

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：35403

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2016

課題番号：25730152

研究課題名(和文)非線形発振器の結合系にみられる特殊な同期現象の新しい解析手法に関する研究

研究課題名(英文)Research of New Analysis Method for Special Synchronization Phenomena on Coupled Nonlinear Oscillators

研究代表者

山内 将行(Yamauchi, Masayuki)

広島工業大学・工学部・准教授

研究者番号：40384169

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：結合発振器上で、様々な同期現象が見られ、その中の特殊な同期現象の一つとして位相反転波動がある。この波動現象は、隣接した発振器間の位相状態を切り替え伝搬し続ける現象と言える。これら特殊な同期現象を解析するには、従来の手法で十分であるとは言えない。そこで、電力を用いた解析手法の開発を行った。特に、個別の発振器の瞬時電力を見ることにより、従来よりも明確に位相反転波動などの現象を判別できることを明らかにした。また、各種同期状態の周波数を電力を用いて導出できることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Many kinds of synchronization phenomena are observed and phase-inversion waves of one of special synchronization phenomena can be observed on coupled oscillators. In other words, we can say that the phase-inversion waves is a wave-motion phenomenon propagating phase differences between adjacent oscillators. We need a new method for analyzing phase-inversion waves. In this paper, we developed a new method using electric powers. We made clear that the phase-inversion waves can be discriminated from other waves by observing itinerancy of an instantaneous electric power of each oscillator. It was clarified that theoretical synchronization frequencies are obtained by using electric powers.

研究分野：非線形現象

キーワード：電力 同期現象 結合発振器 位相反転波動 位相波

1. 研究開始当初の背景

自然界において観測される現象の一つに同期現象がある。同期現象は至るところで観測される現象であり、例えば超伝導現象、東南アジアで観測される蛍の一斉点滅、月の公転と自転など、小さなものから非常に大きなものでまで観測できる。さらに、噂や流行なども一種の同期現象と言え、有形無形限らず、様々な場やもので観測できると言える。これら同期現象は、工学的にも応用が進んでおり、通信システムなども同期現象がなければ成立できないと言える。

従来、我々はこれら同期現象を、発振器をインダクタで梯子状や環状、格子状に結合した回路において、観測を行ってきた。これらの回路の上で、隣接する発振器間の位相差が伝搬する現象などを発見し、調査を行ってきた。この現象を位相波と呼んでいる。また、隣接した発振器間の位相状態が伝搬し続ける現象についても、発見し解析を行ってきた。この現象を位相反転波と呼び、位相反転波が複数組み合わせさせた現象を位相反転波動と呼んでいる。この位相反転波動は、定常状態で伝搬し続ける特殊な波動現象であると言える。これら位相波や位相反転波動を解析する手法はあまりない。非線形の強度が低く波がなければ安定解を求められる理論的な手法として、平均法と呼ばれるものがあるが、波がある状態では難しいと言える。よって、我々は隣接した発振器間の位相差や各発振器の周波数を観察することで、現象のメカニズムの解析などを行ってきた。しかし、位相波と位相反転波動を短時間で見分けることなどが難しく、さらに様々な波のような同期現象を含めた複雑な同期現象を解析する手法としては、従来の手法だけでは十分ではないと言える。

2. 研究の目的

本研究では、上記のような事情を踏まえ、様々な同期現象を解析できる、新たな電力を用いた解析手法の開発を行うことを、大きな目的とした。また、非線形の強度が高い状態でも、理論周波数などが求められる手法の開発を行うことも目的とし、その過程で、新しく開発した手法を用いて、様々な同期現象の解析を試みることも、目的の一つとした。

3. 研究の方法

本研究では、発振器を多数結合した比較的大きな系における変化をし続けるような同期現象を中心に解析を行っている。そのため、理論解析を行うことは非常に困難であると言える。そこで、Runge-Kutta法を用いた数値解析を基本としたシミュレーションを行い、現象の解析を行う。特に、波のような現象に対しては、瞬時電力を計算し、瞬時電力がどのように変動するかを観測し、個別の現象の特性を明らかにするが、それらの現象を考える際に用いる値の一つである各発振器

の周波数などについては、電力を用いた理論式を導出し、解析を行う。

4. 研究成果

本研究では、発振器の結合系に見られる同期現象などを解析するための、新たな解析手法の開発を主としている。そのため、図1~4のように、van der Pol 発振器をインダクタで梯子状、環状、格子状などに結合した回路を作成し、そこに発生する同期現象の解析を行う。特に、解析が難しい、隣接した発振器間の位相状態が伝搬し続ける現象である位相反転波動のような現象の解析を主に行う。

(1) 回路モデル

van der Pol 発振器は、図1のように構築する。非線形負性抵抗は、実回路実験においては図1の右図の様にオペアンプと抵抗で構築する。図2~5のように、インダクタで梯子状、環状、2次元格子状、星型に結合した回路を主として用いて開発を行う。これらの回路において、全ての発振器は同じ発振器とし、結合に用いるインダクタも、全て同じ値とする。ただし、図5の梯子を複数結合した星型回路においては、中心の発振器に結合するインダクタのみ、他の結合用インダクタと大きさを異なることとする。

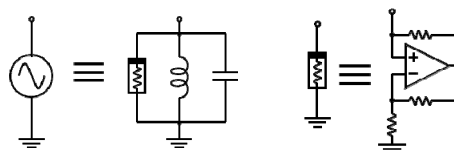


図1 van der Pol 発振器

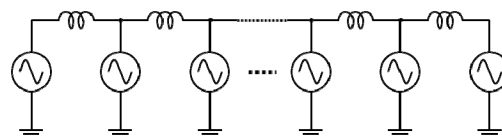


図2 梯子状回路

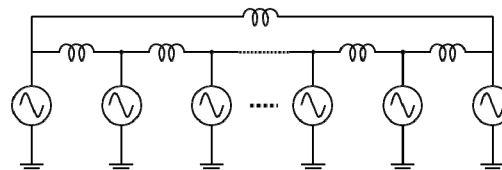


図3 環状回路

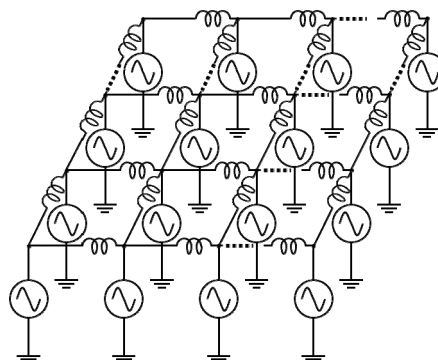


図4 2次元格子状回路

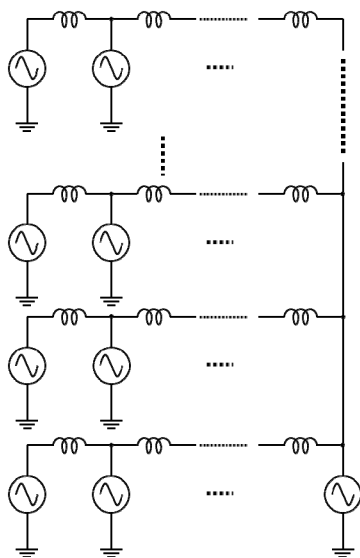


図5 星型回路

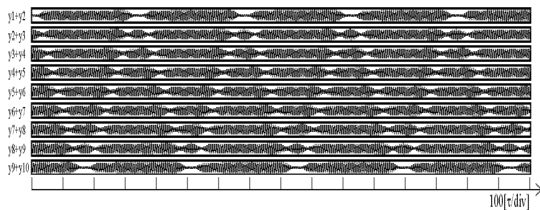


図6 梯子状回路に見られる位相反転波動

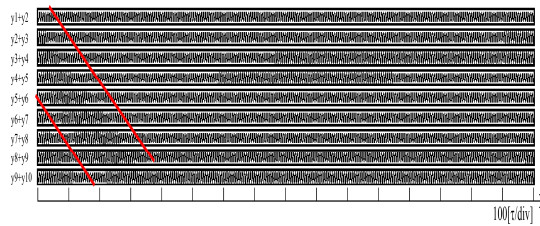


図7 梯子状回路に見られる位相反転波動

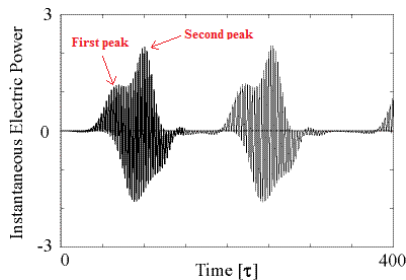


図8 位相反転波動が伝搬している際の6個目の発振器の瞬時電力の変化

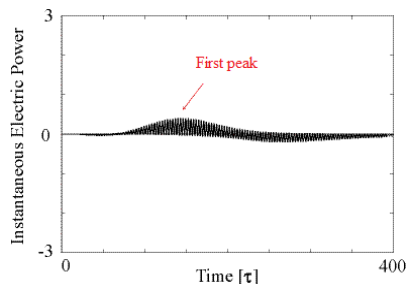


図9 位相波が伝搬している際の6個目の発振器の瞬時電力の変化

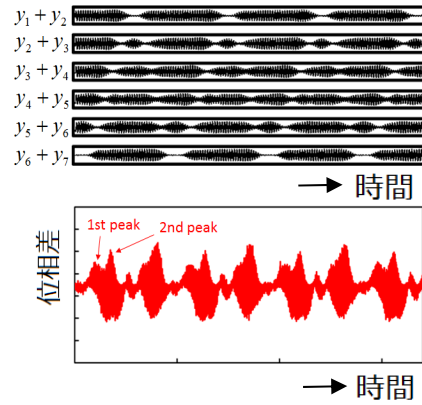


図10 実回路実験による位相反転波動と4番目の発振器の位相の遍歴

(2) 位相波と位相反転波動の瞬時電力を用いた判別

梯子状に結合された回路においてみられる位相反転波動と、過渡状態のみ観測できて位相反転波動になるか消滅する位相波は、それぞれ図6と図7のようになっている。図6, 7は、10個の発振器を梯子状に結合した回路に見られる現象で、横に細長い箱を縦に9個重ねて表示しており、それぞれの箱の縦軸は隣接した発振器の電圧を足し合わせ、時間軸に沿って表示している。そのため、隣接した発振器間の位相状態が同相同期に近くなると黒くなり、逆相同期に近い状態になるほど白くなる。上の箱から、1つ目の発振器と2つ目の発振器の電圧を足し合わせて表示し、2つ目の箱が2つ目の発振器と3つ目の発振器の電圧を足し合わせて表示している。そして、一番下の箱が9個目の発振器と10個目の発振器の電圧を足し合わせて、時間軸にそって表示している。

図6では、1個目の発振器から伝搬した同相同期から逆相同期へと切り替える位相反転波と逆相同期から同相同期へと切り替える位相反転波が組み合わさった位相反転波動が端まで伝搬し、端で繰り返し反射しながら、伝搬し続けていることが解る。また、図7では、赤線の間付近で波が1個目の発振器から10個目の発振器へと伝搬していく様子がみられる。この図では、伝搬している角度が小さく、位相波であり、位相反転波動ではないことが明確に解りやすいが、伝搬している角度が大きくなると、位相反転波動と同じく、図6のように黒い領域の中を白い部分が伝搬し、しばらくすると消滅する画像がみられ、最初だけでは判別が付きにくくなる。この図6と図7の位相反転波動と位相波の瞬時電力の遍歴を、それぞれ図8と図9に示す。位相反転波動の場合、波動が通りすぎる瞬間、2回のピークを迎えることが解り、位相波が伝搬する際には、1回のピークしか持たないことが解る。すなわち、瞬時電力を調べることで、短時間で位相反転波動か位相波かを判断できるということが明らかである。

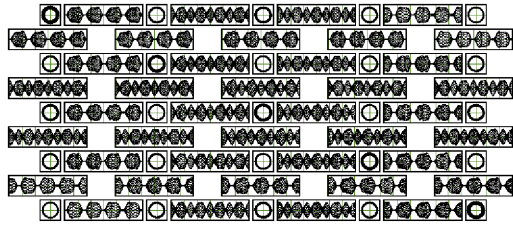


図 11 5x5 の 2 次元格子状回路における縦方向と横方向に伝わる位相反転波動

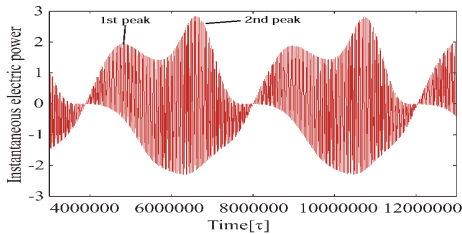


図 12 図 11 が観察される時の中央の発振器の瞬時電力の遍歴

位相反転波動が伝搬する際、位相差の遍歴において 2 度のピーク見られることは、図 10 に示した実回路実験の結果からも解るように、実際の回路においても確認することができる。

### (3) 格子状回路における位相反転波動

2 次元格子状の回路においても、位相反転波動は観測される(図 11 参照)。また、3 次元格子状の回路においても、同様の現象が見られる。図 11 の円は、各発振器のアトラクタを示しており、縦軸に電流、横軸に電圧を示している。また、円と円間に示しているグラフは、各発振器間の位相状態を時間軸に沿って示しており、例えば左上の円(発振器 1-1 のアトラクタ)と、その下の円(発振器 2-1 のアトラクタ)の間に示されているグラフは、発振器 1-1 と発振器 2-1 の電圧を足し合わせて時間軸に沿って示したグラフである。すなわち、図 6 などの細長い箱と同等のグラフである。図 11 は、5x5 の 2 次元格子状回路にみられる位相反転波動であり、位相波点波動が縦方向と横方向に同時に伝搬していることがわかる。この時の中央の発振器である発振器 3-3 の瞬時電力の遍歴を、図 12 に示す。以上の結果より、梯子状の時と同じく縦方向と横方向に同時に位相反転波動が伝わる時でも、2 回ピークが見られることが解り、瞬時電力を用いて判別ができることが解る。

### (4) 環状回路における波動現象

環状に結合された回路上で位相反転波動は見られるが、我々はそれ以外の新たな波動現象を本研究で発見し、瞬時電力を用いて解析を行った(図 13 参照)。この現象は、図 13 のように、位相反転波動のように位相差が伝搬し続ける波動現象であり、従来の図 13 のような観測の手法では、位相反転波動と判別す

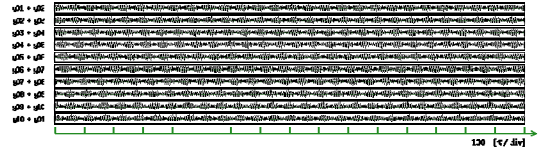


図 13 10 個の発振器を環状に結合した回路の上で見られる新たに発見した波動現象

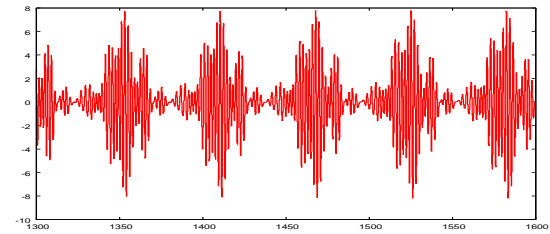


図 14 2 番目の発振器の瞬時電力の遍歴

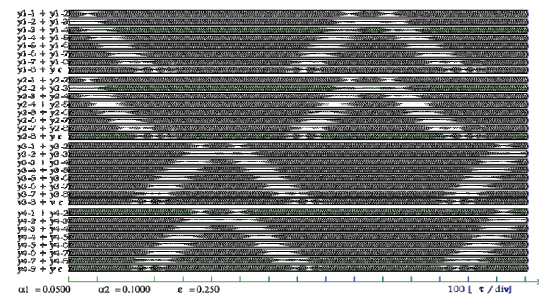


図 15 8 個の発振器で構築された梯子 4 本を 1 つの発振器で結合した回路の上で見られる位相反転波動

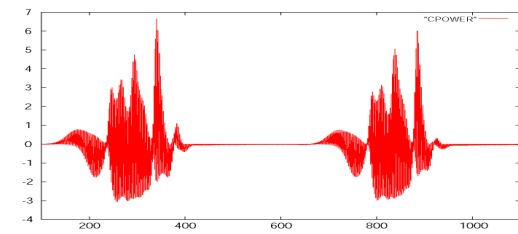


図 16 図 15 の現象が見られる時の中央の発振器の瞬時電力

ることが比較的難しいと言える。しかし、図 14 に示した瞬時電力を見ると、ピークの数 2 つではなく多数見られ、明確に位相反転波動と違い、新たな現象であることが解る。

### (5) 星型回路における位相反転波動

複数の梯子を組み合わせた星型回路において、同相同期から逆相同期に切り替えながら伝搬する位相反転波と、逆相同期から同相同期へと切り替える位相反転波が一定の時間を開けて伝搬する現象が観測される。これらの現象において、特に中央の発振器における振る舞いが重要となる。これらについて、瞬時電力を用いて調査解析を行った。4 本の梯子を組み合わせた十字型の回路において観測された位相反転波動を図 15 に示す。図 15

表1 理論周波数とシミュレーション結果

周りの逆相同期の数	理論値	シミュレーション結果
0	0.159	0.159
2	0.174	0.174
4	0.188	0.188
6	0.201	0.201

は、8個の発振器で構築された梯子を4本、中央の発振器に結合して構築した十字型回路に見られる位相反転波動を示している。図15は4つのブロックに別れており、それぞれの梯子の位相状態を示している。各ブロックの上の端は、各梯子の1つ目と2つ目の発振器の位相差を示し、各ブロックの一番下は、8個目の発振器と中央の発振器との間の位相状態の遍歴を示している。中央の発振器の瞬時電力を図16に示す。図16より、明確に6度瞬時電力が小さくなっており、同相同期状態などに幾度も引き込まれようとしていることが解る。

#### (6) 理論周波数の導出手法

理論周波数を求めるには、従来から平均化法などの手法がある。これらの手法は、規模が大きい回路になった場合、解く事が難しくなると言える。そこで我々は、理論周波数を求める比較的簡単な電力を用いた手法の開発を行った。本方式では、系の無効電力を求め、無効電力が0として周波数を求める。

非線形の強度が十分低いとし、ある発振器とその発振器に繋がる周りの発振器数が複数であるとする。その、ある発振器に繋がった周りの発振器の内、いくつが逆相同期で、いくつが同相同期であるかによって、理論周波数は変わる。例えば、2次元格子状の回路においては、基本的に1つの発振器に4つの発振器が繋がっている。すなわち、繋がっているコイルの数が4あるため、5パターンの位相状態において、それぞれ理論周波数 $f$ が得られる。求める式は次のようになる。ただし、式中の $\alpha$ は結合の強さを表し、 $\gamma$ はまわりにいくつ逆相同期があるか示している。

$$f = \frac{\sqrt{1+2\gamma\alpha}}{2\pi}$$

これらの式を用いて解いた、非線形の強度が低い値での各理論周波数とシミュレーション結果を表1に示す。非常に良くあっていることが解る。さらに、上記の計算を発展させ、電力を用いることにより、同期状態への引き込み力を表せる可能性を示した。

#### (7) まとめ

本研究では、主に瞬時電力を用いた位相反転波動などの解析を行う手法の開発を行った。また、無効電力を用いて、理論周波数を求める手法の開発を行った。これらの研究を進める上で、新たな現象を発見し、解析を行った。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文(査読有)] (計13件)

- ① Mikiya TANAKA, and Masayuki YAMAUCHI, "Analysis of An Oscillation Frequency Depending on The Number of Coupled Oscillators," Proceedings of the 2017 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits and Signal Processing, pp. 277-280, Mar. 2017.
- ② Ryouhei TAKANO, and Masayuki YAMAUCHI, "Investigation of Phase Itinerancy of Complex Waves on A Ring Constructed by Van Der Pol Oscillators," Proceedings of the 2016 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications, pp. 574-577, Nov. 2016.
- ③ Ryoji FUKUMASA, Masayuki YAMAUCHI, and Yoshifumi NISHIO, "Investigation of Attracting Force to Synchronization States on Coupled Oscillator System by Using Electric Power," Proceedings of the 2016 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications, pp. 385-388, Nov. 2016.
- ④ Mikiya TANAKA, and Masayuki YAMAUCHI, "Occurring Phenomena between A Center Oscillator and Each Adjacent Oscillator on A Cross of Coupled Van Der Pol Oscillators," Proceedings of the 2016 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits and Signal Processing, pp. 451-454 Mar. 2016.
- ⑤ Ryouji FUKUMASA, Masayuki YAMAUCHI, and Yoshifumi NISHIO, "Investigation of Simulation Frequencies and Theoretical Frequencies of Synchronization States by Using Electric Power," Proceedings of the 2016 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits and Signal Processing, pp. 447-450 Mar. 2016.
- ⑥ Shouhei FUJIMOTO, Yoshihito TODANI, and Masayuki YAMAUCHI, "Itinerancy of Instantaneous Electric Powers of Penetration between Phase-Inversion Waves on Coupled Van Der Pol Oscillators as A 2D Lattice," Proceedings of the 2015 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits and Signal Processing, pp. 146-149 Feb. 2015.
- ⑦ Ryouhei TAKANO, Shouhei FUJIMOTO, Masayuki YAMAUCHI, Shunji MAEDA, and Takeshi TANAKA, "Analysis of Phase-Inversion Waves on Van Der Pol Oscillators Coupled by Inductors as a

Ring,” Proceedings of the 2015 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits and Signal Processing, pp. 142-145 Feb. 2015.

- ⑧ Yoshihito TODANI, Masayuki YAMAUCHI, and Yoshifumi NISHIO, “Phase-Inversion Waves in Simultaneously Existing Two Synchronization Modes of 2D Oscillator Networks,” Proceedings of the 2014 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications, pp. 361-364, Sep. 2014.
- ⑨ Shouhei FUJIMOTO, Seiko KUNIHURO, and Masayuki YAMAUCHI, “Investigation and Analysis of Phase-Inversion Waves in In-and-Anti-Phase Synchronization on 3D Lattice Oscillators,” Proceedings of the 2013 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications, pp. 467-470, Sep. 2013.
- ⑩ Yoshihito TODANI, Seiko KUNIHURO, Masayuki YAMAUCHI, and Yoshifumi NISHIO, “Analysis of Phase-Inversion Waves in In-and-Anti-Phase Synchronization on Coupled Van der Pol Oscillators as a 2D Lattice by Using an Actual Circuit,” Proceedings of the 2013 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications, pp. 463-466, Sep. 2013.

[学会発表] (計15件)

- ① 福政遼二, 山内将行, 西尾芳文, “2つの van der Pol 発振器を結合した回路における電力を用いた同期状態の引き込み力に関する考察,” 第3回電子デバイス・回路・照明・システム関連教育・研究ワークショップ, 広島工業大学(広島県広島市), pp. 12-13, 2016年5月28日.
- ② 田中幹也, 山内将行, “8個の発振器で梯子状に構成された回路を十字型に結合したシステムの上で見られる異なる位相反転波動,” 第3回電子デバイス・回路・照明・システム関連教育・研究ワークショップ, 広島工業大学(広島県広島市), pp. 5-6, 2016年5月28日.
- ③ 福政遼二, 山内将行, “発振器をリング状に結合した系における電力を用いた発振周波数の導出,” 第2回電子デバイス・回路・照明・システム関連教育・研究ワークショップ, 広島工業大学(広島県広島市), pp. 16-17, 2015年11月7日.
- ④ 田中幹也, 山内将行, “8個の発振器で構築された4本の梯子を十字型に結合した系にみられる個別に動く位相反転波,”

電子情報通信学会 回路とシステム研究会, アステールプラザ(広島県広島市), pp. 109-114, 2015年10月6日.

- ⑤ 高野涼平, 山内将行, “van der Pol 発振器を環状にインダクタによって結合した系にみられる複雑な振る舞いをする波の調査,” 電子情報通信学会 回路とシステム研究会, アステールプラザ(広島県広島市), pp. 103-108, 2015年10月6日.
- ⑥ 高野涼平, 藤本昌平, 山内将行, 前田俊二, 田中武, “環状に9もしくは10の van der Pol 発振器をインダクタによって結合した系にみられる波動現象の解析,” 電子情報通信学会 非線形問題研究会, ピパの湯ゆ〜りん館(北海道美瑛市), pp. 31-36, 2015年7月21日.
- ⑦ 藤本昌平, 山内将行, “梯子状と格子状に結合した発振器の系に見られる波動現象の瞬時電力を用いた解析手法の開発,” 第1回電子デバイス・回路・照明・システム関連教育・研究ワークショップ, 広島工業大学(広島県広島市), pp. 4-5, 2015年5月23日.
- ⑧ 新見浩介, 山内将行, “発振器を梯子状に結合した系にみられる同相同期を基本とした位相反転波動の瞬時電力による解析,” 電子情報通信学会 非線形問題研究会, ニセコパークホテル(北海道虻田郡倶知安町), pp. 151-156, 2014年1月22日.
- ⑨ 戸谷悦士, 山内将行, 西尾芳文, “2次元格子状に結合された発振器に見られる同相同期と交互逆相同期が混在した状態における位相反転波動の伝搬と反射,” 電子情報通信学会 非線形問題研究会, サンポートホール高松(香川県高松市), pp. 99-104, 2013年10月28日.

[図書] (計1件)

- ① Masayuki Yamauchi, Yoshihito Todani, and Syohei Fujimoto, “Wave propagation of phase difference in coupled oscillator arrays,” Oscillator Circuits -Frontiers in Design, Analysis and Applications-, London: The Institution of Engineering and Technology. ISBN: 978-1-78561-057-8, Chapter 8, pp. 133-162, 15 Dec. 2016.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

山内 将行 (YAMAUCHI, Masayuki)  
広島工業大学・工学部・准教授  
研究者番号: 40384169