

ボンディングワイヤの集中定数等価回路モデル抽出

Extraction of Lumped Element Equivalent Circuit Model of Wirebonds

石飛 徳昌†
N.Ishitobi
†有限会社ソネット技研
Sonnet Giken Co.,Ltd.

和田 光司‡
K.Wada
‡電気通信大学
UEC

あまし： 平面系電磁界シミュレータでボンディングワイヤを解析しその集中定数等価回路モデルを導出した。さらにSPICEで時間軸解析しその有効性を確認した。先ずモデル化に必要な帯域と精度を考察し、円形と円弧を平面構造に置き換えて電磁界解析を行った。さらに高速な解析が可能な長方形モデルと、集中定数等価回路モデルの近似式を導出した。導出したモデルを使ってボンディングワイヤを通過した高速信号の波形歪を解析しモデルの有効性を確認した。

キーワード： 平面系電磁界シミュレータ, ソネット, ボンディングワイヤ, 波長, 等価回路, 抽出
Keywords: planer em-simulator, Sonnet, wirebond, wavelength, equivalent circuit, extraction

1 まえがき

CAE環境の進歩と回路システムの複雑化にともない、構成要素の全てを見た目そのままに仮想環境中に再現して電磁界解析を行いたいとの要求が寄せられるようになった。ところが最新の計算機資源を惜しみなく投入したとしても電磁界シミュレータがそのような要求に応えることは難しいし、一見複雑な問題でも初歩的な知見に基づいて単純な問題に帰着できることが多い。本小論ではそのような問題の一例としてボンディングワイヤを取り上げる。

先ずボンディングワイヤの一般的な属性を踏まえて目標を設定する。次に高速な電磁界解析を行うためのいくつかの単純化したモデルの導出とその検証を行う。さらに電磁界解析を必要としない集中定数等価回路モデルの近似式を導出する。最後に集中定数等価回路モデルと電磁界解析の結果を使用して高速信号の波形歪を解析し、集中定数等価回路モデルの有効性を検証する。

2 ボンディングワイヤの特徴[1]

2.1 波長より小さい

ボンディングワイヤの共振や放射を積極的に利用する例外的な設計[2]を除いて、ボンディングワイヤの長さは、それを通過する信号の波長より遙かに小さい。それゆえボンディングワイヤ自身をインダクタとして扱うことができる。またボンディングワイヤ両端のボンディングパッドはさらに小さいことから、それをキャパシタとして扱うことができる。電極の構造寸法からキャパシタンスを求めることは、ワイヤの寸法からインダクタンスを求めるよりずっと容易であることから、本小論ではワイヤについてだけ考える。

2.2 比較的要求精度が低い

ボンディングワイヤが回路ブロックと回路ブロッ

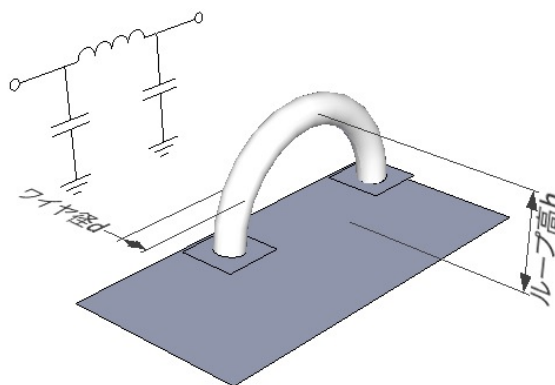


図1 ボンディングワイヤの構造と集中定数等価回路

クの間信号の接続に使用されるとき、ワイヤのインピーダンスは負荷インピーダンスより十分低いことが望ましい。あるいはボンディングワイヤが回路ブロックを接地する経路に使用されるとき、ワイヤのインピーダンスは接地しようとする回路ブロックのインピーダンスより十分小さいことが期待される。いずれの場合であれ、ワイヤは十分小さなインピーダンスであるかどうかの問題であって、特定の値は必要とされない。そこで本小論では一般に流通している個別部品と同程度の±5%程度を目標とする。

2.3 円弧形状である

ボンディングワイヤは空中に弧を描いて配置されるし、ワイヤ自身の断面形状も円形の場合が多い。この形状を再現するために四面体要素を使う3次元有限要素法が好まれる。しかし他の回路構造や多数のワイヤについて一度に電磁界解析を行うための計算負荷はとて大きい。そこで本小論ではより高速な平面系電磁界シミュレータでボンディングワイヤの形状的特徴を再現することを試みる。

3 円弧形状の平面三次元電磁界解析

3.1 円形断面

円形断面の導体と、等価なインダクタンスを持

つリボン状断面と正方形断面の導体を考える。

導線のインダクタンスについては多くの研究がなされている。例えば文献[3]の式(6.2.1.1)と式(6.2.2.1)によれば、周波数が低く、長さが断面に対して十分長い場合に

$$L_{\text{round}} = 2 \times 10^{-4} \left(\ln \frac{4l}{d} + \frac{d}{2l} - \frac{3}{4} \right) (\text{nH}/\mu\text{m})$$

$$L_{\text{ribbon}} = 2 \times 10^{-4} \left(\ln \frac{l}{w} + 0.2235 \frac{w}{l} + 1.193 \right) (\text{nH}/\mu\text{m})$$

である。ここで d は円形断面の直径、 w はリボン導体の幅、 l は導体長である。ここで $w=kd$ と置いて上の2式が等しくなる k を求めれば、 $w=1.75d$ なるリボン導体と直径 d なる円形断面の導体が等価なことがわかる。

次に、正方形の断面については、正方形が円に内接する場合と外接する場合の中間の時に円形断面の導体と概ね等価になると考えるとその断面の辺長 s は

$$s = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{2}} \right) \cdot d \approx 0.85 \cdot d$$

となる。

電磁界シミュレータで長さ2mmの導体に関して検証した結果を図2に示す。リボン状断面の場合は $w=2.1d$ 程度、正方形の場合は $s=0.85d$ の時に直径 $d=0.254\text{mm}$ の円形断面の導体と等価になることがわかる。この関係を使えば円形断面の導体と等価なモデルを平面系電磁界シミュレータで再現することができる。

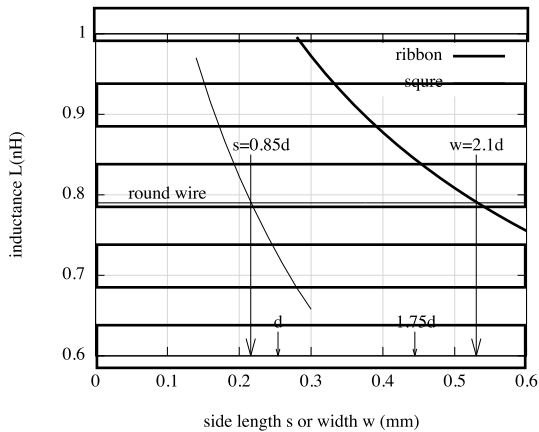


図2 円形、正方形、リボン状の断面導体のインダクタンス

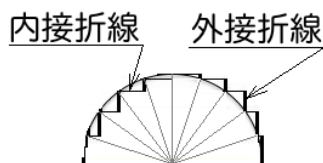


図3 折線モデルの構造

3.2 半円状のワイヤループ

ボンディングワイヤがループ高さ h の半円状をなしているとき、これと等価なマイクロストリップ線路とviaの組合せを求める。

図3のように、半円を $2N$ 個に分割し外接する折線と内接する折線で近似したモデルについて分割数を増やしながら電磁界解析を行った。図4は、 $h=1000\mu\text{m}$ 、 $d=10\mu\text{m}$ の場合の結果で、自己共振周波数と、低い周波数での等価インダクタンスはそれぞれ56GHz、3.8nHに単調に収束した。そして分割数 N を5にしたときの結果は収束値の $\pm 5\%$ 以内であった。

次に図5のような長方形モデルを考える。この長方形の高さをループ高さ h の87%にした場合の解析結果を、上述の折線近似 $N=5$ の結果と共に図6に示す。ワイヤ径 $d=10\sim 100\mu\text{m}$ 、ループ高さ $h=100\sim 1000\mu\text{m}$ の範囲で、折線モデルの収束値によく一致している。しかも解析時間は $N=5$ の折線モデルの1/5であった。

4 集中定数等価回路の抽出

4.1 インダクタンス

長方形モデルの近似式

$$L_{\text{approx}} = h(k_1 \cdot \ln \frac{h}{d} - k_2) (\text{nH})$$

を求める。図6のデータを上式の L_{approx} 、 h 、 d に与えて連立方程式を解けば係数が求まり、

$$L_{\text{approx}} = h \cdot (7.04 \times 10^{-4} \ln \frac{h}{d} + 3.80 \times 10^{-4}) (\text{nH})$$

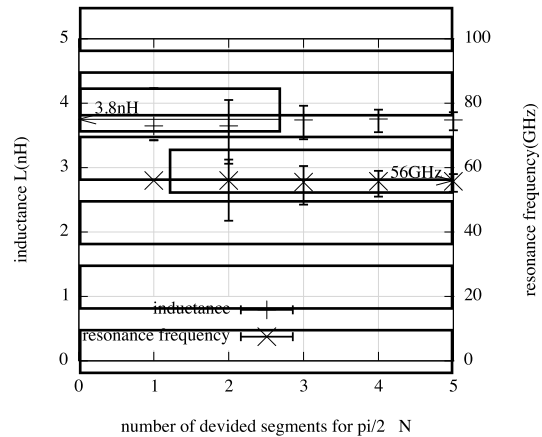


図4 折線モデルの収束性

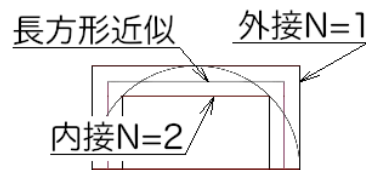


図5 長方形近似モデルの構造

を得る. この近似式と長方形モデルの電磁界解析結果は図7のようによく一致する.

4.2 隣接したワイヤの結合係数

図5の長方形モデルを隣接して平行配置しその間隔 D と結合係数 k の関係について電磁界解析を行った. $D=0$ のとき $k=1$ で $D=\infty$ のとき $k=0$ であることは自明であることから, k は概ね

$$k = e^{-c \cdot \frac{D}{h}}$$

に従う. この指数部を一次関数とし, D/h が0.316~3.16の範囲で電磁界解析結果と一致するよう係数を最適化して,

$$k_{\text{approx}} \approx e^{-1.29 \cdot \frac{D}{h}} - 1$$

なる近似式を得た. 図8はワイヤ径 $d=10 \mu\text{m}$ の場合の結果で, この近似式と電磁界解析の差は ± 0.05 以内である.

5 波形歪解析への応用

図9のように $d=10 \mu\text{m}$, $h=1000 \mu\text{m}$ のボンディングワイヤを $D=316 \mu\text{m}$ 隔てて配置した構造を結合インダクタでモデル化し, それを高速な差動信号が通過したときの波形歪を解析した. 結合インダクタモデルの妥当性を確認するため図9の折線近

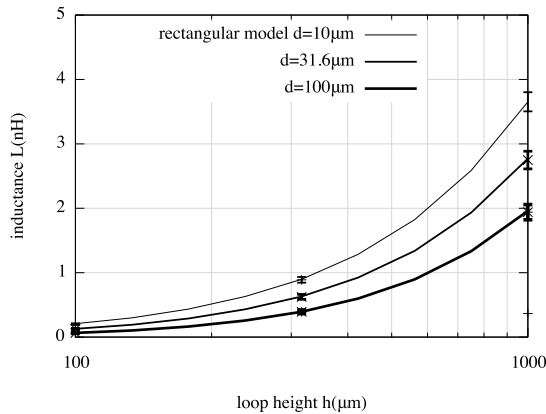


図6 長方形モデルの電磁界解析結果

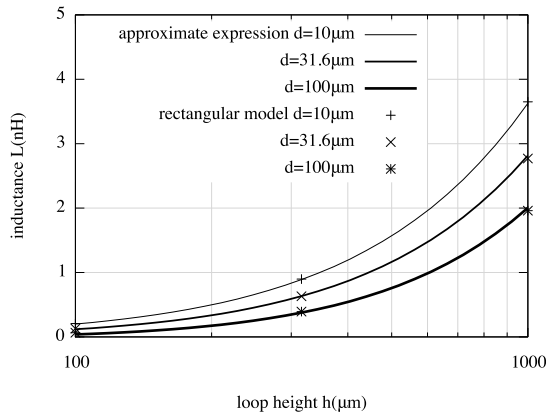


図7 近似式と長方形モデルのインダクタンス

似モデルを100GHzまで電磁界解析し, その結果を使った同様の解析も行った. 図10は, それら二つのSPICEモデルである. 信号源 V_p, V_n はそれぞれ振幅 $1V_{p-p}$, 立ち上がり時間 T_r , 立ち下がり時間 T_f はそれぞれ周期の7.5%の矩形波で, 50Ω の内部抵抗を持っている.

図11はボンディングワイヤを通過した信号の負荷抵抗 R_p の両端電圧の周波数成分である. 図11(左)の2GHzの矩形波の結果より, 二つのモデルは第5高調波まで一致するが, 第7高調波では1dB, 第9高調波では3dBの差が現れることがわかる. 図11(右)は10GHzの矩形波の場合で第3高調波でも4dB, 第5高調波では10dBもの差があり, この領域ではもはや結合インダクタモデルを使用することはできない. このボンディングワイヤは図4の通り56GHz付近に共振周波数が出現していることから, これらの結果は妥当である.

図12はそれぞれの時間軸波形である. 図12(右)の10GHzの時間軸波形を見るに集中定数等価回路モデルは実用的に思われるが, 図11で2GHzと10GHzの基本波成分を比較すれば, 10GHzの基本波は5dB程度減衰していることがわかる. このように高速信号の伝送特性は周波数領域で観測した方が要因を把握しやすい.

6 まとめ

ボンディングワイヤのシンプルな集中定数等価回路モデルを導出し, 予想される有効範囲で厳密な電磁界解析モデルと等価な結果が得られることを確認した. これにより多量のボンディングワイヤを含む系の解析に計算負荷の小さい集中定数等価回路モデルが利用できる可能性を示した.

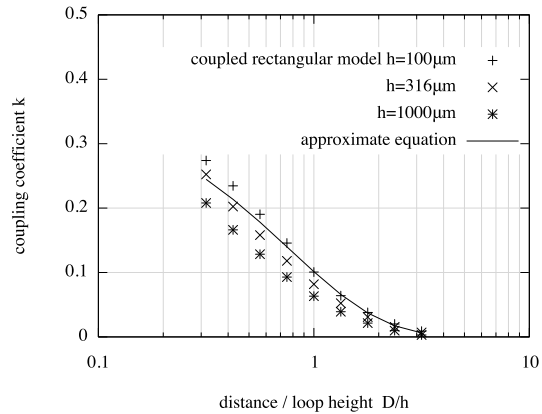


図8 隣接して配置した長方形モデルの結合係数

参考文献

- [1] Dean L.Monthei, "Package Electrical Modeling, Thermal Modeling, and Processing for GaAs Wireless Applications," Kluwer Academic, 1999, ISBN 0-7923-8364-8.
- [2] 堤 由佳子, 伊藤 敬義, 尾林 秀一, 庄木 裕樹, 諸岡 翼, "ミリ波帯ボンディングワイヤアンテナのインピーダンス整合改善," 2010年信学総大, BS-1-1, Mar.2010.
- [3] Brian C.Wadell, "Transmission Line Design Handbook," Artech House, 1991, ISBN 0-89006-436-9.

連絡先

連絡先氏名 石飛 徳昌
 所属機関 有限会社ソネット技研
 所在地 〒285-0858 千葉県佐倉市
 ユーカリが丘5-1-1-706
 電話番号 (043)463-6663
 FAX番号 (043)463-6773
 E-mail tovy@ieee.org

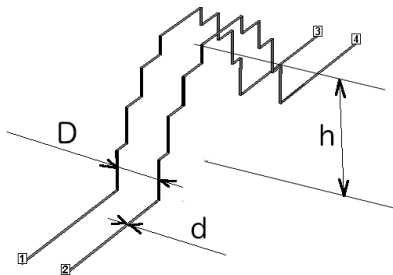


図9 隣接して配置されたボンディングワイヤの構造

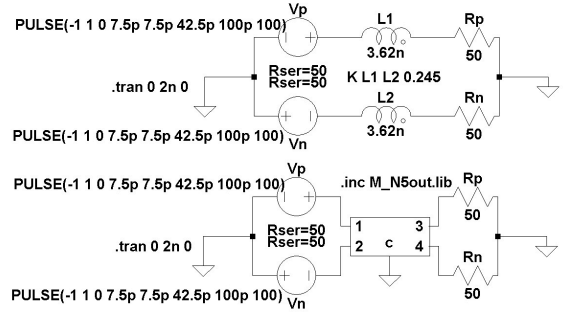


図10 SPICEモデル (上)結合インダクタモデル (下)折線モデル

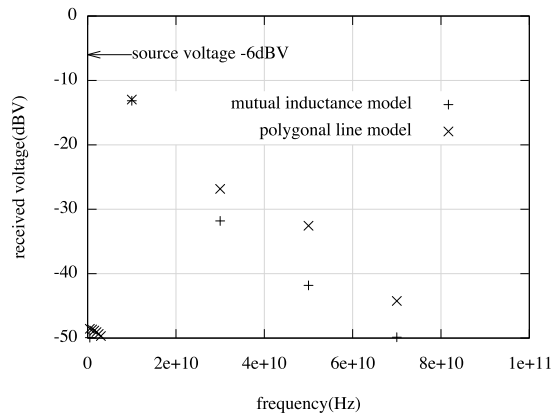
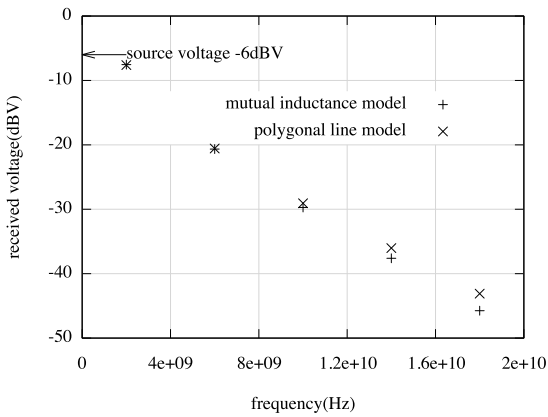


図11 出力電圧(R_p 両端電圧)の周波数成分 (左)2GHz (右)10GHz

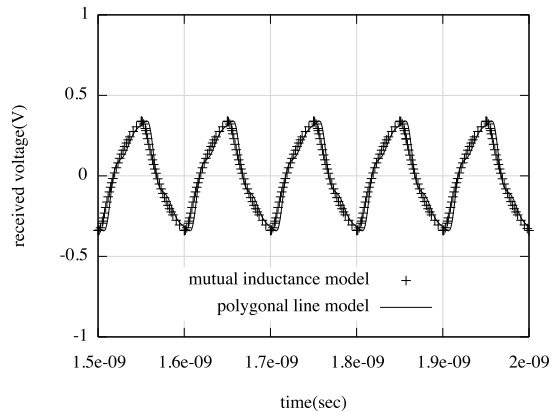
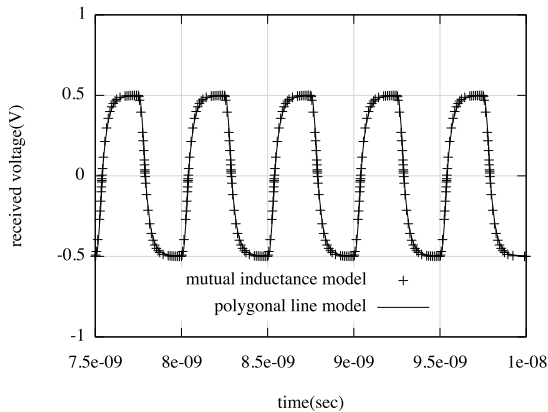


図12 出力電圧(R_p 両端電圧)の時間領域波形 (左)2GHz (右)10GHz