

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 17 日現在

機関番号：21602

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560077

研究課題名(和文)新しい物理計測法及び通信方法を実現する系列セット

研究課題名(英文) Novel Sequence Set for Novel Instrumentation and Communication Systems

研究代表者

林 隆史 (Hayashi, Takafumi)

会津大学・コンピュータ理工学部・教授

研究者番号：20218580

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：相関関数の値がある範囲で零となるZCZ系列セットについて、新規生成法の開発や応用システムの検討を行った。異なる系列サブセットに属する系列間の相関関数が零となる範囲が、同一サブセットに属する系列間の相関関数よりも広いZCZ系列は、応用上有用であるが、従来は生成することができなかった。本課題で、このような系列の生成方法を複数開発した。これによって、距離の近い通信装置ごとにサブセットを割り当てることで、距離の遠い通信装置間ほど、より大きな時刻ずれに対応できるようになったり、計測システムの精度や測定速度を向上が可能になった。低ピーク比白色雑音によって構成されるZCZ系列セット生成方法も開発した。

研究成果の概要(英文)：In this research project, we have investigated schemes for novel sequence construction, in particular, sequence sets having a zero-correlation zone, so-called ZCZ sequence sets, and developed eight different types of sequence construction schemes. Among these, five schemes can each obtain a set of sequences consisting of  $N$  subsets. The correlation function of the sequences of a pair of different subsets has a ZCZ with a greater width than that of the correlation function of sequences of the same subset. A wider inter-subset ZCZ enables improved performance in applications. The other developed construction schemes can generate ZCZ sequence sets having flat power spectra, and quaternary phase-shift keying ZCZ sequence sets. We have demonstrated the high performance of the applications of sequences obtained by the proposed schemes, including to wireless communication systems, ultrasonic imaging, synthetic aperture radar, sensor-system synchronization, and visible secret sharing.

研究分野：系列設計とその応用

キーワード：系列設計 零相関範囲系列 ZCZ 完全系列 超音波イメージング レーダーパルス圧縮 視覚秘密分散

## 1. 研究開始当初の背景

本課題では、零相関範囲を有する系列セット(以下、ZCZ 系列と略)の新しい生成方法の開発、新しい応用方法の検討をそれらの数理的背景とともに研究するものである。ZCZ 系列とは、以下に示す二つの条件を満たす系列セットのことである。

- (1) セットのどの系列についても、その自己相関関数が、位相差の絶対値が1以上  $Z$  以下で、常に0。
- (2) セットのどの系列の対についても、その相互相関関数が、位相差の絶対値が  $Z$  以下で、常に0。

このような系列セットを  $Z_{cz}(L, N, Z)$  と表す。ここで、 $L$  は系列の長さを、 $N$  は系列セットの系列数を表す。相関関数が0となる位相差の範囲を零相関範囲と呼ぶ。性質 1)は同期捕捉、時間や距離のずれの測定に、性質 2)はチャンネル特定に利用することができる。

通信、計測などで、M 系列、嵩系列、Barker 系列等が広く用いられている。これらの系列の相関関数の値が小さいことを利用しているのであるが、ある種の応用では、相関関数の値が系列の自乗和に対して相対的に小さいだけでなく相関関数の値が零である事が要求される事がある。このような要求に答えるために、一定の位相差範囲内では相関関数が零となるように設計された系列が ZCZ 系列である。応用面では、よりエネルギー効率の高い ZCZ 系列が望ましい。

実システムでの応用では、信号のダイナミックレンジは限定されている。系列のエネルギー効率は、系列の Root Mean Square (RMS) 値と系列のピーク値の比(ピーク比の逆数)で示すことができ、ピーク比が低いほど、限られたダイナミックレンジでより高いエネルギー効率を示すことができる。

系列が2値か3値( $\pm 1$  及び0)であると、応用システムは多値系列を用いたときよりもシンプルにすることができる。

一般に、 $Z_{cz}(L, *, Z)$  となる ZCZ 系列セット(理想 ZCZ 系列セット)の系列数の理論的上限は  $L/(Z+1)$  に等しい。実際の系列数  $N$  がこの上限値に等しいか近いことが望ましい。現在知られている2値(系列の値が $\pm 1$ ) ZCZ 系列セットの系列数は、ZCZ 系列の系列数の理論的上限の約半分にとどまっている。

従来の ZCZ 系列生成方法では、相関関数の特性によって特徴付けできるようなサブセットをもつものは、サブセットの数が2つのものなど例外的なものしか存在しなかった。その一方で、通信や計測への応用では、近接した発信器・受信器間と離れた発信器・受信器では、許容される時間遅れ(時刻のずれ)がことなるため、

- (1) 系列セット全体としては、理想 ZCZ 系列セットかそれに準ずる系列本数と零相関範囲を有し、
- (2) 異なるサブセットに属する系列間の相

関関数(サブセット間相関関数)は、系列セット全体で成立する零相関範囲よりも長い零相関範囲を示すような ZCZ 系列セットが必要とされてきた。

## 2. 研究の目的

研究内容とその特色：本研究課題では ZCZ 系列で、

- (1) 理論的上限に等しいか、それに近い系列数を有している。
- (2) 系列セットがサブセットを持ち、サブセット間相関関数が、系列セット全体で成立する零相関範囲よりも長い零相関範囲を示す

を満たしながら、以下の性能・性質をより多く示すような系列セットを構成的に生成する方法の開発と、その応用方法の検討が第1の目的である。

- (3) 非周期、周期、奇相関の全てに対応して零相関範囲を有している。
- (4) 零相関範囲外の相関関数(自己相関および相互相関)のピーク値が小さい。
- (5) 系列の要素のほとんどが非零要素(1 か -1)で、零要素が少ない。
- (6) 生成できる系列数や長さの制約が少ない。

ZCZ 系列の応用研究のほとんどは、電波を用いた無線通信や多重光通信(主に有線)に偏っている。我々は、従来より、高速低ノイズ他周波同時測定、合成開口イメージングなどをはじめ様々な応用を提案してきた。本課題では、それをさらに進めるために、上記の新規系列セットを用いた新しい応用の検討を行った。単に新しい系列生成法や応用法を検討するだけでなく、本辛いの成果が、新しい系列など他の研究に発展できるように心がけた。

本研究の意義：種々の方法によって生成される ZCZ 系列の性質を明らかにすることによって、どのような応用にどのタイプの ZCZ 系列を用いるべきかを示すことができるようになる。また、ZCZ 系列を用いた応用システムの性能向上も期待できる。また、いままでも明らかでなかった ZCZ 系列の性質をしめすことができれば、ZCZ 系列の新たな応用が可能になるものと期待される。応用システムの性能が向上すれば、通信システムのように直接的な効果が期待されるだけでなく、物理計測などによって、物性研究や生物学、医学研究へも派生的効果が期待される。実際、研究代表者の ZCZ 系列を超音波イメージングへ応用したものは、M 系列などを用いたものよりも、高い性能が出ている。

種々の ZCZ 系列生成法の数理的特徴を比較検討することによって、ZCZ 系列に限らず、広く系列生成法研究の発展に寄与することができるものと考えている。研究代表者のい

ままでの研究でも、新しい系列生成を発明したあとで、その生成法の数理的検討が、さらに新しい系列の発明につながっている。ZCZ 系列の数理的研究およびその応用によって、様々な工学分野の研究開発に寄与することが本研究の大きな目的の一つである。

### 3. 研究の方法

本研究の目的は、研究代表者が今までに考案した種々の ZCZ 系列生成法の数理を再検討することで、

- (1) 理想 ZCZ 系列セットかそれに準ずるもので、
- (2) サブセットを持ち、サブセット間相関関数がより広い零相関範囲を示すものの構成的生成方法の開発を行った。

その上で、これらの系列を用いた応用システムのシミュレーションを中心とした性能評価を行った。そして、物理計測やセンサーネットワークのデータ通信、光無線通信などへの新しい応用方法の検討を行った。

ZCZ 系列は、その生成方法によって異なった性質を示す事がある。特に、零相関範囲外の相関関数の振る舞いは、生成法等によって、大きく変化する。そのため、ZCZ 系列の相関関数に関する様々な性質を明らかにすることは、ZCZ 系列の工学的応用を検討するためにも重要であることを考慮して、零相関範囲で相関関数が零となる点以外についても検討を行った。特に、零相関範囲外でも相関関数が小さくなるような系列は実システムでも有用であることがわかっているので、詳しく検討した。

これらの検討過程で見つかった知見を用いて、「広いサブセット間零相関範囲」を持たない従来型の ZCZ 系列セットについても、新規系列の生成方法を検討した。このような生成方法を見つけることができれば、その中には、サブセットを持った ZCZ 系列の生成に利用できるものがあるかもしれないからである。

応用システムの評価は

- ・ 自作のソフトウェアを用いた応用システムの性能評価。
- ・ 信号処理及び通信システム設計シミュレーションソフトウェア (MATLAB) を用いた用システムの設計と評価。

といった実験を行いながら研究を進めた。

### 4. 研究成果

3 年間の研究の中で、複数種類の新たな系列生成方法を発見・開発し、それらについて理論的検討と応用方法の検討を行った。得られた結果は、学術雑誌、国際学会を中心に発表を行った。

2012 年度の主な成果：

2012 年度は、主に以下の点について研究を進めた。

1) サブセットを持ち、異なるサブセット間に属する系列の相互相関関数の零相関範囲が同一のサブセットに属する系列の相互相関関数や自己相関関数の零相関範囲よりも広い零相関範囲系列セットの新しい構成方法や応用方法の発見と、応用システムの評価。

2) ピーク値を系列の二乗和の平方根で割った値、すなわちピーク比をさげることで、通信におけるエネルギー伝送効率や計測における SN 比を高めることを目的とした、低ピーク比零相関範囲系列セットの構成方法と応用方法の検討。

3) 自己相関関数が位相差 0 以外で零値をとる完全系列の数理的検討。

4) 相関現象をとらえるための新しい物理計測方法の検討。

その結果、1)については、数種類の新たな系列生成方法を発見・考案し、学術論文や国際学会へ投稿、発表した。2)についても、研究代表者が発見した低ピーク比疑似白色雑音構成法を拡張することで、新たな系列構成方法を発見し、学術論文として投稿した (審査中)。特に、比較的多くの研究者によって研究されている 3 値系列よりも高いピーク比の系列セットを 3 値系列セットよりも生成される系列長や本数の制約を少なくしたものを構成することができ、応用システムについてのシミュレーションでも良好な結果を得ることができた。3)についてのいくつかの知見を得ることができたので、学術論文として発表した。4)については、研究協力者と協力しながら、新しい物理測定法についての検討を進めた。

### 2013 年度の主な成果

2013 年度は、主に以下の点について研究を進めた。ピークファクタは、ピーク値を系列の二乗和の平方根で割った値で、ピークファクタを低くすると、同じダイナミックレンジで、SN 比を高めることができる。

1) ピークファクタの一つの基準値として、円関数のピークファクタ  $\sqrt{2}$  がある。本課題では、ピークファクタが  $\sqrt{2}$  に等しく、自己相関は、位相差 0 以外で零値をとり、相互相関の値が零となる範囲が理論値の上限に等しい零相関範囲系列セットの構成方法を検討し、新しく 2 つの方法を発見した。またその方法で生成された系列セットの応用方法とその性能の検討を行った。

2) M 系列とアダマール行列を用いることで、相関関数が零となる範囲以外でも、ピーク値が低くなるような系列セットの構成方法を検討し、新たに 2 つの構成方法を発見した。またその方法で生成された系列セットの応用方法とその性能の検討を行った。

3) 我々が以前に構成方法を考案した 2 次

元零相関3値系列セットが持偶相関関数、奇相関関数、非周期的相関関数でも零相関範囲を持つ性質を利用して、系列をスペクトル拡散通信の拡散符号のように用いることで、視覚的秘密分散の位置合わせを用意すること、スペクトラム拡散による隠蔽効果の向上を実現した。

4) 相関現象をとらえるための新しい信号処理方法の数理的検討を行い、いくつかの知見を得ることができた。

5) 新たに、センサーデータや通信データの同期を補助する方法を発見し、現在その内容を詳しく検討中である。

6) QPSK 通信用の新たな系列セットの構成方法を発見した。その性質について詳しい検討を続けている。

7) MIMO への応用の検討。これらの結果は、学術論文や国際学会へ投稿したり、発表を行ったりした。また成果の一部については、現在論文執筆中である。また、5)から7)の内容については、研究計画を検討した時には予定していなかった成果である。

#### 2014 年度の主な成果

2014 年度の主な成果は、1)ピークファクタ(ピーク値を系列の二乗和の平方根で割った値)が $\sqrt{2}$ と三角関数と同じ低い値を持ち、個々の系列は完全相関を示し、系列セットとしては、零相関範囲系列セットとなるものの新しい生成方法を発見し、その応用システムについての検討、2) 新しい QPSK 零相関範囲系列セットの生成法の発見とその応用の検討、3) 可視光通信用に、様々な光学素子を用いることで、従来2値系列以外では困難だった零相関範囲系列セットの応用を可能にする方法の開発、4) 2値2次元零相関範囲系列(行列)を用いた視覚的秘密分散システム法を発見した。5) 零相関範囲系列セットを用いた新規同期通信システム構成方法を開発、6) 新規 MIMO 通信への零相関範囲系列セットの応用の検討、などを行った。雑誌論文誌1編、国際学会3編、国内学会1編を発表した。

平成 24、25 年度には、1)サブセットを持ち、異なるサブセット間に属する系列の相互相関関数の零相関範囲が同一のサブセットに属する系列の相互相関関数や自己相関関数の零相関範囲よりも広い零相関範囲系列セットの生成方法や応用方法の検討、2) 種々の低ピーク比零相関範囲系列セット構成方法とその応用の検討、3) 完全系列の数理的検討、4) 相関現象をとらえるための新しい物理計測方法の検討、5) M 系列とアダマール行列を用いることで、相関関数が零となる範囲以外でも、ピーク値が低い系列セットの新規構成方法、6) 2次元零相関範囲系列セット(2値と3値)を用いた、視覚的秘密分散の位置合わせシステムの開発、などを行い、それぞれで成

果を得ることができた。

本課題研究全体として、4編の雑誌論文、9編の国際学会論文、2編の国内学会論文を発表し、さらに、雑誌論文誌に3編、国際学会に1編投稿し査読中である。

従来の ZCZ 系列セットは、系列セット全体での零相関範囲だけが議論されてきた。しかしながら、多くの応用で、系列セットの中にサブセットを作り、サブセット間での零相関範囲が同一サブセット内での零相関範囲よりも広いことが求められる。本研究課題の最終年度になって、このような条件を満たす ZCZ 系列セット生成方法を複数発見することができた。現在、それらを整理しながら、いくつかについて論文投稿中である。この新しいクラスの ZCZ 系列について、より深く広く研究を進めていく予定である。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計4件、全て査読あり)

Takafumi Hayashi, Takao Maeda, Shigeru Kanemoto, and Shiya Matsufuji, "Low-Peak-Factor Pseudo-White-Noise Sequence Set with Optimal Zero-Correlation Zone," IEICE Trans. Fund. Vol. E97-A, No.12, pp.2343-2351, Dec. 2014  
DOI: 10.1587/transfun.E97.A.2343  
Takao Maeda and Takafumi Hayashi, "Fourier Analysis of Sequences over a Composition Algebra of the Real Number Field Date of Evaluation," IEICE Trans. Fund. E96-A, No.12, pp.2452-2456, 2013  
DOI: 10.1587/transfun.E96.A.2452  
Takao Maeda and Takafumi Hayashi, "Parameterization of Perfect Sequences over a Composition Algebra," IEICE Trans. Fundamentals, E95-A, No.11, pp.2139-2147, 2012  
DOI: 10.1587/transfun.E95.A.2139  
Takafumi Hayashi, Takao Maeda, and, Shinya Matsufuji, "A Generalized Construction Scheme of a Zero-Correlation Zone Sequence Set with a Wide Inter-Subset Zero-Correlation Zone," IEICE Trans. Fundamentals, E95-A, No.11, pp.1931-1936, 2012  
DOI: 10.1587/transfun.E95.A.1931

[学会発表](計10件、全て査読あり)

Takafumi Hayashi, Yodai Watanabe, Takao Maeda, "A Novel Class of Binary Zero-Correlation Zone Sequence Sets by using a Cyclic Difference Set," Proc. of ISITA 2014, pp. 663-667 Oct., 2014,

Melbourne, Australia  
Takafumi Hayashi, Yodai Watanabe,  
Takao Maeda, "A Novel  
Zero-Correlation Zone Sequence Set  
Having a Low-Peak Factor and a Flat  
Power Spectrum," Proc. of ISITA2014,  
pp. 668-672, Oct., 2014, Melbourne,  
Australia

Takao Maeda and Takafumi Hayashi,  
"Parameterization of high-dimensional  
perfect sequences over a composition  
algebra over  $\mathbb{R}$ ," Proc. of ISITA2014,  
pp.682-686, Oct., 2014, Melbourne,  
Australia

林隆史, 前田多可雄, 渡辺曜大, "零相関  
範囲を有することで同期可能なデータ構  
成法とその応用," 日本応用数学会  
2014年度年会,日本応用数学会,東京,  
9月,2014

Takafumi Hayashi, Takao Maeda,  
Shigeru Kanemoto, and Shinya  
Matsufuji, "Low-Peak Factor Optimal  
Zero-Correlation Zone Sequence Set  
and Its Applications," Proc. of  
IWSDA2013, pp.72-75, IEICE, Oct.  
2013, Tokyo, Japan

林隆史, 前田多可雄, 松藤信哉, 渡辺曜  
大, "2次元2値零相関配列を用いた視覚  
秘密分散," 日本応用数学会2013年度  
年会,日本応用数学会,福岡,9月,2013  
Takao Maeda and Takafumi Hayashi,  
"Fourier Analysis of Sequences over a  
Composition Algebra of the Real  
Number Field," 2012 International  
Symposium on Information Theory and  
its Applications (ISITA 2012),  
pp.625-628, Oct. 2012, Honolulu,  
USA

Takafumi Hayashi, Takao Maeda, and  
Shigeru Kanemoto, "Sequence Sets  
Having Wide Inter-Subset  
Zero-Correlation Zone and Its  
Applications to Instrumentation," Proc.  
of SICE 2012, pp. 1150 -1155, Aug.,  
2012, Akita, Japan

Takafumi Hayashi, Hideyuki  
Fukuhara, Jiro Yamazaki, Yodai  
Watanabe, Junya Terazono, Taro  
Suzuki, Toshiaki Miyazaki, Masayuki  
Hisada, Tetsu Saburi, Hajime Tokura,  
Atsushi Kara, and Jiro Iwase, "A  
Network-Centric Approach to  
Low-Power Consumption  
Sensor-network with Related Service  
Integration," SICE 2012, pp. 1433-1436,  
Aug., 2012, Akita, Japan

Takafumi Hayashi, Takao Maeda,  
Shigeru Kawamoto, Satoshi Okawa, "A  
Novel Class of Zero-Correlation Zone  
Sequence Set having Sequence

Subsets," APWCS 2012, Aug.  
2012.Kyoto, Japan

[その他]  
ホームページ等  
[http://www.u-aizu.ac.jp/%7etakafumi/  
research.html](http://www.u-aizu.ac.jp/%7etakafumi/research.html)

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

林 隆史 (HAYASHI, Takafumi)  
会津大学・コンピュータ理工学部・教授  
研究者番号：2018580

### (2)研究分担者

東原 恒夫 (TSUKAHARA Tsuneo)  
会津大学・コンピュータ理工学部・教授  
研究者番号：10433153

### (3)研究分担者

渡辺 曜大 (WATANABE Yodai)  
会津大学・コンピュータ理工学部・准教  
授  
研究者番号：70360675

### (4)研究分担者

宮崎 敏明 (MIYAZAKI Toshiaki)  
会津大学・コンピュータ理工学部・教授  
研究者番号：70404895

### (5)研究分担者

丁 数学 (DING Shuxue)  
会津大学・コンピュータ理工学部・教授  
研究者番号：80372829