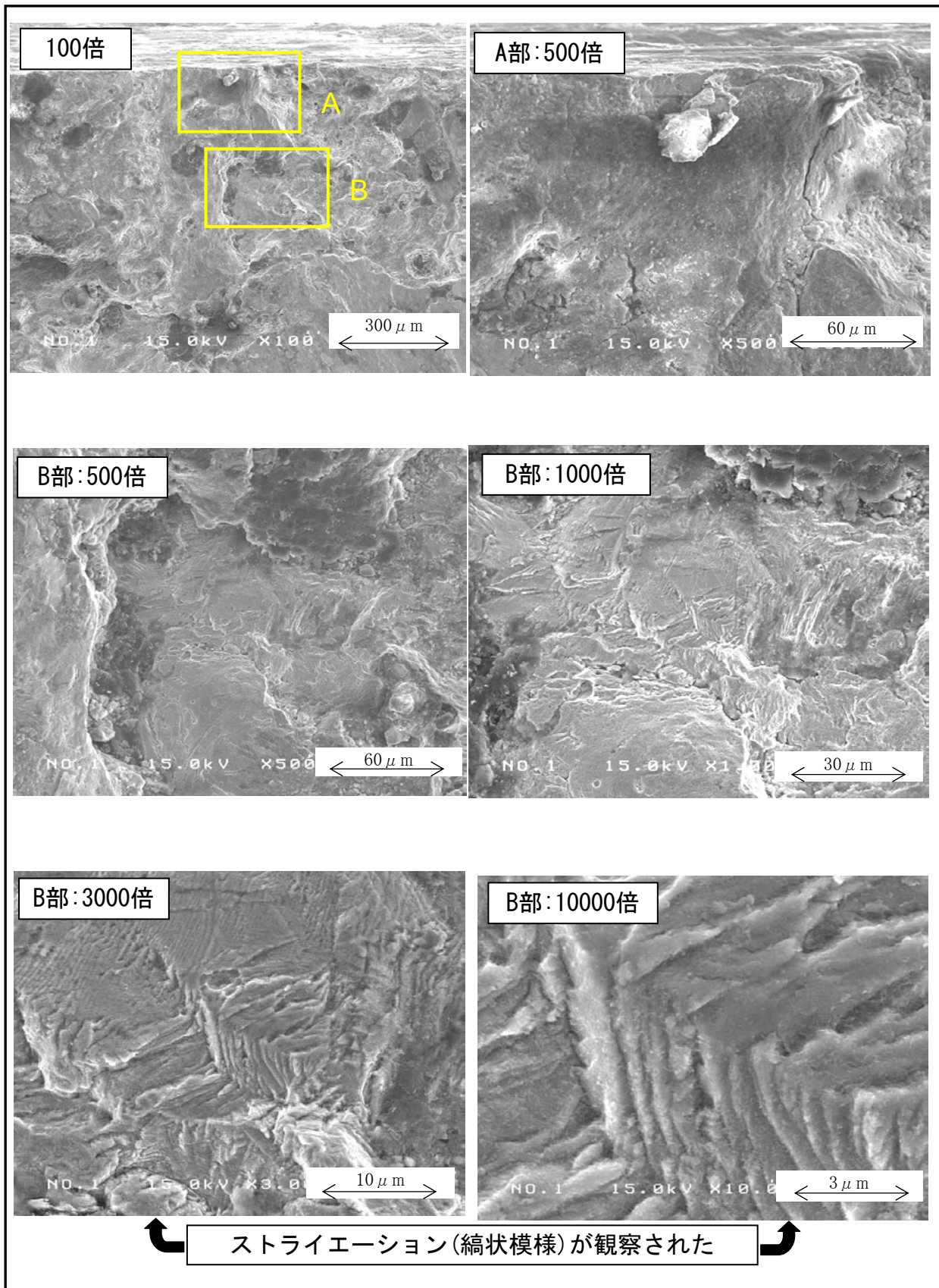


付図10 本件ハブの状況・フランジ側（その2）



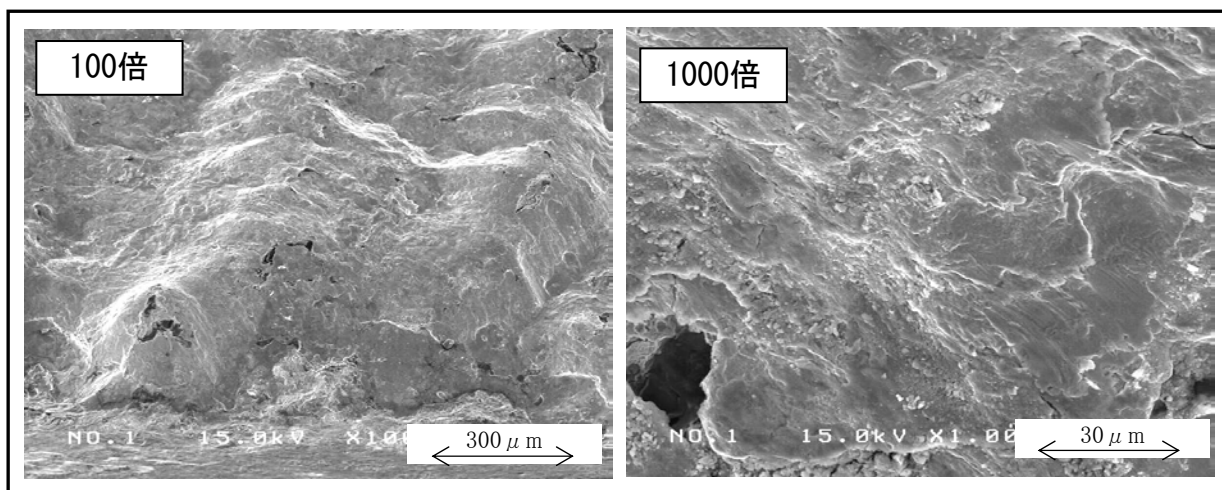
付図 1 1 破断面電子顕微鏡写真 (その 1)

No. 1 R 5 部付近表面

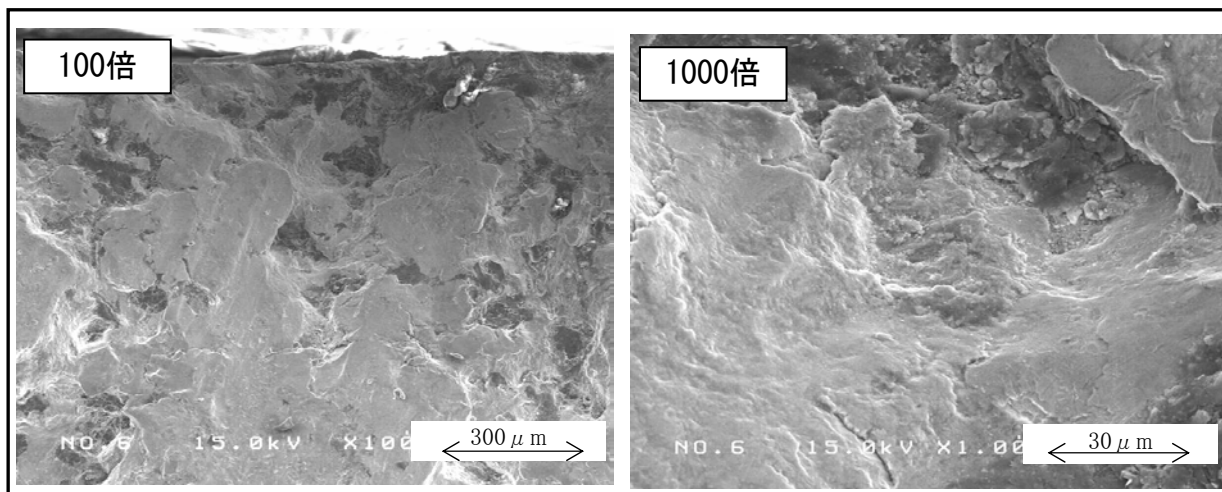


付図 1 1 破断面電子顕微鏡写真 (その 2)

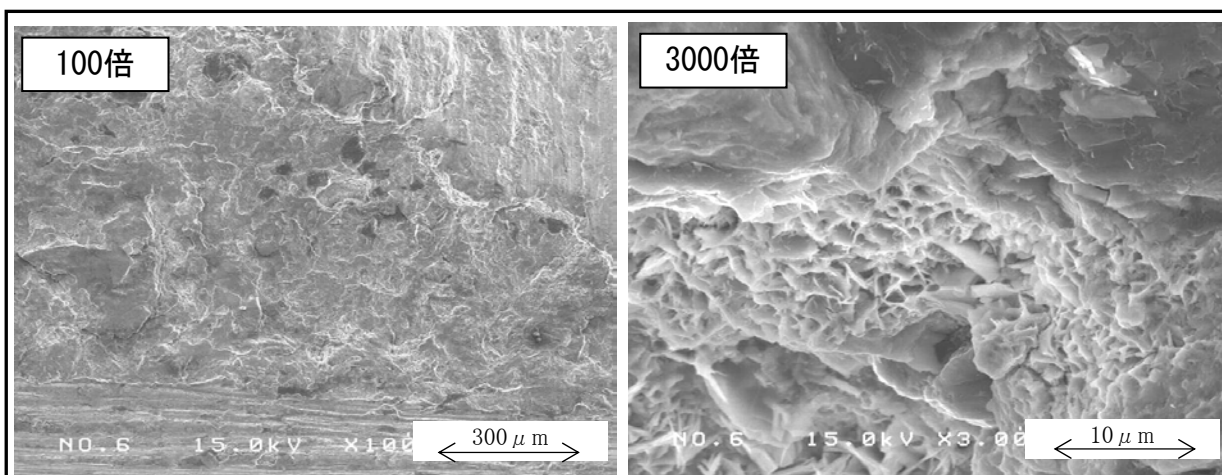
No. 1 R 1 部付近表面



No. 6 R 5 部付近表面



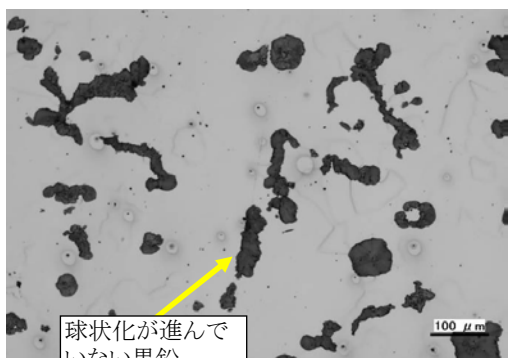
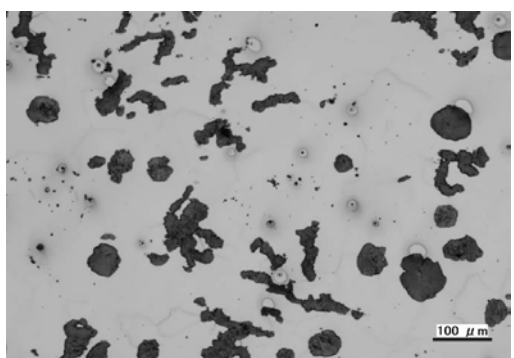
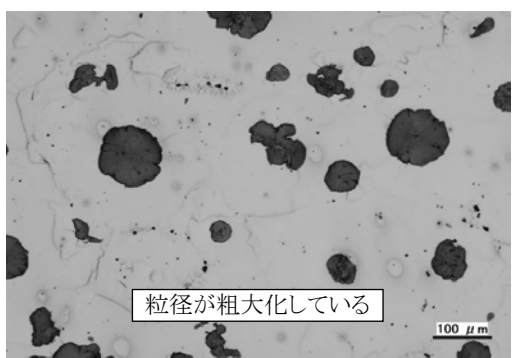
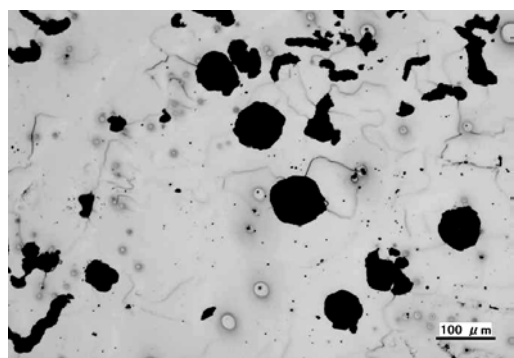
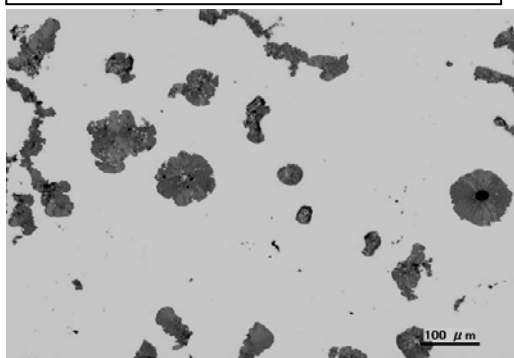
No. 6 R 1 部付近表面



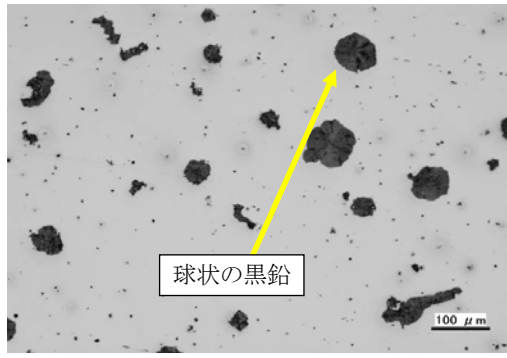
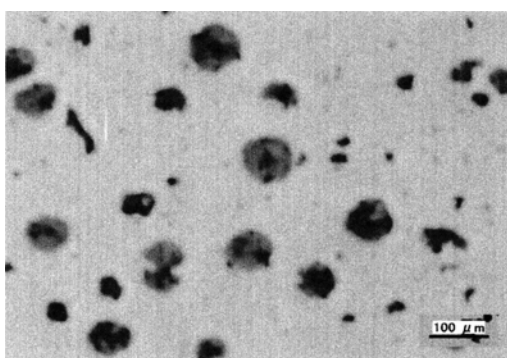
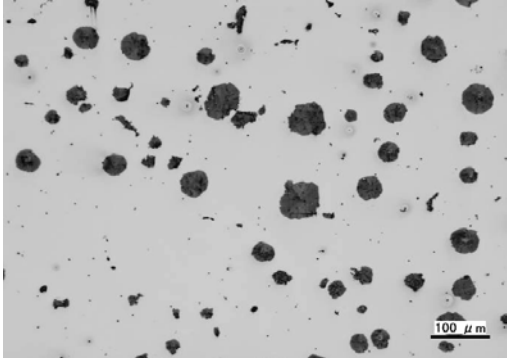
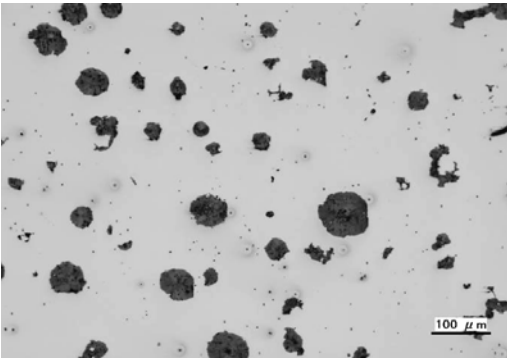
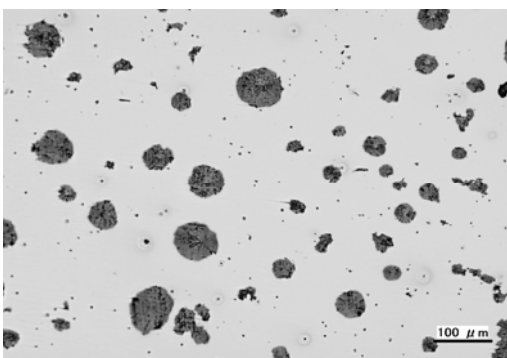
ディンプル破断面(多数の小さい窪みが見られる破断面)が観察された

付図 1 2 黒鉛球状化の状況

本件ハブ 黒鉛球状化率55%

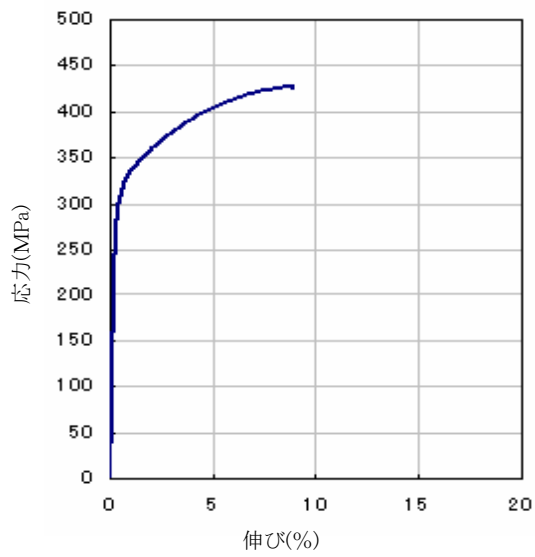


健全ハブ 黒鉛球状化率75%

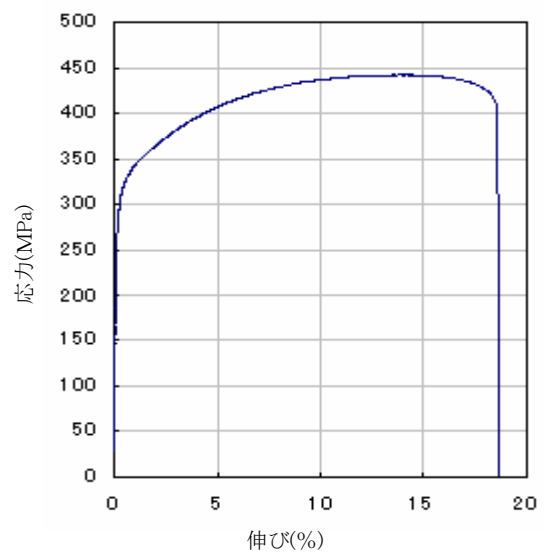


付図 1 3 引張り試験結果

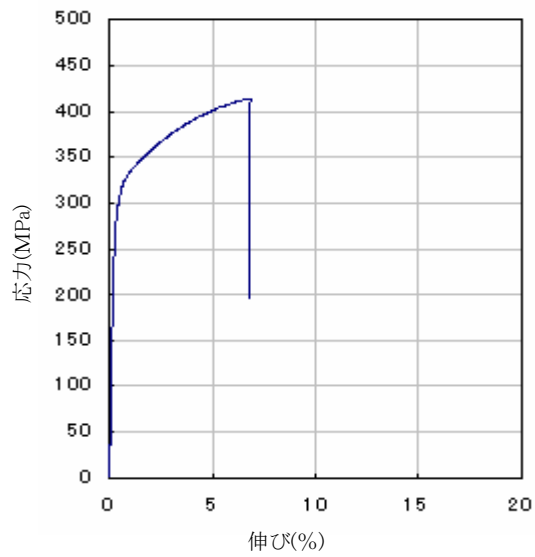
試験片 本件ハブ 1



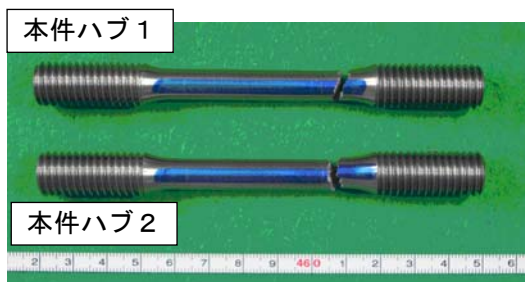
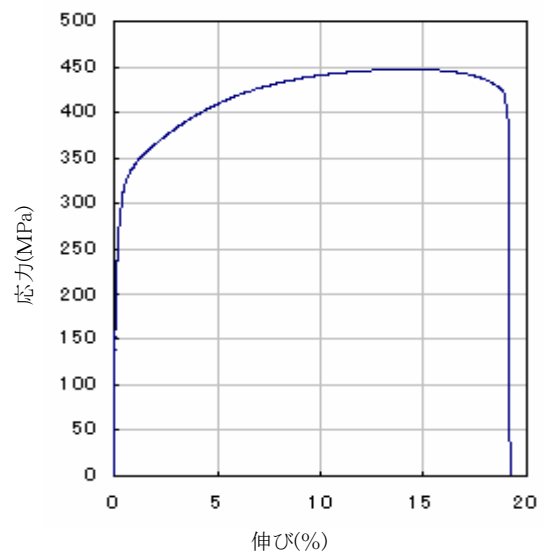
試験片 健全ハブ 1



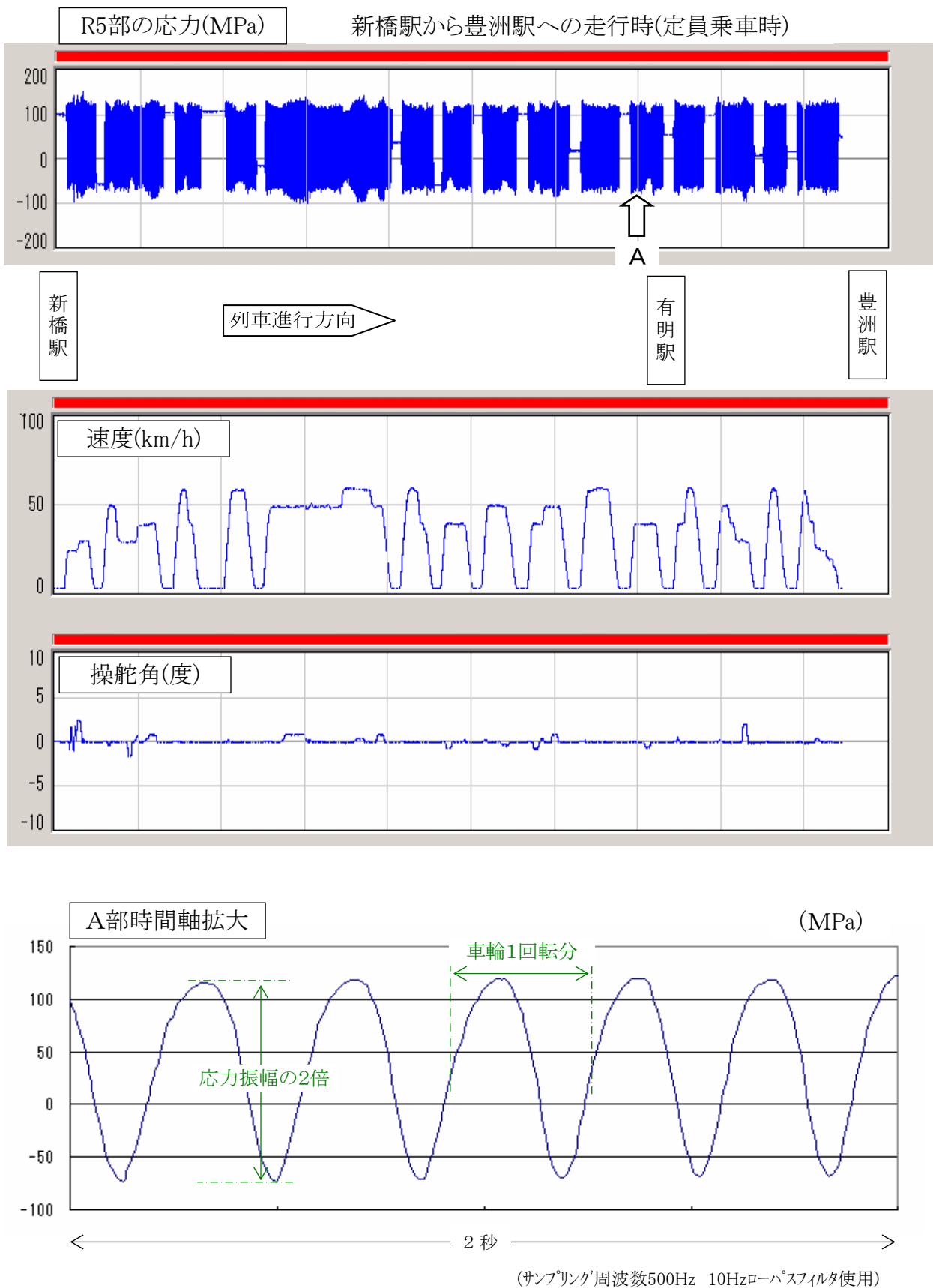
試験片 本件ハブ 2



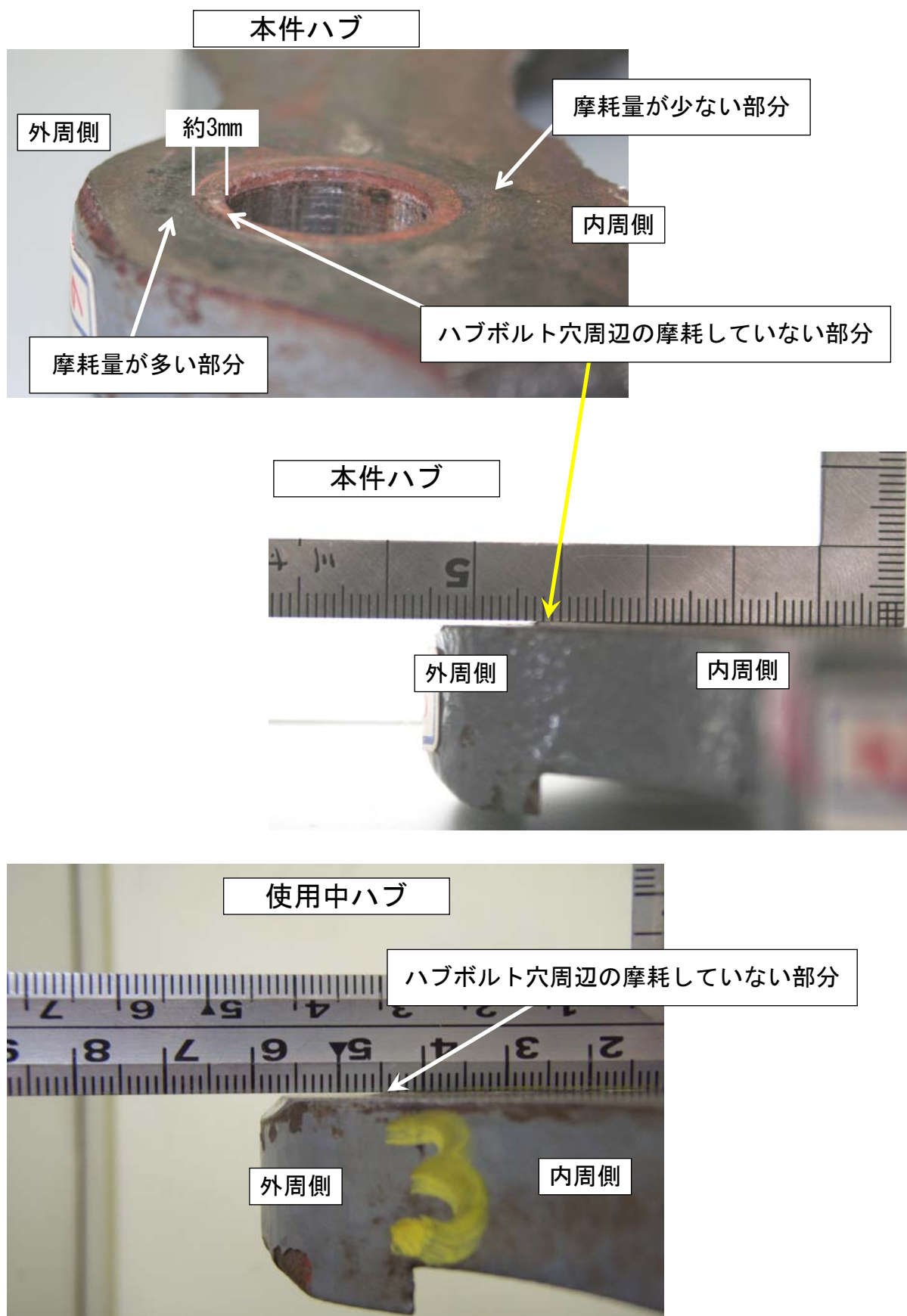
試験片 健全ハブ 2



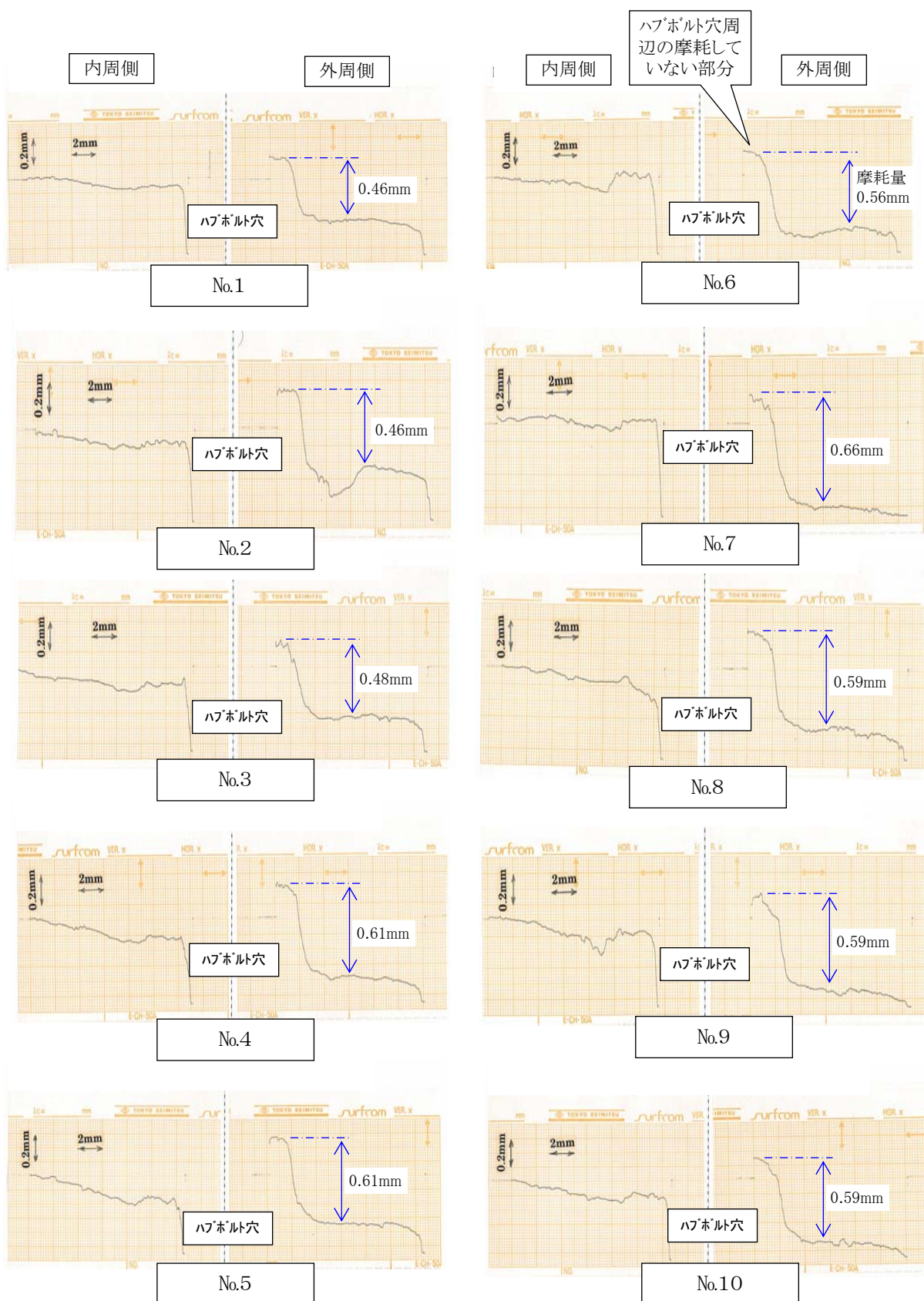
付図 1 4 走行試験での測定応力波形の例



付図 1 5 本件ハブと使用中ハブの摩耗状況

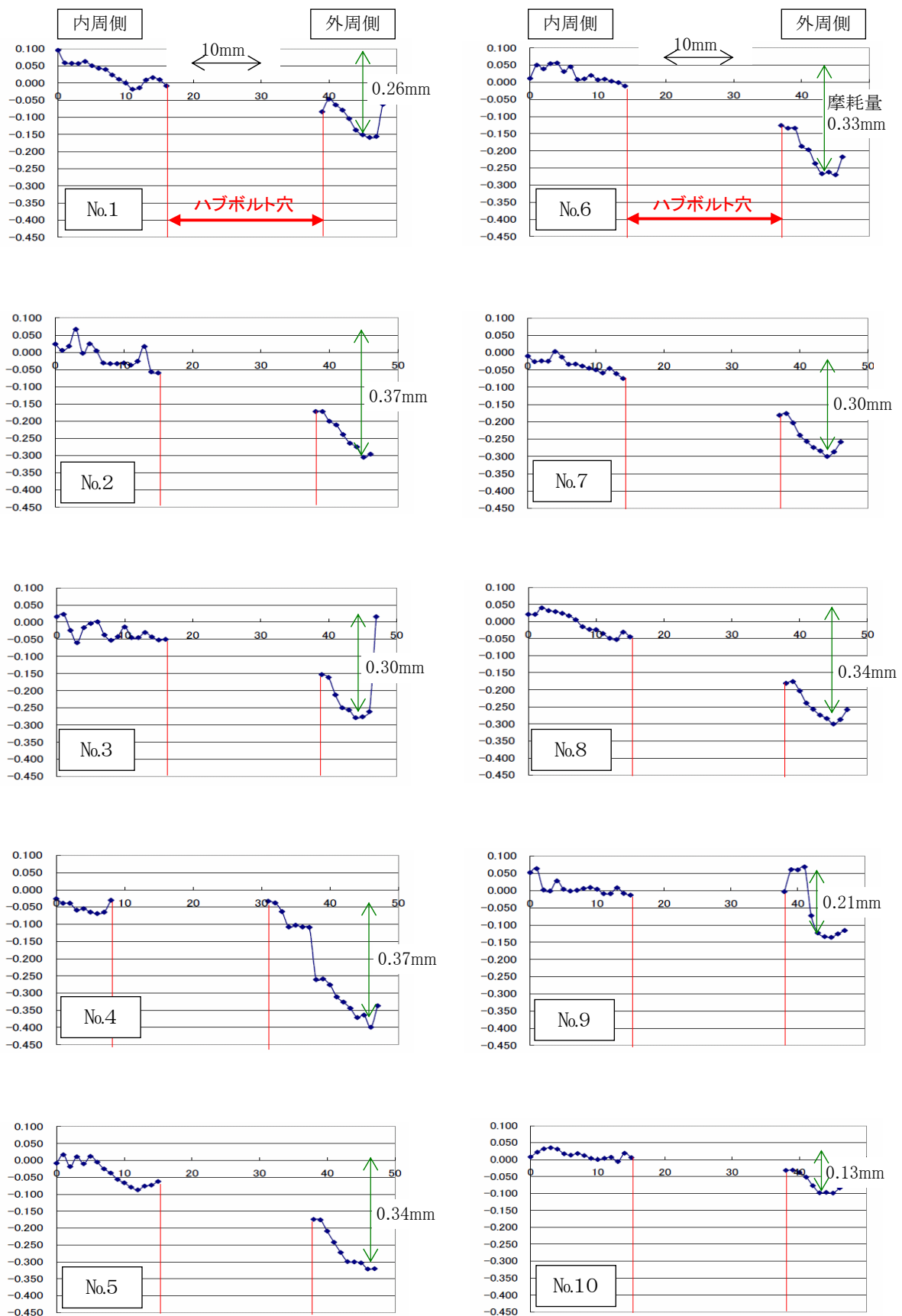


付図16 本件ハブの摩耗状況



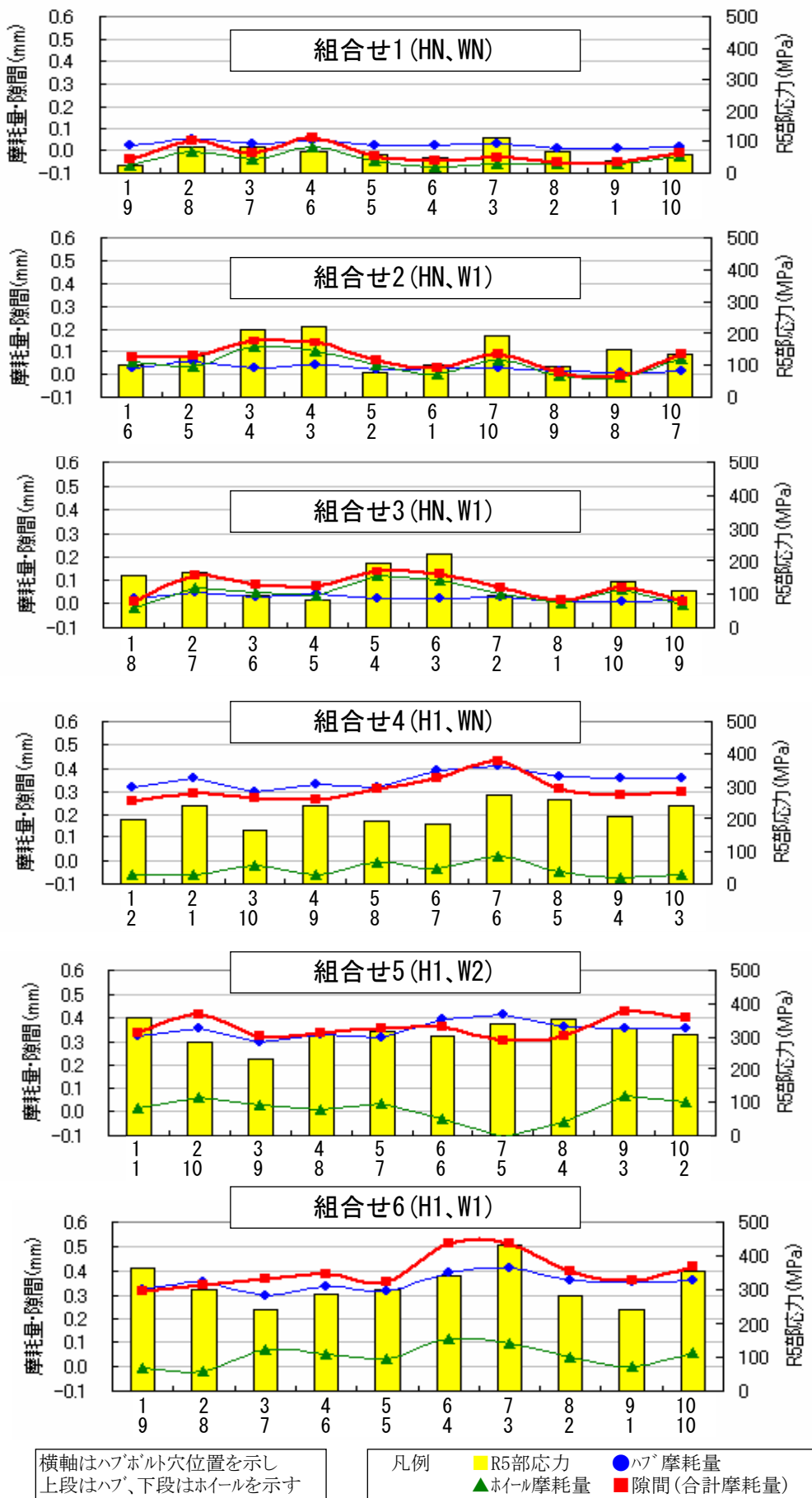
注:ハブボルト穴を境に内周側と外周側は0点が異なるため、内周側と外周側は比較できない。

付図 1 7 本件ホイールの摩耗状況

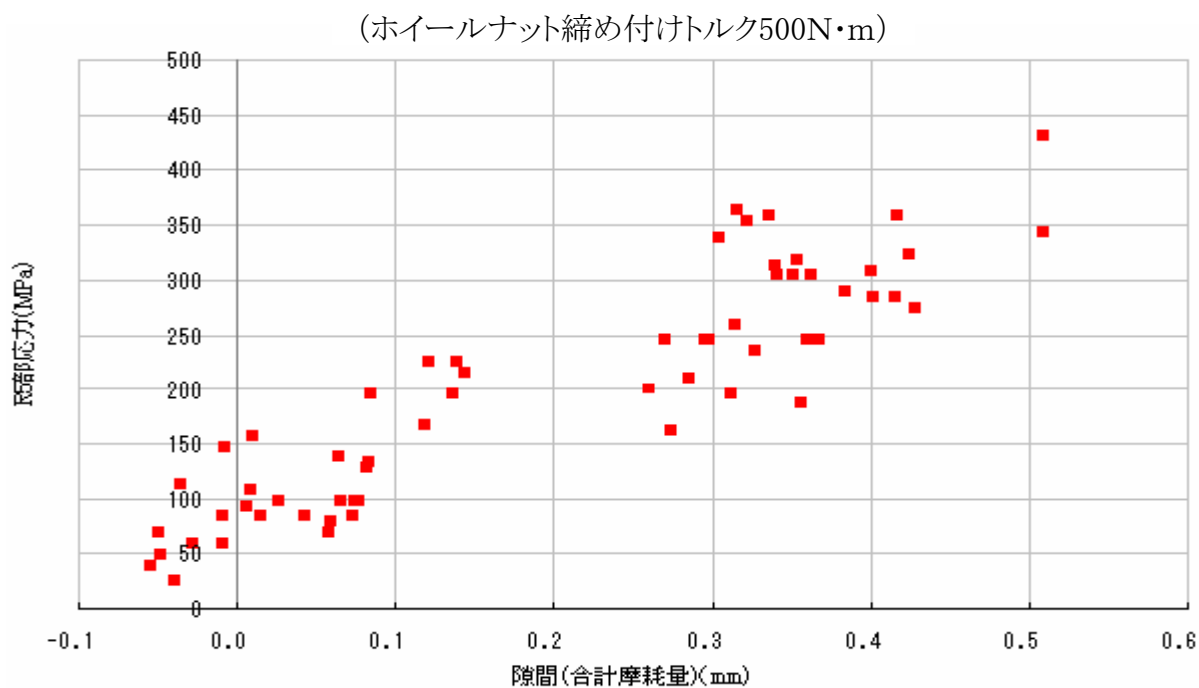


縦軸の1目盛は0.05mmを示す

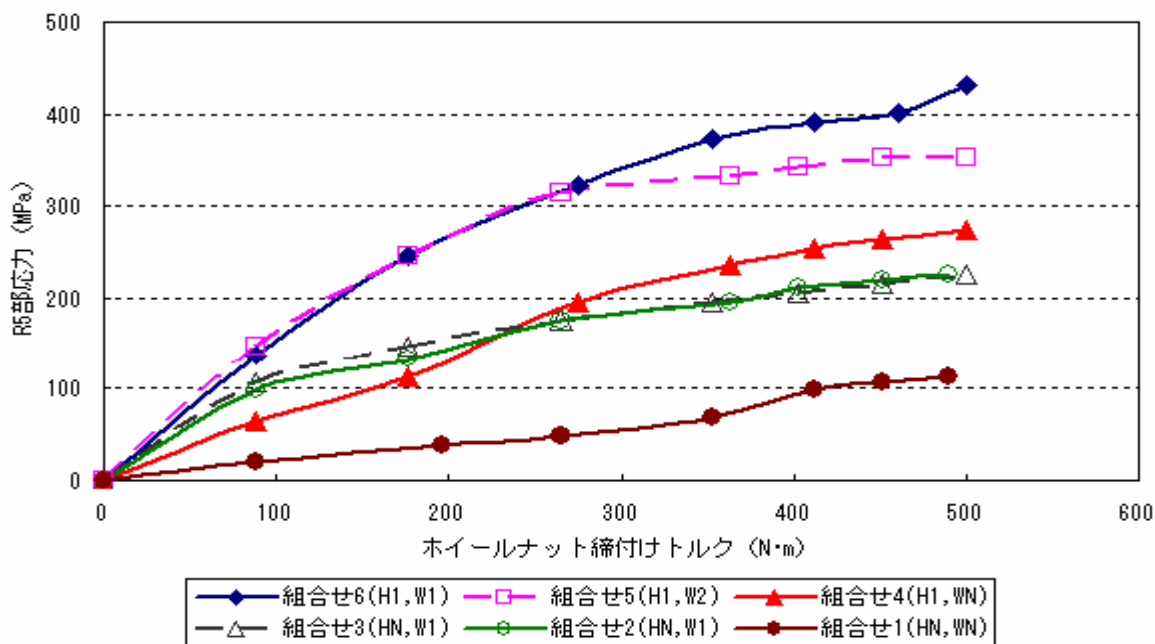
付図 1 8 摩耗量・隙間と応力の関係図



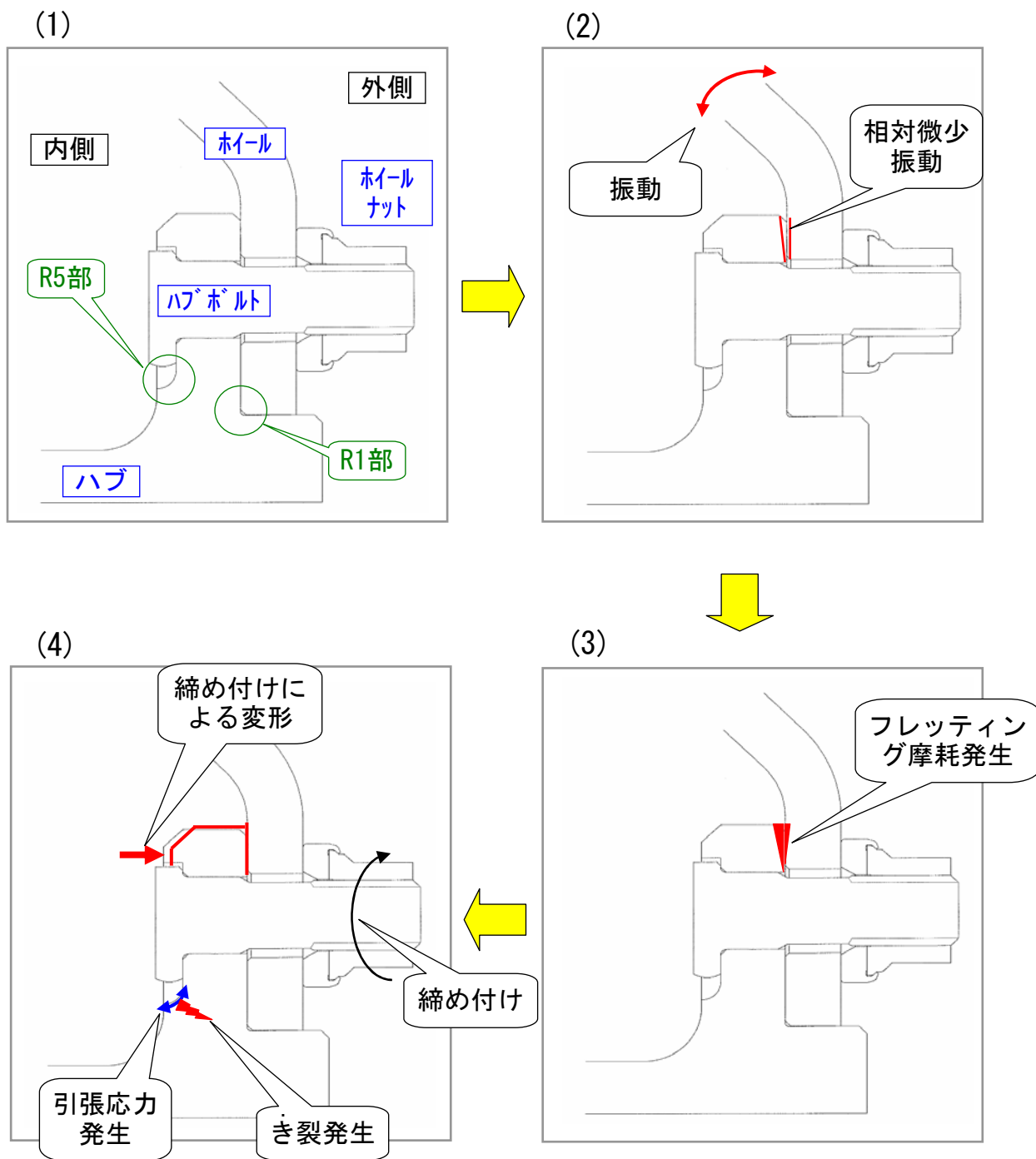
付図 1 9 隙間・応力線図



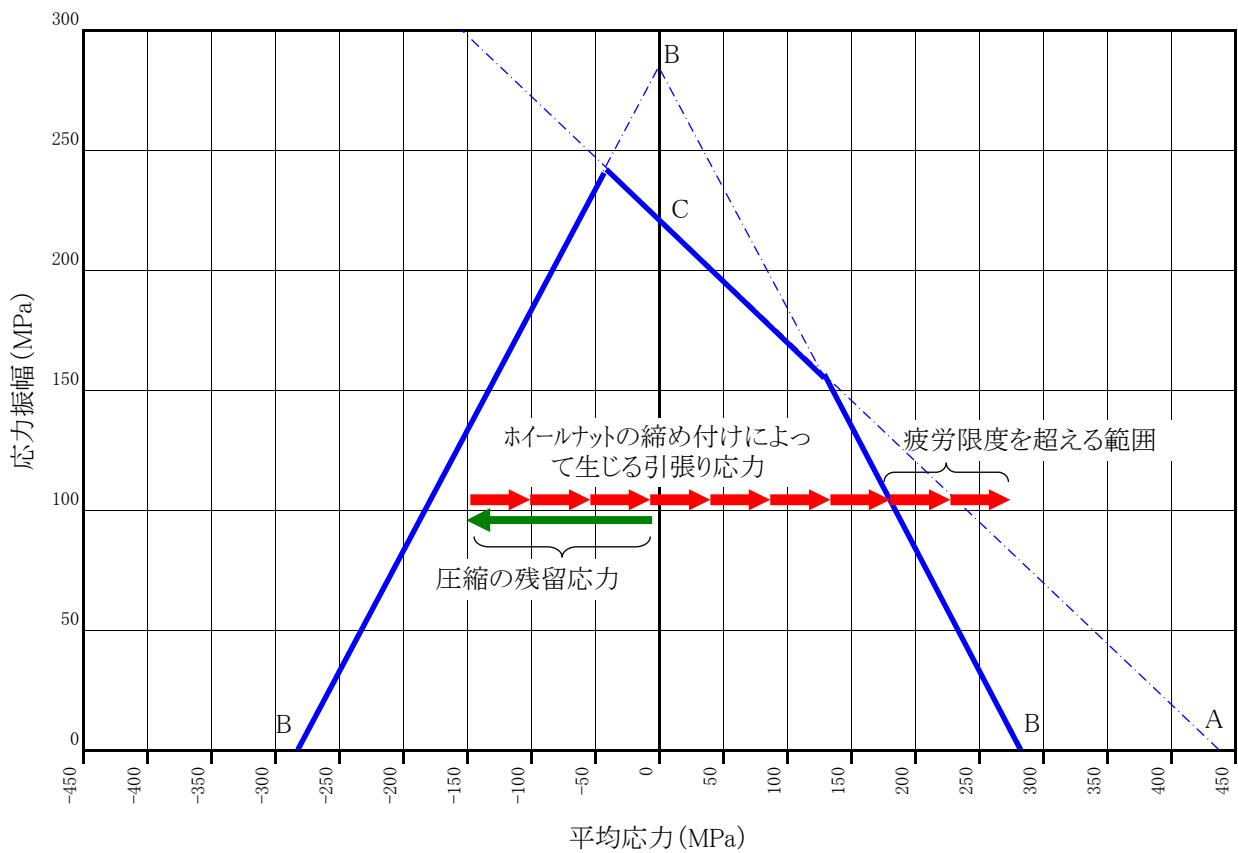
付図 2 0 ホイールナット締め付けトルクと応力線図



付図 2 1 き裂発生メカニズム (推定)



付図 2 2 疲労限度線図



引張り強さ	A	441 MPa (JIS規格値を用いた)
耐力	B	284 MPa (JIS規格値を用いた)
疲労限度	C	220 MPa (引張り強さの0.5倍とした)
応力振幅		102 MPa
平均応力		-150 ~ 280 MPa

(圧縮の残留応力-150 MPaにホイールナット締め付けによって生じる引張り応力の0~430 MPaを加えた。)

《参 考》

本報告書本文中に用いる解析の結果を表す用語の取扱いについて

本報告書の本文中「3 事実を認定した理由」に用いる解析の結果を表す用語は、次のとおりとする。

①断定できる場合

・・・「認められる」

②断定できないが、ほぼ間違いない場合

・・・「推定される」

③可能性が高い場合

・・・「考えられる」

④可能性がある場合

・・・「可能性が考えられる」