

機関番号：11501

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2010

課題番号：20360150

研究課題名（和文） 非線形メタマテリアルを用いた高機能回路に関する研究

研究課題名（英文） Study on high performance circuits using nonlinear metamaterials

研究代表者

榎原 浩一（NARAHARA KOICHI）

山形大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：00422171

研究成果の概要（和文）：

本研究では、非線形メタマテリアルとしてショットキーバラクタを導入した右手左手混在線路を用いて、その基本特性把握ならびに応用を検討した。まず、逐減摂動法による非線形孤立波の定量化を進め、実測により整合性検証を行う形をとった。一次元構成では、非線形性によるソリトンの孤立波生成とその共鳴相互作用の発見に、二次元構成では自己集束現象の実証にそれぞれ成功した。また、トランジスタの分布定数的導入による損失補償など、将来的な実践性向上に資する手法を新たに考案した。

研究成果の概要（英文）：

This study investigates composite right- and left-handed (CRLH) transmission lines periodically loaded with Schottky varactors to examine the fundamental properties and potential applications of nonlinear metamaterials. The analytical properties of nonlinear pulses in the line were first obtained by the reductive perturbation method, which were confirmed by several experimental measurements. In one dimension, we succeeded in the observation of solitary waves and their resonant interactions, while the self-focused pulse was clearly observed in two dimensions. A method of the wave amplification using traveling-wave field-effect transistors were newly devised to widen the future fields of applications.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	11,400,000	3,420,000	14,820,000
2009年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2010年度	1,700,000	510,000	2,210,000
年度			
年度			
総計	14,500,000	4,350,000	18,850,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子・電子デバイス・電子機器

キーワード：メタマテリアル，ソリトン，自己集束，非線形線路，共鳴相互作用

1. 研究開始当初の背景  
メタマテリアルは概して自然界に存在する

物質では生じ得ない電磁特性を人工的な構造で実現した物質である。1968年に Veselago

が、誘電率と透磁率が同時に負であるとき屈折率が負になることを示した。以降 30 年ほど経った 2001 年に Smith らによってその具現化がなされる。彼らはスプリットリングとワイヤからなる金属周期構造を作成しマイクロ波帯の特定の周波数帯において負の屈折率を実証した。その後、2002 年には Itoh らと Eleftheriades らによって伝送線路の形態をもつメタマテリアルとして右手 / 左手系複合線路 (Composite Right- and Left-Handed Transmission Line、以下、CRLH 線路) が提案された<sup>1)</sup>。CRLH 線路は比較的広い帯域に渡って左手系の性質が現れ、一方、有限の周波数において波数がゼロとなる性質や強い分散をもつ性質なども手伝って、ゼロ次モード発振器、方向性結合器、漏れ波アンテナなど従来にはない興味深いアプリケーションに応用されている。本研究は、この CRLH 線路に非線形素子を導入することによって現れる疑似ソリトンの伝播特性を利用するものである。ソリトンは、非線形性と分散性をともに持つ伝送線路において両者のつりあいが図られる場合に生成される孤立波であり、数理的な興味にとどまらず工学的利用においてもさまざま進められている対象である。1972 年には Hirota らによってバラクタを装荷した LC はしご型回路が戸田格子をよくエミュレートすることが見出された。1990 年代には Rodwell らのグループによってパルス圧縮、ショック生成といった非線形波動の超高速回路への適用がなされている。彼らは GaAs 基板上にショットキーダイオードをバラクタとして採用した LC はしご型回路を作製し、ソリトンパルス圧縮のデモンストレーションなどを行った。ことに立ち上がり時間が 1 ps (=  $10^{-12}$  秒) を下回るようなショック波の生成に成功している。<sup>2)</sup> この他にリング状線路を用いた極短パルス列生成の議論もなされている。一方、Hasegawa らによつては光ファイバの波長分散と光カー効果とのつりあいによってなる光ソリトンが提唱された。これは非線形シュレディンガー (Nonlinear Schrödinger, NS) 方程式に従う包絡ソリトンである (以下、NS 方程式の解であるものを NS ソリトンと呼ぶ)。強い分散が存在する線路において生成され、それがゆえに光ファイバの分散特性を長さ方向にさまざま設計することによって長距離伝送をはじめスーパー・コンティニューム (Supercontinuum, SC) 光生成などに活かされている。

## 2. 研究の目的

非線形メタマテリアル線路の理論的・実験的研究を行い、左手系電磁波の広帯域信号生成ならびに信号処理回路構築の基礎を固める。電圧依存容量を周期装荷した CRLH 線路上の波動伝播は非線形シュレディンガー方程式

で記述されることを世界に先駆けて示した。この性質を用いて、従来知られる右手系ソリトンに加えて左手系ソリトンが得られる。また二次元 CRLH 線路中には疑似ソリトンが励起される。これを制御することにより従来にはない高機能回路が構築される。本研究では理論解析の精度向上と原理確認実験を通じて、レーダーシステムに革新をもたらす超広帯域入出力信号分離といった新機能回路体系を実現する。研究期間内には次の 3 項目を特に強く推進する。

(1) 非線形一次元および二次元 CRLH 線路におけるソリトンの設計理論の精密化

これまでの研究実施によって、非線形 CRLH 線路の基礎方程式が得られている。その指導原理に沿って、実践性の大きい回路設計指針を提供する。具体的には、内製の電磁界解析ツールおよび汎用回路シミュレータにおける設計をすすめ、原理確認試作に橋渡しを行う。

(2) プリント・ボード回路を用いた試作評価による原理確認

理論的研究の帰結は実証されなければならない。回路試作および評価によってこれを行う。新しい哲学に従った回路の実現性をみるためには、設計性十分な試作が有効である。プリント回路ボード (Print Circuit Board, PCB) を用いた試作が最善である。

(3) 新しいパルス制御回路の提案

非線形 CRLH 線路は、従来は困難とされるさまざまな機能回路のプラットフォームとなる。パルス・レーダー・システムにおいて、送信と受信を単一モジュールで実現することのできる超広帯域入出力信号分離機能や、電気的制御による連続的パルス遅延制御回路などがこれにあたる。動作原理確認を待つて、こうした高機能回路の設計論を提供する。

## 3. 研究の方法

平成 20 - 22 年度の三年間の計画とする。平成 20 年度は非線形一次元 CRLH 線路の、21 年度は非線形二次元 CRLH 線路の、そして 22 年度は高機能パルス制御回路の、それぞれ設計論および原理動作確認を最終的な解決課題と設定する。具体的には 20 年度初期において数理に基づく解析的設計指針をまとめあげ、非線形一次元 CRLH 線路の設計論を確立する。期末には非線形一次元 CRLH 線路の原理動作を実証する。その成果を次元拡張の形態で昇華させることによって、平成 21 年度は非線形二次元 CRLH 線路の開発にあてる。そして期末に原理動作を実証する。平成 22 年度は具体的な高機能回路の開発を行い期末に完了する。

## 4. 研究成果

(1) 1 次元非線形 CRLH 線路における非線形孤立波の伝播特性の解明: 1 次元線路では、分

散と非線形のつり合いによるパルスの分散補償が可能である。線路の特性を明らかにするために、伝送方程式から一次元非線形シュレディンガー方程式を導出し、分散係数  $P$ 、

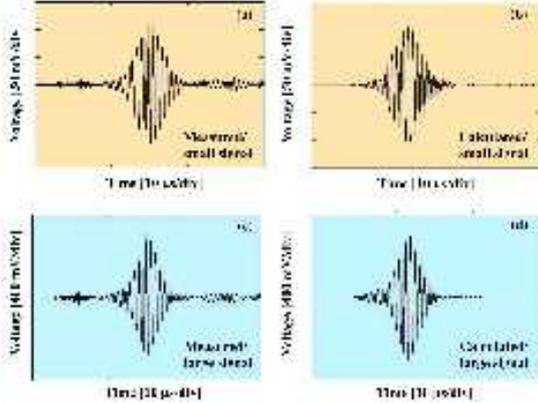


図 1：1次元非線形 CRLH 線路上のパルス波

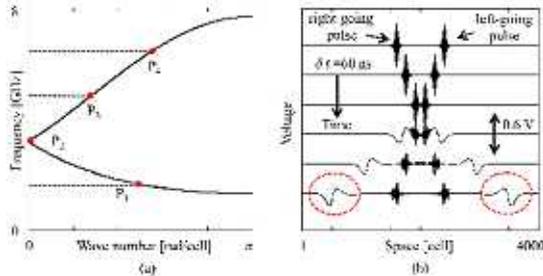


図 2：1次元非線形孤立波の共鳴相互作用

非線形係数  $Q$  を明らかにした。これらを元に、分散補償による短パルスの生成について数値解析ならびに実験を行い、非線形孤立波の励起を実証した。図 1 は試作線路上に誘起された非線形孤立波の時間領域測定結果である。線形分散パルスに比し明確な差別化が定量的に観測される。

(2) 1次元非線形 CRLH 線路上の孤立波共鳴相互作用：孤立波同士の衝突によって、波数整合が成立する場合において高調搬送波の孤立パルスが生成される共鳴相互作用が存在することを新たに見出した。特に対向したパルスを衝突させると第 2 高調波パルスの波数を小さく設計することができるため、線路を漏れ波アンテナとして動作させうる。入力キャリアの周波数を調整することによってアンテナの指向性制御が可能となる。図 2 は非線形孤立波の衝突による（赤色点線で囲む）高調搬送波パルス生成の様子を示す数値解析結果を示している。入力パルス波は分散グラフの  $P_1$  に対応している。第二高調波は  $P_2$  に対応するがほぼゼロに近い。互いに対向して衝突すると波数整合が成立する。

(3) 進行波型トランジスタと非線形 CRLH 線路の融合：パラクタのみからなる場合、線路損失によりパルスの振幅劣化が無視できな

い。損失と分散の補償とともに成功するスキームとして進行波型トランジスタを導入した。図 3 は、左に損失によるパルス振幅劣化の様子を示し、右にそれをトランジスタの能

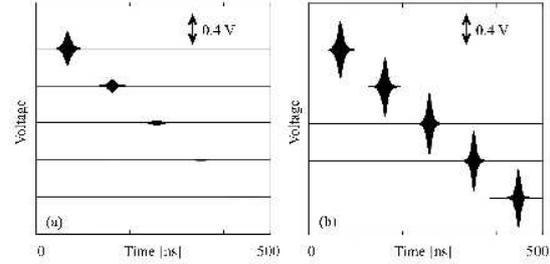


図 3：進行波型トランジスタによる損失補償

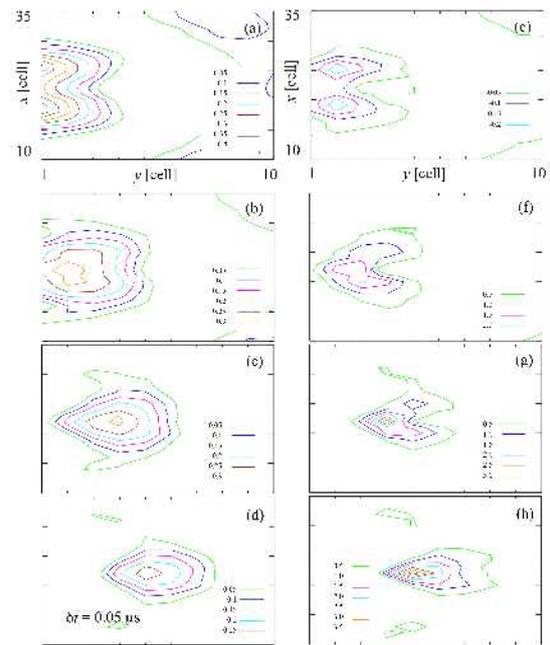


図 4：2次元非線形 CRLH 線路上のパルス伝搬

動性によって補償に成功している様子をそれぞれ示している。

(4) 2次元非線形 CRLH 線路における自己集束波の観測：1次元の場合とは異なり、2次元では非線形シュレディンガー方程式が可積分系を保たないため、分散性と非線形性が常に非均衡な状態が続く。しかし、非線形素子として用いているショットキーバークタによって非線形性を制限することが可能だと考えられる。これは、ショットキーバークタに順バイアスを与えたときダイオード電流が支配的となり、非線形性がパルスに影響しなくなるためである。原理確認のための設計と実験を行い、自己集束波を実測した。図 4 にはこの観測結果を明示する。図の左側には線形線路の波形伝搬を、右側には非線形線路のそれをそれぞれ示している。上から下に向かって時間が経過している。非線形線路ではパルスが自身の強度によって崩壊する様子

が見て取れる。

以上の包括的な検討によって、非線形メタマテリアルを用いた新しい技術の芽がさまざま見出された。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 28 件)

- (1) K. Narahara, "Experimental characterization of nonlinear pulses in coupled Schottky transmission lines," Progress in Electromagnetics Research C 21, pp. 143-153 (2011) 査読あり
- (2) K. Narahara, "Nonlinear traveling-wave field-effect transistors for managing dispersion-free envelope pulses," Progress in Electromagnetics Research Letters 23, pp. 29-38 (2011) 査読あり
- (3) K. Narahara, "Collision of nonlinear envelope pulses in composite left- and right-handed transmission lines periodically loaded with Schottky varactors," Progress in Electromagnetics Research C 21, pp. 1-12 (2011) 査読あり
- (4) J. Ogasawara, K. Narahara, "Self-focused pulses in composite right- and left-handed transmission lines periodically loaded with Schottky varactors," Progress in Electromagnetics Research Letters 22, pp. 29-38 (2011) 査読あり
- (5) K. Narahara, "Experimental observation of pulse-shortening phenomena in traveling-wave field effect transistors," Progress in Electromagnetics Research Letters 21, pp. 79-85 (2011) 査読あり
- (6) K. Narahara, "Characterization of short-pulse generation using traveling-wave field effect transistors," Jpn. J. Appl. Phys. 50, pp. 014104-014109 (2011) 査読あり
- (7) K. Narahara, "Generation of short electrical pulses using nonlinear traveling-wave field effect transistors," IEICE Electronics Express 7, pp. 1474-1479 (2010) 査読あり
- (8) K. Narahara, "Interactions of nonlinear pulses developed in coupled transmission lines regularly spaced Schottky varactors," Progress in Electromagnetics Research Letters 17, pp. 85-93 (2010) 査読あり
- (9) S. Nakagawa, K. Narahara, "Characterization of left-handed traveling-wave field effect transistors," to appear in Proc. 2010 Asia-Pacific Microwave Conf. (2010) 査読あり
- (10) K. Narahara, S. Nakagawa, "Nonlinear traveling-wave field effect transistors for amplification of short electrical pulses," IEICE Electronics Express 7, pp. 1188-1195 (2010) 査読あり
- (11) K. Narahara, "Coupled nonlinear transmission lines for doubling repetition rate of incident pulse streams," Progress in Electromagnetics Research Letters 16, pp. 69-78 (2010) 査読あり
- (12) J. Ogasawara, K. Narahara, "Experimental characterization of left-handed transmission lines with regularly spaced Schottky varactors," IEICE Electron. Express 7, No.4, pp. 608-614 (2010) 査読あり
- (13) K. Narahara, "Dynamics of oscillating pulse edges in two-dimensional switch lines," IEICE Electron. Express 7, No.4, pp. 314-319 (2010) 査読あり
- (14) K. Narahara, "Characterization of two-dimensional transmission lines periodically loaded with electronic switches for generation of short pulses," Jpn. J. Appl. Phys. 49, pp. 014101-014106 (2010) 査読あり
- (15) K. Narahara, "Characterization of nonlinear transmission lines for short pulse amplification," J. Infrared, Millimeter and Terahertz Waves DOI:10.1007/s10762-009-9597-0] (2009) 査読あり
- (16) J. Ogasawara, K. Narahara, "Short envelope pulse propagation in composite right- and left-handed transmission lines with regularly spaced Schottky varactors," IEICE Electron. Express 6, no. 22 pp.1576-1581 (2009) 査読あり
- (17) K. Narahara, "Amplification of short pulses in transmission lines periodically loaded with Schottky varactors," IEICE Electron. Express 6, no. 16 pp.1199-1204 (2009)

- 査読あり
- (18) K. Narahara, "Characterization of one- and two-dimensional switch lines for controlling traveling pulses," IEICE Electron. Express 6, no. 11, pp. 769-773 (2009) 査読あり
  - (19) S. Nakagawa, K. Narahara, "Characterization of left-handed traveling-wave transistors," IEICE Trans. Electron. E92-C, no. 11, pp. 1396-1400 (2009) 査読あり
  - (20) A. Yokota, K. Narahara, "Characterization of oscillating pulse edges in switch lines for development of widely tunable voltage-controlled oscillators," Jpn. J. Appl. Phys. 48, 084502-084506 (2009) 査読あり
  - (21) K. Narahara, A. Yokota, "Experimental observation of oscillating wave propagation on switch lines for generation of continuous electromagnetic waves," Journal of Electrical and Computer Engineering 2009, Article ID 816806, 4 pages (2009) 査読あり
  - (22) 中道徹, 榎原浩二, "二次元ショットキー-CRLH 線路を用いた空間的孤立波生成と応用," 信学技報 108, No. 256, pp. 35-40 (2008) 査読なし
  - (23) K. Narahara, A. Yokota, "Experimental characterization of short pulse generation in switch lines," IEICE Electronics Express 5, no. 22, pp. 973-977 (2008) 査読あり
  - (24) Y. Suzuki, S. Nakagawa, K. Narahara, "Non-linear plasma waves in coupled two-dimensional electron systems," Jpn. J. Appl. Phys. 47, pp. 8756-8760 (2008) 査読あり
  - (25) T. Nakamichi, S. Nakagawa, K. Narahara, "Management of spatially-localized pulses in two-dimensional composite right- and left-handed transmission lines periodically loaded with Schottky varactors," Jpn. J. Appl. Phys. 47, pp. 6583-6587 (2008) 査読あり
  - (26) K. Narahara, Y. Suzuki, "Characterization of plasma waves in gated two-dimensional electron systems," J. Appl. Phys. 103, pp. 023301 1-4 (2008) 査読あり
  - (27) K. Narahara, A. Yokota, "Full-wave analysis of quasi-steady propagation along trans- mission lines

periodically loaded with resonant tunneling diodes," Jpn. J. Appl. Phys. 47, pp. 1126-1129 (2008) 査読あり

- (28) S. Nakagawa, K. Narahara, "Characterization of two-stage composite right- and left-handed transmission lines," IEICE Trans. Electron. E91-C, pp. 631-637 (2008), 査読あり

〔学会発表〕(計 15 件)

- (1) 榎原浩二, 沼部洋平, "互いに結合した非線形線路の基本特性と応用," 電子情報通信学会総合大会, 2011 年 3 月 17 日, 東京都市大学
- (2) 中川俊, 榎原浩二, "左手系進行波型 FET の実験的検証," 電子情報通信学会総合大会, 2011 年 3 月 17 日, 東京都市大学
- (3) 小笠原淳, 榎原浩二, "ショットキーバラクタを装荷した左手系線路の設計論," 電子情報通信学会 MW 研究会, 2010 年 9 月 11 日, 東工大
- (4) 中川俊, 榎原浩二, "非線形進行波型トランジスタの特性解析," 電子情報通信学会 MW 研究会, 2010 年 9 月 11 日, 東工大
- (5) 中川俊, 榎原浩二, "左手系進行波型トランジスタの波動伝搬特性," 電子情報通信学会総合大会, 2010 年 3 月 15 日, 東北大学
- (6) 中川俊, 榎原浩二, "構造を単純化した左手系進行波型 FET の特性解析," 電子情報通信学会ソサエティ大会, 2010 年 9 月 17 日, 大阪府立大学
- (7) 小笠原淳, 榎原浩二, "ショットキーバラクタを装荷した左手系線路を用いたパルス制御," 電子情報通信学会ソサエティ大会, 2010 年 9 月 17 日, 大阪府立大学
- (8) 菅井亮, 榎原浩二, "非線形線路によるパルス増幅作用の検討," 電子情報通信学会ソサエティ大会, 2010 年 9 月 17 日, 大阪府立大学
- (9) 丸山裕之, 榎原浩二, "一次元および二次元スイッチ線路を用いたパルス制御," 電子情報通信学会ソサエティ大会, 2009 年 9 月 19 日, 新潟大学
- (10) 小笠原淳, 榎原浩二, "ショットキーバラクタを装荷した CRLH 線路を用いたパルス制御," 電子情報通信学会ソサエティ大会, 2009 年 9 月 17 日, 新潟大学
- (11) 鈴木佑太, 榎原浩二, "2 次元半導体プラズマ中の非線形波動伝播," 応用物理学会春季連合講演会, 2008 年 3 月 10 日, 日本大学

- (12) 鈴木佑太, 榎原浩一, " 二次元電子二重層における非線形プラズマ波の特性解析, " 電子情報通信学会ソサエティ大会, 2008年9月18日, 明治大学
- (13) 横田聡裕, 榎原浩一, " RTD 線路の波動伝播特性のフルウェーブ解析, " 電子情報通信学会ソサエティ大会, 2008年9月18日, 明治大学
- (14) 中川俊, 榎原浩一, " 多段 CRLH 線路の設計に関する検討, " 電子情報通信学会ソサエティ大会, 2008年9月16日, 明治大学
- (15) 中道徹, 榎原浩一, " 二次元ショットキー-CRLH 線路を用いた空間的孤立波生成と応用, " , 電子情報通信学会 EMCJ/MW 共催研究会, 2008年10月28日, 山形大学

〔図書〕(計1件)

- (1) K. Narahara, InTech Press, Wave Propagation in Materials for Modern Applications, 2009.

〔その他〕

ホームページ等

<http://teraele.yz.yamagata-u.ac.jp>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

榎原 浩一 (NARAHARA KOICHI)

山形大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：00422171