



## <研究紹介・自己紹介>

### 研究項目 A01 計画研究ア

#### 「周期構造を利用したマイクロ波メタマテリアルの開発と応用」

研究分担者 堀井康史（関西大学）

研究計画アで、マイクロ波用メタマテリアルデバイスの開発を目指している関西大学の堀井康史です。ここでは、私自身が行ってきたメタマテリアル研究とその背景についてご紹介したいと思います。

2000年、D.R.Smith がスプリットリング共振器と金属細線の組み合わせで左手系メタマテリアルの実現に成功し、これによって多くの研究者がメタマテリアルに関心を寄せることになったのはご周知の通りです。しかし、マイクロ波デバイスの開発に携わっていた私には、その2年後に登場した伝送線路系メタマテリアルこそ本当の意味で大きなショックでした。UCLA の T.Itoh 氏、C.Caloz 氏、A.Sanada 氏が中心となって2002年にCRLH伝送線路を提案し、コンデンサとコイルを組み込んだ簡単な伝送線路構造で左手系メタマテリアル特有の特異な物理現象を広帯域に、かつ低損失に発現できることを報告しました。左手系帯域ではバックワード波が伝搬し、位相進みが発生する。この位相特性を利用すれば、従来にはない広帯域動作のデバイスや多周波動作のデバイスが自由に設計できるという、まさに夢のような研究成果が続々と生まれてきました。さらに、漏れ波アンテナでは、180度のビーム走査が可能なアンテナも紹介され、一気にメタマテリアル研究が熱を帯びてきました。

その当時、私の職場では2003年度の在外研究員の募集があり、何としてもという思いで書いた計画書が評価されたのか、運よくその権利を獲得することができました。2003年9月から1年間の海外生活。とはいえ、海外経験の乏しかった私は「ロス市警 24時間」のテレビ番組を見るにつれ、家族(当時、子供が8歳)をロサンゼルスに連れて行ってもいいものかと思悩み、在外期間の前半を家族と治安の良いビクトリア(カナダ)で暮らし、その後、単身で私だけがアメリカにわたることに決意しました。

UCLAではC.Caloz氏、S.Han氏、そしてDGS(Defected Ground Structure)の生みの親として知られるD.Ann氏と同室となり、彼らの研究スタイルを眺めつつ、昼夜を問わず研究に打ち込んだものでした。UCLAにおける研究効率の良さは、即座のディスカッションにあったように思います。誰かが新しい案を

思いつくと、「これ、どう思う」とすぐさま同室の仲間とディスカッションに入る。それと同時に元のアイデアにどンドンと磨きかけられ、骨格ができ上がり、そこから枝葉が広がっていく。さらに High Frequency Center では、エッチング用マスクの作成から測定までを瞬時に行える環境が整っており、朝に得たアイデアがその日のうちに検証できるような態勢がとられていました。かつて、Caloz 氏より「1 日 1 本、論文を書こう」と言われたことがありましたが、まんざらジョークではなかったのかもしれませんが、在籍中、Caloz 氏にさまざまな CRLH 回路を見せていただき、それらの回路がデバイス設計に極めて魅力的な特性を持ち備えていることを教えていただきましたが、1 点どうしても気になったのが回路寸法でした。せつかくの特性もあのように大きくては、実用の際に問題になることは明確でした。その点を何とか克服しようとして生まれたのが積層型 CRLH 伝送線路です。

メアンダ線路を 2 組の金属平板でサンドイッチ状に挟んで積層化し、これらをビアで結んでユニットセルとしたものを、上下に積み重ねることで積層型 CRLH 伝送線路を実現します。動作原理は従来の平面型 CRLH 伝送線路と同じですが、いざ広帯域で挿入損の小さなものを作ろうとしてもなかなか特性が出ず、結果的に図 1 のような実用性を欠いた特性となってしまいました。おまけに、12 枚の基板をカづくで積層した手製の試作モデルでしたので、その実験特性も大きく乱れてしまいました。

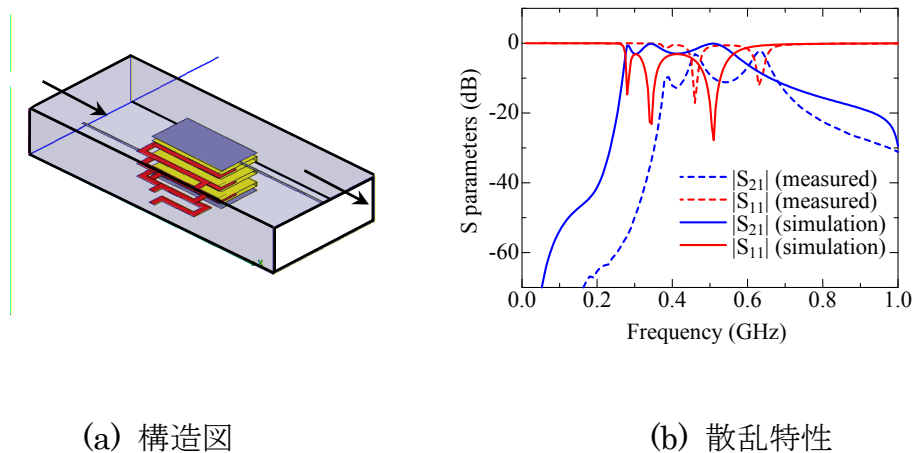


図 1 UCLA において考案した初代積層型 CRLH 伝送線路[1]

在外研究を終え、日本に帰国後もその特性の改善を細々に行っていました。今から思えばずいぶんとさまざまな構造を試したものでしたが、最終的な構造

では、平行金属板の中央の金属を取り除いて右手系直列インダクタンスを大きく取れるように工夫し、さらにメアンダ線路と平行金属板との結合を抑えるようにメアンダ線路の配置を調整することで、特性が大幅な改善へとつながりました。図 2 は 2008 年に発表した 2 代目の積層型 CRLH 線路で、図 1 のもの比べて通過帯域が非常にフラットで、挿入損も大きく改善されていることがお分かりいただけるかと思います。なお、このモデルは、比誘電率 2.59 の Rexolite 2200 基板を用いて  $6.0 \times 5.0 \times 2.85 \text{ mm}^3$  の寸法で実現したものです。

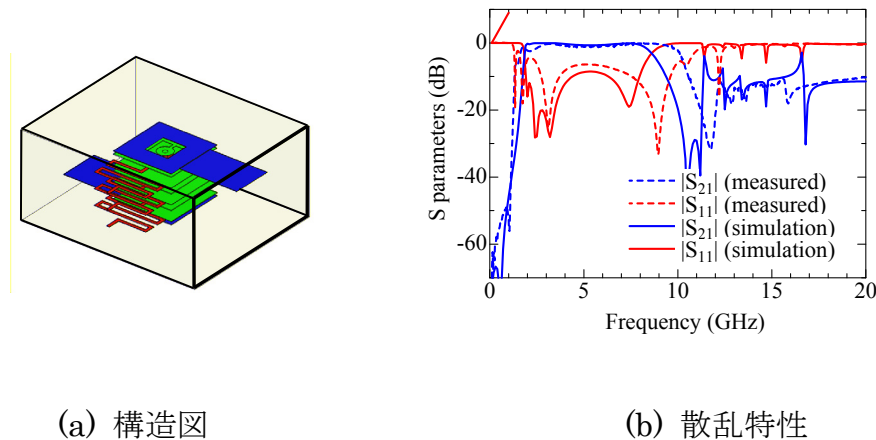
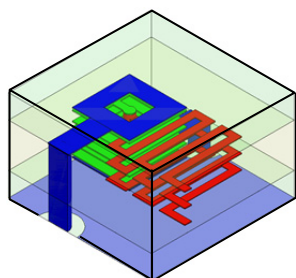


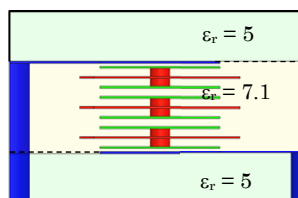
図 2 2008 年に報告した第 2 世代の積層型 CRLH 伝送線路とその特性[2]

最後にご紹介するのが、LTCC 積層化技術で作製した図 3 の CRLH 伝送線路で、回路寸法は  $1.5 \times 1.5 \times 0.95 \text{ mm}^3$  と米粒大です。回路構造がこれまでご紹介したものと大変似ているためあまり変化がないように思えるかもしれませんが、圧倒的な小型化を実現しています。また、このような小型化を図るとさまざまな箇所でも思いもよらない結合が生じ、その結果、いとも簡単に伝送特性が劣化してしまいます。これを防ぐため、回路形状の微調整とセラミック材料の選定には注意を払っています。散乱特性から確認できるように 3GHz から 16GHz まで挿入損の少ないフラットな特性を実現できていることが確認できます。また、さらに注目すべき点は左手系帯域が非常に広いことで、このモデルの左手系帯域は FCC が掲げる 3.1GHz から 10.6GHz の UWB 帯域と完全に一致しています。このように左手系が広がるのは、左手系回路パラメータの寄与にくらべて、右手系パラメータの寄与が大幅に少ないためで、純粋な左手系メタマテリアルを作ることが不可能といわれてはいますが、小型化することで右手系回路の寄与を抑圧し、純粋な左手系特性に近い特性を実現できることをこの米

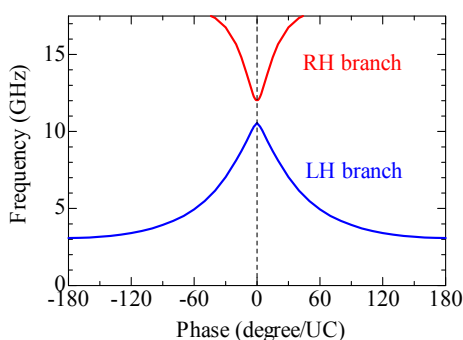
粒大モデルは物語っています。



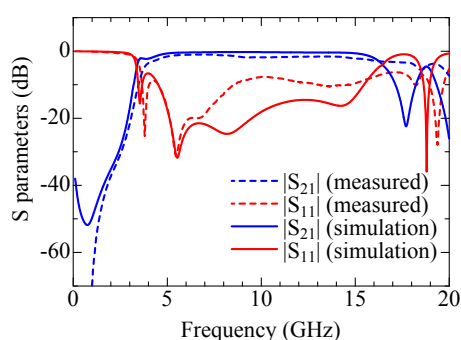
(a) 構造図



(b) 側面図



(a) 分散特性



(b) 散乱特性

図3 2010年に報告した第3世代の積層型CRLH伝送線路とその特性[3]

今後のデバイス研究においては、ここでご紹介した積層メタマテリアル技術をさまざまな高周波回路設計にフル活用することで、より小型・高機能なデバイスを提案し続けていきたいと考えています。

- [1] Y. Horii, C. Caloz, and T. Itoh, "Super-compact multi-layered left-handed transmission line and diplexer application", *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.*, vol.53, no.4, 1527-1534, April 2005.
- [2] Y.Horii, "A super-compact balanced multi-layered CRLH transmission line with wideband LH properties for microwave phase engineering," *IEEE Int'l Microwave Symp., Proceedings*, TU1F-4, pp.53-56, June 2009.



- [3] Y. Horii, N. Inoue, T. Kawakami, and T. Kaneko, "Super-compact LTCC-based multi-layered CRLH transmission lines for UWB applications," European Microwave Conf., Proceedings, Manchester, UK, Sep. 2011.