

# 直撃雷によるビル内の電流・磁界分布

木島均・服部知彦

東海学院大学健康福祉学部総合福祉学科

## 要 約

本論文は、ビルに雷が直撃した場合のビル内の電流分布と磁界分布の解析結果を述べている。ビルの高層化などにより、ビルへの直撃雷が増加し、ビル内の電子機器の故障が予想される。耐雷対策を実施するうえで、ビル内の鉄筋にどのように雷サージが分流するかを予測することが可能ならば、電子機器を守る上でより適切な雷防護素子 SPD (Surge Protective Device) を選択することが可能である。又、これらの電流によって生じる磁界の強度分布を解明できれば、電子機器のより適切な設置場所を検討することが可能である。

本論文では、LTspice と JMAG を用いて、ビル内の雷による電流分布と磁界分布を解析した結果を示した。

キーワード： 雷防護素子, 電流分布, 磁界分布, LTspice, JMAG

(2017. 9. 6 受稿 査読審査を経て 2017. 10. 23 受理)

## 1. まえがき

高密度に集積化された電子機器は、雷過電圧に対して脆弱になっている。特に、ビルの高層化やヒートアイランド現象により、雷発生確率が上がり、ビル内の電子機器の故障頻度の上昇が予想される。耐雷対策を実施するうえで、ビル内の鉄筋にどのように雷サージが分流かが予測できれば、電子機器を守る上でより適切な雷防護素子 SPD (Surge Protective Device) を選択することが可能である。又、これらの電流によって誘起されるビル内の磁界分布が解明できれば、電子機器のより適切な設置場所を検討することが可能である。

これまでは、縮尺モデルを用いた実験やシミュレーションによる解析が行われてきたが、ビル内の電流分布と磁界分布を同時に解析し、両者の比較検討は行われていない<sup>(1)-(4)</sup>。よって本論文では、LTspice と JMAG を用いて、ビル内の電流分布と磁界分布を解析し、両者の比較検討を行った。

## 2. 解析方法

### 2. 1 LTspice による雷電流分布を解析

電子回路シミュレーションソフト LTspiceVII<sup>(5)</sup>を用いて、雷電流分布を解析した。LTspice は、WEB から無償でダウンロードして使用可能な電子回路シミュレーションソフトであるが、授業でも用いており信頼のお

けるソフトなので使用した。しかしながら、このソフトでは、雷電流を解析することは可能であるが、磁界強度を解析することはできないとの欠点がある。

### 2. 2 JMAG による雷電流分布及び磁界分布解析

電磁界解析ソフトとして、無償で使用できるシミュレーションソフトはない。このため、アカデミック価格で比較的手ごろな JMAG<sup>(6)</sup> を電磁界解析ソフトとして使用することとした。JMAG は有限要素法を用いた有償の電磁界解析ソフトであり、専用サーバを通じて使用する。このソフトでは、雷電流と、磁界強度を以下の手法で同時に解析することが可能である。

(1)式のマックスウェルの方程式は、磁束密度  $\mathbf{B}$  のベクトル発散はゼロであることを示している。

$$\text{Div } \mathbf{B} = 0 \quad (1)$$

(1)式からベクトルポテンシャル  $\mathbf{A}$  を、定義できる。

$$\mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A} \quad (2)$$

JMAG による有限要素法では、まずこのベクトルポテンシャル  $\mathbf{A}$  を求め、その後、(1)式及び(3)～(5) 式のマックスウェルの方程式から、電束密度  $\mathbf{D}$ 、電荷  $\rho$ 、電界強度  $\mathbf{E}$ 、磁界強度  $\mathbf{H}$ 、電流密度  $\mathbf{J}$ 、電流密度  $\mathbf{J}$  を面積分した電流  $\mathbf{I}$  を求めている。

$$\text{Div } \mathbf{D} = \rho \quad (3)$$

$$\text{Rot } \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t \quad (4)$$

$$\text{Rot } \mathbf{H} = \mathbf{J} + \partial \mathbf{D} / \partial t \quad (5)$$

### 2. 3 解析に使用するビルモデル

解析に使用するビルモデルとしては、左右対称なモ

デル1と、左右非対称なモデル2を使用した。

モデル1は、単純な2階建ての直方体のモデルであり建物の幅、奥行きを7.2m、高さを9.5mとし、各々の柱は22mmφの鉄筋9本を配置した。

モデル2は、5階建てで、屋上にキュービクル(変電室)を配置した、左右非対称な複雑なモデルであり、建物の幅、奥行きとも20m、各階の高さは5mとし、柱は10mごとに22mmφの鉄筋8本を配置した。なおモデル2については、従来の避雷針による雷防護に代わり、金属メッシュを追加するメッシュ法<sup>7)</sup>についても検討した。

雷は一番電界強度の大きい箇所に落雷するため、直撃雷の注入点は屋上の中央とした。またそれぞれの鉄筋の電気抵抗率を  $1 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$ 、インダクタンスを1.5uH/mとして解析した。

### 3. ビルモデル1についてのシミュレーション結果及び考察

モデル1は、単純な2階建ての直方体のモデルであり、100kAの雷電流を流した場合の雷電流分布解析をLTspiceと、JMAGを用いて行った。さらに、JMAGを用いて磁界分布解析を行った。

#### (1) LTspiceによる電流分布解析結果

モデル1のビルに対して、LTspiceを用いて100kAの雷電流を流入させた時のシミュレーション結果を図1に示した。

図1において、電流は流入点直下にあたるビルの中央の柱に23.4kAと最も大きく流れ、その次に外周部の中央の柱に10.9kA、外周部の鉄筋には8.5kAの電流が流れた。これは、インピーダンスの最も低い最短の経路で電流が流れるためであると考えられる。

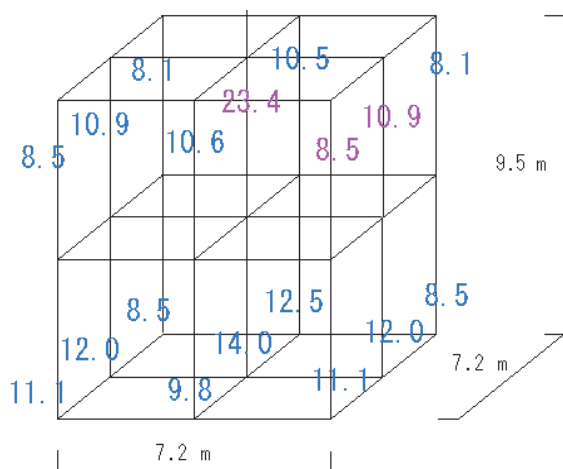


図1 LTspiceを用いた電流分布解析結果(モデル1)

また、鉄筋の各部に流れる電流分布が左右対称であり、LTspiceによる解析結果の有効性が推測される。

#### (2) JMAGによる電流分布解析結果

JMAGを使用し、100kAの雷電流を流入させた時の雷電流の分布を解析した。この結果を、図2に示した。図2に示すJMAGによる電流解析結果では、4角の鉄筋に約13kAの電流が流れ、中心の鉄筋と比較して約2倍の電流が流れた。JMAGによる解析においては、モデル1が左右対称なモデルにも係わらず、電流分布の解析結果が、左右対称でないとの結果が出た。

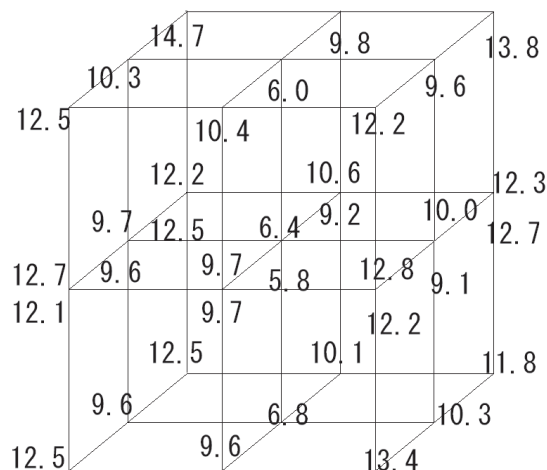


図2 JMAGを用いた電流分布解析結果(モデル1)

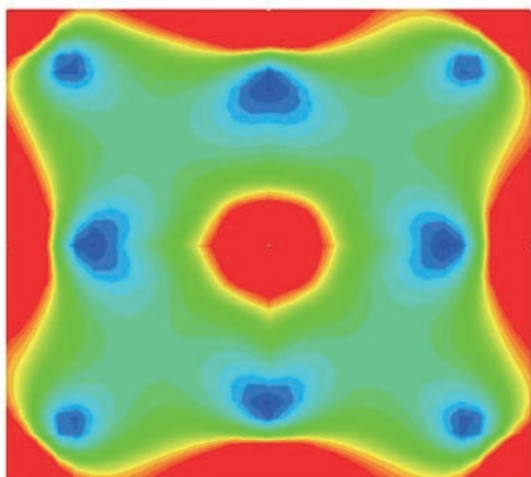
図2に示すJMAGによる電流解析結果では、4角の鉄筋に約13kAの電流が流れ、中心の鉄筋と比較して約2倍の電流が流れた。JMAGによる解析においては、モデル1が左右対称なモデルにも係わらず、電流分布の解析結果が、左右対称でないとの結果が出た。

LTspiceを用いた電流分布解析結果は、左右対称であり、モデル1が左右対称であることと整合する。JMAGは、電磁界を解析することも可能であるが、3次元モデルの作成に長時間を要する上に、電流解析に若干の問題があることが明らかになった。

このため、電流分布解析においては、LTspiceの方が、JMAGよりも優れていると考えられる。

#### (3) JMAGによる磁界分布解析結果

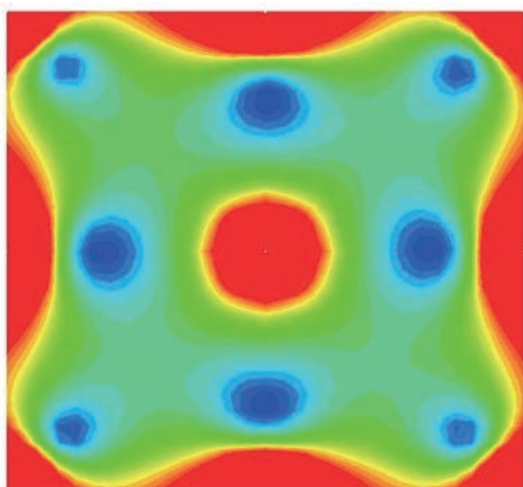
JMAGを使用した1階及び2階における磁界分布解析結果をそれぞれ図3及び図4に示した。図3及び図4において、色の赤い部分の磁界強度が最も強く、色が橙、黄、緑、青、藍、紫になるにつれて磁界強度が弱くなったことを示している。



(MAX  $2.4 \times 10^{-2} \text{T}$ , MIN  $8.9 \times 10^{-7} \text{T}$ )

図3 JMAGによる磁界分布解析結果(2階断面図)

各階における磁界分布を見ると1階と2階の磁界分布はほぼ同じであった。これは、モデル1が左右対称であるためと考えられる。なお、1階及び2階における磁界強度の最大値は  $2.4 \times 10^{-2} \text{T}$ 、磁界強度の最小値は  $8.9 \times 10^{-7} \text{T}$  であり、全く同じ解析結果であった。



(MAX  $2.4 \times 10^{-2} \text{T}$ , MIN  $8.9 \times 10^{-7} \text{T}$ )

図4 JMAGによる磁界分布解析結果(1階断面図)

また、図5に1階における磁界ベクトル分布を示した。図5では、色の赤い部分の磁界強度が最も強く、色が橙、黄、緑、青、藍、紫になるにつれて磁界強度が弱まっていることを示している。磁界ベクトル分布も、図4に示した磁界分布と対応して左右対称であり、部屋の中心と端の磁界強度が大きいことが分かった。

これらの磁界分布解析結果から、モデル1の場合には、部屋の中心と隅が高い磁界強度となっている。つま

り、このビルモデルでは、電子機器は部屋の中心と端を避けた場所に置けば良いことが明らかになった。

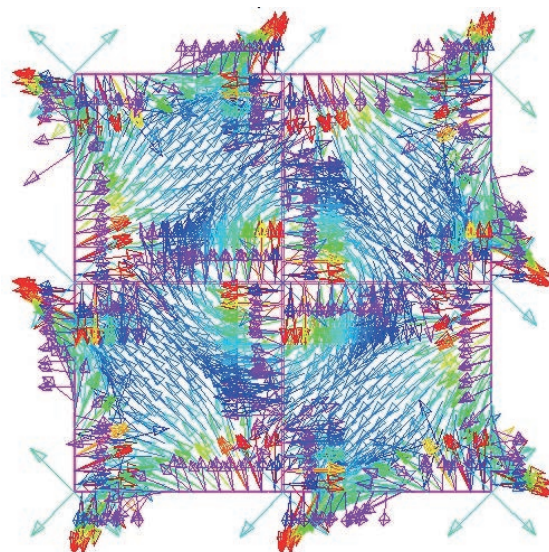


図5 1階における磁界ベクトル(モデル1)

#### 4. ビルモデル2についてのシミュレーション結果及び考察

モデル2は、5階建てで、屋上にキュービクルを配置した、左右対称でない複雑なモデルである。

##### (1) LTspiceによる電流分布解析結果

モデル2のビルに対して、LTspiceを用いて100kA ( $1/50 \mu \text{sec}$ :立ち上がり時間  $1 \mu \text{sec}$ 、半幅  $50 \mu \text{sec}$ )、の雷電流を流入させた場合のシミュレーション結果を図6に示す。図6の波形のピーク値(波高値)をプロットしたものを、図7に示した。

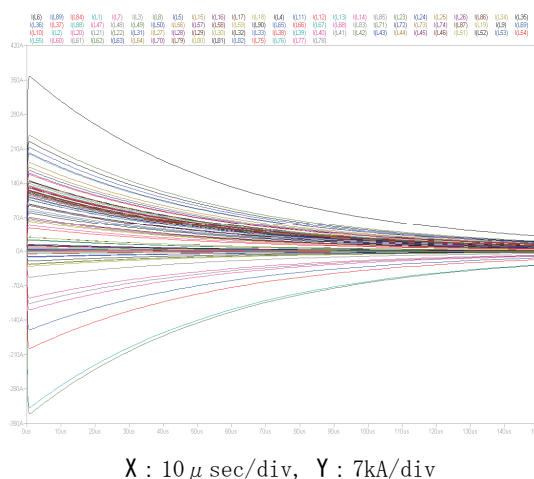


図6 LTspiceを用いた電流分布解析結果(モデル2)

この解析において、雷電流の立ち上がり時間を、 $0.1 \mu \text{sec}$  から、1, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40  $\mu \text{sec}$  及び 50  $\mu \text{sec}$  まで変化させて鉄筋に流れるピーク電流を解析

## 直撃雷によるビル内の電流・磁界分布

したが、ピーク値の解析結果に変化は見られなかった。

なお、図6の電流分布解析結果において、マイナス方向に電流が流れている理由は、3次元のビルを2次元平面グラフで解析しているために、一方向の電流の向きを正にすると、見掛け上、反対方向に流れる電流の向きが負に見えるためである。したがって、シミュレーション上では負の電流が流れている様に見えるが、実際はすべて正の電流である。

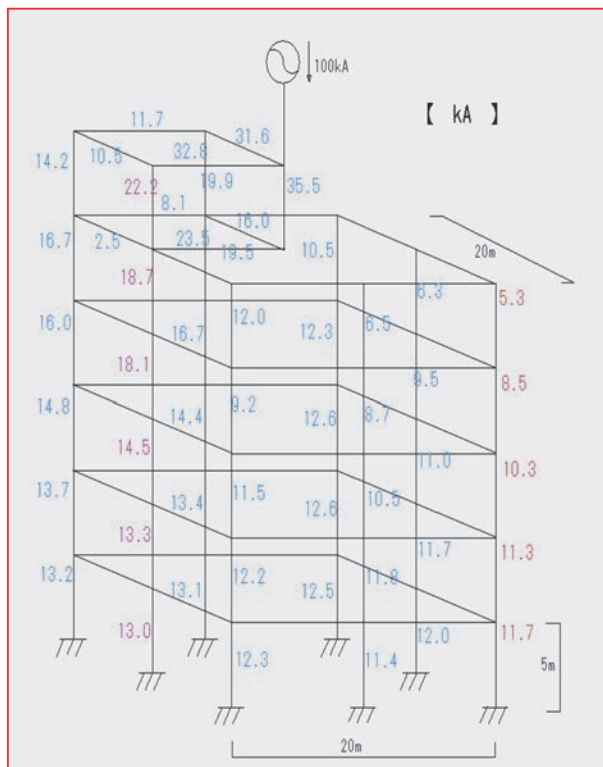


図7 LTspiceを用いた電流分布解析結果  
(ピーク値：モデル2)

流入点であるキュービクルの鉄筋に多くの電流が流れた。キュービクルの左の手前の22.2kA流れている鉄筋の引下げ部を見ていくと、5階に18.7kA、4階は18.1kA、3階は14.5kA、2階は13.3kA、1階は13.0kAと階が下がる毎に減少した。また、5階の手前右端の5.3kA流れている鉄筋の引き下げ部においては、4階が8.5kA、3階が10.3kA、2階11.3kA、1階11.7kAと階が下がるにつれて増加した。これはさきほどのキュービクルからの電流の減少分の一部が流入したためと考えられる。

### (2) JMAGによる電流分布解析結果

JMAGを用いた電流分布解析結果を図8に示した。図7のLTspiceを用いた雷電流の解析結果と比較して全体的にほぼ同じ電流値であり、解析結果の妥当性が確認できた。

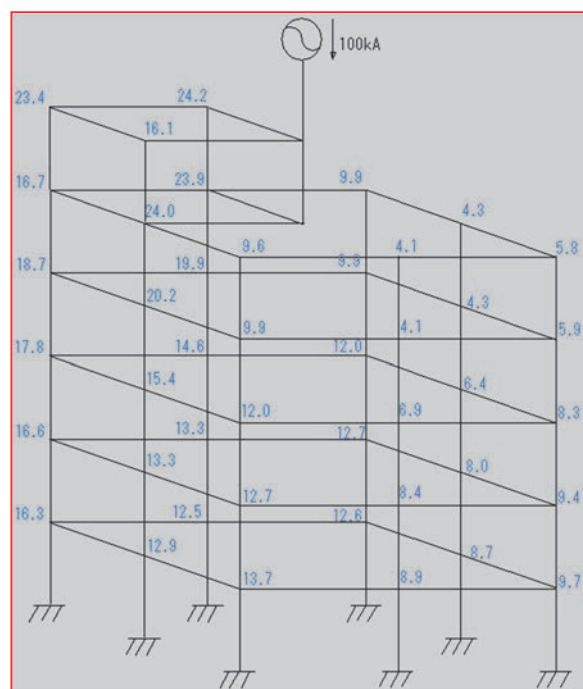
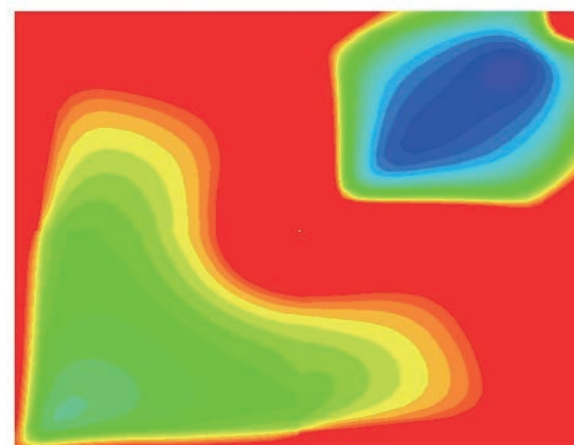


図8 JMAGを用いた電流分布解析結果(モデル2)

### (3) JMAGによる磁界分布解析結果

JMAGを用いて解析した磁界分布解析結果を5階から1階にかけて図9から図13に示した。図9から図13において、色の赤い部分の磁界強度が最も強く、色が橙、黄、緑、青、藍、紫になるにつれて磁界強度が弱くなっている。



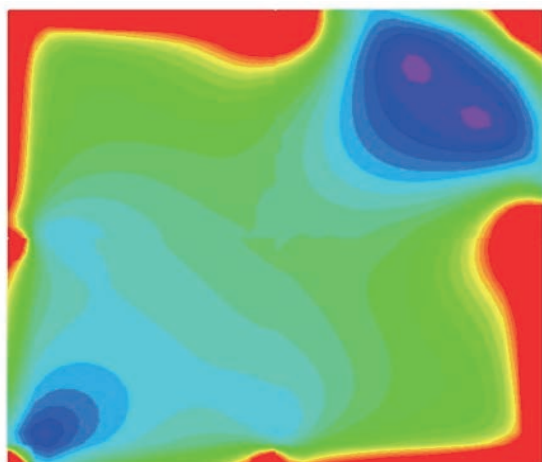
(MAX  $3.7 \times 10^{-2}$  T, MIN  $1.7 \times 10^{-6}$  T)

図9 5階における磁界分布(断面図)

図9に示す5階における磁界分布を見ると、屋上にキュービクルを有している部分が一番大きい磁界強度であった。なお、最大磁界強度は $3.7 \times 10^{-2}$  T、最小磁界強度は $1.7 \times 10^{-6}$  Tであることが明らかになった。

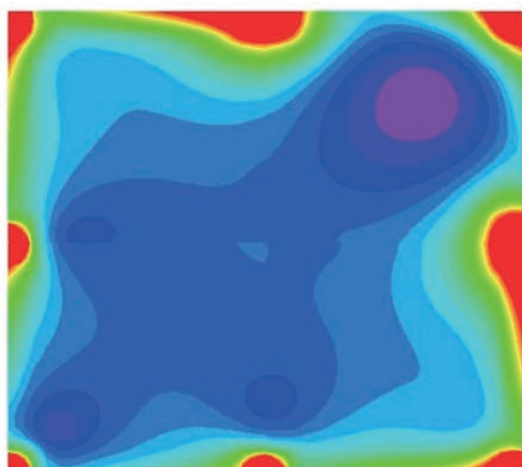
図10に示す4階における磁界分布の最大磁界強度

は  $2.4 \times 10^{-2}$  T であり、図 1 1 に示す 3 階における磁界分布の最大磁界強度は  $1.7 \times 10^{-2}$  T であった。



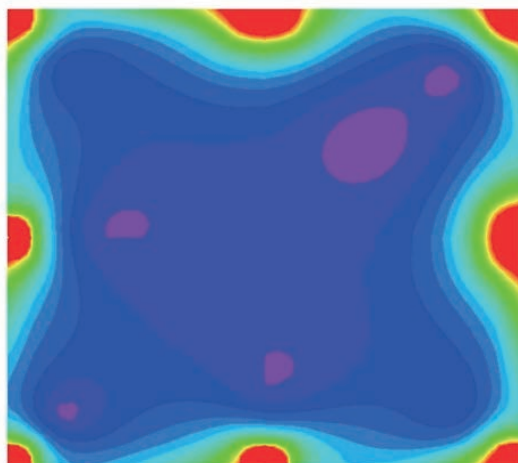
(MAX  $2.4 \times 10^{-2}$  T, MIN  $1.7 \times 10^{-6}$  T)

図 1 0 4 階における磁界分布 (断面図)



(MAX  $1.7 \times 10^{-2}$  T, MIN  $1.7 \times 10^{-6}$  T)

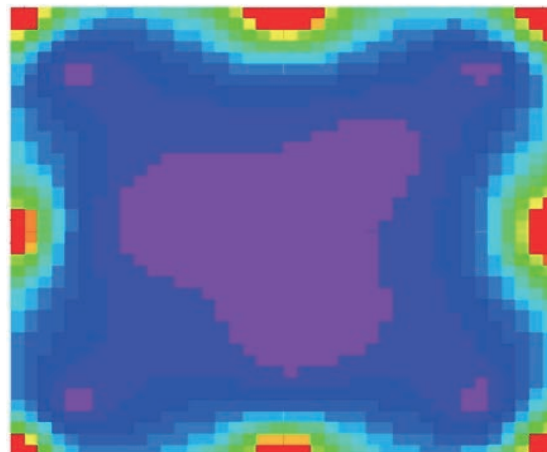
図 1 1 3 階における磁界分布 (断面図)



(MAX  $1.6 \times 10^{-2}$  T, MIN  $1.7 \times 10^{-6}$  T)

図 1 2 2 階における磁界分布 (断面図)

4 階における磁界強度及び 3 階における磁界強度を 5 階部における磁界強度と比較すると、4 階、3 階の順にそれぞれ約 3 0% ずつ弱くなっていることが明らかになった。これは、階数が下がるにつれて、電流が鉄筋に均一に流れ、磁界が相殺したためであると考えられる。



(MAX  $1.5 \times 10^{-2}$  T, MIN  $1.7 \times 10^{-6}$  T)

図 1 3 1 階における磁界分布 (断面図)

図 1 2 に示す 2 階における磁界分布の最大磁界強度は  $1.6 \times 10^{-2}$  T であり、図 1 3 に示す 1 階における磁界分布の最大磁界強度は  $1.5 \times 10^{-2}$  T であった。図 1 2 に示す 2 階部と、図 1 3 に示す 1 階部を比較すると、1 階部の中心において磁界が弱くなっている範囲が大きくなっていることが明らかになった。つまり、モデル 2 のビルにおいては、磁界の影響の少ない各階の中央部に電子機器を設置すると良いことが判明した。

また、5 階と 1 階の磁界ベクトル分布をそれぞれ図 1 4 及び図 1 5 に示す。図 1 4 及び図 1 5 では、色の赤い部分の磁界強度が最も強く、色が橙、黄、緑、青、藍、紫になるにつれて磁界強度が弱くなっていることを示している。

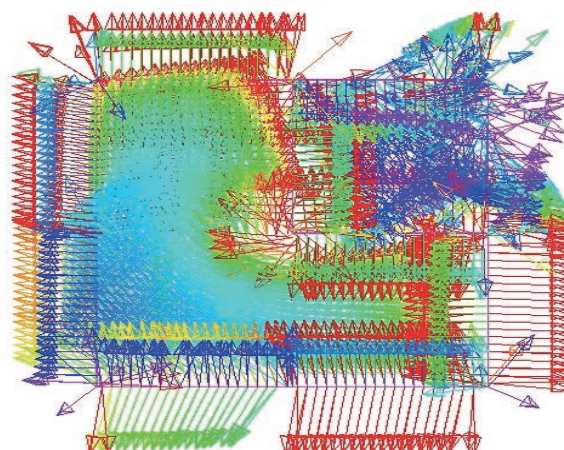


図 1 4 5 階における磁界ベクトル

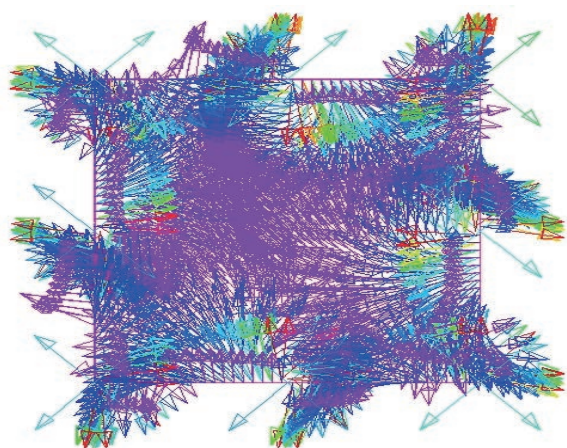


図15 1階における磁界ベクトル

磁界ベクトル分布から明らかのように、5階においては左右非対称であった磁界ベクトルが、1階においてはほぼ左右対称であった。

(4) モデル2にメッシュ法を追加したモデルについての考察

ビルを雷から保護するための方法の一つにメッシュ法がある。この方法は、従来の避雷針による雷防護に代わり、金属メッシュを追加する雷防護の新技术である。このメッシュ法の効果を確認するため、ビルモデル2の屋上において鉄筋がない部分(図16の赤線部分)に、22mmφの金属を追加し、解析を行った。

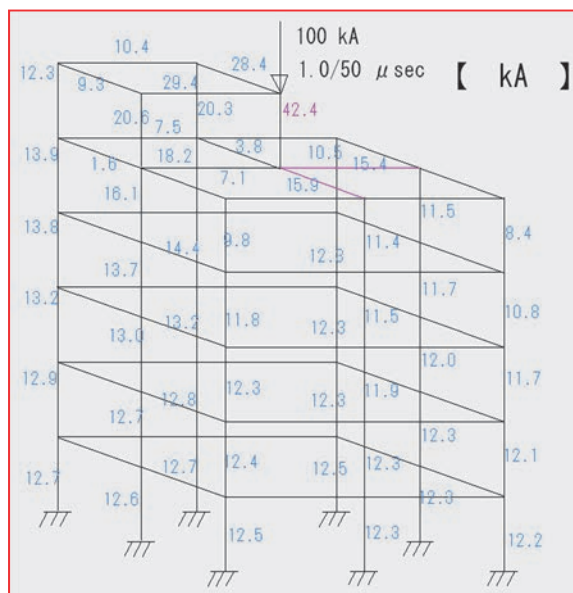


図16 モデル2にメッシュ法を追加したモデル

図7と比較すると、図7においては注入点直下に流れる電流値は35.5kAであったのに対して、メッシュを追加したモデルでは、同じ鉄筋において42.4kAと上がっている。これは、注入点直下のインピーダンスが低

下したためであると考えられる。また一階での電流値を比較すると、図7のメッシュ法を適用していない場合は、11.4~13.2kAと電流値に差があるのに対して、メッシュ法を適用した図16の場合には、電流値が12.2~12.7kAとほぼ均一に流れていることが明らかになった。このため、屋上において鉄筋がない部分に、メッシュ幅10mの金属を追加する方法は、電流値を均一にする上で有効な対策であることが明らかになった。

## 5. まとめ

雷サージを異なるビルモデルに注入し、LTspiceとJAMGを用いて電流分布と磁界分布を解析した。

(1) LTspiceを用いた電流分布解析結果は、左右対称であり、モデル1が左右対称であることと整合した。JAMGは、電磁界を解析することも可能であるが、3次元モデルの作成に長時間を要する上に、電流解析に若干の問題があることが明らかになった。このため、電流分布解析においては、LTspiceの方が、JAMGよりも優れていると考えられる。

(2) JAMGによる磁界解析の結果、モデル1の場合には、電子機器は部屋の中心と端を避けた場所に設置すれば良いことが明らかになった。また、モデル2のビルにおいては、磁界の影響の少ない各階の中央部に電子機器を設置すると良いことが判明した。

(3) 雷防護の新技术であるメッシュ法は、金属メッシュを追加する雷防護の新技术であるが、ビル全体に電流を均一に流す上で有効な対策であることが明らかになった。

## 引用文献

- (1) M. Sadegh Rahimian, Ali M. Hussein, Calculation of tall-structure lightning current parameters using particle swarm optimization technique, ICLP, pp1-5, 2012
- (2) Amedeo Andreotti, Luigi Verolino, A New Channel Base Current Function for Lightning Studies, IEEE Transactions on EMC, Vol. 57, Issue 6, pp1539-1546, 2015
- (3) Kok Lian Chia, Ah Choy Liew, Modeling of lightning return stroke current with inclusion of distributed channel resistance and inductance, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.19, Issue 3, pp 1342-1347, 2004
- (4) Saketa Shivalli, Lightning effects and protection of structures, IOSR JEEE, Vol.11, Issue 3, pp44-50, 2016
- (5) 電子回路シミュレーションソフト LTspiceVII, 2017
- (6) 電磁界解析ソフト JAMG, 2017
- (7) 建築物の雷保護, JISA 4201, 2003

The current and magnetic field distribution generated  
by direct lightning strikes on buildings

**Hitoshi Kijima and Tomohiko Hattori**

Abstract

As a building becomes higher, a direct lightning strike to the building has been increased. When a direct lightning strikes the building, lightning surge current flow through the iron steel installed in the building. It is important to estimate the lightning surge current distribution inside the building in order to select appropriate SPDs (Surge Protective Devices) which have current capability depending on the size and the material. And also, it is necessary to analyze the magnetic field caused by the lightning surge current in order to find out the appropriate location of equipment taking into account of its immunity level against the magnetic field.

In this paper, the analyzed results on direct striking lightning surge current and magnetic field distributions inside the buildings using LTspice and JMAG were shown.

**Keywords/** Surge Protective Device, lightning current distribution, magnetic field, LTspice, JMAG

以上