

# COMSOL Multiphysics を用いた ギターピックアップの動的電磁界解析

## Dynamic Electromagnetic Analysis of Guitar Pickup aided by COMSOL Multiphysics

古川達也\* 田中秀明† 伊藤秀昭\* 福本尚生\* 相知政司‡  
Tatsuya FURUKAWA\*, Hideaki TANAKA†, Hideaki ITOH\*, Hisao FUKUMOTO\*  
and Masashi OHCHI‡

\*佐賀大学大学院, †トヨタテクニカルディベロップメント, ‡千葉工業大学

\*Graduate School, Saga University, †Toyota Technical Development Co.,

‡Chiba Institute of Technology

平成 24 年 11 月 22 日

### Abstract

The electric guitar is widely used by many musicians. However, the relation between the string vibrations of a guitar and the electric signals that it produces is not fully investigated. The pickup devices, which transduce the string vibrations to the electric signals, are therefore not easy to design. Currently, designing the pickups requires knowledge and intuition of trained experts. If the simulation of the pickup process becomes possible, it will become easy for a musician to design his or her own pickups that produce the sound that he/she likes, without knowledge and intuition of trained experts. However, in transient analyses of electromagnetic fields with moving media, it is difficult to grasp the phenomena theoretically in the same manner of the convective heat diffusion since the treatment on the coupled problem with the field and dynamics is necessary. In this paper, we illustrate the dynamic magnetic flux patterns around the electric guitar pickup, where the string will move over the permanent magnet surrounded by the pickup coil, using COMSOL Multiphysics.

**Keywords:** Finite Element Analysis, Electromagnetic Analysis, Guitar Pickup, Moving Medium, Weak Coupled Problem

## 1 まえがき

エレクトリック・ギターは、ギターメーカーの老舗、Rickenbacker 社の George Beauchamp が 1931 年に販売を開始したものが最初に作られたもの<sup>\*1</sup>だと言われている [1]。

開発された当初は、ハワイアンやブルーグラス用のラップスチール・ギターとしての用途であったが、その後、ジャズで使われたアーチドトップ・ギター<sup>\*2</sup>にもピックアップが搭載され、ロックンロールが流行し出した 1950 年代後半からは、一般にも広がり始めた。エレクトリック・ギターが生まれた背景の一つには、ビッグバンド・ジャズにおいて、大音量を発声する管楽器や打楽器に比べてギターの音量が小さかったためであり、最初はアーチドトップ・ギターそのままの音質で音量を拡大する事を目的としていた。その後、Les Paul 氏によっ

て、ソリッドボディーの筐体にギター専用のピックアップ(以下、ピックアップ)を搭載したものが提案・開発され、Leo Fender 氏が別途開発したソリッドボディーのエレクトリック・ギターと共に大きな流れを作ってきた。

しかし、現在では、エレクトロニクスの進歩と相まって、独自のサウンドを持つ楽器として、エレクトリック・ギターという分野を築くに至っている [2]。エレクトリック・ギターは、ピックアップを用いて弦の振動を電気信号に変換し、アンプによって増幅させスピーカーで音を発生させる楽器である。エレクトリック・ギターが誕生して約 80 年経過したが、ギタリスト達の要望によって、今でも新たなエレクトリック・ギターが開発され続けている。多種多様のボディー、ピブラート・ユニット、ピックアップ、アンプ、エフェクタ、スピーカーなどエレクトリック・ギターのパーツが開発されているが、歪みなどエレクトリック・ギター個々の独自の音が好まれているためか、ピックアップの動作原理を数理的ならびに実験的に解析された例 [3, 4, 5, 6] は、極めて少ない。

特に、当初の研究 [3, 4, 5] では、一次元の波動方程式に古典的な磁気回路から求めた電磁力を粘性力として連成して、定式化を試みている。しかしながら、複数の磁石や分割された複数のコイルからなる実際のピックアッ

<sup>\*1</sup> 形状から Frying Pan と呼ばれた。

<sup>\*2</sup> 完全な空洞を持つフルアコースティック・ギターや一部にブロック構造を持つセミアコースティック・ギター等のギターの総称であるが、本来は、フルバンド・ジャズで用いられていたフルアコースティック・ギターのこと。

ブでの磁束分布は、3次元的であり、それらの研究では、弦の振動現象に限って数理的・実験的に捉えているが、ピックアップの電磁的な振る舞いについては、一切言及されていない。

一方、ギタリストの中には、工場の機械で大量生産されたものではなく、職人の手によってコイルが巻かれたピックアップを愛用している人もいる。ハンドメイドのピックアップの正確なシミュレーションが可能になれば、職人が作ったものと同じピックアップが機械で製造可能になり、ビンテージと呼ばれる高価で手が届かないものも安価に手に入れることができるようになるであろう。

本研究プロジェクトでは、エレクトリック・ギターのピックアップ部分に有限要素法を適用して電磁界解析を行い、ピックアップの電磁界の振舞い、弦振動による電磁界の変化が如何にピックアップ出力に影響を与えるのかをピックアップ・コイルの構成、永久磁石等の磁性材料、真鍮等のベースメタルを考慮することによって解明し、ピックアップの設計支援システムを構築することを目標にして進められている [7, 8, 9, 10]。

従前の報告 [6] では、電磁界解析は、2次元解析であり、実験面では、実際のギターを使うことなく、ピックアップ単体の電気特性を取得する実験を行っていたが、本論文では、まず、筆者らがこれまで行ってきた解析法とその結果 [7, 8, 9, 10] の問題点を提起し、さらに、ほぼ一定の力で弦を弾くことのできる撥弦装置を用いて実際のエレクトリック・ギターからの電気出力を計測した結果を提示し、最後に、COMSOL Multiphysics を用いて弦の振動も考慮した3次元電磁界解析を行った結果について報告する。

## 2 ピックアップの構造

エレクトリック・ギターは、スチール弦<sup>\*3</sup>の振動に起因するピックアップコイルに鎖交する磁束変化を電磁誘導の原理で電圧に変換して、音情報として取得している。

ピックアップとは、図1に示すように、永久磁石とその周辺に配置されたコイルから構成される。エレクトリック・ギターの場合はスチール弦が磁性体に相当し、弦の振動の回数だけ周囲の磁束が変化し、電圧が生じる。すなわち、弦の振動が早くなる（音が高くなる）と、電圧の変化も大きくなる。こうした弦の振動を電磁誘導の原理を利用して電気信号に変換しているのがピックアップである。

一般に市販されているピックアップのコイルでは、太さ 0.05 から 0.07mm の導線（ウレタン線）を機械を使

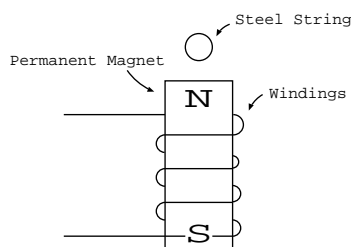


図1 ピックアップの構造

\*3 ニッケル、クロム、ステンレスを含む鉄材が主素材である。

い、数千回巻かれているため、直流抵抗は、数 kΩ にもなる。

このコイルの巻き方がエレクトリック・ギターの音色を決める極めて重要なファクターになっており、コイルの巻き数が多いほど音が大きくなる傾向がある。またピッチ（線と線の間隔）の間隔が広いとすっきりした音になり、また、間隔が狭いと低音が強調されると言われる。しかし、巻き過ぎると音がこもってくる傾向がある。このようなことから、ピックアップの設計方法については職人や熟練者の知識や勘に頼るところが多く、企業機密になっていることも多い。

## 3 従前の解析と実験結果

以下に、辺要素3次元有限要素法を用いて、振動する弦の運動を仮想的にシミュレートした結果と実験結果を示す。

### 3.1 基礎方程式

ここでは、永久磁石を有する領域を解析する場合の式を導出する。永久磁石の磁気特性は、着磁したことによって磁石に生じる磁化  $M$  を用いて次式で表される。

$$B = \mu H + M \quad (1)$$

上式をアンペアの法則の微分形に代入すると次式が得られる。

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} (B - M) = \nabla \times H \quad (2)$$

また、磁束密度  $B$  を磁気ベクトルポテンシャル  $A$  の回転に、 $1/\mu$  を磁気抵抗率  $\nu$  で置き換えると

$$\nabla \times \nu (\nabla \times A - M) = J_0 \quad (3)$$

さらに、 $\nu$  は空間の関数ではないと考えて、上式を変形すると、

$$\nu \nabla \times \nabla \times A - J_0 - \nu \nabla \times M = 0 \quad (4)$$

(4) 式の左辺第3項は、磁化によって生じる項であり、電流と同じ次元を有しており、等価磁化電流密度と呼ばれる。このとき、一要素においては、磁束密度  $B$  および磁界の強さ  $H$  は一定であるとする。一方、磁化  $M$  は、磁束密度  $B$  により決まるので、 $M$  も要素内で一定であると仮定する。また、強制電流は、本解析では考慮しないため、 $J_0$  を零と考え、(4) 式に辺要素3次元有限要素法を適用し、磁気ベクトルポテンシャル  $A$  の導出を試みる。

### 3.2 発生する電気信号の取得方法

コイルに誘導される電気信号を計算するため、図2に示すようなコイルの等価回路を考える。図中の  $R_0$ ,  $R$ , および  $I$  は、それぞれコイルの内部抵抗、計測時の電圧計等の内部抵抗を考慮した負荷抵抗、コイルに鎖交する磁束、およびコイルに誘導される電流である。このとき、回路方程式は、以下ようになる。

$$(R_0 + R)I + \frac{d\Phi}{dt} = 0 \quad (5)$$

(5) 式の鎖交磁束数  $\Phi$  は、ベクトルポテンシャル  $A$ 、巻線の巻数  $n_c$ 、巻線の断面積  $S_c$  を用いて次式で表される。

$$\Phi = \frac{n_c}{S_c} \iiint_V \mathbf{A} \cdot \mathbf{n}_s dV \quad (6)$$

ここで、 $n_s$  および  $V$  は、それぞれ電流の方向ベクトル、巻線部分の体積とする。

今回の解析では、 $n_c = 184$  回、 $S_c = 12[\text{mm}^2]$  としている。上式を辺要素有限要素内に適用することによって、ベクトルポテンシャル  $A$  から鎖交磁束数  $\Phi$  を導出することによって、その時間変化からエレクトリック・ギターの弦の振動によって、コイルに発生する電気信号を得る。

### 3.3 弦の運動の表現方法

ギターピックアップの解析を行うに当たって、弦の運動を考慮する必要がある。本節では、弦に相当する部分の運動の表現方法として、有限要素法の解析時に用いる各要素に割り当てる透磁率を時刻ごとに切り替えること [11] で対応した。

三次元モデルのメッシュでは、わかりにくいので、ここでは、簡単な 2 次元の要素で説明する。その方法は、図 3 と図 4 に示すとおりであり、空気部分を①、弦部分を②としている。実際の有限要素解析では、まず、図 3 の状態で電磁界解析を行い、そこで得られた電磁界の情報を図 4 に引き継ぎ、同様の電磁界解析を行う。これを一定の間隔で繰り返し、ギター弦の振動を模擬した。

### 3.4 簡易形式エレクトリック・ギターの解析モデル

図 5 に今回解析に用いたピックアップ部分の写真を示す。通常のギターのピックアップでは、永久磁石の上に鉄製のポール・ピースが一つの弦の一つ用いられているが、このピックアップは、一つの永久磁石がポール・ピースを兼ねており、複数の弦をカバーする。

この解析モデルのモデリング、メッシュ分割には、ANSYS Workbench を使用した。使用した ANSYS Workbench は、アカデミック版であり、解析可能な要素数に制限があるため、モデリングとメッシュ分割だけに使用し、3 次元辺要素有限要素法のプログラムは、自作した。図 6 に解析に用いたモデルのメッシュ分割図を、図 7 に弦の移動領域の拡大図を示す。

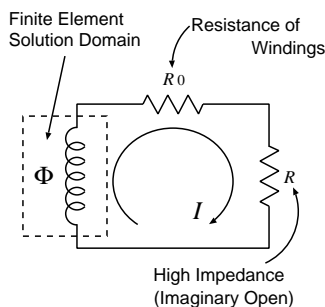


図 2 ピックアップの等価回路

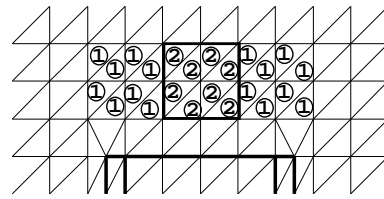


図 3 移動前の弦

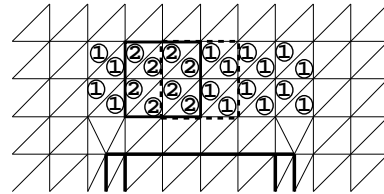


図 4 移動後の弦



図 5 実験に用いたピックアップ

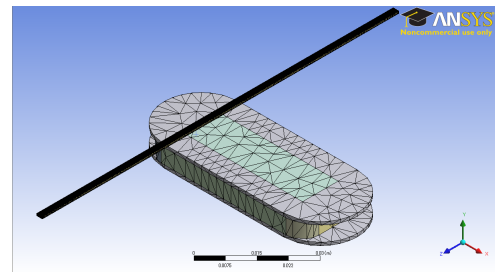


図 6 メッシュ分割図

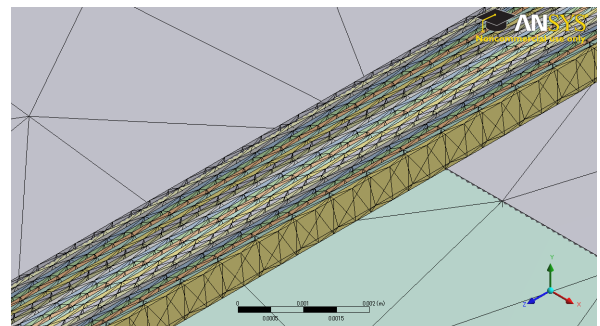


図 7 弦部分のメッシュ分割図

弦の直径はすべて  $0.65[\text{mm}]$  であると考え、前述したようにこの解析では、この弦の透磁率を変化させ、弦の運動を表現する。この場合、解析毎の弦の移動距離を弦の  $1/8$  である  $0.08125[\text{mm}]$  刻みとする。そして、永久磁石の磁化の値  $M_y$  を  $1[\text{T}]$ 、コイルの抵抗  $R_0$  を  $12.5[\Omega]$ 、

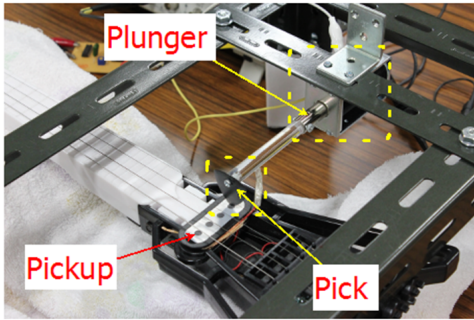


図 8 製作した撥弦装置

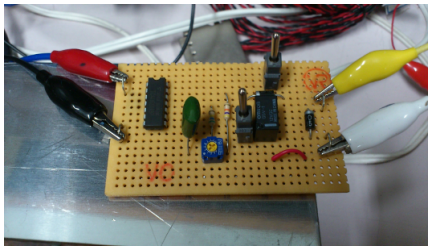


図 9 プランジャ駆動装置

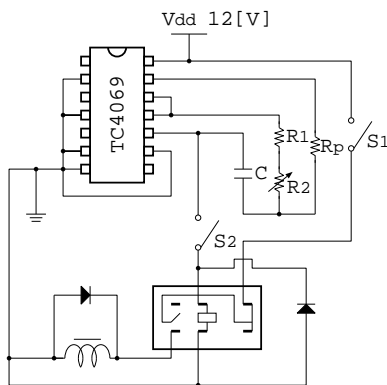


図 10 プランジャ駆動回路

コイルの巻数を 184 回とする。また、節点数は、30,358、辺要素数は、194,473 である。

3.5 実験装置

実験の再現性を図るために、図 8 に示す撥弦装置を製作した。図 8 に示したプランジャは、図 9 で示すプランジャ駆動回路部のスイッチ  $S_1$  と  $S_2$  を押下することで、プランジャ軸の先に取り付けられたピックで弦を弾くことができる。図 10 は、具体的な駆動回路図である。図 10 の IC TC4069 は、図中の  $S_1$  と  $S_2$  を同時でオンすることで、振動式プランジャを駆動するために使用する発振回路であり、 $R_2$  の可変抵抗によって振動数を変えることも可能であるが、今回使用した図 8 に示したプランジャでは、1 発だけの撥弦のため  $S_1$  だけを使用した。

3.6 モデルギターの解析値と数値計算結果の比較

図 11 に第 3.4 節で示した解析モデルに対して辺要素有限要素法電磁界解析を実施した場合の結果を示す。図中の矢印は、磁束密度をベクトルで表したものである。永久磁石の部分に磁化を  $y$  方向にだけ与えているため、図 11 のように中心の永久磁石の部分は矢印が  $y$  方向に

すべて向いていることがわかる。また、弦部分には比透磁率 600 を与えているため、磁束密度が高くなり、矢印が大きくなっていることがわかる。周辺の空気領域では矢印が磁石領域の上部から下部に向かっていることもわかる。

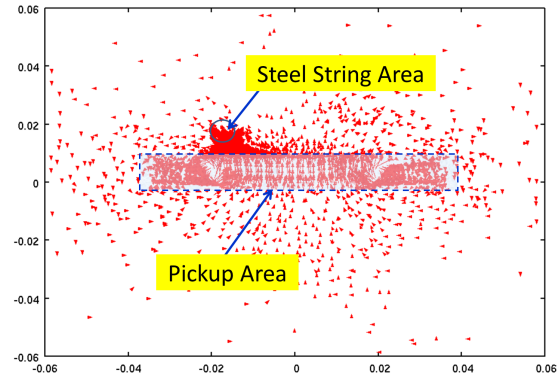


図 11 磁束密度分布

弦の振動と発生する電気信号の関係を解析した結果を図 12 に示す。この図では、0.17[s] と 0.18[s] の間、0.33[s] と 0.34[s] の間、0.49[s] と 0.50[s] の間で弦の進行方向を等速度で変化させており、弦の移動によって出力される信号の値が変化していることがわかる。また、図 13 に示す出力信号の実測値と比較すると、同図の中央あたりに見られる特徴的な波形を再現できているようであるが、加速度を伴う弦の振動を考慮できていないので、実測値とは、かけ離れた時間的な変化となっており、透磁率の変化で弦の運動を模擬しようとする本方法の限界が見えた。したがって、ピックアップの特性を理論的に把握するためには、実際の弦振動を考慮する、よりリアリスティックなモデルでの電磁界解析を展開する必要がある。

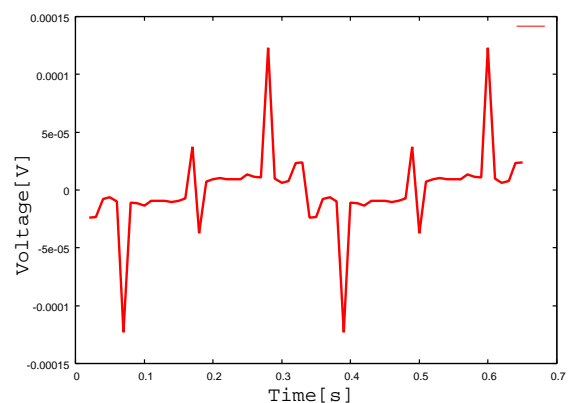


図 12 透磁率の変化で弦振動を模擬した 3 次元辺要素有限要素解析でのピックアップ出力結果

4 COMSOL Multiphysics による解析

第 3.6 節の最後で述べたように、従前の透磁率の変化で弦の運動を模擬するには、かなりの無理があり、弦の位置による磁束変化を考慮できるが実際の弦の運動を考慮することができなかった。本節では、COMSOL

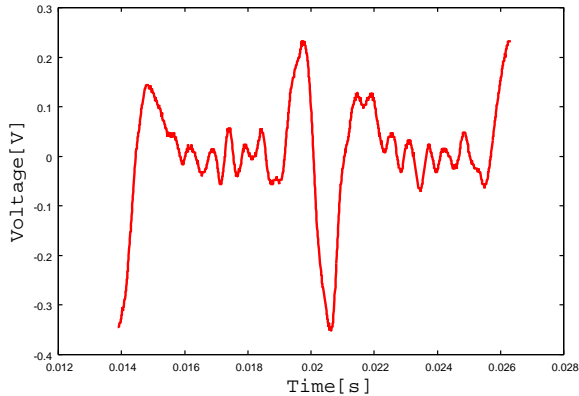


図 13 ピックアップ出力の実測結果



図 14 ノーブランドのシングルコイル・ピックアップ

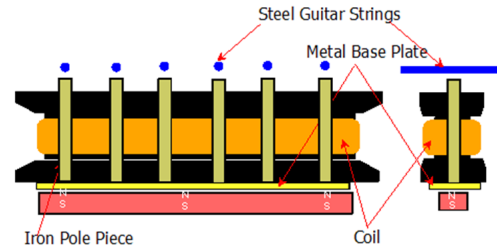


図 15 一般的なシングルコイル・ピックアップの構造

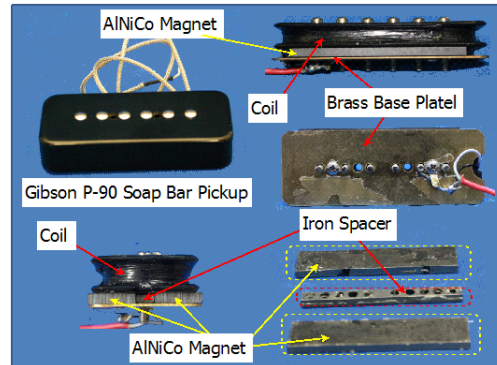


図 16 Gibson P-90® ピックアップ

Multiphysics の AC-DC モジュールを使って、弦の正弦波的運動を仮定した動的な 3 次元電磁界過渡解析を試みた。

4.1 実際のギターピックアップの解析モデル

第 3.4 節では、解析当初、単純な構造の文献 [2] 付録 4 弦ギターに搭載されたピックアップについて、解析を実行したが、本節では、COMSOL Multiphysics の強力なモデリング機能を活用して、実際のエレクトリック・ギターに搭載されている 2 種類のピックアップについて、電磁界解析を行うことにした。

4.1.1 ノーブランドのシングルコイル・ピックアップ

図 14 は、Fender Stratocaster の中国製コピーモデルのセンターピックアップである。同図上段は、プラスチックカバーであり、ピックアップ自体の構造は、同図中段のように、6 本の鉄製ポールピースの周りに非磁性のボビンを介してコイルを巻き、その下から、同図下段に示すセラミック永久磁石を配置するものとなっている。それを模式化したものが図 15 である。Fender Stratocaster に搭載されている純正ピックアップは、同図下に磁石は、配置されおらず、6 本のポール・ピースそのものが磁石になっている。なお、今回のノーブランド品には、ノイズ対策に有効と言われているベースメタルは、存在しなかった。

4.1.2 Gibson P-90 ピックアップ

図 16 は、米国 Gibson 社のシングル・コイルピックアップである P-90® [12] である。同図左上から P-90 本体、左下はソープバーと呼ばれるプラスチックカバーを取り除いて側面から撮影したコイルと磁石部、右上は、別の側面から見たもの、右中段は、ピックアップ背面の真鍮製ベースメタル、右下は、2 個の AlNiCo 磁石とその間に介在する鉄製のスペーサである。

Gibson P-90 は、図 17 に示すように、他社のシングルコイル・ピックアップとは、異なり、シングル・コイル

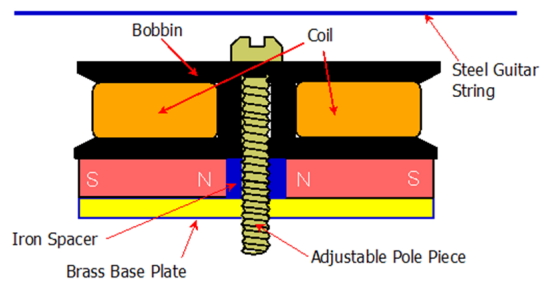


図 17 P-90 の構造

でありながら、2 個に分割された磁石が特有の磁束分布を作ることによって、二つのシングルコイルを逆直列に接続したハムバッカー・コイル [13] のような厚みのある重厚なサウンドを得ることができるという特徴を有し、世界的に根強い人気を持つ。

4.2 COMSOL Multiphysics でのモデリング

本節では、第 4.1.1 節と第 4.1.2 節で実機を説明したノーブランドのシングルコイル・ピックアップと Gibson P-90 ピックアップについて COMSOL Multiphysics でモデリングしたものを説明する。

4.2.1 ノーブランドのシングルコイル・ピックアップのモデリング

図 18 は、モデリングしたノーブランドのシングルコイル・ピックアップの全体図である。底面にセラミックの永久磁石を置いて、その上にコイルが配置されているものとした。当初の解析として、収束などのチェックのため、6 個のポール・ピースは、モデル化せず、コイルも外部回路を考えずに、開放電圧を求めることにした。

図 19 は、図 18 を要素分割した結果である。現象の可視化の第一歩として、要素分割は、比較的粗くしている。

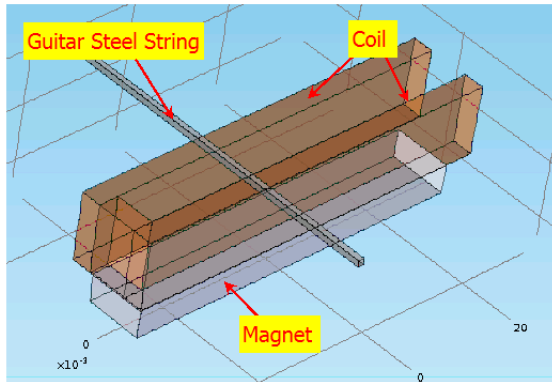


図 18 ノーブランドのシングルコイル・ピックアップの CAD モデル図

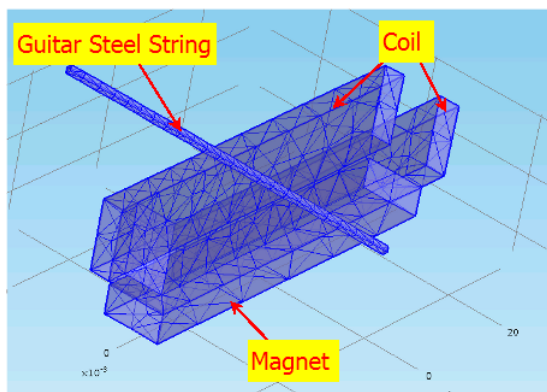


図 19 ノーブランドのシングルコイル・ピックアップの要素分割図

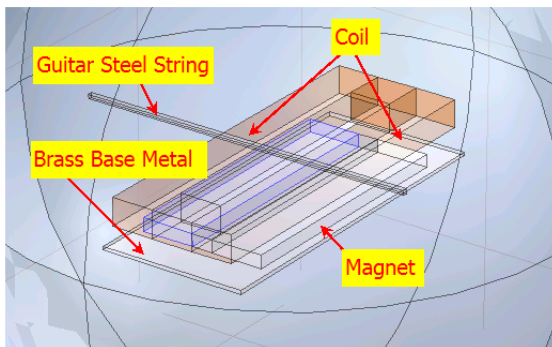


図 20 Gibson P-90 の CAD モデル

#### 4.2.2 Gibson P-90 のモデリング

図 20 は、Gibson P-90 のモデル図である。このモデルでも解析を簡単にするために、ここでも、図 17 に示したアジャスタブル・ポール・ピースを省略し、さらに、コイル部分も開放電圧を求めるとして、開口部のある導体として、モデルを作成した。

図 21 は、その要素分割である。解析の収束性を確認するために、要素分割は、粗くしており、弦の太さも 1[mm] としている。

#### 4.3 COMSOL Multiphysics での解析の設定

以下に弦の振動を考慮したギター・ピックアップの電磁界解析の手順を簡単に述べる。

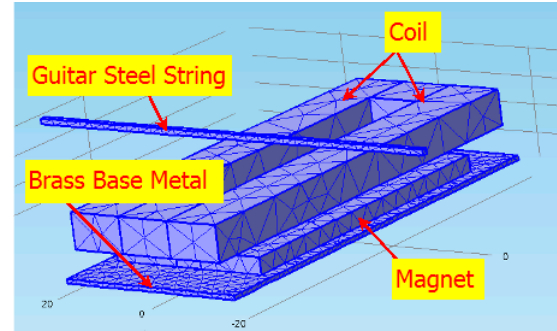


図 21 P-90 の要素分割図

#### 4.3.1 磁場 (mf) と移動メッシュ (ale) インターフェースの利用

まず、磁場 (mf) と移動メッシュ (ale) インターフェースを使って、運動する弦を含めた磁場解析の設定を行う。

1. COMSOL Multiphysics 4.2a を立ち上げる。
2. 空間次元を 3D とし、次へボタンをクリックし、フィジックスを追加で ACDC > 磁場 (mf) を右クリックし、選択フィジックスリストに追加する。
3. 同様に、フィジックスを追加で数学 > 変形メッシュ > 移動メッシュ (ale) を右クリックし、選択フィジックスリストに追加する。
4. 次へボタンをクリックし、スタディタイプを選択で時間依存をクリックし完了ボタンをクリックする。
5. モデルビルダのプロトタイプ構成が図 22 のようになっていることを確認する。
6. ジオメトリを作成する [14]。
7. メッシュを作成する [14]。

#### 4.3.2 磁石領域の磁化の設定

次に、磁石領域の設定を以下に沿って行う。

1. 磁場 (mf) ノードを右クリックし、アンペールの法則を選択する。
2. 追加された「アンペールの法則 2」ノードをクリックして設定ウィンドに行き、磁化を与えたい面番号を選択する。
3. 設定ウィンド内にある磁場の構成関係を比透磁率から磁化に変更し、図 23 のように磁化の値を設定する。
4. 材料定数を設定する。ただし、空気領域は、デフォ

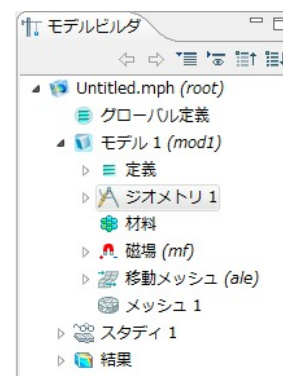


図 22 モデルビルダの設定例

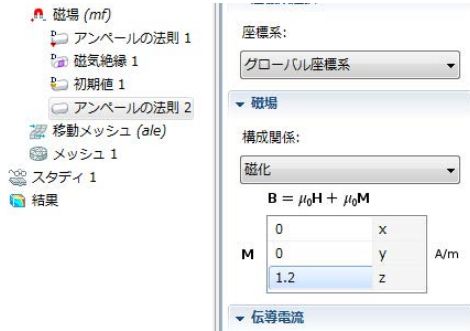


図 23 磁化の設定画面

P1 パラメータ

名前	式	値
freq0	10[Hz]	10.000 Hz
period0	1/freq0	0.10000 s
tprint	period0/10	0.010000 s
tend	10*period0	1.0000 s

図 26 変位パラメータの設定

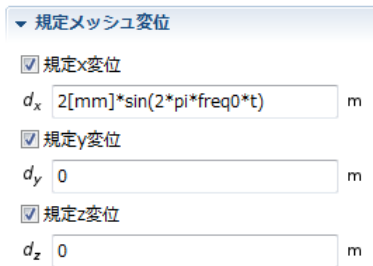


図 24 規定メッシュ変位の設定

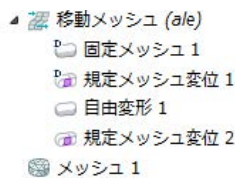
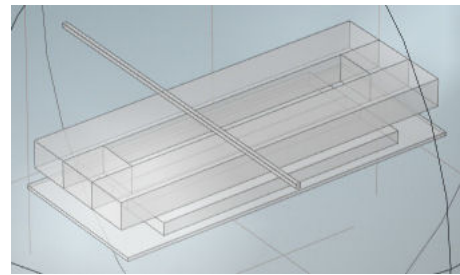
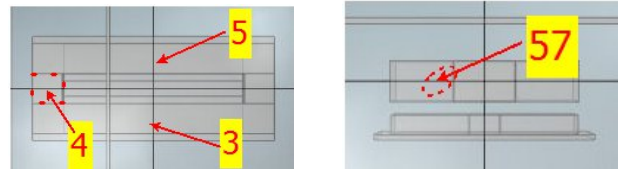


図 25 最終的なモデルツリー



(a) Gibson P-90 の全体図



(b) Gibson P-90 の上面図と側面図

図 27 誘導起電力計算のための領域拡大図

ルトでは、零が設定されているので、小さい値に設定する必要がある。

#### 4.3.3 移動メッシュの設定

最後に、移動メッシュの最終設定を以下の手順で行う。

1. 移動メッシュを右クリック、自由変形を選択し、設定で全ドメインを選択する。
2. 移動メッシュを右クリック、境界条件として既定メッシュ変位を選択する。
3. 既定メッシュ変位ノードを右クリック、移動物体表面をすべて選択し、かつ移動変位を設定する。ここでは、図 24 のようにする。振幅の値は、今回 2[mm]としているが、モデルによって変えることができる。ここまでの作業でモデルツリーは、図 25 のようになる。
4. グローバル定義を右クリックし、図 26 に示すようにパラメータを選択する。

#### 4.4 誘導起電力の計算方法

ここでは、モデルライブラリ>AC/DC Module>Motors and Drives>generator\_2d を参考にして設定した誘導起電力の導出方法を記す\*4。なお、モデルは、図 20 で示した Gibson P-90 をもとに話を進める。

\*4 筆者らの理解不足で間違っているかもしれない。



(a) 積分領域の定義 (b) 積分演算式の定義

図 28 誘導起電力計算のための積分定義

#### 4.4.1 誘導起電力の積分領域と演算の定義

図 27 に示す数字 3, 4, 5 はジオメトリ番号, 57 は、境界番号である。ここで、定義を右クリックし、「モデルカップリング>積分」を選択すると図 28(a) が上がってくるので、各ジオメトリと境界の積分領域の定義を行う。

つぎに、「グローバル定義」を右クリックして、図 28(b) のように「変数定義」エリアから誘導起電力の計算に必要な演算式を入力する。ここで、A はコイルの断面積、ns はコイルの巻数 (パラメータで定義)、mod1.mf.Ey は y 方向の電場、mod1.mf.Ex は x 方向の電場、(1) または、(-1) は、電流の方向を意味する。

#### 4.4.2 積分結果の表示設定

最後に、解析終了後発生信号を表示する。結果を右クリックし、表示グループ (1D) を選択。作成された表示グループ (1D) を右クリックし「グローバル」を選択。

y軸データ

式	単位	説明
Ev	V	Induced voltage in v
2 [mm]*sin(2*pi*...)	m	

図 29 計算結果表示の設定

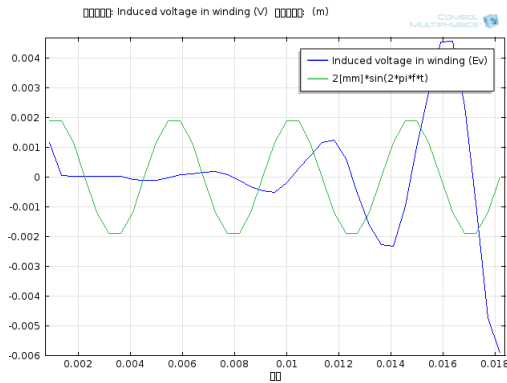


図 30 ノーブランドのシングルピックアップの出力電圧過渡特性

「グローバル」の設定内にある y 軸データの右にある二つの三角形から構成されるボタンをクリック。「定義 > (Ev)」を選択し、図 29 のように式に Ev を追加する。

#### 4.5 弦の運動を考慮した解析結果

以下の解析は、ノーブランドのシングルコイル・ピックアップと Gibson P-90 を第 4.2 節で述べたように簡易化したモデルとして、太さ 1[mm] の弦が振幅 2[mm] で正弦波的に振動している場合を想定して、COMSOL Multiphysics でシミュレーションを実行したものである。

##### 4.5.1 ノーブランドのシングルコイル・ピックアップの解析結果

図 30 は、ノーブランドのシングルコイル・ピックアップに誘起される開放電圧の時間変化である。図中の緑の線が弦の振動を意味し、青線が誘起される電圧である。弦振動に対して、電圧位相が 90 度遅れているのがわかる。また、図 31 は、ある瞬間の過渡状態磁束分布である。筆者らが調べた範囲では、Web ページ [15] 等で紹介されている従前の結果は、ほとんど 2 次元の定常電磁界解析の結果であり、COMSOL Multiphysics を使った世界で初めて弦の振動も考慮した動的な解析が実現したと言っても過言ではない。さらに、図 32 は、側面から見た磁束分布である。いずれの磁束分布も単一の磁石から出る磁束線の分布になっている。

##### 4.5.2 Gibson P-90 の解析結果

図 33 は、Gibson P-90 に誘起される開放電圧の時間変化である。2 個の磁石のため、生ずる起電力も大きく、シングルコイルでありながら、通常のハムバッカー・コイル並みの出力を得ることがわかる。図 34 は、ある瞬間の過渡状態磁束分布である。また、図 35 は、側面から見た磁束分布である。本図から二つの磁石によってバタフライ状の磁束分布が形成され、図 32 のような通常のシングルコイル・ピックアップとは、全く異なる磁束分布となることが明白である。これが P-90 の「音抜け

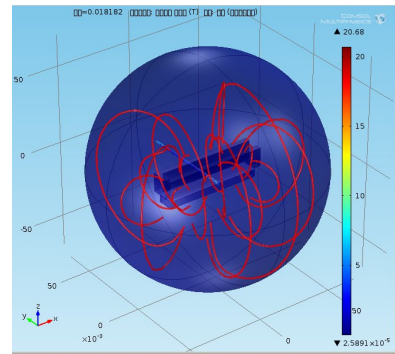


図 31 ノーブランドのシングルピックアップの磁束分布

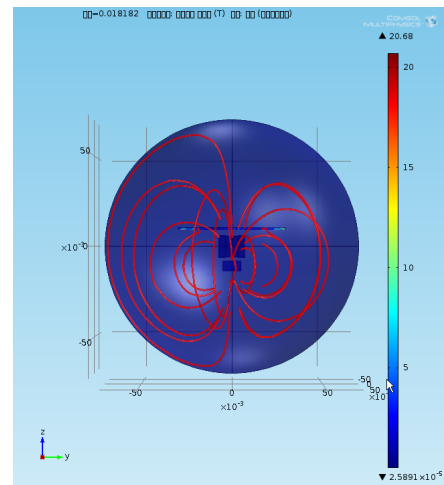


図 32 ノーブランドのシングルピックアップの側面の磁束分布

の良さとコシを持った甘く太いサウンド」と呼ばれる所以かもしれない。

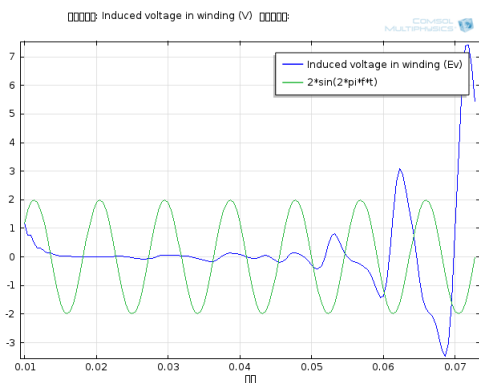


図 33 Gibson P-90 シングルピックアップの出力電圧過渡特性

## 5 むすび

本稿では、まず、筆者らが従前から行ってきたギター・ピックアップの実験とその電磁界解析を示し、解析上、弦の運動を考慮することにこれ以上限界があることを示し、COMSOL Multiphysics を適用することで、世界で



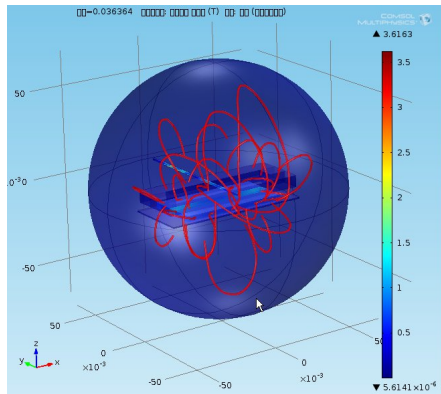


図 34 Gibson P-90 の磁束分布

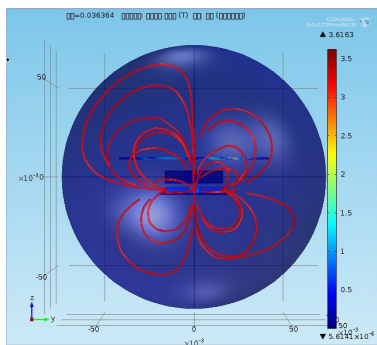


図 35 Gibson P-90 の側面の磁束分布

初めて、弦の振動を考慮したエレクトリック・ギターのピックアップの電磁界解析を実行することができることを明らかにした。

運動を考慮した電磁界解析技術は、プラズマ、半導体、誘導電動機や一般的な電気機器の過渡状態をシミュレートするには、必須の技術であり、COMSOL Multiphysics がこれらの解析に威力を発揮するのが本解析で明白になったと言えよう。

本報告では、COMSOL Multiphysics によるエレクトリック・ギター・ピックアップの動的な電磁界解析の可能性が見出せたが、その手始めとして、モデルを簡略したため、実機のポール・ピース、ベースメタルに関しては、考慮していない。また、開放電圧を仮定して解析を行ったため、巻線の寸法の影響も考慮することができなかった。今後、解析モデルをより実機に近づけ、さらに、本稿で紹介した撥弦装置を使った実際のギターの生振動データと外部電気回路を考慮した解析を実施する必要がある。

## 謝辞

COMSOL Multiphysics を導入する際、評価版の長期に渡る貸与等にご尽力頂いた計測エンジニアリングシステム株式会社第 1 営業部部長加藤和彦氏ならびに弦振動を電磁界解析に適用する際にご助言を頂いた同社第 1 技術部部長橋口真宜氏に深謝する。また、図面の作成で尽力頂いた、本学理工学部電気電子工学科卒業研究生鈴木木介君に謝意を表す。

## 参考文献

- [1] [http://en.wikipedia.org/wiki/Frying\\_pan\\_%28guitar%29](http://en.wikipedia.org/wiki/Frying_pan_%28guitar%29)
- [2] 「大人の科学マガジン (ミニエレキ)」, vol. 26, 学研教育出版, 2009-12
- [3] 原園正博:「離散的な負スティフネスの影響を受けた弦の振動」日本音響学会誌, 第 44 巻, 3 号, pp.187-193, 1988-3
- [4] Masahiro Harazono, “Electromagnetic pickup response excited by a string vibration,” Journal of the Acoustical Society of Japan (E), vol. 10, no. 1, pp. 23-29, 1989-01
- [5] 井上壮太, 降旗建治:「エレキギターの音響特性」, 信学技報, A, 応用音響 104(379), pp.25-30, 2004-10
- [6] <http://www.moore.org.au/pick001.htm>
- [7] 田中秀明, 古川達也, 伊藤秀昭, 福本尚生, 和久屋寛, 相知政司:「有限要素法を用いたギターピックアップの電磁界シミュレーション」, 平成 22 年電気学会 電子・情報・システム部門大会, GS5-5, CD-ROM, 2010-9
- [8] 田中秀明, 古川達也, 伊藤秀昭, 福本尚生, 和久屋寛, 相知政司:「三次元有限要素法を用いたギターピックアップの電磁界解析」, 電気学会マグネティクス研究会資料, MAG-10-192, pp.1-5, 2010-12
- [9] 田中秀明, 古川達也, 伊藤秀昭, 福本尚生, 和久屋寛, 相知政司:「有限要素法を用いたギターピックアップの信号解析」, 平成 23 年度 電気関係学会九州支部連合大会 (第 64 回連合大会) 講演論文集, 12-2A-01, pp.419(CD-ROM), 2011-9
- [10] 田中秀明, 古川達也, 伊藤秀昭, 福本尚生, 和久屋寛:「ギターピックアップによる発生信号の計測結果と解析結果の比較」, 第 1 回学生研究発表会予稿集, IEEE IM-S11-09, pp 12, 2011-11
- [11] 加川幸雄:「電気・電子のための有限要素法の実際」, オーム社, 1982
- [12] <http://store.gibson.com/p-90-single-coil-with-soapbar-cover/>
- [13] <http://en.wikipedia.org/wiki/Humbucker>
- [14] 橋口真宜:「COMSOL Multiphysics Ver.4.2 超入門」(chosoku\_guide.vol1.pdf), 2011-7
- [15] <http://www.moore.org.au/pick/07/20030123%20Innovating%20High%20Sensitivity%20Guitar%20Pickups.pdf>, 2003-1