

技術・研究報告

クラシックギターにおける弦振動方向による 表板振動特性の差異の測定

古地 勇介^a, 田口 友康^b, 北村 達也^c

^a 株式会社日本ビジネスデータプロセッシングセンター
神戸市中央区伊藤町 1 1 9 三井生命神戸三宮ビル 10 階, 650-0032

^b 田口計算解析研究所
神戸市北区桂木 2 - 1 6 - 1, 651-1223

^c 甲南大学 知能情報学部 知能情報学科
神戸市東灘区岡本 8 - 9 - 1, 658-8501

(受理日 2010 年 4 月 6 日)

概要

クラシックギターの代表的な奏法にアポヤンドとアルアイレがあり, それぞれ異なる音色を生み出す. 前者では弦が表板に対して主に垂直に振動し, 後者では主に水平に振動する. そこで, 本研究ではクラシックギターの弦の振動方向が音色に与える影響を明らかにするため, 1 弦と 6 弦の振動方向による表板の振動特性の違いを測定した. クラシックギター (YAMAHA CG-131S) の駒に加速度ピックアップを垂直方向と水平方向に設置し, 表板上の 60 点をインパクトハンマーにて 1 点ずつ加振した. これによって得られるインパクトハンマーの加振力と駒上の垂直方向と水平方向の加速度から周波数応答関数 (モビリティ) を得た. さらに, 周波数応答関数のピーク周波数における表板振動のモード形状も求めた. 測定の結果, 弦の垂直方向の振動による応答は水平方向の振動による応答よりもパワーが大きいことが明らかになった. これはアポヤンド奏法はアルアイレ奏法に比べ音量が大きいことに対応する. また, 2 つの振動方向の周波数応答関数には違いがあることを実証し, 2 つの奏法の音色の違いを生み出す要因を明らかにした.

キーワード: クラシックギター, 弦振動, アポヤンド奏法, アルアイレ奏法, 表板, モード

1 はじめに

ギターは撥弦楽器の一種である. アコースティックギターの音色は, 本体の構造や素材, 弦の素材のみならず, 奏法によっても大きく変化する. 代表的な奏法としてアポヤンド, アルアイレがあり, これらはそれぞれに異なる弦の弾き方により異なる弦振動を生じさせ, その結果, 奏法固有の音色を作り出す. このような弦の振動と音色との関係が明らかになれば, ギターの設計や演奏の工夫において有用と考えられる.

Jansson [1] は, アコースティックギターの弦に静的な力を加えた場合の表板の歪みを干渉ホログラムを用いて測定している. そして, 力の方向を表板に垂直な方向または水平な方向に設定し, それぞれの条件による表板の歪の違いを報告した. Jansson は弦を弾く角度と生成される音の減衰率の関係についても報告している [2].

アコースティックギターの奏法と弦振動の関係を調査した研究には渡辺ら [3] によるものがある. 彼らは, 合成音の作成を目的として, アポヤンド奏法とアルアイレ奏法の分析を行った. フラメンコギターとフォークギターを対象にした測定の結果, 通常のアポヤンド奏法では水平弾弦音 (ギターの表板に平行な振動による音) の割合が 30 %, アルアイレ奏法では 70 %であることを示した.

本研究では, アコースティックギターの弦の振動方向と音色に関するより基本的な特性を明らかにするため, 表板に対して水平な弦振動と垂直な弦振動によるギターの表板の振動を加振測定により明らかにする. なお, 以降ではアコースティックギターを単にギターと表記する.

2 ギターの構造

ギター各部の名称を図 1 に示す. 現代の一般的なギターは, 長さが約 65 cm で, E_2 (82 Hz), A_2 (110 Hz), D_3 (147 Hz), G_3 (196 Hz), B_3 (247 Hz), E_4 (330 Hz) に調弦された 6 本の弦が張ってある.

表板はスプルースやシダーなどが使われており, 裏板と側板にはローズウッド, マホガニー, カエデなどの堅い木材が用いられている. 表板, 裏板のどちらにも力木が取り付けられており, 特に表板に対する補強棒 (リブ) あるいは力木 (ブレイス) による補強法 (ブレイシング) は重要な設計項目とされている [4].

ギターはその構造により 4 つのグループ, すなわちクラシック, フラメンコ, フラットトップ (フォーク), アーチトップに分類される [4]. 本研究で対象にするクラシックギターは, ネックがフラットトップのものより太く, 弦がナイロン製である点が特徴である.

3 クラシックギターの奏法

クラシックギターは撥 (ピック) によらず右手指を弦にあてて演奏する. その際に次のような種々の技法を用いる. まず, 右手指の動きに関しては, 指を動かす方向で区別するアポヤンド, アルアイレといわれる 2 種類の指の使い方を基本とする. これに撥弦時の爪の角度, 爪の長さ, 爪の種類, 指を抜くスピード, 方向, 指の硬さ, 指の曲がり具合, 使用する指の種類などを変えることにより, 音量と音色を微妙に変化させる. その他, アラストレ (左指を, 押弦しながら弦上を滑らせる), ラスゲアード (右指の爪や指先で弦を掻き鳴らす), ハンマリング (前音の振動している弦を左指で抑えて離す, この操作でスラーを表現する), タンボーラ (ブリッジ付近の弦を右手で叩いて音を鳴らす), タブレット (2 本の弦を左手でねじり小太鼓のような音を出す) などがある. これらのうち, 本研究に密接に関わるアポヤンドとアルアイレについて以下に幾分詳しく説明する.

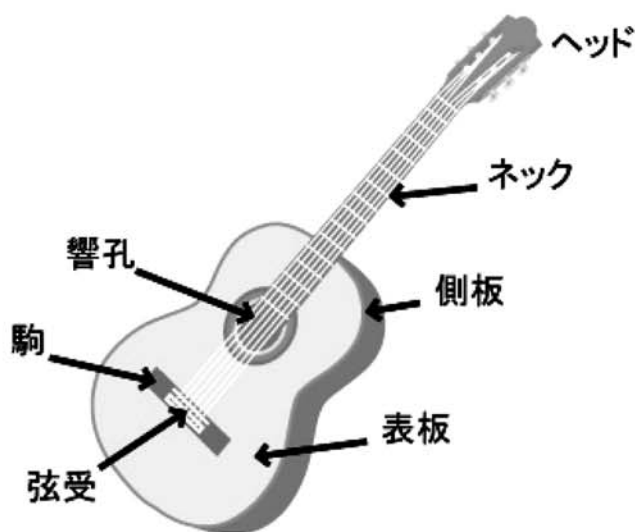


図 1: ギター各部の名称

3.1 アポヤンド奏法

アポヤンド (apoyando) とはスペイン語で「もたれる」の意味である。この奏法では弾弦した右の指が隣の弦に触れて止まる。生成される音は音量が豊かかつ明瞭で、明るく、太い音になる。また、音の減衰が大きい。アポヤンド奏法における弦振動は表面板に対して垂直なもの (縦振動) が主である。

3.2 アルアイレ奏法

アルアイレ (al aire) とはスペイン語で「空中」の意味である。この奏法では弾弦した指が隣の弦に触れずに空中に去る。なお、日本で使われている「アルアイレ」という用語は諸外国では開放弦を意味し、ティランド (tirando, スペイン語で「引っ張る」、「投げる」の意味) が一般的に使われている。アルアイレ奏法は、アポヤンド奏法に比べて音量が小さく、繊細で、細い音が出る。女性的な音とも言われる。また、音の減衰はゆるやかである。アルアイレ奏法における弦振動は表面板に対して平行なもの (横振動) が主である。

4 測定及び分析の対象と方法

4.1 測定対象

実験対象のクラシックギターは YAMAHA CG-131S (2003 年製) である。その材質及び製法を表 1 に示す。また、表面板の振動に大きな影響を与えるギター内部の力木の様子を見るため、響孔から内部に電球を入れて暗闇で撮影した写真を図 2 に示す。この写真から、このギターは非対称な力木を特徴とするラミレス式 [4] に似た構造を持っていることがわかる。

表 1: YAMAHA CG131S の材質及び製法 [5]

表板	スプルース単板
裏板	ナトー
側板	ナトー
ネック	ナトー
指板	ローズウッド
ブリッジ	ローズウッド
仕上げ	グロス仕上げ
弦	オーガスチンリーガルブルー
胴厚	94 – 100 mm
弦長	650 mm

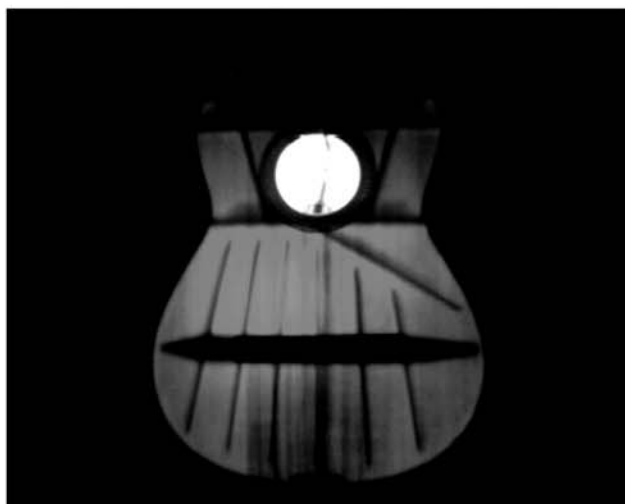


図 2: YAMAHA CG131S の力木の配置を示す写真

4.2 測定方法

表板上の各点を 1 点ずつインパクトハンマーで加振し、駒の上にてその応答を加速度ピックアップにより測定する。2つの加速度ピックアップを用い、表板に垂直な方向と水平な方向の加速度を計測することによって、垂直方向及び水平方向の弦振動による表板の振動特性を求めることができる。

まず、ギターに測定対象の弦のみを張り、駒の上に加速度ピックアップ (Brüel Kjær Type 4374) を固定した。本来であれば、弦の振動を直接受ける弦受に加速度ピックアップを固定すべきであるが、物理的に不可能であった。そこで、垂直方向の加速度ピックアップは弦直下の表板に固定し、水平方向の加速度ピックアップは駒と弦ではさんで固定した。加速度ピックアップの固定の様子を図 3 に示す。

次に、弦の振動をフェルト片で十分に制止した状態で、表板上の 60 点を 1 点ずつインパクトハンマー (Brüel Kjær Type 8203) にて加振した。加振点を図 4 に示す。そして、インパクトハンマーの加

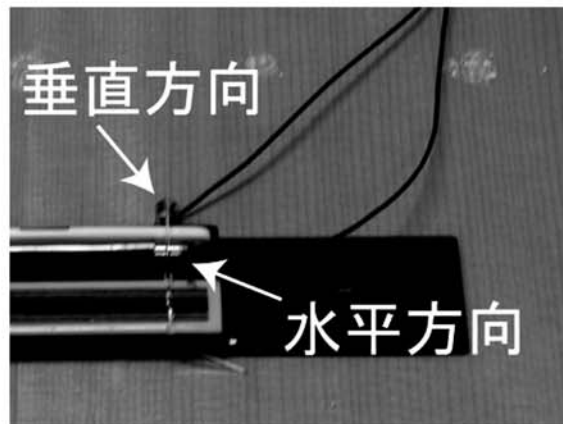


図 3: 加速度ピックアップ固定の様子



図 4: 表板上の加振点. 白くマークしてある点を加振した

振力及びそれに対する応答をコンディショニングアンプ (Brüel Kjær Type 2692), データ取得システム (Brüel Kjær Type 3560C), 分析ソフトウェア (Brüel Kjær PULSE) を用いてパーソナル・コンピュータに取り込んだ. 標本化周波数は 65,536 Hz である.

インパクトハンマーによる加振は表板に垂直になるよう行った. ハンマーの加振力が最大値の 10% まで上昇した時点でトリガーを発生させ, その時点の 40 ms 前から 100 ms 間のデータを取得した. そして, 分析ソフトウェア上でハンマーの打撃が単一であることが目視確認されたデータのみを 10 回保存する. その加算平均を測定データとし, 加速度データの時間積分によって速度のデータを得た.

以上の測定は室温 24 °C, 湿度 20 % の防音室にて実施した.

4.3 分析方法

まず, それぞれの加振点と測定点のデータからオートパワースペクトルとクロススペクトルを計算し, Vibrant Technology 社のモーダル解析システム ME'scopeVES により周波数応答関数を求める. 周波数応答関数 (モビリティ) $M(\omega)$ は, 加振力 (入力) の時間信号 $f(t)$ と測定点における速度 (応答) の時間信号 $v(t)$ から次式により求める.

$$M(\omega) = \frac{\mathcal{F}[v(t)]}{\mathcal{F}[f(t)]} \quad [\text{ms}^{-1}/\text{N}] \quad (1)$$

ここで, $\mathcal{F}[\cdot]$ はフーリエ変換, ω は角周波数, N は力の単位ニュートンである.

得られた周波数応答関数からカーブフィット計算によって固有振動数, 固有減衰比, 固有ベクトルを同定して, モード形状を算出する.

5 結果と考察

5.1 周波数応答関数

垂直方向及び水平方向に設置した加速度ピックアップにより測定した 1 弦の周波数応答関数を図 5 に示す. このグラフは表板上の測定点 60 点に対応する 60 本の周波数応答関数を重ねて表示したものである. 図は表板が数多くの共振周波数を持つことを示しており, 概ね 1 kHz 以下ではその共振特性は著しく鋭い (Q 値が高い) こと, 1.5 kHz 超あたりからはやや鈍る (Q 値が低い) ことが分かる. 同様に, 垂直方向及び水平方向に設置した加速度ピックアップにより測定した 6 弦の周波数応答関数を図 6 に示す.

1 弦, 6 弦の双方において垂直方向に設置した加速度ピックアップにより測定した周波数応答関数が水平方向のものよりも全体のパワーが大きい. これは弦が主に垂直方向 (表板に垂直な方向) に振動するアポヤンド奏法の方がアルアイレ奏法よりも音量が豊かであることと一致する. さらに, 垂直方向と水平方向のモビリティは全体形状も異なる. これはアポヤンド奏法とアルアイレ奏法による音色が異なることと密接に関係する.

図 5, 6 においてピークのパワーが大きい順序に周波数を並べると以下ようになる.

- 1 弦水平: 328 Hz, 934 Hz, 732 Hz, 1,140 Hz, 1,360 Hz, 552 Hz
- 1 弦垂直: 328 Hz, 232 Hz, 112 Hz, 1,140 Hz, 738 Hz, 438 Hz
- 6 弦水平: 334 Hz, 944 Hz, 236 Hz, 1,030 Hz, 548 Hz, 734 Hz
- 6 弦垂直: 336 Hz, 232 Hz, 112 Hz, 938 Hz, 680 Hz, 446 Hz

全ての場合において 330 Hz 付近に最も大きいピークがあることから, 1 弦開放 ($E_4=330$ Hz) は大きな音量が得られることがわかる. また, 垂直方向に設置した加速度ピックアップの周波数応答関数においては 112 Hz におけるパワーも大きいため, 5 弦開放 ($A_2=110$ Hz) は垂直方向に弾くと大きな音量が得られる.

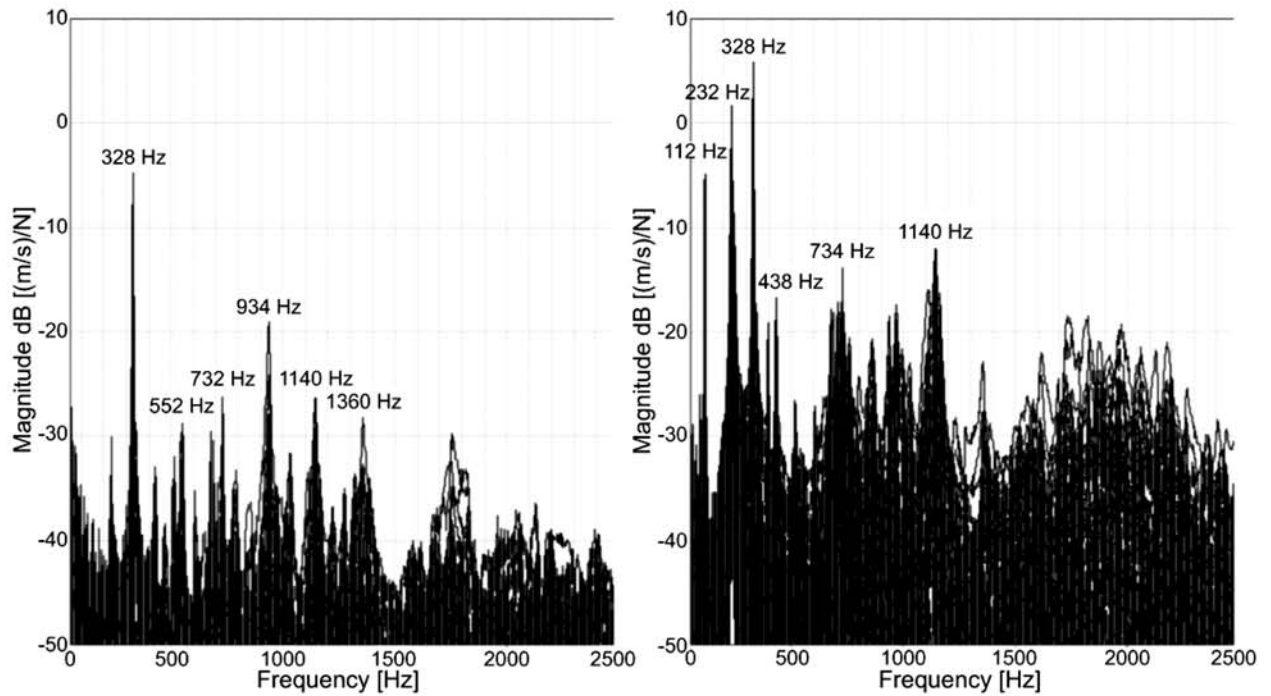


図 5: 水平方向(左)及び垂直方向(右)に設置した加速度ピックアップにより測定した1弦の周波数応答関数. 横軸は周波数 [Hz] で, 0 Hz から 2.5 kHz まで線形軸にて示している. 縦軸は対数パワー. 図中の数字はピークの周波数

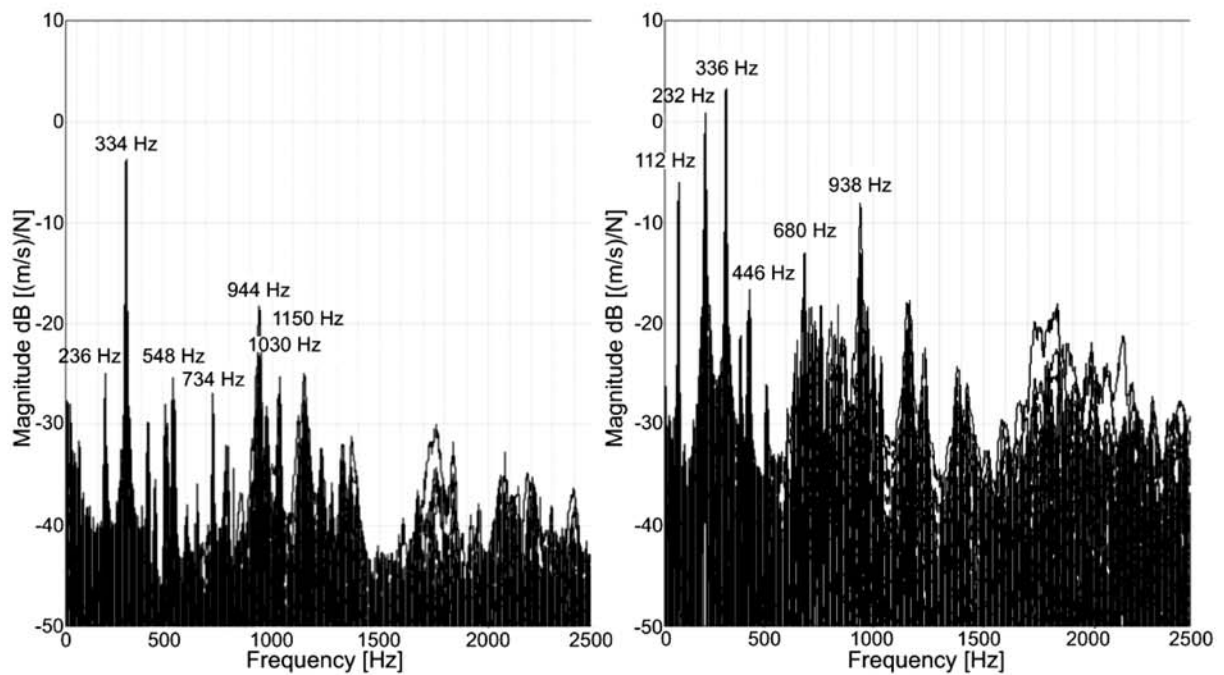


図 6: 水平方向(左)及び垂直方向(右)に設置した加速度ピックアップにより測定した6弦の周波数応答関数. 横軸は周波数 [Hz] で, 0 Hz から 2.5 kHz まで線形軸にて示している. 縦軸は対数パワー. 図中の数字はピークの周波数

5.2 モード形状

1 弦及び 6 弦の水平方向及び垂直方向の振動による表板振動のモード形状を図 7, 8, 9, 10 に示す. 図 7 は, 図 5 (左) の周波数応答関数でピークが生じている周波数における表板の振動 (変位) の様子を示したコンター・マップである. 同様に, 図 8, 図 9, 図 10 は, それぞれ図 5 (右), 図 6 (左), 図 6 (右) の周波数応答関数のピーク周波数における表板振動のコンター・マップである. これらの図中の青点は加振点 (図 4) を示している. また黒線はノードル・ライン (Nodal line), すなわち振動の節線であり, 当該の周波数においてこの黒線の部分は変位しない. 表板の変位の大きさは等高線表示されており, 赤線, 黄線, 青線の順に変位が大きい.

全ての図に見られる 330 Hz 前後の周波数では, 表板の中心線に対して対称に振動する (1,0) と呼ばれるモード (振動パターン) が生じている. また, 図 8, 9, 10 に現れている 232 Hz 付近の振動は, 表板が上下に分割して振動する (0,1) のモードを示している. 垂直方向の弦振動に関する図 8, 10 に見られる 112 Hz の振動は表板全体が振動する (0,0) のモードである. 同様に, 図 8, 10 に現れる 440 Hz 付近の振動は, 表板が上下に 3 分割される (0,2) のモードであると考えられる. 上記のモードとその周波数は, Rossing ら [6] によるフォークギターを対象とした測定結果と概ね一致する.

なお, これらの図に対応する動画を甲南大学知能情報学部北村研究室の Web ページ <http://basil.is.konan-u.ac.jp/guitar2009/> にて公開している.

6 おわりに

本研究では, 加振測定によってクラシックギター (YAMAHA CG-131S) の弦の振動方向による表板の振動特性の差異を計測した. 1 弦及び 6 弦を対象として表板に対して垂直方向の振動と水平方向の振動に関して測定を行い, それぞれの振動方向の周波数応答関数を得た. さらに, 周波数応答関数のピーク周波数における表板振動のモード形状を求めた. これによって, 従来あまり検討されてこなかった, 弦振動方向と表板の振動特性の関係の一端を明らかにすることができた.

第 1 著者はクラシックギター奏者であり, 本研究のような測定によりギターの発音原理を深く追求することによってギター演奏に応用できると期待している. また, 楽器は長年の勘や経験で造られているが, 本研究のような検討によって新たな形で楽器製作に貢献しようと考えている.

参考文献

- [1] E.V. Jansson, "Fundamentals of the guitar tone," *J. Guitar Acoustics*, vol. 6, pp. 26–41, 1982.
- [2] E.V. Jansson, "Acoustics for the guitar player," *Function, Construction, and Quality of the Guitar* (E.V. Jansson ed.), pp. 7–26, Royal Swedish Academy of Music, 1983.
- [3] 渡辺久晃, 石川智治, 徳弘一路, "ギターのアポヤンド奏法とアルアイレ奏法," 神奈川工科大学研究紀要, vol. B, no. 20, pp. 157–164, 1996.

- [4] N.H. Fletcher and T.D. Rossing, *The Physics of Musical Instruments*. Springer-Verlag, 1998 (岸憲史, 久保田秀美, 吉川茂訳, 楽器の物理学. シュプリンガーフェアラーク東京, 2004).
- [5] <http://yamaha.jp/product/guitars-basses/cl-guitars/cg131s/>
- [6] T.D. Rossing, J. Popp, and D. Polstein, "Acoustic response of guitars," in *Proc. of SMAC83*, pp. 333–342, 1985.

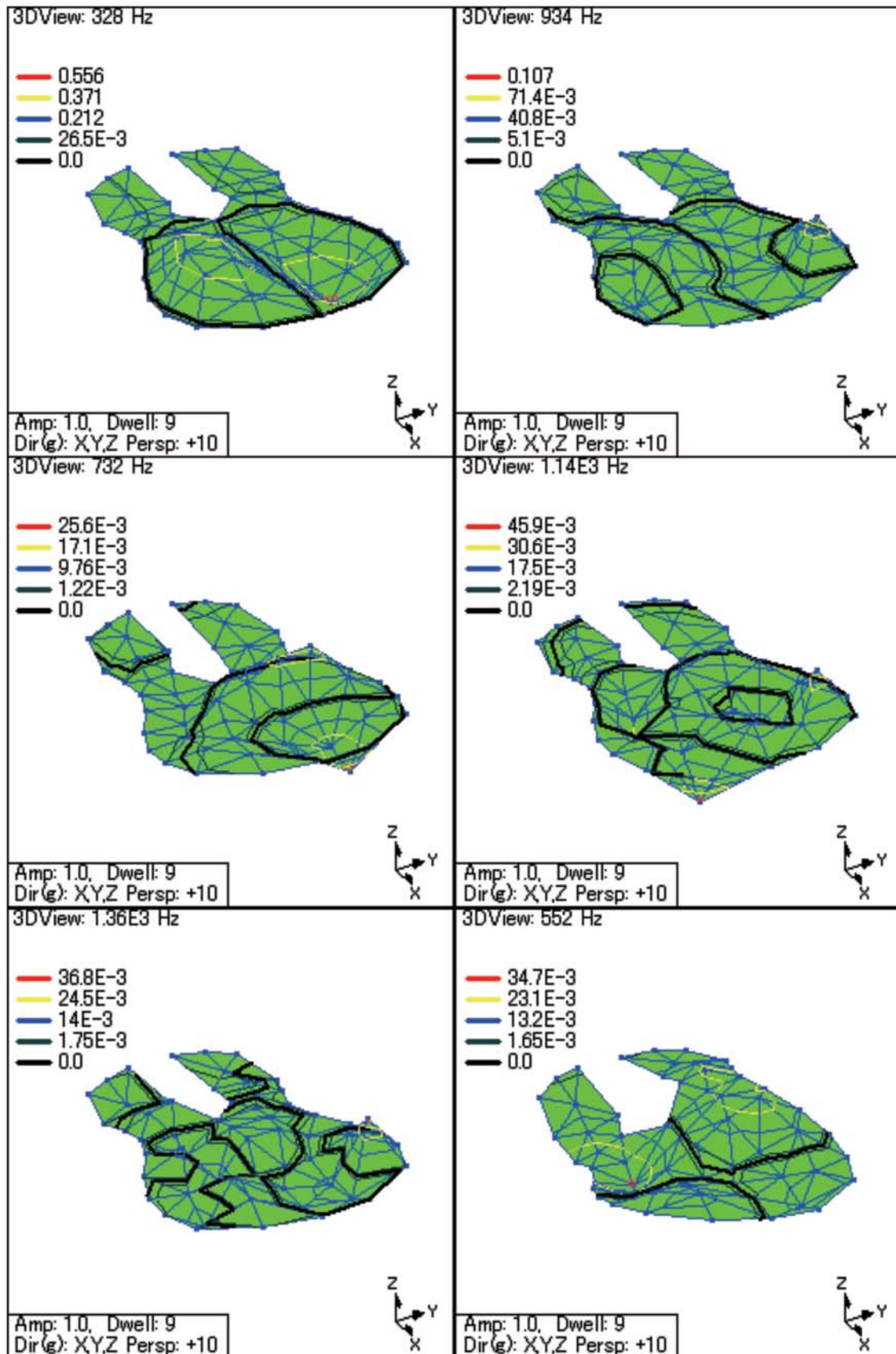


図 7: 1 弦の水平方向振動による表板振動のモード形状. 上段左: 328 Hz, 上段右: 934 Hz, 中段左: 732 Hz, 中段右: 1,140 Hz, 下段左: 1,360 Hz, 下段右: 552 Hz (ピークのパワーが大きい順序)

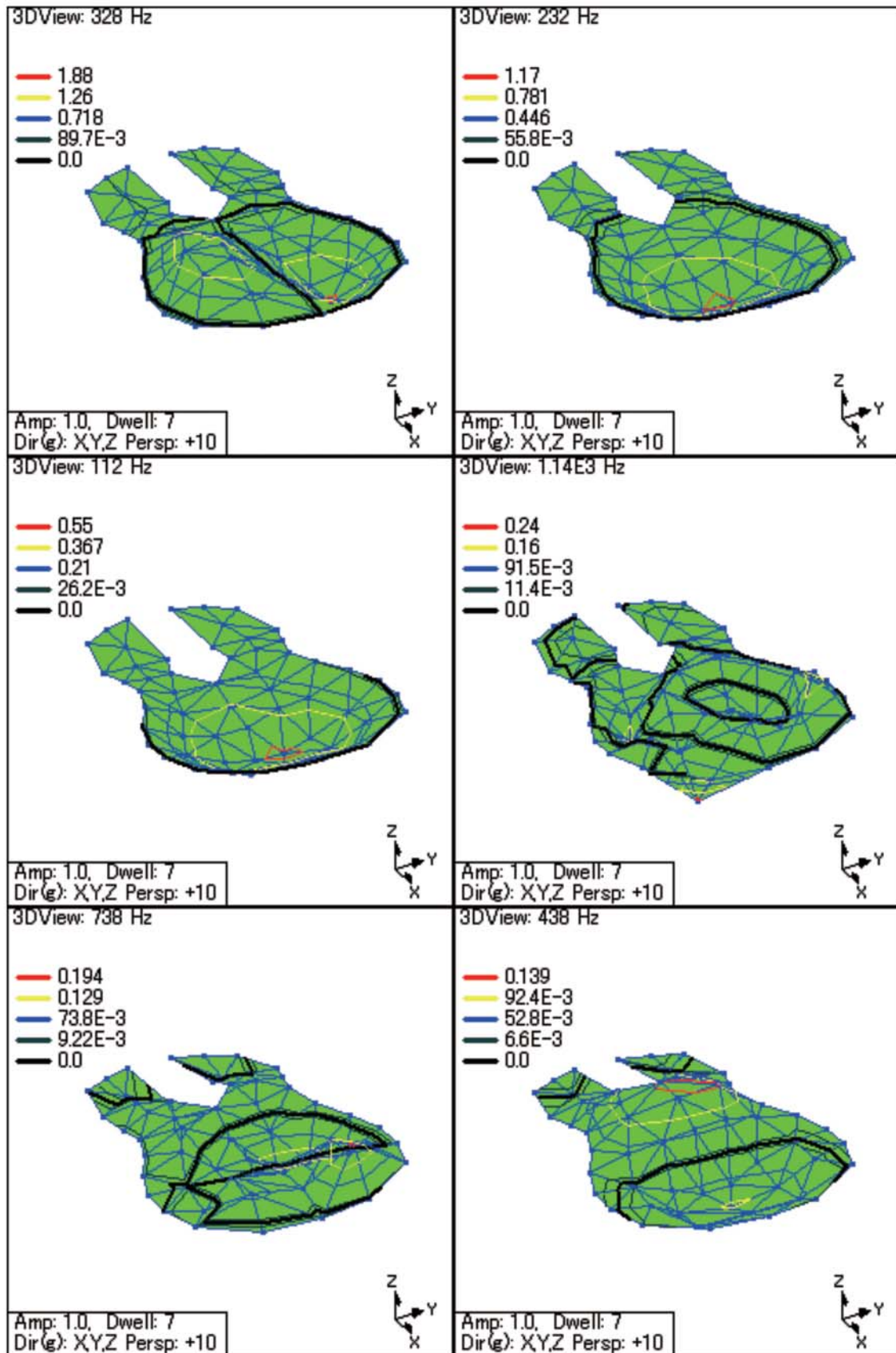


図 8: 1 弦の垂直方向振動による表板振動のモード形状. 上段左: 328 Hz, 上段右: 232 Hz, 中段左: 112 Hz, 中段右: 1,140 Hz, 下段左: 738 Hz, 下段右: 438 Hz (ピークのパワーが大きい順序)

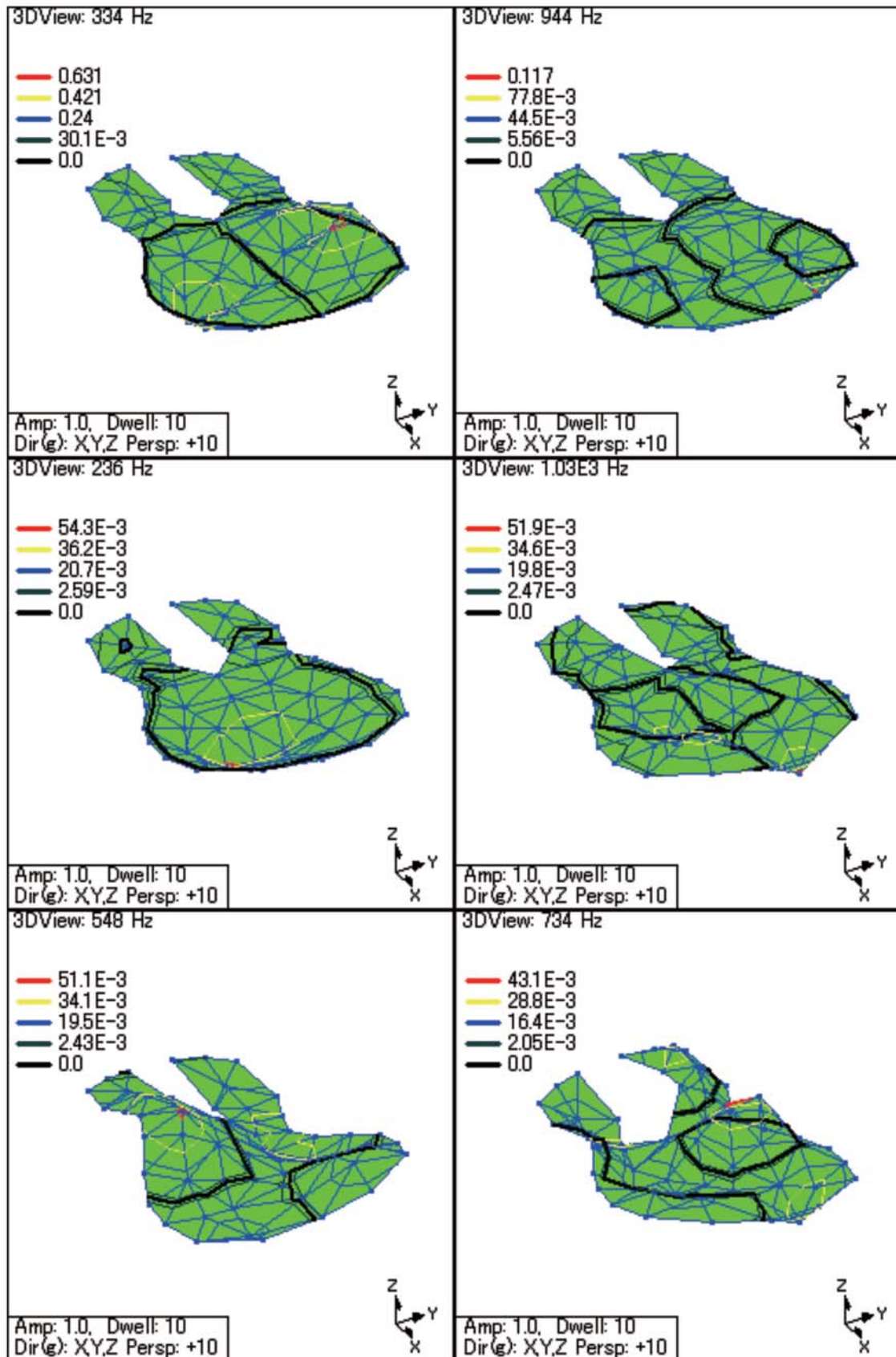


図 9: 6 弦の水平方向振動による表板振動のモード形状. 上段左: 334 Hz, 上段右: 944 Hz, 中段左: 236 Hz, 中段右: 1,030 Hz, 下段左: 548 Hz, 下段右: 734 Hz (ピークのパワーが大きい順序)

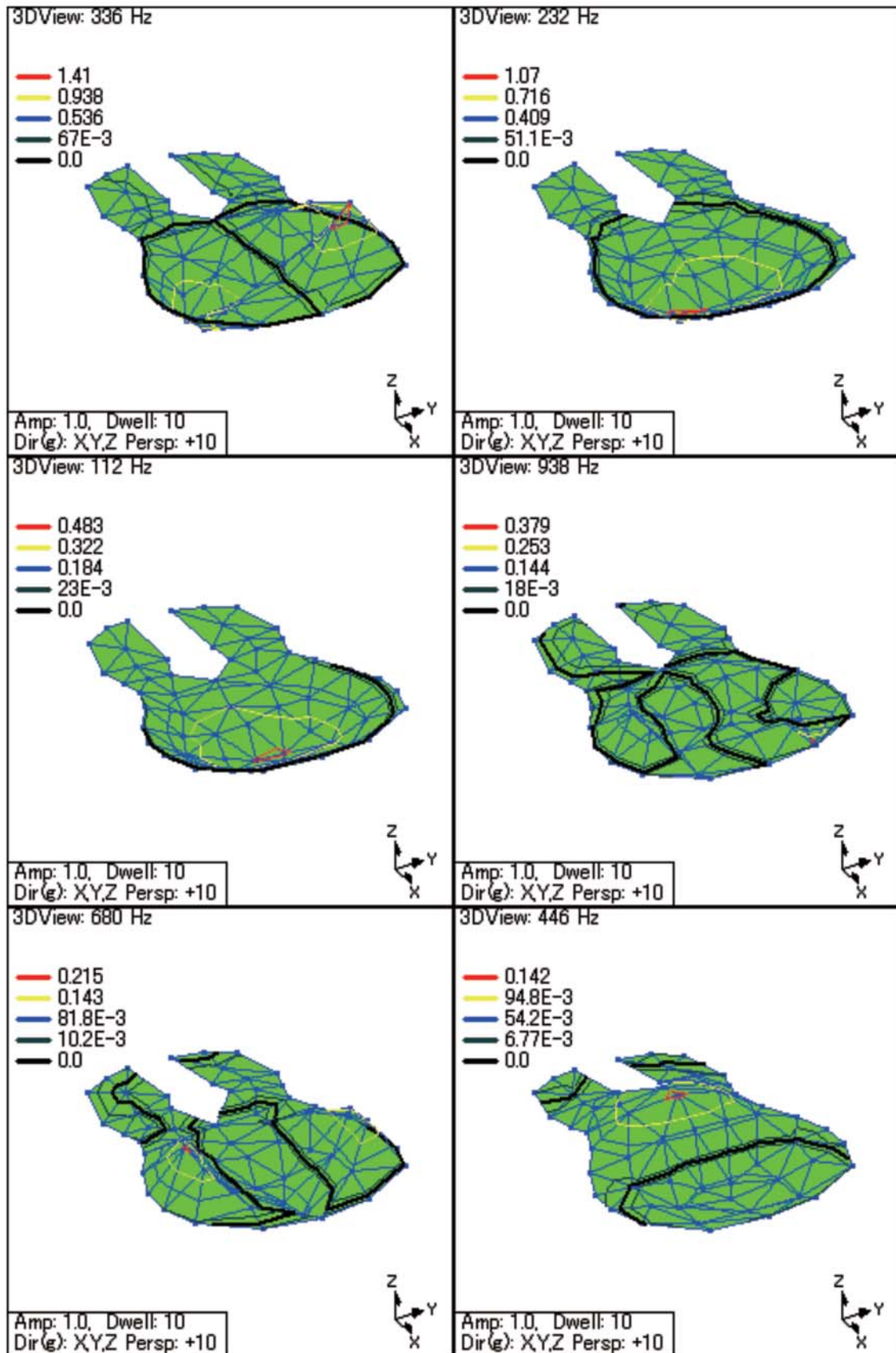


図 10: 6 弦の垂直方向振動による表板振動のモード形状. 上段左: 336 Hz, 上段右: 232 Hz, 中段左: 112 Hz, 中段右: 938 Hz, 下段左: 680 Hz, 下段右: 446 Hz (ピークのパワーが大きい順序)