

THE RECORD OF ELECTRICAL AND
COMMUNICATION ENGINEERING CONVERSAZIONE
TÔHOKU UNIVERSITY

Vol. 92 No. 2 March 2024

東北大学電通談話会記録

第 92 卷 第 2 号

令和 6 年 3 月

東 北 大 学

電 氣 通 信 研 究 所

工 学 研 究 科

電気エネルギーシステム専攻

通信工学専攻

電子工学専攻

技術社会システム専攻

情 報 科 学 研 究 科

情報・生命系

医 工 学 研 究 科

医工学専攻

第 92 卷 第 2 号 目 次

令和 5 (2023) 年度学位論文関連短編

論文内容	題	目	第一著者名	指導教員	頁
博士後期課程					
工学研究科					
電子工学専攻					
1.	ノンコリニア反強磁性ヘテロ構造の電氣的制御に関する研究	.....	ユン ジュヨン	(深見 教授)	2
通信工学専攻					
2.	イメージエンハンスメント1ビットバンドパス $\Delta\Sigma$ 変調器を用いた20GHz帯DBF送信機に関する研究	.....	張 俊皓	(末松 教授)	4
電気エネルギーシステム専攻					
3.	自律分散協調制御型直流マイクログリッドの電力融通方法に関する研究	.....	劉 可	(山田 教授)	8
博士前期課程					
工学研究科					
電子工学専攻					
4.	トンネルダイオードを利用したニューロン回路の構成とその応用に関する研究	.....	菅家 由佳	(佐藤 教授)	12
5.	ノンコリニア反強磁性体 Mn_3Sn ナノドットの熱安定性	.....	佐藤 佑磨	(深見 教授)	14
6.	熱延伸とレーザ加工で作製された多検体電気化学センシング用集積ファイバ	.....	呉 京宣	(吉信 教授)	16
通信工学専攻					
7.	高ピークパワーを有する905nm波長帯短光パルス発生手法に関する研究	.....	崔 鈺雯	(山田 教授)	18
8.	再エネ駆動型データセンタの電源状況に応じたジョブスケジューリングの研究	.....	王 静池	(山田 教授)	20

VOL. 92 No. 2

CONTENTS

Summary of Doctor-Course Dissertations '23

Ju-Young YOON (Supervisor: S. Fukami)

Electrical Control of Noncollinear Antiferromagnetic Heterostructures 2

Junhao ZHANG (Supervisor: N. Suematsu)

A Study on 20GHz-band DBF Transmitter Using Image Enhanced 1-Bit Bandpass Delta
Sigma Modulator 4

Ke LIU (Supervisor: H. YAMADA)

A Study on Power Sharing Methods for Autonomous Decentralized Coordinated Control
based DC Microgrids 8

Summary of Master-Course Dissertations '23

Yuka KANKE (Supervisor: S. Sato)

A Study on Design of a Neuron Circuit Utilizing a Tunnel Diode and its Application 12

Yuma SATO (Supervisor: S. FUKAMI)

Thermal stability of non-collinear antiferromagnet Mn_3Sn nanodot 14

Jingxuan WU (Supervisor: T. Yoshinobu)

Integrated Fibers for Multianalyte Electrochemical Sensing Fabricated by Thermal
Drawing and Laser Machining 16

Yuwen CUI (Supervisor: H. Yamada)

Study on a method for generating short light pulses in the 905nm wavelength band with
high peak power 18

Wang JINGCHI (Supervisor: H. Yamada)

A Study on Job Scheduling for Renewable Energy Driven Data Centers 20

令和 5 (2023) 年度学位論文関連短編

博士学位論文要約（令和5年9月）

ノンコリニア反強磁性ヘテロ構造の電氣的制御に関する研究

ユン ジュヨン

指導教員：深見 俊輔

Electrical Control of Noncollinear Antiferromagnetic Heterostructures

Ju-Young YOON

Supervisor: Shunsuke FUKAMI

Spin-orbit torque (SOT) has been utilized for efficient electrical control of magnetic orderings. When discussing the SOT-driven dynamics of magnetic ordering in magnets with collinear spin orientations, the overall magnetic order parameters such as net magnetization and Néel vector are governed by the same law of SOT on individual magnetic moments, and this treatment has been naively extended to the magnets with non-collinear system. Here, we reveal unconventional dynamics of the overall magnetic order parameter of a non-collinear antiferromagnet, *i.e.*, the octupole moment, which is in sharp contrast to those of previously studied collinear systems. Using ac harmonic and dc measurements on a Mn₃Sn/Pt heterostructure, we reveal that the octupole moment undergoes an opposite rotation with respect to the individual magnetic moments, which stems from the interplay between the SOT and the chiral-spin structure of Mn₃Sn. Our study provides a guideline for understanding the electrical manipulation of non-collinear antiferromagnets, which substantially differs from the well-established collinear systems.

1. はじめに

近年、情報化社会において膨大な情報量を保存・処理するために、省電力化が課題点として残され、それに向けた研究が大いにされている。様々な研究分野の中で、スピントロニクス分野では磁性体の磁気秩序の電氣的制御が一つの中心的課題であり、1999年に初めてスピントランスファートルクという駆動力も用いて、強磁性体を電氣的に制御することが可能となった[1]。ごく最近ではノンコリニア反強磁性体が注目を集めている。ノンコリニア反強磁性体は3つの磁気モーメントが互いに120度ずつ傾いたカイラルスピン構造をしており、全体的に正味の磁化を持たない反強磁性を示している。このようなカイラルスピン構造を有することで、異常ホール効果などコリニア反強磁性体では見られなかった輸送特性が現れることが知られ、多くの注目を集めている[2]。このノンコリニア反強磁性体を電氣的に制御するため、スピン軌道トルク(SOT)が用いられている[3,4]。しかし、ノンコリニア反強磁性体に働くトルクの働き方はまだ明らかではなく、より系統的に調べる必要があった。

本研究では代表的なノンコリニア反強磁性体であるMn₃Snに注目した。3つの磁気モーメントで構成されるカイラルスピン構造は磁気八極子という一つの秩序パラメーターで表現されることが知られている[5]。本研究では、電流が印加された際、この磁気八極子のダイナミクスについて調べ、その時のトルクをDCおよびAC測定より定量的に評価する。

2. 電流誘起磁化反転

ノンコリニア反強磁性体はその物理特性が磁気構造(≒結晶構造)に起因するため、当材料系特有の現象を観測してその理解を深めるためには、結晶方位の揃ったエピタキシャル薄膜を作製する必要がある。そのため、本研究ではMgO(110)単結晶基板の

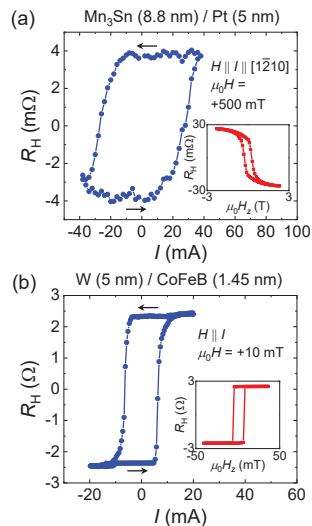


図1 (a)ノンコリニア反強磁性体 Mn₃Sn と(b)強磁性体 CoFeB を含めるヘテロ構造における R_H - I と R_H - H_z (インセット) 曲線

上に W/Ta/Mn₃Sn/Pt ヘテロ構造をスパッタリング法より成膜し、Mn₃Sn のカゴメ格子が面直に並んでいる M 面配向 Mn₃Sn 薄膜を作製した。また、強磁性体との比較のため、Si/SiO₂ 基板上に W/CoFeB/MgO ヘテロ構造も作製した。ここでヘテロ構造に電流を流すと、重金属である Pt 層と W 層から Mn₃Sn または CoFeB 層に同じ方向の面内スピンが注入され、磁性体を反転させることができる。

図 1(a)と(b)はそれぞれノンコリニア反強磁性 Mn₃Sn と強磁性 CoFeB の SOT 誘起磁化反転の結果を示す。その反転符号を見ると、互いに反対の反転符号を示すことが分かる。つまり、正の電流を印加した際に、ノンコリニア反強磁性体の磁気八極子は上向きから下向きに反転されるに対して、強磁性体の磁気双極子は下向きから上向きに反転される。これは、SOT によって誘起される Mn₃Sn の磁気八極子が強磁性体の磁気双極子と逆方向に回転することを示唆する。

3. スピン軌道トルクの評価と掌性異常

Mn₃Sn の SOT 誘起ダイナミクスをより深く理解するため、回転中の磁気八極子に働く SOT を高調波ホール抵抗測定より評価した。この方法より SOT を評価するためには、まず、磁化容易面内の磁気異方性を調べる必要があり、図 2(a)に示されたように第一高調波ホール抵抗 $R_H^{1\omega}$ の外部磁場角度 β 依存性を調べた。求められた実験結果を理論モデルよりフィッティングすることによって 2 回と 4 回対称磁気異方性エネルギーがそれぞれ $1.7 \times 10^2 \text{ J/m}^3$ と $1.0 \times 10^2 \text{ J/m}^3$ として求められ、その起源が面内方向の引張歪みにあることが分かった。

次に、得られた磁気異方性の情報を基に磁気八極子に及ぼす SOT について議論する。カゴメ面に対して垂直に注入されたスピンは個々の磁気モーメントに均一な Slonczewski-like (SL) トルクを印加し、結果的に磁気八極子が回転することになる。ここで回転された角度 $\Delta\varphi_{\text{oct}}$ はホール抵抗の変化量 ΔR_H より求められるため、Mn₃Sn/Pt ヘテロ構造における SOT の大きさと方向は第二高調波ホール抵抗 $R_H^{2\omega}$ 測定より求めることができる。図 2(b)は $R_H^{2\omega}$ の β 依存性を示したものである。得られた実験結果を理論モデルよりフィッティングするためには、この系に存在するトルクの平衡状態式から解を求める必要がある。この系には SL トルクと磁気エネルギーから誘起されるトルクが存在し、後者は前述で得られた磁気異方性エネルギー式から得ることができる。また、SL トルクは従来の強磁性体モデルに従って表すと、 $\tau_{\text{SL}}^{\text{ct}} = -\gamma\mu_0\mathbf{m}_{\text{oct}} \times \mathbf{H}_{\text{SL}}^{\text{ct}}$ であり、 $\mathbf{H}_{\text{SL}}^{\text{ct}} \propto \mathbf{m}_{\text{oct}} \times \boldsymbol{\sigma}$ である。ここで $\gamma, \mu_0, \mathbf{m}_{\text{oct}}, \boldsymbol{\sigma}, \mathbf{H}_{\text{SL}}^{\text{ct}}$ はそれぞれ磁気回転比、真空中の透過率、磁気八極子、注入されたスピン、磁気八

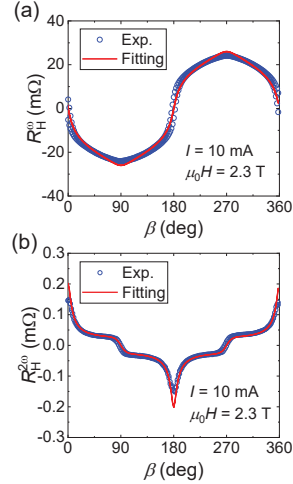


図 2 (a)第一と(b)第二高調波ホール抵抗の外部磁場角度依存性とフィッティング曲線

極子に働く SL トルクの有効磁場となる。しかし、図 2(b)の赤線のように実験結果がよくフィッティングするためには上記の二つのトルクの平衡状態の解を求めるほかに $\mathbf{H}_{\text{SL}}^{\text{ct}} = -H_{\text{SL}}\mathbf{m}_{\text{oct}} \times \boldsymbol{\sigma}$ という条件が必要である。ここで注目すべき点は、 H_{SL} の前にマイナス符号があることであり、磁気八極子が個々の磁気モーメントと反対方向に回転することを意味する。これはコリニア磁性体と区別つける現象であり、ここでは掌性異常と呼ぶ。また、SOT 効率は 0.017 として求められた。

4. まとめ

本研究では、ノンコリニア反強磁性体の磁気八極子は、強磁性体の磁気双極子とは逆方向に回転するという実験結果が示された。理論モデルの構築と DC および AC 測定によるトルクの評価から、個々の磁気モーメントに働くトルクについては Mn₃Sn と CoFeB は同方向であるのに対して、Mn₃Sn のカイラルスピン構造の特殊性から磁気八極子は強磁性体の磁気双極子とは逆方向に回転することが明らかにされた。ここで得られた知見はノンコリニア反強磁性体を電氣的に制御するスピントロニクス素子の開発の基礎を与えるものである[6]。

文献

- 1) E. B. Myers, *et al.*, *Science*, **285** (1999) 867.
- 2) S. Nakatsuji, *et al.*, *Nature*, **527** (2015) 212.
- 3) H. Tsai, *et al.*, *Nature*, **580** (2020) 608.
- 4) Y. Takeuchi, *et al.*, *Nat. Mater.*, **20** (2021) 1364.
- 5) M.-T. Suzuki, *et al.*, *Phys. Rev. B*, **95** (2017) 094406.
- 6) J.-Y. Yoon, *et al.*, *Nat. Mater.*, **22** (2023) 1106.

博士学位論文要約（令和5年9月）

イメージエンハンスメント1ビットバンドパス $\Delta\Sigma$ 変調器を用いた20GHz帯DBF送信機に関する研究

通信工学専攻 ^{ちょう}張 ^{しゅんごう}俊皓

指導教員：末松 憲治

A Study on 20GHz-band DBF Transmitter Using Image Enhanced 1-Bit Bandpass Delta Sigma Modulator Communication Engineering, Junhao ZHANG

Supervisor: N. Suematsu

Direct digital RF transmitter using the high order image components of 1-bit bandpass delta sigma modulator (BP-DSM) has been studied to miniaturize digital beamforming (DBF) transmitter in high frequency band by generating RF signal directly without up-converter. However, because of non-return-to-zero (NRZ) coding scheme and frequency characteristic of 1-bit digital-to-analog converter (DAC), the image components suffer a severe attenuation so that the image enhancement techniques using Manchester coding and RF tripler in digital and analog domain are proposed in this paper. Moreover, to realize the antenna integration with transmitter module, a low-backlobe Vivaldi endfire array antenna is proposed and measured in this paper as well. And also, a DBF module utilizing the image enhancement techniques and low-backlobe Vivaldi array antenna is fabricated and evaluated.

1. Introduction

In the era of 5G/B5G, with the development of wireless communication, there is a tendency of higher speed and larger capacity. To realize it, the phantom cell has been proposed. Phantom cell consists of one marco cell for control data transmission in lower band/data rate but larger coverage and several small cells for user data transmission in higher band/data rate but shorter coverage. To overcome the higher attenuation in higher band, such as super high band (SHF), DBF technology has been studied[1]. Compared to analog beam forming (ABF), DBF transmitter with multiple antennas can generate multibeams simultaneously which is very helpful for larger capacity. However, each antenna needs a transmitter, which is resulted in large size. With the shorter distance between antenna elements in higher band, not only the large number/size of transmitter, but also the connection between the antenna and transmitter module becomes issue. To solve the problem, for transmitter module, the miniaturization and integration with antenna module is a must.

Therefore, the direct digital RF transmitter has been studied[2]. Direct digital RF transmitter using the high order image components of 1-bit BP-DSM can realize the miniaturization of DBF transmitter by generating RF signal directly without up-converter. However, the

high order image components of 1-bit BP-DS modulated signal suffer a severe attenuation because of the power spectral density (PSD) of NRZ coding scheme and the frequency characteristic of 1-bit DAC so that the power and signal-to-noise ratio (SNR) of image components degrade.

Additionally, for DBF transmitter operating in higher frequency band, the distance between antenna element becomes shorter. Instead of coaxial connector, the antenna integration with transmitter module is necessary so that the endfire antenna is more suitable than broadside antenna because of its horizontal radiation direction to substrate. However, the backlobe of endfire antenna becomes a problem. The backlobe power will be reflected by metal transmitter module to frontward and degrade the mainlobe. Consequently, a low-backlobe endfire array antenna is necessary.

In this study, an image enhancement technique using Manchester coding (digital domain) and RF tripler (analog domain) is proposed and verified in chapter 2 and 3, respectively. In addition, a low-backlobe endfire Vivaldi array antenna whose front-to-back ratio (FBR) is beyond 20 dB to eliminate the backward leaked power is discussed in chapter 4 as well. Chapter 5 evaluates the fabricated 20GHz-band DBF transmitter using the proposed image enhancement technique and

low-backlobe Vivaldi array antenna. Chapter 6 is conclusion. The thesis is organized as followed and shown in Figure 1.

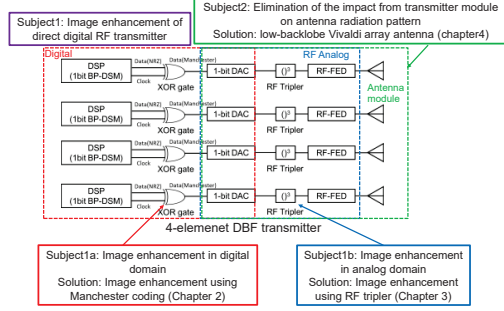


Figure 1: Framework of thesis

2. Image enhancement technique using Manchester code in digital domain

Instead of NRZ coding, the Manchester coding [3] is proposed to enhance the image components at specific Nyquist zone. The waveforms of NRZ and Manchester code are shown in Figure 2. Manchester code is a line code in which the encoding of each data bit is either low then high, or high then low, for equal time in one period. As shown in Figure 2, the Manchester coding can be easily implemented by using XOR gate on 1-bit data in NRZ code and synchronous clock. So there will not be much more burden on DSP, such as complexity, power consumption and so on.



Figure 2: Waveforms of NRZ and Manchester code

Regarding the 1-bit BP-DS modulated signal as a pseudo-random sequence, the PSD of 1-bit signal in NRZ and Manchester code can be calculated by Equation 1. The envelopes of PSD of 1-bit signal in NRZ and Manchester code are shown in Figure 3.

$$PSD_{NRZ}(f) = A^2 T_s \text{Sinc}^2(\pi f T_s)$$

(a) In NRZ code

$$PSD_{MAN}(f) = A^2 T_s^2 \text{Sinc}^2(\pi f T_s / 2) \sin^2(\pi f T_s / 2)$$

(b) In Manchester code

Equation 1: PSD of 1-bit signal

As Figure 3 shows, the high order image components of 1-bit BP-DS modulated signal at specific $(4n-1)^{\text{th}}$ and $(4n-2)^{\text{th}}$ Nyquist zone can be enhanced by using Manchester coding.

In this chapter, to ensure the 'distance' between each image components on spectrum, the center frequency

of DS modulator is set to $0.25f_s$, quarter of sampling frequency. Therefore, the image components are generated at $(0.5n+0.25)f_s$, n represents the order of image components. The output power of fundamental and image components of 1-bit BP-DS modulated signal in NRZ and Manchester code can be calculated. For further verification, both simulation and measurement are conducted. In both simulation and measurement, 4th order 1-bit BP-DS modulator in a sampling rate of 8 Gbps is used, and the CW input signal is set at 2.01 GHz near $1/4f_s$. The amplitude is set to $1V_{pp}$. All the calculated, simulated and measured output powers of fundamental and image components of 1-bit BP-DS modulated signal in NRZ and Manchester code are concluded in Table 1. It is confirmed by theoretical calculation, simulation and measurement that the high order image components of 1-bit BP-DS modulated signal in Manchester code at specific $(4n-1)^{\text{th}}$ and $(4n-2)^{\text{th}}$ Nyquist zone can be enhanced. The simulation result has a good agreement to the calculation result even though the measurement result deviates slightly from the calculation result in high frequency band because of the frequency response of measurement device, PPG. Therefore, it is proven that the proposed image enhancement technique using Manchester coding in digital domain is feasible.

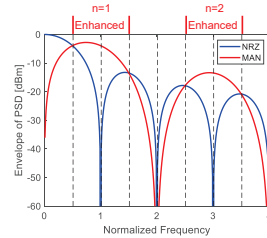


Figure 3: Envelopes of PSD of 1-bit signal

Nyquist Zone	Calculation			Simulation			Measurement		
	NRZ [dBm]	MAN [dBm]	Diff. [dB]	NRZ [dBm]	MAN [dBm]	Diff. [dB]	NRZ [dBm]	MAN [dBm]	Diff. [dB]
1	-0.91	-8.56	-7.65	-0.13	-7.73	-7.60	-0.02	-7.59	-7.57
2	-10.45	-2.8	7.65	-9.59	-1.99	7.60	-9.53	-1.83	7.70
3	-14.89	-7.24	7.65	-14.02	-6.41	7.61	-14.27	-6.44	7.83
4	-17.81	-25.46	-7.65	-16.84	-24.48	-7.61	-17.53	-25.55	-8.02
5	-20.00	-27.65	-7.65	-18.99	-26.60	-7.61	-21.39	-28.27	-6.88
6	-21.74	-14.09	7.65	-20.64	-13.03	7.61	-24.21	-16.72	7.49
7	-23.19	-15.54	7.65	-21.99	-14.38	7.61	-28.37	-20.31	8.06

Table 1: Conclusion of output powers of 1-bit BP-DS modulated signal in NRZ and Manchester code

3. Image enhancement technique using RF tripler in analog domain

Since the attenuation of high order image components is caused not only by NRZ coding scheme in digital domain but also by the frequency characteristics of 1-bit DAC in analog domain. Even

though the high order image components of 1-bit BP-DS modulated signal are enhanced by 7.6 dB, a severe attenuation beyond ten to dozens of decibels still will occur in analog domain. Consequently, an image enhancement technique in analog domain is necessary as well. In this chapter, to enhance or regenerate the high order image components of 1-bit BP-DS modulated signal, an image enhancement technique using RF tripler in analog domain is proposed to be implemented after 1-bit DAC.

Since the Manchester coding was proposed to enhance the image components at specific $(4n-1)^{\text{th}}$ and $(4n-2)^{\text{th}}$ Nyquist zone, only the 1st and 2nd image components of 1-bit BP-DS modulated signal in Manchester code at the frequency of $0.75f_s$ and $1.25f_s$ are regarded as input signal after suffering a severe attenuation from 1-bit DAC. In NRZ code condition, the fundamental and 1st image components of 1-bit BP-DS modulated signal in NRZ code at the frequency of $0.25f_s$ and $0.75f_s$ are regarded as input signal because of the attenuation in Sinc function.

The ideal output-input function of RF tripler in time domain can be simplified by Equation 2[4].

$$y(t) = x^3(t)$$

Equation 2: Output-input function of RF tripler

After calculation, the amplitude of output signals of RF tripler in the condition of 1-bit BP-DS modulated signal in NRZ and Manchester code are shown in Figure 4.

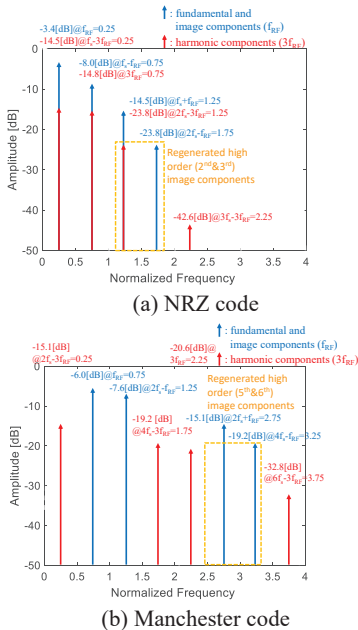


Figure 4: Output signal of RF tripler

In NRZ code condition, since the frequency of input signal is lower than that in Manchester code, only 2nd and 3rd order image components are regenerated. The regenerated image components are overlapped by harmonic components, which will degrade SNR. In contrast, with higher frequency of input signal in Manchester code, it is confirmed that 5th and 6th order image components of 1-bit BP-DS modulated signal are regenerated. Moreover, in Manchester code condition, the harmonic components are totally separated from the regenerated image components, which improves the SNR. As a result, it is proven that using RF tripler can regenerate the high order image components and a better performance can be achieved by using Manchester coding additionally, compared with NRZ coding. Besides the theoretical calculation, the simulation and measurement are conducted for further verification as well.

In simulation and measurement, the RF signal whose frequency is 0.501 GHz is modulated to 1-bit digital signal in NRZ and Manchester code whose amplitude and datarate are $1V_{pp}$ and 2Gbps, respectively. The lowpass filter (LPF) whose cutoff frequency is 3.5 GHz is applied to imitate the frequency characteristics of 1-bit DAC. The simulated and measured output powers of the regenerated high order image components of 1-bit BP-DS modulated signal in NRZ and Manchester code are concluded in Table 2.

Order of regenerated image component	Simulation			Measurement		
	NRZ [dBm]	MAN [dBm]	Diff. [dB]	NRZ [dBm]	MAN [dBm]	Diff. [dB]
5 th @5.5 GHz	-36.1	-23.2	12.9	-29.9	-22.4	7.5
6 th @6.5 GHz	-40.8	-26.0	14.2	-37.8	-24.9	12.9

Table 2: Conclusion of output powers of RF tripler

It is confirmed by theoretical calculation, simulation and measurement that the high order image components of 1-bit BP-DS modulated signal can be regenerated despite suffering a severe attenuation because of the frequency characteristics of 1-bit DAC. Moreover, compared with the NRZ coding scheme, using Manchester coding can improve the output power of regenerated high order image components of 1-bit BP-DS modulated signal beyond 10 dB.

4. Low-backlobe endfire Vivaldi array antenna

In this chapter, a low-backlobe endfire Vivaldi antenna with two slits is proposed, as shown in Figure 5. Since the backlobe power is caused by the current on both left and right edges [5], with two slits inserted on the edge sides, the current on the edges degrades, and the FBR is improved as shown in Figure 6. Based on the proposed Vivaldi antenna, 4-element array antenna is

博士学位論文要約(令和5年9月)

自律分散協調制御型直流マイクログリッドの電力融通方法に関する研究

劉 可

指導教員:山田 博仁

A Study on Power Sharing Methods for Autonomous Decentralized Coordinated Control based DC Microgrids

KE LIU

Supervisor: Hirohito YAMADA

This paper proposes a DC grid configuration method in which batteries are distributed and directly loaded on the base line to realize a green and resilient power network and confirms that the grid can be stably operated by autonomous distributed cooperative control (ADCC) using the battery characteristics, both by simulation and by testbed experiments. Even in an unstable microgrid operated mainly by renewable energy, it was found that the stability of power supply can be improved by exchanging power among neighboring grids, and economies of scale can also be expected. We also confirmed the feasibility and effectiveness of microgrid expansion based on power sharing. The grid simulator developed in the course of the research was able to reproduce and predict the grid conditions of the testbed well, indicating the feasibility of constructing a CPS system.

1. はじめに

太陽光や風力など、再生可能な自然エネルギーに基づく発電を主電源とするマイクログリッドの実証実験が各地で展開されているが、我々は再エネなどの直流機器の親和性が高い直流マイクログリッドを枠組みとして用い、電気的慣性力を有しながら簡単な制御方法によりマイクログリッド内の自律制御と安定した電力供給の実現を目指す。さらに、MECなどの通信技術を仮想に使用した自律分散制御に基づく電力融通により、各グリッド間の接続を強化することで、供給の安定性を高め、システム全体のレジリエンスを向上させる。本研究では (1) 部分最適化を実現する自律分散協調制御(ADCC)型直流マイクログリッドの構成技術確立、(2) グリッド間での自律分散制御による電力融通を通じて、部分最適化を図ることにより、スケーラビリティとレジリエンスを具備した持続可能な電力網の実現を目標として行なった。

2. 直流基線の設計

ここで考えるマイクログリッドのスケールとしては、最大でも数キロメートル程度であるので、前章で述べたようにグリッド内の直流基線電圧は350~420Vの範囲が検討されている。基線には、安全性を考慮して、2芯CVケーブルまたは、中性接地線を有する3芯CVケーブルを使用し、図1に示す様に、各ラインの電位を接地電位に対して±200V(ライン間電圧:400V)以下

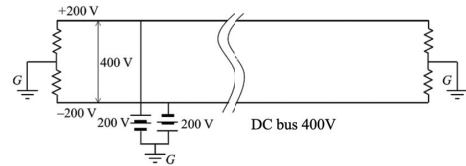


図1 直流基線の等価回路。

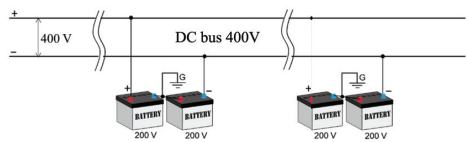


図2 分散型負荷電池を搭載した直流基線。

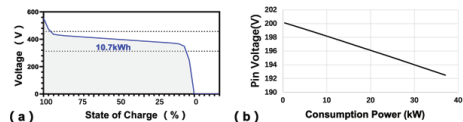


図3 Liイオン電池の(a)放電特性と(b)ドロップ特性。

に設定する。既存の蓄電池を含むマイクログリッドの構成においては、蓄電池の端子電圧が一般的には基線電圧とは異なるため、DC/DCコンバータで電圧変換を

行う必要がある。その場合、複数の蓄電池間での充放電の協調制御は、DC/DC コンバータにおけるドループ制御に基づいて実現される。しかし、高周波スイッチング・パワーエレクトロニクス(IGBT など)をベースとする DC/DC コンバータが突入電流に対する処理能力が弱いので、電力負荷が基線に接続された瞬間に必要な大電流は供給できず、電気的慣性力は弱いと考えられる[1]。基線に電気的慣性力を付与するために、図 2 に示す様に、端子電圧が直流基線の電圧と等しい電池を直接装荷する方法を提案する。蓄電池を直列に接続することで、DC/DC コンバータでは避けられなかった瞬間的な電流による動作制限を回避し、より強い電気的慣性力を実現できる。この場合、特に瞬時最大放電電流が大きな蓄電池(即ち、内部抵抗の小さな蓄電池)を用いることが望ましい。

例えば、リン酸鉄リチウムイオン電池の一セルの電圧は約 3.2 V であるから、接地中性線をとる場合は、約 60 個のセルを直列に接続して構成した蓄電池を、一組は基線の正極側に、もう一組を基線の負極側に接続する。60 個のセルを直列に接続すると、端子電圧は約 192 V になる。そのため、蓄電池の端子電圧は、図 3 (a) のように残量に対して 400 V 前後ではほぼ直線的に変化する。そして、図 3 (b) のように負荷が重いと端子電圧が低くなるドループ特性をベースにして、容易に自律制御を行うことができる。このような電圧差に基づく充放電制御は受動的かつ自律的に行われる。この制御には通信回線は必要ないため、他の設備の追加(つまり、スケーラブル性)も非常に容易である[1]。また、直流基線の電気的慣性力を更に向上させるために、図 2 に示すように、大容量の電池を基線上の 1 箇所接続するのではなく、比較的容量の小さい蓄電池を基線上の複数箇所に多数接続することが望ましい。

3. 自律分散協調制御(ADCC)

直流基線には、家庭や店舗、工場などの多くの電力を消費する負荷や、太陽光パネル(PV)や風力発電機などの多くの発電源が接続される。それらすべての機器の状態を監視し、各機器の充放電を集中制御することは現実的ではない。そこで、各機器の接続点で直流バスの状態(電圧)のみを監視し、自律分散協調制御に従って各機器の充放電を制御する方法(図 4)を提案する。

本制御方法では、蓄電池の SOC がゼロにならない限り、オフグリッド(ローカルグリッドに接続されていない状態)でも DC バスを運転することができる。しかし、不安定な再生可能エネルギーのみを使用する場合、DC バスを継続的に維持することは困難であるため、DC バスを図 5 に示すようなアルゴリズムでローカルグリッドに接続する必要がある。

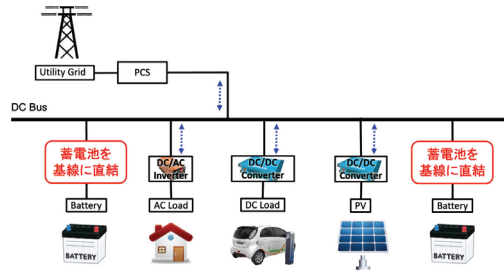


図 4 自律分散協調制御のイメージ図。

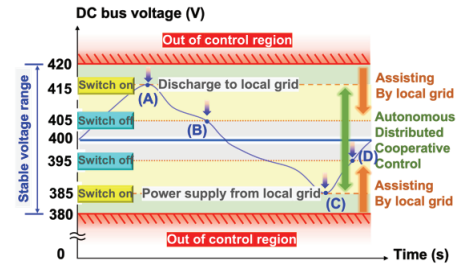


図 5 自律分散協調制御に基づくアルゴリズム。

3. シミュレーター構築

現在、主に再エネおよびエネルギー貯蔵システムの最適化と計画を目的とした交流・直流電力網シミュレーションソフトウェアが市販されているが[2, 3], 具体的な物理モデルや等価回路は公開されていないので、設計案の検証のためには、独自に直流マイクログリッドシミュレータを開発する必要がある。本シミュレータは簡易な等価回路と必要な初期データに基づいて、各種シナリオに基づく、マイクログリッドの設計、運用解析および評価などの機能が実現できるシミュレータを構築した。過渡現象の解析や厳密な経済モデルは含まれていない。

直流グリッドの構成要素を考えると、直接装荷された蓄電池を少なくとも一台以上有する直流基線上に、蓄電池、電力負荷、PV、非常用直流発電機、系統電力網との系統連系装置などを配置している。これらの構成要素のモデルを図 6 に示す。

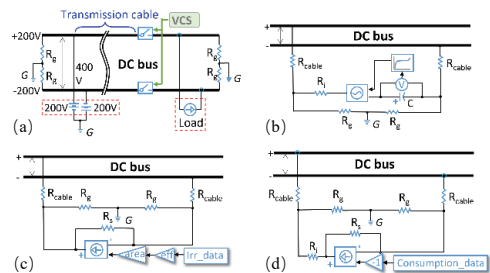


図 6 シミュレーションにおけるローカルグリッド(a)、蓄電池(b)、PV(c)、負荷(d)のモデル。

まず、図6.(a)のDCバスは、200VのDC電源を2つ直列に接続して作られている。蓄電池は、図6.(b)に示すように電圧源と直列に接続されたコンデンサを使ってモデル化されている。ここでは、このモデルの出力電圧をリチウムイオン電池の特性(端子電圧がSOCに比例する)に合わせて作成した。また、図6.(c)と(d)の日本の標準的な家庭の消費電力の統計データと、仙台市の年間日照時間に応じたPVの発電量のデータをもとに、各PVの発電量とバス内の各家庭の消費電力をシミュレーションすることができる。直流バスの電源ケーブルは、200SQのCVケーブルを想定し、長さあたりの電気抵抗を考慮した等価回路である。図7に示す3軒の住宅の1日の電圧変動により、提案したADCCベースのマイクログリッドの有効性が実証された。

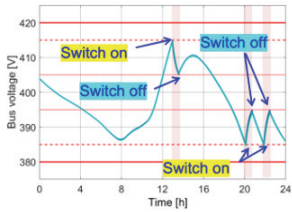


図7 一月のある日の基線の電圧変動。

4. 蓄電池直結型直流マイクログリッド実証実験

図8に、大学構内に構築した直流マイクログリッドの概略を示す。中央の建物をハブにしてT字形に直流基線(14SQ CVケーブル)を敷設し、3つの建物屋上に設置した端子電圧51.2V、120Ahのリン酸鉄Liイオン蓄電池を基線上の各ノードに直接接続した。ハブとなる中央の建物にも容量240Ahの蓄電池を接続している。さらに、3つの建物屋上には、定格出力800Wのソーラパネル(PV)を設置し、充電制御器を介して基線と接続している。充電制御器は接続された蓄電池の充電状態(SoC)を管理し、蓄電池の過充電を防ぐため、端子電圧が55.2Vに達するとFloatingモードに切り替える。本グリッドは電力網に接続されていないオフグリッドであり、PV発電量と各ノードでの電圧は1分毎に遠隔監視されている。

そこで、蓄電池直結型直流グリッドの自律分散協調動作を調べるため、電子負荷装置を各ノードに接続し、放電実験を行った。中央ノード(B4)に直流電子負荷を接続し、10分間隔で負荷を変化させたときのB4における電流の流れを、流入を「+」として図9に示す。1,200Wの負荷を接続した最初の期間は、電圧差によってB1-B3からB4へ電流が流入しており、B1~B4全ての蓄電池が自律協調して負荷に電力を供給していることが分かる。2,000Wの電力負荷を接続した場合、1台の蓄電池(端子電圧約51.2V)の

みから電力を供給する場合は、約39Aの電流が流れるはずであるが、各蓄電池が、そのドループ特性により協調して給電しているため、B4の蓄電池からは最大でも28Aしか引き出されていない。これは、電力分布がリアルタイムで受動的に調節されていることを示している。

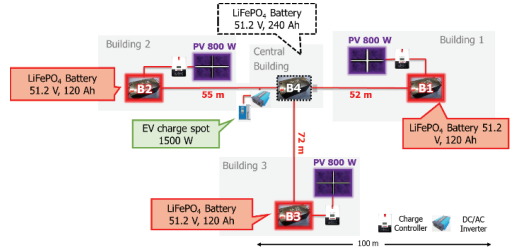


図8 蓄電池を直接接続したDCマイクログリッドテストベッドの概略図。

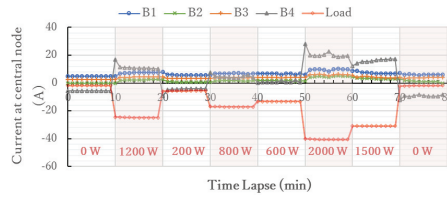


図9 B4に電力負荷を接続した時の電流の流れ。

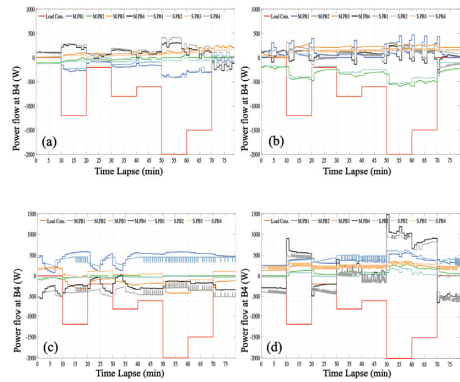


図10 B1~B4 (a~d)で負荷印加した場合電圧変化のシミュレーション結果と実測値との比較。

ここでは、実験と同じ条件下でのDCマイクログリッドの挙動をシミュレータ上で再現することを試みて、電力負荷の変動によるパワーフローの変化に焦点を当ててシミュレーションを行った。図10での測定データとシミュレーションデータを比較すると、B1からB4への電力フローの傾向はほぼ一致しており、電力の変化の方向、各蓄電池の給電比率、および電力負荷の変化に対する蓄電池の応答も一致している。

長期使用による電池モデルの劣化は、シミュレーション結果と実験データとの不整合の原因と考えられている[4, 5]. 複雑な電気化学反応を伴うエネルギー貯蔵電池の正確なモデリングは、常に困難な課題である。ただし、全体として、エネルギー分配のシミュレーション結果は実験結果と非常に一致している。したがって、シミュレータは、故障テスト、負荷容量テスト、およびその他の実験など、実験では難しいいくつかの実験を実施するために後続で使用されることが期待される。

5. 電力融通

マイクログリッドをより大規模に拡張するには、グリッド間での電力融通を自律分散協調制御に基づいて行う方式について検討してみる。

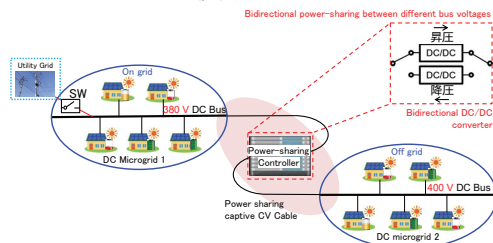


図 11 近接する2つのマイクログリッド間の電力融通概略図。

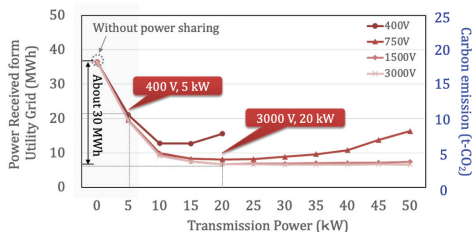


図 12 異なる PV と蓄電池の組み合わせで、送電電圧と電力が系統送電網から受電する電力および CO₂ 排出に与える影響。

まず、隣接する2つのグリッド間でのリアルタイムの電力融通を実現するため、MEC 技術に基づく自律分散制御が使われると仮定する。各グリッドの電力状況を MEC に上げて、近隣のグリッド間で電力情報を共有する。そして、その情報を基に、各マイクログリッドが近隣のグリッドと電力融通を行うものとする。

ここで取り上げたケース(図 11)では、1 km 離れた 50 世帯の 2 グリッド間で、図 12 に示すように電力融通を最適化することで、電力融通を行わない場合に比べて CO₂ 排出量を最大約 75% 削減することができる。これに対応する CO₂ 排出量は約 15 t-CO₂/年であり、0.15 t-CO₂/[年・軒]の削減を貢献できる。ここでの CO 排出量の計算は[6]に参考した。さらに、400 V (直流マイクログリッドの基線電圧に相当)のままで電

力融通を行った場合も、最大で約 64% の CO₂ 排出量削減が可能である。この場合、両方のグリッドが同じ電圧であれば、DC/DC コンバータを経由しないことは実現可能であると思われる。さらに、より長距離でより大きな規模のグリッド間での電力融通を考慮する場合は、より高い送電電圧と送電電力を設定する必要があるが、電力融通効果を最適化する適切値が存在することが一般的。以上の結論は、電力融通に基づくマイクログリッド拡張の実現可能性と有効性を示すのに十分である。

6. まとめ

本論文では、グリーンでかつレジリエントな電力ネットワークの実現を目指し、蓄電池を分散して基線に直接装荷する直流グリッドの構成法を提案し、バッテリーの特性を利用した自律分散協調制御により、安定にグリッドを運転可能なことを、シミュレーションおよびテストベッドによる実験の双方で確認した。また、電力融通に基づくマイクログリッド拡張の実現可能性と有効性確認した。研究過程で開発したグリッドシミュレーターは、テストベッドのグリッドの状態を良く再現・予測でき、CPS としての構築可能を示した。

文献

- 1) 山田 博仁, 信学会ソサイエティ大会 B-9-2 (2020)
- 2) “HOMER Pro,” *HOMER Software*, <https://www.homerenergy.com/products/pro/index.html> (accessed Jul. 2, 2023).
- 3) Canada, Natural Resources. “RET Screen.” *Natural Resources Canada*, May 30, 2023. <https://natural-resources.canada.ca/maps-tools-and-publications/tools/modelling-tools/retscreen/7465> (accessed Jul. 2, 2023).
- 4) W. -H. Yang, Z. -D. Wu, K. Eda, Y. Kamiya and Y. Daisho, *2016 IEEE 2nd Annual Southern Power Electronics Conference (SPEC)*, Auckland, New Zealand, 2016, pp. 1-6
- 5) L. Hou *et al.*, *Chemical Engineering Journal*, vol. 465, p. 142946, Jun. 2023.
- 6) 令和3年度の電気事業者ごとの基礎排出係数・調整後排出係数等(一部追加・更新)の公表について,” 環境省, https://www.env.go.jp/press/press_01075.html (accessed Jul. 12, 2023).

修士学位論文要約 (令和 5 年 9 月)

トンネルダイオードを利用した ニューロン回路の構成とその応用に関する研究

菅家 由佳

指導教員：佐藤 茂雄, 研究指導教員：山本 英明

A Study on Design of a Neuron Circuit Utilizing a Tunnel Diode and its Application

Yuka KANKE

Supervisor: Shigeo SATO, Research Advisor: Hideaki YAMAMOTO

With the development of AI technologies, machine learning and neuromorphic processing at edge locations are becoming crucially important. Many neuron models have been proposed to realize brain-like dynamics. In the case of engineering applications, the choice of models is based on a balance between the processing required and the cost of implementation. In this study, I focus on the self-excited neuron model (ID model) proposed by Nakajima et al. that shows excellent characteristics in optimization problems, and investigate its circuit implementation using a tunnel diode to minimize circuits resources. Moreover, I study its application to reservoir computing.

1. 序論

現在、AI技術の発展に伴い、エッジコンピューティングの重要性が高まっている。エッジでの計算を効率的に実行するハードウェアの開発が不可欠となっており、本研究ではニューラルネットワークを用いたハードウェアの実装方法について検討する。

ニューラルネットワークの性能はニューロンモデルの性質や動作原理と密接に関係している。ニューロンモデルの一種であり、脳型情報処理や最適化問題の解法に使用されるモデルとして、ポップフィールドモデル[1]がある。その動作は、エネルギー関数により決まり、必ずしも最適解ではない極小値に収束してしまうという課題がある。

この課題を解決するモデルとして、IDニューロンモデル[2]が中島らによって提案されている。IDモデルは、負性抵抗特性により、自励発振機能を有し、最適化問題の解法において優れた特性を示す。また、さらにこれを改良した、特徴的なバースト発火ダイナミクスを有するバーストIDニューロンモデル[3], [4]が提案されている。本研究の目的はバーストIDニューロンを構成するハードウェアの効率的実装方法を提案すること、またバーストIDニューロンを用いてネットワークを構成し、リザーバ計算への応用可能性を検証することである。リザーバ計算への応用においてはリードアウト層のより効率的な構成を目的として、多数決回路をアナログ的に実装することも提案する。

2. 自励発振型ニューロン回路

バーストIDモデルの動作を実現するアナログ回路が

提案されている[3], [4]。本研究では、先行研究の結果を踏襲しながら比較的最近のCMOSプロセス(0.18 μm)を用いて回路の再設計を行った。その際、多数のトランジスタを必要とする負性抵抗特性を実現する回路をトンネルダイオード1個で置き換えた。理想的なトンネルダイオードの特性を仮定した電圧制御電流源を用いて、ニューロン回路の動作をSPICEシミュレーションによって検証した。図1に示す通り、バースト発火動作を再現することができた。 V_x がニューロンの出力である。

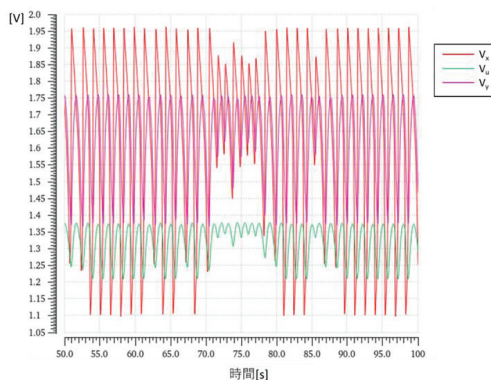


図1:バースト発火動作

3. リザーバ計算への応用

リザーバ計算とは機械学習のひとつであり、時系列データをリザーバ層を介して高次元に写像すること

により認識や分類を行う情報処理方法である。第二章で設計したバースト ID ニューロンをリザバー層に使い、リードアウト層についてはファイインの大きなニューロン回路として多数決回路[5]を用いることを検討した。CMOS プロセス(65 nm)を想定したシミュレーションにおいて、多数決回路として所望の動作を得て、消費電力と動作速度をそれぞれ評価した。しかし、実際の試作チップでは、ゲートリーク電流によるものと思われる誤動作が確認された。しかし、CMOS プロセス(0.18 μm)を用いた再試作では、所望の動作を確認した。電源電圧の増大により動作マージンが増大したことが要因として挙げられる。

さらに、SPICE シミュレーションにより、リザバー計算機としての動作確認を行った。具体的なタスクとして正弦波とのこぎり波の波形分類を取り上げ、SPICE シミュレーションにより提案ハードウェアが正しく動作することを確認した。このことにより、少ない回路リソースで動作しうるリザバー計算機の具体的な構成方法を提案した。

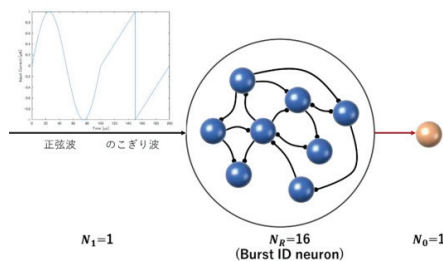


図 2: リザバー計算への応用のモデル図

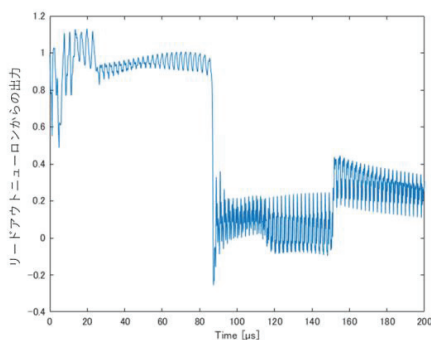


図 3: リードアウト層の応答

4. 結論

AI 技術の発展に伴い、機械学習や脳型処理のエッジ側での実装が社会的課題となっている。そこで処理されるべき応用の一つとして、組み合わせ最適化問題というものが存在する。本研究では、中島らによ

って提案され、最適化問題などで優れた特性を示す自励発振型ニューロンモデル(ID モデル)に着目し、その回路実装とリザバー計算への応用について検討した。

第二章では、中島らによって提案されたバースト ID ニューロンについて、トンネルダイオードを利用した高効率なアナログ回路の実装方法について提案した。23 個のトランジスタから構成される負性抵抗特性を有する要素回路をトンネルダイオード1つで置き換え可能であることを SPICE シミュレーションにより明らかにした。

第三章では、バースト ID モデルを利用したリザバー計算機の実現について述べた。まずリードアウト層の回路実装のために、大きなファンインを有する多数決回路をバイナリ結合ニューロンとして利用する方法を提案し、SPICE シミュレーションにより回路パラメータの調整を行った。さらに、具体的なタスクとして正弦波とのこぎり波の波形分類を取り上げ、SPICE シミュレーションにより提案ハードウェアが正しく動作することを確認した。このことにより、少ない回路リソースで動作しうるリザバー計算機の具体的な構成方法を明らかにした。

本研究では、エッジコンピューティングなどで求められる最適化問題やリザバー計算などの高効率な実装に向けて、バースト ID ニューロン回路に着目し、トランジスタだけでなくトンネルダイオードも利用するハードウェア実現方法について提案した。SPICE シミュレーションと一部 LSI 試作を通じて、提案手法の有効性を確認した。実用化に向けては、システム全体のハードウェア化と性能評価などが今後の課題となる。

文献

- [1] J. J. Hopfield, "Neurons with graded response have collective computational properties like those of two-state neurons," Proc. Natl. Acad. Sci. USA., vol. 81, pp. 3088-3092, 1984.
- [2] K. Nakajima, Y. Hayakawa, "Characteristics of inverse delayed model for neural computation," Proc. NOLTA2002, pp. 861-864, 2002.
- [3] 末永晋也, 「高次ダイナミクスの導入による 高機能集積化神経回路網の研究」, 東北大学博士学位論文, 2006.
- [4] S. Suenaga, Y. Hayakawa, K. Nakajima, "Design of a Neural Network Chip for the Burst ID Model with Ability of Burst Firing," IEICE Trans. Fundamentals, vol. E90-A, pp. 715-723, 2007.
- [5] H. Akima, Y. Katayama, M. Sakuraba, K. Nakajima, "Majority Neuron Circuit Having Large Fan-in with Non-voltage Synaptic Weight," IEICE Trans. Electron. vol. E99-C, pp. 1056-1064, 2014.

修士学位論文要約 (令和 5 年 9 月)

ノンコリニア反強磁性体 Mn_3Sn ナノドットの熱安定性

佐藤 佑磨

指導教員：深見俊輔

Thermal stability of non-collinear antiferromagnet Mn_3Sn nanodot

Yuma SATO

Supervisor: Shunsuke FUKAMI

D_{019} - Mn_3Sn , an antiferromagnet having non-collinear spin structure in a kagome lattice, has attracted great attention owing to various intriguing properties such as a large anomalous Hall effect. Stability of magnetic state against thermal fluctuation, characterized in general by the thermal stability factor Δ , has been well studied in ferromagnetic systems but not for antiferromagnets. Here we study Δ of the antiferromagnetic Mn_3Sn nanodots as a function of their diameter D . To obtain Δ , we measure the switching probability as a function of pulse-field amplitude and analyze the results based on a model taking account of two and six-fold magnetic anisotropies in the kagome plane. We observe no significant change in Δ down to $D = 300$ nm below which it decreases with D . The obtained D dependence is well explained by a single-domain and nucleation-mediated reversal models. These findings provide a basis to understand the thermal fluctuation and reversal mechanism of antiferromagnets for device application.

1. はじめに

反強磁性体は正味の磁化を持たないことから、これまで多く利用されてきた強磁性体と比較して高密度、高速かつ洩れ磁場が極めて小さいといった特徴を持ち、次世代のスピントロニクスデバイス材料として注目を集めている^{1, 2)}。さらに隣接するスピンの平行または反平行とならないようなカイラルスピン構造を有するノンコリニア反強磁性体は、反強磁性体でありながら磁気状態の電氣的読み取りが容易であることが明らかになっている^{3, 4)}。さらに、薄膜化技術が確立されたことによって、電流による反転や回転といったデバイス応用が期待される機能性が開拓された^{5, 6)}。一方で、このノンコリニア反強磁性体をナノスケールのデバイスサイズに加工した際に、反強磁性体の利点やカイラルスピン構造の機能性を発揮できるかは未知である。また、デバイス応用に向けて、このカイラルスピン構造の熱に対する安定性は非常に重要な指標である。そこで、本研究では、ノンコリニア反強磁性体 Mn_3Sn のエピタキシャル薄膜をナノスケールのホールドット素子へ微細化し、カイラルスピン構造の熱安定性を調べることを目的とする。

2. ナノドット素子の作製と電氣的測定

$W(2)/Ta(3)/Mn_3Sn(20)/MgO(1.3)/Ru(1)$ (nm)の膜構成で $MgO(110)$ 基板上に DC および RF マグネトロンスパッタリング法により $400^\circ C$ で加熱製膜した。バッファ層である $W(2)/Ta(3)$ は基板の MgO の(110)面と Mn_3Sn との M 面の格子間ミスマッチを緩和するものである⁷⁾。

製膜後、 $500^\circ C$ 、1時間の熱処理によって Mn_3Sn を結晶化した。作製したブランク膜の Mn_3Sn 層は XRD によって M 面向向でエピタキシャル成長していることを確認している。また、電子線リソグラフィと Ar イオンミリングによってナノスケールのホールドット素子に加工した(SEM 図 1)。ドット的设计直径は、サイズ依存性を取るために 175 nm から 1000 nm とした。

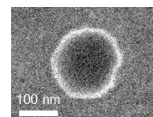


図 1 ドットパターンの SEM 図

図 2 (a)に示すような測定回路で異常ホール効果を観測することによってカイラルスピン構造の磁場に対する応答を確認した。図 3 はドット素子に対して磁場を掃引し、異常ホール効果を測定したものである。2 値化したホール抵抗の変化からカイラルスピン構造の磁場による反転が確認できる。

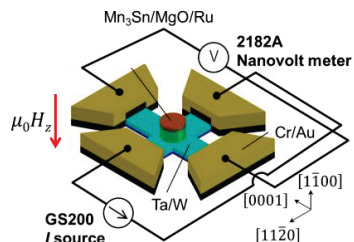


図 2 ドット素子の概略図と測定回路

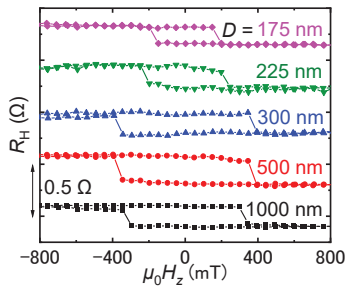


図3 ドット素子の R_z - H_z 曲線

3. 熱安定性指数のドットサイズ依存性

図2に示した測定系を用いて、パルス磁場による反転確率測定を行った。得られた反転確率の外部磁場依存性をネールアレニウスの熱活性モデルを仮定し、フィッティングによって熱安定性を定量化した。図4は熱安定性指数 A のサイズ依存性である。300 nm 以上のドットサイズで、 A はおよそ 120 程度であり、サイズに対して A は一定である。一方で、300 nm を下回ったところで、サイズの減少とともに A が小さくなっていくような傾向が見られ、最小サイズである 175 nm で A は 30 程度となった。強磁性体を用いた磁気トンネル接合素子における先行研究⁸⁾においても同様な傾向が見られている。図4の点線は、300 nm を臨界サイズとして、低サイズ側を一斉反転モードでの反転、高サイズ側を核生成反転モードでの反転を仮定した計算によるプロットである。得られた臨界サイズは Mn_3Sn のナノワイヤを用いた先行研究の結果と一致していることから、この計算によって実験結果をよく説明できている。

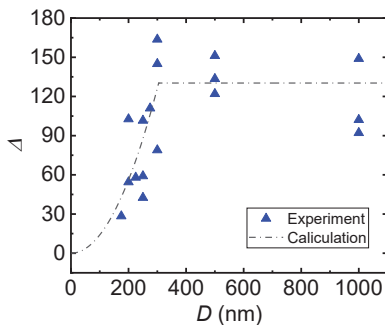


図3 熱安定性指数 A のドットサイズ依存性

4. まとめ

本研究では、ノンコリニア反強磁性体 Mn_3Sn のエピタキシャル薄膜をナノスケールのホールドット素子へ微細化し、異常ホール効果によってカイラルスピン

構造の状態検出を利用することで、パルス磁場による反転確率測定から熱安定性の定量評価を行った。得られた熱安定性指数のサイズ依存性では、300 nm 付近を臨界サイズとしてサイズの減少に対して熱安定性が減少する領域と、サイズに依存しない領域が見られ、それぞれ反転のモードが異なることが示唆された。以上より、ノンコリニア反強磁性体のデバイス設計に向けた反転機構や熱活性の理解の基礎となる重要な知見が得られた。

文献

- 1) T. Jungwirth *et al.*, Nat. Nanotechnol. **11**, 231 (2016).
- 2) V. Baltz *et al.*, Rev. Mod. Phys. **90**, 015005 (2018).
- 3) S. Nakatsuji *et al.*, Nature **527**, 212 (2015).
- 4) A. Nayak *et al.*, Sci. Adv. **2**, 1501870 (2016).
- 5) H. Tsai *et al.*, Nature **580**, 608 (2020).
- 6) Y. Takeuchi *et al.*, Nat. Mater. **20**, 1364 (2021).
- 7) J. Yoon *et al.*, Appl. Phys. Express **13**, 013001 (2020).
- 8) H. Sato *et al.*, Appl. Phys. Lett. **105**, 062403 (2014).
- 9) H. Bai *et al.*, Appl. Phys. Lett. **117**, 052404 (2020)

修士学位論文要約（令和5年9月）

熱延伸とレーザー加工で作製された多検体
電気化学センシング用集積ファイバ

呉 京宣

指導教員：吉信 達夫， 研究指導教員：郭 媛元

Integrated Fibers for Multianalyte Electrochemical Sensing
Fabricated by Thermal Drawing and Laser Machining

Jingxuan WU

Supervisor: Tatsuo YOSHINOBU, Research Advisor: Yuanyuan GUO

To satisfy the practical needs in wearable devices for electrochemical detection, this study utilized the versatile thermal drawing process to develop a flexible multianalyte electrochemical sensing fiber that could be woven into textiles as a new form of wearable bioelectronics. Here, the laser ablation and surface functionalization processes were adopted to realize sensing capabilities on the longitudinal side of fibers, breaking the limitations of the tip-dominated functions and the number of sensing targets. A catalytic-type sensing electrode modified by gold nanoparticles (AuNPs) for uric acid (UA), an affinity-type ion selective electrode (ISE) functionalized by Na^+ ionophores, and a pseudo reference electrode (p-RE) were integrated on the longitudinal surface of the fiber. The all-in-one-fiber electrochemical sensor for multiplexed detection was characterized in detail [1].

1. Introduction

Human beings are facing severe crises of survival, such as aging populations, cancer, mental health, pandemics, etc. Research on basic physiology, clinical medicine, and daily healthcare has received extensive attention to address these crises. The development of reliable and highly sensitive sensing technologies is one crucial aspect. In various application scenarios, wearable electrochemical bioelectronics represents an emerging technology to monitor the physiological parameters of the human body continuously and seamlessly, especially under the high demand for self-health monitoring in the post-COVID-19 era [2]. Among various important body fluids, sweat has attracted much attention as the primary object of seamless health monitoring as it can be obtained non-invasively and safely at any time [3]. For instance, the concentrations of uric acid (UA), Na^+ ions, K^+ ions, and Cl^- ions in sweat can be used to monitor metabolic arthritis, heatstroke, hypokalemia, and cystic fibrosis, respectively [4].

Recently, fiber-based electronics have shown great potential in wearable applications due to their special geometry, aspect ratio, mechanical properties, and weavable properties. The thermal drawing process, conventionally used in the telecommunication industry to produce optical fibers, has been adopted to

develop multifunctional and multimaterial fibers. The macroscopically designed structure and function within the preform can be scaled down proportionally in fibers at a micron scale with extended lengths of hundreds of meters, during the thermal drawing process [5]. However, thermally-drawn-fiber-based wearable bioelectronics focusing on biochemical parameters, such as monitoring important chemicals in sweat, are still on the way.

As shown in Fig. 1, in this study, taking advantage of the thermal drawing process, a flexible multifunctional fiber with a footprint of $750 \mu\text{m} \times 370 \mu\text{m}$ to $1100 \mu\text{m} \times 550 \mu\text{m}$ was developed, which can be woven into textiles for on-body sweat sensing with all-in-one-fiber multiplexed sensing capabilities. The fiber consists of two polymer electrodes based on carbon-black-loaded polyethylene (CPE) electrodes and stainless steel (SS) wires directly beneath them, internal microfluidic channels between the electrodes, and an outermost polycarbonate (PC) cladding. In this study, the laser machining technique was employed to expose the CPE within the PC cladding at designated locations along the longitudinal sides of the fiber, which produced a large sensing surface. The exposed electrodes were further modified with sensing materials, such as AuNPs for direct monitoring of UA oxidation as well as ion-selective membranes (ISM)

for sensing Na^+ concentration. The electrical signal could be recorded directly through the SS wires behind the CPE to avoid signal attenuation and noise disturbance when it passes through high-resistance CPE electrodes. Meanwhile, an Ag/AgCl-based pseudo-reference electrode (p-RE) was also incorporated into the fiber by integrating Ag/AgCl ink, NaCl-containing hydrogel, and a passive membrane layer. Finally, all functions were integrated into one fiber as an all-in-one-fiber sensor, and its multiplexed sensing performance in the artificial sweat was characterized.

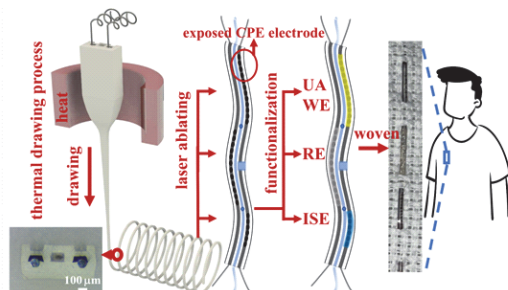


Fig. 1 Schematic illustration of thermally drawn fiber fabrication, functionalization and characterization.

2. Characterizations

The AuNPs-modified UA sensing electrodes, Na^+ ISE, and p-RE were successfully developed and integrated into a single fiber as an all-in-one-fiber multianalyte electrochemical sensor for the characterization of the designed wearable application. The fiber is woven into textiles and systematically characterized in artificial sweat.

For the measurement of UA, a cyclic voltammetry (CV) measurement was performed in a two-electrode configuration, consisting of a p-RE and a UA sensing electrode, which were connected to the potentiostat. Here, the p-RE served as both the reference electrode and the counter electrode. To characterize the capability of Na^+ monitoring, the open circuit potential (OCP) method was used in a two-electrode configuration consisting of a p-RE and an ISE within the fiber, which was connected to the potentiostat.

The CV curves and the sensitivity to UA are shown in Fig. 2a and b. The oxidation and reduction peaks can be observed at around 0.5 V and 0.3 V of the CV curve. The average sensitivity of UA was obtained from the oxidation peak to be $0.62 \pm 0.1 \text{ nA}/\mu\text{M}$. The Na^+ sensing characteristics of the ISE within the fiber are shown in Fig. 2c. The potential became higher in

response to the concentration of Na^+ . The sensitivity is calculated as $43.1 \pm 3.5 \text{ mV/decade}$ (Fig. 2d). Both potentiometric and amperometric measurements could be fully integrated within a single fiber. They have detection ranges that match the physiological ones with high sensitivities, which can be further weaved into functional textiles for sweat sensing.

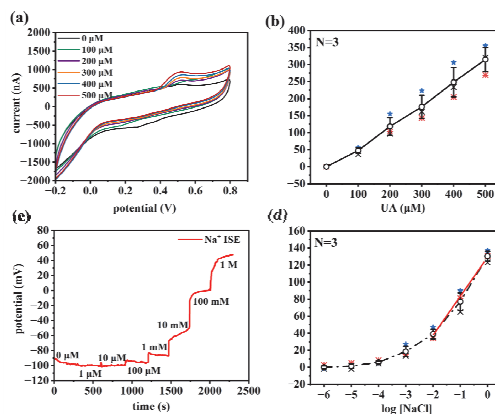


Fig. 2 (a) The CV curves and (b) sensitivity of the all-in-one-fiber sensor in response to UA in the artificial sweat. (c) The potential-time curve and (d) average corresponding calibration curve of the fiber in artificial sweat-based NaCl solution.

3. Conclusion

In this study, a series of unique fabrication processes were utilized to develop a multianalyte electrochemical sensing system based on thermally drawn fibers and textiles for wearable sweat-sensing applications. This fiber-based wearable bioelectronics, integrated with fully multiplexed electrochemical sensing, represents a new class of wearable health monitoring with great potential for fully comprehensive wearable health monitoring applications in daily life.

References

- 1) Wu, J., Sato, Y. & Guo, Y. *Anal Bioanal Chem* 415, 4307–4318 (2023).
- 2) Y. Yang, Y. Song, W. Gao, et al. *Nat Biotechnol*, 38, 217–224. (2020)
- 3) S. Roy, M. David-Pur, Y. Hanein, *ACS Appl Mater Interfaces*, 9, 35169–35177. (2017)
- 4) J. Kim, A.S. Campbell, B.E.-F. de Ávila, J. Wang, *Nat Biotechnol*, 37, 389–406. (2019)
- 5) W. Yan, F. Sorin, et al. *Materials Today*. 35 (2020) 168–194.

Master's Thesis Abstract (September 2023)

高ピークパワーを有する 905nm 波長帯短光パルス発生手法に関する研究

崔 鈺雯

指導教員：山田 博仁

Study on a method for generating short light pulses
in the 905nm wavelength band with high peak power

Supervisor: Hirohito YAMADA

Two-photon excitation laser microscopy is rapidly expanding its usage in various fields, such as neuroscience, immunology, and cancer screening, due to its characteristics of low invasiveness and deep tissue penetration. In current biological imaging, green fluorescent protein (GFP) is used as a standard substance. Two-photon excitation of the GFP requires a wavelength of 900-1000 nm. Also, due to the requirements of two-photon excitation, the light source needs to have high peak power output characteristics. Usually, optical amplification is needed to achieve high peak power. However, at present, there are no high-performance laser diodes (LDs) in the 905 nm wavelength band that can be used as the light sources. Therefore, this paper proposes two methods that can be used to generate 905 nm light pulses with high peak power in the two-photon excitation wavelength range of the GFP.

Introduction

This article introduces two methods for generating 905nm ultra-short optical pulses. First, ultra-continuous spectra were generated based on GS-LD. The process of generating ultra-continuous spectra based on Raman shift was analyzed. A BPF was used to extract 905nm optical pulses, which were then amplified using NdFA. Since the generation of ultra-continuous spectra is a complex process, this study proposes a method of exciting QW-LD with a strong electrical pulse to extract 905nm optical pulses from the oscillation of the second quantum level.

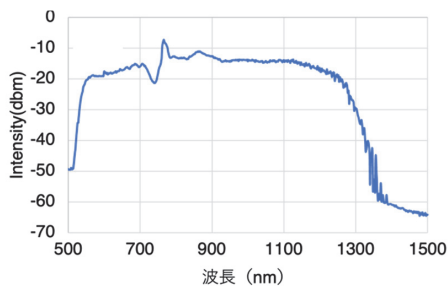
2. Method I : Generation and Amplification of Supercontinuum (SC) Light through LD Excitation

Fig. 1 A supercontinuum spectrum with a bandwidth of 600nm

In previous research, we succeeded in amplifying light pulses extracted by a band-pass filter from an ultra-wideband light spectrum generated using a picosecond light source and photonic-crystal fiber (PCF) [1]. This amplified light was used for two-photon imaging. We adopted a similar approach using a picosecond light source and a 10-meter-long PCF to generate a supercontinuum spectrum with a pulse width of 600 nm as shown in Fig. 1 and extracted the light pulse at a wavelength of 905 nm using a bandpass filter. Unlike previous studies, we amplify the target pulse by two-stage fiber amplification. Finally, we obtained an optical pulse with a peak power of 380 W and a time width of 11 ps, as shown in Fig. 2. Although the result did not reach the target value, theoretically it is possible to reach the target by compressing the pulse width. However, it is difficult to do so in practice.

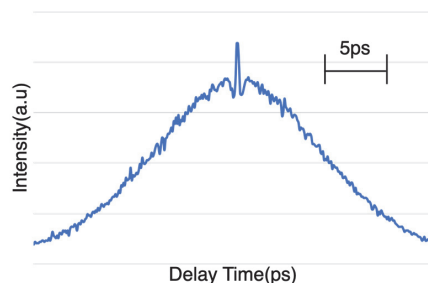


Fig. 2 Autocorrelation waveform of light pulses extracted from supercontinuum.

3. Generation and Amplification of Light Pulses through Strong Excitation of the Second Quantum Level in LD

The generation of supercontinuum spectra is a complex process. Therefore, in this study, we propose a method for exciting quantum wells (QWs) using strong electrical pulses and extracting 905nm optical pulses from the oscillation of the second quantum level. During the excitation with strong electrical pulses, we analyzed the effect of superimposed DC bias on the oscillation of the second quantum level using MATLAB. This analysis revealed that the oscillation of the second quantum level is enhanced when a small amount of DC bias is superimposed during electrical pulse excitation. However, excessive DC current overlay suppresses the oscillation of the second quantum level. Therefore, we adjusted the superimposed DC bias to maximize the oscillation of the second quantum level. Finally, we extracted the second quantum level in the 905 nm wavelength band using a bandpass filter (BPF), amplified it with a NdFA, and obtained optical pulses with a pulse width of 134 ps and a peak power of 40 W (5.2 nJ) without trailing components. The time waveform of the light pulse is shown in Figure 3.

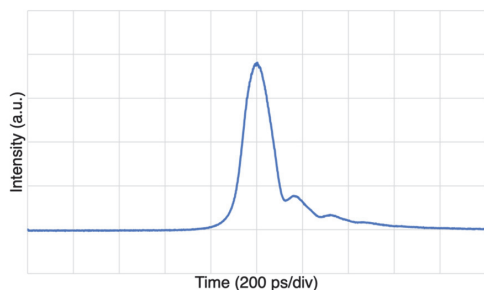


Fig. 3 The time waveform of the light pulse

4. Comparison of two Methods

The comparison of the light pulses obtained from two techniques is shown in Table 1. Although the data extracted from the supercontinuum spectrum appears better based on the current results, however when practicalizing these two types of technologies, it is necessary to input optical pulses with a pulse width of several picoseconds into the PCF for the generation of supercontinuum spectra, and the bandwidth of the supercontinuum spectra depends on the input power to the PCF. Therefore, it is necessary to ensure that the optical pulses injected into the PCF have a high peak power and short pulse width. On the other hand, the generation of the

TABLE I The results obtained from two methods

	Extraction from SC light	Extraction from SQS
time span	11 ps	134 ps
ASE%	27%	8.8%
P_{peak}	380 W	40 W
$FOM(P_{peak} \cdot P_{av})$	22 W^2	2.6 W^2

second quantum level requires only strong electrical pulse excitation for second quantum level oscillation, making it simpler compared to the generation of SC light. Furthermore, the oscillation of the second quantum level can provide picosecond optical pulses with much higher peak power and no trailing edge component compared to conventional GS-LDs based on FQS laser oscillation. Therefore, when comparing the two methods of optical pulse generation in this paper, it is desirable to recommend the use of the method extracting optical pulses from the second quantum level for future research.

References

- 1) Yokoyama, H., Tsubokawa, H., Guo, H., Shikata, J., Sato, K., Takashima, K., Kashiwagi, K., Saito, N., Taniguchi, H., & Ito, H. *Journal of Biomedical Optics*, 12(5), 054019. (2007).

Master's Thesis Abstract (September 2023)

再エネ駆動型データセンタの電源状況に応じた ジョブスケジューリングの研究

王 静池

指導教員：山田 博仁

A Study on Job Scheduling for Renewable Energy Driven Data Centers Supervisor: Hirohito YAMADA

In today's data-driven society, the surging energy demand of data centers (DCs), pivotal for information processing and storage, is of growing concern. By 2030, Nature predicts that ICT's power consumption will account for 21% of global usage, with DCs contributing 13%. Given this vast energy consumption, there's an imperative for DCs to incorporate renewable energy (RE) to achieve carbon neutrality and sustainable development goals (SDGs). To maximize RE and minimize transmission losses, the study proposes replacing power transmission with information processing load migration. This research aims to examine job scheduling (JS) methods for RE-driven distributed data center networks, considering both temporal and spatial dimensions, and to provide insights into optimizing energy use in DCs while addressing potential challenges.

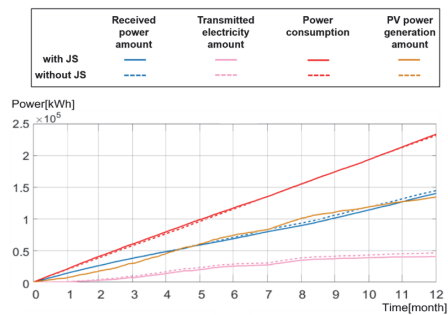
1. Introduction

In the quest to optimize energy use in data centers (DCs), this study delves into innovative job scheduling methods for renewable energy (RE)-driven distributed DC networks. Utilizing a grid simulator on Matlab/Simulink, we explored the potential of JS across geographically dispersed DCs. Our focus was twofold: spatially, examining the effects of JS between locations with varying sunlight correlations, and temporally, emphasizing processing during peak solar generation at a single location. By setting up Micro Data Centers (MDCs) on a 'Testbed DC Microgrid' and establishing a container cluster, we aimed to discern the efficacy of these JS techniques in enhancing renewable energy utilization.

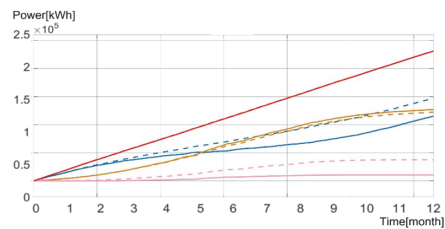
2. Job Scheduling based on location

This research investigates job scheduling methods in data center networks powered by solar energy. Given the variability in solar power generation across regions due to differences in sunlight exposure, the study proposes job scheduling based on the battery's state of charge (SoC). By allocating information processing tasks according to SoC, data centers in diverse sunlight regions can better harness renewable energy, enhancing its utilization rate. Using a microgrid simulator developed by LIU on Matlab/Simulink, an algorithm was created to redistribute operational loads based on SoC. Simulations between Aomori and Tokyo showed a modest 2.7% improvement in renewable energy utilization due to a moderate sunlight

correlation coefficient of 0.69. However, when simulating between Aomori and a location with a 12-hour difference, like New York, the improvement surged to 13.6%. This indicates that lower sunlight correlation coefficients can significantly boost the benefits of job scheduling in optimizing solar energy use.



(a) With a solar radiation correlation coefficient of 0.7



(b) With a solar radiation correlation coefficient of -0.41

Fig. 1 the cumulative power consumption of the data center in one year

3. job scheduling based on time

In an effort to optimize energy utilization in data centers, a unique approach was undertaken by installing micro servers outdoors, powered by solar energy, even under the scorching summer sun. This was further enhanced by the development of a container cluster, which dynamically shifted information processing loads based on power availability. The current study expanded on this by establishing a distributed micro datacenter network composed of three micro datacenters (shown in Fig.2). Within this network, the individual servers from each micro data center were integrated to form a container cluster. This cluster utilized container technology and was orchestrated by Kubernetes. Through scheduling information processing tasks based on the time of day, it was demonstrated that the servers could operate solely on the limited solar power available during winter.

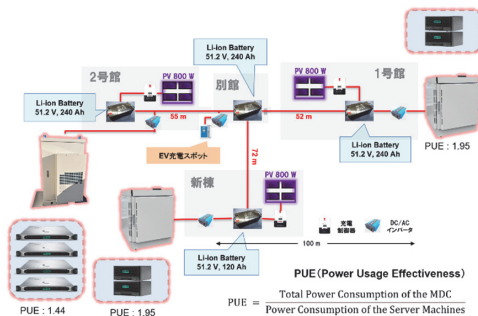


Fig. 2 Distributed MDC network and renewable energy driven DC microgrid testbed

The micro data centers was connected to the 'Testbed DC Microgrid Network' located on the rooftop of the Engineering Department at Tohoku University's Aobayama Campus [1]. The power generation potential of an 800W solar panel during winter was found to be limited, even on clear days. However, by effectively scheduling server operations—running all nodes during the day when battery charge was high and conserving energy at night by running only essential nodes—the system could maximize solar energy utilization and preserve battery power.

As is shown in the fig.3, the experimental results examined the effects of job scheduling on battery voltage in renewable energy-driven MDCs. Without JS, batteries frequently reached a full charge during the day, halting power generation and indicating wasted potential. With JS, batteries maintained a charge below full capacity, optimizing power generation. Solar radiation data from the Sendai Meteorological Agency showed higher solar power generation on days with JS, despite less solar

radiation. This suggests that JS effectively utilizes solar power, conserves battery life, and reduces nighttime power consumption.

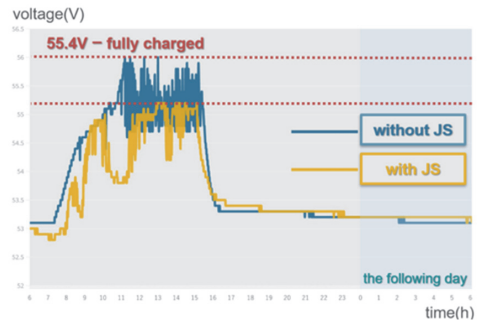


Fig. 3 time-varying terminal voltage of the battery

The time waveform of the light pulse is shown in Figure 3.

4. Conclusion

This research delved into job scheduling methods for distributed data center networks powered by renewable energy, examining their efficacy and challenges both theoretically and empirically. Spatially, the study verified the potential and impact of job scheduling across geographically dispersed data centers, aiming to optimize the utilization of renewable energy. Specifically, it was demonstrated that in regions with low solar radiation correlation, job scheduling can significantly enhance the effective use of photovoltaic power generation. Temporally, the research proposed a job scheduling method at a single location, distributing information processing loads based on daily solar power variations, maximizing renewable energy use efficiency. The results highlighted the trade-offs between improved renewable energy utilization rates through job scheduling and challenges like reduced device operation rates and potential server shortages. These findings underscore the importance of green initiatives for data centers and contribute valuable theoretical and practical solutions towards sustainable development goals. Future work should further optimize energy management solutions and expand research conditions to understand the broader implications of job scheduling.

References

[1] Liu Ke, Yamada, Hirohito, Katsumi Iwatsuki, and Taichi Otsuji, "A Study for Stable Operation of Battery Loaded DC Bus Based on Autonomous Cooperative Control," in 2021 6th International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE), 2021, pp. 1165-1168. 2021/09/25 (Chapter 3, Chapter 4)

THE RECORD OF ELECTRICAL AND
COMMUNICATION ENGINEERING CONVERSAZIONE
TÔHOKU UNIVERSITY

Vol. 92 2024

東北大学電通談話会記録

第 92 卷

令和 6 年

東 北 大 学

電 氣 通 信 研 究 所
工 学 研 究 科

電気エネルギーシステム専攻
通信工学専攻
電子工学専攻
技術社会システム専攻

情 報 科 学 研 究 科

情 報 ・ 生 命 系

医 工 学 研 究 科

医 工 学 専 攻

東北大学電通談話会記録総目次第92巻

第 1 号

論文内容	題	目	著	者	名	頁 (通巻頁)
令和 4 (2022) 年度学位論文関連短編						2

第 2 号

論文内容	題	目	著	者	名	頁 (通巻頁)
令和 5 (2023) 年度学位論文関連短編						2 (222)

東北大学電通談話会記録について

東北大学において八木秀次教授の下に電気通信法の研究が開始されたのは大正8年に遡る。

大正12年から斎藤報恩会の支援をうけ大きく飛躍し、今日よく知られている数々の成果があがりはじめた。電気通信法の研究が進展していくにしたがい、大正末期頃から研究発表会が毎週火曜日に開かれ、熱心な討論が行われてきた。この発表に際しては謄写版のプリント配布を行っていた。これがいろいろなルートを通して外部の関係研究者に時々配布されたので、公刊物の論文に東北大学電気火曜談話会記録という名称で引用されることが次第に多くなった。そのような経緯を経ていつのまにか、この謄写版のプリントは公式出版物として扱われるようになった。

しかし戦争のため研究発表は自然に立ち消えという形になってしまった。戦後、昭和23年頃から復活し、再び活発な討論を繰返すようになった。発表された論文のプリントを綴って東北大学電気通信研究所、工学部電気工学科、工学部通信工学科、連合談話会記録と銘を打って昭和23年に第17巻（火曜談話会記録の通算推定）として関係各方面に配布することになった。この報告はその後順調に発刊され、昭和27年度から現在の誌名となって現在に及んでいる。その間火曜談話会は工学研究会となり、現在、伝送工学研究会、音響工学研究会、仙台プラズマフォーラム、EMC仙台ゼミナール、コンピュータサイエンス研究会、システム制御研究会、情報バイオエレクトロニクス研究会、スピニクス研究会、ニューパラダイムコンピューティング研究会、超音波エレクトロニクス研究会、ブレイン機能集積工学研究会、情報・数物研究会、生体・生命工学研究会、ナノ・スピン工学研究会、先進的情報通信工学研究会の15分科会をもっている。

本誌の目的は、主に電気通信研究所の専任、兼任の教官の研究室における研究成果の発表の場の一つたることにある。その中には工学研究会で発表され討論をうけたものがすくなくない。また機関の研究活動を広く知っていただくことも主な目的の一つであり、この趣旨から最終講義、通研シンポジウムの分野展望、招待論文などを随時掲載している。

本誌は昭和27年度に現在の誌名となって以来年4回の刊行であったが、第60巻より年3回の刊行と改められ、第75巻より年2回の刊行になり現在に至っている。現在、次の編集機構をもっている。

編 集 委 員		編 集 幹 事
斎藤 浩海	西山 大樹	佐藤 茂雄
金井 浩	田中 和之	吹留 博一
堀尾 喜彦		

令和6年3月19日 作成 令和6年3月21日 発行 東北大学電通談話会記録 第92巻第2号	発行者 東北大学電気通信研究所 所長 羽生 貴弘 仙台市青葉区片平2丁目1番1号 電話 217-5420 印刷所 北日本印刷株式会社 仙台市若林区石垣町35番6 電話(代表) 224-7781
---	--

Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University
Sendai, Japan