

# 心柱の制振効果 ～ジェンガを用いた考察～ The damping effect of central pillar in five storied pagodas ～Consideration using jenga～

利國 碧 近藤 薫 佐々木 凜太郎 佐野 天麻  
Aoi Toshikuni Kaoru Kondo Rintaro Sasaki Tenma Sano

## 1. 要旨, 概要

日本では年間平均 1,000～2,000 回もの地震が発生している。その数は世界の中でもトップクラスである。私たちはそのような地震大国・日本において、世界最古の木造建築である法隆寺が 1300 年以上もの間、地震で倒壊していないことに興味を持った。そこで、法隆寺について調べてみたところ、塔の中央に「心柱（しんばしら）」と呼ばれる木製の柱が地震の際に、振り子のように動くことで塔の横揺れを軽減することが分かった。私たちはこの心柱の制振効果に着目して実験を行うことにした。先行研究ではジェンガで五重塔のモデルを制作しており、手で振動装置を動かしていた。私たちはそれを参考に新たにジェンガの塔のモデルを制作し、振動装置を購入することで精度の高い実験を目指した。検証実験においては先行研究で行っていた実験を、新たに制作したジェンガの塔と心柱を用いて行うことで先行研究と同様の結果が得られるか調べた。予備実験においては心柱の長さや直径を変数として実験を行うことで、ジェンガの塔に最適な心柱を見つけた。本実験では、心柱の材質のみを変数として、心柱の振幅をグラフ化し、それぞれの材質における制振効果について考察した。

## 2. 問題提起及び研究目的

参考文献の研究より発見した問題点から研究目的を設定した。なお以下は参考文献の研究内容と問題点である。

### 研究の概要

五重塔の心柱が浮いているにも関わらず地震で一度も崩壊していない理由を調べる。そのために、ジェンガで制作した五重塔のモデルと自作の振動装置で心柱の有無や心柱を取り付ける位置、心柱の長さによってジェンガのモデルが倒れるまでの時間がどのように変化するかについて実験した。ジェンガは積み木のバランスを考える遊びであり、五重塔について身近なもので考察することに最適であると考えた。

### ① 実験装置

#### ・振動装置

ゴムマットの上に置いたアクリルケースにビー玉を入れる。その上にジェンガの塔を置くための円形のアクリルケースを敷く。このアクリルケースには手で揺らすための持ち手を取り付けておく。

#### ・ジェンガのモデル

ジェンガ 40 本を 2 本ずつ交互に重ねてジェンガの塔とした。心柱は厚紙に穴を開けて差し込み、ジェンガの塔の最上段から吊るす。



### ② 実験道具

- ・心柱（木・鉄・プラスチック）
- ・アクリル板
- ・ビー玉
- ・ゴムマット
- ・ストップウォッチ
- ・ジェンガ
- ・厚紙

### ③ 実験の内容

1. 心柱の有無による実験
2. 心柱の質量の違いによる実験  
木 (47 g)・鉄 (496 g)・プラスチック (8 g)
3. 心柱の長さの違いによる実験  
積み重ねる塔の段数を変えることで、ジェンガの塔の最上段から出ている心柱の長さを変えていた。
4. 心柱の吊るす高さの違いによる実験  
ジェンガの塔の段数は 5 段に固定して、心柱の吊るす位置を最上段から 2 段目、3 段目、4 段目とした。
5. 心柱の下端と地面との距離の違いによる実験  
心柱を地面につけるか、つけないか。

#### ④ 実験結果

1. 心柱があると建物が丈夫になる。
2. 心柱は木製の質量程度がよい。
3. 心柱の長さを建物の高さとのバランスから考える必要がある。
4. 心柱は最上段から2段目に吊るすとよい。
5. 心柱は、地面から浮かせるとよい。

#### ⑤ 課題

実験の方法の回数が少なく、手で振動させており実験の度に振動の様子やスピードが変わってしまう。また、実験によってジェンガの塔の高さを変えたり、変えなかったりしていたので変数が制御できていなかった。

##### 《研究目的》

私たちの研究では、先行研究の検証もふまえ、4つの段階に分けて実験を行うことにした。それぞれの実験の段階及び目的は以下の通り。

#### 1. 検証実験 1

先行研究では、実験でジェンガを揺らす際に手動で行っており、記録がでていないものもあったので、適切な実験装置を用いて心柱の有無による耐震効果を調べ、先行研究の結果と同様になるかを調べる。その際、先行研究の結果で最も倒れにくかった、心柱をジェンガ1段分浮かせた状態で実験を行う。

#### 2. 検証実験 2

心柱の下端から地面までの距離の違いによる耐震効果を調べ、先行研究の結果と同様になるかを調べる。

#### 3. 予備実験

先行研究では扱われていなかった心柱の長さ、直径を変えることによって耐震性がどのように変わるか比較する。

#### 4. 本実験

検証実験 1, 2 及び予備実験から得られた結果から実験方法などを改善し、ジェンガのモデルを用いて、五重塔の心柱の材質と制振効果との関係性を明らかにする。

### 3. 実験道具及び研究方法

先行研究をもとに、以下の手順で研究を進める。

#### 1. 検証実験 1

#### 2. 検証実験 2

#### 3. 予備実験

#### 4. 本実験

##### 《それぞれの実験において共通で使用する実験道具》

- ・ジェンガ 40 本
  - ・振動装置 (NaRiKa・じしん君 mini K50-1207)  
振れ幅とスピードを設定することが可能。今回は設定値を固定。設定値は後に説明する。
  - ・距離センサー (PASCO・PS-2103A)  
センサー前に置かれた物体の初めの位置からの距離を計測することができる。今回はジェンガの上段のあたりにセンサーをあてて、振動の様子を計測した。
  - ・加速度センサー (PASCO・PS-2136)  
取り付けたものの加速度を計測することが可能。今回は、振動装置が一定の加速度で振動しているかを確かめるために用いた。
  - ・PC  
上記の距離センサーと加速度センサーの計測値を記録、処理するために用いた。PASCO というソフトウェアを利用する。このソフトは、つけたセンサーによって計測した値を表とグラフで表すことができる。
  - ・心柱  
長さや材質は実験に応じて変更する。
  - ・ストップウォッチ
- ※これらは以降でまとめて表すときに「先述した実験道具」と表記する。

なお、各実験では上記の道具にそれぞれの実験の目的に応じて実験道具を追加する。

## 《振動装置の説明》



**振動装置**

左記の写真のように振幅を 5, 速度を 6 のメモリに合わせて設定し、今後の実験もこのメモリで実験を行うものとする。

上記の設定値は阪神淡路大震災の記録をもとに設定した。

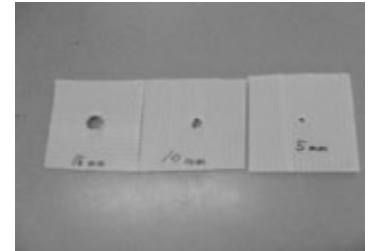
### 3.1 検証実験 1

#### 《実験道具》

- ・先述した実験道具  
心柱は木製で長さ 35 cm, 直径 10mm のものを使用
- ・プラスチック板  
直径 15, 10, 5 mm の穴をあけておく。

※直径 15, 5mm の穴をあけたものは後述の予備実験で使用し、検証実験 1 及び 2 では穴の直径が 10mm のもののみを使用する。

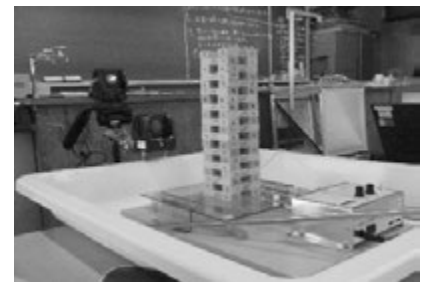
上記の実験道具は検証実験 1 のみならず検証実験 2 でも使用する。



**穴をあけたプラスチック板**

#### 《実験方法》

- 1.長さ 35 cm, 直径 10 mm の心柱を穴のあけたプラスチック板に差し込む。
- 2.振動装置に 2 本ずつ交互に組み立てたジェンガを乗せる。
- 3.そのジェンガの上から 1.で作った心柱を取り付ける。
- 4.振動装置で振動させ、ジェンガが倒れるまでの時間をストップウォッチで計測する。



**振動装置にのせたジェンガ**

### 3.2 検証実験 2

#### 《実験道具》

検証実験 1 同様。

#### 《実験方法》

心柱を取り付ける高さを下の A から C の 3 つのパターンに分け、それぞれの高さにおける耐震性を比較する。使用する道具は検証実験 1 と同じものを使用する。

- A. 心柱の下端が地面につくように取り付ける。
- B. 心柱を塔の最下層からジェンガ 1 段分の高さまで浮かせて取り付ける。
- C. 心柱を塔の最下層から塔の高さの半分の高さまで浮かせて取り付ける。

A~C の 3 つのパターンでそれぞれ実験を行い、倒れるまでの時間を計測する。心柱の取り付け方及び振動装置の設定は検証実験 1 と同様に行う。

### 3.3 予備実験

#### 《実験道具》

- ・先述した実験道具  
心柱は木製で直径は 5mm, 10mm, 15mm の 3 種類とし、各直径で長さ 30cm, 35cm, 40cm のものをそれぞれ準備する。
- ・プラスチック板  
検証実験で先述した 15, 10, 5 mm の穴をあけたもの

#### 《実験方法》

30cm, 35cm, 40cm の木製の心柱それぞれに直径 5mm, 10mm, 15mm のものを準備する。心柱の取り付け方及び振動装置の設定は検証実験 1, 2 と変えないものとする。

### 3.4 本実験

Keyword ・ ・ ・ 制震効果

建物の地震による揺れを建物内の構造によって軽減すること。  
今回の実験においては、心柱がジェンガの塔の揺れに対して別の揺れを起こすことにより塔の揺れを軽減するという効果である。

《実験道具》

- ・ 先述した実験道具
- ・ ジェンガ 40 本

質量の合計が等しくなるように 8 個ずつに分け、2 本ずつ交互に並べて、ボンドで固定し右図のような 4 段のブロックを合計 5 個作る。

- ・ 心柱

木、プラスチック、ステンレスの 3 種類の材質のものを準備し、それぞれの直径と長さは直径 10mm、長さ 30cm で統一する。

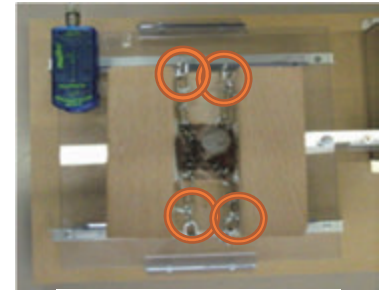
今回、変数に材質を選んだ理由は、心柱の性質（質量の違いなど）による振動の変化を見るためである。また、木、プラスチック、ステンレスを選んだ理由は、入手しやすい事と加工しやすい事が理由に挙げられる。

- ・ 金属チェーン

本来の五重塔は、塔の最上段から金属の鎖によって吊り上げられている。その構造を再現するために、右図のように最上段に釘を打ち込みそこに金属チェーンを引っ掛けて心柱を吊るす。

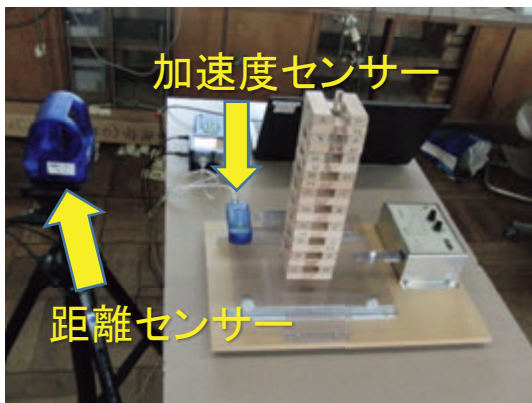


作成した塔一段分のブロック



心柱の取り付け部分

《実験の様子》



記録装置を設置した状態



心柱の下端部分

《実験方法》

まず、実験道具で説明した様にボンドで固めたジェンガのブロックを振動装置の上に 5 段重ねて、心柱を金属チェーンでジェンガに取り付ける。この時、心柱が塔のどこにも当たっていないことを確認する。次に、距離センサーを塔の上段に当たる様に設置する。また、加速度センサーを振動装置に設置する。これは、振動装置が同じ振動を繰り返しているかどうかを確かめるために設置した。2 つのセンサーを PC に接続し、振動装置で、ジェンガの塔を 15 秒間揺らす。この 15 秒というのは阪神淡路大震災の主要動の継続時間を参考にした。

木、プラスチック、ステンレスの心柱でそれぞれ 10 回ずつ計 30 回行う。最後に PC で距離センサーのデータを集める。距離のグラフから最大値と最小値を読み取りエクセルに手動で記録していく。その後、振幅を割り出し振幅の変化をグラフにし比較した。

#### 4. 実験結果

##### 4.1 検証実験 1

回数	心柱（無）〔s〕	心柱（有）〔s〕
1	3.24	9.82
2	4.45	8.30
3	4.46	6.46
average	4.05	8.19

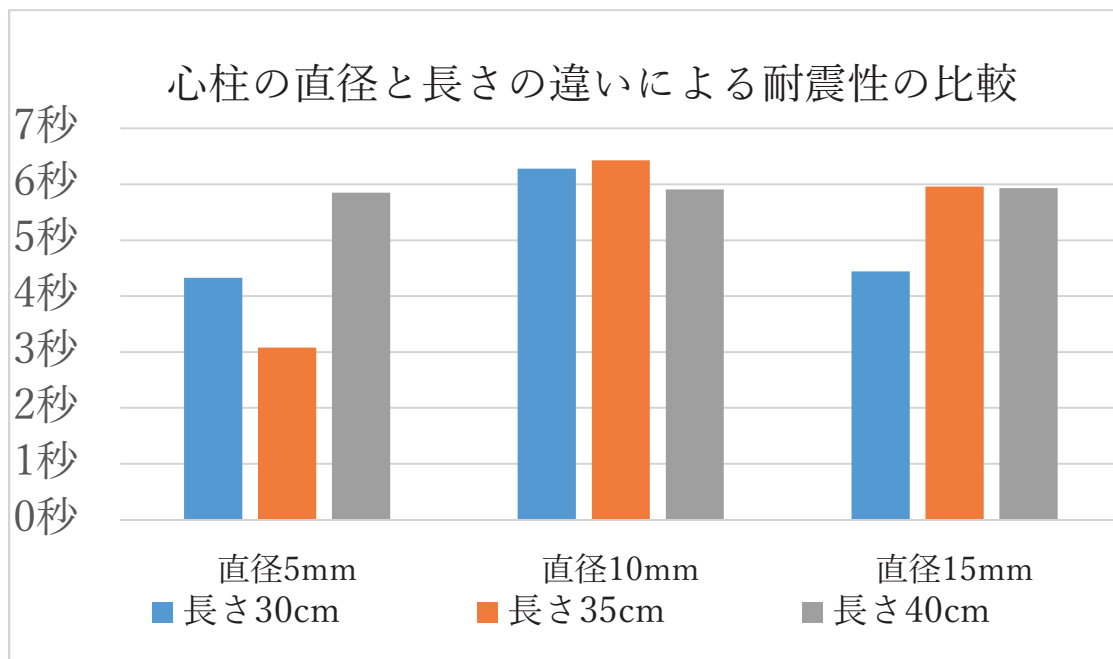
表① 心柱の有無による塔が崩壊するまでの時間の違い

##### 4.2 検証実験 2

回数	A〔s〕	B〔s〕	C〔s〕
1	4.74	9.82	4.48
2	5.79	8.30	4.13
3	4.27	6.46	5.28
average	4.93	8.19	4.63

表② A, B, C 各条件下での塔が崩壊するまでの時間の違い

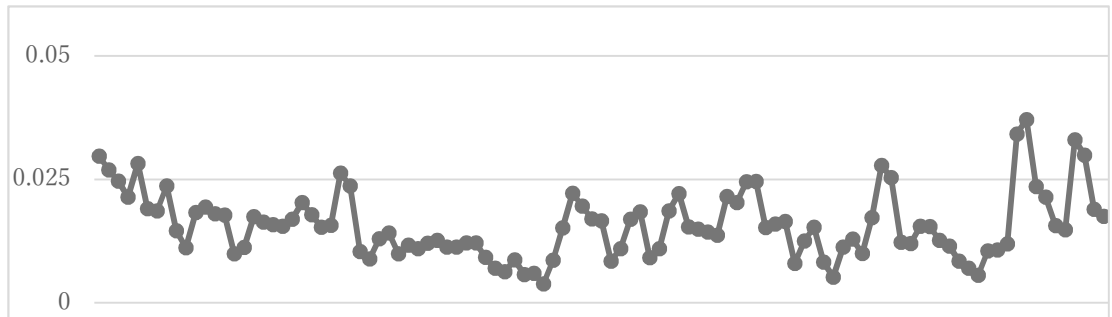
##### 4.3 予備実験



グラフ① 心柱の直径と長さの違いによる耐震性の比較



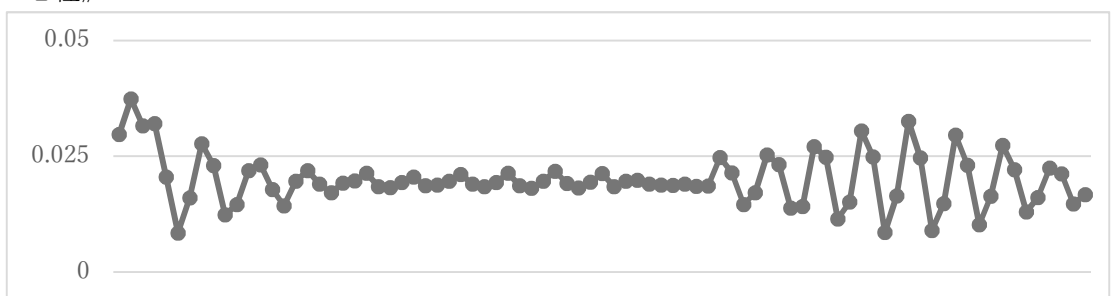
#### 4.4 本実験 《木の心柱》



グラフ② 木の心柱を使用した際の振幅の推移

木の心柱を使用した時は、振幅が安定せずに大きくなったり、小さくなったりした。

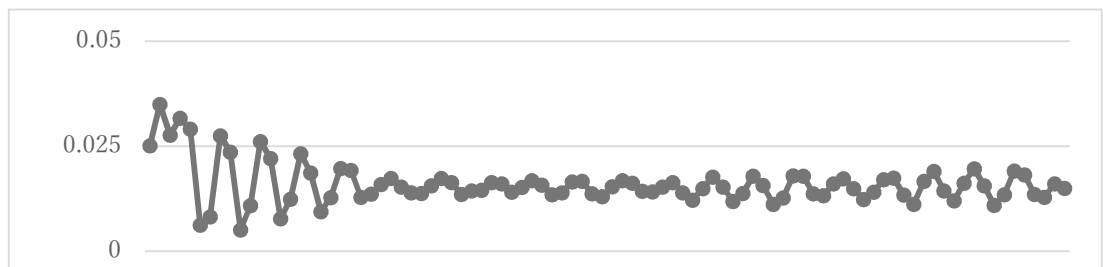
#### 《プラスチックの心柱》



グラフ③ プラスチックの心柱を使用した際の振幅の推移

プラスチックの心柱を使用した時は、最初は大きく揺れるが、次第に振幅は安定する傾向にあった。しかし、振動終了直前に再び大きく変化する傾向があった。

#### 《ステンレスの心柱》



グラフ④ ステンレスの心柱を使用した際の振幅の推移

ステンレスの心柱を使用した時は、プラスチックの時と同様に、最初大きく揺れ、その後振幅が安定する傾向にあった。しかし、プラスチックの時とは違い振動終了直前に振幅が大きく変化することは無かった。

### 5. 考察

#### 5.1 検証実験 1

表①より、心柱を取り付けたときのほうが塔が崩壊するまでの時間が長いことが分かる。ジェンガが揺れた際に心柱がジェンガの揺れとは反対の向きに揺れることで、揺れを打ち消しあっているか、心柱自身がジェンガの揺れのエネルギーを吸収しているのではと考えた。

#### 5.2 検証実験 2

表②より、最も耐震性を持つ取り付け方は B の「心柱を塔の最下層からジェンガ 1 段分の高さまで浮かせて取り付ける」であり、A や C の場合との差は 2 倍近くあることが分かる。

A は心柱を地面に固定していたため、心柱の揺れが極端に小さくなっていったことが考えられる。また、C は心柱を取り付けた高さが B の場合と比べてより高くなっていったことで塔最上部から塔の外部に突き出ている長さがほかに比べて長かったために、塔の内部にある部分の長さが短くなり、塔内部における心柱の揺れ

の影響が小さくなったと考えられる。以上よりBのように心柱が地面から浮いており、なおかつ塔の内部にある心柱の長さが十分であることが必要であると考えられる。

### 5.3 予備実験

グラフ①を見ると、直径 10mm のものは他の直径の大きさのものが長さによってバラつきがみられるのに対してどの心柱の長さにおいても長時間振動に耐えていたことがわかる。本実験では心柱の取り付け方の改善に伴い、長さは 30cm のものが最適であったため、直径 10mm でこの長さのものを使用している。

心柱は検証実験 1 でも述べたように心柱自身が揺れることで地震の揺れのエネルギーを吸収していると考えられる。直径の観点から考察すると直径が小さいと塔内部における心柱が占めるスペースが小さくなることで心柱の揺れることのできる範囲が大きくなり、逆に心柱の直径が大きければ塔内部における心柱が占めるスペースが大きくなり心柱の可動範囲は小さくなる。今回は 3 つの直径の大きさのなかで中間にあたる 10mm を使用した場合が最も最適であった。これは、塔内部での心柱が揺れることのできるスペースが小さすぎず大きすぎない最適なものであったためだと考えられる。

長さの観点からは、比較的長さの長いものが比較的長時間耐久した結果となっているが、直径が十分であり、検証実験 2 の考察で述べたように塔内部にある心柱の長さが十分であれば、心柱としての機能はしっかりと持つのではないかと考えられる。

### 5.4 本実験

木の心柱は使用した心柱の材質の中で最も質量が小さかったことから心柱がジェンガの塔に与える影響が小さく制震効果が最も小さいと考えた。

木のグラフに関しては、振動は不規則に変化している様に見えるが、心柱とジェンガの塔それぞれの固有振動がうなりを起こすことにより今回の様な、振幅の変化をしたのではないかと考えた。

ステンレスの心柱が 3 つの内最も重いので、振幅が小さくなって安定し始めるまでの時間が早いと考えた。

そして、プラスチックやステンレスも同様にうなりによる効果を考えると、プラスチックの心柱に顕著にみられた再び振幅が激しく変化する現象もうなりが原因であることが考えられる。15 秒以上揺らすことにより振幅の変化がより明確に浮かび上がってくるのではないかと考えた。しかし、ジェンガの塔と心柱についてそれぞれの固有振動数を求めることが出来ていないのでうなりであるかどうかの検証はできていない。

また、今回、最初振幅が大きく変化してから安定し始めたが、本来の地震では小さい縦揺れ振動から始まり次第に振幅が大きい横揺れになることが分かっている。したがって、この現象は本来起こらない可能性がある。

## 6. 結論

結果と考察からステンレスの心柱が最も制震効果があると考えられる。

また、始めは材質に焦点を当てていたが、実験結果から心柱の質量が結果に大きく影響を与えたと思われる。

《今後の課題と展望》

- ・本来の地震の振動に対する相対的なジェンガの塔の揺れの設定値の確立。
- ・15 秒以上の振動による振幅の変化についての実験。
- ・ジェンガの塔と心柱のそれぞれの固有振動数を求めること。
- ・心柱の質量の変数を増やしての実験を行い、心柱の質量と振幅の関係を考察する事。

また、今回は阪神淡路大震災を基に、振動時間や振幅、スピードを設定したが、ジェンガのスケールに対する相対的な値で実験を行ったわけではない、加えて、その他のスピードや振幅についてもコロナによる休校の関係上、実験できていない。これらのことを踏まえてこれからの実験について考えていきたい。

## 7. 参考文献

- ・「五重塔はなぜたおれないのか？」～ジェンガで探れ！心柱の不思議～  
筑波大学附属小学校 1 部 4 年 雨宮龍之介（2016 年度 筑波大学「科学の芽」賞 小学生部門受賞作品）  
[https://www.tsukuba.ac.jp/community/students-kagakunome/shyo\\_list/2016/schc4.pdf](https://www.tsukuba.ac.jp/community/students-kagakunome/shyo_list/2016/schc4.pdf)
- ・震度と加速度 気象庁  
<https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/kaisetsu/comp.htm>

## 8. 謝辞

この研究にあたり、私たちの班の担当教諭である岡田友良先生をはじめとした、一高の諸先生方にこの場を借りて深く御礼申し上げます。