

# CRLH 理論の誕生 BIRTH OF CRLH SCHEME

伊藤 龍男  
Tatsuo Itoh

カリフォルニア大学ロサンゼルス校電気工学科  
Dept. of Electrical Engineering, University of California, Los Angeles

## Abstract

This article describes a circumstance in which the composite right/left handed (CRLH) structure has emerged during the struggling days in connection with starting the activities of microwave applications of metamaterial structures. The author had a very unique experience that does not happen frequently but that affected significant impacts on the subsequent research activities and became a main stream of the practical metamaterial projects.

## 1. はじめに

メタマテリアルとは、自然界に通常存在しない特異な特性を持つ人工物、あるいは合成物質の構造と定義される。近年において、様々なタイプのメタマテリアルが研究された。一つはフォトニックバンドギャップ物質あるいはフォトニック結晶である。この結晶は、その構造の周期性により、電磁波を遮断する独特な特性を持つ。しかし、本稿では、等価誘電率及び等価透磁率が同時に負となる左手系あるいは負屈折物質の議論に限定する。このような物質構造においては、屈折（スネルの法則）の反転現象や位相速度と群速度の逆行など、多くの興味深い現象が起こる。この内、屈折の反転現象はマクスウェル方程式から簡単に説明できる。波源を含まない領域で無損失を仮定すると、平面波は次式で定義される。

$$\vec{E} = \vec{E}_0 e^{-j\vec{\beta} \cdot \vec{r}}, \quad \vec{H} = \vec{H}_0 e^{-j\vec{\beta} \cdot \vec{r}} \quad (1)$$

マクスウェル方程式から、次式を得る。

$$\vec{\beta} \times \vec{E} = +\omega\mu\vec{H} \quad (2a)$$

$$\vec{\beta} \times \vec{H} = -\omega\varepsilon\vec{E} \quad (2b)$$

もし $\varepsilon$ と $\mu$ の両方が正であるなら、 $\vec{E}$ ,  $\vec{H}$ ,  $\vec{\beta}$  ベクトルは右手の法則に従う。例えば、 $\vec{E}$  は+x軸、 $\vec{H}$  は+y軸、 $\vec{\beta}$  は+z軸方向となる。しかし、もし $\varepsilon$ と $\mu$ の両方が同時に負であるなら、これらのベクトル

が左手の法則、すなわち、 $E_x, H_y, -\beta$  (z軸の負の方向) となることは容易にわかる。また、 $v_p = \omega/\beta$  で与えられる位相速度も負となることを意味する。一方、ポインティングベクトル  $\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$  に関する群速度は正のままである。

屈折の反転現象、あるいはスネルの法則の反転は、(普通の) 右手系媒質と左手系媒質の間の境界条件を満足することによってもたらされる。

## 2. メタマテリアル研究の歴史

1968年<sup>1</sup>、ロシアの科学者Veselagoが初めて負屈折物質の概念を提案したが[1]、この提案は長い間日の目を見ない状態であった。しかし、提案から約30年後の2000年に、カリフォルニア大学サンディエゴ校の研究グループが、スプリットリング共振器と細線メッシュを使用することによりスネルの法則を反転させ、マイクロ波領域において負屈折現象を実験的に実証した。この実験により、負屈折物質構造に注目が浴びることとなる。図1にスプリットリング型メタマテリアルを示す。この研究はPendryの研究に基づいている。Pendryは細線メッシュによって負の誘電率を、スプリットリング共振器により負の透磁率をすでに実証していた[3, 4]。しかし、残念ながら、これらの出版物が物理学の機関誌にあったため、著者は後になる

<sup>1</sup> ロシア語の原本は1967年に出版された。



図1 スプリットリング型メタマテリアル

までメタマテリアルという研究テーマに触れることがなかった。

少し後の2000年に、UCLAやUCSD、その他の大学からの数人の研究者が国防総省のMURI

(Multidisciplinary University Research Initiative: 総合的  
大学研究イニシアチブ)と呼ばれる研究拠点

(COE)タイプの政府補助金に対して研究提案を提出

した。その研究目的は左手系メタマテリアルの物理学及び工学的技術をさらに調査しその可能性を探ることであった。そして、この研究グループが、

著者をメタマテリアルのマイクロ波アプリケーションの分野での研究に誘ってくれた。研究提案は首尾よく承認され、国防総省より資金が供給された。これは新しい研究領域に入り込む素晴らしい機会であり、また責任は非常に重くやりがいがあった。そしてどんな種類のマイクロ波アプリケーションがこの新しいベンチャーで十分独創的であるか、注意深い考察が必要であった。著者は様々な可能性のあるアイデアを思い付いた。それらの

1つは従来の右手系伝送線路とメタマテリアル左手系伝送線路からなる非対称方向性結合器である。2つの右手系伝送線路からなる従来の設計では、結合係数は2つのモードの伝搬定数の違いに依存している。左手系と右手系線路の伝搬定数は異符号であるため、結合長は非常に短くなることが期待された。もう1つのアイデアは、単位セル内の構成要素あるいは境界条件のいずれかを機械的に変えることができる機械的チューナブルメタマテリアル構造である。これらのアイデアの両方とも後に実証された[5, 6]。

2つの右手系伝送線路からなる従来の設計では、結合係数は2つのモードの伝搬定数の違いに依存している。左手系と右手系線路の伝搬定数は異符号であるため、結合長は非常に短くなることが期待された。もう1つのアイデアは、単位セル内の構成要素あるいは境界条件のいずれかを機械的に変えることができる機械的チューナブルメタマテリアル構造である。これらのアイデアの両方とも後に実証された[5, 6]。

2つの右手系伝送線路からなる従来の設計では、結合係数は2つのモードの伝搬定数の違いに依存している。左手系と右手系線路の伝搬定数は異符号であるため、結合長は非常に短くなることが期待された。もう1つのアイデアは、単位セル内の構成要素あるいは境界条件のいずれかを機械的に変えることができる機械的チューナブルメタマテリアル構造である。これらのアイデアの両方とも後に実証された[5, 6]。

2つの右手系伝送線路からなる従来の設計では、結合係数は2つのモードの伝搬定数の違いに依存している。左手系と右手系線路の伝搬定数は異符号であるため、結合長は非常に短くなることが期待された。もう1つのアイデアは、単位セル内の構成要素あるいは境界条件のいずれかを機械的に変えることができる機械的チューナブルメタマテリアル構造である。これらのアイデアの両方とも後に実証された[5, 6]。

2つの右手系伝送線路からなる従来の設計では、結合係数は2つのモードの伝搬定数の違いに依存している。左手系と右手系線路の伝搬定数は異符号であるため、結合長は非常に短くなることが期待された。もう1つのアイデアは、単位セル内の構成要素あるいは境界条件のいずれかを機械的に変えることができる機械的チューナブルメタマテリアル構造である。これらのアイデアの両方とも後に実証された[5, 6]。

2つの右手系伝送線路からなる従来の設計では、結合係数は2つのモードの伝搬定数の違いに依存している。左手系と右手系線路の伝搬定数は異符号であるため、結合長は非常に短くなることが期待された。もう1つのアイデアは、単位セル内の構成要素あるいは境界条件のいずれかを機械的に変えることができる機械的チューナブルメタマテリアル構造である。これらのアイデアの両方とも後に実証された[5, 6]。

### 3. 伝送線路アプローチ

メタマテリアルの研究初期から、著者はスプリットリング型メタマテリアルをマイクロ波コンポーネントに実装することに関して懐疑的だった。最も基本的な問題はスプリットリングに基づく構造が狭帯域であることであった。それは負の誘電率と透磁率は共振によって得られるからである。加えて、共振状態において電流は導体の端部近くに集中するため、構造の挿入損失が高くなる可能性もあった。図1の構造は3次元構造であるが、メタマテリアルの電磁気特性は3次元ではない。構造は偏波に依存し、異方性である。物理学のグループにおける負屈折物質の主要な興味は、負の屈折の実証と関連した自由空間光学型現象にあるように思われた。

しかし、マイクロ波アプリケーションのためには、各基本コンポーネントが広帯域であることが望まれる。広帯域なコンポーネントから狭帯域な共振タイプ構造を作ることは可能であるが、反対を実現することは難しい。それ故、広帯域な左手系物質を見いだすことが望ましい。同じく、研究の目的も単に左手系あるいは負屈折現象を実証するだけでなく、これらの機能を組み込んだマイクロ波コンポーネントの作成に焦点を当てていなくてはならなかった。

そして、2001年の秋に天佑が訪れた。著者は学部生向けの電磁気の講義の準備をしていて、Ramo、Winnery、Van Duzerの本[7]をざっと読んでいた。著者は偶然263ページを開き、そこに書かれていた位相速度と群速度が逆行する左手系伝搬を持つ1次元構造に沿った後退波の記述に目を奪われた。その等価回路と分散図は図5.16に示されていた。著者のグループはすぐにシミュレーションと実験を始め、左手系伝送を実証した。図2は(普通の)右手系と左手系伝送線路の等価回路と分散図である。ちなみに面白いことに、このマイクロ波実装のための左手系伝送線路の概念は、独立してほとんど同じ時期に3つの別のグループによって発見された[8, 9, 10]。

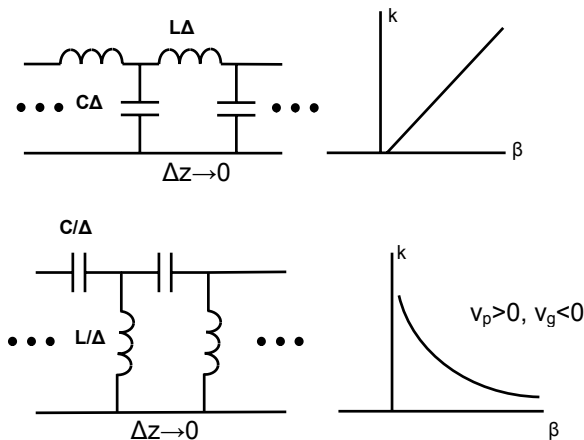


図2 (普通の) 右手系及び左手系伝送線路の等価回路と分散図

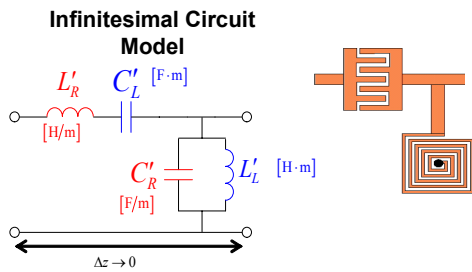


図3 右手/左手系伝送線路の無限小の等価回路とそのマイクロストリップ実装

#### 4. 右手/左手系複合(CRLH)伝送線路

その後間もなく、純粋な左手系伝送線路の構成が不可能であることに気がついた。これは図2で示される左手系伝送線路の分散図から理論的に説明できる。周波数が増加するにつれ、分散カーブの勾配によって与えられる群速度が際限なく増加し、光速をも超えてしまい、物理学の基本法則に反することがわかる。これは左手系伝送現象が、ある特定の周波数までしか実現されないことを示す。

純粋な左手系伝送線路を作成することは、実用的に不可能である。隣接した直列キャパシタンスは、直列インダクタンスを与えるインターコネクトによって接続される必要がある。また、インターコネクトと直列キャパシタ電極上には電荷が存在しているため、並列キャパシタンスも存在してしまう。これらの「寄生素子」を含んだ、現実的な構造を等価回路とともに図3に示す。この構造が右手系コンポーネント ( $L_R$  と  $C_R$ ) と左手系コン

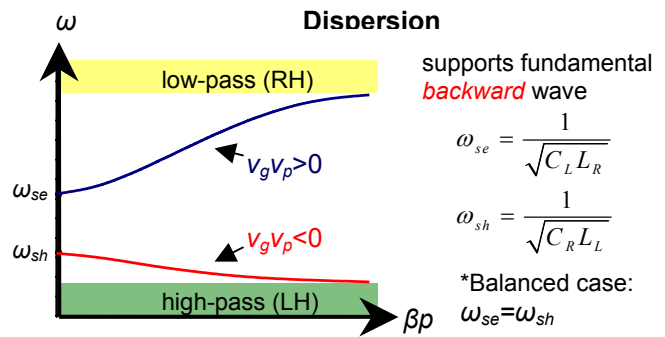


図4 CRLH 伝送線路の分散特性

ポーネント ( $C_L$  と  $L_L$ ) 両方を含んでいることは明らかである。それ故に、この構造を右手/左手系複合 (CRLH) 伝送線路と命名した [11, 12]。

CRLH伝送線路の分散図は、図4で示したようなものになる。 $\omega_{sh} = 1/\sqrt{C_R L_L}$  以下の周波数では左手系の性質を示し、 $\omega_{se} = 1/\sqrt{C_L L_R}$  以上の周波数では右手系の性質を示す。また、左手系特性の高域の性質により高域遮断域が存在し、右手系コンポーネントによる低域遮断域が存在する。 $\omega_{sh}$  と  $\omega_{se}$  両方において、伝搬定数  $\beta = 0$  あるいは管内波長が無限大、群速度は零となる。これらはCRLH伝送線路に沿って波が伝搬しない状態である。 $\omega_{sh}$  と  $\omega_{se}$  の間では、波は伝搬せず、この領域はスペクトルギャップと呼ばれる。この領域では等価誘電率あるいは等価透磁率のいずれかが負となる。もし  $L_R/C_R = L_L/C_L$  であるなら、 $\omega_{sh} = \omega_{se}$  となりスペクトルギャップはなくなる。このような場合、群速度は零ではなく、位相速度は無限大 (あるいは  $\beta = 0$ ) のままである。

一見すると、右手系コンポーネントの形式の寄生素子の存在は、純粋な左手系特性の性質を下げるかもしれない。しかし、CRLHの概念は、伝搬特性の柔軟性を高め、そして通常では成しえなかった特性を持つマイクロ波デバイスの構築に貢献する。この分散特性は、従来の伝送線路の特性を決定する物理的及び材料パラメータで設計されるよりむしろ、4つの等価パラメータ  $C_L, L_L, C_R, L_R$  の選択により設計されると言った方がいいかもしれない。この認識はマイクロ波コンポーネント開発のための「Dispersion Engineering: 分散工学」の概念の確立である。若干の例としては、広帯域マイクロストリップ-CPS変換器[13]、(左手系領域にお

ける超遅波性質による) 超小形アンテナ [14]、デュアルバンドコンポーネント[15]、無限波長アンテナ[16]、等位相等振幅電力分配器[17]などが挙げられる。

## 5. おわりに

本稿は右手/左手系複合 (CRLH) 構造の発見に導いた出来事の回顧録である。伝送線路に基づくメタマテリアルを発見するに至ったのは非常に稀有な出来事によるものであった。この概念に基づいて、左手系の概念とアイデアの原型はユニークで普通ではない特性を持つ実用的なマイクロ波コンポーネントにより広範囲に拡張されてきた。1次元 CRLH 構造だけが議論されてきたが、構造がより高次元に拡張できることも指摘しておく [12]。

## 謝辞

原稿の翻訳と体裁を整えていただいた防衛大学校助教、道下尚文博士に感謝する。

## 参考文献

- [1] V. Veselago, "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of  $\epsilon$  and  $\mu$ ," *Soviet Physics Uspekhi*, vol.10, no.4, pp.509-514, Jan., Feb. 1968.
- [2] D. R. Simth, W. J. Padilla, D. C. Vier, S. C. Nemat-Nasser, and S. Schultz, "Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity," *Phys. Rev. Lett.*, vol.84, no.18, pp.4184-4187, May 2000.
- [3] J. B. Pendry, A. J. Holden, W. J. Stewart, and I. Yongs, "Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructure," *Phys. Rev. Lett.*, vol.76, no.25, pp.4773-4776, June 1996.
- [4] J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins, and W. J. Stewart, "Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena," *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, vol.47, no.11, pp.2075-2084, Nov. 1999.

[5] C. Caloz and T. Itoh, "A novel mixed conventional microstrip and composite right/left-handed backward-wave directional coupler with broadband and tight coupling characteristics," *IEEE Microwave Wireless Compon. Lett.*, vol.14, no.1, pp.31-33, Jan.2004.

[6] N. Michishita, A. Lai, T. Ueda and T. Itoh, "Tunable dielectric resonator-based left-handed leaky wave antenna," *2007 International Symposium on Antennas and Propagation*, Niigata, Japan, Aug. 20-24, 2007.

[7] S. Ramo, J. R. Whinnery and T. Van Duzer, *Fields and Waves in Communication Electronics*, John Wiley & Sons, 1993, ISBN 0-471-58551-3.

[8] A. K. Iyer and G. V. Eleftheriades, "Negative refractive index metamaterials supporting 2-D waves," *IEEE MTT Int'l Symp.*, vol.2, Seattle, WA, pp.1067-1070, June 2002.

[9] C. Caloz and T. Itoh, "Application of the transmission line theory of left-handed (LH) materials to the realization of a microstrip LH transmission line," *Proc. IEEE AP-S USNC/URSI National Radio Science Meeting*, vol.2, San Antonio, TX, pp.412-415, June 2002.

[10] A. A. Oliner, "A periodic-structure negative-refractive-index medium without resonant elements," *URSI Digest, IEEE-AP-S USNC/URSI National Radio Science Meeting*, San Antonio, TX, p.41, June 2002.

[11] A. Lai, C. Caloz and T. Itoh, "Composite right/left-handed transmission line metamaterials," *IEEE Microwave Magazine*, vol.5, no.3, pp.34-50, September 2004.

[12] C. Caloz and T. Itoh, *Electromagnetic Metamaterials*, John Wiley & Sons, 2006, ISBN-10: 0-471-66985-7.

[13] C.-J. Lee, K.M.K.H. Leong and T. Itoh, "Broadband microstrip-to-CPS and microstrip-to-CPW transitions using composite right/left handed metamaterial transmission lines," *IEE Proc. Microwave, Antennas and Propagation*, vol.153, no.3, pp.241-246, June 2006.

[14] C-J Lee, K.M.K.H. Leong and T. Itoh, "Composite right/left-handed transmission line based on compact resonant antennas for RF module integration," *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol.54, no.8, pp 2283-2291, August 2006.

[15] I.-H. Lin, K. M.K.H. Leong, C. Caloz and T. Itoh, "Dual-band sub-harmonic quadrature mixer using composite right/left-handed transmission lines," *IEE Proc. Microwave, Antennas and Propagation*, vol.153, no.4, pp.365-375, August 2006.

[16] A. Lai, K.M.K.H. Leong and T. Itoh, "Infinite wavelength resonant antennas with monopolar radiation pattern based on periodic structures," *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol.55, no.3, pp.868-876, March 2007.

[17] K. M.K.H. Leong, A. Lai and T. Itoh, "Power combining oscillator array using metamaterial based injection locking coupling network," *2006 Asia Pacific Microwave Conference*, Yokohama, Japan, December 12 -15, 2006, pp.1066 -1069.