

第6章 結論

6.1 まとめ

ワイヤレス電力伝送の新しい方式として 2006 年に出現した電磁界共振結合は、研究が始まったばかりであり、多くの研究課題があった。まず、現象自体の解明を必要とし、アンテナ近傍で起こっている現象を理解する必要があった。そして、大きなエアギャップで高効率の電力伝送が出来ることの理論的裏付けを必要とし、定式化して理論を体系化する必要があった。最後に、電磁界共振結合がワイヤレス電力伝送技術として実用レベルで実現可能であることの検証を必要とした。

本論文において、磁界型アンテナとしてヘリカルアンテナとスパイラルアンテナを提案し、電界型アンテナとしてメアングラインアンテナを提案した。それぞれ大エアギャップかつ高効率の電力伝送が可能である。現象面では、電磁界共振結合によっておこるアンテナ近傍電磁界の振る舞いを検証し、2つの共振周波数において、磁気壁と電気壁を形成している事を確認した。また、磁界共振結合と電界共振結合の対称性を近傍電磁界から確認した。大きなエアギャップと高効率を実現する電磁界共振結合を等価回路で定式化した。そして、磁界共振結合と電界共振結合の対称性も確認した。これにより、アンテナ自体の設計や周辺回路設計を容易にし、現象面においても見通しが立てられるようになった。

等価回路化が成功したので、そこから様々な発展を行なった。まず、周波数を自在に操るためにオープン・ショート型のアンテナを提案し、オープンとショート型は共振や反共振という特性によって大きくその性質が変わりかつ対称的な特性を持つ事を示した。そして、オープン・ショート型アンテナにコンデンサやコイルを挿入する事で周波数を調整する方法を示した。更に、等価回路化した事により、大エアギャップと高効率を実現する電磁界共振結合の最大効率とエアギャップ限界を定式化する事ができた。これにより、最大効率で動作させる方法や、大エアギャップかつ高効率を達成させるために必要なアンテナ設計が行なえる。また、MHz に縛られていた周波数を kHz~MHz~GHz まで自在に扱える事を実証した。kHz ではパワーエレクトロニクスの技術を使えば制御を容易に行うことが出来る。また、GHz では、通信で培われた技術と融合する事により、情報と電力を同時に送受することが出来るなど、他の分野との融合で電磁界共振結合は更なる進化が可能となる。また、等価回路を用いて、効率と電力との関係を明らかにし、小信号での実験の正当性を明らかにした。同時に、高 Q のアンテナにおいて大電力を扱う際に気をつける点、大きさや周波数変化によるスケール則が Q 値に及ぼす影響などを示した。また、等価回路から非対称アンテナの有効性を示し、非常に位置ずれに強い非対称アンテナの提案を行なった。非対称アンテナは、実用においては非常に有効的である。特に、駐車場における位置ずれ対策としては、従来方式に比べ圧倒的に強く、また、今後の移動体への給電においても重要な役割を担う。更に、等価回路を用いて、電磁誘導と磁界共振結合の差異について明らかにし、単なる力率補償ではなく、共振とインピーダンスマッチングによる電磁界共振結合による電力伝送は高効率大エアギャップを達成できることを示した。この様に、電磁界共振結合の理論体系化に貢献を行なった。

更に、電磁界共振結合がワイヤレス電力伝送として実用的に使用するための方法として、電磁界共振

結合用追従制御システムを提唱した。電磁界共振結合は、大エアギャップかつ高効率を達成できるので、従来のワイヤレス電力伝送とは一線を画し、使用用途も固定型ではなくリアルタイムで位置が変わる受信アンテナを前提としたワイヤレス電力伝送技術である。そのため、リアルタイムに変わる電気的特性においても、高効率かつ大エアギャップを達成させるために、最大効率を追従する制御システムを提案し、周波数追従制御やインピーダンスマッチング制御方式において、その有効性を実証した。また、電気自動車へのワイヤレス充電として、本システムが適応できる事を、基礎的な要素において実証した。

6.2 今後の課題

電磁界共振結合の基本的な性質や、電磁界共振結合用のシステムの基本設計の提案や実証実験を行った。しかしながら、本論文において述べたことは、電磁界共振結合のはじまりであり、ここからの発展や研究課題は多岐に渡る。そこで、その一端について述べる。

まず、本研究においては、電磁界共振結合の基本性質を調べるために、送信アンテナと受信アンテナは1対1に限定したが、実用化を考えると、1対多や多対多のシステム設計やアンテナ特性の改善が必要である。更に、直接1対多とせず、共振器コイルを中継コイルとして延長した場合における検討もこれからである。非対称アンテナと同様、移動体への給電を考えた場合、そして、ユビキタスエネルギー社会を考えた場合には、非常に重要なテーマとなる。

学問としては、電磁誘導と共振器と磁界共振結合の磁界結合に関する統一性を示したが、電磁誘導の電界版にあたる現象と共振器と電界共振結合の統一性を実証すれば、全ての現象を統一的に論じる事が出来る。そのためには、等価回路化で論じる方法以外に、マクスウェルの方程式に立ち戻り、磁束や電束のあたりから再度検証する必要性もある。

現象としては、スケールの大きな共振器として考えると現象面においては一番近いといえる、一方、特殊なケースの電磁誘導方式として捉える事もでき、電磁誘導やkHzあたりの低周波で使われてきたパワーエレクトロニクスとの融合で、制御を容易に行なう事により、電磁界共振結合の分野はより一層発展していくものと思われる。

本論文が、この電磁界共振結合という新しい分野の学問発展や産業界発展に貢献し、人々の心豊かな生活の一翼を担えれば幸いである。

謝辞

本研究の遂行にあたり、指導教官である堀洋一教授には、ご多忙であるにも関わらず、熱心なご指導と的確な助言を頂きました。自由な発想のもと研究活動が出来る機会を与えて頂いたおかげで、その喜びを享受するだけでなく自立した研究への取り組み方など、多くのことを学ぶ事ができました。博士課程から取り組んだ研究で時間が限られていたにも関わらず、本論文が完成に至ったのは、堀教授のご助力の賜物であり、ここに深く感謝の意を表します。

内田利之技官には、本研究室で全く初めての本研究テーマを行なうにあたり、研究環境を一から作り上げるにあたって多くの助言と協力をして頂き、心より感謝申し上げます。

研究を始めるにあたって、東京大学大崎博之先生、古関隆章先生、野崎雄一郎様に多くの助言を頂き、また、昭和飛行機工業高橋俊輔様、山本多喜男様には、多くを学ばせて頂き、そして、堀研先輩の JAXA 坂井真一郎先生や豊田中央研究所梅野孝治様には、多くのアドバイスを頂き、心より感謝申し上げます。

京都大学篠原真毅先生、埼玉大学名誉教授小林禧夫先生、同じく埼玉大学阿部茂先生、東京大学小紫公也先生には、突然の訪問にも関わらず、研究のご相談をさせて頂き、また多くの助言を頂き、心より感謝申し上げます。

ワイヤレス研究会開催にあたっては、徳島大学大野泰夫先生、東京大学森川博之先生、翁長久先生、埼玉大学古川実様にご協力頂き、心より感謝申し上げます。

高周波アンテナ作成時には、東京大学高宮真先生、島本潤吉様にご協力頂き、心より感謝申し上げます。

博士論文予備審査と本審査におきまして、大崎博之先生、古関隆章先生、櫻井貴康先生、高宮真先生、廣瀬明先生には、的確な指摘や助言を頂き、研究の幅と質を向上させることができ、心より感謝申し上げます。

最後に、呉世訓先生、秘書の降籬明子様、ワイヤレスチームの皆様をはじめとし、堀研の学生の皆様方には普段の生活から研究のことまでお世話になり、心より厚く御礼申し上げます。

付録A 近傍電磁界

“2.3.2 ヘリカルアンテナの近傍電磁界”では、2素子における共振周波数 f_m' 、 f_e' における近傍磁界の半周期分の振る舞いを示した。ここでは1素子における共振周波数 f_0 の磁界の様子を図A.1に示す。

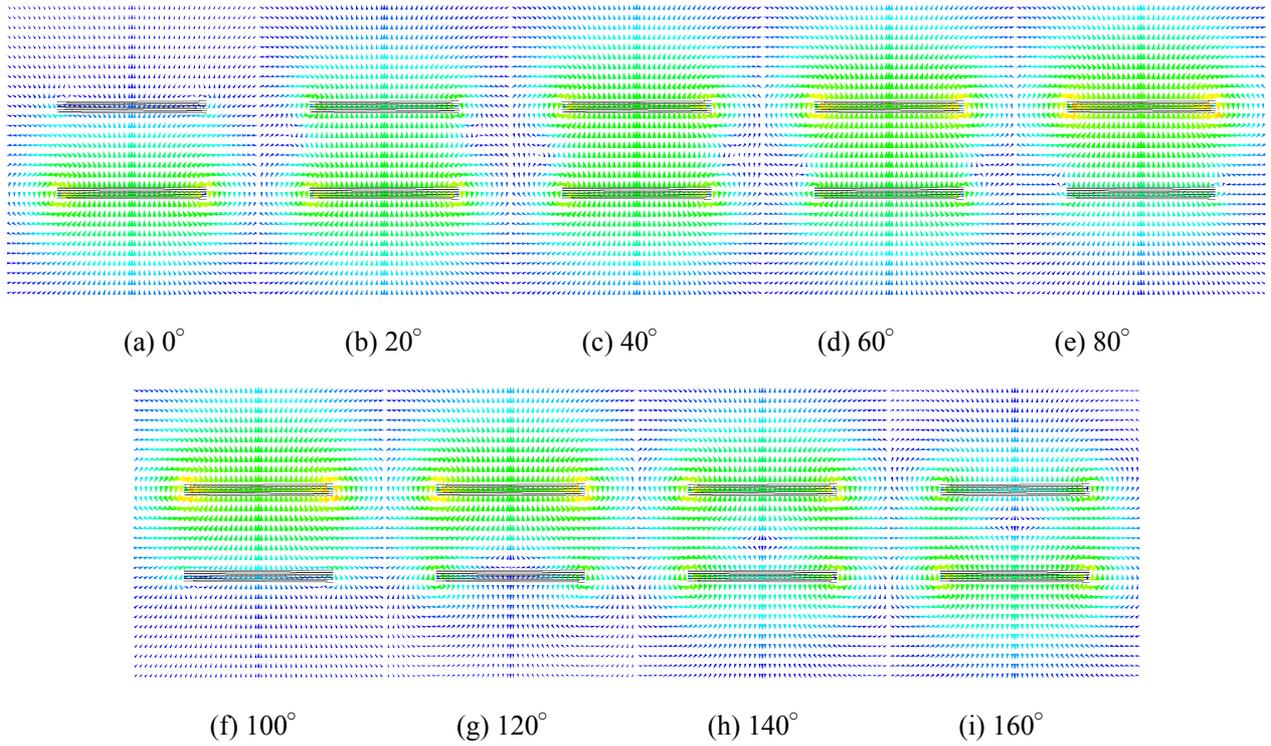


図 A.1 f_0 における半周期の磁界変化，ベクトル表示

付録B 共振周波数 $f_{01} \neq f_{02}$ の検証

“4.7.1 送信アンテナと受信アンテナの共振周波数の関係”において、 $f_{01} \neq f_{02}$ における電力伝送効率の悪化の様子を検証し、(i) 送信側の共振周波数をキャパシタンス C_1 によって変化させる場合、(ii) 送信側の自己インダクタンス L_1 によって変化させる場合、そして、同様に (iii) 受信側の共振周波数をキャパシタンス C_2 によって変化させる場合、(iv) 受信側の自己インダクタンス L_2 によって変化させる場合の4つの場合について検討を行なった。その際省略した結果を記載する。

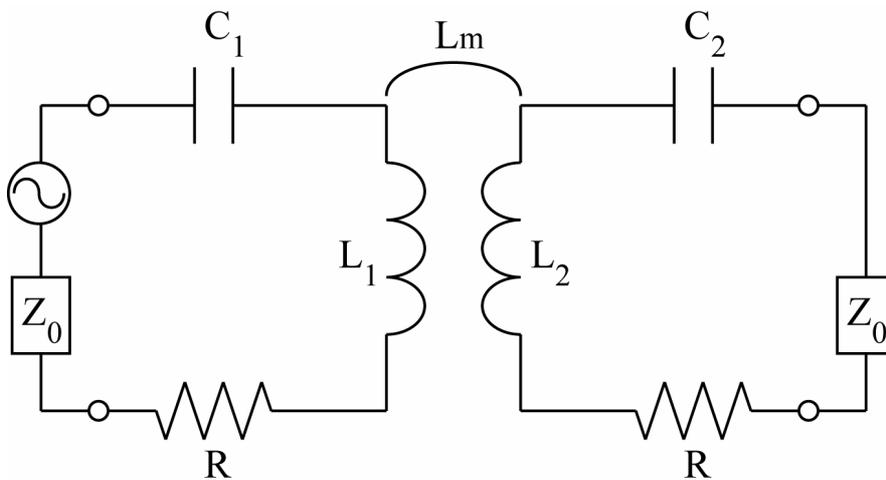


図 B.1 送信側と受信側の共振周波数が一致しない場合の等価回路

(i) 送信側キャパシタンス C_1 変化によって共振周波数 f_{01} が変化したときの電力伝送効率

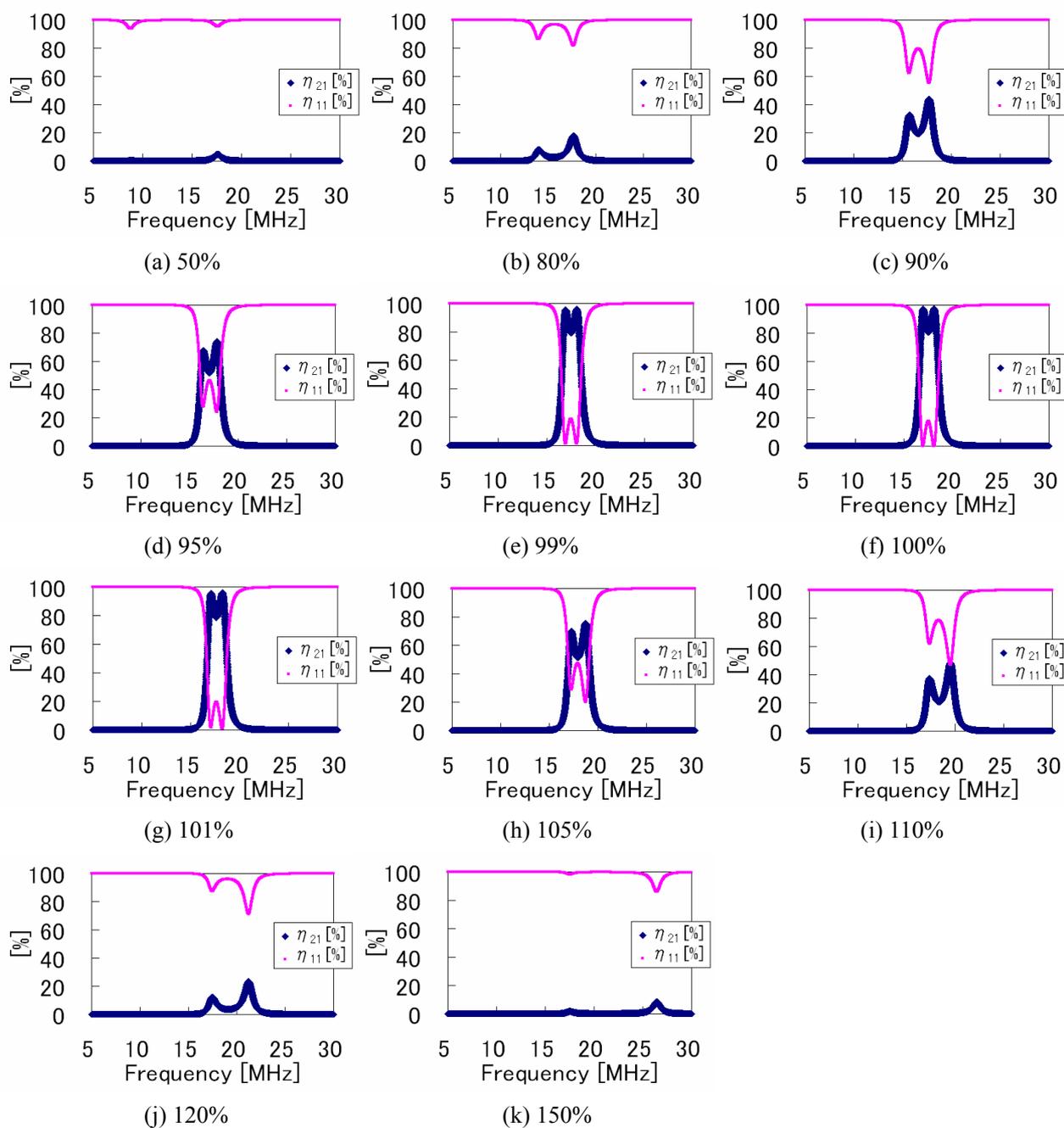
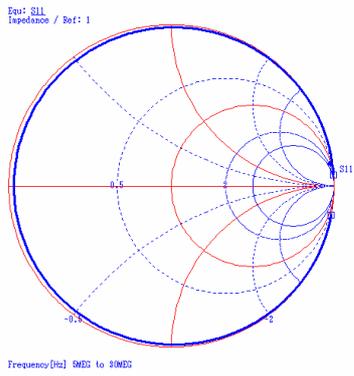
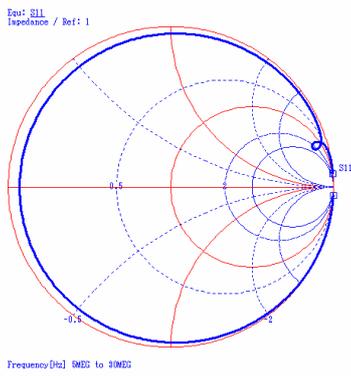


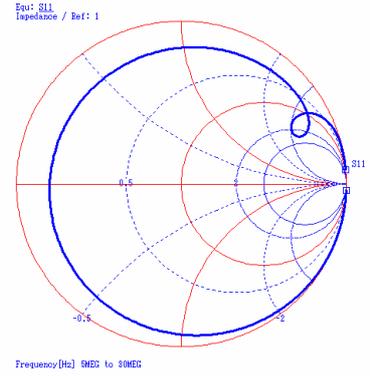
図 B.2 C_1 変化時のエアギャップと共振周波数と効率の関係



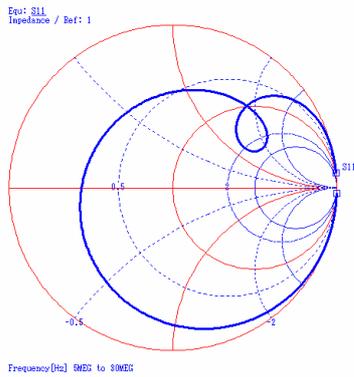
(a) 50%



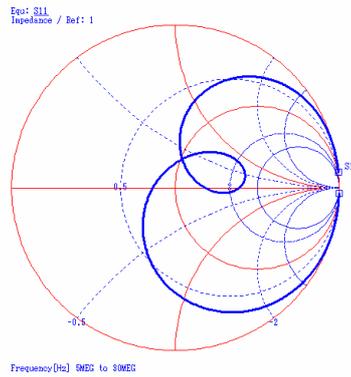
(b) 80%



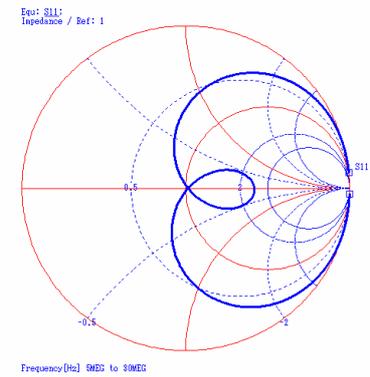
(c) 90%



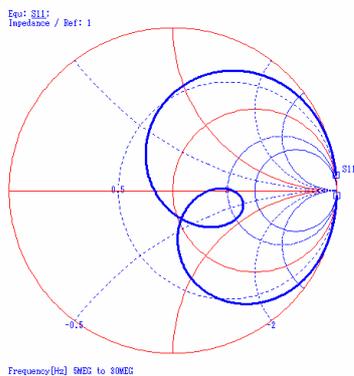
(d) 95%



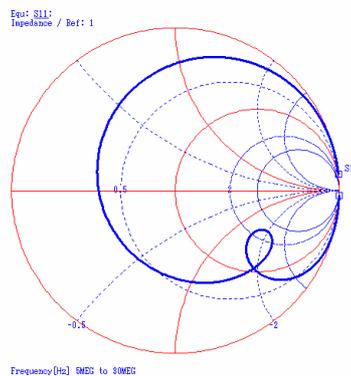
(e) 99%



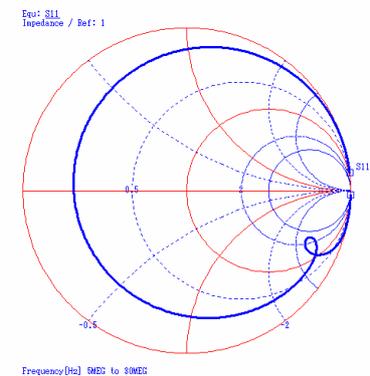
(f) 100%



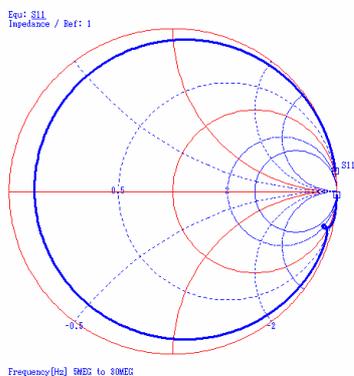
(g) 101%



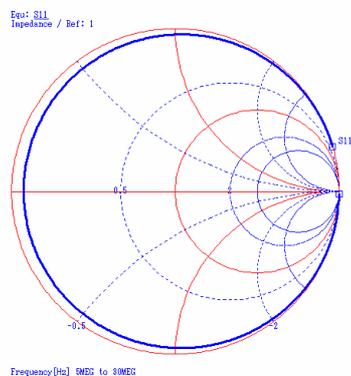
(h) 105%



(i) 110%



(j) 120%



(k) 150%

図 B.3 C_1 変化時のエアギャップとスミスチャートの関係

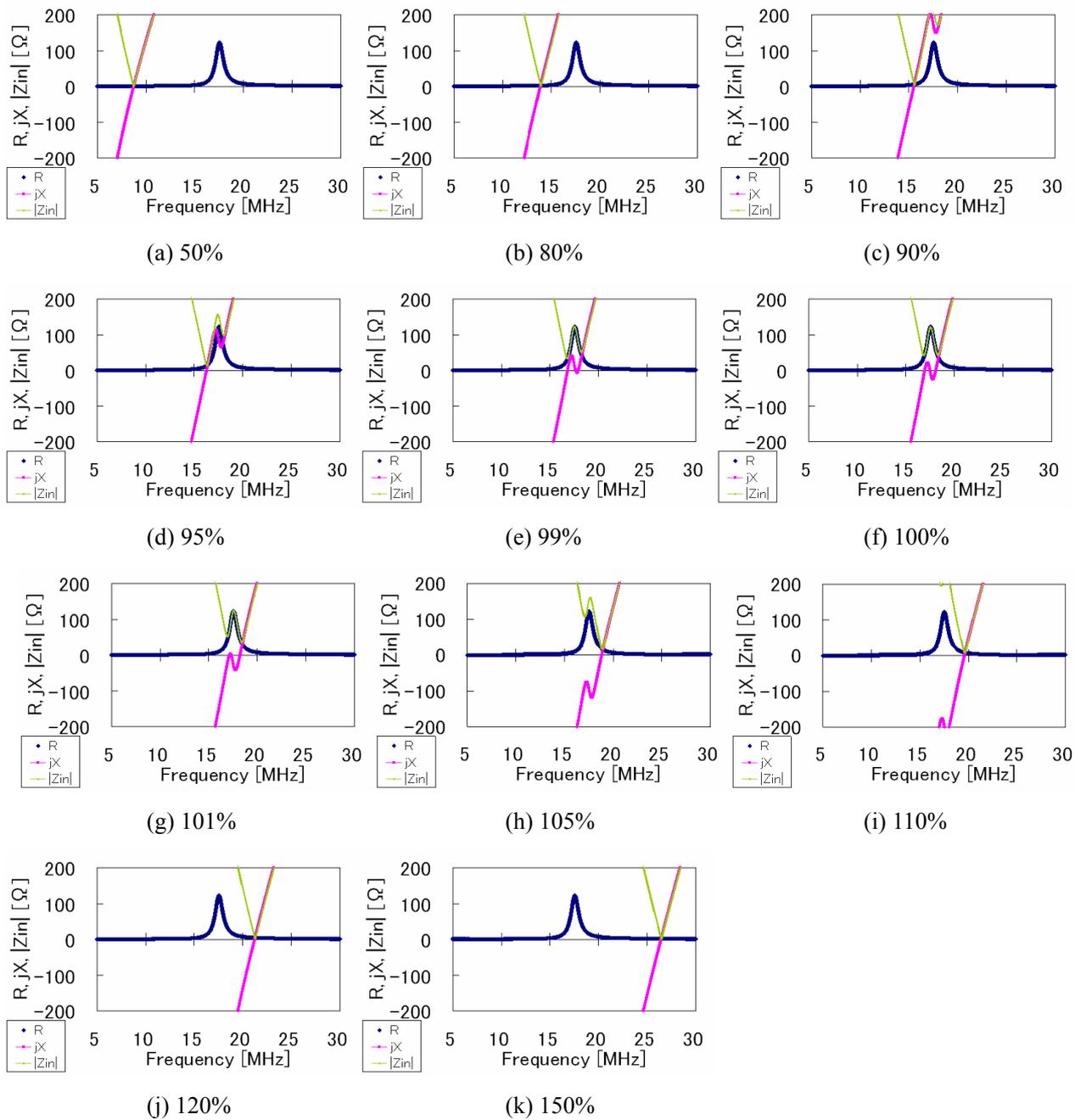


図 B.4 C_1 変化時のエアギャップと入力インピーダンスの関係 (拡大)

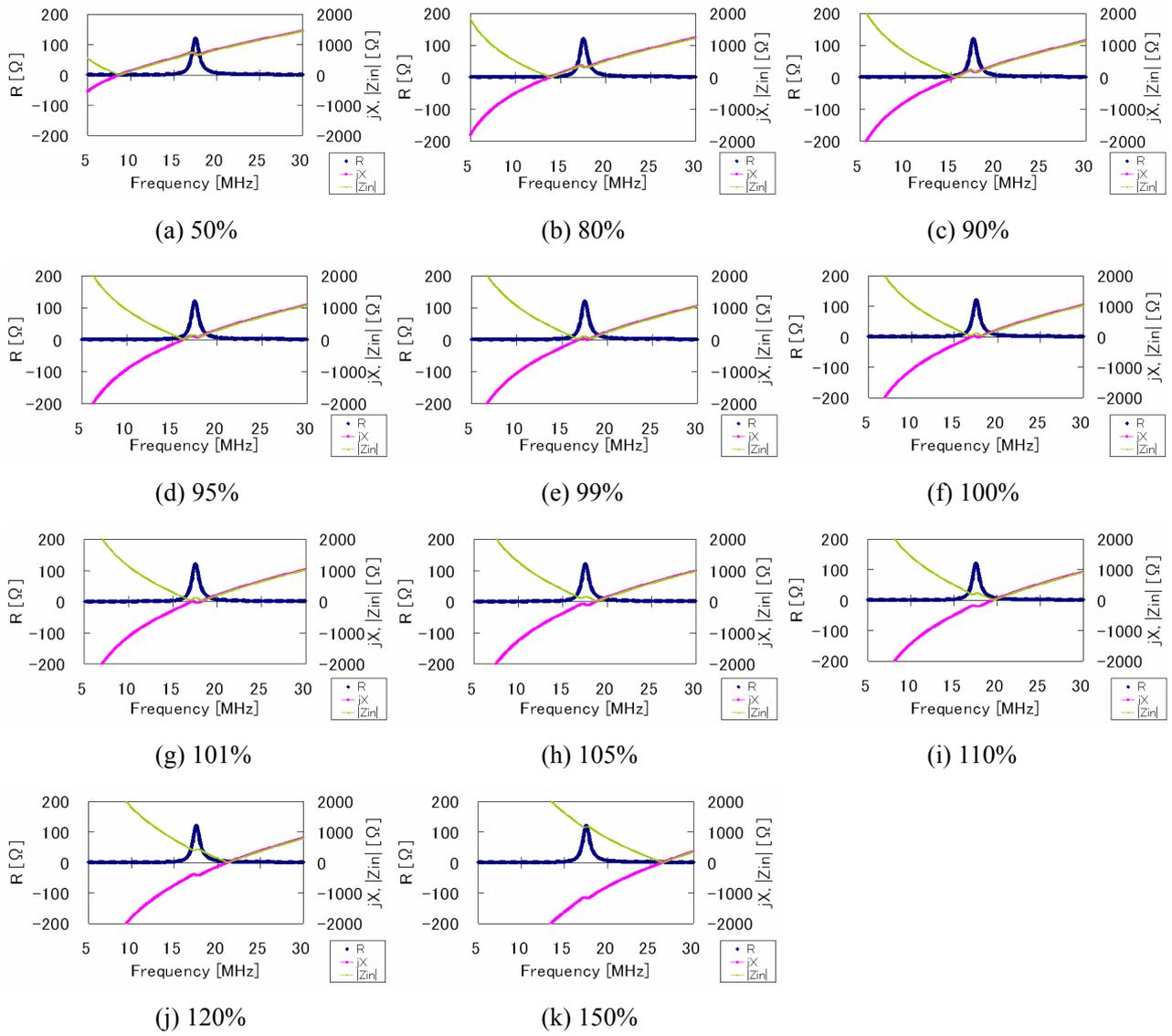


図 B.5 C_1 変化時のエアギャップと入力インピーダンスの関係 (全体)

(ii) 送信側自己インダクタンス L_1 変化によって共振周波数 f_{01} が変化したときの電力伝送効率

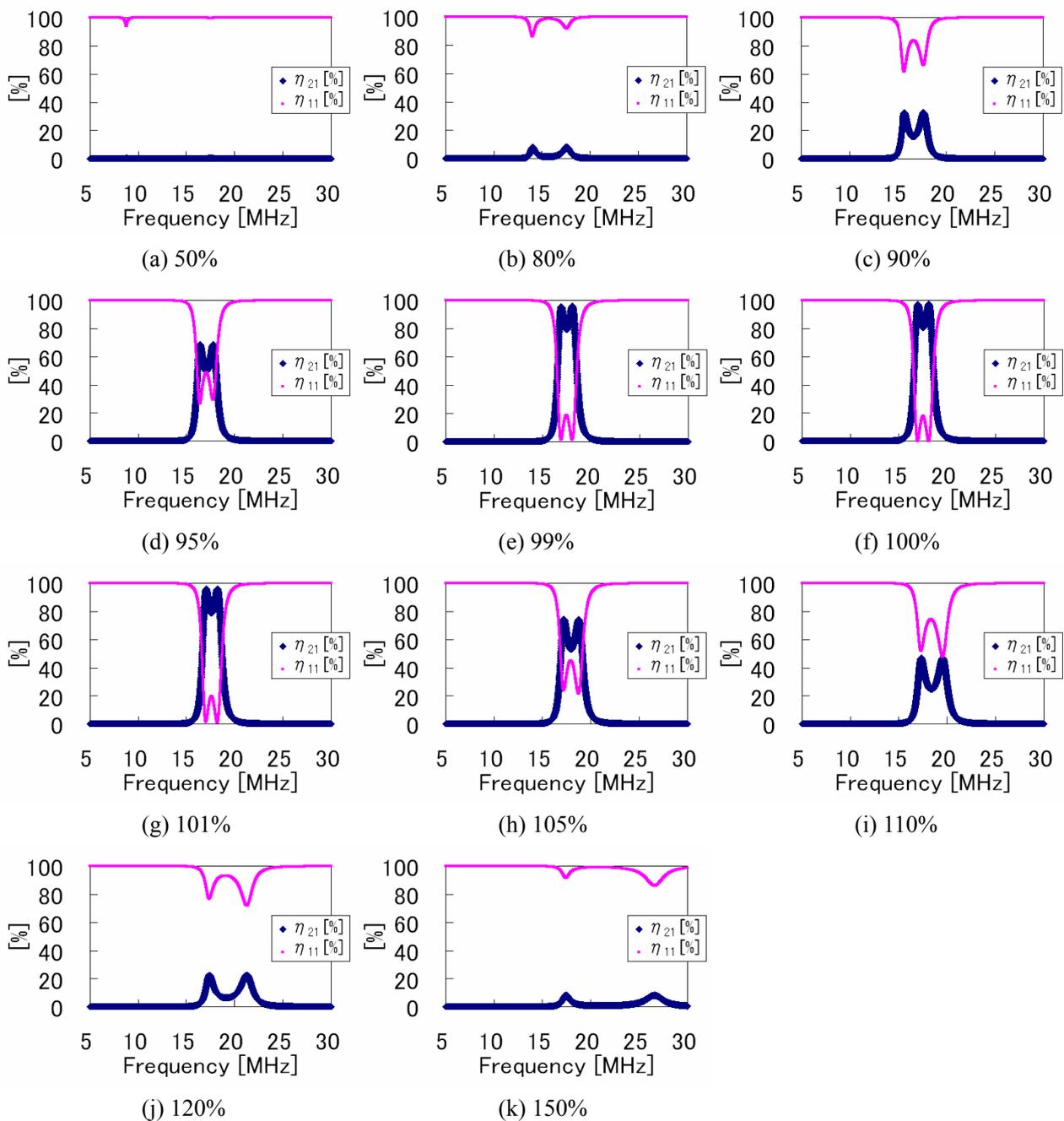
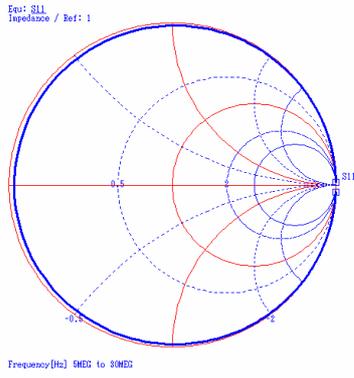
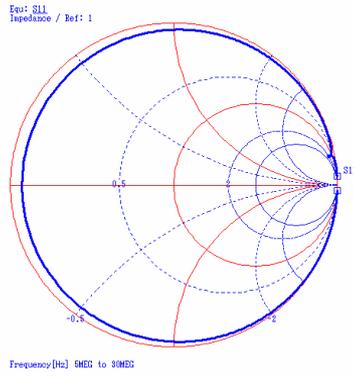


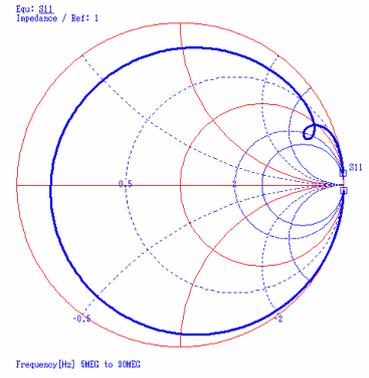
図 B.6 L_1 変化時のエアギャップと共振周波数と効率の関係



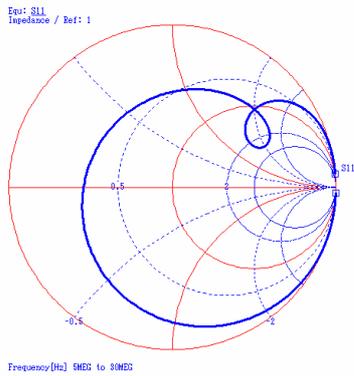
(a) 50%



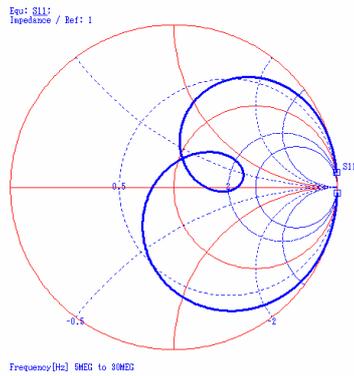
(b) 80%



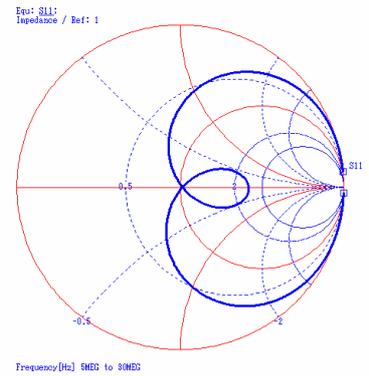
(c) 90%



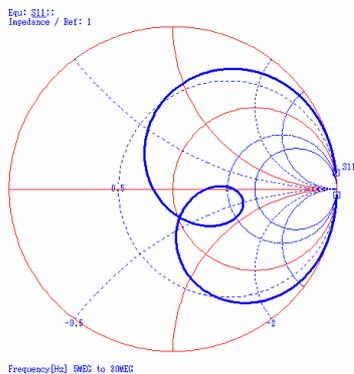
(d) 95%



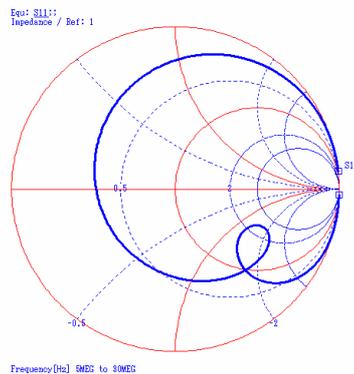
(e) 99%



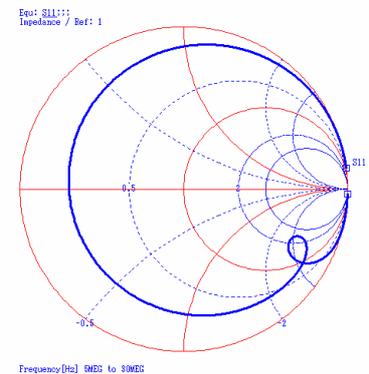
(f) 100%



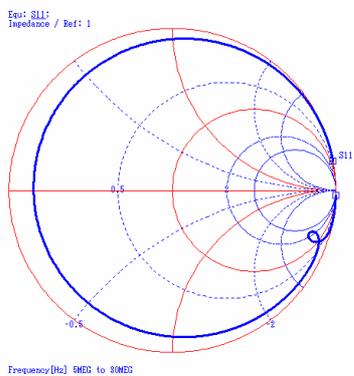
(g) 101%



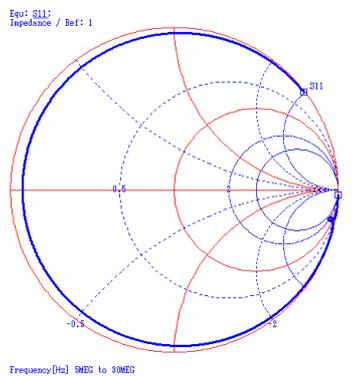
(h) 105%



(i) 110%



(j) 120%



(k) 150%

図 B.7 L_1 変化時のエアギャップとスミスチャートの関係

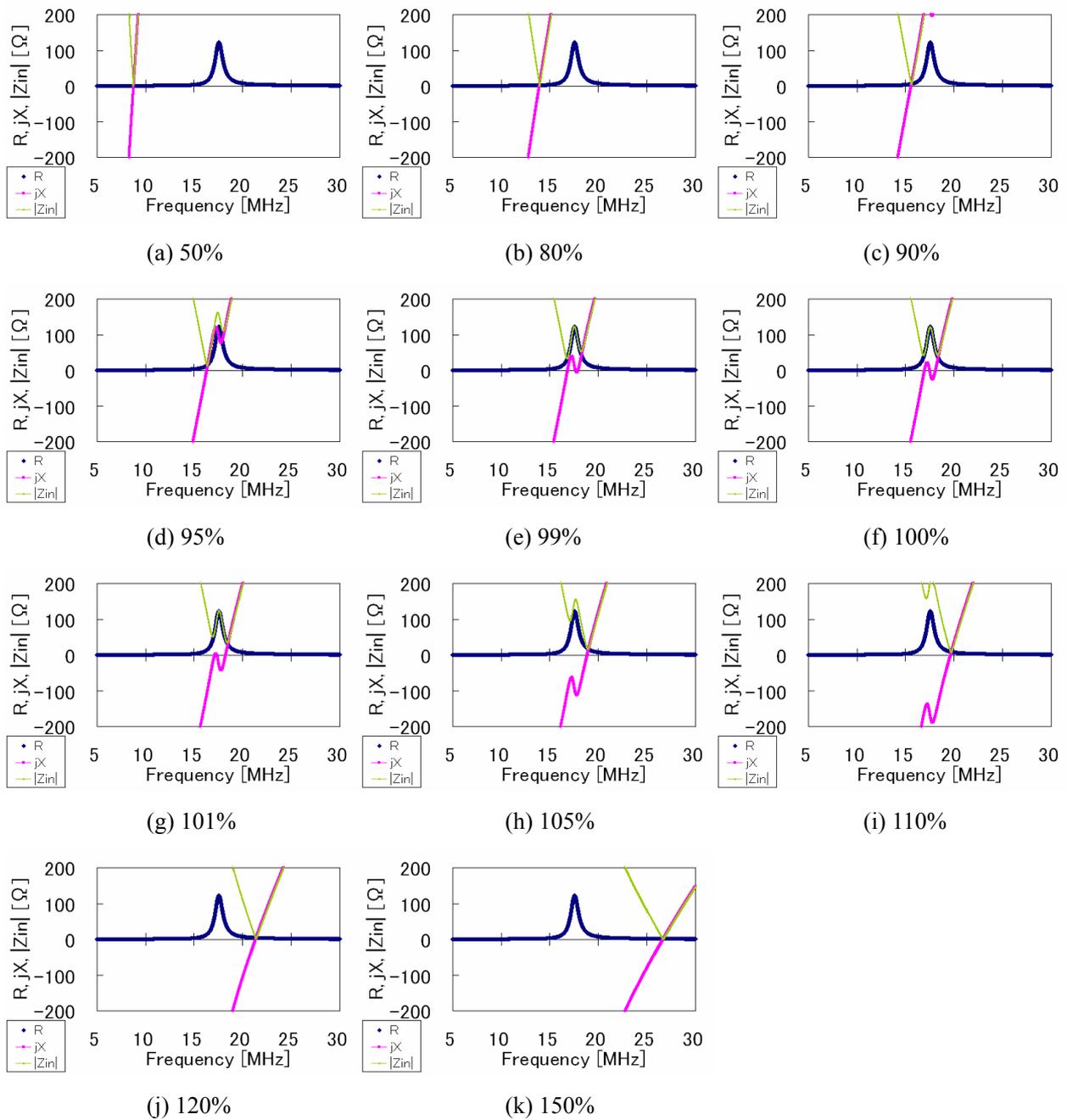


図 B.8 L_1 変化時のエアギャップと入力インピーダンスの関係 (拡大)

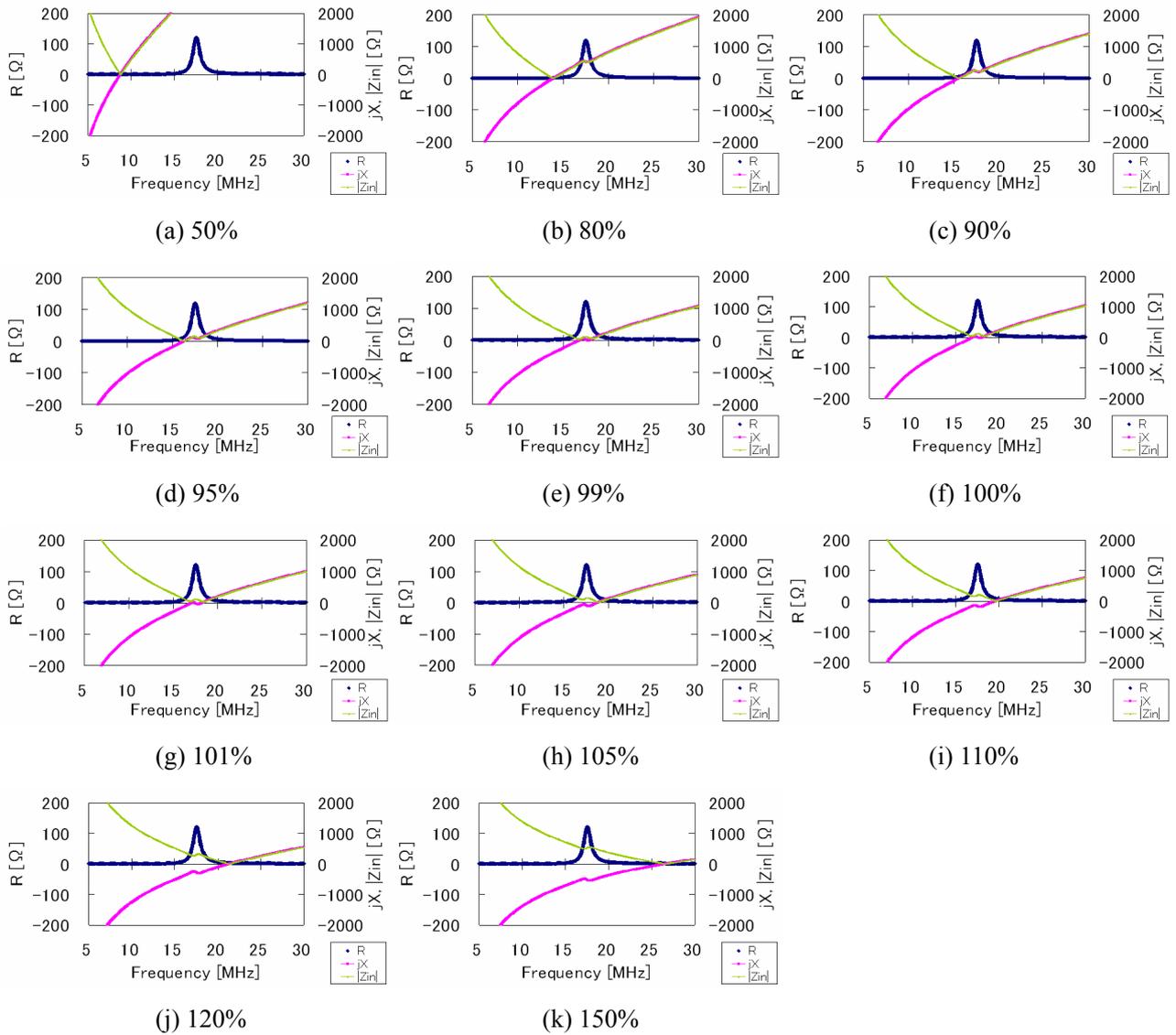


図 B.9 L_1 変化時のエアギャップと入力インピーダンスの関係 (全体)

(iii) 受信側キャパシタンス C_2 変化によって共振周波数 f_{02} が変化したときの電力伝送効率

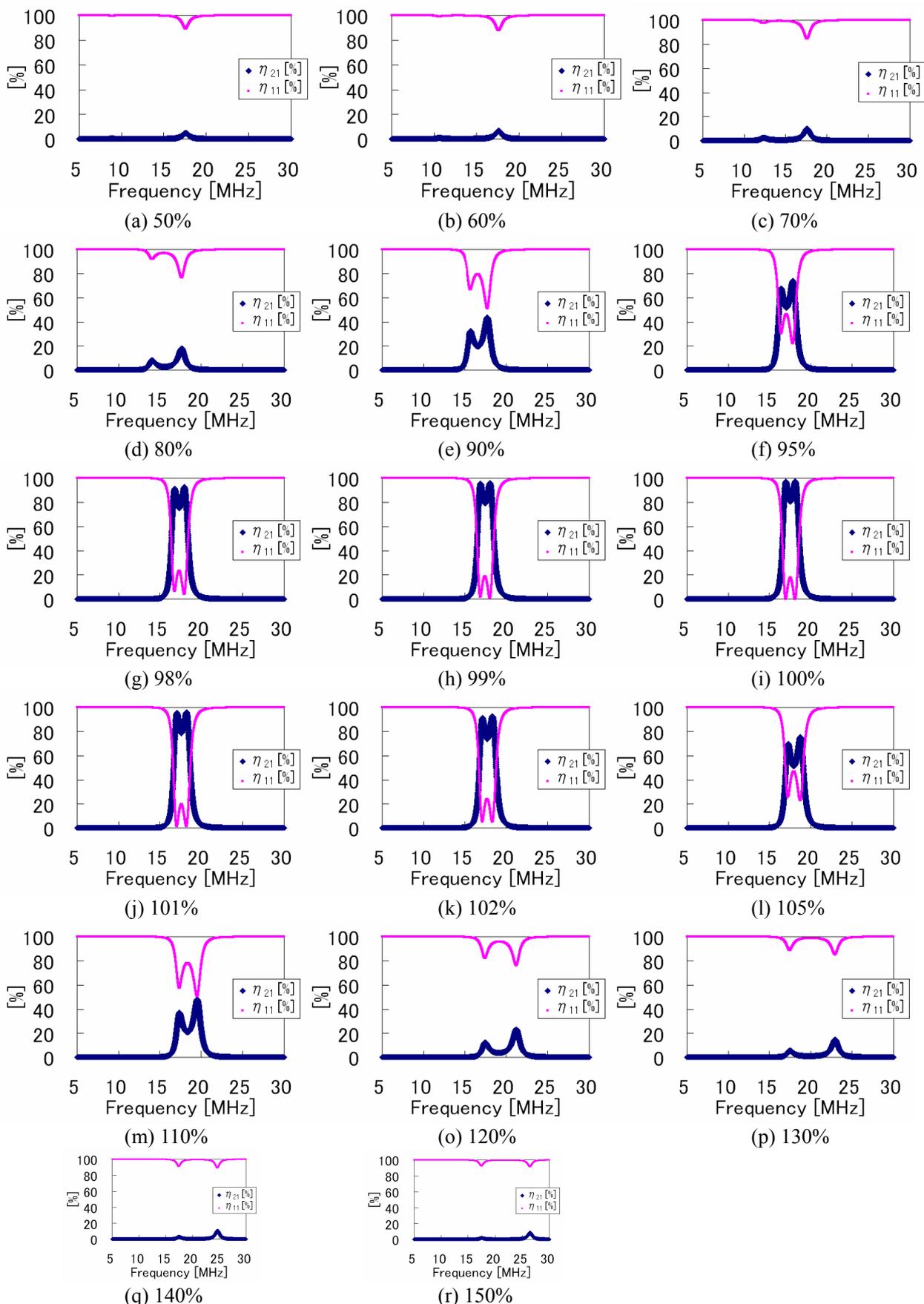
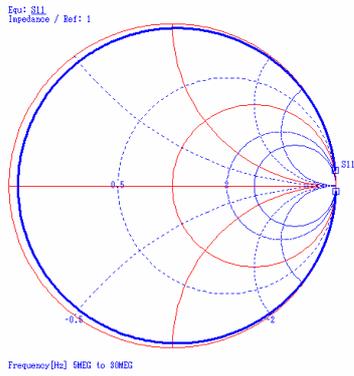
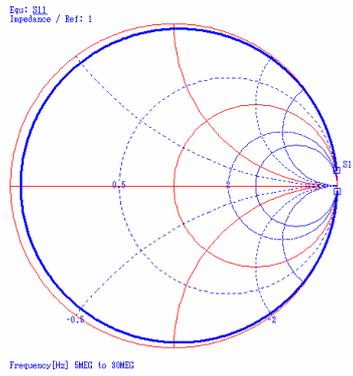


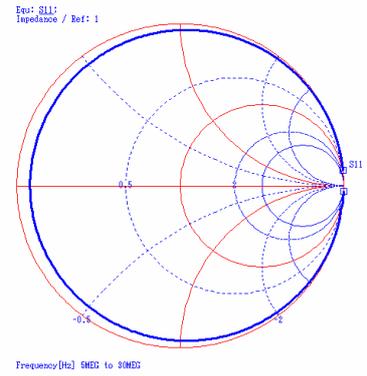
図 B.10 C_2 変化時のエアギャップと共振周波数と効率の関係



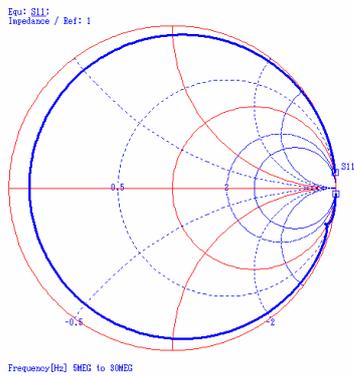
(a) 50%



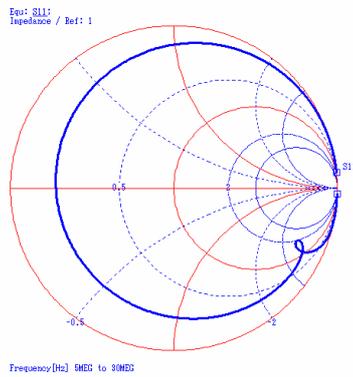
(b) 60%



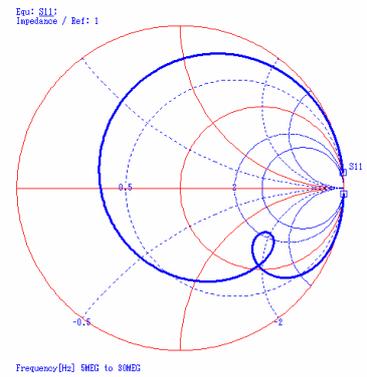
(c) 70%



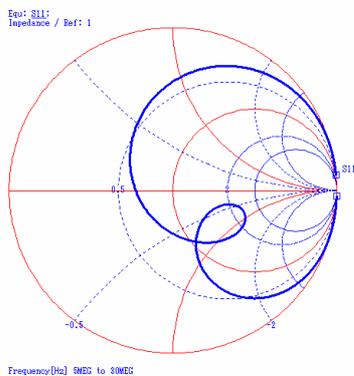
(d) 80%



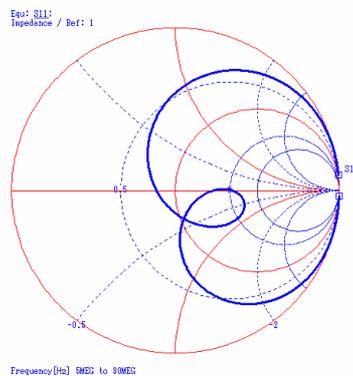
(e) 90%



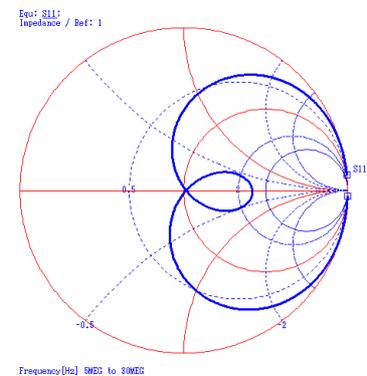
(f) 95%



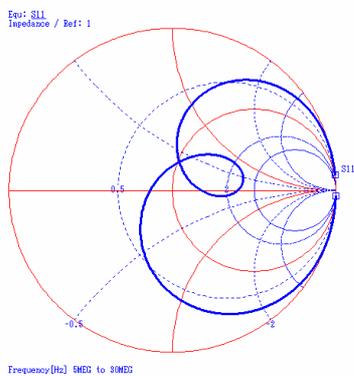
(g) 98%



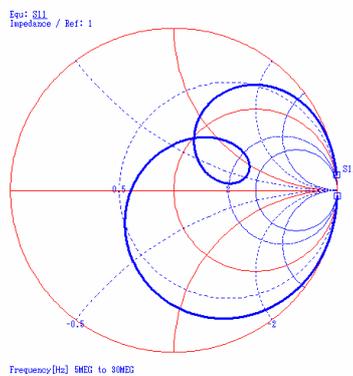
(h) 99%



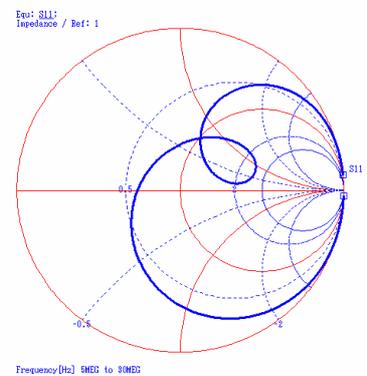
(i) 100%



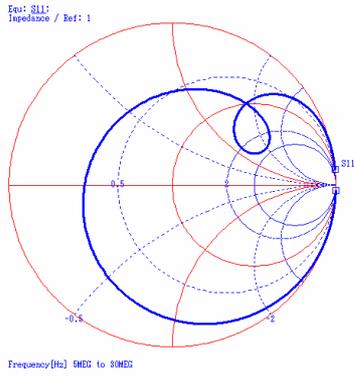
(j) 101%



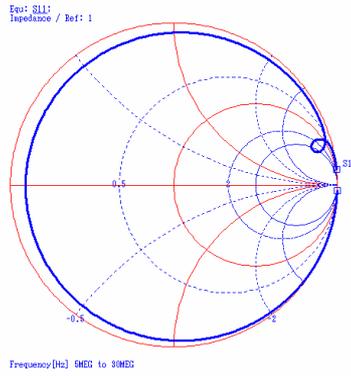
(k) 102%



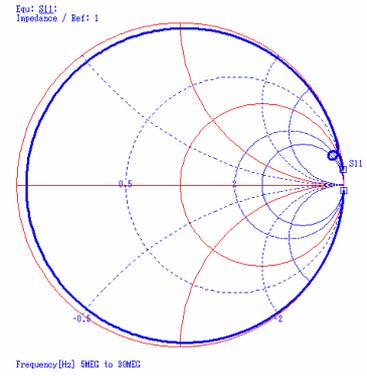
(l) 105%



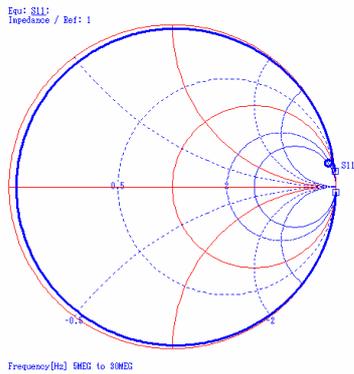
(m) 110%



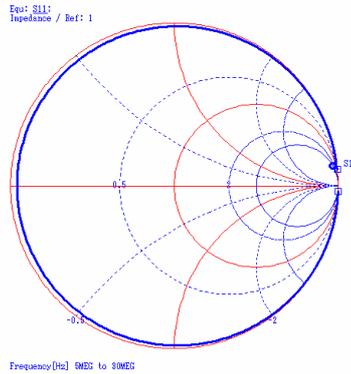
(o) 120%



(p) 130%



(q) 140%



(r) 150%

図 B.11 C_2 変化時のエアギャップとスミスチャートの関係

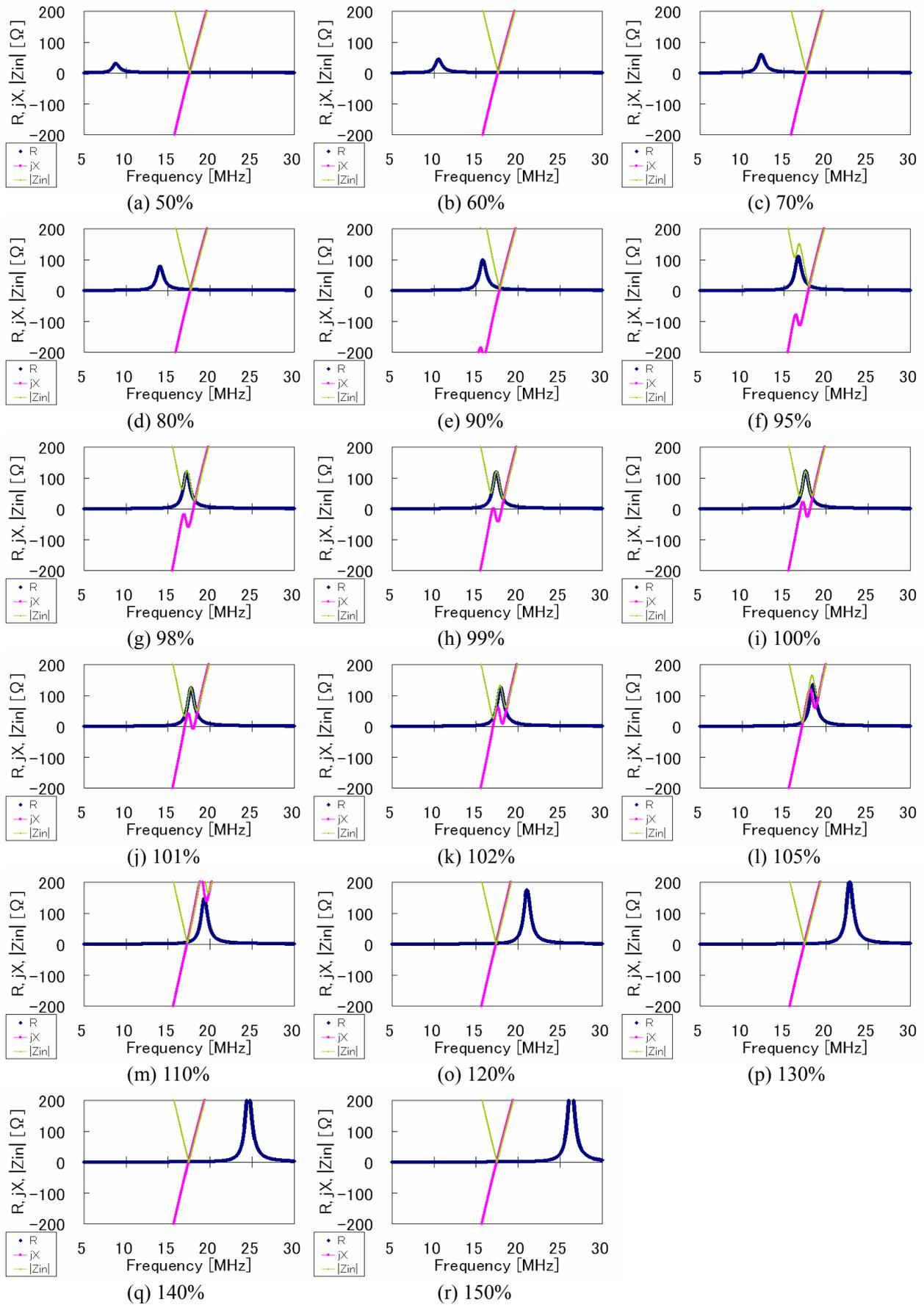


図 B.12 C_2 変化時のエアギャップと入力インピーダンスの関係 (拡大)

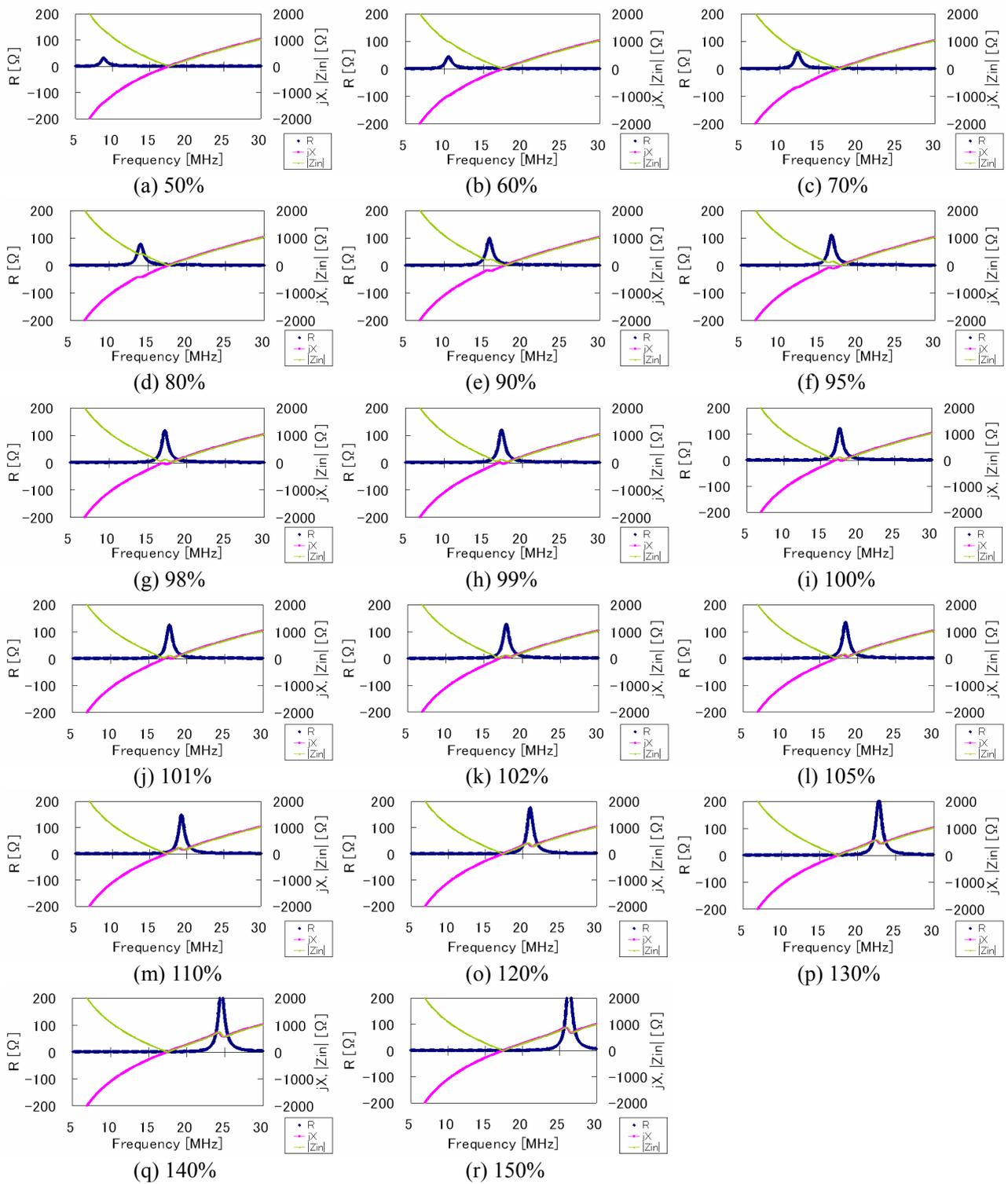


図 B.13 C_2 変化時のエアギャップと入力インピーダンスの関係 (全体)

(iv) 受信側自己インダクタンス L_2 変化によって共振周波数 f_{02} が変化したときの電力伝送効率

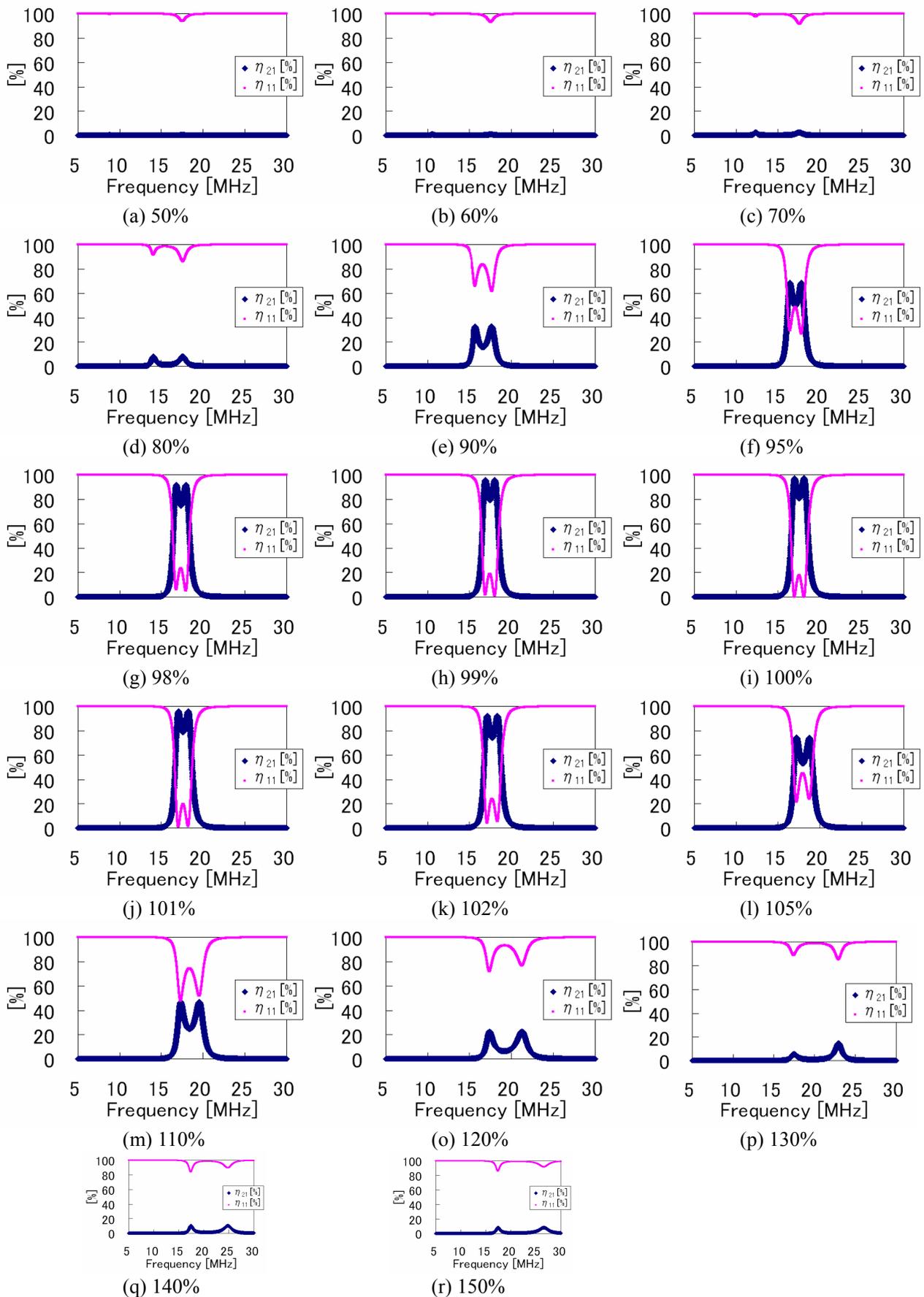
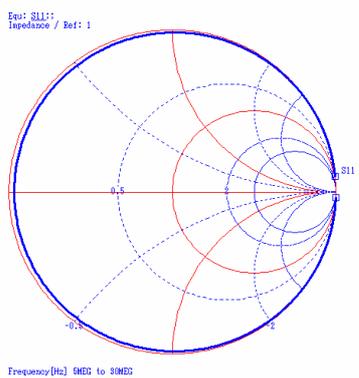
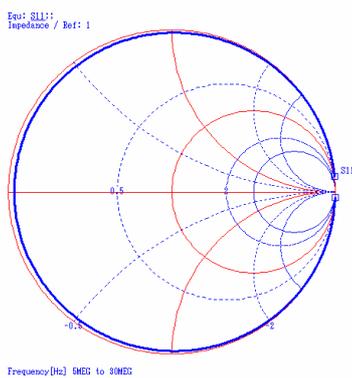


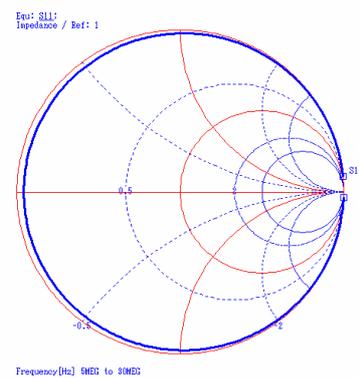
図 B.14 L_2 変化時のエアギャップと共振周波数と効率の関係



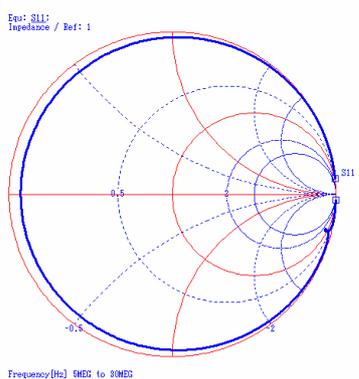
(a) 50%



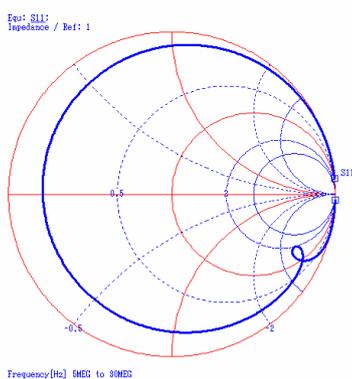
(b) 60%



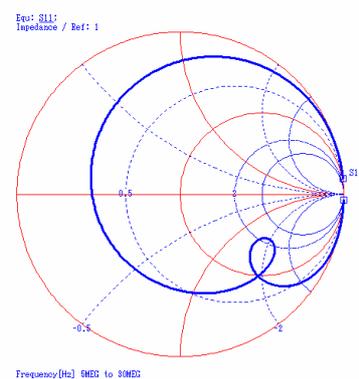
(c) 70%



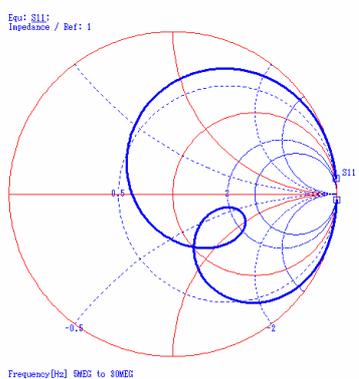
(d) 80%



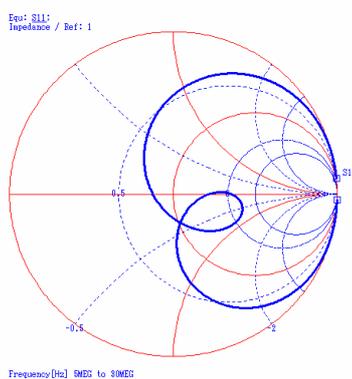
(e) 90%



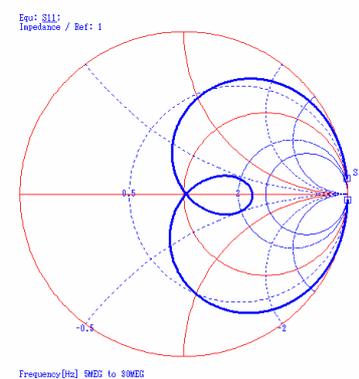
(f) 95%



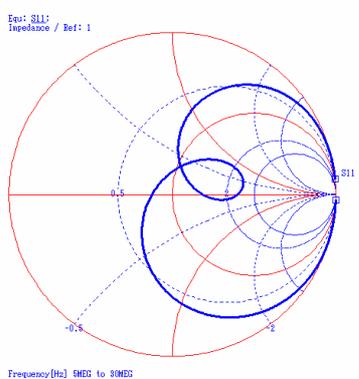
(g) 98%



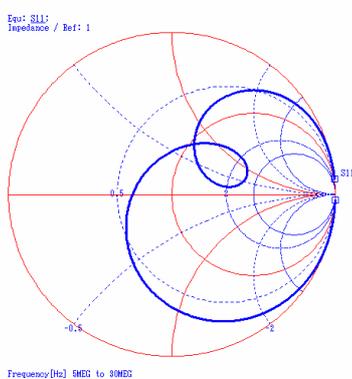
(h) 99%



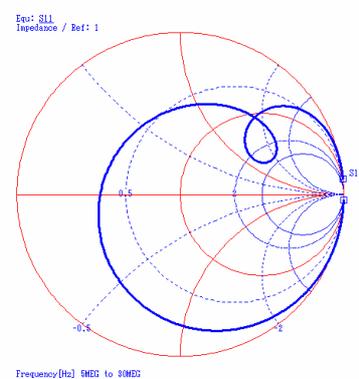
(i) 100%



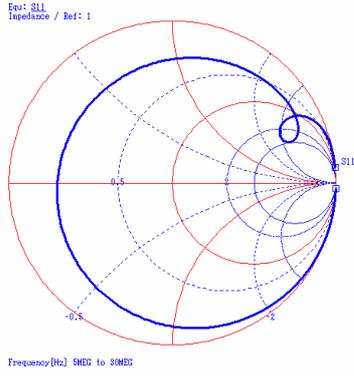
(j) 101%



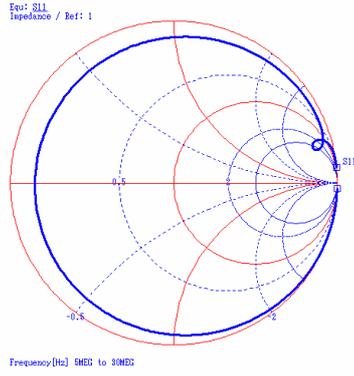
(k) 102%



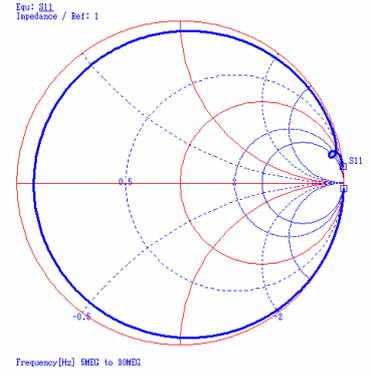
(l) 105%



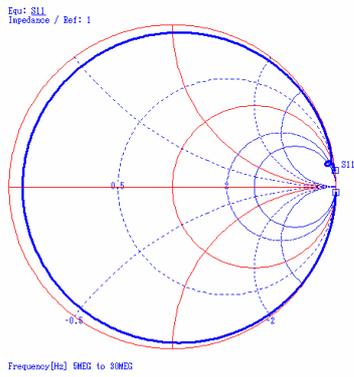
(m) 110%



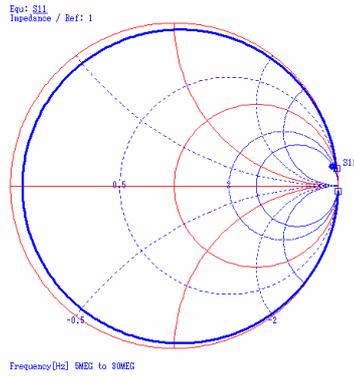
(o) 120%



(p) 130%



(q) 140%



(r) 150%

図 B.15 L_2 変化時のエアギャップとスミスチャートの関係

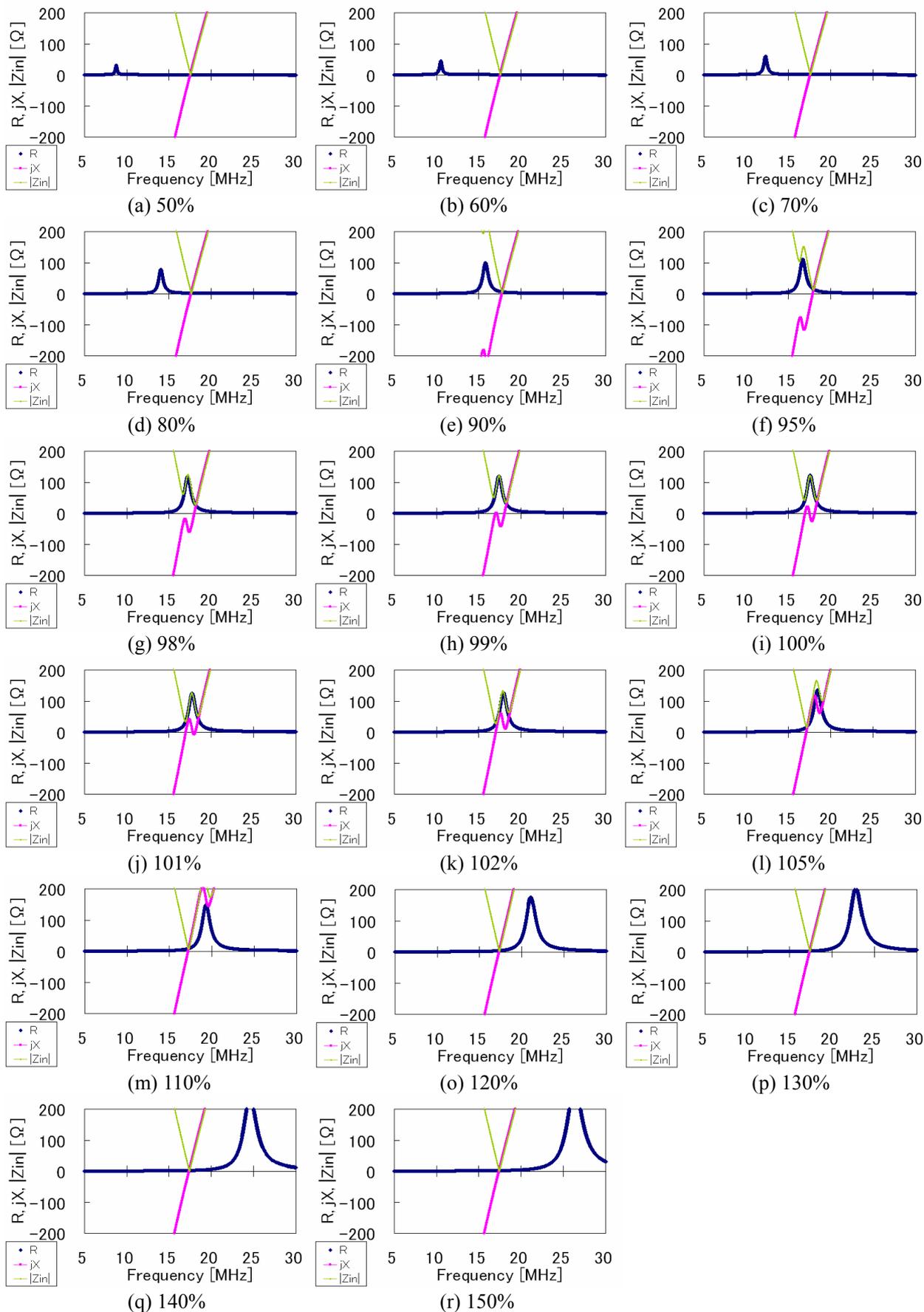


図 B.16 L_2 変化時のエアギャップと入力インピーダンスの関係 (拡大)

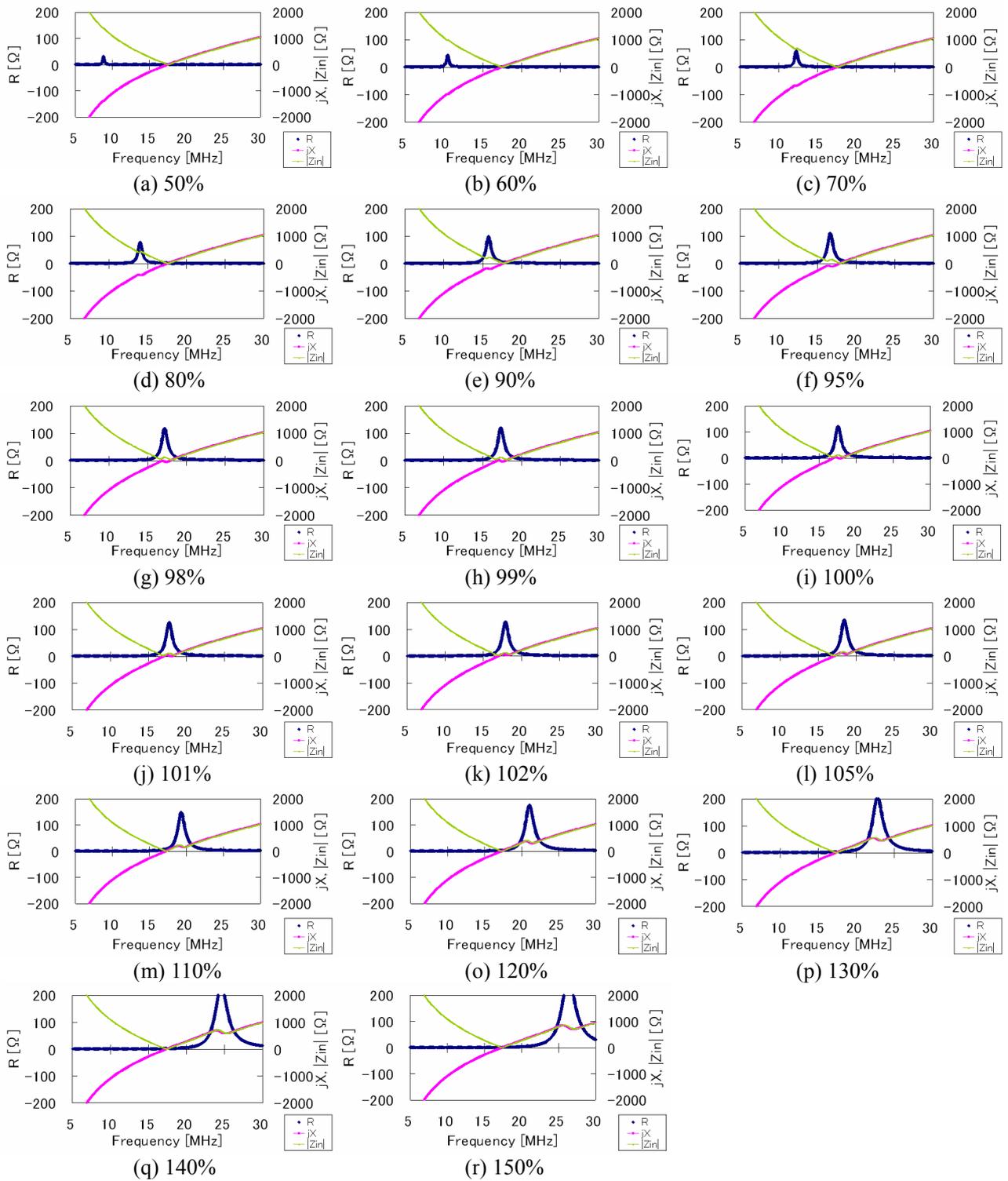


図 B.17 L_2 変化時のエアギャップと入力インピーダンスの関係 (全体)

付録C ギャップ変化と Z_{01} 補償

“5.3.2 インピーダンスマッチング追従方式の提案”において、最適化有り無しにおけるエアギャップ変化で、相互インダクタンス L_m を変化させ、その時における効率と共振周波数変化を検証した。その際省略した結果を記載する。

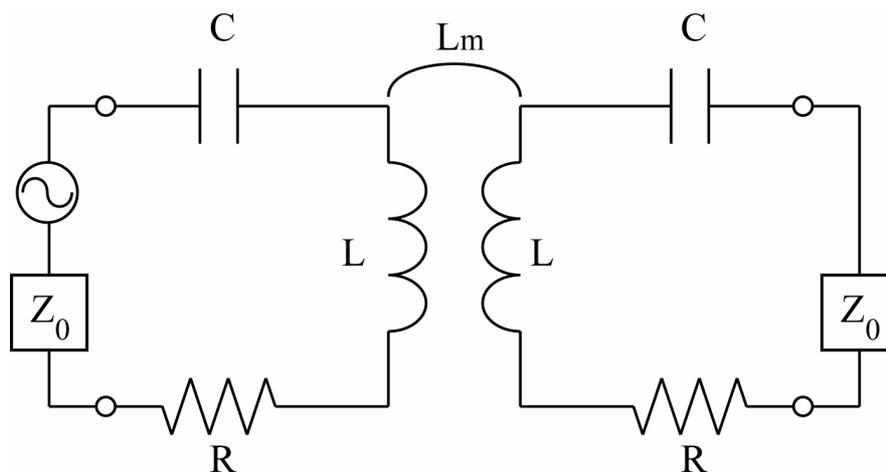


図 C.1 磁界共振結合の等価回路

エアギャップ変化 $Z_{01}=50\ \Omega$ 固定(最適化なし)

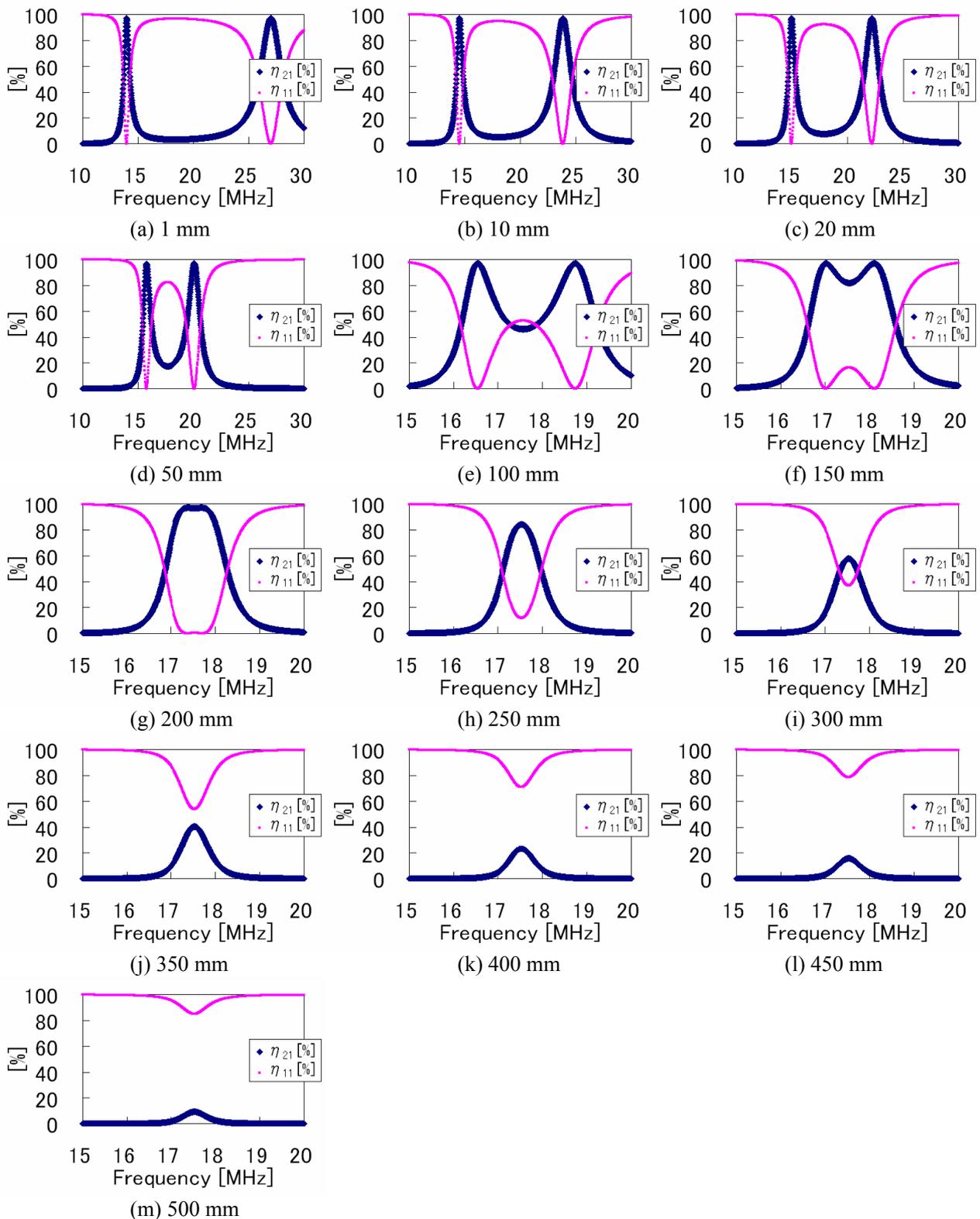
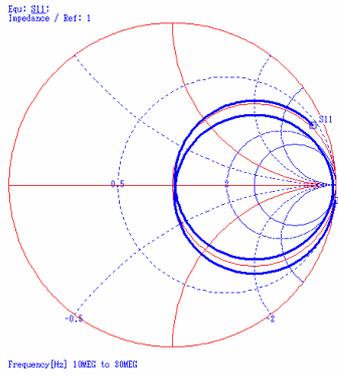
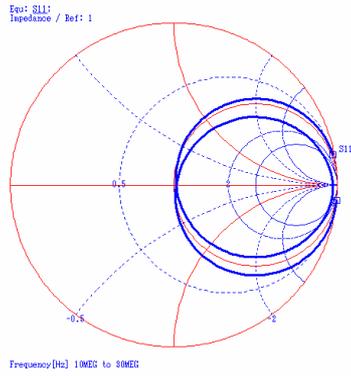


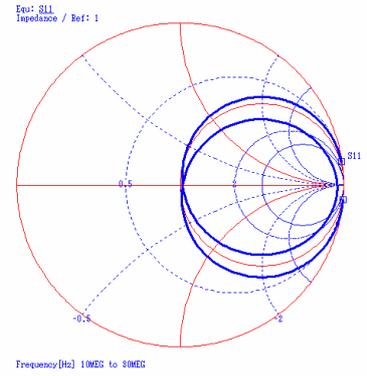
図 C.2 エアギャップ変化時の共振周波数と効率の関係 (Z_{01} 固定, 最適化なし)



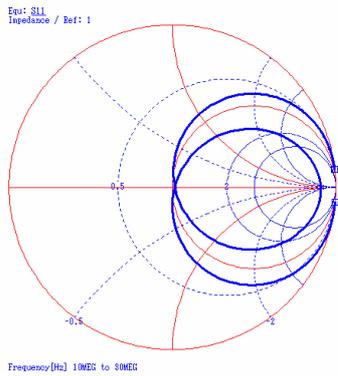
(a) 1 mm



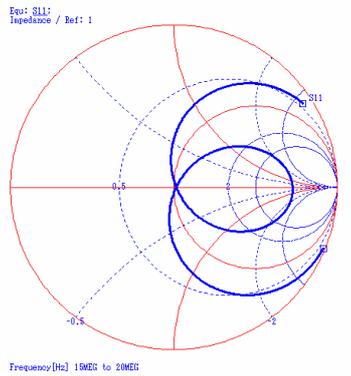
(b) 10 mm



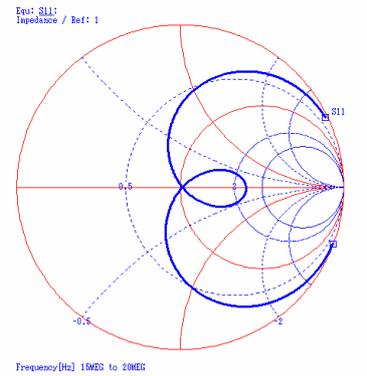
(c) 20 mm



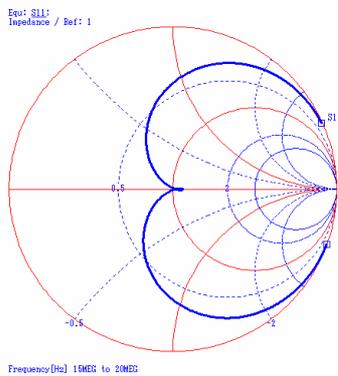
(d) 50 mm



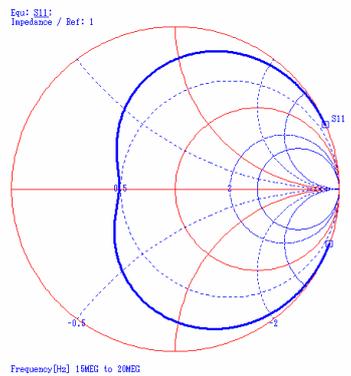
(e) 100 mm



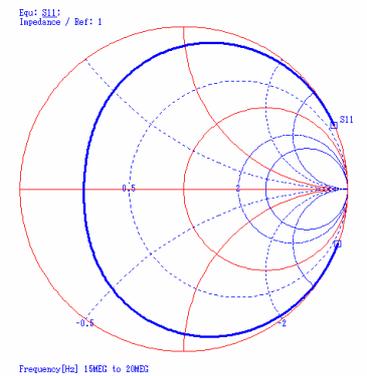
(f) 150 mm



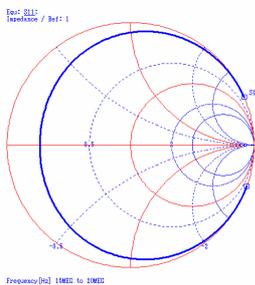
(g) 200 mm



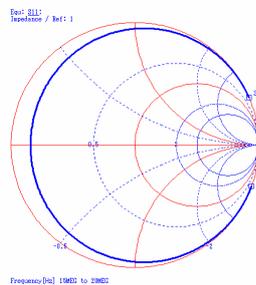
(h) 250 mm



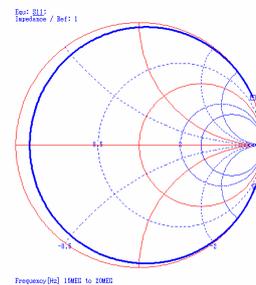
(i) 300 mm



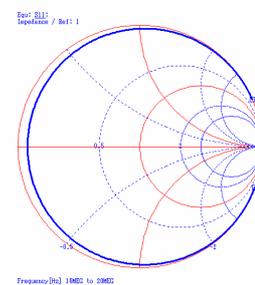
(j) 350 mm



(k) 400 mm



(l) 450 mm



(m) 500 mm

図 C.3 エアギャップ変化時のスミスチャートの関係 (Z_{01} 固定, 最適化なし)

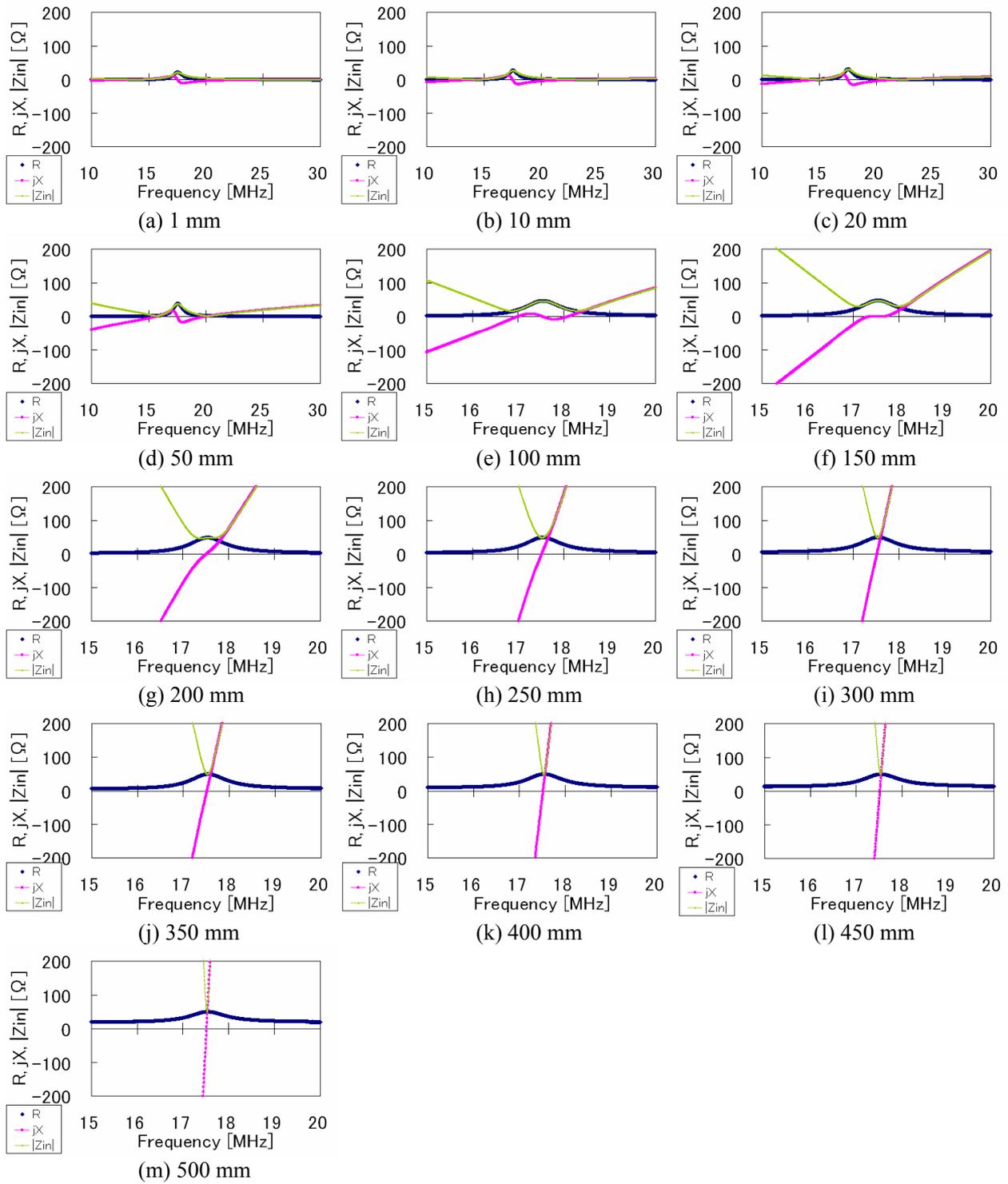


図 C.4 エアギャップ変化時の入力インピーダンスの関係 (Z_{01} 固定, 最適化なし, 拡大)

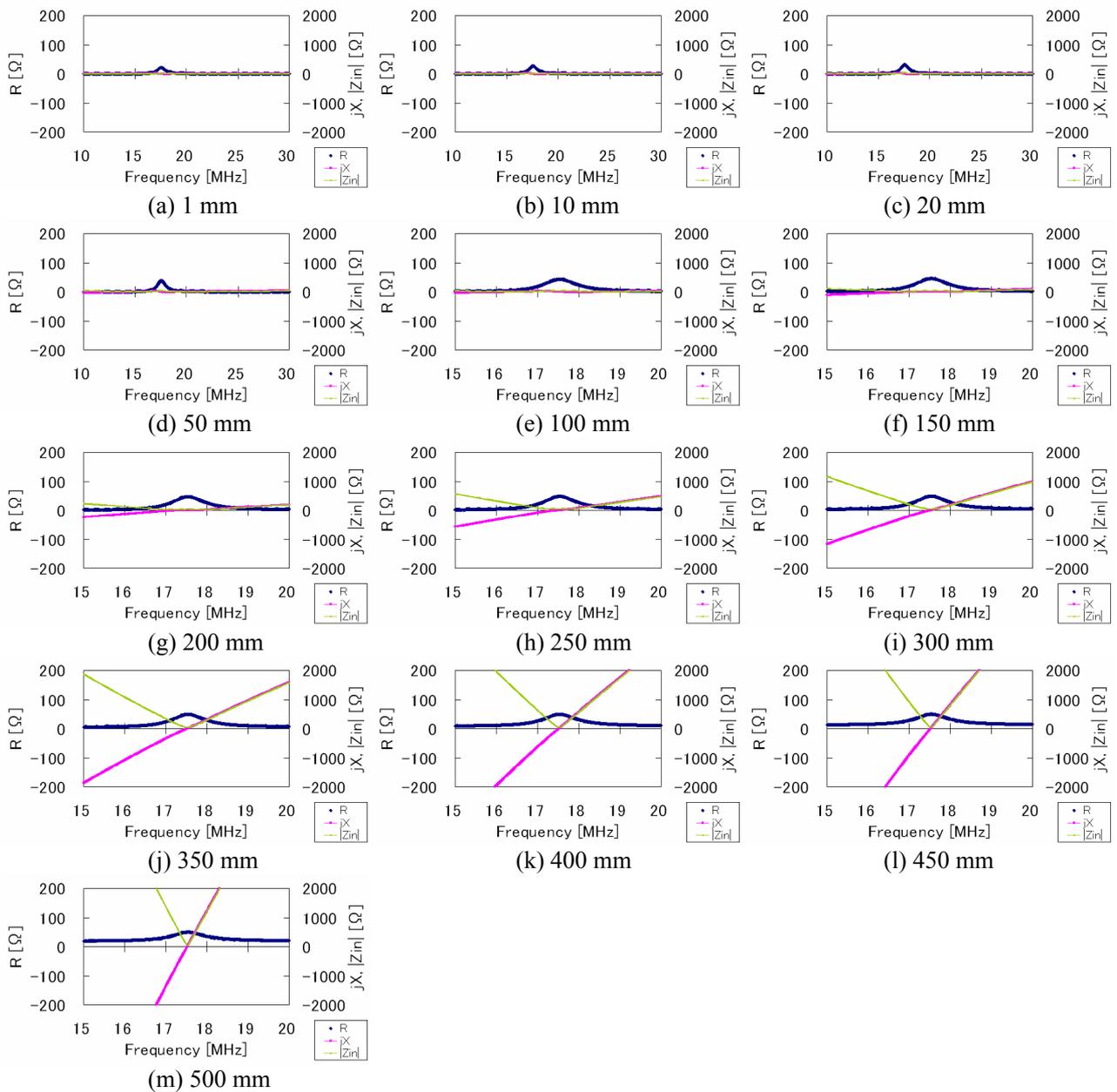


図 C.5 エアギャップ変化時の入力インピーダンスの関係 (Z_{01} 固定, 最適化なし, 全体)

エアギャップ変化 Z_{01} 最適化

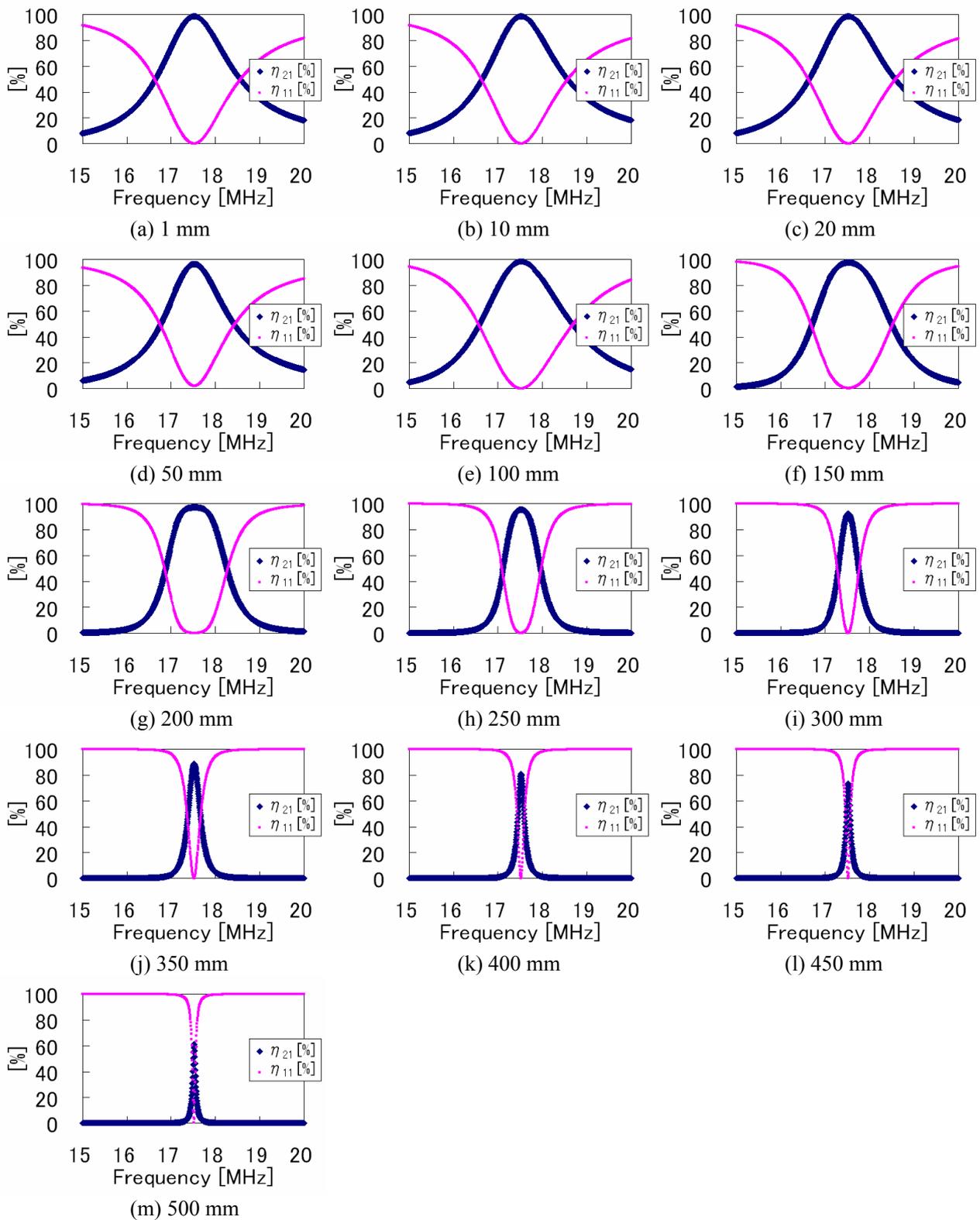
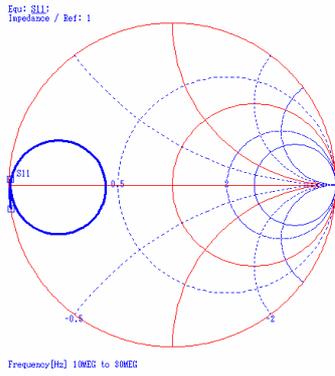
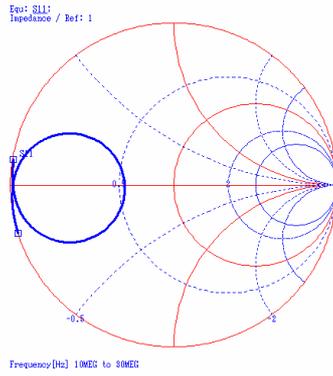


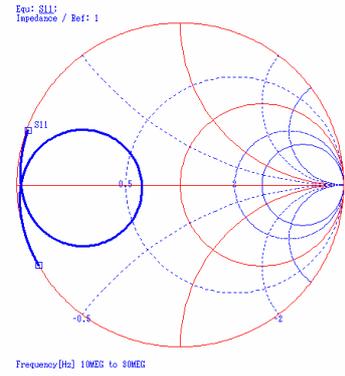
図 C.6 エアギャップ変化時の共振周波数と効率の関係 (Z_{01} 最適化)



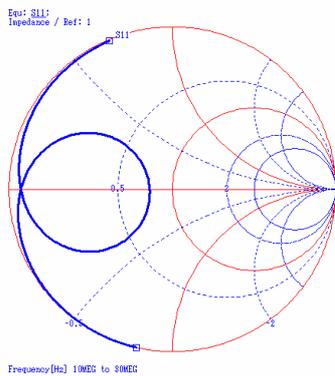
(a) 1 mm



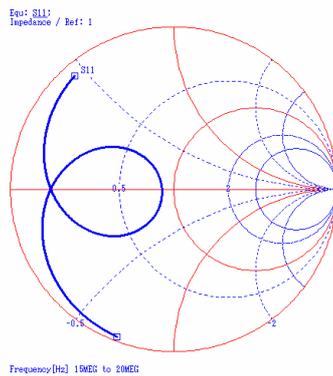
(b) 10 mm



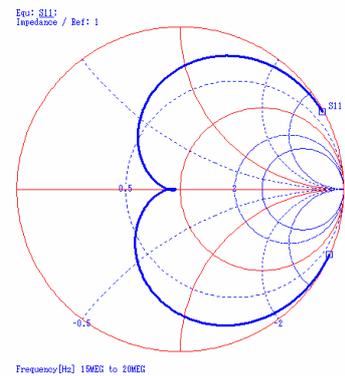
(c) 20 mm



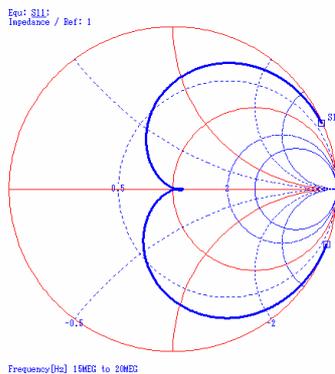
(d) 50 mm



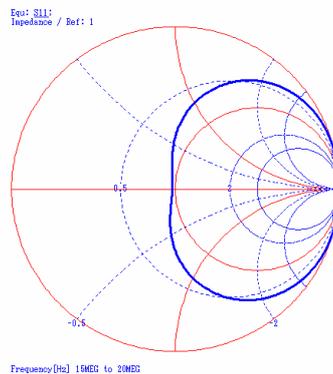
(e) 100 mm



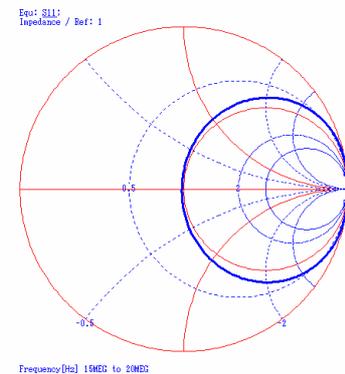
(f) 150 mm



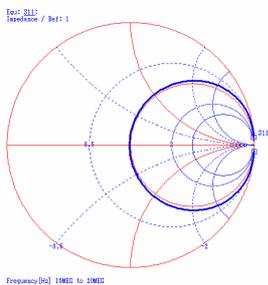
(g) 200 mm



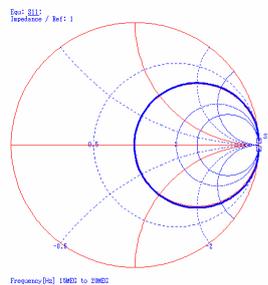
(h) 250 mm



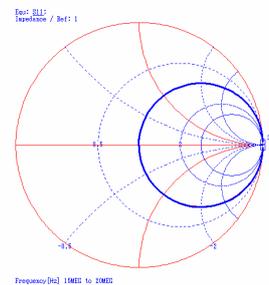
(i) 300 mm



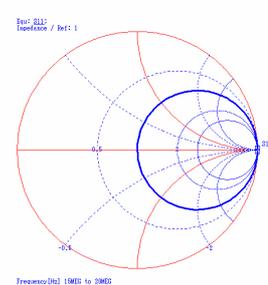
(j) 350 mm



(k) 400 mm



(l) 450 mm



(m) 500 mm

図 C.7 エアギャップ変化時のスミスチャートの関係 (Z_{01} 最適化)

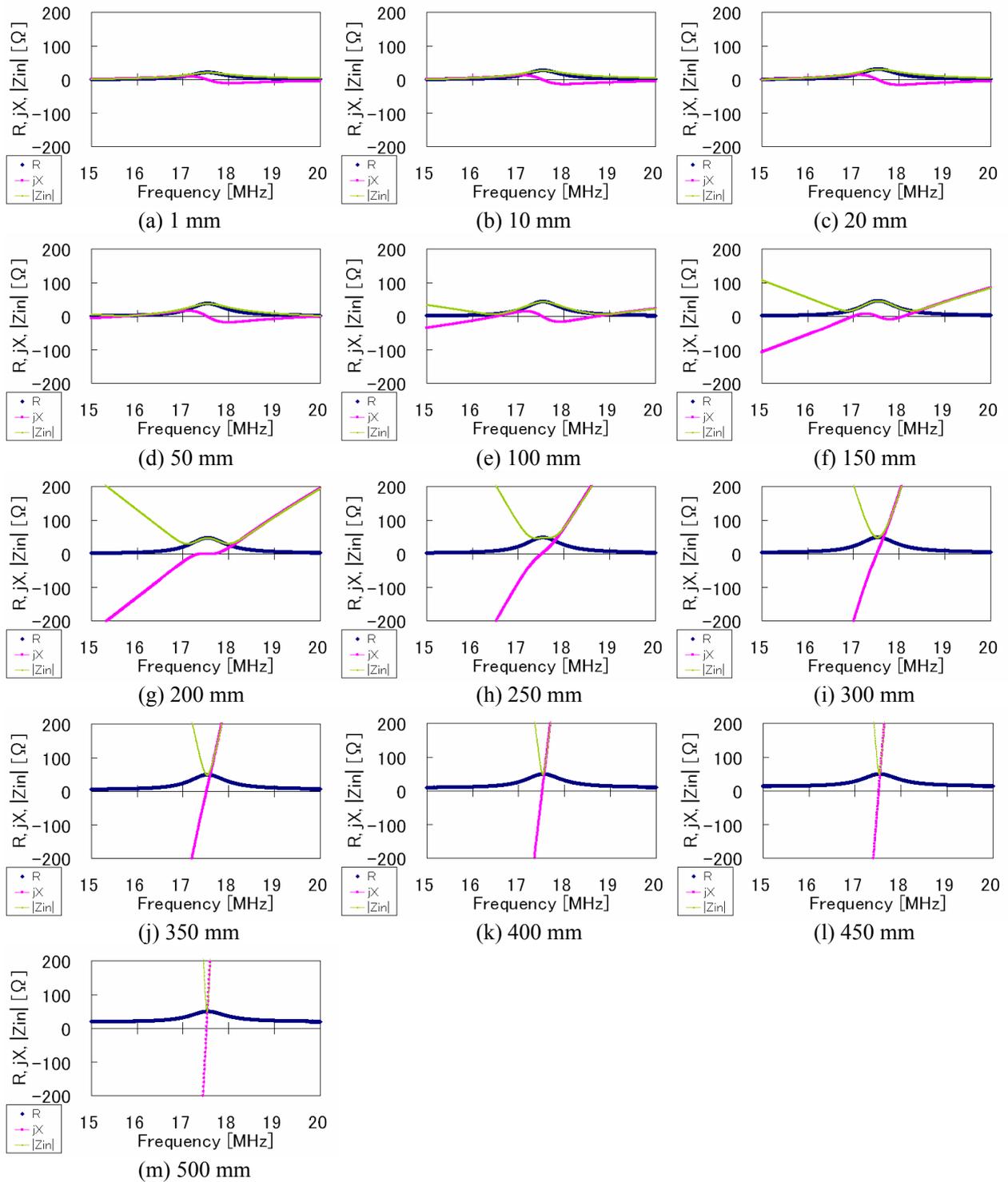


図 C.8 エアギャップ変化時の入力インピーダンスの関係 (Z_{01} 最適化, 拡大)

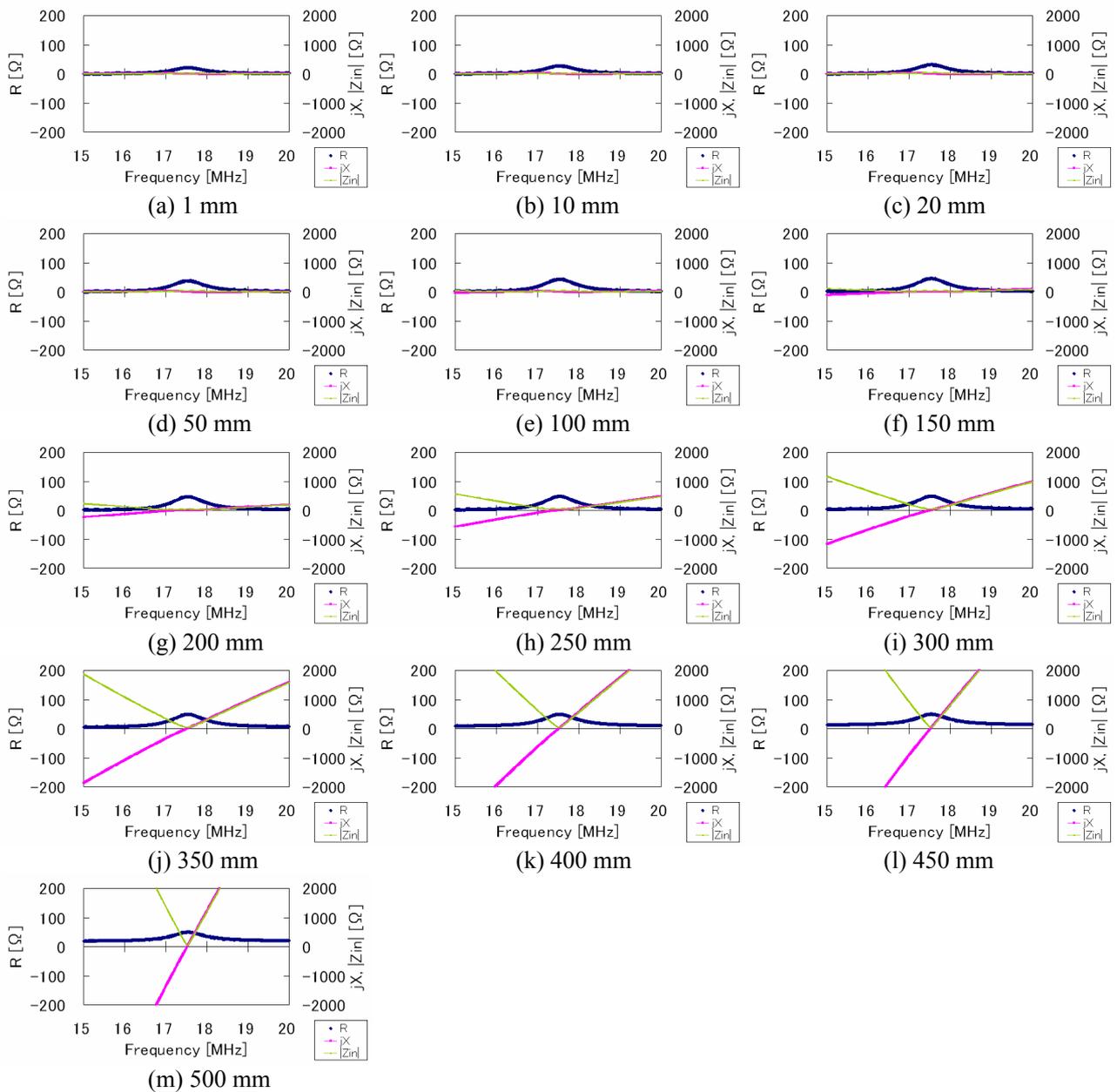


図 C.9 エアギャップ変化時の入力インピーダンスの関係 (Z_{01} 最適化, 全体)

付録D 負荷変化と Z_{01} 補償

“5.3.2 インピーダンスマッチング追従方式の提案”において、最適化有り無しにおける負荷変動時の効率と共振周波数変化を検証した。その際省略した結果を記載する。

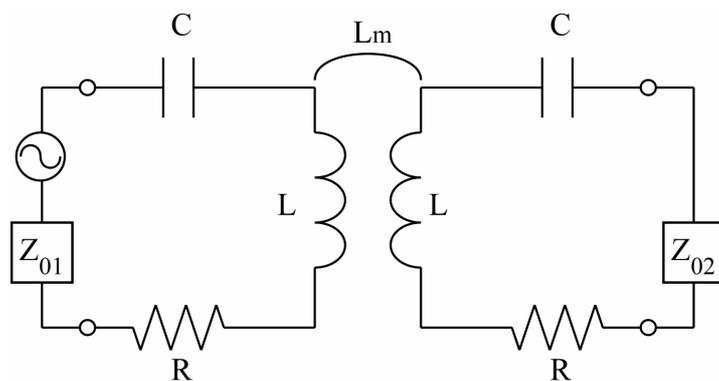
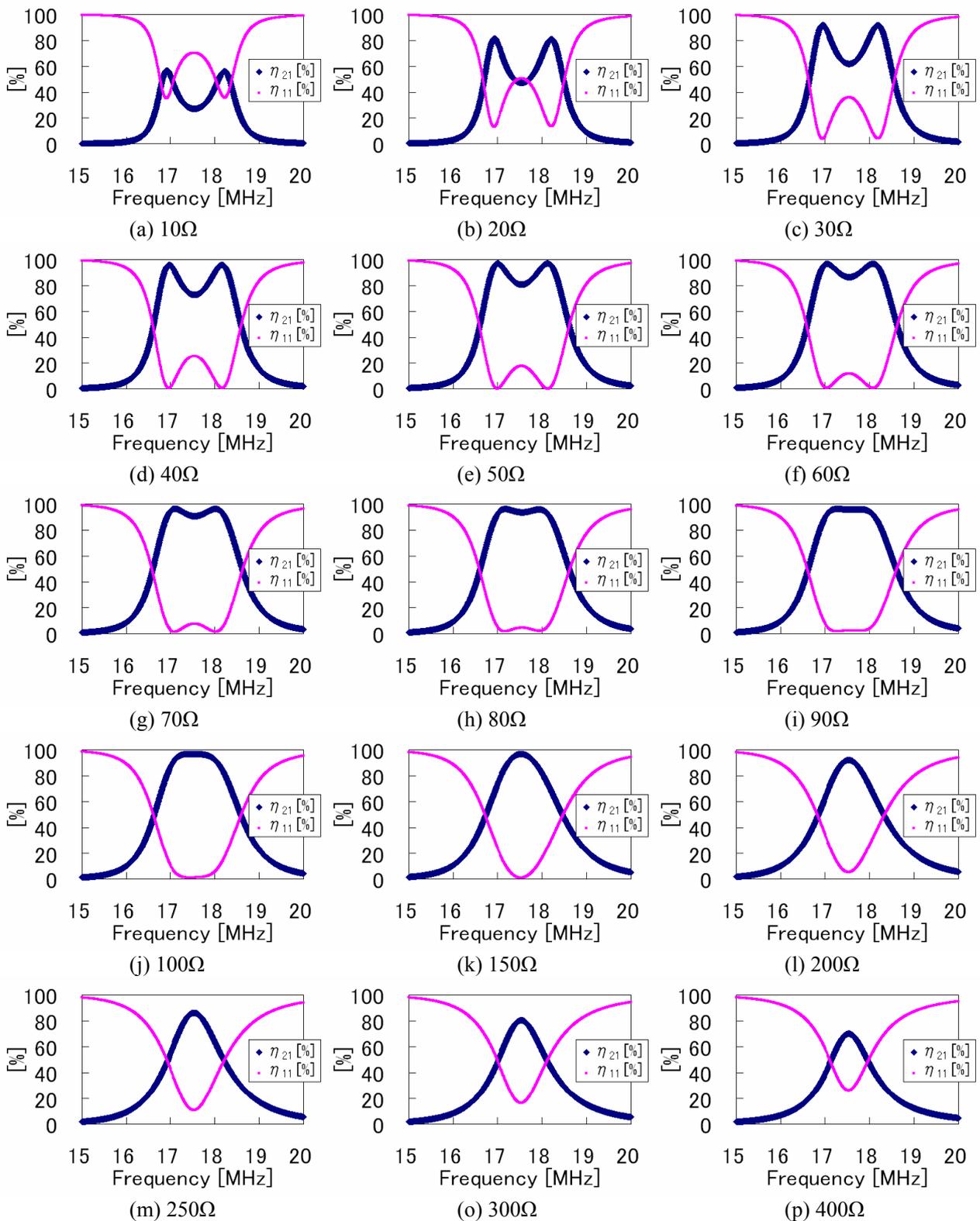


図 D.1 入力インピーダンスと負荷側のインピーダンスが違う場合の磁界共振結合の等価回路

Z_{02} 変化 $Z_{01}=50\Omega$ 固定 (最適化なし)



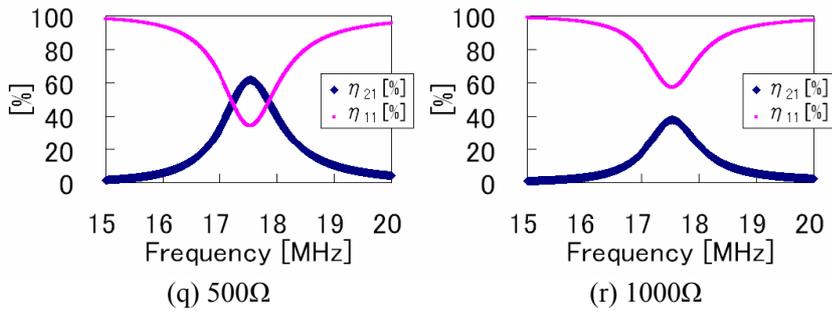
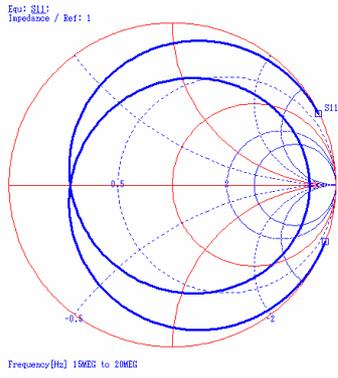
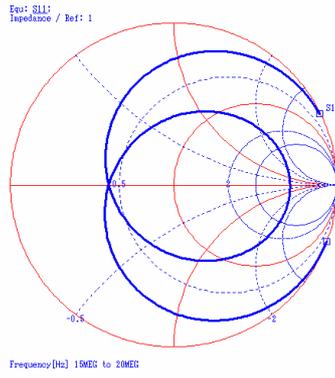


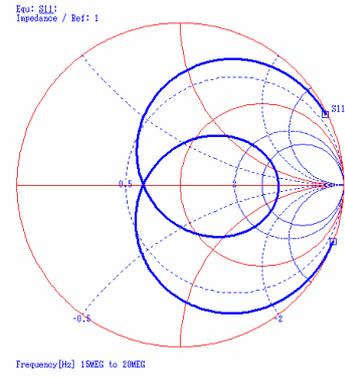
図 D.2 負荷 Z_{02} 変化時のエアギャップと共振周波数と効率の関係 (Z_{01} 固定, 最適化なし)



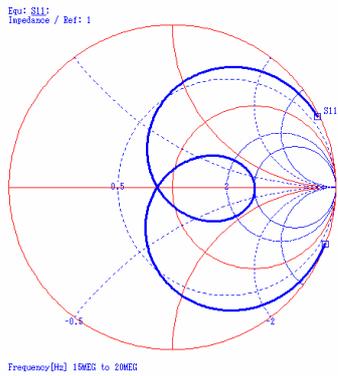
(a) 10Ω



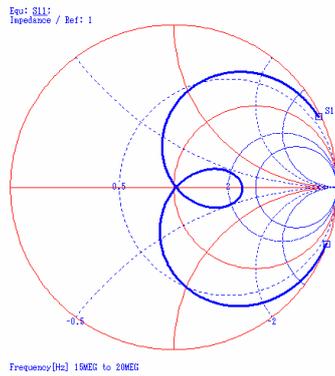
(b) 20Ω



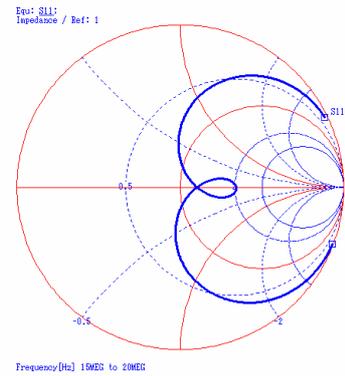
(c) 30Ω



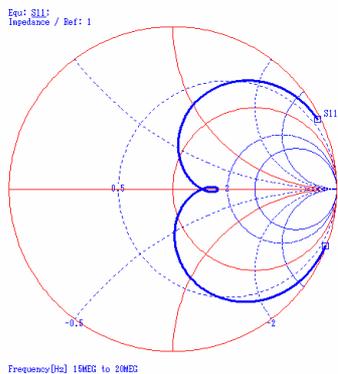
(d) 40Ω



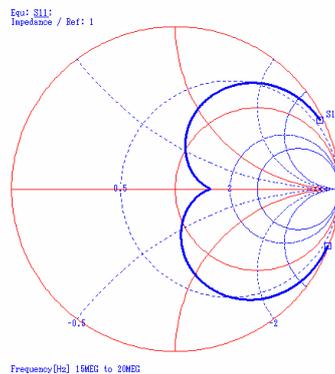
(e) 50Ω



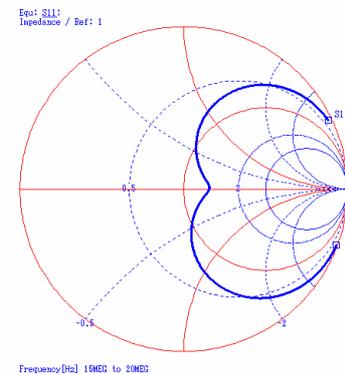
(f) 60Ω



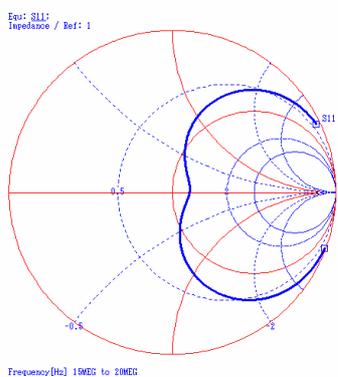
(g) 70Ω



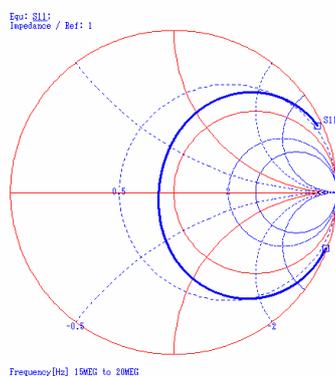
(h) 80Ω



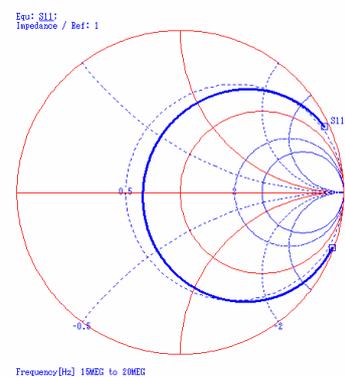
(i) 90Ω



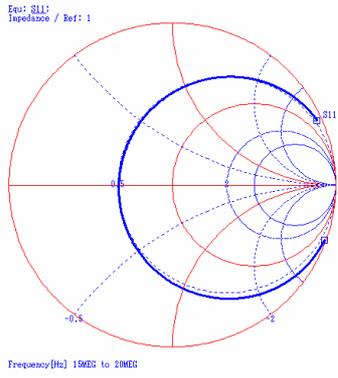
(j) 100Ω



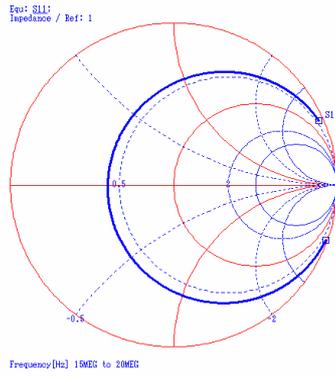
(k) 150Ω



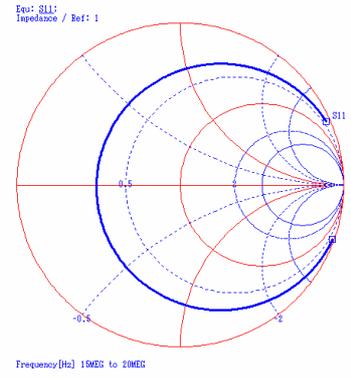
(l) 200Ω



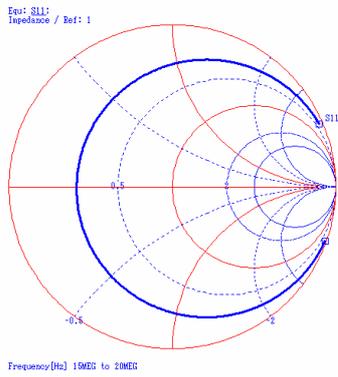
(m) 250Ω



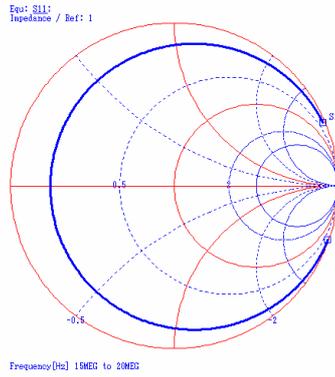
(o) 300Ω



(p) 400Ω



(q) 500Ω



(r) 1000Ω

図 D.3 負荷 Z_{02} 変化時のエアギャップとスミスチャートの関係 (Z_{01} 固定, 最適化なし)

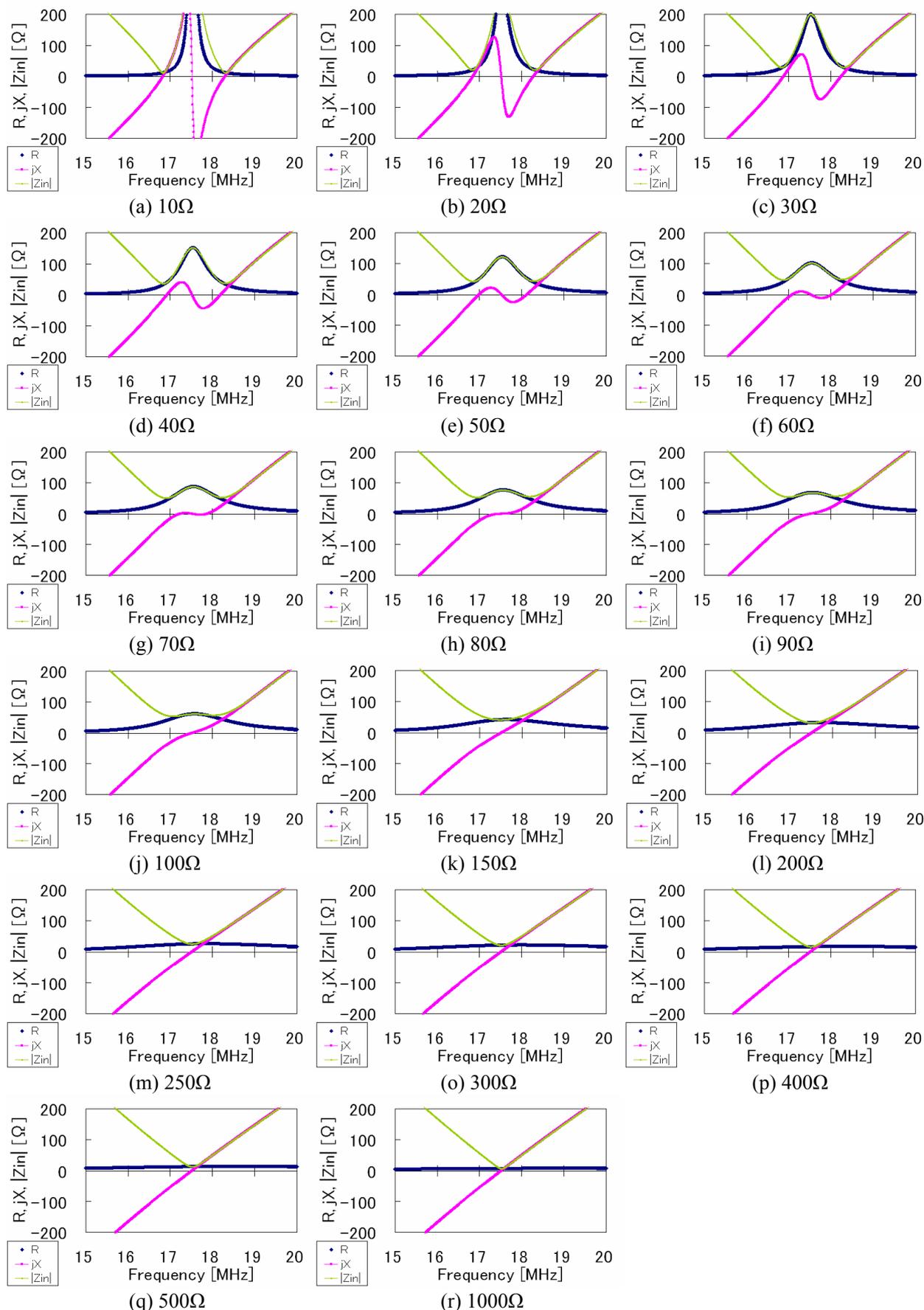


図 D.4 負荷 Z_2 変化時のエアギャップと入力インピーダンスの関係 (Z_1 固定, 最適化なし, 拡大)

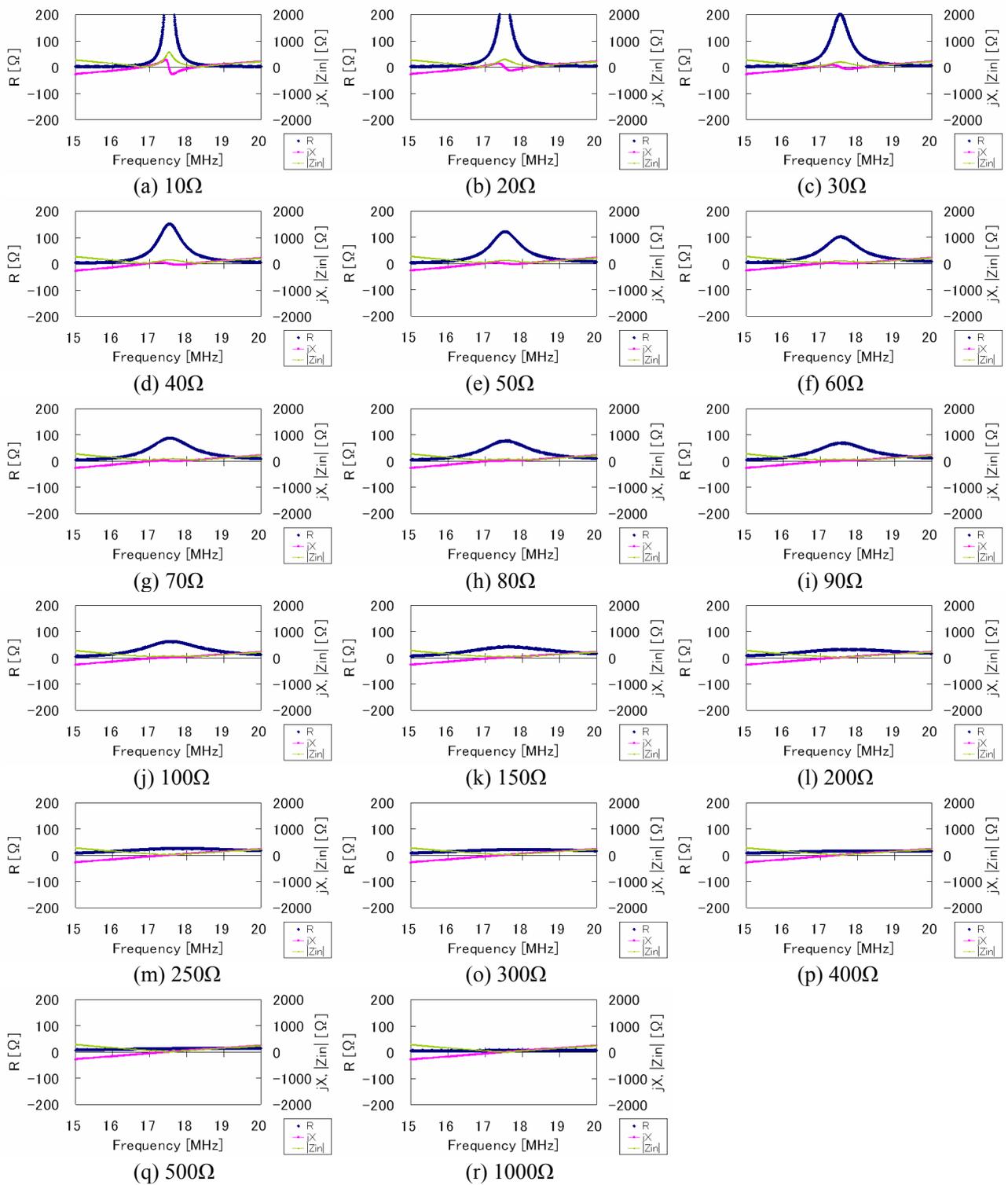
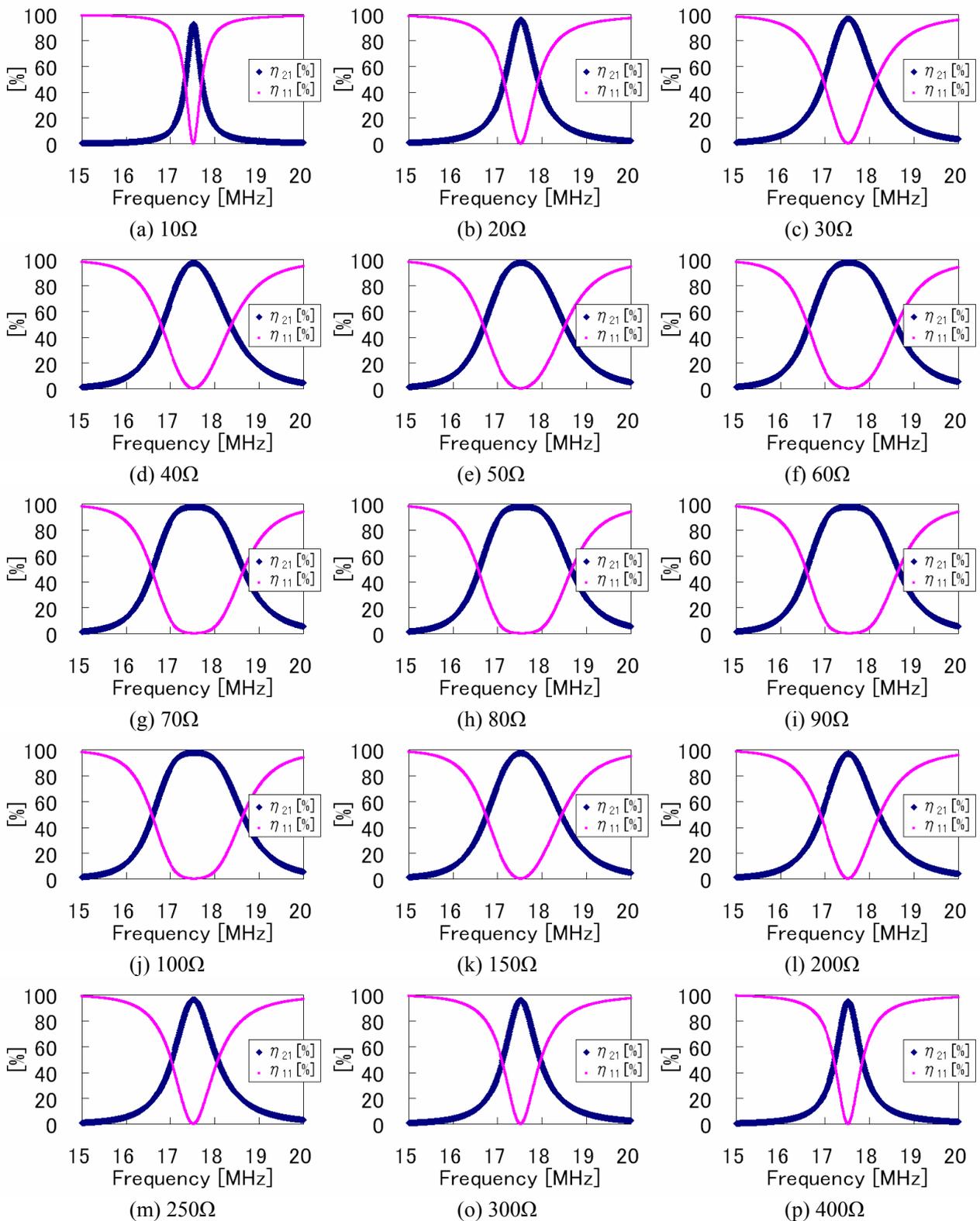


図 D.5 負荷 Z_{02} 変化時のエアギャップと入力インピーダンスの関係 (Z_{01} 固定, 最適化なし, 全体)

Z_{02} 変化 Z_{01} を最適化



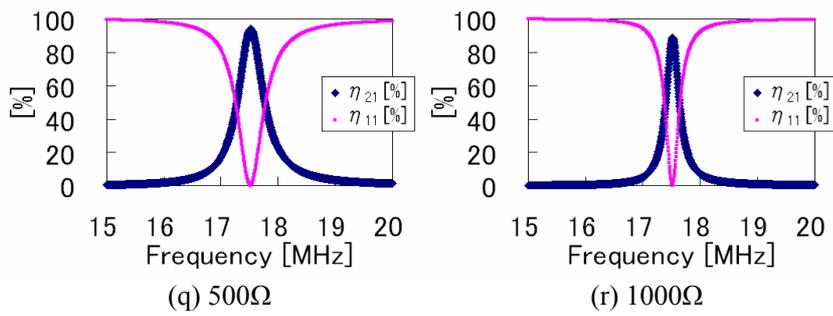
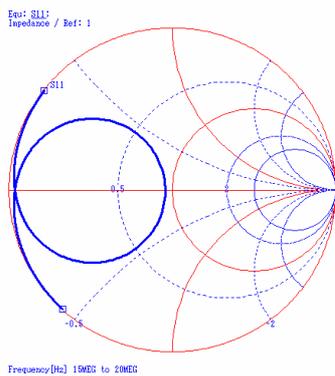
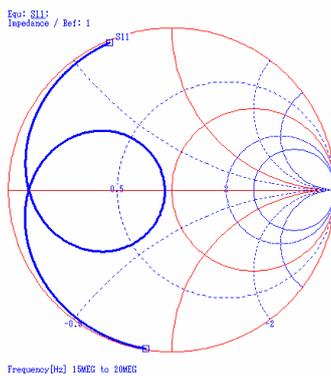


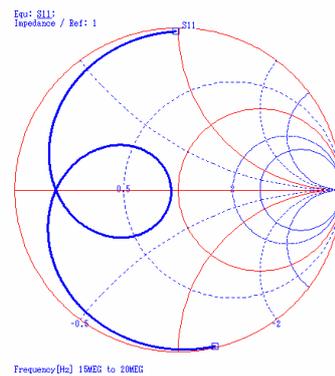
図 D.6 負荷 Z_{02} 変化時のエアギャップと共振周波数と効率の関係 (Z_{01} 最適化)



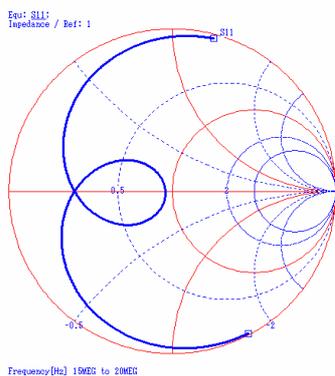
(a) 10Ω



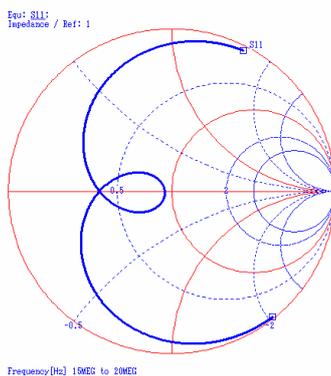
(b) 20Ω



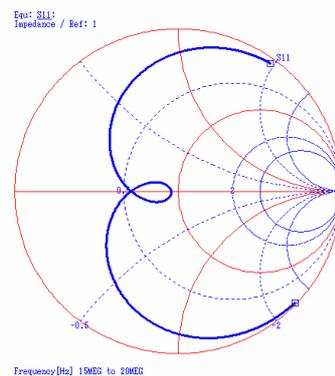
(c) 30Ω



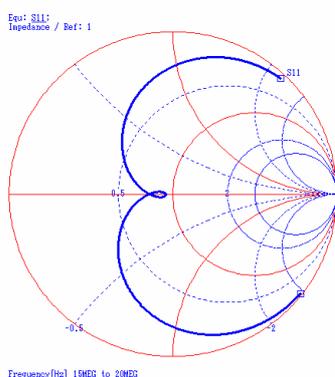
(d) 40Ω



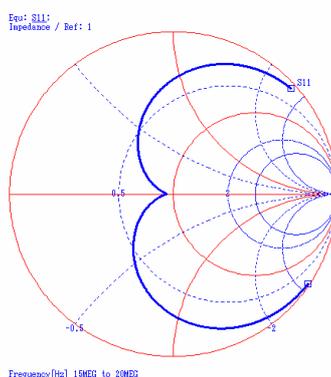
(e) 50Ω



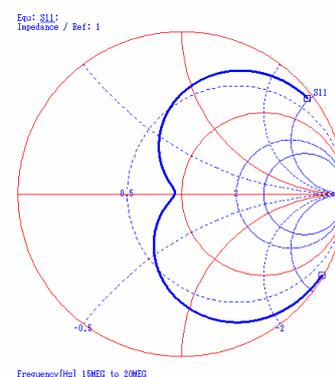
(f) 60Ω



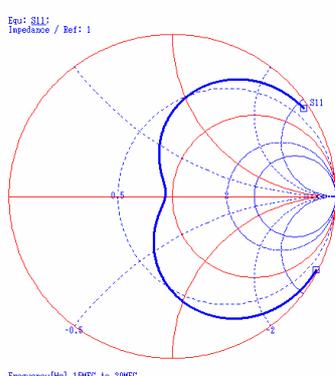
(g) 70Ω



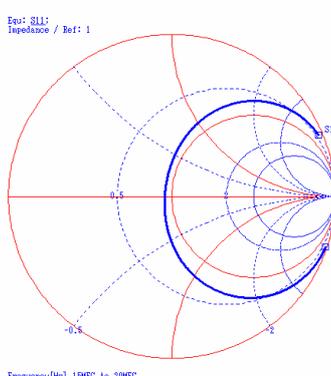
(h) 80Ω



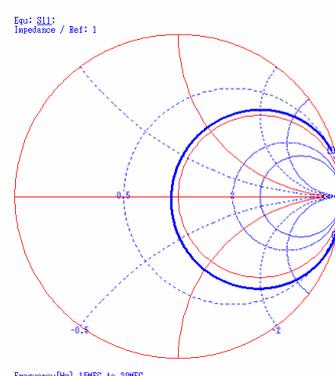
(i) 90Ω



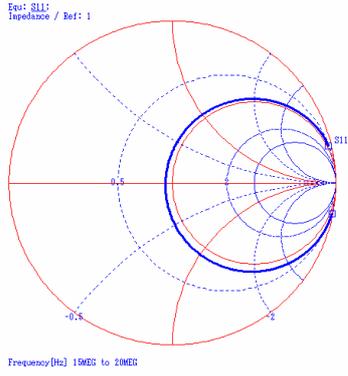
(j) 100Ω



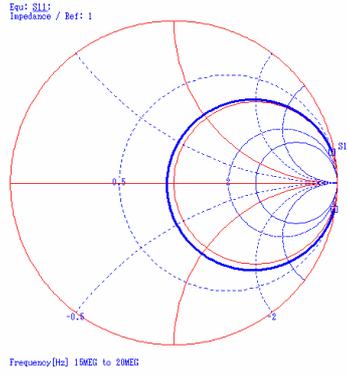
(k) 150Ω



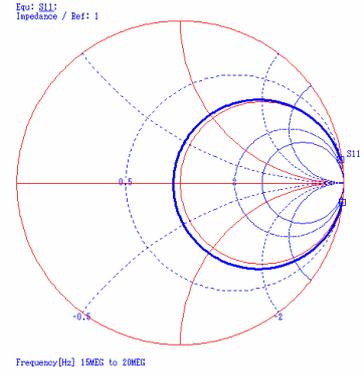
(l) 200Ω



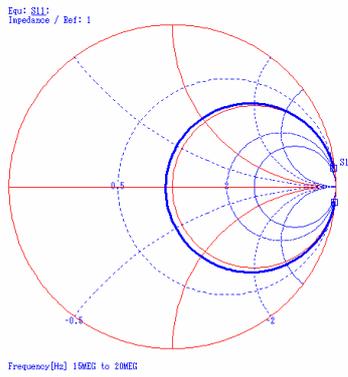
(m) 250Ω



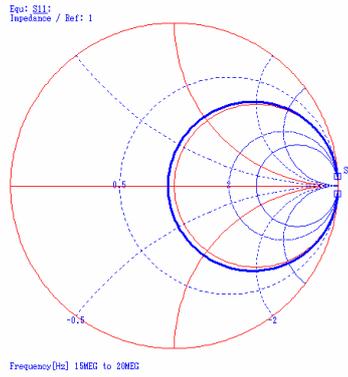
(o) 300Ω



(p) 400Ω



(q) 500Ω



(r) 1000Ω

図 D.7 負荷 Z_{02} 変化時のエアギャップとスミスチャートの関係 (Z_{01} 最適化)

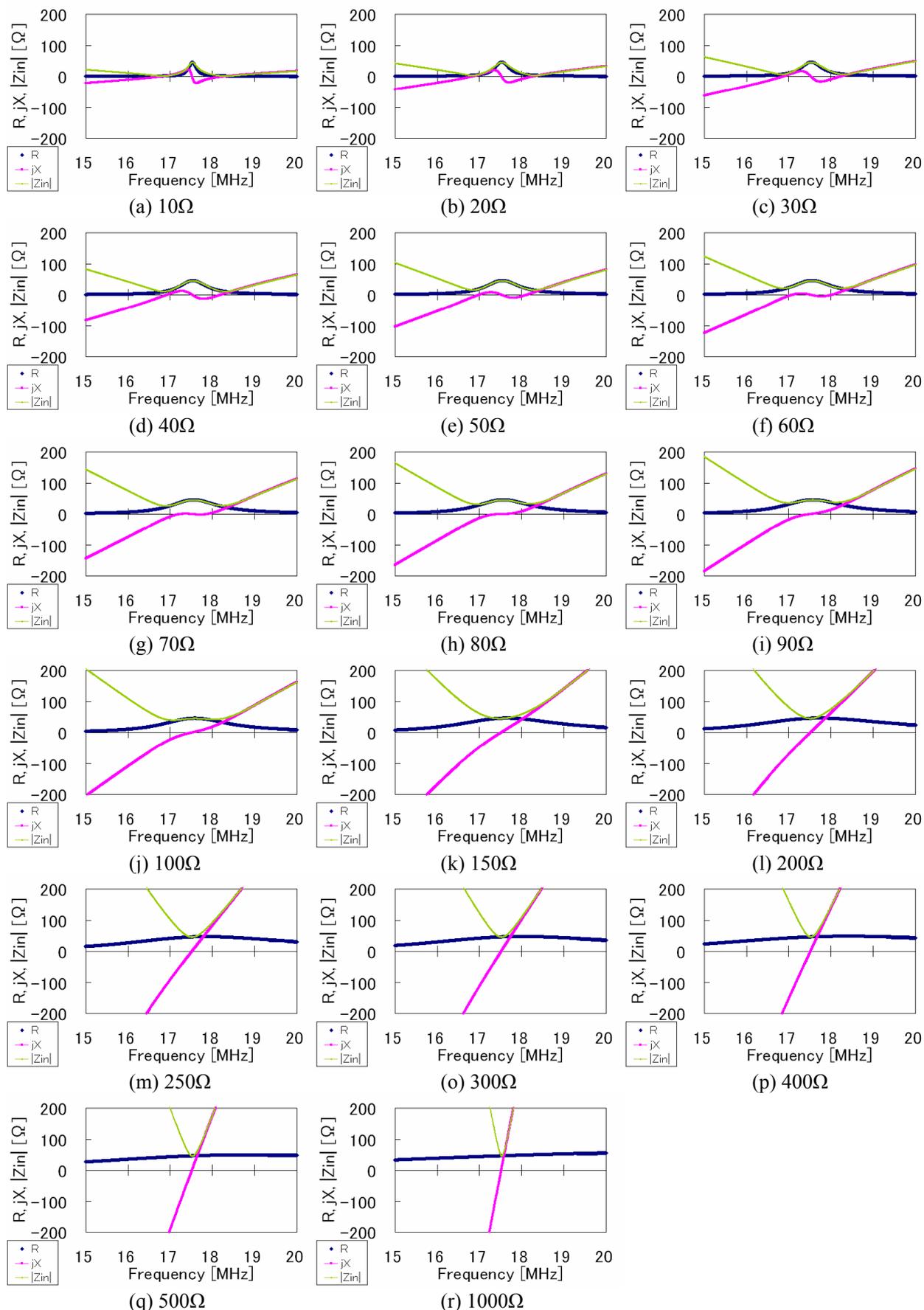


図 D.8 負荷 Z_{02} 変化時のエアギャップと入力インピーダンスの関係 (Z_{01} 最適化, 拡大)

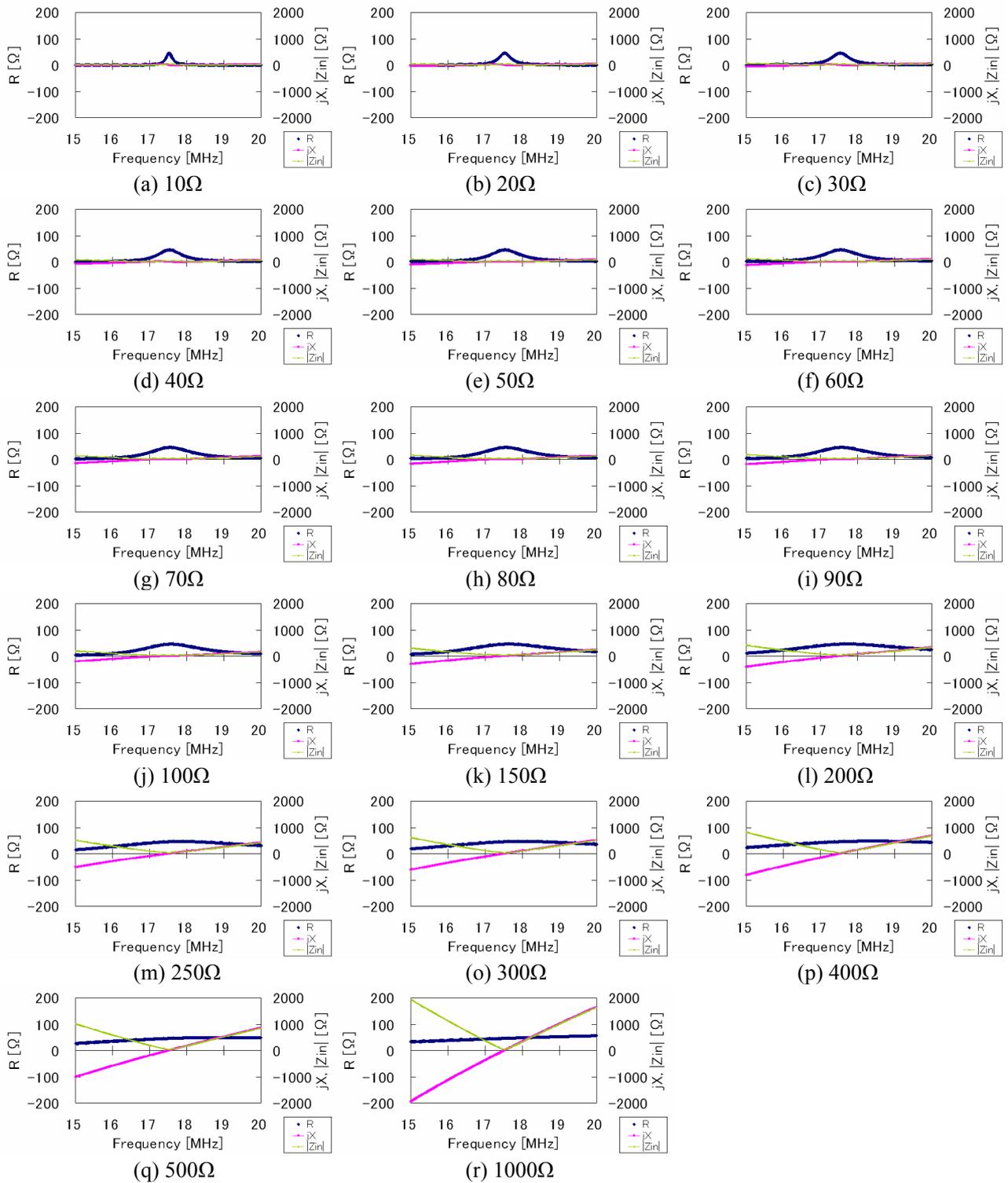


図 D.9 負荷 Z_{02} 変化時のエアギャップと入力インピーダンスの関係 (Z_{01} 最適化, 全体)

付録E 伝送線路と入力インピーダンス

“4.2.2 ショート型ヘリカルアンテナ”において伝送線路における負荷端オープン・ショートの際の結果を“図 4.14 伝送線路におけるオープンとショートにおける入力インピーダンス”で示した。そこで使われた数式を書きに記す。

伝送線路における入力インピーダンスは、以下の様に求められる。

$$V = V_L \cos \beta L + jZ_0 I_L \sin \beta L \quad (\text{E.1})$$

$$I = I_L \cos \beta L + j \frac{V_L}{Z_0} \sin \beta L \quad (\text{E.2})$$

$$Z_{in} = \frac{V}{I} = Z_0 \frac{Z_L + jZ_0 \tan \beta L}{Z_0 + jZ_L \tan \beta L} \quad (\text{E.3})$$

$$R_{in} = \text{Re}\{Z_{in}\} = \frac{1 + \tan^2 \beta L}{Z_0^2 + R_L^2 \tan^2 \beta L} Z_0^2 R_L \quad (\text{E.4})$$

$$X_{in} = \text{Im}\{Z_{in}\} = \frac{(Z_0^2 - R_L^2) \tan \beta L}{Z_0^2 + R_L^2 \tan^2 \beta L} Z_0^2 \quad (\text{E.5})$$

負荷がオープンの時, $I_L=0, Z_L=\infty$

$$Z_{in} = Z_0 \frac{1 + j \frac{Z_0}{Z_L} \tan \beta L}{\frac{Z_0}{Z_L} + j \tan \beta L} = -jZ_0 \frac{1}{\tan \beta L} \quad (\text{E.6})$$

負荷がショート時, $V_L=0, Z_L=0$

$$Z_{in} = jZ_0 \tan \beta L \quad (\text{E.7})$$

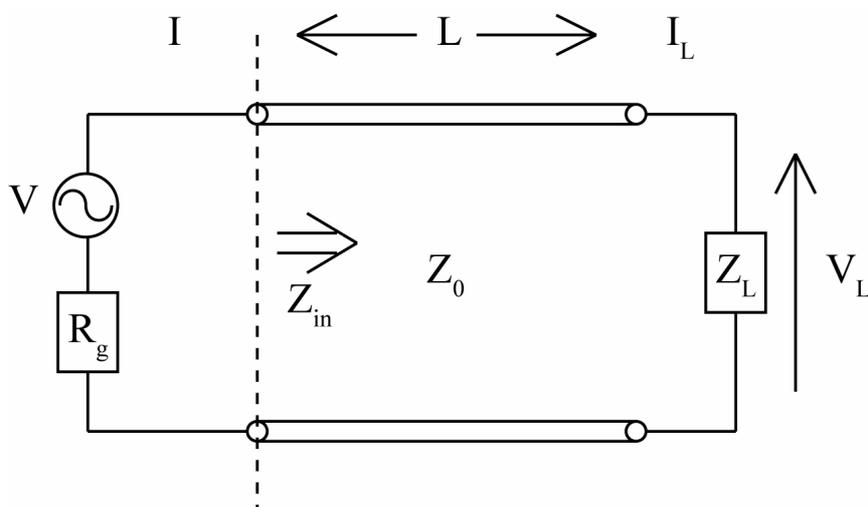


図 E.1 伝送線路

付録F 低周波と高周波の効率の定義の検証

MHz や GHz などの高周波においては、整合という概念が必要となる。これは、反射を考慮する為である。一方、kHz などの低周波において、電気回路やパワーエレクトロニクス技術などを扱う場合においては、長距離送電等の特殊な場合を除くと反射を考慮する必要がない。電磁界共振結合においても kHz ~MHz~GHz まで動作範囲が広がった事を受け、高周波と低周波における効率の定義と、今後の発展の可能性について述べる。

MHz や GHz などの高周波においてはアイソレータやサーキュレータを使用し、反射した電力は電源に直接戻らないようにして、アイソレータ内で消費するか、サーキュレータの先に設けられた負荷などで消費する。また、これら回路素子は、インピーダンスマッチングとしても使用される。これは、通信品質確保のため、また回路素子の破壊回避の為に必要な回路構成である。

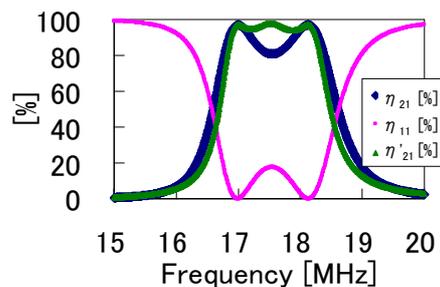
一方、パワーエレクトロニクス技術などを扱う kHz においては、反射を考慮する必要が無く、整合等を必要としない。そのため、電力伝送効率の計算方法が若干異なると思われる。実証実験含めての検証が必要であるが、反射を損失としない場合は(F.1)となる。反射を損失とみなす高周波においては(F.2)が使われている。

$$\eta'_{21} = \left| \frac{S_{21}^2}{1 - S_{11}^2} \right| \times 100 \quad [\%] \quad (F.1)$$

$$\eta_{21} = |S_{21}|^2 \times 100 \quad [\%] \quad (F.2)$$

第3の共振点

本論文は、統一して式(F.2)を使用している。一方、今後、反射を損失としない方式が確立されれば、式(F.1)のように更なる効率の向上が見込まれる。その際、共振周波数は2つではなく3つになり、その3つめの共振周波数は1素子における共振周波数 f_0 に等しくなるので、周波数を可変するなどの必要性がなくなり、周波数追従制御など不要で容易に高効率の電力伝送を行なえる。一方、 f_0 はエアギャップ変化によりインピーダンスの変動が激しく、エアギャップが小さいと電流が流れにくく、効率は高いが電力が送り辛いなどの現象も生んでいる。参考までに、式(F.1)と(F.2)の結果を図F.1に示す。以上については、実証実験などで示す必要があり、今後の課題とする^[57]。



図F.1 反射を考慮する場合と考慮しない場合の電力伝送効率と第3の共振点

付録G 単位変換

$$(\text{dBm}) = 10 \times \log_{10} (\text{mW})$$

$$(\text{mW}) = 10^{(\text{dBm}/10)}$$

dBm	電力
-10	0.1 mW
0	1 mW
10	10 mW
20	100 mW
30	1 W
40	10 W

発表文献・研究業績

査読付きオリジナル論文

- [1] 居村岳広, 岡部浩之, 内田利之, 堀洋一, “共振時の電磁界結合を利用した位置ずれに強いワイヤレス電力伝送 –磁界型アンテナと電界型アンテナ–”, 電学論D, Vol. 130, No. 1, pp.76-83 (2010).
- [2] 居村岳広, 岡部浩之, 内田利之, 堀洋一, “等価回路から見た非接触電力伝送の磁界結合と電界結合に関する研究 –共振時の電磁界結合を利用したワイヤレス電力伝送–”, 電学論D, Vol. 130, No. 1, pp.84-92 (2010).
- [3] Takehiro Imura, Toshiyuki Uchida, Yoichi Hori, “Flexibility of Contactless Power Transfer using Magnetic Resonance Coupling to Air Gap and Misalignment for EV”, World Electric Vehicle Association Journal, Vol.3, 2010
- [4] 居村岳広, 堀洋一, “等価回路から見た磁界共振結合におけるワイヤレス電力伝送距離と効率の限界値に関する研究”, 電学論D (査読中)
- [5] Takehiro Imura, Hiroyuki Okabe, Yoichi Hori, “Study on Open and Short End Helical Antennas with Capacitor of Wireless Power Transfer using Magnetic Resonant Couplings”, IEEE Transactions on Industrial Electronics. (査読中)
- [6] Takehiro Imura, “Theory of Maximum Air-gap and Efficiency of Magnetic Resonant Coupling for Wireless Power Transfer Using Equivalent Circuit and Neumann Formula”, IEEE Transactions on Industrial Electronics. (査読中)
- [7] 居村岳広, 岡部浩之, 堀洋一, “kHz~MHz~GHzにおける磁界共振結合によるワイヤレス電力伝送”, 信学論B (投稿準備中)

解説論文その他

- [8] 居村岳広, 堀洋一, “電磁界共振結合による伝送技術”, 電気学会誌, Vol. 129, No. 7, pp.414-417 (2009)
- [9] 居村岳広, “(仮題) 電磁共鳴によるワイヤレス電力伝送総論”, 日経エレクトロニクス, (10p), 2010 (掲載予定)
- [10] 居村岳広, “電磁界共振結合”, パワーエレクトロニクスハンドブック, 2編 11章 11.5節中, (2p), 2011.3 (掲載予定)
- [11] 居村岳広, “非接触給電(磁界共鳴)”, 自動車技術ハンドブック 設計 (EV・ハイブリッド) 編 第10分冊, (3p), 2011.5 (掲載予定)

国際会議発表

- [12] Takehiro Imura, Toshiyuki Uchida, Yoichi Hori, “Flexibility of Contactless Power Transfer using Magnetic Resonance Coupling to Air Gap and Misalignment for EV”, IEEE Electric Vehicle driven on Electric Vehicle Symposium 24, 2009.5
- [13] Takehiro Imura, Toshiyuki Uchida, Yoichi Hori, “Basic Experimental Study on Helical Antennas of Wireless Power Transfer for Electric Vehicles by using Magnetic Resonant Couplings”, IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference , 2009.9
- [14] Takehiro Imura, Hiroyuki Okabe, Toshiyuki Uchida, Yoichi Hori, “Study on Open and Short End Helical Antennas with Capacitor in Series of Wireless Power Transfer using Magnetic Resonant Couplings”, IEEE Industrial Electronics Society Annual Conference, 2009.11
- [15] Takehiro Imura, “Study on Maximum Air-gap and Efficiency of Magnetic Resonant Coupling for Wireless Power Transfer Using Equivalent Circuit” , IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2010.7. (Panel Sessions, 招待)
- [16] Teck Chuan Beh, Takehiro Imura, Masaki Kato, Yoichi Hori, “Basic Study of Improving Efficiency of Wireless Power Transfer via Magnetic Resonance Coupling Based on Impedance Matching”, IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2010.7. (審査中)

国内学会・研究会等発表

国内学会

- [17] 居村岳広, 内田利之, 堀洋一, “近傍界用磁界アンテナの共振を利用した高効率電力伝送の解析と実験—基本特性と位置ずれ特性—”, 電気学会総合応用部門大会, 2008.8
- [18] 居村岳広, 内田利之, 堀洋一, “非接触電力伝送用メアランダラインアンテナの提案”, 電子通信情報学会ソサイエティ大会, 2008.9
- [19] 居村岳広, 内田利之, 堀洋一, “共振による磁界結合を利用した非接触電力伝送 –3次元的位置ずれに柔軟な近傍界用アンテナ—”, ITS シンポジウム, 2008.12
- [20] 居村岳広, 岡部浩之, 内田利之, 堀洋一, “共振時の磁界結合を利用したワイヤレス電力伝送用ヘリカルアンテナのオープンショート特性評価”, 電気学会産業応用部門大会, 2009.8
- [21] 岡部浩之, 居村岳広, 内田利之, 堀洋一, “磁界結合を用いた非接触電力伝送用アンテナのピッチ依存性”, 電気学会産業応用部門大会, 2009.8
- [22] 居村岳広, 内田利之, 堀洋一, “磁界共振結合を利用したエアギャップと位置ずれに強い電気自動車へのワイヤレス充電用アンテナに関する研究”, EVS フォーラム 2009, 2009.12
- [23] 居村岳広, 岡部浩之, 小柳拓也, 加藤昌樹, ベーテックチュアン, 大手昌也, 島本潤吉, 高宮真, 堀洋一, “kHz~MHz~GHzにおける磁界共振結合によるワイヤレス電力伝送用アンテナの提案”, 電子情報通信学会総合大会, 2010.3 (Symposium Session, 投稿済み)
- [24] 岡部浩之, 居村岳広, 加藤昌樹, 小柳拓也, 大手昌也, ベーテック チュアン, 内田利之, 堀洋

一, “kHz 帯における磁界共振結合の実現とフェライトの効果” IEICE, 総合大会, 2010.3

- [25] 大手昌也, 居村 岳広, 岡部浩之, 加藤昌樹, 内田利之, 堀洋一, “電磁界共振結合を用いた非接触電力伝送システムにおける電力反射による電力伝送効率への影響の考察”, 電気学会産業計測制御研究会, 2010.3

研究会

- [26] 居村岳広, 内田利之, 堀洋一, “非接触電力伝送における電磁誘導と電磁界結合の統一的解釈”, 電気学会自動車研究会, VT-09-007, 2009.1
- [27] 居村岳広, “共振時の電磁界結合を利用したワイヤレス電力伝送と研究動向”, 第一回ワイヤレス給電研究会, 2009.6

委員会発表

- [28] 居村岳広, “電磁界共振結合を利用した大エアギャップかつ高効率のワイヤレス電力伝送におけるアンテナ特性”, 第8回キャパシタフォーラム, 2009.5 (招待講演)
- [29] 居村岳広, “電磁界共振結合によるワイヤレス電力伝送と研究動向”, 第3回移動体用エネルギーストレージシステム技術調査専門委員会, 2009.7 (招待講演)

その他の業績

招待講演

- [30] 居村岳広, “電磁界共振結合によるワイヤレス電力伝送技術”, IEEE MTT-S Kansai Chapter, 第1回無線電力伝送ワークショップ, 2009.8 (招待講演)
- [31] 居村岳広, “電磁共鳴によるワイヤレス電力伝送の最先端技術”, 電気学会四国支部, 2009.12 (招待講演)

商業講演・セミナー

- [32] 居村岳広, “電磁界共振結合による非接触電力伝送技術の概要・開発動向と応用及び今後の展開”, 日本技術情報センター, (第一回)2009.12, (第二回) 2010.1 (セミナー講演依頼)
- [33] 居村岳広, “共鳴方式ワイヤレス送電技術とその応用”, 日本テクノセンター, 2010.3 (セミナー講演依頼)
- [34] 居村岳広 “ワイヤレス給電技術の基本を解説 —電磁誘導から磁界共鳴まで—”, NE テクノロジー・シンポジウム, 2010.3 (セミナー講演依頼)

取材

- [35] EE Times Japan 取材記事, “ワイヤレス送電第二幕”, no51, pp.21-33.2009.10
Web 版, <http://eetimes.jp/content/3351>

参考文献

- [1] 中尾浩, 秋山一浩, “BS の放送品質”, 電子情報通信学会技術研究報告. CQ, コミュニケーションクオリティ, pp.31-36, 1998.7.23.
- [2] <http://www.tesla-museum.org/>
- [3] <http://www.rigb.org/>
- [4] http://www.clerkmaxwellfoundation.org/html/picture_viewer_13.html
- [5] James Clerk Maxwell, “A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field”, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1865.
- [6] <http://www.deutsches-museum.de/sammlungen/ausgewaehlte-objekte/meisterwerke-v/originalapparate/>
- [7] Thomas Valone, “Harnessing the Wheelwork of Nature: Tesla's Science of Energy”, Adventures Unlimited Press, 2002.
- [8] Sato, T., Sato, F., Matsuki, H.,” Computer simulation of eddy current loss reduction for rechargeable cardiac pacemaker”, Proceedings of the 3rd Annual International IEEE/EMBS Special Topic Conference on Microtechnology in Medicine and Biology, 2005. pp.120- 121, 2005. 5
- [9] K. Lashkari, S. E. Schladover, and E. H. Lechner : “Inductive power transfer to an electric vehicle,” in Proc. 8 th Int. Electric Vehicle Symp. 1986, pp. 258-267 (1986)
- [10] J.G. Hayes, “Battery charging systems for electric vehicles,” IEE Colloquium on Electric Vehicles - A Technology Roadmap for the Future, 5 May 1998, pp. 4/1-4/8.
- [11] Zhang Bingyi, Liu Hongbin, Zhao Yisong, Ying Yong, Feng Guihong, “Contactless Electrical Energy Transmission System Using Separable Transformer”, Proceedings of the Eighth International Conference on Electrical Machines and Systems, Vol.3, pp.1721-1724, 2005.
- [12] HIDEKI AYANO, HIROSHI NAGASE, HIROMI INABA, “A Highly Efficient Contactless Electrical Energy Transmission System”, Electrical Engineering in Japan, Vol.148, No.1, 2004.
- [13] Chwei-Sen Wang, Stielau O.H., Covic G.A., ”Design Considerations for a Contactless Electric Vehicle Battery Charger”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.52, Issue5, pp1308-1314, 2005.
- [14] J. Yungtaek and M. M. Jovanovic, “A contactless electrical energy transmission system for portable-telephone battery chargers,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 50, no. 3, pp. 520-527, 2003.
- [15] S.Y.R. Hui and W.W.C. Ho, “A new generation of universal contactless battery charging platform for portable consumer electronic equipment”, IEEE Trans. Power Electron. 20 (3) (2005), pp. 620–627.
- [16] H. Abe, H. Sakamoto, and K. Harada : “A Noncontact Charger Using a Resonant Converter with Parallel Capacitor of the Secondary Coil.” IEEE Trans. on Industry Applications, VOL. 36, No2, pp. 444-451, MARCH/APRIL (2000)
- [17] K. Hatanaka, F. Sato, H. Matsuki, S. Kikuchi, J. Murakami, M. Kawase and T. Satoh, “Power transmission of a desk with a cord-free power supply”, IEEE Transactions on Magnetics 38 (September (5)) (2002), pp. 3329–3331.
- [18] A. W. Green and J. T. Boys : “10 kHz inductively coupled power transfer-concept and control”, IEE Power

electronics and variable speed drives conference, PEVD, No. 399, pp. 694-699 (1994)

- [19] 紙屋雄史, 中村幸司, 中村達, 大聖泰弘, 高橋俊輔, 佐藤剛, 松木英敏, 成澤和幸, “電動車両用非接触急速誘導充電装置の開発と性能評価 (第一報)”, 自動車技術会春期大会 学術講演会前刷集 No.80-07, 2007.
- [20] 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構, (委託先) 昭和飛行機工業株式会社, 学校法人 早稲田大学, 国立大学法人 東北大学, 独立行政法人 交通安全環境研究所, “非接触給電装置の研究開発”, 平成 17 年度~18 年度成果報告書, エネルギー使用合理化技術戦略的開発, エネルギー有効利用基盤技術先導研究開発, 平成 19 年 3 月 (2007.3)
- [21] O. H. Stielau and G. A. Covic : “Design of loosely coupled inductive power transfer systems”, Proc. 2000 Int. Conf. Power System Technology, Vol. 1, pp. 85-90 (2000)
- [22] 藤田敏博・金子裕良・阿部 茂 : 「直列および並列共振コンデンサを用いた非接触給電システム」, 電学論 D, 127, 2, pp. 174-180 (2007)
- [23] 金子裕良・松下真也・及川康史・阿部 茂 : 「直列および並列共振コンデンサを用いた移動型非接触給電システム」, 電学論 D, 128, 7, pp. 919-925 (2008)
- [24] André Kurs, Aristeidis Karalis, Robert Moffatt, J. D. Joannopoulos, Peter Fisher, Marin Soljačić, “Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances,” in Science Express on 7 June 2007, Vol. 317. no. 5834, pp. 83 – 86.
- [25] Aristeidis Karalis, J.D. Joannopoulos and Marin Soljačić, “Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer,” Annals of Physics, Volume 323, Issue 1, January 2008, Pages 34-48, January Special Issue 2008.
- [26] Justin Rattner, “Research and Development: Crossing the Chasm between Humans and Machines”, Intel Developer Forum, 2008.8.19-21
- [27] <http://www.lightninglab.org/>
- [28] Haus, H.A., Huang, W., ”Coupled-mode theory” Proceedings of the IEEE, Volume 79, Issue 10, Page(s)1505 – 1518, Oct. 1991
- [29] 日経 BP 社, <http://techon.nikkeibp.co.jp/>
- [30] “日経エレクトロニクス”, 2009 年 10 月 5 日号
- [31] Brown W.C., “The History of Power Transmission by Radio Waves”, IEEE Trans. MTT, Vol.32, No.9, 1984, pp.1230-1242.
- [32] Brown W.C., “Experiments in the transportation of energy by microwave beam”, IEEE International Convention Record, Vol.2, part2, pp.8-18, 1964.
- [33] Tae-Whan Yoo and Kai Chang, “Theoretical and Experimental Development of 10 and 35 GHz Rectennas,” IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol.40, no.6, pp. 1259-1266, June 1992.
- [34] 浅野孝文, 安見達郎, 賀谷信幸, 角田博明, “導電性不織布を用いたフレキシブル・レクテナの特性評価”, 電子情報通信学会技術研究報告. A・P, アンテナ・伝播, pp.87-91, 2001.11.8
- [35] William C. Brown and E. Eugene Eves. “Beamed Microwave Power Transmission and its Application to Space”IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES, VOL 40. NO 6. JUNE 1992. pp. 1239-1250.

- [36] R. Dickinson and W. Brown, Radiated Microwave Power Transmission System Efficiency Measurements. NASA-JPL, Technical Memorandum 33-727 (May 15, 1975) Pasadena, CA .
- [37] Glaser, Peter E., "Power from the Sun: Its Future", Science Magazine, Vol.162, pp.857-861. (Nov. 22, 1968)
- [38] McSpadden, J. O. and J. C. Mankins, "Space Solar Power Programs and Microwave Wireless. Power Transmission Technology", IEEE Microwave Magazine, December 2002, pp.46-57.
- [39] Matsumoto, H., "Research on solar power satellites and microwave power transmission in Japan", Microwave Magazine, IEEE, Vol.3, Issue 4, pp.36-45. Dec. 2002
- [40] 上田英樹,安藤真,篠原真毅,山川宏,藤原暉雄,長野賢司, "ユビキタス電源を目指した, 飛行船によるマイクロ波送電実験用ハニカムラジアルラインスロットアンテナの設計試作",SPS 時限研究専門委員会研究会,2008.4.22,機械振興会館,東京.
- [41] 吉田雄輝, 寺田則幸, 青山洋光, 川崎繁男, 佐々木進, 田中孝治, "原型レトロディレクティブアクティブ集積アンテナの試作", 信学技報, ED2001-212-223, pp. 45-50, Jan. 2002
- [42] 高橋文人, 橋本弘藏, "マイクロ波送電用レトロディレクティブシステムの開発及び屋外実験", 信学技報, SPS2008-15(2009-03), 2009
- [43] 篠田健司, 兒島淳一郎, 篠原真毅, 三谷友彦, 橋本隆志, 岸則政, 藤田晋, 三田村健, 外村博史, 西川省吾, "マイクロ波送電を用いた電気自動車充電システムの評価研究Ⅱ", 信学技報 SPS2006-18(2007-02), 2007.
- [44] 篠原真毅, 松本紘, 三谷友彦, 芝田裕紀, 安達龍彦, 岡田寛, 富田和宏, 篠田健司, "無線電力空間の基礎研究", 信学技報 SPS2003-18 (2004-03) pp. 47-53 (2004)
- [45] Alanson Sample, Joshua R. Smith, "Experimental results with two wireless power transfer systems", Radio and Wireless Symposium, 2009. RWS '09. IEEE, pp16-18, 18-22 Jan. 2009
- [46] N. Kawashima, "The importance of the development of a rover for the direct confirmation of the existence of ice on the moon," Trans. Japan. Soc. Aeronaut. Space Sci. Vol.43, 2000, pp.34-35
- [47] N. Kawashima, K. Takeda, H. Matsuoka, Y. Fujii, M. Yamamoto, "Laser Energy Transmission for a Wireless Energy Supply to Robots", 22nd International Symposium on Automation and Robotics in Construction, ISARC 2005 - September 11-14, 2005, Ferrara (Italy)
- [48] 小紫 公也, "総論", 電気学会誌, Vol. 129, No. 7, pp.410-413 (2009) .
- [49] Parviz, B.A., "For your eye only", IEEE, Spectrum, 2009.9
- [50] 居村岳広, "電気二重層キャパシタを利用した電気自動車用充電スタンド模擬実験", 上智大学卒業論文, 2005.3
- [51] 財団法人日本エネルギー経済研究所石油情報センター <http://oil-info.ieej.or.jp/>
- [52] Hong, J.-S., "Couplings of asynchronously tuned coupled microwave resonators," Microwaves, Antennas and Propagation, IEE Proceedings, Volume 147, Issue 5, pages 354-358, Oct 2000.
- [53] 河口, 小林, "Open-loop 共振器間結合係数の磁気結合と静電結合の判別," 信学総大, C-2-79, pp. 114, Mar. 2004.
- [54] 河口 民雄, 小林 禧夫, 馬 哲旺, "分布定数共振器間電磁結合の等価回路表示に関する研究," 電子情報通信学会技術研究報告. EMCJ, 環境電磁工学, Vol. 103, No. 370, pp. 1-6, 2003.
- [55] 河口 民雄, 馬 哲旺, 小林 禧夫, "マイクロストリップスパイラル共振器を用いた楕円関数特性

帯域通過フィルタの設計”, 電子情報通信学会論文誌. C, エレクトロニクス J88-C(12)
pp.1040-1048 20051201

- [56] 栗井 郁雄, 岩村 慎太郎, 久保 洋, 真田 篤志, “共振器結合係数の電気及び磁氣的成分への分離,” 電子情報通信学会論文誌. C, エレクトロニクス, Vol.J88-C, No.12, pp. 1033-1039, 2005.
- [57] 大手昌也, 居村 岳広, 岡部浩之, 加藤昌樹, 内田利之, 堀洋一, “電磁界共振結合を用いた非接触電力伝送システムにおける電力反射による電力伝送効率への影響の考察”, 電気学会産業計測制御研究会, 2010.3