

# マグネットジョイントによる木造フレームツールの開発に関する試論

## A Preliminary Study on a Magnetic-Joint Timber Frame System

○相澤佑斗（宮城大学大学院事業構想学研究科）<sup>\*1</sup>

友渕貴之（宮城大学事業構想学群）<sup>\*2</sup>

<sup>\*1</sup> Yuto Aizawa, Graduate School of Project Design, Miyagi University, 1-1 Gakuen, Taiwa-cho, Kurokawa-gun, Miyagi, 981-3298, p2452001@myu.ac.jp

<sup>\*2</sup> Takayuki Tomobuchi, School of Project Design, Miyagi University, 1-1 Gakuen, Taiwa-cho, Kurokawa-gun, Miyagi, 981-3298, tomobuchit@myu.ac.jp

キーワード: マグネット構法, 可変構造, 木造フレームツール, 場づくり, 災害時活用

### 1. はじめに

本研究では、マグネットの即時性に着目し、一般流通の木材とマグネットを組み合わせることで、利用用途に応じて組み換え可能な木造フレームツールの開発を目指している。この木造フレームツールは、部材同士をマグネットジョイントにより接合することで、容易な組み立て・分解を可能にする。現在のわが国では、非常時のために必要となるものを特別に用意することが多く、それらを収納・保管する空間も必要となる。しかし、マグネットを用いた木造フレーム構法の開発が実用化されることによって、面外方向の剥離や回転自由度に起因する不安定性が課題として挙げられるが、日常的に使われながらも非常時には別の用途へ転用できるプロダクトとなると考えている。このように、暮らしの中で時間的な変化に応じた臨機応変な対応可能性を秘めており、社会的にも強い意義を持つと考えている。

### 2. 研究の目的と位置づけ

#### 2.1. 研究の目的

本研究は、マグネットジョイントによる木造フレームツールを実用化することを目指している。そのため、マグネットによる接合方法の検証を行うことで、マグネットジョイントの可能性を示すことに加え、木造フレームツールの構造的な課題に関する条件整理を行うことを大きな目的としている。

#### 2.2. 研究の位置付け

先行事例として、『Pazls』という拡張可能な棚の事例が見られたが、ベンチとして利用することなど大きな荷重を想定してはおらず、家具スケールに留まっている。本研究は、マグネットを用いて部材同士を接続し構造を維持する構法の開発を目指しながら、日常的に利用できるベンチや棚から非常時には仕切りなどの空間へと転用できるツールの開発を目指している。そのため、マグネットによる新たな接合方法を提示するとともに、マグネットの持つ可能性を再認識するものとして位置付けている。また、マグネットの即時性に着目し、マグネットジョイントの可能性を追求すると同時に、実現に向けた条件整理を行うことを目指す。

#### 2.3. 用語の定義について

本論で用いているマグネットとは、2つの磁極を持ち、双極性の磁場を発生させる源となる物体として定義づけて

いる。

また、木造フレームツールとは、木材を構成部材として用いて骨組みを構築しながら、構築・解体が容易な構造物として定義づけている。本研究では、木材を基本構造物として用いることで、外力に対する耐力を十分確保しながら、変形可能性の高い性質を持った構造物の構築を目指している。

### 3. 研究の方法

研究の方法としては、以下の手順によって行う。

- ①マグネットによる接合部の荷重耐力の計測実験を行い、マグネットジョイントの最適条件を明らかにする。
- ②3DCAD などを用いたモデリングを通して、課題や改善点を考慮して設計を行う。
- ③モックアップを作成し、構造的課題や考慮事項について確認を行う。
- ④②と③の作業を繰り返すことで、実践的に諸条件を整理しながら設計を行う。
- ⑤設計の中で表れてきた考慮事項を整理し、仕様書を作成する。
- ⑥プロトタイプ制作を行う。

上記の手順によって、マグネットジョイントによる木造フレーム構造の開発に向けた条件整理を行い、プロトタイプ制作を目指す。

### 4. マグネットジョイントの最適条件と構造の検証

#### 4.1. 素材の選定と接合方法の検討

木造マグネットフレームは、比較的安価で入手しやすい部材を利用することで、容易に生産することができることを目指している。そのため、本論では一般流通の木材として、杉材を選定し検討することとした。また、マグネットの種類については、ネオジム磁石という磁力の強いマグネット<sup>(1)</sup>を採用した。マグネットの形状については、形や大きさの異なる種類のものを用意し、マグネットのサイズと抵抗力について実験を行う。実験の方法については、以下の手順で測定を行うこととした。

- ① CRANE SCALE A4405T という吊りはかりを吊るす。
- ② 鉛直方向上側に取り付ける磁石と量りを薄手のメッシュ生地や布地によって接続する。
- ③ 鉛直方向下側に取り付ける磁石を同様の布地を間に

- 挟むことで、2つの磁石を磁力により接続する。
- ④ 間に挟んだ布地を鉛直方向下向きに垂直荷重を徐々に加えていく。荷重は2つの磁石が剥離するまで加えるものとし、剥離直前の数値を記録する。
- ⑤ これを10回繰り返し記録する。記録した値の平均値を算出することで、マグネットの磁力を測定する。
- この実験の様子について、下図に示す。



Fig.1 Setup for measuring the pull-off load of magnets

また、この実験で得た結果について、表1に示す。

Table 1. Results of magnet pull-off load measurements.

ドーナツ型円形マグネット 直径20mm 厚み:5mm	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目
	4.0kg	4.2kg	4.0kg	4.4kg	4.2kg
	6回目	7回目	8回目	9回目	10回目
	4.2kg	4.6kg	4.6kg	4.4kg	4.6kg
	平均値				4.32kg
長方形型マグネット 縦:20mm 横:30mm 厚み:5mm	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目
	6.4kg	6.2kg	6.0kg	5.8kg	5.8kg
	6回目	7回目	8回目	9回目	10回目
	6.2kg	6.4kg	6.6kg	6.2kg	6.0kg
	平均値				6.16kg
円形型マグネット 直径20mm 厚み:5mm	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目
	4.6kg	4.2kg	4.8kg	4.6kg	4.0kg
	6回目	7回目	8回目	9回目	10回目
	4.4kg	4.4kg	4.2kg	4.0kg	4.4kg
	平均値				4.36kg
円形型マグネット 直径10mm 厚み:3mm	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目
	0.8kg	0.8kg	0.8kg	1.0kg	0.8kg
	6回目	7回目	8回目	9回目	10回目
	1.0kg	0.6kg	1.0kg	1.0kg	0.8kg
	平均値				0.86kg
ドーナツ型円形マグネット (2個) 直径20mm 厚み:5mm	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目
	6.4kg	6.8kg	7.0kg	6.6kg	6.4kg
	6回目	7回目	8回目	9回目	10回目
	6.4kg	6.4kg	6.6kg	6.8kg	6.8kg
	平均値				6.56kg

長方形型 マグネット (2個) 縦:20mm 横:30mm 厚み:5mm	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目
	11.2kg	11.8kg	11.6kg	11.8kg	11.4kg
	6回目	7回目	8回目	9回目	10回目
	12.0kg	11.4kg	12.0kg	11.6kg	11.8kg
	平均値				11.66kg

上記の実験結果から、直径20mmのドーナツ型円形マグネット、直径20mmの円形型マグネット、長方形型マグネットの3つについて、4.0kg以上の荷重に対する抵抗力を備えていることが読み取れる。また、マグネットの個数を増やすことでも磁力による抵抗力を高めることができることも明らかとなっている。

これらのことを考慮し、直径20mmのドーナツ型円形マグネット、直径20mmの円形型マグネット、長方形型マグネットの3つを候補として挙げ、木造フレームツールに最適なマグネットを選定する。

続いて、木材とマグネットの接合形状と接合方法について検討を行う。これらの接合形状のパターンとしては、以下のように大きく3つに分類し検討する。

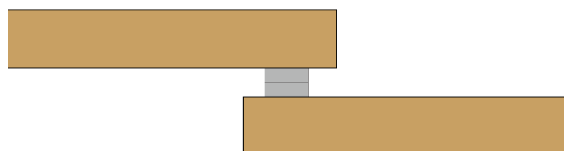


Fig.2. Joint Type ①: convex-convex coupling

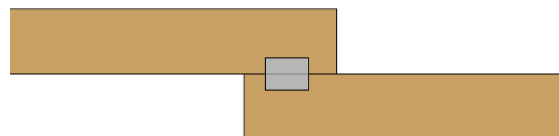


Fig.3. Joint Type ②: flush-face coupling

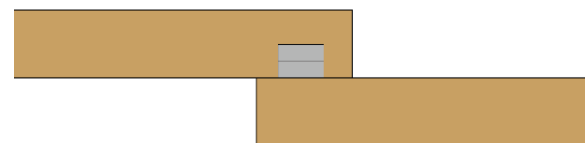


Fig.4. Joint Type ③: convex-concave coupling

接合形状①と接合形状②については、接地面に対して水平方向の外力に対する抵抗力が磁力による抵抗力に依存する。そのため、接合形状③を採用し、接地面に対して水平方向の外力に対する抵抗力を高める接合形状を採用する。木材をドリルにより彫り込み加工することを考慮し、直径20mmのドーナツ型円形マグネットを選定する。

また、木材とマグネットの接合方法については、木工用ボンドによる接合とビスによる接合が挙げられる。木工用ボンドによる接合方法は、マグネットや木材に破損が見られた場合、接合されている部材を全て交換しなければならない。そのため、マグネットや木材に破損や施工過程での不備が発生した場合にも再利用できるように、ビスによる接合方法を採用する。

また、ビスによる接合を行う場合、「ビス頭部の厚み」・「ねじ部の長さ」が非常に重要な検討事項となる。そこで、磁力に対する抵抗力を測定することで、ビスの適正を明らかにすることを目的として実験を行う。ここでは、直径20mmのドーナツ型円形マグネットを用いて、複数の異なる種類

のビスをマグネット中央にある穴に通して麻紐を接続し鉛直方向に力が伝達されるように固定することで、磁力による抵抗力を記録する。この実験において記録する磁力による抵抗力の値は、マグネット剥離直前の荷重を採用する。具体的な手順について、下記に示す。

- ① CRANE SCALE A4405T という吊りはかりを吊るす。
  - ② 鉛直方向上側に取り付ける磁石と吊りはかりを麻紐で接続する。
  - ③ 鉛直方向下側に取り付ける磁石も同様に麻紐と接続し、2つの磁石を磁力によって接着する。
  - ④ 鉛直方向下側に取り付けた磁石に接続した麻紐を鉛直方向下向きに垂直荷重を徐々に加えていく。荷重は2つの磁石が剥離するまで加えるものとし、磁力による抵抗力の値については剥離直前の数値を記録する。
  - ⑤ 記録は10回繰り返し、平均値を算出することで、ビスによる接合時のマグネットの磁力を測定する。
- この実験の様子について、図5に示す。



Fig 5. Test setup for pull-off load with a screw-fastened magnet.

この実験では、上記手順での計測のほか、木材への接合時にマグネットの磁力による抵抗力によりビスが剥離する可能性の有無についても検証し、結果を表2に示した。

Table 2. Pull-off resistance by screw type during magnet fastening.

径 3.8mm	1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目
長さ 57mm	2.2kg	2.4kg	2.4kg	2.0kg	2.2kg
頭部 1.5mm	6 回目	7 回目	8 回目	9 回目	10 回目
剥離 無	2.4kg	2.6kg	2.4kg	2.4kg	2.6kg
径 3.3mm	1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目
長さ 25mm	5.4kg	5.2kg	5.6kg	4.8kg	5.8kg
頭部 1.0mm	6 回目	7 回目	8 回目	9 回目	10 回目
剥離 無	6.2kg	6.0kg	5.8kg	5.8kg	6.0kg
径 3.3mm	1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目
長さ 40mm	6.0kg	6.2kg	6.4kg	6.2kg	6.4kg
頭部 1.0mm	6 回目	7 回目	8 回目	9 回目	10 回目
剥離 無	5.8kg	6.2kg	6.2kg	6.2kg	5.8kg
径 2.0mm	1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目
長さ 15mm	3.6kg	3.8kg	3.8kg	4.0kg	3.6kg
頭部 1.0mm	6 回目	7 回目	8 回目	9 回目	10 回目
剥離 有	4.0kg	3.8kg	3.6kg	3.8kg	3.6kg
径 3.3mm	1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目
長さ 20mm	2.4kg	2.2kg	2.0kg	2.2kg	2.0kg
頭部 2.0mm	6 回目	7 回目	8 回目	9 回目	10 回目
剥離 有	2.4kg	2.4kg	2.2kg	1.8kg	1.8kg

径 3.3mm	1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目
長さ 25mm	2.4kg	2.0kg	2.4kg	2.0kg	2.2kg
頭部 2.0mm	6 回目	7 回目	8 回目	9 回目	10 回目
剥離 無	2.2kg	2.0kg	2.4kg	2.2kg	2.0kg
径 4.0mm	1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目
長さ 25mm	1.0kg	0.8kg	1.0kg	1.2kg	1.6kg
頭部 2.0mm	6 回目	7 回目	8 回目	9 回目	10 回目
剥離 無	1.8kg	1.2kg	1.0kg	1.0kg	1.2kg
径 4.0mm	1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目
長さ 35mm	1.0kg	1.2kg	1.0kg	1.4kg	1.4kg
頭部 3.0mm	6 回目	7 回目	8 回目	9 回目	10 回目
剥離 無	1.2kg	1.0kg	1.6kg	1.2kg	1.0kg

上記の結果から、「ビスの頭部が磁力に対する抵抗力への影響」と「ビスのねじ部の長さがビスの剥離への影響」が読み取れる。

まず、「ビスの頭部の形状」についてである。頭部の形状は、1mm 程度の平たい頭部形状を持つビスを用いることによって、直径 20mm のドーナツ型円形マグネットと接合した場合に磁力を高めていることが読み取れる。つまり、ドーナツ型円形マグネットを用いる場合、頭部形状は1mm程度の平たいビスを選定することが適正条件の1つであることが明らかとなった。

また、「ビスのねじ部の長さ」については、20mm 以下のビスは磁力によって引き抜かれてしまい十分な耐久力を備えていないことが明らかとなっている。そのため、ビスのねじ部の長さの条件として、25mm 以上の長さを確保していることが非常に重要であることが明らかとなった。

これらの結果をもとに、杉材の断面寸法について検討を行う。そのため、以下の3つの観点から決定する。

- ① マグネットの寸法と接合形状
- ② ビスの耐久力の確保
- ③ 一般流通する規格であること

まず上記①のマグネットの寸法については、直径 20mm の中央に穴が開けられたドーナツ型マグネットを採用することとした。そのため、20mm 以上の寸法が最低限求められる。また、接合形状については、木材を彫り込むことで、マグネット接地面に対して水平方向の外力に対する耐力を生む接合形状により構成することを想定している。そのため、直径 20mm の穴に加え、穴の周囲に 10mm 以上の余白を作ることで、マグネット接着面に対する水平方向の外力による杉材の割れなどの破損を抑制する。①の条件から最低限 40mm×40mm の断面寸法が必要とされることが読み取れる。

続いて、②のビスの耐久力についてである。ビスについて磁力に対する耐久力の実験結果から、25mm 以上の長さを有する必要があることが明らかとなった。ここで、マグネットの厚みが 5mm であることから、木材内部に入り込むねじ部の長さは、20mm 以上必要となる。また、ビスによる接合が双方向での接合を行う場合も考慮する必要がある。そのため、40mm よりも大きい断面寸法を確保しなければならない。

そのため、③の条件としては、最低限 40mm×40mm を満たした断面形状の杉材を選定する必要がある。そこで、45mm×45mm の断面形状の杉材を選定する。

これまでの実験から得られたマグネットジョイントの最

適条件について、下記にまとめる。

#### 4.1.1. 条件①：マグネットの接合形状について

マグネットジョイント部分に対する水平力に対して抵抗力を与えるため、角材を片側 10mm 掘り込み、ネオジム磁石を固定することで、凸部分と凹部分を作り、噛み合うように接合する構成を採用する。彫り込む場合、周囲に 10mm の余白を取る。

#### 4.1.2. 条件②：ネオジム磁石の形状について

インパクトドライバーによりドリルビットを用いて加工するため、直径 20mm・厚さ 5mm のドーナツ型ネオジム磁石を採用し、ビスにより固定する。

#### 4.1.3. 条件③：ビスの形状について

頭部の厚さ 1.0mm 以下、ねじ部の長さ 25mm 以上のビスを用いる。

#### 4.1.3. 条件④：木材の断面寸法

最低限 40mm×40mm を満たした断面形状が必要となる。そのため、45mm×45mm の断面形状の杉材を選定。

#### 4.2. 構造体について

これらの条件を考慮し、構造体についての検討を行う。

マグネットによる接合方法は、ピン接合という種類の接合方法に該当する。ピン接合とは、構造部材同士が接続しているものの、一体化していない接合方法のことを指している。そのため、回転力に対する対処が非常に重要となった。これらのことを考慮し、木造フレームツールの初期案として什器を制作し、図 6 に示す。木造フレームについては、「マグネットジョイント部分へ垂直荷重が集中しないこと」、「回転を抑える部材構成を行うこと」の 2 点を考慮して構造を計画する。

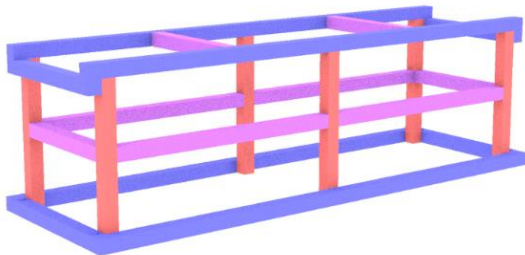


Fig. 6. Initial Timber Frame System-concept modeling.

図 6 で示された、赤色の部材によって垂直方向の外力に対応しており、青色の部材によって水平方向の外力に対応するように構成している。また、マグネットによる接合により発生する回転力を、桃色の部材で抑制する部材構成により計画している。これらを踏まえて実寸大で制作し、構造について検討を行う。

### 5. モックアップの制作と検討

#### 5.1. モックアップの制作による検証

図 6 で示した木造フレームツールの初期案のモデリングについて、実寸大でモックアップを制作し、検証する。その結果、2つの構造的課題が明らかとなった。

1 つは、水平方向に対して一定の荷重がかかると、ねじれにより、マグネットの接合部が徐々に剥離し、構造体が解体されてしまうという課題である。この課題の原因を分析した結果、図 7 で示した部材に課題があることが推察された。長手方向に対して、赤色の部材に変位が生まれ、その変位により青色の部材に回転力が働き剥離していること

が明らかとなった。短手方向に対しては、青色の部材が上部の灰色部材のみと接合しているため、マグネットの磁力による抵抗力のみに左右され、一定の外力によって部材が剥離することが明らかとなった。



Fig. 7. Issue ① in the Timber Frame System.

もう 1 つは、図 8 中の赤色の部材が、短手方向に対して接合箇所が全くないという点である。これにより、構造体全体に発生するねじれが大きくなっていることが明らかとなった。そのため、一定の外力によって部材間の接合が剥離することに繋がると推察される。

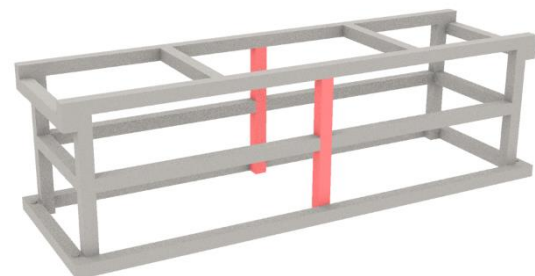


Fig. 8. Issue ② in the Timber Frame System.

これら 2 つの検討箇所について、考慮事項を再整理し木造フレームツールの実用性を高めると同時に、条件整理を行う。

#### 5.2. 構造の安定に向けた改善策の検証

モックアップの制作により明らかとなった 2 つの課題に対する改善策について検証する。

まず図 7 で示した課題について、改善策として以下 2 つを挙げる。

- ① 青色の部材の下端に鉛直方向の部材を挿入する方法
- ② 図 14 の青色の部材と赤色の部材を接合する方法



Fig. 9. Remedy to Issue ①: Option 1.

まず①の方法は、部材を増やすことによって、短手方向に対する変形を抑制することによる改善策である。この改善策は、マグネットの数量だけでなく、部材数が増加してしま。そのため、費用の増加という問題だけではなく、図 9 のように部材数が増えることにより意匠的な観点でも全体的に重みのあるデザインとなってしまうことがモデリングによる検討を通して明らかとなった。



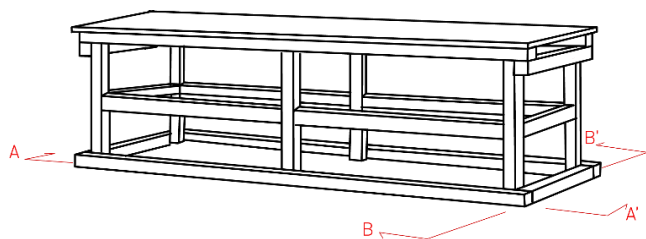


Fig 10. Mock-up: line drawing.

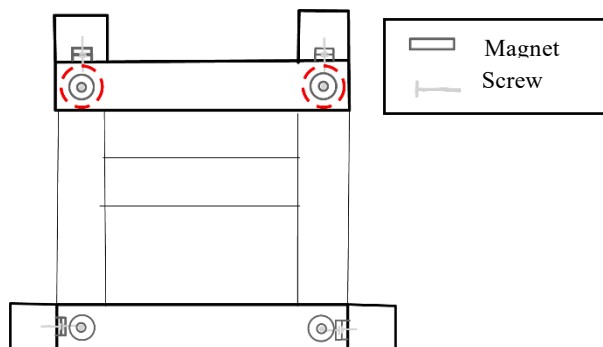


Fig 11. Remedy to Issue ①: Option 2, Section B-B'

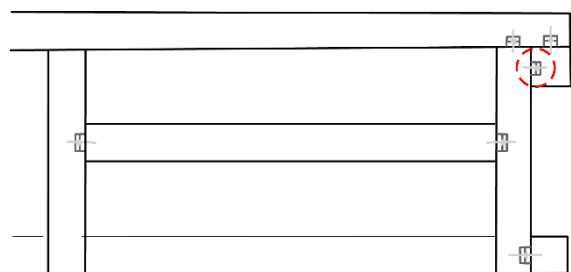


Fig 12. Remedy to Issue ①: Option 2, Section A-A'

改善策②の方法は、図 11、図 12 で示した赤色の箇所にもマグネットを取り付け、接合箇所を増やす方法である。これにより、図 10 のように、意匠的には変化はなく、力学的な問題の改善が見込まれる。

これらのことから、図 7 で示した課題①に対する改善策として、改善策②の方法を採用した。

続いて、図 8 で示した課題②についての改善策について検討する。この改善策として、以下 2 つの方法を挙げ、検討を行った。

- ① 図 13 の赤色の部材と青色の部材を接合する方法
- ② 図 14 の赤色の部材と青色の部材を接合する方法

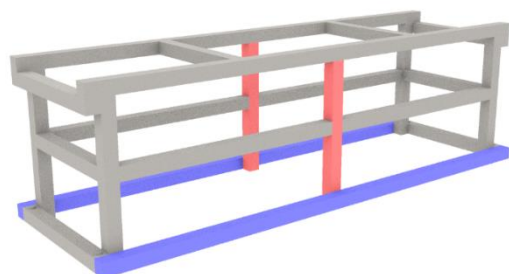


Fig 13. Remedy to Issue ②: Option 1.

まず、改善策①については、赤色の部材と青色の部材を接合するため、施工が容易である。しかし、図 13 の赤色の部材が青色の部材と接続することで、短手方向の外力がマグネットジョイント部分に荷重が集中してしまう。そのため、構造的な安定性は見込めない。

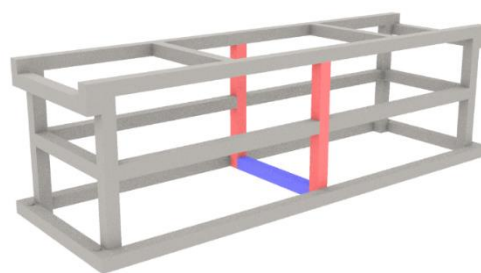


Fig 14. Remedy to Issue ②: Option 2.

一方で、改善策②の方法は、部材が 1 つ増えることとなるが、短手方向の外力をマグネットジョイント部分ではなく、図 14 において青色で示した線材に伝達する。そのため、構造的安定性を高めることが予想される。

これらのことから、図 8 で示した課題②については、改善策②の方法を採用することとした。

### 5.3. 面材を用いた構造の検証

ここまで木造フレームツールとして線材による部材構成による設計を行っていた。しかし、線材のみで構成したフレームは、マグネットジョイントによるピン接合の特性上、水平方向の外力およびねじりに起因する回転が残存してしまうことが推察される。そのため、面材を付加した場合についても比較を行い、最小限の部材追加によりねじり剛性と水平方向の抵抗力を同時に向上させることを目指す。

そのため、モックアップで制作した木造フレームツールに対して、面材の挿入パターンの検討を行う。ここでは、モックアップ制作時に懸念された長手方向の外力への変形を抑制することを目指す。ここでは、面材の挿入による変化を確認するため、長手方向のみに面材を挿入することを目的として設計を行う。

また、面材として用いる素材としては、コストや性質等の観点から選定し、厚さ 20mm のパイン集成材を用いる。モデリングを中心に面材の挿入方法について検証する。

そこで、図 6 で示した回転力を抑制する役割を果たす桃色の部材をもとに、面材の挿入箇所について検討する。面材の厚みとフレームの厚みが異なっており、図 15 に示した赤色の部材と青色の部材の位置が鉛直方向で重なっていないことで、4.1.1 で示したように掘り込み位置の周囲に 10mm の余白を確保して設置することが困難となる。

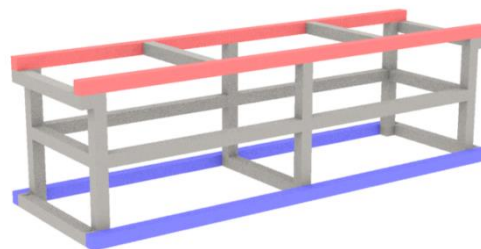


Fig 15. Areas of concern for panel insertion

この改善策として、以下の 3 つの方法を検証する。

- ① 図 15 の青色の部材の上部に面材を当て、灰色の部材とマグネットジョイントにより接合する方法(図 16)
- ② 既存のフレームをそのまま残し、その隙間に面材を挿入する方法(図 17)
- ③ 図 6 で示した長手方向に対し平行な桃色の部材を最下端へ移動し、面材を挿入する方法。(図 19)

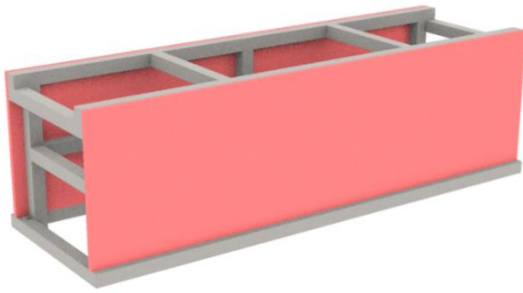


Fig 16. Panel insertion method ① .

まず面材挿入方法①については、側面に1枚ずつ面材を取り付けるため、施工が容易で2枚の面材を挿入するため部材数も少ない。長手方向に対しては外力に対する抵抗力を高めることが予想されるが、短手方向に対しては、磁力に依存した接合のため、ねじれなどにより面材の接合箇所が剥離し、分解されてしまう恐れがある。

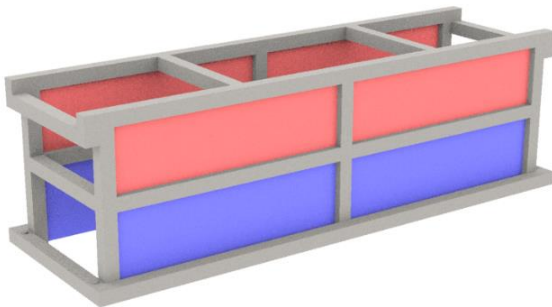


Fig 17. Panel insertion method ② .

続いて、面材挿入方法②についてである。この方法は既存の木造フレーム形状に対して、隙間に面材を挿入することで、長手方向に対する変形を抑制し、安定させることを想定したデザインである。これは長手方向だけでなく短手方向に対しても抵抗力を持つ構造となっている。しかし、部材数が多くなることで、接合部の数も多くなるため、コストが高いだけでなく施工難易度も高くなることが予想される。また、4.1.1で示した条件から、20mm以下の面材を用いる場合、掘り込むことが難しく凸型の形状となる。そのため、図17の面材が隣接する角材については凹型の形状の接合部となる必要があり、図18のように彫り込んだことで、ビスが接触してしまう課題などの問題が生まれることが予想される。

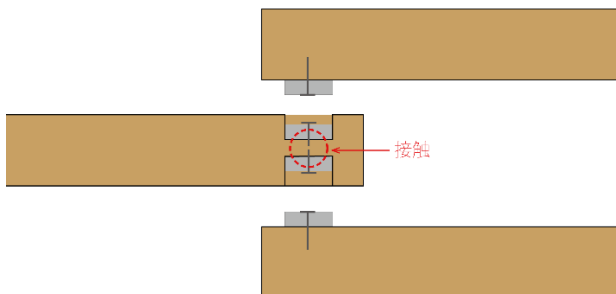


Fig 18. Screw interference from two-sided recesses.

面材挿入方法③の方法は、②と同様に既存の部材を再利用した設計であるが、②の懸念点であった部材数の多さを解消したデザインである。図6で示した長手方向に対して平行な桃色の部材を最下端へ移動させることで（図19に示した青色部材）、図15で挙げた懸念点を解消し、面材を側面のフレームに4辺で接合し挿入する。これにより、長

手方向の変形に対する抵抗力を確保しながら、短手方向に対しても抵抗力を持つ役割を果たす。

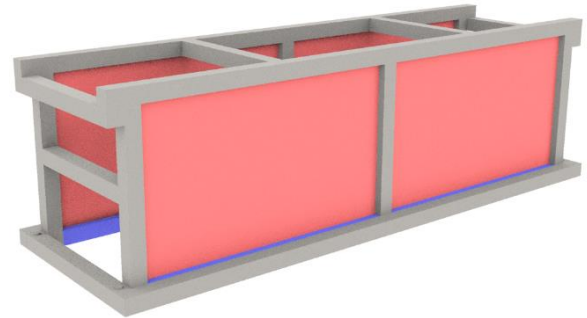


Fig 19. Panel insertion method ③ .

これらのことから、構造的安定性を考慮し、面材挿入方法③を採用しプロトタイプ制作を行う。

## 6. プロトタイプの制作

これまで挙げられた考慮事項や改善策をもとに、「線材のみを用いた木造フレームツール」と「面材を用いた木造フレームツール」の2パターンプロトタイプ制作を行う。

### 6.1. 線材のみを用いた木造フレームツール

まず、線材のみを用いた木造フレームツールについて、考慮事項などを踏まえた改善策を適用しプロトタイプ制作する。（図20）



Fig 20. Timber Frame System Prototype ① .

モックアップ制作時は一定の外力を受けると全ての部材間の結合部が剥離してしまっていた。しかし、今回制作したプロトタイプについては変形が見られたものの部材間の接合箇所が剥離することはなかった。だが、マグネットジョイント部分が剥離しないことから、変形に対する抵抗力がビス部分に集中していることが推察される。

### 6.2. 面材を用いた木造フレームツール

続いて、面材を用いた木造フレームツールのプロトタイプ制作する。（図21）



Fig 21. Timber Frame System Prototype ②

プロトタイプとして制作した面材を用いた木造フレームツールは、面材を用いたことで長手方向に対しては抵抗力がかなり高まり、変位はほとんど見られなかった。しかし、面材を挿入していない短手方向については、図 22 のような変形が生じており、傾きが約  $2.5^{\circ}$  生じることが確認できた。

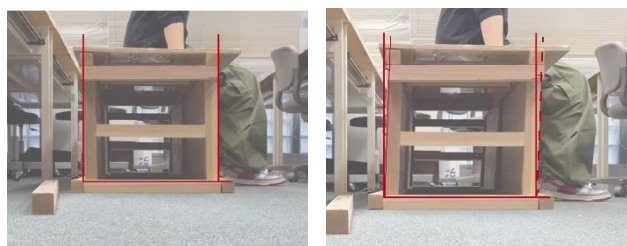


Fig 22. Deformation of the Timber Frame System

面材により変形を抑制することができたが、意匠的には線材のみのパターンと比較すると存在感が強く、面材の挿入方法について再度検討が必要である。

そのため、今後の検討では、意匠的な観点を考慮しながら、構造的にも強固となるデザインを模索することが重要である。

## 7. 条件整理

木造フレームツールの実現に向けて、これまでの検討を踏まえ、条件整理を行う。その結果、以下の条件が挙げられる。

- マグネットの選定について
  - 形状：ドーナツ型マグネット
  - 種類：ネオジム磁石
  - サイズ：直径 20mm 以上
- 木材（線材）について
  - 規格：45mm 角以上の断面形状
  - 樹種：杉材
  - 形状：1800mm 以下の線材
- 木材（面材）について
  - 種類：パイン集成材などの変形しにくい素材
  - 厚み：20mm 以上
  - 力学的役割①：水平・垂直モーメントの抑制
  - 力学的役割②：たわみに対する抵抗力
  - 力学的役割③：垂直荷重に対する抵抗力
- 接合方法について
  - 接合部品：ビス等の結合部品
  - 接合形状：③凸×凹での接合
- マグネット結合部品の適正について
  - ビスの頭部形状：1mm 以下
  - ねじ部の長さ：25mm 以上
- 構造について
  - 力学的役割①：水平荷重に対する抵抗力
  - 力学的役割②：鉛直荷重に対する抵抗力
  - 力学的役割③：水平平面のモーメントに対する抵抗力
  - 力学的役割④：垂直平面のモーメントに対する抵抗力

本研究から木造フレームツールにおいて、これらの条件を留意することが重要であることが示唆された。そのため、上記で示した各項目を、本論で目指していた木造フレームツールの仕様書として位置づける。この仕様書を軸にして、

今後は構造的安定性を兼ね備えながらも様々な状況に転用できるツールの開発を目指す。

## 8. おわりに

本研究は、一般流通材とネオジム磁石を用いたマグネットジョイントによる木造フレームツールの開発に向けて、接合方法や構造条件などを整理し、実寸大プロトタイプを通じた検証を行った。その結果、マグネットの形状だけでなく、頭部厚さ 1mm 以下かつねじ部の長さ 25mm 以上の接合部材となるビスを接合部材として選定する必要があるといった最適条件を明らかにすることができた。さらに、線材のみの構造と面材を用いた構造の比較を通じて、構造的安定性を高める設計上の知見も得ることができた。

一方で、部材のたわみや乾燥収縮に起因する変形、面材導入による意匠性の低下など、今後さらに検討すべき課題も明らかとなっている。

本研究は、マグネットジョイントによる木造フレームツールの開発に向け、成立するための数値条件や納まりなどを実寸大での検証とともに提示した点に意義がある。今後は、部材のパターン化とそれに伴う成立条件の整理を行い、実用化に向けてより自由度の高い利用が可能となるよう最適化を進める。そして、マグネットジョイントによる木造フレームツールが、日常的な利用から災害時等の非常時の利用まで幅広く応用できる即時性と拡張性を兼ね備えたプロダクトとして発展することを目指す。

## 文 献

- (1) S. Rathfelder, S. Schuschnigg, C. Kukla, C. Holzer, D. Suess, and C. Burkhardt, Production of Anisotropic NdFeB Permanent Magnets with In Situ Magnetic Particle Alignment Using Powder Extrusion, *Materials*, vol. 18, No. 15, art. 3668, 2025