

衝撃変形で曲げ剛性が急増する 柔軟CFRPの開発

金沢大学 理工研究域 機械工学系

樋口 理宏



RING!RING!
プロジェクト
競輪の補助事業

本研究は競輪の補助（27-135）
を受けて実施しました。

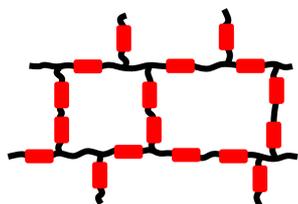
本事業では、**軟質エポキシ樹脂**を母材とすることで、低速変形時は曲げ剛性が低く柔軟で高い引張剛性を有する一方、**衝撃変形時のみ曲げ剛性が急増するCFRP**（炭素繊維強化プラスチック）の開発も目的とする。

同CFRPが実現されれば、装着性に優れた軽量なスポーツ用プロテクタや、違和感なく着用できる日常生活用の保護具など、これまでに無い**装着性と安全性を備えた防具**への応用が期待できる。

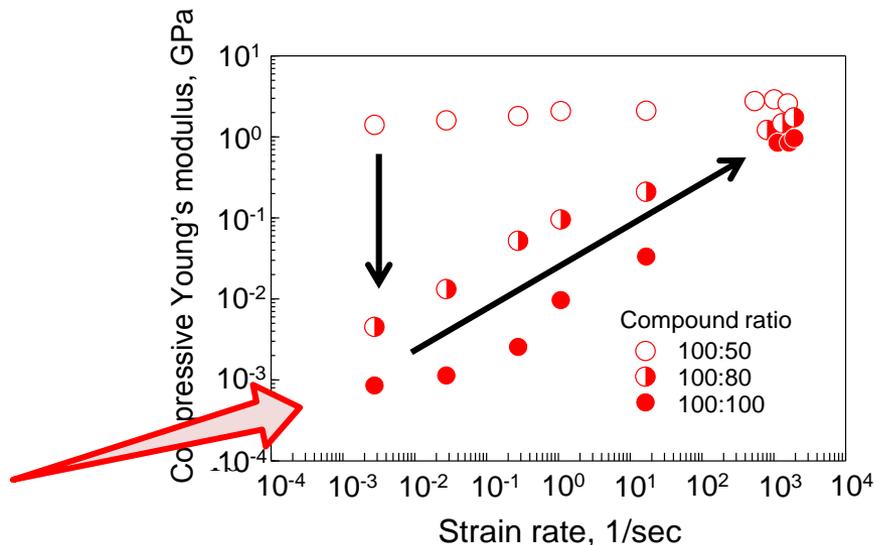
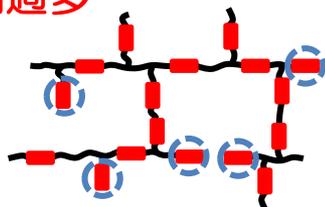
軟質エポキシ樹脂

化学量論比配合

— : 主剤
■ : 硬化剤



硬化剤過多



圧縮弾性率とひずみ速度の関係

エポキシ樹脂の主剤・硬化剤の配合比を化学量論比配合からずらすことで、低ひずみ速度下で柔軟、高ひずみ速度下で硬質となる

■ 母材

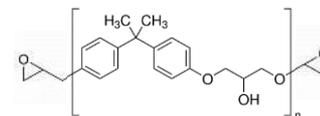


TRANSLUX D150

AXSON TECHNOLOGIES

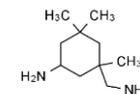
- 主 剤：ビスフェノールA型エポキシ樹脂

Bisphenol A epichlorohydrin epoxy resin



- 硬化剤：アミン系硬化剤

3-Aminomethyl-3,5,5-trimethylcyclohexylamine



重量配合比 (主剤：硬化剤) = 100:50, 100:80, 100:100

化学量論比 → 硬化剤過多

比較材として、汎用エポキシ樹脂 (jER828+YH306) も供した

■ 炭素繊維クロス

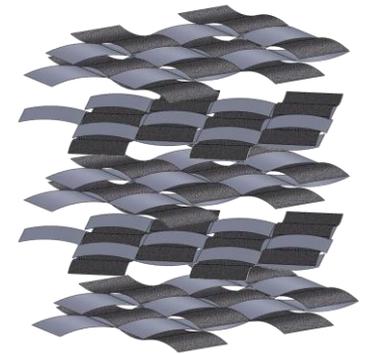
東邦テナックス, W-3101 (標準的な平織3Kのクロスを用いた)

フィラメント	引張強度	4400 [MPa]
	引張弾性率	240 [GPa]
	密度	1.77 [g/cm ³]

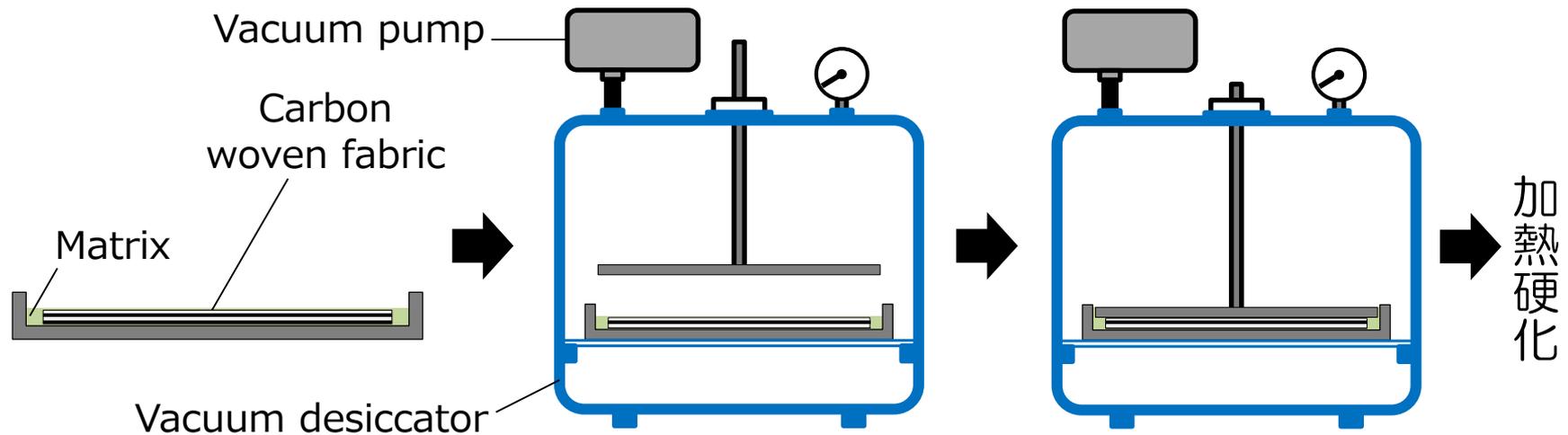
■積層構成

- 単層 [(90°/0°)]
- 5層 [(90°/0°),(45°/-45°),(90°/0°),(45°/-45°),(90°/0°)]

疑似等方性



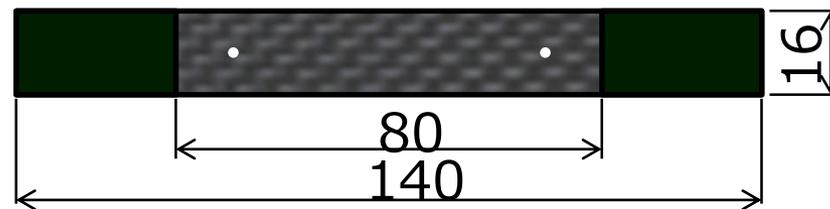
■成形手順



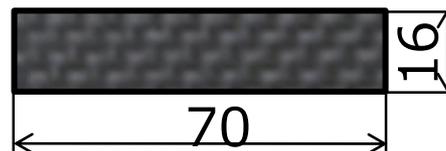
本事業では、少量・小サイズのCFRPを高精度で成形する方法を採用
(大量生産する場合は、**既存のCFRPの成形法をそのまま利用可**)

	単層	5層
厚さ[mm]	0.31	1.35
密度[g/cm ³]	1.3	1.3
炭素含有率 [%]	38	42
用途	引張	引張, 曲げ

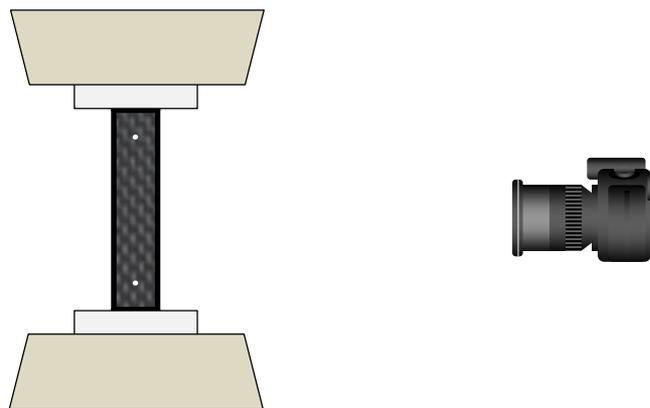
- 引張試験片



- 曲げ試験片

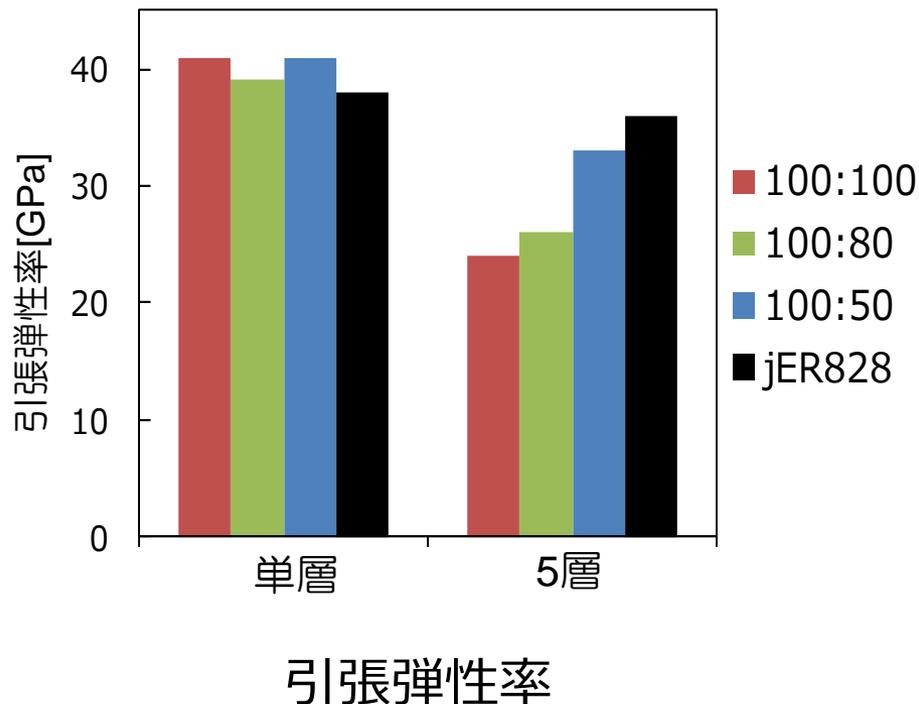


■ 試験方法

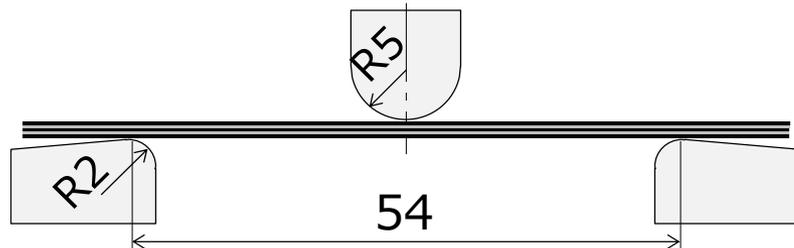


- 試験機 : Autograph AG-100kND
- 試験速度 : 1 mm/min.
- 試験片 : 単層, 5層
- ひずみ測定 : DIC (デジタル画像相関法)

■ 試験結果



5層積層（疑似等方）の場合、母材樹脂が柔軟なほど引張弾性率は低下するが、20GPaオーバー。



試験片 5層CFRP

幅広いたわみ速度で試験

■ 低たわみ速度

- 材料試験機 (Autograph, AG-100kND)
- 試験速度 0.005, 0.05, 0.5, 5 mm/s

■ 中たわみ速度

- カム機構を用いた動的材料試験機
- 試験速度 100 mm/s
- 最大変位 4 mm

■ 高たわみ速度

- 衝撃三点曲げ試験機
- 試験速度 10^3 mm/s オーダー

曲げ応力

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2}$$

曲げ弾性率

$$E = \frac{1}{4} \frac{L^3}{bh^3} \frac{P}{\delta}$$

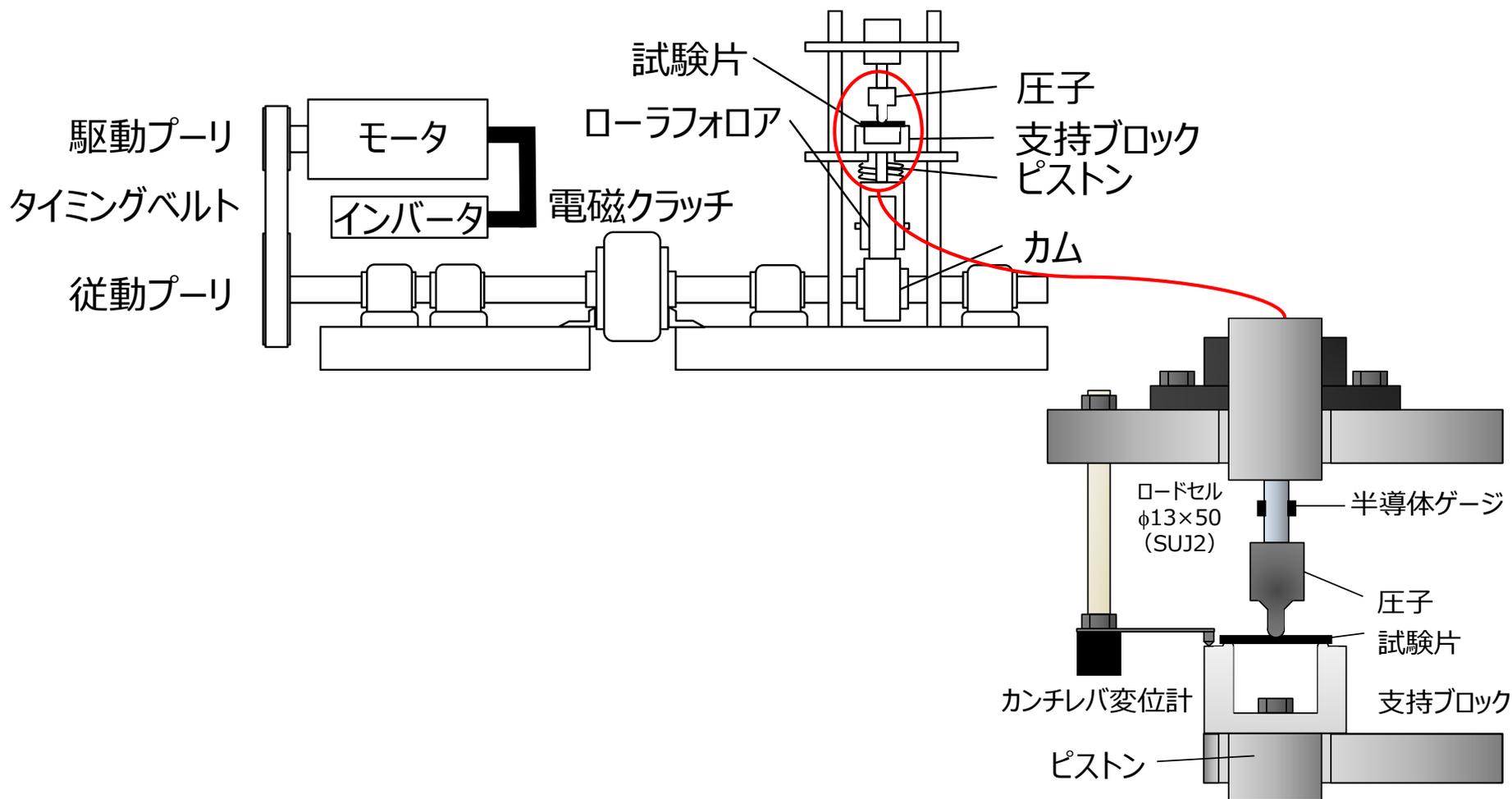
P : 荷重[N]

L : 支点間距離[mm]

b : 試験片幅[mm]

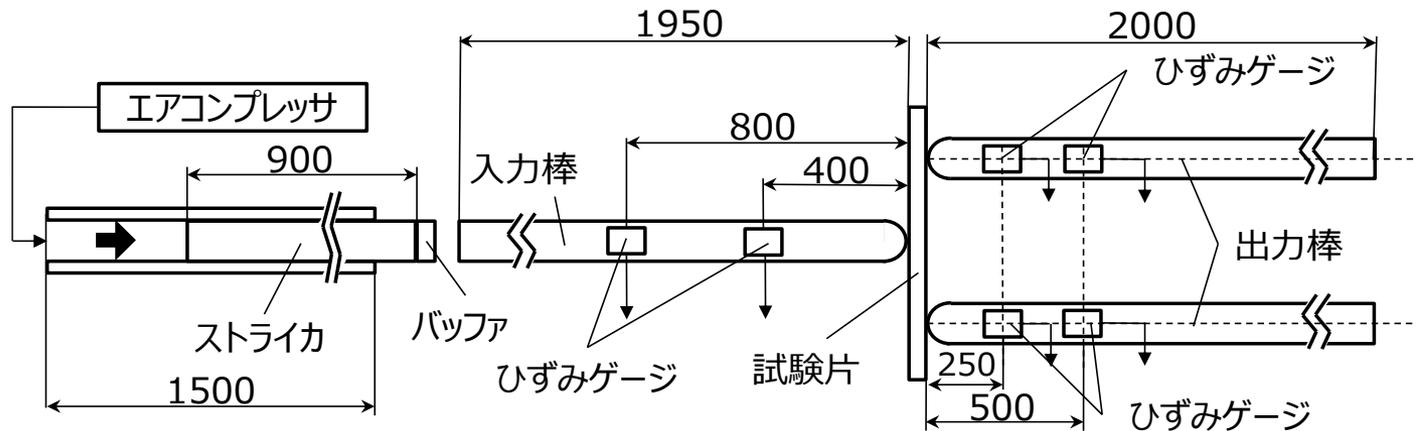
h : 試験片厚さ[mm]

P/δ : 荷重 - 変位線図の傾き[N/mm]



「平成26年度カム機構を用いた動的 material 試験機の開発補助事業」
にて設計・開発した装置を3点曲げ試験機に拡張

本事業にて、SHPB法（Split Hopkinson Pressure Bar method）を応用した
衝撃三点曲げ試験機を開発



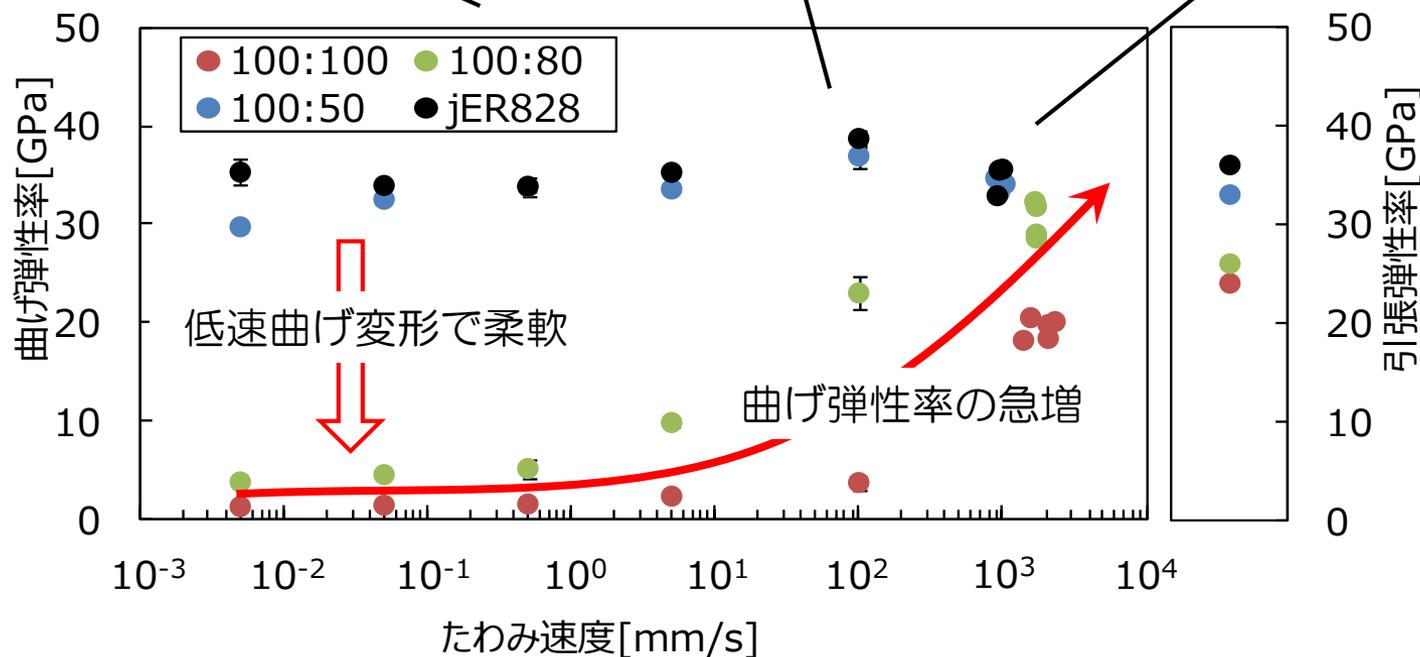
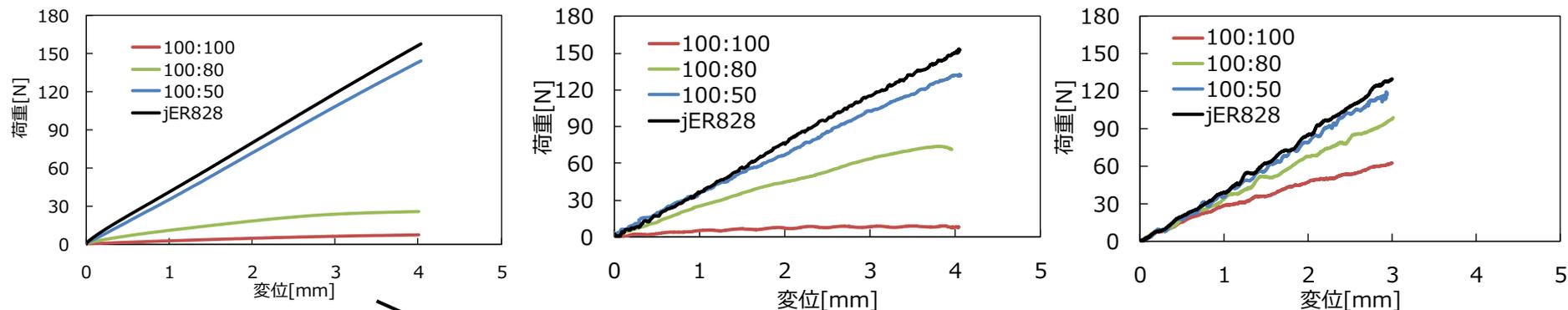
高速度カメラ
(DITECT, HAS-D71)

各応力棒に貼付した2カ所のひずみゲージにより
長時間の荷重・変位を測定可能

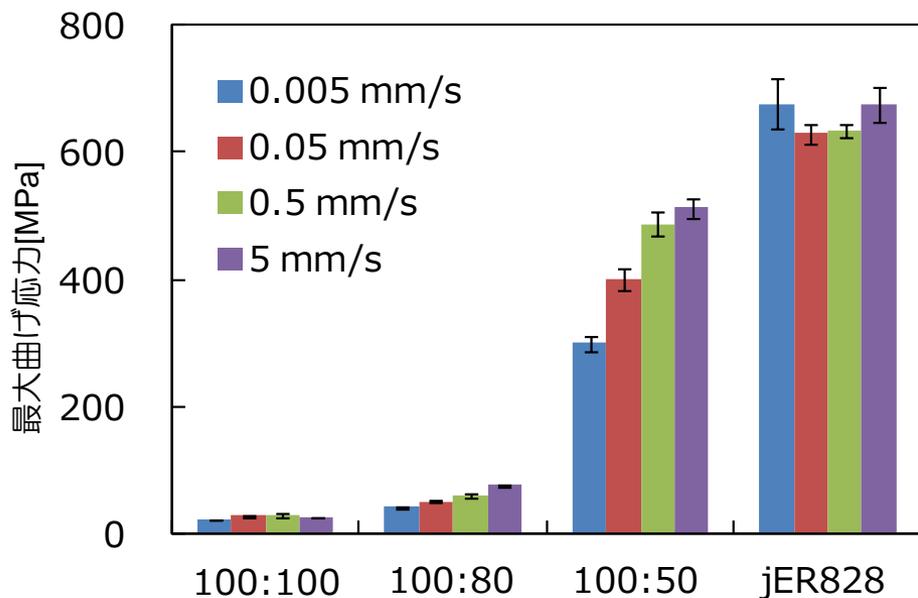
高速度カメラにより、
試験片に振動が生じていないことを確認
（動的平衡状態の実現）



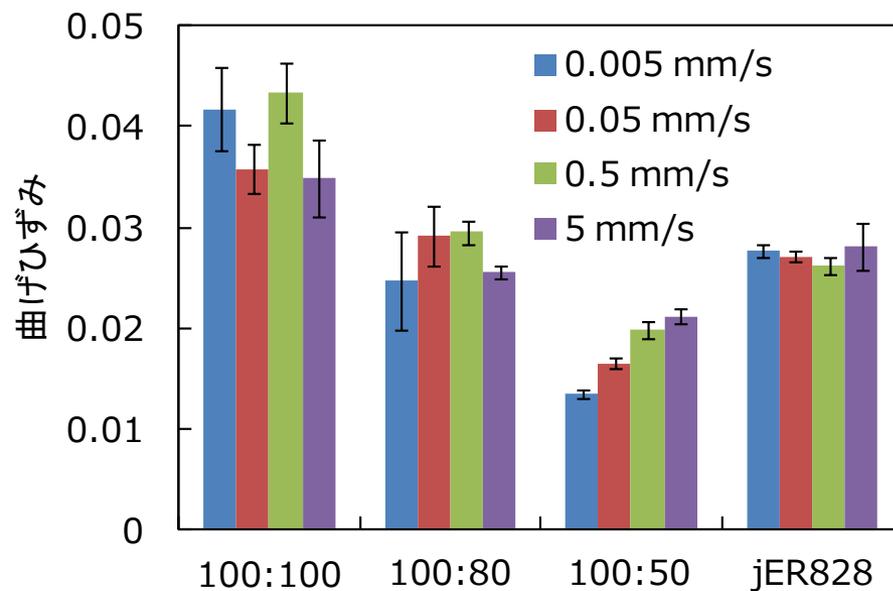
曲げ特性評価～試験結果1～



低速変形下で低曲げ弾性率，高速変形下で高曲げ弾性率なCFRPを実現



低たわみ速度試験における最大曲げ応力



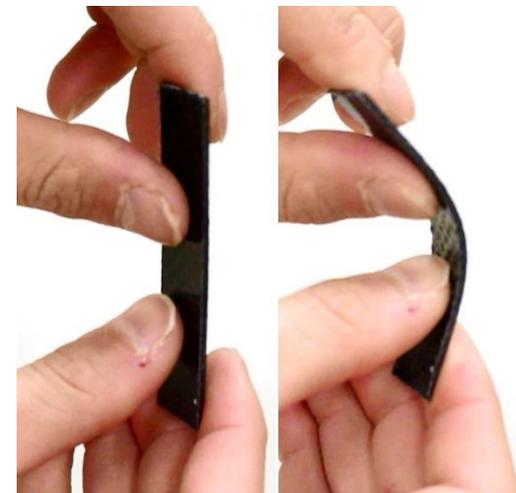
低たわみ速度試験における最大曲げ応力時の曲げひずみ量

母材が柔軟なほど最大曲げ応力低下

最大曲げ応力時のひずみ量増加

低速変形時において
柔軟な樹脂ほど曲げ弾性率，最大曲げ応力低下
変形能は汎用的なCFRPと同等以上

本事業において、**軟質エポキシ樹脂**を母材とすることで、低速変形時は曲げ剛性が低く柔軟で高い引張剛性を有する一方、**衝撃変形時のみ曲げ剛性が急増するCFRP**（炭素繊維強化プラスチック）の開発に成功した。



謝 辞

本研究は競輪の補助（27-135）を受けて実施しました。
御関係各位に深謝いたします。

