

建築分野での CFRTP 長尺部材の適応 — 伝統木造建築物の耐震補強部材 —

正会員 株式会社 能勢建築構造研究所
第四設計室 室長 櫻井 暢二

1. 適応の目的と背景

伝統木造建築物の耐震補強には多くの鋼製ブレースが用いられている。しかし、落下した場合の危険性や結露による伝統木造建築物の古材の腐食などの課題が挙げられる。それらの課題を解決する為に、近年、熱可塑性樹脂を用いた炭素繊維複合材料（CFRP）による耐震補強が行われている。また、CFRP の高速成型技術に関する研究開発がなされ、従来に比べて低コスト化、2次加工が可能となった。CFRP は鋼鉄に比べて軽く、高強度、錆びない、結露しにくいといった特長を有している。そんな中、金沢工業大学革新複合材料研究開発センター（ICC）と小松マテーレ(株)にて研究・開発された CFRTP によるより線（CFRTP スtrandロッド）が耐震補強部材として JIS 化されるなど、建築分野への適応が高まっている。

伝統木造建築物は、高い変形能力を有することが確認されていることから、耐震補強では大変形を許容した設計法を適応するため、塑性域での構造性能が重要となる。よって部材としての塑性も要求性能としてあげられ、脆性破壊しない補強部材の選定が必要である。

2. CFRTP スtrandロッドの概要

CFRTP スtrandロッドは、炭素繊維の技術を融合した強さとしなやかさを有するロープ状の材料である。引張強度が高く、繊細かつ強靱な構造体である。それをねじってロープ状にした CFRTP スtrandロッドは、外層を合成繊維や無機繊維でカバーリングし、熱可塑性樹脂を含浸させたものである。

<主な特徴>

- ・ 軽量（比重は鉄の 1/4）
- ・ 引張りに強い
- ・ 錆びない
- ・ 耐久性に優れる
- ・ 結露しない
- ・ 作業現場への運搬が容易

<利点と在来工法との違い>

- ・ 軽量でロッドを巻いた状態で搬入できる
- ・ 長さに制限が無く，たわみが少ない
- ・ 柔軟性があり，配置の自由度が高い
- ・ 木材を傷つけず腐食させにくい

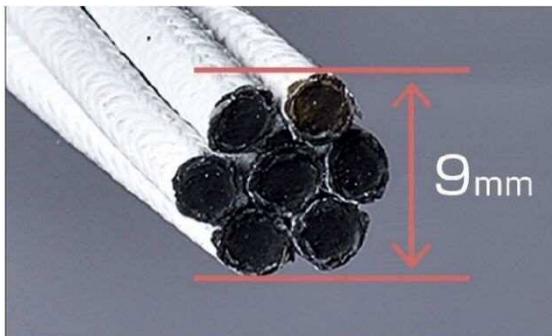


図1 CABOMA スtrandロッド概要図

表1 CABOMA スtrandロッド標準

品番	実際径 (mm)	単位重量 (g/m)	有効断面積 (mm ²)	破断力 (kN)	引張弾性率 (kN/mm ²)
 NH2417	7.0	53	10	35≦	160
 NH2427	8.2	68	20	55≦	160
 NH2437	9.0	88	30	80≦	160
 NH6017N	6.3	31	24	45≦	110

3. 木造建築物の耐震補強の適応に向けて

CFRTP スtrandロッドを用いた耐震補強は既に複数適応されている。

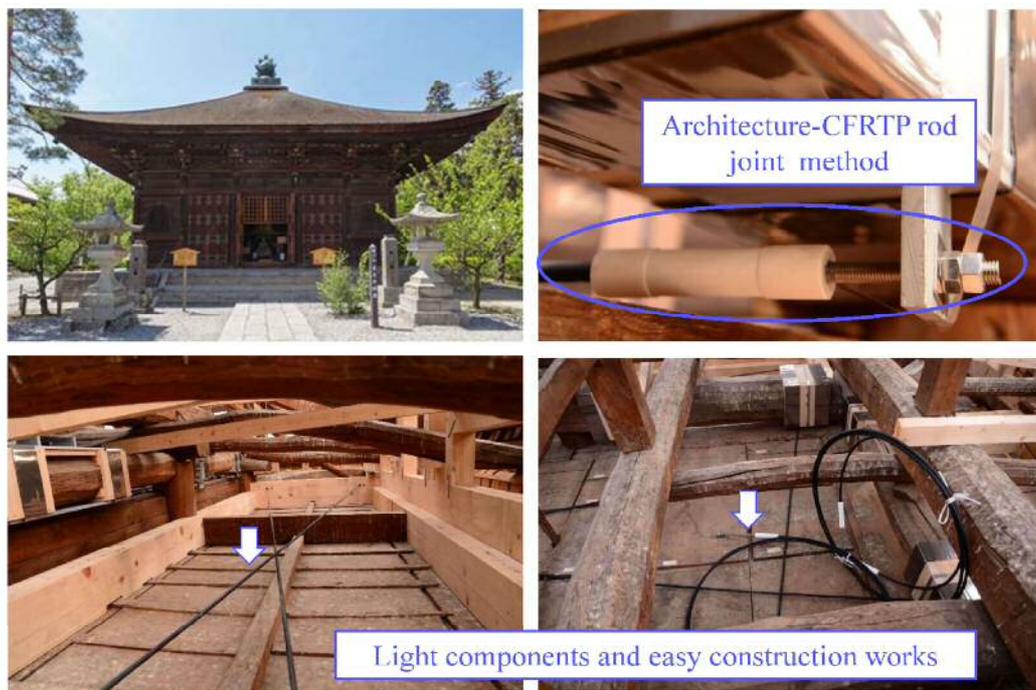


図2 耐震補強事例

16th Japan International SAMPE Symposium&Exhibition より引用

3.1 端部定着部の開発

CFRTP スtrandロッドの既存木造建築物との接合方法は、従来、鋼製部材への接着による方法であり、腐食や結露といった問題があり、接合部の耐久性に課題があった。そこでICC では、鋼製部材を用いない CFRTP 部材を使用し、CFRP の特長を損なわず、課題であった脆性破壊を解消するために Hot Method 法による接合法（HWM 法）の研究に従事し、CFRTP ソケットによる端部定着部を開発した。



図3 熱溶着による CFRTP スtrandの端部定着構造

図3：日本建築学会技術報告集 第27巻 第65号 108-113 2021年2月より引用

開発の過程において、ソケット繊維方向とストランド繊維方向を合わせると比較的高強度だが、ソケットは脆性破壊するが、合わせないと低強度だが脆性破壊しないことが確認された。また、加熱温度を上げること、体積を上げることにより、強度が向上することが確認された。

3.2 端部定着部の概要

端部接合の材料は、表 2 に示す仕様の CFRTP チップ（熱可塑性樹脂含浸炭素繊維）を用いてプレス成型した板材から楕円高さ 28mm×幅 20mm で積層方向にウォータージェットにより切出している。ストランドの公径直径 6mm をソケット断面重心に設けた直径 7 から 7.5mm の孔に貫通させて油圧式ホットプレス機を用いて熱溶着を行っている。

表 2 CFRTP ソケット材料の概要

仕様	CFRTPP-01
外観	平面寸法 320mm×320mm, 厚さ 43mm 貫通孔を有するプレート
材料	CFRTP チップ (KB-B46) 繊維長 50mm
装置	真空チャンバープレス機
成形条件	240 度まで加熱, 30 分加圧 (4MPa) 後, 100 分加圧力を保持したまま冷却
重量	6.135kg

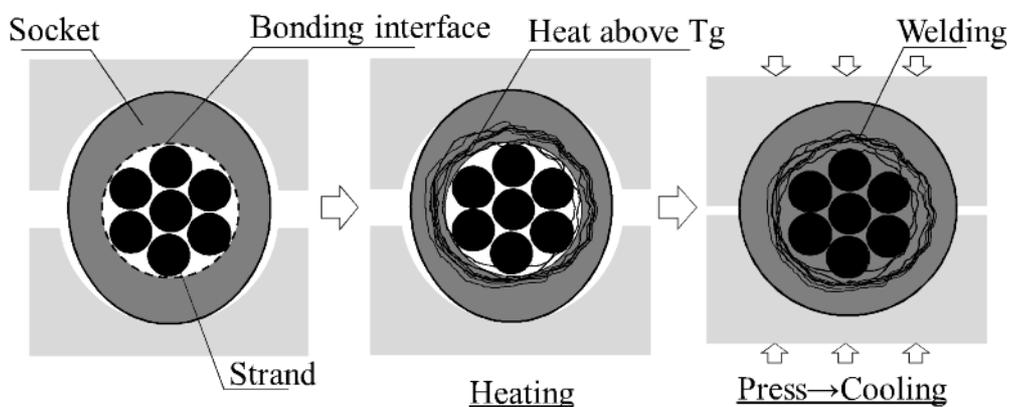


図 4 熱溶着による端部定着方法

4. 木造建築物の耐震補強への適応

4.1 適用事例概要

民族学博物館内に展示されている酒幕は、1920年頃に建てられた朝鮮半島の旅人が飲食や宿泊をする施設を1999年に再現し展示されたものである。展示にあたり、元の屋根を草葺きから銅板に変更している。平面形状はL型で間取りは日本の旅籠屋のような宿泊部屋とウチニワ（炊事場）で構成されている。



東面外観



南面外観

図5 木造建築物の耐震補強事例

4.2 構造概要

木造軸組構法による架構は、150mm×150mmの柱、150mm×200mmの梁、90mm×150mmの貫で構築され、壁は真壁形式の合板貼りである。軸組部材は全てマツが用いられ、柱脚は石場建てであり、小屋組は銅板葺きの和小屋で構成されている。図6に小屋組伏図・軸組図、表3に建物重量を示す。

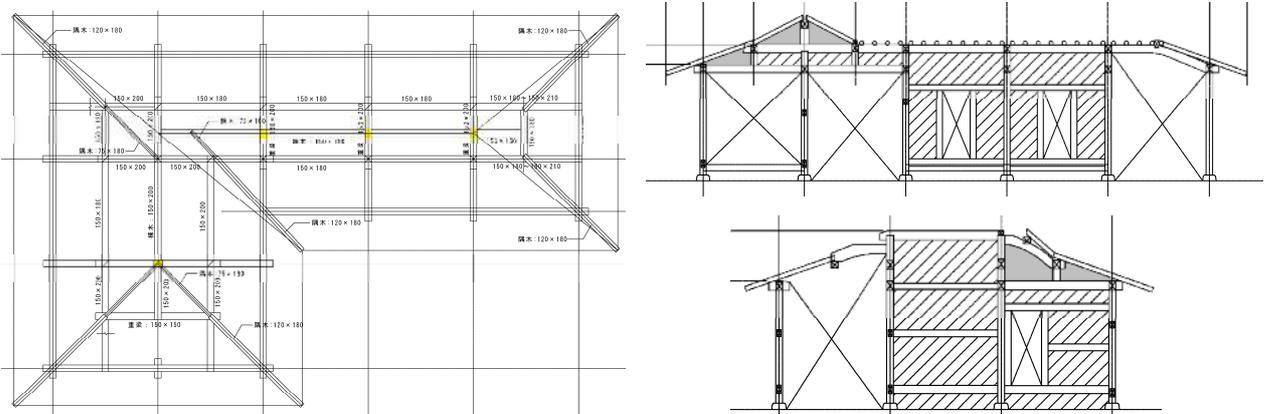


図6 小屋組伏図・軸組図

表 3 対象建物重量

階	階高 <i>H</i> (m)	階重量 <i>W</i> (kN)	面積 <i>A</i> (m ²)	<i>W/A</i> (kN/m ²)
1	3.270	114.61	61.76	1.85

4.3 耐震補強の概要

補強建物が復元された展示物であり、建物の外観および内観をいじした補強が必要である。そこで現状の壁内に設置可能な補強部材である CFRTP ストランドを用いて耐震補強を行った。

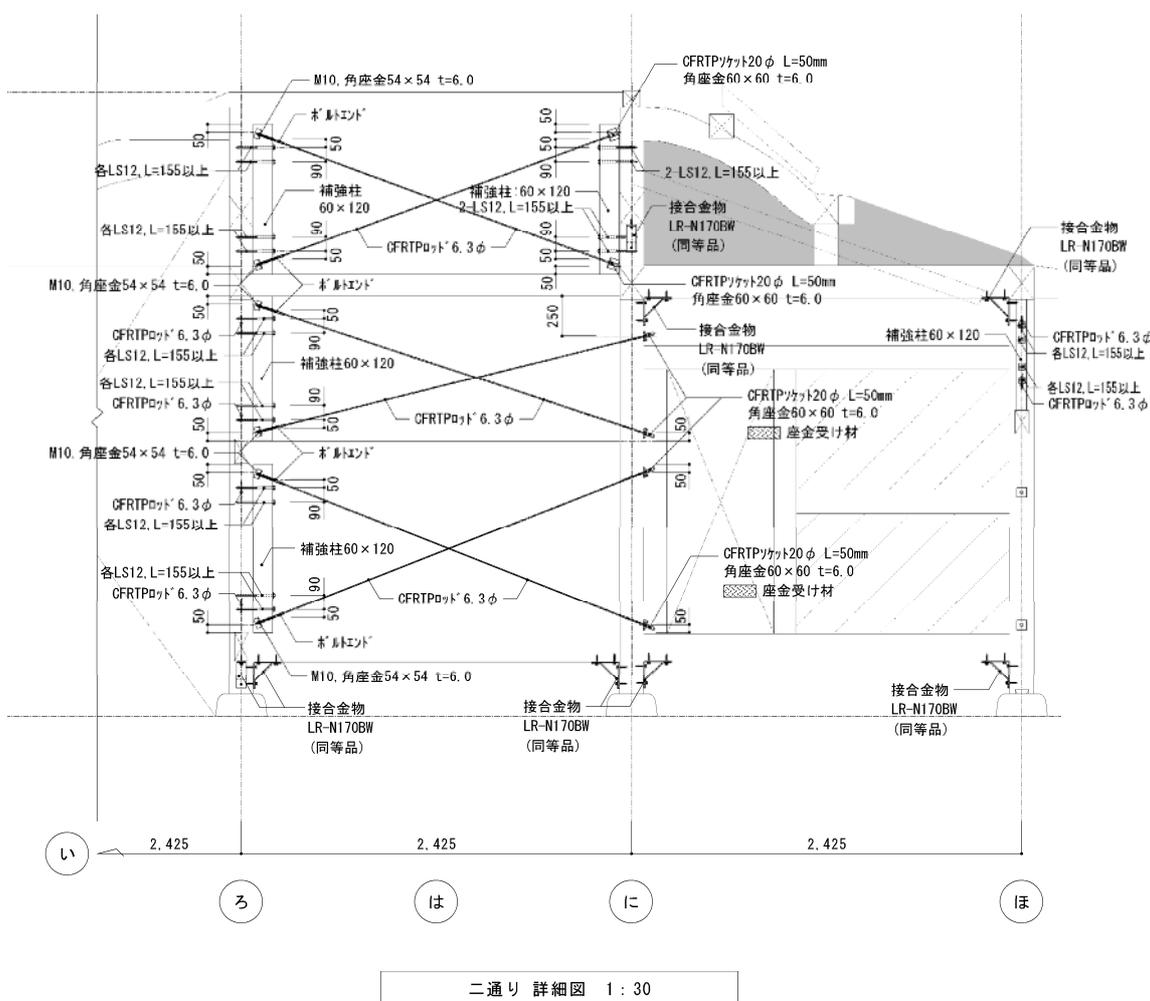


図 7 小屋組伏図・軸組図

4.4 耐震補強解析モデル

過去に文化財建造物等で実施された耐震補強設計の多くは、柱を緊結して浮き上がりを拘束することで変形を抑えている。しかし、当該建物は石場建てであり、緊結が困難であることから、ある程度、変形を許容することによって、大地震に対する安全性を担保する必要がある。

本建物は、有限要素法による3次元解析モデルを作成し、静的変位増分解析によって復元力特性を得て、応答スペクトル法（限界耐力計算）を用いて地震時安全性に関する検討を行う。解析モデルは、Ⅰ．浮き上がりを拘束し、応力が厳しくなるモデルを構築し、軸組部材が終局時に降伏しないこと、および層間変形角が1/30以下になることを確認するとともに、Ⅱ．浮き上がりを考慮したモデルを構築し、層間変形角が既存木造建築物の限界変形角1/15以下になることを確認する。

(1) 解析モデル

表4 解析モデル一覧

No.	モデル名	検討項目	床倍率	浮き上がり
Ⅰ	ベースモデル	床倍率の検討	0.2	-
			1.0	-
			2.0	-
			剛床	-
Ⅱ	浮き上がりモデル	長期荷重相当の柱脚バネ入力	2.0	考慮

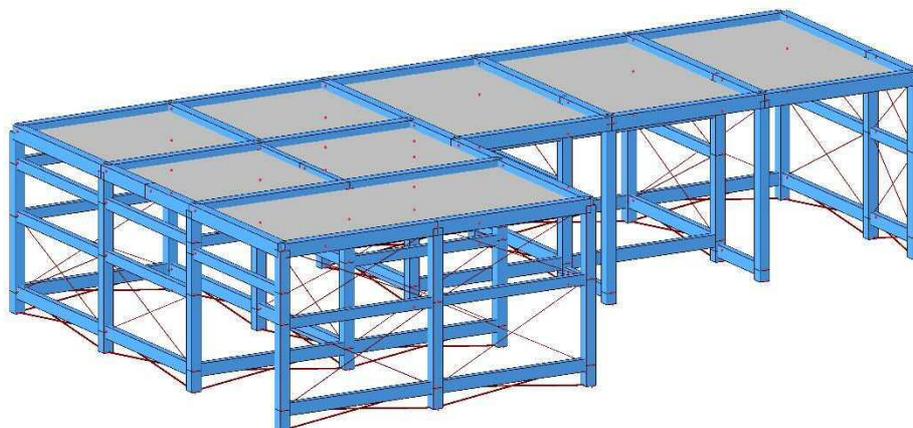


図8 解析モデル

(2) 水平構面のモデル化

水平構面のモデル化は、現地調査により、床組が強固に組み立てられていることは確認しているものの、床倍率として評価する方法が無いため、床倍率の検討を行った。床倍率を0～∞まで変化させた際の固有値解析の結果を表5に示す。床倍率1.0倍ではMode.1でねじれ成分が検出できるが、Mode.2では確認できない。床倍率2.0倍では各モードでねじれ成分が確認できる。それ以降も同様のモードとなり、剛床でも同様のモードとなった。本検討では、安全側に判断し、床倍率を2.0倍と評価した。

表5 固有値解析結果

床倍率	Mode.1	Mode.2
0.2		
1.0		
2.0		
Rigid		

4.5 増分解析結果

荷重変形関係を以下に示す。

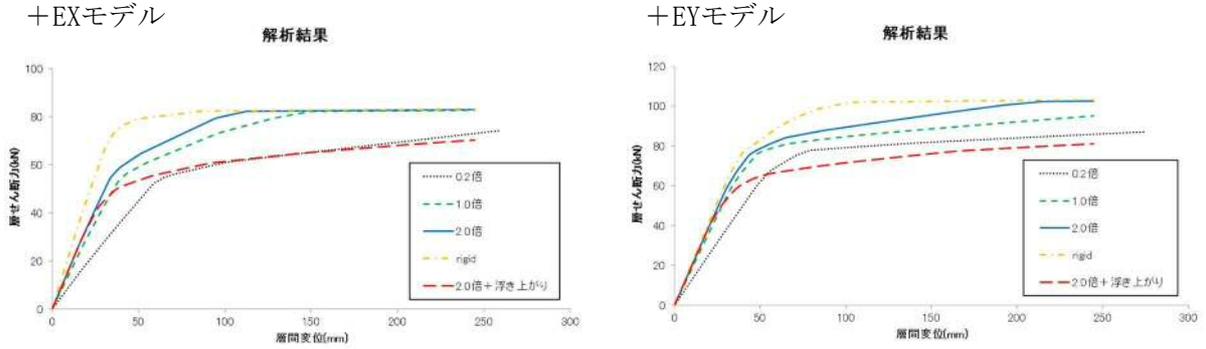


図9 荷重-変形角関係

表5 終局時(1/15)軸組ヒンジ状態(ベースモデル2.0倍)

	Ry	Rz
+EX		
-EX		
+EY		
-EY		

4.6 限界耐力計算結果

限界耐力計算結果を以下に示す。

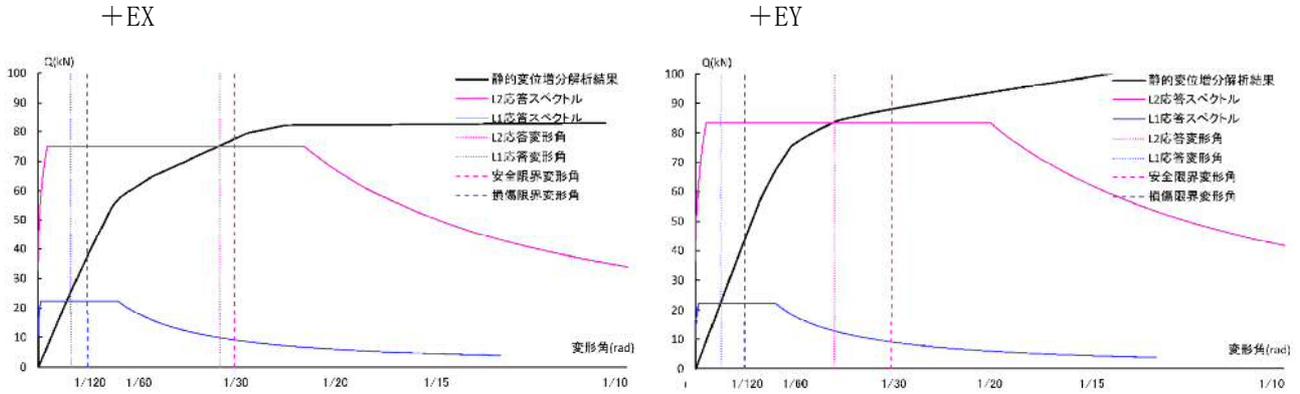


図 10 限界耐力計算結果 ベースモデル

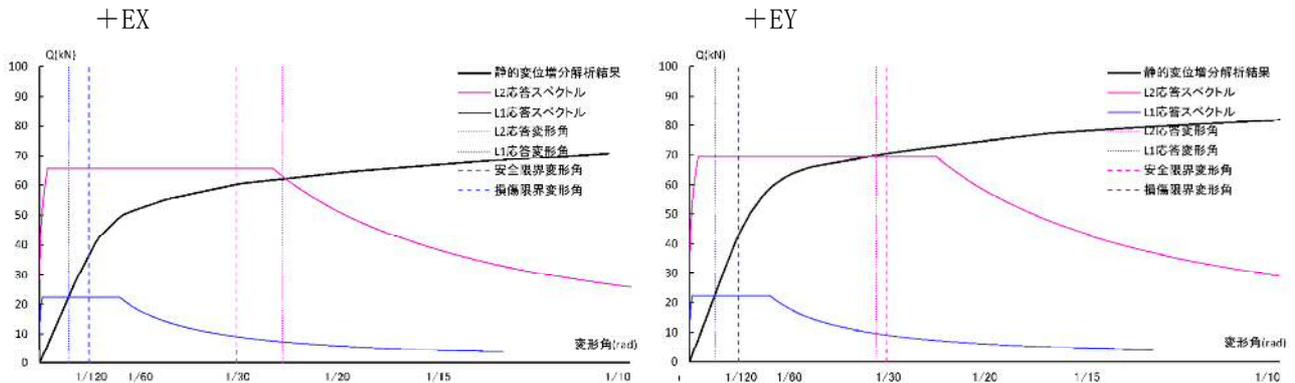


図 11 限界耐力計算結果 浮上りモデル

表 6 限界耐力計算結果一覧

No.	モデル名	位置付け	方向	L1 地震動	目標値	L2 地震動	目標値	
I	ベースモデル	応力用	+EX	1/179	≤1/120	1/32	≤1/30	
			-EX	1/197		1/31		
			+EY	1/230		1/42		…ok
			-EY	1/231		1/42		
II	浮き上がりモデル	変形用	+EX	1/202	…ok	1/24	≤1/15	
			-EX	1/197		1/22		
			+EY	1/230		1/31		…ok
			-EY	1/231		1/30		

5. 建築分野への適応に向けた課題

今後、既存木造建築物への耐震補強工事への適応が予定されている。工場でCFRTPストランドにCFRTPソケットを熱溶着して、現場に搬入し補強対象の構面に設置を行うことになる。現時点では、施工手順上、両端部をCFRTPソケットとすることが出来ないため、片側（緊張端）はステンレスボルトエンドにより接合する。しかし、比較的低温で熱溶着が可能な性質を活かして、今後は、現場での熱溶着が可能な装置の開発や緊張可能なCFRTPボルトエンドの開発に期待したい。