

自転車関連研究開発普及事業

平成 23 年度事業実施報告書

CFRP 製自転車の損傷に関する調査と 検査方法について

平成 24 年 3 月

財団法人 自転車産業振興協会 技術研究所

はじめに

当協会では、自転車関連研究開発普及事業として、カーボン等高付加価値自転車の非破壊検査方法開発普及事業を進めており、その初年度として、平成23年度はCFRP製自転車の実態調査及び検査のための非破壊検査装置の開発を実施しました。

CFRP製自転車はその特性から、従来の自転車には見られない破損事例があることから、本事業は、CFRP製自転車非破壊検査方法の確立・普及を図り、CFRP破損に起因する製品事故の未然防止、自転車競技の活性化、及び高級自転車の普及に資することを目的として開発を行いました。

なお、事業の遂行に際しましては、学識経験者および業界有識者で構成する「CFRP製自転車検査方法開発検討会」を設置の上、学識経験者、自転車製造業者、素材メーカーと連携して事業を実施しました。

本報告書をCFRP製自転車の安全普及、安全な取り扱いの参考として活用いただければ幸いです。

財団法人 自転車産業振興協会

会長 野澤 隆寛

目次

1. 事業実施の背景と目的.....	1
2. CFRP 製自転車について.....	1
2.1 CFRP 製自転車フレームの構造.....	1
2.2 CFRP に生じる損傷.....	2
2.3 層間剥離による特性変化.....	3
3. CFRP 製自転車フレームの実使用における損傷調査.....	4
3.1 調査方法と損傷事例.....	4
3.1.1 主に前ホーク、ヘッドパイプ周辺の損傷.....	5
3.1.2 主に上パイプ周辺の損傷.....	15
3.1.3 主に下パイプ周辺の損傷.....	32
3.1.4 主にバックホーク周辺の損傷.....	38
3.1.5 主にチェーンステー周辺の損傷.....	50
3.1.6 その他の損傷.....	54
3.2 損傷事例まとめ.....	56
3.3 損傷が生じた原因.....	62
3.4 損傷が生じやすい箇所.....	62
4. 外力付与における損傷調査.....	65
4.1 調査方法.....	65
4.2 調査結果.....	66
5. 超音波による非破壊検査方法の開発.....	69
5.1 非破壊検査方法の選定.....	69
5.2 超音波による非破壊検査装置の選定.....	70
5.3 既製品による適用範囲.....	70
5.4 超音波による非破壊検査の課題.....	73
6. 非破壊検査装置開発により改善された点と適用範囲.....	77
6.1 「4.外力付与による損傷発生調査」で用いたフレームでの検証.....	77
6.2 その他市販品での検証.....	83
7. 疲労試験による亀裂・層間剥離の伸展調査.....	84
7.1 調査手順.....	84
7.2 調査結果.....	84
8. まとめ.....	90

1. 事業実施の背景と目的

CFRP（Carbon Fiber Reinforced Plastic）は従来自転車で多く用いられてきたクロモリ鋼やアルミ合金などの構造材と比較して、力学特性が優れている、軽量である、腐食しないなどの利点があることから、主にレース用の自転車フレーム・部品に採用され、近年広く普及しつつある。しかしCFRPの特性として、外部から衝撃を受けると表面上は損傷が無いにもかかわらず積層間で剥離などを生じ、それにより力学的強度低下が発生することが知られている。

CFRPは、従来自転車で使用されてきたクロモリ鋼に比べ歴史が浅い素材であるが、近年その進歩が著しい素材である。今後も技術進歩や低価格化により、CFRPの自転車への利用はますます進むと考えられるが、金属とは異なる特性により、今までにない事故やトラブルが起きることも考えられる。損傷が疑われる場合の使用中断に関する警告は、メーカーや専門店等で独自に行われているが、その判断はショップやユーザーに委ねられているのが現状である。さらにCFRP製自転車フレームは高価であるため、多少の損傷があっても継続して使用するユーザーもいるようである。

そこで、製品に起因する事故を未然に防止するため、CFRP製自転車の損傷実態調査と自転車用途に特化した非破壊検査機器の開発研究を実施した。

2. CFRP製自転車について

2.1 CFRP製自転車フレームの構造

CFRP製品は積層板を成形し構造物としたものである。積層板は、エポキシ等の樹脂を浸透させた半硬化状態のプリプレグと呼ばれる中間成形シートを金型に何層にも重ねて、気泡を作らぬようフィルム等でパックされた積層板を真空引きしながらオートクレーブを用い加熱・加圧し成形する方法や、積層したCF（Carbon Fiber）に真空引きを利用し樹脂を流しこみながら、加熱・成形するVaRTM（Vacuum Assisted Resin Transfer Molding）と呼ばれる方法で作成することが多い。これらの手法は、製造業者ごとに独自のノウハウをもち、自転車においても、各社のノウハウを活かしたCFRP製自転車が製造されている。

各製造業者は軽量化に重点を置く、コストに重点を置く、乗り味に重点を置くなどそれぞれの設計思想を持っている。その設計思想を満足するため、繊維を、強度を上げたい方向に向け積層する、CFとは異なるものを織り交ぜる、箇所により肉厚を変える（写真1）などすることで、最適な強度や、剛性、弾性を生み出すことができる。高比強度、高比剛性であるのに加え、設計形状の自由度も高いため、CFRPは自転車製造に適した素材であると言える。

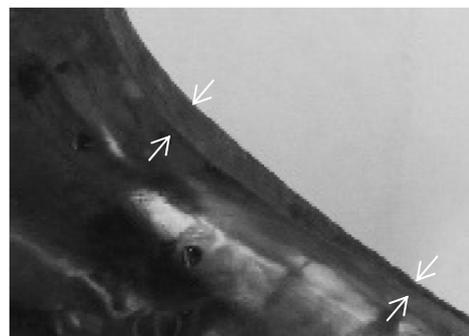


写真1 パイプ肉厚
(フレームの断面)

CFRP 製自転車はその構造も様々である。例えば、写真 2 に示すように、ラグを用いて CFRP 製パイプを接着する場合と、モノコック構造（一体構造）である場合がある。また、つめなどの金属部品と CFRP の接合は写真 3 のように接着している場合が多い。

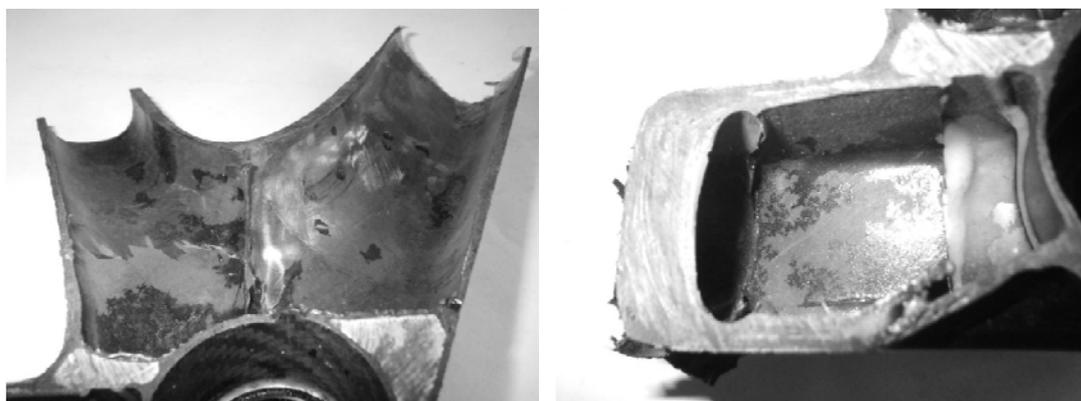


写真 2 接着構造とモノコック構造の例（左：ハンガ部と立パイプ、下パイプがモノコック構造、右：ハンガ部とチェーンステーを接着）



写真 3 金属部品と CFRP 接着部断面の例
（左：ホーク足と前つめ、右：チェーンステーと後つめ）

2.2 CFRP に生じる損傷

CFRP に生じる欠陥や損傷としては、次のようなものが挙げられる。

・製造時に生じる欠陥：

気泡（ポイド）、繊維束の蛇行、樹脂リッチ、異物混入、剥離（接着不良）

・使用時（衝撃時）に生じる損傷：

層間剥離、亀裂

このうち、CFRP 製自転車を使用する際に注意が必要なのが層間剥離である。

CFRP は力学特性が優れている材料であるが、弱点もあり、繊維方向以外に受ける力には弱い。特に積層面に垂直に衝撃等の力を加えると表面や内部に亀裂が生じる場合や、積層間で剥離を起こす、いわゆる層間剥離が生じる場合がある（図 1）。これらの現象は、従来のクロモリ鋼やアルミ合金フレームには無かった CFRP 固有の問題であるが、転倒等で衝撃を受けた際に容易に起こりうる現象であるため、取扱いには注意が必要である。また、CFRP 製自転車フレームは前述のとおり、金属部品と接着された箇所もあるため衝撃により界面で剥離を起こす場合もある。

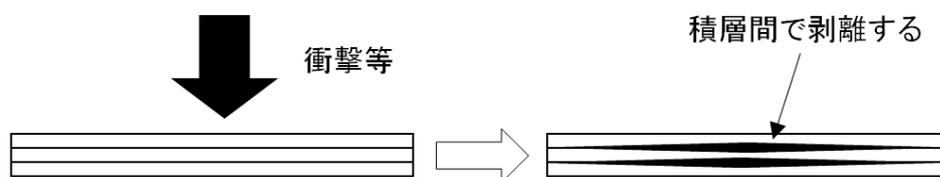


図 1 層間剥離のイメージ図

2.3 層間剥離による特性変化

層間剥離の発生によって大きく変わるのが圧縮強度である¹⁾。例えば、航空機業界などでは、圧縮強度低下によるトラブルを防ぐため、衝撃により損傷を与えた時の衝撃後圧縮強度（Compression After Impact、CAI 強度）を用いた設計を行っているなど、強度低下は無視できない問題である。

また、CFRP は金属材料に見られる様な顕著な降伏点がなく、破壊寸前まで変形を起こしても、永久歪は残らずに復元する為、大きなエネルギーを吸収出来る性質をもつ。その性質ゆえに、CFRP はガラスやコンクリートのように伸びずに突然破壊が生じる「脆性破壊」の性質をもつ。金属材料では一般的には伸びてから破壊が生じる「延性破壊」であるため、破壊に至る過程も CFRP と金属材料では異なるものである。

自転車に関しては、使用方法や乗り方、路面状態により各パイプには引張方向・圧縮方向・ねじれ方向等様々な力が加わる。CFRP 製自転車において、層間剥離を生じ圧縮強度が低下した際には突然折損する危険性がある。層間剥離は衝撃により生じることから、自転車のあらゆる箇所で起こる可能性があり、特に使用時に応力が大きくなる箇所では気をつけなければならない。

また、CFRP 製自転車の表面は化粧板で覆われている、あるいは塗装されていることが多いため、内部損傷である層間剥離や界面剥離を目視で判別できないことも多く、使用者が気づかず継続して使用していることもある。

¹⁾ 野原利雄・松嶋正道「衝撃損傷を受けた CFRP 積層板の圧縮強度について」 航空宇宙技術研究所報告 1995 年

3. CFRP 製自転車フレームの実使用における損傷調査

本章では、

① 損傷が生じた原因は何か ② 損傷が生じやすい箇所はどこかを調べるため、実際にユーザーが使用続行不可能と判断した CFRP 製自転車フレームを収集し、①、②について調査した結果を報告する。

3.1 調査方法と損傷事例

実際にユーザーが使用続行不可能と判断した CFRP 製自転車フレームを収集するために表 1 に示すような方法で、51 台の自転車を収集した。

表 1 収集方法について

収 集 方 法	・損傷発生の原因・損傷状況・損傷発生後の使用状況等の損傷履歴が分かる CFRP 製自転車(フルカーボン車、カーボンバック車)を収集し、本事業に役立てるとの目的を提示の上、当会ホームページ上で募集した。(有償入手)
募 集 期 間	平成 23 年 8 月 1 日～平成 23 年 12 月 9 日
申 込 者 数	57 人
収 集 し た 自 転 車	51 台

3.1.1～3.1.6 章では CFRP 製自転車フレームの損傷について、損傷事例ごとに該当箇所のおよその位置と外観写真、損傷の状態や大きさについてまとめた。損傷理由、使用期間、走行距離、乗員体重、年齢、主な使用用途については、使用していたユーザーから申告された内容である。

図中の表記について

-  . . . 外観で損傷が確認できた箇所
(擦傷など軽微なものは含んでいない)
-  . . . 折損箇所 (パイプが二つに分離している状態)

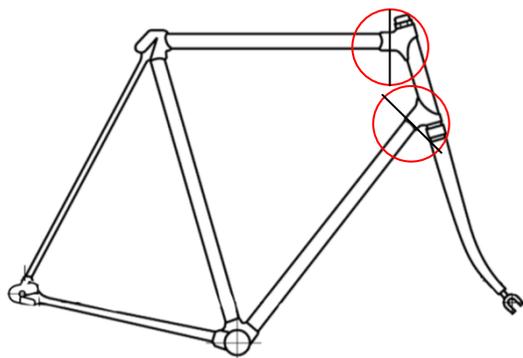
寸法を記載したものについては、外観で損傷が判別可能な範囲で採寸した。全て [mm] で表記した。

なお、本調査報告では、自転車の損傷に関する情報を掲載しているが、これらは製品に起因する損傷ではなく、使用時のユーザーの過失や不慮の事故により損傷したものである。

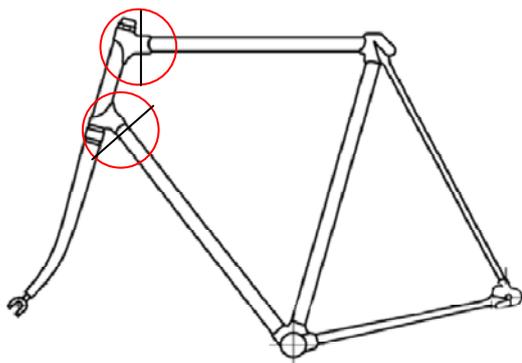
3.1.1 主に前ホーク、ヘッドパイプ周辺の損傷

【事例 1-1】自転車にて登山中、ハンドルを取られ単独で転倒した。ヘッドパイプが上パイプ、下パイプから割れて外れた。

申込者年齢	30 歳	体重	70 kg
使用期間	1 年 3 カ月	走行距離	12,000 km
主な使用用途	趣味、レース		



上パイプ折損



下パイプ折損

P6～P55 は閲覧できません

3.2 損傷事例まとめ

● 申込者の年齢構成

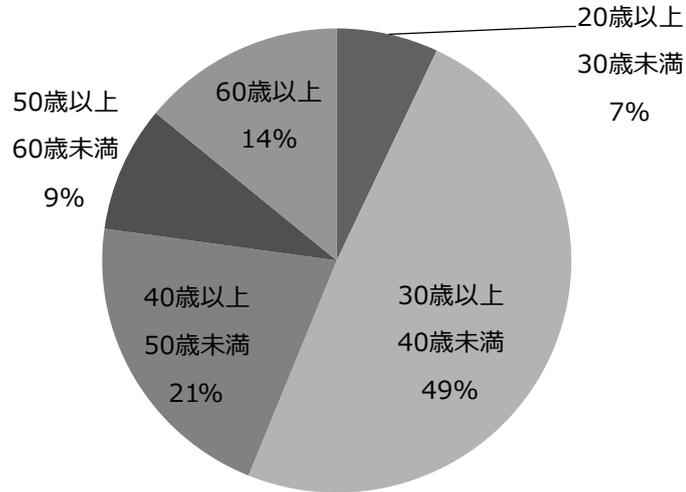


図 2 申込者の年齢構成 (n=57)

「30歳以上 40歳未満」の申込者が最も多く、約半数（49%）を占めていた。次いで「40歳以上 50歳未満」（21%）、「50歳以上 60歳未満」（9%）となっていた。性別は全て男性からの申込であった。北海道から鹿児島県まで、全国各地から申し込みがあった。申込者の平均年齢は42.3歳であった。

● 乗員体重

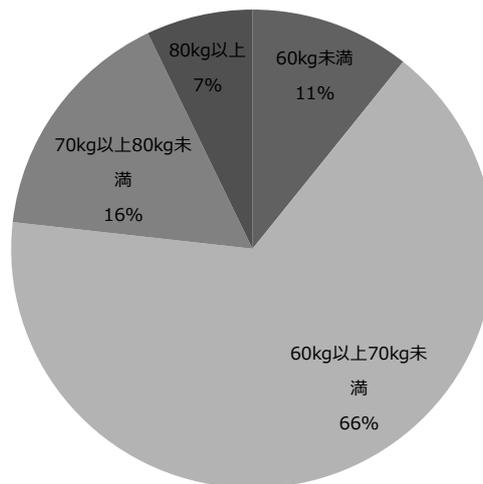


図 3 乗員体重 (n=56)

「60kg以上 70kg未満」の乗員が最も多く、6割以上（66%）を占めていた。次いで「70kg以上 80kg未満」（16%）、「60kg未満」（11%）となっていた。平均体重は64.1kgであった。

● CFRP 製自転車購入時の価格帯

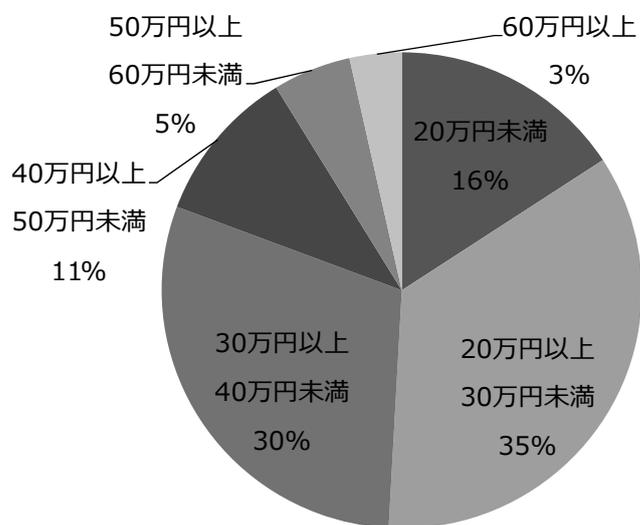


図 4 CFRP 製自転車購入時の価格帯 (n=57)

CFRP 製自転車の購入価格としては、「20 万円以上 30 万円未満」が 35%と最も多かった。次いで「30 万円以上 40 万円未満」(30%)、「20 万円未満」(16%)の順になっており、40 万円未満が約 8 割を占めていた。購入価格は平均で 31.9 万円であった。

● CFRP 製自転車の使用用途

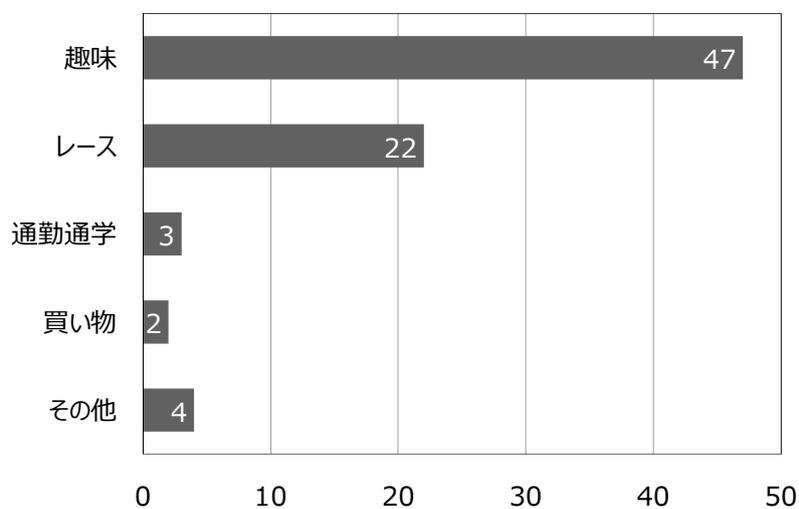


図 5 CFRP 製自転車の使用用途（複数回答可、n=57）

CFRP 製自転車の使用目的は「趣味」が多くを占めており、申込者の約 80%が趣味で使用していた。また、レースで使用している方も多く、申込者の約 40%がレースで使用していた。それ以外の用途ではあまり使われていなかった。

● CFRP 製自転車の保管場所

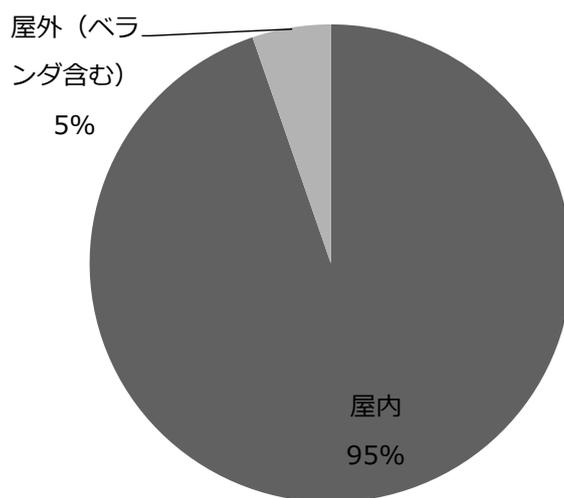


図 6 CFRP 製自転車の保管場所（n=57）

CFRP 製自転車の保管場所は「屋内」が 95%を占めていた。

● 損傷が生じるまでの使用期間

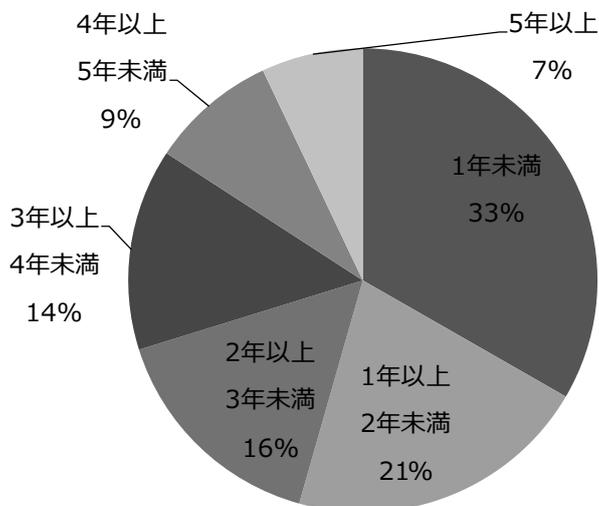


図 7 損傷が生じるまでの使用期間 (n=57)

CFRP 製自転車に損傷が生じるまでの使用期間としては、「1年未満」が33%と最も多かった。次いで「1年以上2年未満」(21%)、「2年以上3年未満」(16%)の順になっており、3年未満で損傷した事例が約7割を占めていた。損傷が生じるまでの使用期間の平均値は約2年5カ月であった。

次に、損傷が生じるまでの使用期間について、n数の多い「趣味」、「趣味とレース」で比較したが、使用用途が趣味とレースである場合の方が、3年未満で損傷が生じることが多い傾向があったがn数が少ないため、「2年以上3年未満」に該当する申込者がいないなど、偏りがあった。損傷が生じるまでの使用期間の平均値は「趣味とレース」で約2年6カ月、「趣味」で約2年4カ月と大きな差はなかった。

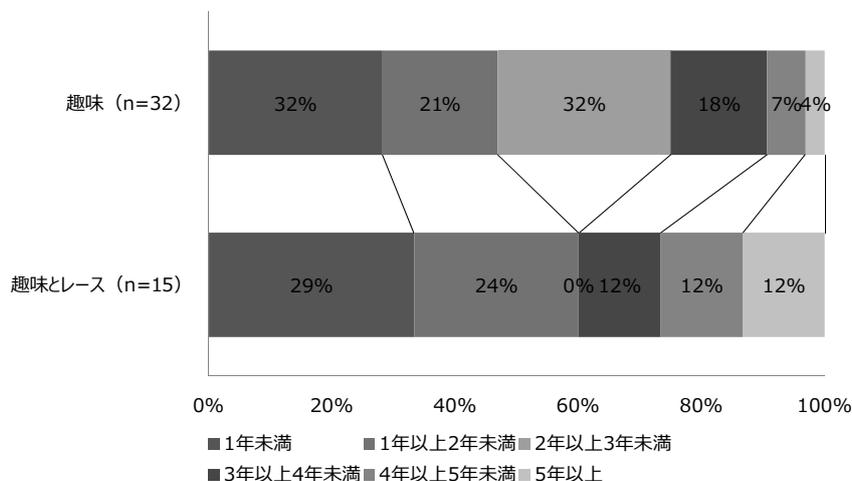


図 8 損傷が生じるまでの使用期間 (使用用途別)

● 損傷が生じるまでの走行距離

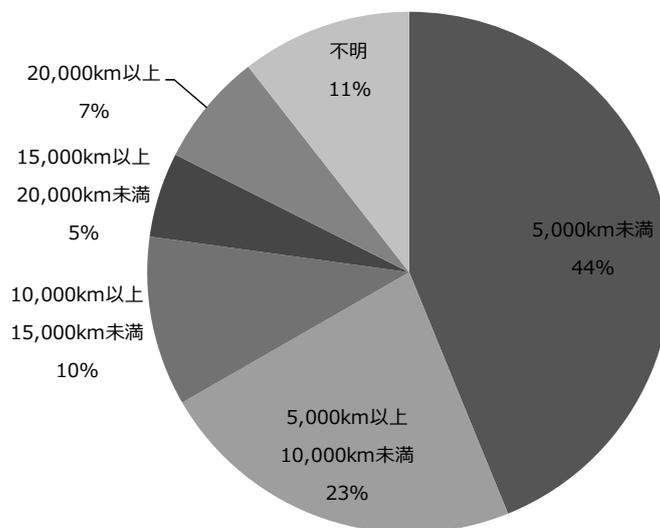


図 9 損傷が生じるまでの走行距離 (n=57)

CFRP 製自転車に損傷が生じるまでの走行距離としては、「0km 以上 5,000km 未満」が 44% と最も多かった。次いで「5,000km 以上 10,000km 未満」(23%)、「10,000km 以上 15,000km 未満」(10%) の順になっており、走行距離 15,000km 未満で損傷した事例が約 7 割を占めていた。損傷が生じるまでの走行距離の平均値は約 8,900km であった。

次に、損傷が生じるまでの走行距離について、n 数の多い「趣味」、「趣味とレース」で比較したが、使用用途が趣味のみである場合の方が、短い走行距離で損傷が生じる傾向があった。損傷が生じるまでの走行距離の平均値は「趣味とレース」で約 9,300km、「趣味」で約 7,500km と 1,800km 程度の差があった。

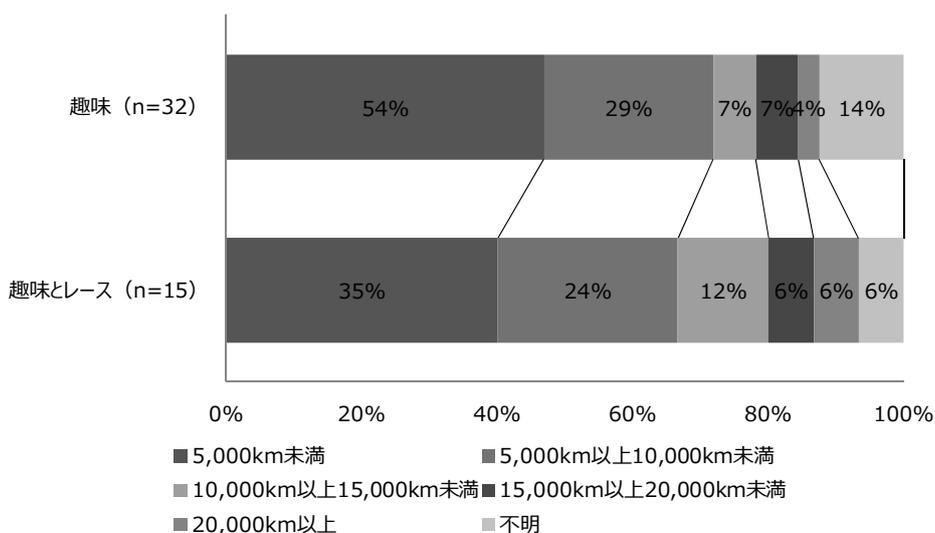


図 10 損傷が生じるまでの走行距離 (使用用途別)

● 損傷が生じた時の状況

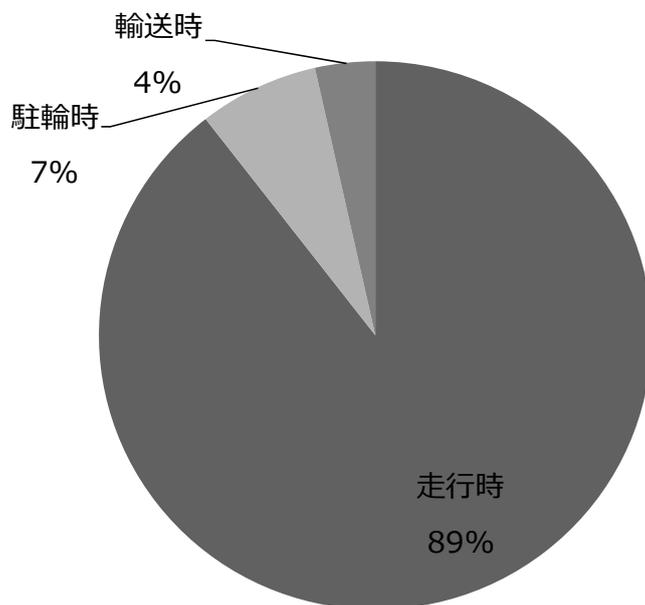


図 11 損傷が生じた時の状況 (n=57)

走行時に損傷が生じた事例が約9割を占めていた。駐輪時に損傷が生じた事例の中には、駐輪時に損傷に気付いたものも含まれている。

次に、走行時に損傷が生じた原因の内訳であるが、自ら衝突・転倒した事例と、他者と衝突・転倒した事例がほぼ同じ割合であった。

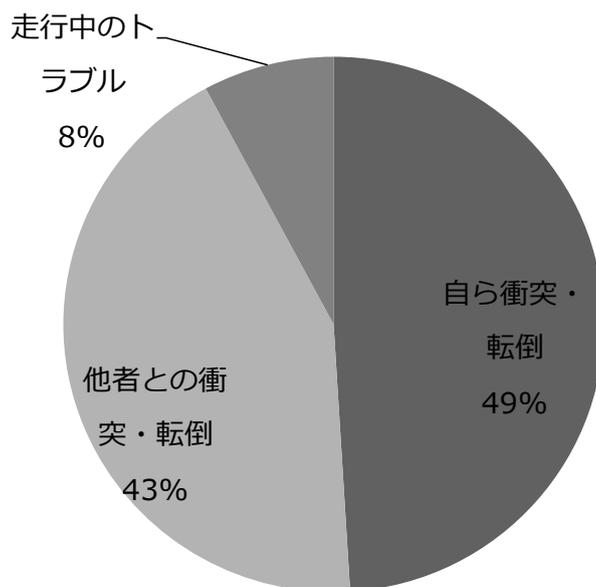


図 12 走行時の損傷理由 (n=51)

3.3 損傷が生じた原因

今回収集した CFRP 製自転車について、判明したことを以下にまとめた。

- ・ 図 5 より、今回収集した CFRP 製自転車は日常的に使用するためではなく、趣味の為に購入される事例が多く、レースで使用されたものも半数程度あった。
- ・ 図 7 より 3 年未満で損傷した事例が約 7 割を占めていた。損傷が生じるまでの使用期間の平均値は約 2 年 5 カ月であった。
- ・ 図 9 より、走行距離 10,000km 未満で損傷した事例が約 7 割を占めていた。損傷が生じるまでの走行距離の平均値は約 8,900km であった。
- ・ 図 11 より、約 9 割の CFRP 製自転車が走行中に損傷した。
- ・ 図 12 より、走行中の損傷理由としては自ら衝突・転倒した事例と他者との衝突・転倒による事例が同程度の割合であった。

3.4 損傷が生じやすい箇所

今回収集した 51 台の CFRP 製自転車フレームで、主な損傷(表面亀裂～折損)箇所を 図 13 に赤丸で示した。

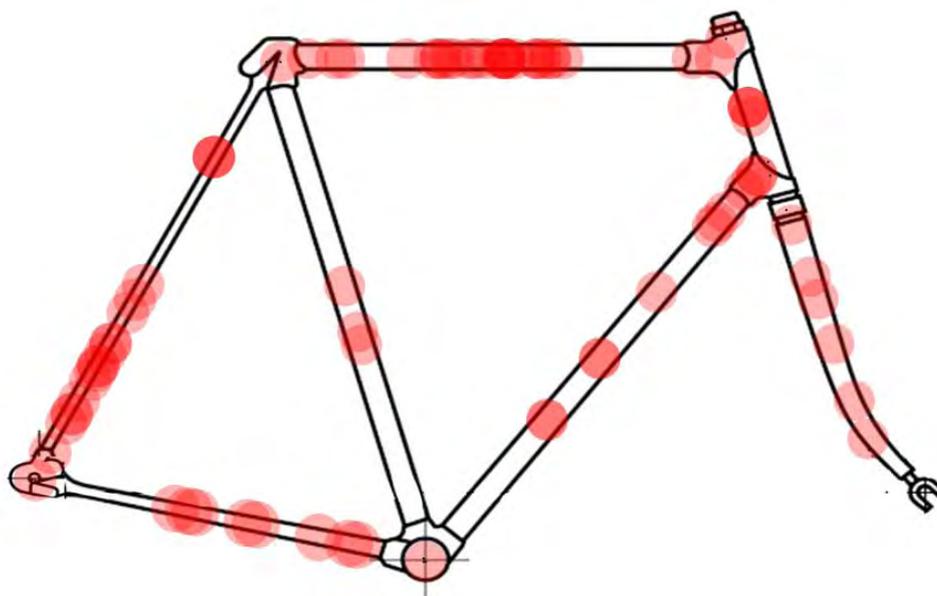


図 13 損傷箇所(左右をまとめて記載している)(n=81)

図 13 において、赤色の濃い箇所が損傷の多い箇所であり、上パイプ中央付近、バックホーク後詰め側付近、ヘッドパイプ～下パイプ付近に損傷が多いことが分かった。特に上パイプの中央付近については損傷事例が非常に多かった。

以下、損傷事例が多かった箇所について、それぞれの損傷の傾向をまとめた。

・上パイプ

転倒時に、路面・ガードレールや他車に衝突した事例が多く、駐輪時に転倒したり、あるいは物が落ちてきたり、乗車した際に足をぶついたりして生じた損傷もあった。損傷箇所については、**図 13**に示すように中央付近の損傷が非常に多かった。また、側面に亀裂が生じた事例が多く、左右側面あわせて、上パイプ損傷事例の6割以上を占めた。

損傷の状態については、側面に亀裂が生じる割合に比べ、折損や全周に渡る亀裂が生じた割合が低く、上パイプ損傷事例の2割程度であった。

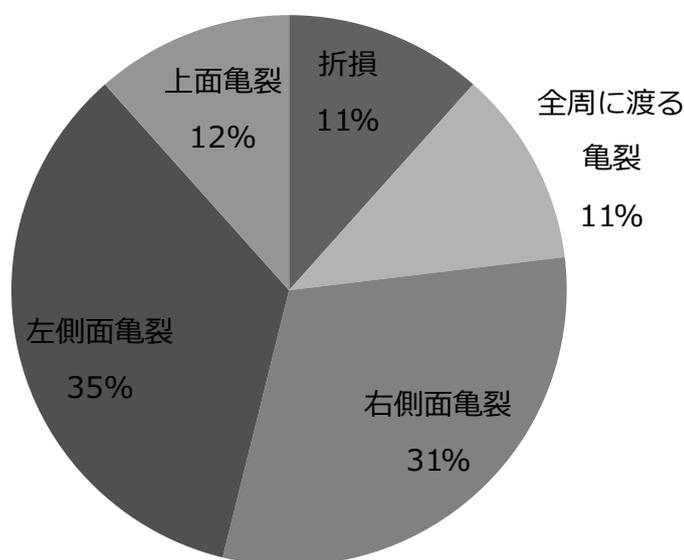


図 14 上パイプの損傷箇所・状態 (n=26)

・バックホーク

上パイプと同様、転倒時や衝突時に損傷が生じる事例が多かった。左バックホークに比べ右バックホークに損傷が生じた事例がやや多かった。損傷箇所については、**図 13**に示すように後つめ側で損傷が生じる事例が多かった。

損傷の状態に関しては、折損あるいは全周に渡る亀裂が生じた事例が多く、左右バックホークあわせてバックホーク損傷事例の4割以上を占めた。

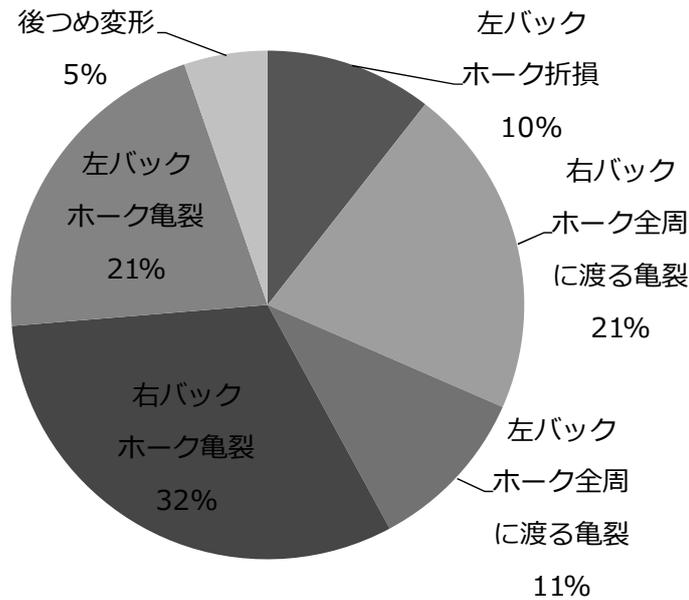


図 15 バックホークの損傷箇所・状態 (n=19)

・ヘッドパイプから下パイプにかけて

路面や正面から他者に追突した際に、ヘッドパイプと下パイプの境目で損傷が生じる事例が多かった。前後方向での衝突の際に生じた損傷が多いため、側面だけに生じる損傷ではなく全周に渡る亀裂や左右側面に渡り亀裂が生じた事例が多かった。また同時に上パイプや前ホークも損傷が生じる事例が多かった。

図 13 に示すように、今回の調査結果からは損傷が生じた原因や生じやすい箇所の傾向を把握できた。しかし、落車・転倒により、フレームのどの部位であっても落車・転倒による衝撃から逃れることはできないことから、自転車のどの箇所においても損傷を受ける可能性があることも分かった。

4. 外力付与における損傷調査

本章では、新品の CFRP 製自転車に転倒やおもりの落下衝撃などで、どの程度の外力を付与した際に損傷が生じるか、3 銘柄の CFRP 製自転車を用い調査を行った。

4.1 調査方法

転倒や衝突などで損傷を受けやすいフレームの側面を中心に、衝撃や力を加えた。供試品として、CFRP 製自転車フレーム 3 銘柄を用いた。

以下、損傷を与えるために行った試験方法や衝撃を加えた箇所を表 2 にまとめた。

表 2 衝撃付与方法

衝撃付与方法	概要	損傷を与えた箇所
①落下衝撃試験	落下衝撃試験機を用いて JIS D 9301:2010 のサドルの耐寒性試験で用いられる 40HRA 以上、重量 8kg の半球状のおもりを自由落下し、衝突させた。	・上パイプ ・下パイプ ・チェーンステー ・バックホーク
②転倒試験(路面凹凸との衝突)	地面との垂直方向から 4 度傾けた状態から静かに手を離し、路面に設置した建築用コンクリートブロックに衝突するよう転倒させた。	・ホーク足 ・チェーンステー
③転倒試験(ハンドルバーと上パイプの衝突)	地面との垂直方向から 4 度傾けた状態から静かに手を離し、転倒させた。なお、ハンドルバーが上パイプに当たっている状態で衝撃を加えるため、ハンドルバーが上パイプに接触した状態で転倒させた。	・上パイプ
④車止め衝突試験	65kg の乗員が車止めに向かって時速 10km 程度で走行し、乗員が自転車に乗ったまま車止めを通過する際、チェーンステーが車止めに当たるよう走行した。	・チェーンステー
⑤シートポストと立パイプの接触を想定した落下衝撃試験	サドルを組付けたシートポストを、立パイプのくびれ部に接触する位置まで挿入後(シートポストはクランプしない)、立パイプが地面に対して垂直になるようフレームを固定し、サドルの座面におもりを自由落下させた。	・立パイプ
⑥締付トルク試験	締付トルクを過剰に加えた。	・シートポスト ・ホークステム

4.2 調査結果

① 落下衝撃試験

CFRP 製自転車 3 銘柄について、衝撃を付与した箇所と、亀裂を確認した時、あるいは衝撃時に生じる「ピシッ」という異音やコインタッピングなどで損傷を確認した時の衝撃力（衝撃力については、(社) 自転車協会自転車安全基準ではエネルギー（「おもりの質量」×「落下高さ」×「重力加速度」）で表記しているため、それに準じた）を図 16 と図 17 にまとめた。なお、図 16 では亀裂や異音を確認した衝撃力の最大値と最小値を、図 17 では 3 銘柄の平均値を示した。

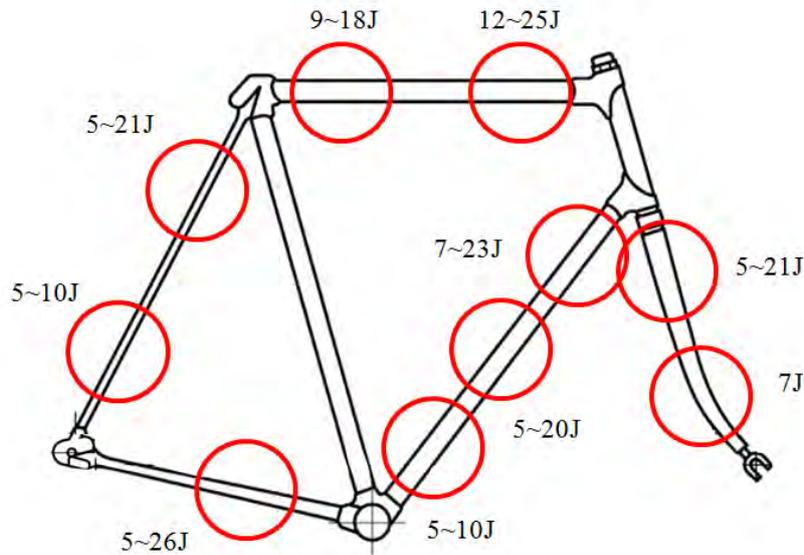


図 16 衝撃を付与した箇所と衝撃力

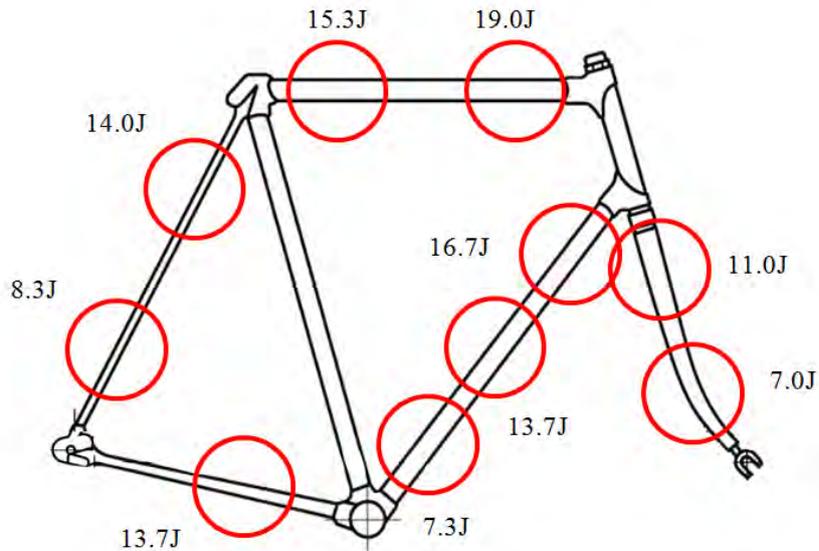


図 17 3 銘柄での衝撃力平均値

フレームの形状や構造の違いなどもあり、フレーム側面各箇所への衝撃に対して強い銘柄と弱い銘柄があった。衝撃力が小さいものでは、5J以下（8kgの半球状のおもりを約6cmの高さから自由落下）で亀裂が生じた。特にバックホークの中央付近への衝撃に関しては、各フレームとも低い衝撃力でも、大きな亀裂が生じた。塗装が施されているものについては、衝撃時に異音が生じるが、外観ではほとんど変化がないものもあった。平均値を見ると前ホーク足、下パイプの中央、バックホークの中央部付近がフレーム側面への衝撃に弱い傾向があった。3章で損傷事例が多かった上パイプについては、他の箇所と比較して衝撃に弱いという傾向はなかった。

② 転倒試験（路面凹凸との衝突）

代表的な損傷を写真4と写真5に示す。転倒時の跳ね返り方やブロックへの当たり方が各自転車で異なるが、前ホーク、チェーンステアともに表面材に亀裂等の損傷が目視で容易に確認できたことから、塗装の有無に関係なく、内部での層間剥離も進んでいるものと考えられる。



写真4 チェーンステアの代表的な損傷（目視で確認できる部分）

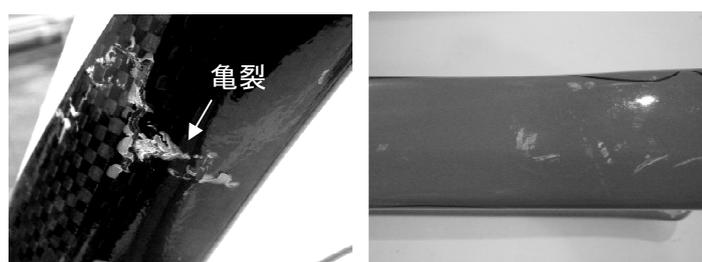


写真5 前ホークの代表的な損傷（目視で確認できる部分）

③ 転倒試験（ハンドルバーと上パイプの衝突）

②の転倒試験とは異なり、外観で判別できる損傷が確認できなかった。実際は落車・転倒時にハンドルバーと上パイプの衝突により損傷が生じる事例があったが、本試験ではただ転倒させただけであったため、衝撃が小さかったものと考えられる。

④ 車止め衝突試験

衝突の状況を写真 6 に、試験後の外観を写真 7 に示す。



写真 6 チェーンステーの衝突の状況



写真 7 衝突試験後の外観

転倒による衝撃とは異なり、走行させながら衝撃を付与したこともあり、いずれのフレームでも側面を擦ったような損傷が生じた。いずれも外観で損傷が判別できたが、衝撃を付与する箇所や走行速度等、試験の再現性が乏しいことに加え、各自転車でチェーンステーの形状が異なるため、傷の付き方の違いが大きかった。

⑤ シートポストと立パイプの接触を想定した落下衝撃試験

衝撃力が 9～22J 程度（平均 15.3J）で異音を確認したが、内部から衝撃を加えたため、外観で判別しづらかった。

⑥ 締付トルク試験

シートポストのクランプ部については $20\text{N}\cdot\text{m}$ でも異音を確認できず、外観もほとんど変わらなかった。ホークステムの締付部については約 $17\text{N}\cdot\text{m}$ で異音を確認できたが、外観では判別できないものもあった。

外力付与における損傷調査では外観の亀裂、あるいは試験時に聞こえる異音などで損傷が生じたと判断したが、実際は損傷がどのような状態か確認できていない。そこで、次章では、損傷を調べる非破壊検査方法について検討した。

5. 超音波による非破壊検査方法の開発

5.1 非破壊検査方法の選定

CFRP 製品の非破壊検査方法としては超音波探傷試験、X 線透過試験、アコースティックエミッション試験、赤外線サーモグラフィーなどの方法があり、今日に至るまで様々な研究が進められている。

今回、非破壊検査方法を検討するにあたり、将来的に競技会場で非破壊検査を実施することも考慮し、特別な環境を必要としない環境下での検査を可能とするために、以下の 3 点を技術的要件とし、非破壊検査方法を検討した。

- ① 再現性のあるデータが測定でき、測定内容を用いて、自転車の使用可・不可が判断できること
- ② 傷の性状が明瞭に判別でき、電子化されたデータが出力可能であること
- ③ 検査装置は容易に運搬が可能であること

表 3 に各非破壊検査方法について、概要と主な長所・短所をまとめた。

表 3 非破壊検査方法について

検査方法	概要	主な長所	主な短所
X 線透過、 X 線 CT	試験体を透過した軟 X 線を CCD カメラで受け、その強弱から判断する	複雑な構造部材にも適用可能である	検査難易度が高い 可搬性に乏しい
超音波探傷	周波数 0.5MHz~25MHz の超音波を試験体に伝搬させ、その伝播状態から判断する	装置が小さく取扱が容易である	波形表示判断の技量が必要 凹凸面での評価が難しい
アコースティックエミッション	応力を負荷した時の構造変位で発生する微弱的な音（弾性波）を検出して判断する	静的・動的試験時にリアルタイムで評価可能である	被検査物に一定の応力を付加する必要がある 大まかな損傷位置しか測定できない
赤外線サーモグラフィー	試験体表面の赤外線量を検知・計測し判断する	被検査物全体を一度に短時間で検査可能である	検査環境に限られる 表面状態のみ検査可能である

3つの要件を満たす非破壊検査方法について検討した結果、可搬性や難易度の点から超音波による非破壊検査が最適であると判断した。

超音波とは音波の一種で、高い周波数をもつ弾性波である。人間が知覚できる音の周波数はおよそ 20 Hz から 20 kHz までであり、超音波はそれよりも高い周波数をもつ。超音波の性質としては

- (1) 直進性を持つ
- (2) 超音波の当たる材質により、透過・減衰・反射する
- (3) 気体中は伝わりにくく、固体や液体中は伝わりやすい

などがある。これらの性質を利用し、被検査物表面に直接超音波を当て、その反射波（エコー）をモニタリングすることで超音波による非破壊検査を行う。被検査物に超音波を当て、表面・底面・欠陥からの反射波を分析し画像化することで、より詳細な非破壊検査が可能となる。

5.2 超音波による非破壊検査装置の選定

装置については、東芝電力検査サービス株式会社（以下、東芝）の「Matrixeye™ EX」をベースとし、東芝と共に CFRP 製自転車用の非破壊検査装置の研究開発を進めることとした。

「Matrixeye™ EX」は、最大 64 個の超音波送受信圧電素子を内蔵した超音波カメラ（プローブ）を搭載しており、電子走査により収集した数千の超音波エコーデータを東芝独自の 3D 開口合成法で処理し、CFRP 特有の内部損傷を高精度に 3 次元画像化することで、被検査物の損傷範囲の特定を容易とした装置である。また、小型・軽量で、操作性、視認性に優れた装置であるため、前述の CFRP 製自転車の非破壊検査の必要要件にも合致する。

実際の使用例としては、全日本空輸株式会社にて、CFRP が多く使用されているボーイング 787 の検査・整備のため導入されているほか、自動車業界の溶接などの非破壊検査にも用いられており、装置の活用実績もあると判断した。²⁾

5.3 既製品による適用範囲

既製品の「Matrixeye™ EX」を用いて、4章で損傷を与えた3銘柄のCFRP製自転車フレームに、どのような損傷が生じたかを判断できるのか調査した。表4に検査結果をまとめた。超音波の周波数は5MHz、プローブは、測定箇所によって既製品のフラットプローブとコンケーブプローブを併用し、シューにはソフトシュー、接触媒質にはグリセリン系のものを用いた。層間剥離が生じた際の代表的な非破壊検査画像を図18に示す。

²⁾ 東芝電力検査サービス株式会社 Matrixeye™ EX カタログなど

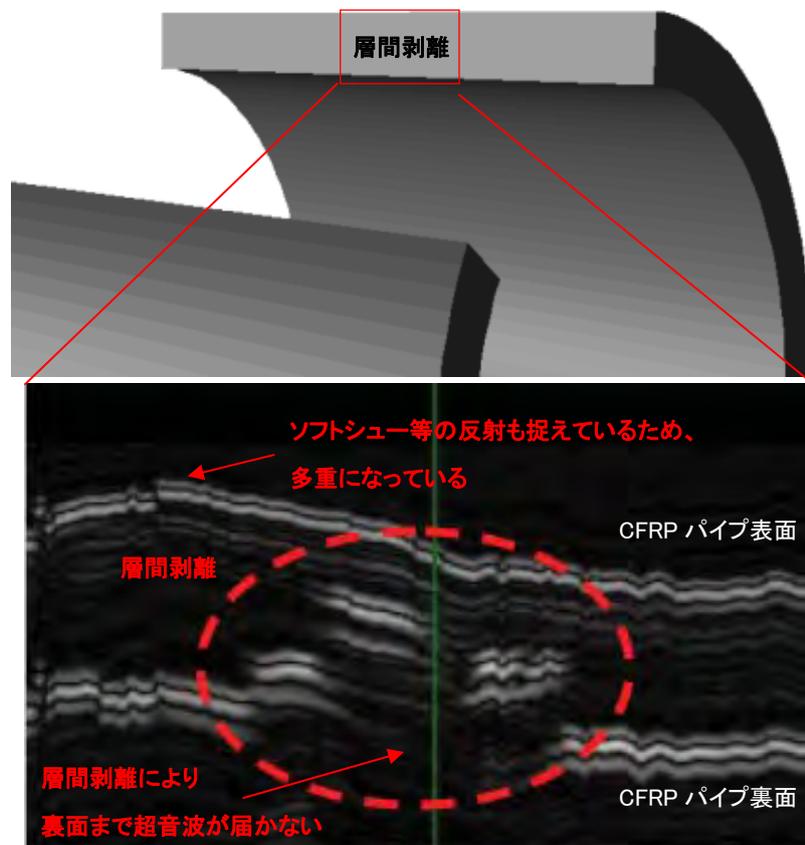


図 18 超音波による非破壊検査での層間剥離を示す断面画像

クロス状に編んだCFでは、表面から衝撃を受けた際に生じる層間剥離は、板厚方向に円錐状に広がる傾向がある。そのため、内部に層間剥離が生じた際、超音波による非破壊検査を行うと、中央部が影となるため図 18 のように螺旋状となった断面映像が見られることが多い。表 4 ではこのような画像が見られたものを層間剥離と判断した。

表 4 に示した通り、検査対象とした 50 箇所のうち約 8 割の箇所で内部状態の確認が可能であった。外観や異音で異常を確認できたものについては、ほぼ層間剥離や亀裂などが生じていることが分かり、外観に異常が見られないものでも、超音波による非破壊検査で層間剥離が確認できたものもあった。また、「？」で示した不確定箇所については、非破壊検査画像でパイプ肉厚の変化や反射波が不連続となっていることは確認できたが、それが損傷なのか、設計上意図的に何かを入れているのか判定できないものや、あるいは被検査箇所の形状が複雑などの理由で、プローブの性能上検査できない箇所である。

表 4 超音波による非破壊検査結果

箇所	損傷発生方法	供試品A		供試品B		供試品C	
		外観	検査結果	外観	検査結果	外観	検査結果
上パイプ ヘッド側 右側面	①落下衝撃	擦傷	層間剥離	擦傷	層間剥離・ 亀裂	擦傷	亀裂
上パイプ 立パイプ側 右側面	①落下衝撃	亀裂	亀裂	打痕・ 表面亀裂	?	亀裂	層間剥離・ 亀裂
下パイプ ヘッド側 右側面	①落下衝撃	亀裂	層間剥離・ 亀裂	亀裂	層間剥離・ 亀裂	擦傷	?
下パイプ 中央 右側面	①落下衝撃	亀裂	亀裂	亀裂	層間剥離・ 亀裂	亀裂	層間剥離・ 亀裂
下パイプ ハンガ側 右側面	①落下衝撃	表面亀裂	層間剥離・ 亀裂	亀裂	層間剥離・ 亀裂	亀裂	層間剥離・ 亀裂
右チェーンステー ハンガ側 右側面	①落下衝撃	表面亀裂	層間剥離・ 亀裂	表面亀裂	層間剥離	打痕	層間剥離
右バックホーク 立パイプ側 右側面	①落下衝撃	表面亀裂	層間剥離・ 亀裂	打痕	?	表面亀裂	層間剥離・ 亀裂
右バックホーク 中央 右側面	①落下衝撃	亀裂	層間剥離・ 亀裂	擦傷・亀裂	層間剥離・ 亀裂	亀裂	層間剥離・ 亀裂
前ホーク 右ホーク肩 右側面	①落下衝撃	表面亀裂	層間剥離・ 亀裂	表面亀裂	層間剥離・ 亀裂	表面亀裂	層間剥離・ 亀裂
前ホーク 右ホーク足中央 右側面	①落下衝撃	表面亀裂	層間剥離・ 亀裂	亀裂	?	表面亀裂	層間剥離・ 亀裂
左チェーンステー 中央 左側面	②転倒	打痕・擦傷	?	擦傷	?	打痕・擦傷	?
前ホーク 左ホーク足中央 左側面	②転倒	表面亀裂	層間剥離・ 亀裂	打痕・擦傷	層間剥離	亀裂	層間剥離・ 亀裂
上パイプ 中央 左側面	③転倒	異常なし	層間剥離	異常なし	層間剥離	異常なし	異常なし
右チェーンステー 中央 右側面	④車止め衝突	打痕・擦傷	層間剥離	擦傷	層間剥離	打痕・擦傷	?
立パイプ 後側 中央	⑤シートポスト 落下試験	亀裂	亀裂	凹み	層間剥離	異常なし	?
シートポスト クランプ部	⑥締付トルク 過多	異常なし	?	異常なし	?	擦傷	?
ホークステム 締付部	⑥締付トルク 過多	—	—	異常なし	?	亀裂	層間剥離・ 亀裂

5.4 超音波による非破壊検査の課題

前述の通り、不確定箇所については、被検査物の形状により検査できない箇所も含まれているが、これは超音波による非破壊検査特有の課題である。

CFRPの超音波による非破壊検査では、損傷により生じた空気層の有無により反射波の違いが生じるため、層間剥離の検査が可能となる。しかし、検査においては(1)超音波が被検査物の表面にきちんと到達すること(水中で超音波を当てる等、プローブと被検査物の間に超音波を通しやすくする接触媒質が必要) (2)空気層以外に異物がある場合、損傷と判別するために層間剥離前後の被検査物の情報が必要であることなどがネックとなる。CFRP製自転車フレームにおいては軽量化や、空気抵抗の低減や断面2次モーメントを高める等の工夫のため形状が複雑なものも多いが、現状では平らな箇所以外での検査は困難である。加えて、完成車状態で検査をする場合は、水中で超音波を当てる水浸法は困難である。

したがって、CFRP製自転車フレームでの超音波による非破壊検査を実施するにあたり、技術的解決が必要な事項として、

- ① 様々な曲面にどのように対応するか
- ② 水浸法を用いない場合、測定精度を高める接触媒質をどのようにするか
- ③ 異物と損傷をどのように見分けるか

の3つの課題を最低限解決する必要があると考えた。

① 曲面への対応

まず、曲面への対応については、曲率半径など被検査物の形状が一様なものであれば、検査対象とする構造物の曲率半径に合わせた内半径のコンケーブタイププローブを用いればよい。しかし、CFRP製自転車フレームの場合はその形状が単純でないものも多く、様々な曲面が混在している。様々な銘柄のCFRP製自転車について検査することを考えれば、多くの形状のプローブを作成すれば測定可能となるが、手間とコストを要するため非現実的である。そこで、検査時の作業効率も考え、フラットプローブ以外に写真8に示すようなプローブ内半径を変えた大小2種類のコンケーブタイププローブを用意し、フレームの曲率半径によって使い分けることとした。



写真8 プローブ形状(左:フラット、中:コンケーブプローブ(内半径大)、右:コンケーブプローブ(内半径小))

② プローブ性能の検証と接触媒質

開発したフラットプローブと2種類のコンケーブタイププローブで曲面を測定した際に、どの程度まで損傷をとらえることができるかを調べた。超音波の周波数は5MHz、試料としては写真9に示すCFRP製シートポストを用いて、CFRPの断面画像を比較し、適用性を検証した。適用性の検証結果を表5にまとめた。

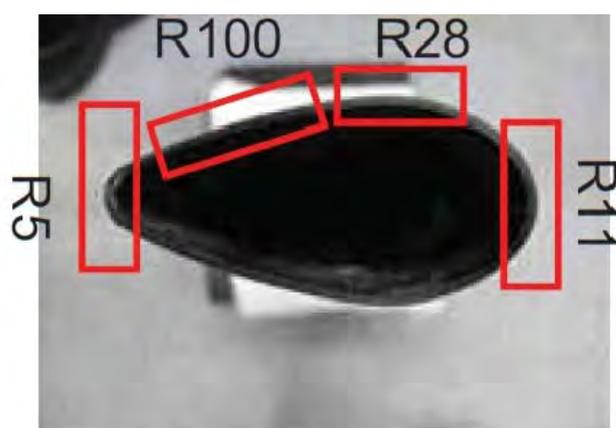
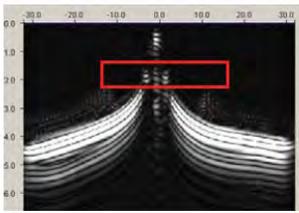
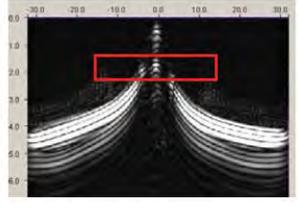
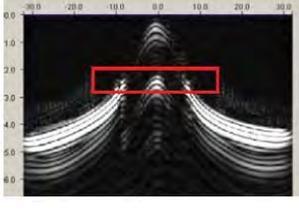
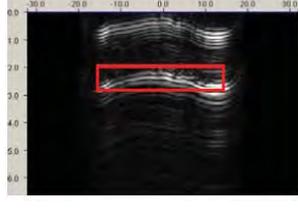
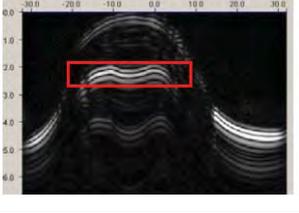
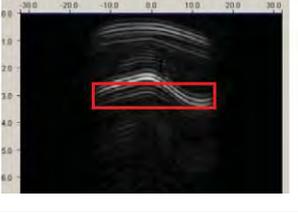
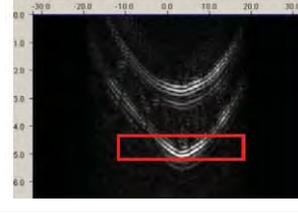


写真9 検証用試料

表5で示した検査画像は、損傷の大きさを調べることも踏まえ、断面の様子が平らに近く、層の様子が明確にわかる画像ほど検査性が良いとした。R5以上の曲率半径の被検査物に対しては、開発したフラットプローブと2種類のコンケーブプローブの組合せで検査が可能と考えられる。損傷したフレームではほぼ全ての損傷箇所がR5以上であり、これらフレームの検査が可能であると考えられる。

また、水浸法を用いずに検査を行うため、接触媒質にソフトシュー（探触子の表面に超音波を通しやすい軟質材料を貼り付けたもの）を用いることとした。被検査物の形状に合わせてソフトシューを変形させることで検出性の向上も期待できる。シューの厚さ検討のため、10～30mm厚のソフトシューを用い、同一プローブ、同一試料の箇所を検出性能の比較を行った結果、検出性やシューの保持の点で30mm厚のものが最適であることが判明した。しかし、ソフトシューは粘着性があるため、測定面を走査しながら検査する際に滑り性が悪く、層間剥離の形状や面積を調べるなどの測定が困難である。そこで、被検査物との接触面に検出性に影響しない程度の薄いテフロンシールを張り、グリセリン系の接触媒質を被検査物の表面に塗布することで滑り性を向上させることとした。

表 5 プローブ曲率半径の適用性

曲率半径	開発フラットプローブ	開発コンケーブプローブ (内半径大)	開発コンケーブプローブ (内半径小)
R5	不可 	不可 	可 (5mm 幅程度) 
R11	不可 	不可 	可 (15mm 幅程度) 
R28	可 (8mm 幅程度) 	可 (10mm 幅程度) 	最適 
R100	可 (20mm 幅程度) 	最適 	可 (15mm 幅程度) 

③ 損傷と異物の判別

CFRP 製自転車の CFRP 層の中にある異物としては

- ① 設計上の理由で CFRP と異なる素材を意図的に入れている場合
- ② 製造工程上、CF 層間にボイド（気泡）などが残る場合
- ③ パイプラグ間などの接着箇所、接着面や接着剤内にボイドが残る場合

などが考えられる。

異物が存在する場合の CFRP 製自転車の非破壊検査画像の一例を図 19 に示す。これらは、損傷前の状態（新品状態）で非破壊検査できれば損傷前後での比較ができるため問題ない。また、図 18 のように断面画像で明らかに層間剥離の傾向が確認できれば判別が可能であるが、損傷後の検査画像だけの情報では、層間剥離か異物かを断言することはできない。

この問題の解決法としては、

- ① 新品状態であらかじめ非破壊検査画像を取得しておき、損傷が生じた際に比較する。
- ② 意図的に何かを入れているのであれば、例えば左右チェーンステーやパイプの左右側面で比較し、損傷かそうでないかの目安とする

などが考えられる。どの箇所にどのような異物が入っているのか、その傾向を把握するためにも今後損傷に関するデータを調査し、数多くの事例を収集する必要があるだろう。

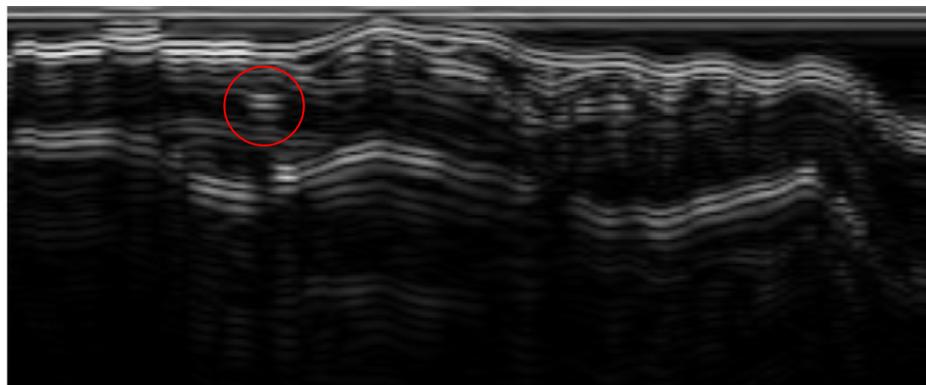


図 19 異物が存在する CFRP の非破壊検査画像例

6. 非破壊検査装置開発により改善された点と適用範囲

開発したプローブを用いて、検査画像がどのように改善されたか、適用範囲がどの程度であるかを調べた。

6.1 「4.外力付与による損傷発生調査」で用いたフレームでの検証

表 4 において「？」であった箇所を中心に、開発したプローブを用いて再度測定を行った。結果を表 6 にまとめた。

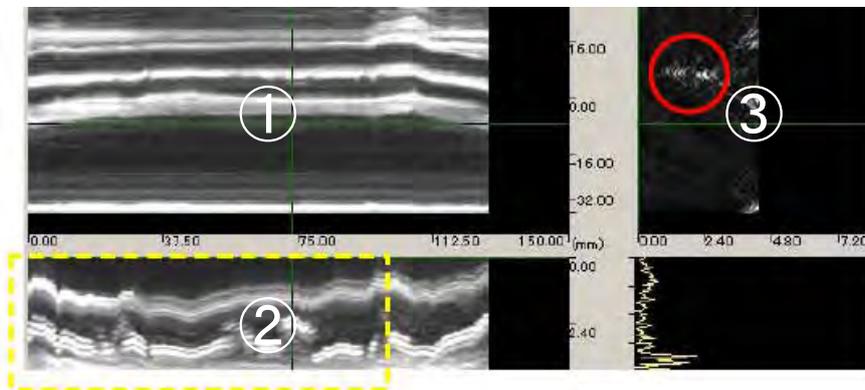
表 6 より、今回検査対象とした3銘柄について、衝撃を付与した全ての箇所で、損傷の状態が確認可能となった。

表 6 開発プローブを用いた超音波による非破壊検査結果

箇所	損傷発生方法	供試品A			供試品B			供試品C		
		外観	検査結果	開発後検査結果	外観	検査結果	開発後検査結果	外観	検査結果	開発後検査結果
上パイプ ヘッド側 右側面	①落下衝撃	擦傷	層間剥離	/	擦傷	層間剥離・ 亀裂	/	擦傷	亀裂	亀裂
上パイプ 立パイプ側 右側面	①落下衝撃	亀裂	亀裂	亀裂	打痕・ 表面亀裂	？	層間剥離・ 亀裂	亀裂	層間剥離・ 亀裂	層間剥離・ 亀裂
下パイプ ヘッド側 右側面	①落下衝撃	亀裂	層間剥離・ 亀裂	層間剥離・ 亀裂	亀裂	層間剥離・ 亀裂	層間剥離・ 亀裂	擦傷	剥離・傷	/
下パイプ 中央 右側面	①落下衝撃	亀裂	亀裂	/	亀裂	層間剥離・ 亀裂	/	亀裂	層間剥離・ 亀裂	/
下パイプ ハンガ側 右側面	①落下衝撃	表面亀裂	層間剥離・ 亀裂	/	亀裂	層間剥離・ 亀裂	/	亀裂	層間剥離・ 亀裂	/
右チェーンステー ハンガ側 右側面	①落下衝撃	表面亀裂	層間剥離・ 亀裂	/	表面亀裂	層間剥離	/	打痕	層間剥離	/
右バックホーク 立パイプ側 右側面	①落下衝撃	表面亀裂	層間剥離・ 亀裂	/	打痕	？	剥離	表面亀裂	層間剥離・ 亀裂	/
右バックホーク 中央 右側面	①落下衝撃	亀裂	層間剥離・ 亀裂	/	擦傷・亀裂	層間剥離・ 亀裂	/	亀裂	層間剥離・ 亀裂	/
前ホーク 右ホーク肩 右側面	①落下衝撃	表面亀裂	層間剥離・ 亀裂	/	表面亀裂	層間剥離・ 亀裂	/	表面亀裂	層間剥離・ 亀裂	/
前ホーク 右ホーク足中央 右側面	①落下衝撃	表面亀裂	層間剥離・ 亀裂	/	亀裂	？	ボイド	表面亀裂	層間剥離・ 亀裂	/
左チェーンステー 中央 左側面	②転倒	打痕・擦傷	？	層間剥離・ 小亀裂	擦傷	？	層間剥離・ 小亀裂	打痕・擦傷	？	層間剥離・ 小亀裂
前ホーク 左ホーク足中央 左側面	②転倒	表面亀裂	層間剥離・ 亀裂	層間剥離・ 小亀裂	打痕・擦傷	層間剥離	/	亀裂	層間剥離・ 亀裂	/
上パイプ 中央 左側面	③転倒	異常なし	層間剥離	層間剥離	異常なし	層間剥離	層間剥離	異常なし	異常なし	/
右チェーンステー 中央 右側面	④車止め衝突	打痕・擦傷	層間剥離	/	擦傷	層間剥離	ボイド	打痕・擦傷	？	異常なし
立パイプ 後側 中央	⑤シートポスト 落下試験	亀裂	亀裂	亀裂	凹み	層間剥離	剥離	異常なし	？	内部構造
シートポスト クランプ部	⑥締付トルク 過多	異常なし	？	剥離断続	異常なし	？	ボイド	擦傷	？	内部構造
ホークステム 締付部	⑥締付トルク 過多	—	—	—	異常なし	？	剥離	亀裂	層間剥離・ 亀裂	/

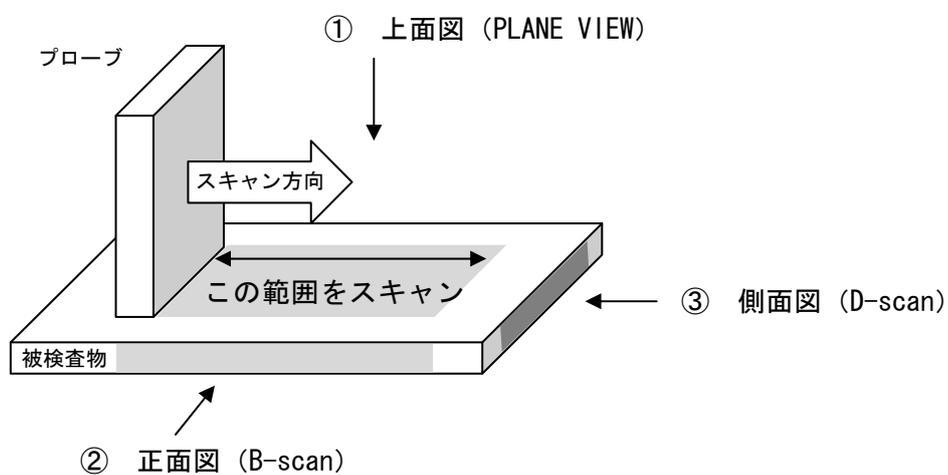
以下、代表的な検査例を示す。

(参考：画像の見方)



- ① 上面図 (PLANE VIEW)
- ② 正面図 (B-scan)・・・①の水平方向の緑線で切った部分の断面図
- ③ 側面図 (D-scan)・・・①の垂直方向の緑線で切った部分の断面図

(イメージ図)



(例 1) 供試品 B 左チェーンステー中央左側面：開発フラット・コンケーブプローブの比較

図 20 に開発前フラットプローブ、開発フラットプローブ、開発コンケーブプローブ（内半径大）で取得した非破壊検査画像を示す。開発前後得た検査画像を比較して（図 20 上と中）、検査対象が緩やかな凸面の側面部分の場合は同様の画像が得られ、裏面（内側表面）の反射状況（模様）も再現されていた。また、B-scan・D-scan 両方向の断面画像も前回記録の良好な再現性が認められた。

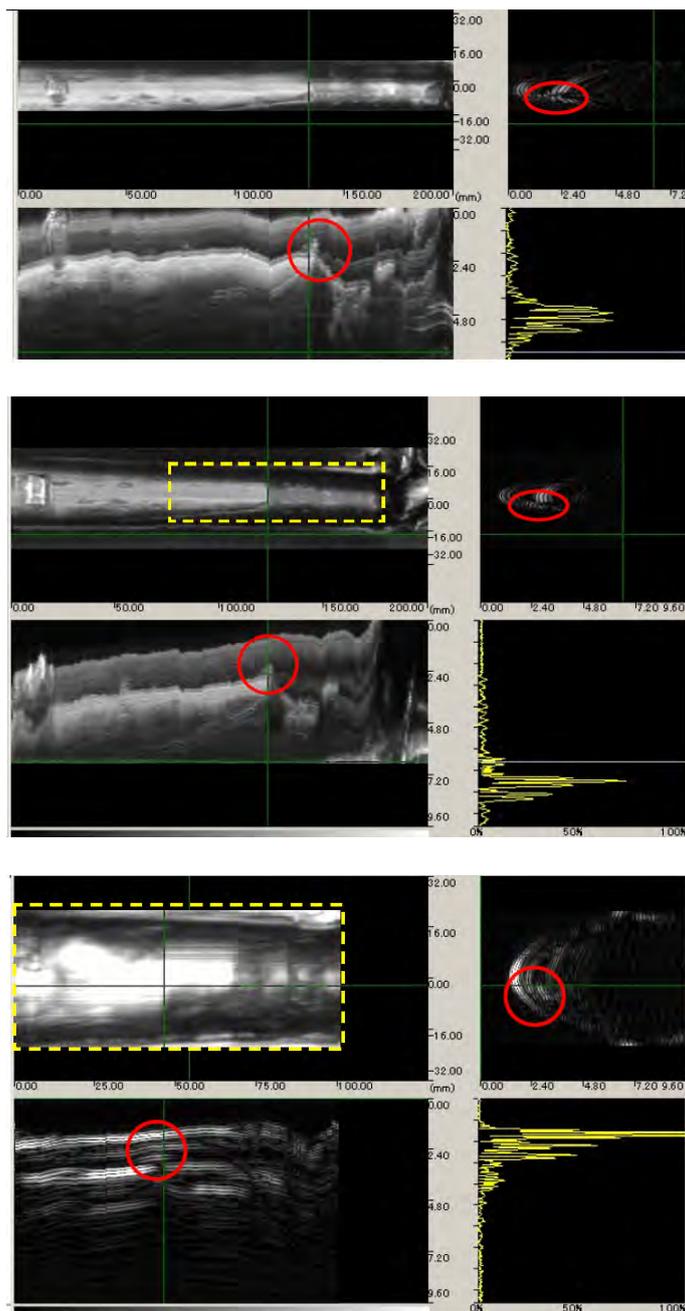


図 20 開発前後での検査画像の比較

(上：開発前、中：開発フラットプローブ、下：開発コンケーブプローブ（内半径大）)

また、黄色点線枠内について開発フラットプローブと開発コンケーブプローブ（内半径大）を用いて断面画像の様子を比較した（図 20中と下）。開発コンケーブプローブ（内半径大）ではより鮮明に分かるようになり、赤丸部の剥離は、大きさは小さく、図 18のような明確な層間剥離の傾向が見られないものの、小さな亀裂を伴う層間剥離であることが判明した。

（例 2） 供試品 B 立パイプ後側中央：開発コンケーブプローブの適用性①

図 21 に開発前後での非破壊検査画像を示す。コンケーブプローブ開発前の段階では、図 21 上のような画像が取得できたため、表 4 では層間剥離と評価した。赤丸部から層間剥離の有無は判別できたが、程度の判断ができないほど、検査可能な範囲が小さかった。

今回開発したコンケーブプローブを用いて、図 21 上の黄色点線部付近の検査を実施したところ、図 21 下のような画像が取得できた。プローブの曲率半径と被検査箇所との曲率半径が近くなったため、明らかに断面画像が見やすくなったことが分かる。図 18 のような明確な層間剥離の傾向が見られないものの、小さな亀裂を伴う層間剥離であることが判明した。

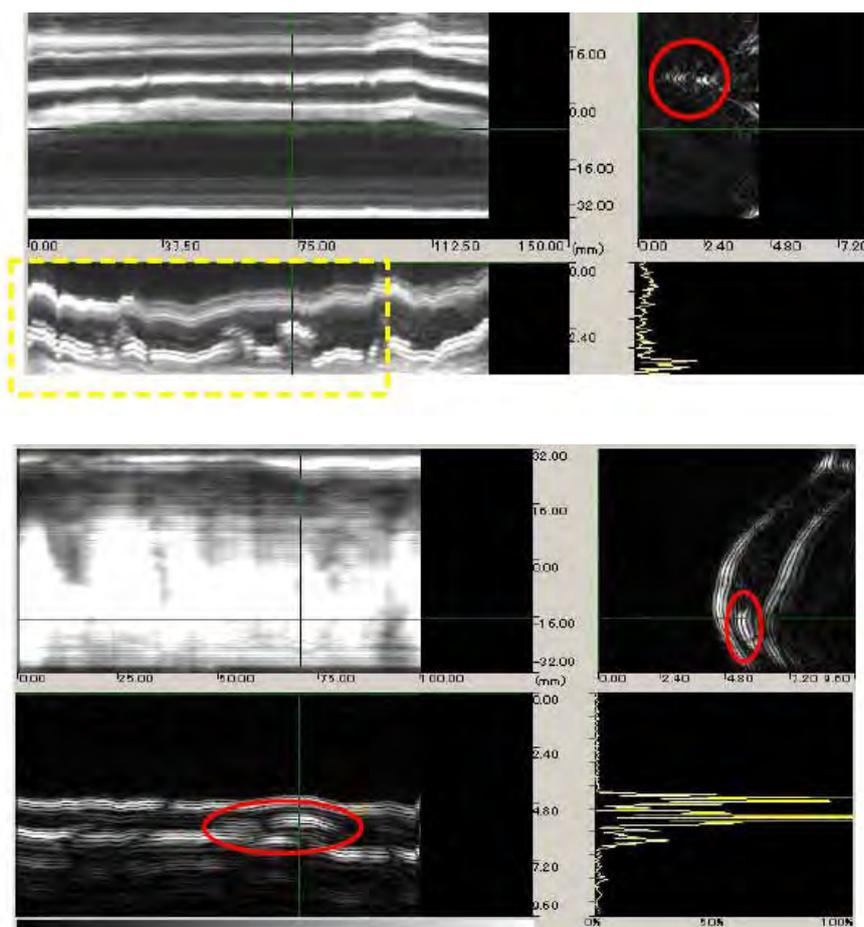


図 21 開発前後での検査画像の比較（上：開発前、下：開発後）

(例3) 供試品B ホークシステム締付部：開発コンケーブプローブの適用性②

図22に開発前後での非破壊検査画像を示す。新規開発コンケーブプローブ開発前の段階では、図22上のような画像を取得できた。この画像を取得する際には、図23①のように、ホークシステムにフラットプローブを当て、円周方向に走査する（プローブを固定し、前ホークを回転させた）ことで画像を取得した。この場合、被検査物の設置、固定が不十分な場合、判断しにくい画像が得られる場合があり、プローブ開発前は内部の状態を把握できなかった。

開発コンケーブプローブでは、図23②のように、軸方向に走査して画像を取得することが可能となったため画像取得が容易になった。フラットプローブ使用時は検査することができなかった図22上黄色点線部の方向（軸方向）に開発コンケーブプローブを走査したところ、図22下のような画像が取得できた。この画像から、この損傷は剥離しているものの、図18のような明確な層間剥離の傾向が見られないが、小さな亀裂を伴う層間剥離であることが判明した。

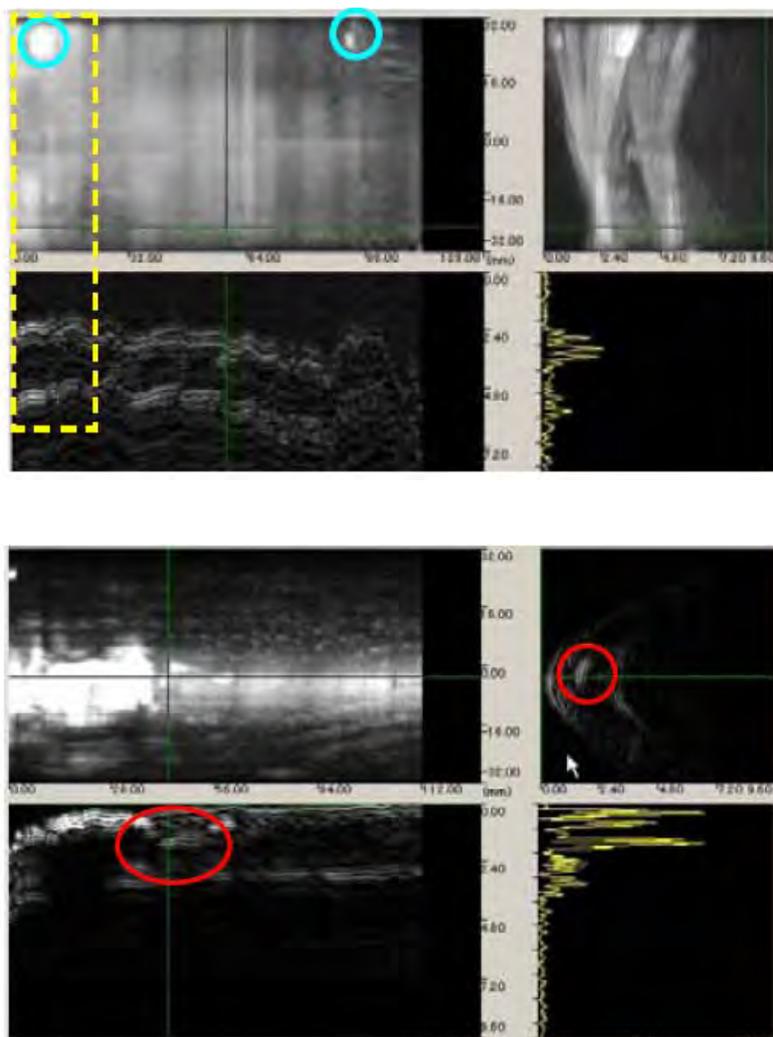


図22 開発前後での検査画像の比較（上：開発前、円周方向、下：開発後、軸方向）

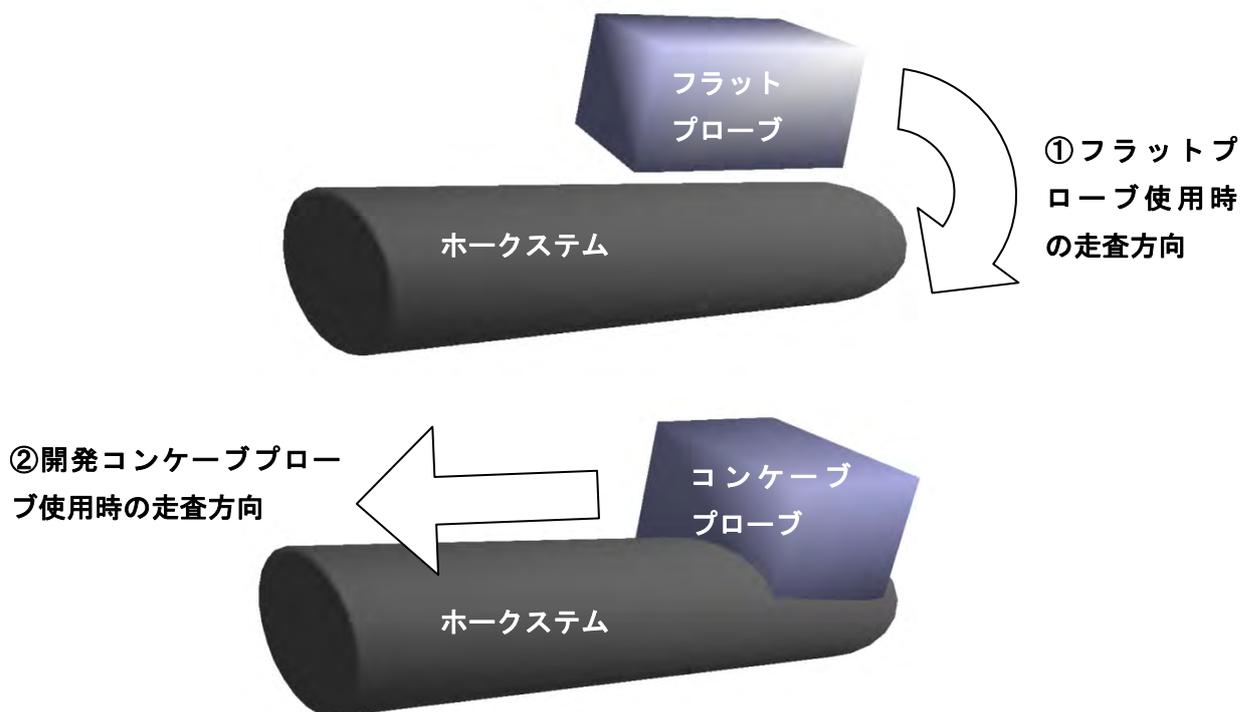


図 23 プローブの走査方向

以下、今回開発したプローブで改善された点をまとめた。

開発フラットプローブ

- ・ソフトシュー・テフロンテープを用いた場合でも、水浸法と同様の画像が得られ裏面（内側表面）の反射状況（模様）が再現されていた。また、B-scan・D-scan 両方向の断面画像も良好な再現性が認められた。

- ・断面表示である B-Scan 画面による検査であれば、90%以上の部分について傷の有無確認が可能であった。

開発コンケーブプローブ

- ・フラットプローブでは、断面を示す B-scan 画面の外表面を示す凸の山が鋭くなり、キズの有無は確認できるが、程度の判断が困難な場合が多いため、コンケーブプローブを用いて測定することとした。今回開発したコンケーブプローブでは、この山がなだらかに表示され、判断しやすくなると共に見落としが少なくなった。また、剥離の円周方向の広がりも確認できた。

6.2 その他市販品での検証

図 24 に示す、市販されている一般的な CFRP 製自転車 4 銘柄について、今回開発した非破壊検査装置を用いて、右側面がどの程度まで検査・測定が可能かを調べ、図 24 にまとめた。



図 24 測定可能な範囲

曲率半径が大きく、形状が一様な箇所（各パイプやホーク足など）では、開発したフラットプローブやコンケーブプローブを用いれば、大まかな損傷の形状・大きさが測定可能であった。平面に近い、あるいは曲率半径がコンケーブプローブの内半径に近いほど、精度よく調べることができた。

曲率半径が小さい箇所ではフラットプローブを軸方向に当て B-Scan することで、損傷の長さは測定可能であり、コンケーブプローブ（内半径小）を用いることで、精度は落ちるが、形状も測定可能であった。

各パイプの接合部やホーク肩など、形状が複雑な箇所に関しては、フラットプローブを当て B-Scan するなど工夫することで、損傷の有無は概ね判別可能であるが、損傷の大きさや形状の測定は難しかった。ヘッドパイプ～下パイプにかけては図 13 に示した通り損傷事例も多いので、今後検査方法を検討する必要があるだろう。また、表面に保護のためアルミ板等を貼り付けている箇所は測定不可能であった。

以上より、市販されている 4 銘柄についても、多くの箇所で検査の可能性が認められた。

7. 疲労試験による亀裂・層間剥離の伸展調査

本章では、層間剥離や亀裂などが生じた CFRP 製自転車について、疲労試験を行うなどして外力を繰り返し付与した際に、損傷が伸展するのか、伸展するのであればどのように伸展するのかを非破壊検査機器を用いて調査した。

7.1 調査手順

以下の手順で調査を実施した。なお、供試品は同一銘柄、形状のダイヤモンド形 CFRP 製フレーム 4 台である。なお、非破壊検査について、事前に異物を把握しておくために新品状態から画像を採取した。また、損傷の状態を詳細に検査するため、必要に応じて水浸法も用いて実施した。調査手順を表 7 に示す。

表 7 疲労試験による亀裂・層間剥離の伸展調査 調査手順

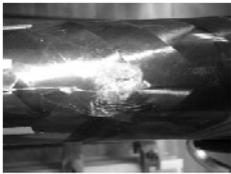
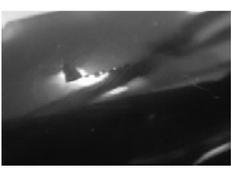
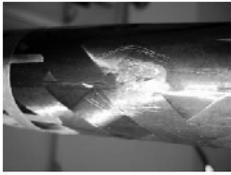
手順	項目
1	新品状態での状態を調べるため、超音波による非破壊検査を実施
2	ペダル荷重による疲労試験 1,100N、水平力による疲労試験±600N でひずみ量を測定し、ひずみ量が大きかった下パイプヘッド側下面とチェーンステーハンガ側右側面に衝撃を付与。 衝撃の付与方法は、落下衝撃試験機を用いて JIS D 9301:2010 のサドルの耐寒性試験で用いられる表面硬さ 40HRA 以上、重量 8kg の半球状のおもりなどを自由落下させ、外観で「目視で亀裂と判断できない損傷（層間剥離など）」と「目視で亀裂が確認できる損傷（亀裂）」を付与
3	衝撃付与後の状態での損傷の状態を調べるため、超音波による非破壊検査を実施
4	・ペダル荷重による疲労試験（EN14781－レーシング車） 1,100N 10万回 ・水平力による疲労試験（EN14781－レーシング車） ±600N 10万回 の試験を連続して実施し、外力付与
5	疲労試験後の状態での損傷の状態を調べるため、超音波による非破壊検査を実施し、3 で得られた画像と比較

7.2 調査結果

調査結果のまとめを表 8 に、各供試品の非破壊検査画像を表 9～表 12 に示す。剥離の程度や箇所異なる供試品 4 台のうち、2 台で層間剥離や界面剥離（異素材間の剥離）の伸展が見られた。そのうち 1 台では新たな剥離箇所が生じた。外観では疲労試験前後であまり差は見られなかったものの、剥離の大きさ・形状や箇所によって伸展するものとしなものがあると考えられる。

また、3 銘柄で検査画像が鮮明になっていることから、大きさが変わらなかった場合でも、剥離に何らかの変化があったと考えられる。

表 8 亀裂・層間剥離の伸展調査結果

供試品	供試品 No.1	供試品 No.2	供試品 No.3	供試品 No.4	
衝撃付与箇所	下パイプヘッド側下面	下パイプヘッド側下面	チェーンステーハンガ側右側面	チェーンステーハンガ側右側面	
衝撃付与方法	先端 R8 のおもり使用、おもり重量 8kg、落下高さ 500mm	半球状のおもり使用、おもり重量 8kg、落下高さ 500mm	先端 R3 のおもり使用、おもり重量 8kg、落下高さ 60mm	半球状のおもり使用、おもり重量 8kg、落下高さ 210mm	
衝撃付与前	外観	化粧板+クリア塗装	塗装	塗装	
	内部	層間に小ボイド散在、ボイド集合部もある	層間に小ボイド散在、ボイド集合部もある	外面側の層間に小ボイド多数密集	
衝撃付与後	外観	塗膜の剥離 (15mm × 8mm) 周辺の塗膜に円弧状の亀裂 	塗膜が白濁 (18mm × 18mm) 周辺の塗膜に円弧状の亀裂 	塗膜の剥離 (12mm × 5mm) 塗膜の剥離部に打痕 	全長約 25mm の塗装亀裂 
	内部	内部層間剥離 (51mm × 32mm)	内部層間剥離 (60mm × 28mm)	打痕直下に小さな剥離	「ハ」の字形界面剥離 (15mm × 15mm と 12mm × 12mm)
疲労試験後	外観				 少し目立つ
	内部	パイプ円周方向片側に約 9.5mm 伸展した。(51mm × 41.5mm) 検査画像が鮮明になった。	剥離の大きさに変化なし。検査画像が鮮明になった。	変化なし	上側(「ハ」の字左側)剥離に伸展が見られた(12mm × 12mm → 13mm × 15mm) 「ハ」の字中央に 4.5mm × 6mm の新たな剥離が生じた

P86～P89 は閲覧できません

8. まとめ

今回の調査内容と結果を以下にまとめた。

- ① 実使用におけるCFRP製自転車の損傷実態調査のため、51台の損傷履歴のわかるCFRP製自転車を調査した。その結果、フレームの上パイプ中央付近、バックホーク後方付近、ヘッドパイプ～下パイプ付近への損傷が多いことが分かった。特に上パイプの中央付近の損傷例が多かった。また、ユーザーが使用続行不可能と感じた損傷に至るまでの平均使用期間は約2年5カ月、平均走行距離は約8,900kmで、衝突や転倒、使用時のトラブルなどによる衝撃付与による損傷がほとんどであった。
- ② 外力付与による損傷発生調査を3銘柄のCFRP製自転車フレームで実施した。半球状のおもりを落下した際、CFRP製自転車フレームの各部分は、概ね20J（8kgの半球状のおもりを約25cmの高さから自由落下させた時の衝撃）以下の衝撃力で、パイプの内外部に層間剥離など何らかの損傷が生じた。
- ③ CFRP製自転車フレームに生じる層間剥離など外観では判別できない損傷については、超音波による非破壊検査が有効であることが分かった。また、CFRP製自転車フレームの非破壊検査を実施可能とするため、自転車用途に特化した検査装置を開発した。本装置により、層間剥離の形状や大きさも調べるのが可能となった。②の3銘柄のCFRP製自転車に加え、市販されている4銘柄のCFRP製自転車でも適用範囲を調べたが、多くの箇所でも検査の可能性が認められた。
- ④ CFRP製自転車フレームに衝撃を加えて生じた層間剥離や亀裂などの損傷が、試験機による疲労試験後どのように変化するかを調査した。同一銘柄・形状のCFRP製自転車フレーム4台にて亀裂・層間剥離の伸展調査を行った結果、外観では大きな変化はないものの、疲労試験後4台中2台で層間剥離や界面剥離の伸展が見られた。剥離の大きさ・形状や箇所によって伸展するものとしめないものがあった。また、剥離近傍で新たな剥離が生じたものもあった。

今回の事業において、

「CFRP製自転車検査方法開発検討会」（敬称略）

鶴澤 潔（東京大学工学系研究科特任准教授）

永田 啓一（東京大学工学系研究科）

春日 伸敏（ブリヂストンサイクル株式会社）

下山 晃（東レ株式会社）

を設置し、指導を得て事業を遂行しました。また、東芝電力検査サービス株式会社、財団法人 JKA の協力を得ました。ここに感謝の意を表します。