

佐賀大学
理工学部集報

第48巻 第1号

目次

有限化学ポテンシャルにおける Z_3 対称な格子QCDシミュレーション河野宏明.....	1
量子確率論の視点から見た等質樹木の距離2グラフのスペクトル分布日比野雄嗣.....	5
博士論文要旨及び審査要旨公表	9

令和元年6月

佐賀大学理工学部

Z₃-symmetric lattice QCD simulations at finite chemical potential

By
Hiroaki Kouno*

Abstract: The results of the Z₃-symmetric lattice QCD simulations at real finite chemical potential under phase quenched approximation are shown. As temperature increases, the expectation value of the absolute value of Polyakov-loop, which is the order parameter of confinement-deconfinement transition, abruptly increases. The transition becomes sharper when the chemical potential becomes larger.

Key word: the lattice QCD, sign problem, chemical potential, Z₃ symmetry

1. Introduction

The effects of the QCD phase transition at finite temperature (T) and finite density are important for phenomena not only in nuclear and elementary particle physics but in astrophysics and cosmology. At zero temperature, quarks are confined in hadrons and have approximately a one-third mass of the baryon. However, the lattice QCD (LQCD) simulations show that the deconfinement state of quarks with lighter current mass appears at sufficiently large T . The new state is called “quark gluon plasma (QGP)”. Now it is believed that QGP existed in the early universe after the Big Bang.

Similar deconfined state of quarks is expected when the quark number chemical potential becomes large. Such a deconfined state may exist in the interior of compact stars. However, at finite quark number chemical potential, there is a well-known sign problem and the LQCD simulations are not feasible when the chemical potential large. The sign problem is caused by the imaginary part of the effective action which appears when the quark fields are integrated out.

There is another problem in deconfinement transition. In pure gauge theory, theory has a symmetry under Z₃ transformation, and the Polyakov loop is an order parameter for the symmetry. On the other hand, the Polyakov loop is related to the free energy of an isolated heavy quark and is 0 (finite) when quark is confined (deconfined). Hence, the Z₃ symmetry is the symmetry that governs the deconfinement transition. However, the full QCD with dynamical quarks does not have the Z₃ symmetry, since the boundary condition of quark fields breaks the symmetry.

In the full QCD, there is no symmetry which distinguishes the confined phase with the deconfined one. Another important symmetry is a chiral symmetry but it is only approximate, since the current quark mass is small but finite. In fact, the LQCD results at finite temperature and zero chemical potential indicates that the transition from hadron to QGP is not a discontinuous phase transition but a continuous crossover transition [1].

However, we can modify three flavor full QCD to have the Z₃ symmetry by imposing the flavor dependent boundary condition on quark fields [2-5]. The modified theory is called Z₃-QCD. Z₃-QCD approaches the original QCD in the zero temperature limit. It is expected that the sign problem is weak in the Z₃-symmetric theory [6]. In fact, the Z₃-symmetric 3-states and 3-dimensional Potts model has no sign problem [7]. The sign problem is weak in the Z₃-symmetric effective Polyakov loop (line) model [8].

The sign problem is expected to be weak in Z₃-QCD. At present, the lattice simulation of Z₃-QCD was done only at zero chemical potential [9]. In this brief report, we present the results of the lattice Z₃-QCD simulations at finite chemical potential under the phase quenched approximation. Note that the results under this approximation correspond to the results with isospin chemical potential rather than the ones with quark number chemical potential. The calculations of quark number density by using the reweighting method are the works in future.

This paper is organized as follows. In Sec. 2, we review the sign problem briefly and explain the phase quenched approximation. The formulation of Z₃-QCD is given in Sec. 3. In Sec. 4, numerical results are shown. Section 5 is devoted to summary and discussions.

Received May 7, 2019

*Department of Physics

@Faculty of Science and Engineering, Saga University

2. Sign problem and phase quenched approximation

The grand canonical partition function in QCD at finite temperature and quark number chemical potential in path-integral form is given by

$$Z = \int DUDqD\bar{q} \exp(-S_{QG} - S_G)$$

$$S_{QG} = \int_0^\beta d\tau \int d^3x \bar{q} M q$$

where q and U are quark and gauge (gluon) field variables, respectively, and $\beta=1/T$. The matrix M has the imaginary time τ , the spatial coordinate x , the color, the flavor and the spinor indices, and depends on temperature T and the quark chemical potential μ . In this paper, we only show the μ -dependence of M , explicitly. S_G is the pure gauge action the explicit form of which is not important in our discussions.

After integrating quark fields, we obtain

$$Z = \int DU \det[M(\mu)] \exp(-S_G)$$

The determinant satisfies the relation.

$$\det[M(\mu)]^* = \det[M(-\mu^*)]$$

This means that the determinant is not real when μ is real and finite, and we cannot regard the integrand as a probability function. Hence, the Monte Carlo simulations with the importance sampling are not feasible.

To circumvent this problem, we use

$$|\det[M(\mu)]| \exp(-S_G)$$

as an approximate probability function. This approximation is called the phase quenched approximation. In two flavor case, this is equivalent to consider isospin chemical potential instead of quark number chemical potential itself. With isospin chemical potential μ_I , the determinant part is given by

$$\det[M(\mu_I)] \det[M(-\mu_I)]$$

The first and the second determinants represent the u quark and the d quark contributions, respectively. We obtain

$$\det[M(\mu_I)] \det[M(-\mu_I)]$$

$$= \det[M(\mu_I)] \det[M(\mu_I)]^*$$

$$= |\det[M(\mu_I)]|^2$$

This is equivalent to the phase quenched approximation for the case with μ_I quark number chemical potential. Using the reweighting method, in principle, the quark number density can be calculated exactly.

3. Z₃-QCD

In pure gauge theory, there is a symmetry under the gauge transformation given by the gauge group element g with boundary condition

$$g(\tau=0, \mathbf{x}) = z g(\tau=1/T, \mathbf{x}).$$

Here, z is an element of the center group of SU(3), namely, Z₃ group. However, in full QCD with dynamical quarks, this symmetry is broken, since the gauge transformation above changes the quark field boundary condition. The change of the quark field boundary condition can be transformed into the following change of chemical potential.

$$\mu \rightarrow \mu + i\varphi \quad (\varphi=0, 2\pi/3, -2\pi/3).$$

Consider the QCD with exact three flavor symmetry. Suppose that the chemical potentials for each flavor (u,d,s) are given by

$$\mu_u = \mu + i2\pi/3,$$

$$\mu_d = \mu - i2\pi/3,$$

$$\mu_s = \mu.$$

It is clear that this system is invariant under the gauge transformation above. This is a Z₃-symmetric QCD, namely, Z₃-QCD [2-9]. For technical reasons, in actual calculations, we consider six flavor case and consider the phase quenched approximation. Furthermore, we multiply the quark action by the factor 1/3. Obtained theory approaches to the original two-flavor QCD in zero temperature limit, since boundary conditions are not relevant in the limit.

4. Numerical results

In this study, we used the same lattice action and the same parameter settings as the ones used in Ref. [10]. We used a lattice with the spatial size 8³ and the temporal size 4.

We used the renormalization-group-improved Iwasaki gauge action [11] and the two flavor Wilson fermion action. We done the simulations by using the Hybrid Monte Carlo program based on the Lattice QCD Tool Kit [12]. (For the detail information, See Ref. [10].) For comparison, we also done the simulations in the case of ordinary two flavor QCD.

Figure 1 shows the β -dependence of the absolute value of the Polyakov-loop P in the case of ordinary two flavor QCD at $\mu=0$, where $\beta=6/g^2$ with the coupling

constant g . The absolute value of the Polyakov-loop increases smoothly as β increases. This behavior indicates that the deconfinement transition is crossover as already known [1].

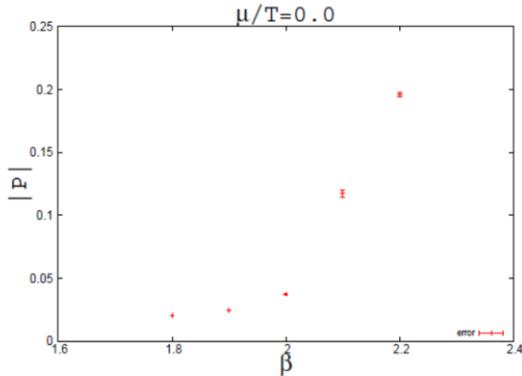


Fig. 1 The β -dependence of the absolute value of the Polyakov-loop in the case of the ordinary two flavor QCD at $\mu=0$.

Figure 2 shows the same as Fig. 1 but for Z₃-QCD. The absolute value of the Polyakov-loop increases rapidly above $\beta=2.1$. This behavior indicates that there is a first order phase transition as was already seen in Ref. [9].

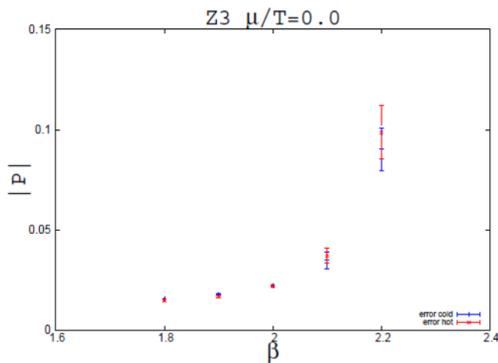


Fig. 2 β -dependence of the absolute value of the Polyakov-loop in the case of Z₃-QCD at $\mu=0$.

Figure 3 shows the same as Fig. 1 but the one at $\mu/T=1.0$. Note that this situation corresponds to the case with finite isospin chemical potential rather than the one with quark chemical potential, since the phase quenched approximation was used. As in the case with zero chemical potential, the absolute value of the Polyakov-loop increases smoothly.

Figure 4 shows the same as Fig. 2 but the one at $\mu/T=1.0$. As is in the case with zero chemical potential, the absolute value of the Polyakov-loop increases rapidly

above $\beta=2.1$. It seems that the transition becomes sharper than the one at zero chemical potential.

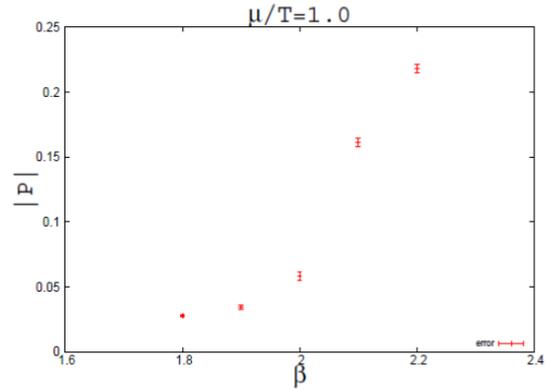


Fig. 3 β -dependence of the absolute value of the Polyakov-loop in the case of the ordinary two flavor QCD at $\mu/T=1.0$.

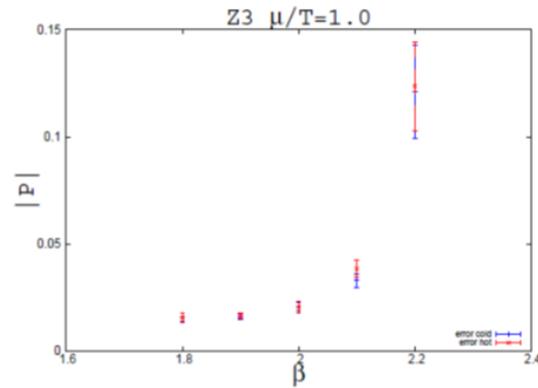


Fig. 4 β -dependence of the absolute value of the Polyakov-loop in the case of Z₃-QCD at $\mu/T=1.0$.

Figure 5 shows the same as Fig. 4 but for number density. Note that this number density corresponds to the isospin number density rather than quark number density, since we used the phase quenched approximation. As in the case of the Polyakov-loop, the number density increases rapidly above $\beta=2.1$.

5. Summary and discussions

In this brief report, we present the results of the lattice Z₃-QCD simulation at finite chemical potential, using the phase quenched approximation.

In Z₃-QCD, the absolute value the Polyakov-loop has a rapid jump as β increases, while the quantity increases smoothly in the ordinary LQCD. In Z₃-QCD, the transition becomes sharper when the chemical potential becomes large.

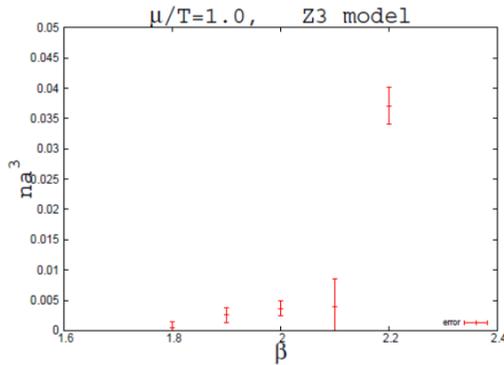


Fig. 5 β -dependence of the absolute value of the number density in the case of Z_3 -QCD at $\mu/T=1.0$. a is a size of lattice spacing.

The results in this report correspond to the ones at finite isospin chemical potential rather than finite quark number density, since the phase quenched approximation was used. However, we can obtain the results at finite quark number density by using the reweighting method. It is a future work.

Acknowledgements

The author deeply thanks to Atsushi Nakamura, Etsuko Itou, Masanobu Yahiro, Junichi Takahashi, Kouji Kashiwa, Masahiro Ishii, Junpei Sugano, Akihisa Miyahara and Takehiro Hirakida for useful discussions and their supports. The calculations were done using the SX-ACE at CMC with supports of CMC and RCNP of Osaka University. This work was supported by Grant-in-Aid for Scientific Research (No. 17K05446.) from the Japan Society for the Promotion of Science (JSPS).

References

- (1) Y. Aoki, G. Endrödi, Z. Fodor, S. D. Katz, and K. K. Szabó, *Nature (London)* 443, 675 (2006).
- (2) H. Kouno, Y. Sakai, T. Makiyama, K. Tokunaga, T. Sasaki and M. Yahiro, *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* 39, 085010 (2012).
- (3) Y. Sakai, H. Kouno, T. Sasaki, and M. Yahiro, *Phys. Lett. B* 718, 130 (2012).
- (4) H. Kouno, T. Misumi, K. Kashiwa, T. Makiyama, T. Sasaki and M. Yahiro, *Phys. Rev. D* 88, 016002 (2013).
- (5) H. Kouno, T. Makiyama, T. Sasaki, Y. Sakai, and M. Yahiro, *J. Phys.G: Nucl. Part. Phys.* 40, 095003 (2013).
- (6) H. Kouno, K. Kashiwa, J. Takahashi, T. Misumi, and M. Yahiro, *Phys. Rev. D* 93, 056009 (2016).
- (7) T. Hirakida, H. Kouno, J. Takahashi and M. Yahiro, *Phys. Rev. D* 94, 014011 (2016).
- (8) T. Hirakida, J. Sugano, H. Kouno, J. Takahasi, and M. Yahiro, *Phys. Rev. D* 96, 074031 (2017).
- (9) T. Iritani, E. Itou, T. Misumi, *JHEP* 11, 159 (2015).
- (10) J. Takahashi, H. Kouno and M. Yahiro, *Phys. Rev. D* 91, 014501 (2015).

(11) Y. Iwasaki, *Nucl. Phys. B* 258, 141 (1985).

(12) S. Choe, A. Nakamura, C. Nonaka and S. Muroya, *Soryushiron Kenkyu (in Japanese)*, vol. 108 no.1, 1 (2003).

Spectral distributions of distance-two graphs of homogeneous trees from a viewpoint of quantum probability

By
Yuji HIBINO*

Abstract: We obtain the concrete form of the spectral distribution of the distance-two graph of a homogeneous tree by using the method of quantum decomposition. And we also obtain the asymptotic spectral distribution of the distance-two graph of a d -homogeneous tree as d tends to infinity.

Key words: quantum decomposition, spectral distribution, homogeneous tree, distance- k graph, free Meixner law, free product.

1 Introduction

For the asymptotic problems in combinatorics, various approaches have been developed from different branches of mathematics. According to Hora and Obata [5] and Obata [9], the asymptotic spectral distribution of growing graphs has been studied from the quantum probabilistic point of view. Recently, the spectrum of the distance- k graph of N -fold power of the Cartesian product of a graph was studied in [6, 7, 8, 3], and [4]. Thereafter, Arizmendi and Gaxiola [1, 2] have studied the asymptotic spectral distributions of distance- k graph of the star product graphs and of the free product graphs, respectively. However, their argument was not the quantum probabilistic approach. In the present paper, we study the spectrum of the distance-two graphs of a homogeneous tree by using the method of quantum decomposition.

This paper is organized as follows: In Section 2, we give basic preliminaries of quantum probability theory for graphs. Especially, the method of quantum decomposition is mainly treated in the present paper. Though a spectral distribution of d -homogeneous tree is well-known, in Section 3.1 we derive it from the viewpoint of the quantum probability. The readers may find in [5] the proofs of all the statements in Section 2 and 3.1. Section 3.2 is devoted to obtaining the spectral distribution of the distance-two graph of a homogeneous tree by using the method of quantum decomposition. In Section 4, we consider the asymptotic spectral distribution of the distance-two graph of a d -homogeneous tree as d tends to infinity.

otic spectral distribution of the distance-two graph of a d -homogeneous tree as d tends to infinity.

2 Quantum decomposition

We give a short review of quantum probability. An *algebraic probability space* is a pair (\mathcal{A}, φ) , where \mathcal{A} is a $*$ -algebra and $\varphi : \mathcal{A} \rightarrow \mathbb{C}$ is a positive and normalized linear functional (called a *state*). The state corresponds to the expectation. We call $a \in \mathcal{A}$ an algebraic random variable. Especially, we call $a \in \mathcal{A}$ a real random variable if $a = a^*$. For a real random variable a , a distribution μ is called the *spectral distribution* of a with respect to the state φ if it satisfies

$$\varphi(a^m) = \int_{-\infty}^{\infty} x^m \mu(dx), \text{ for } m = 0, 1, 2, \dots$$

A *graph* is a pair $\mathcal{G} = (V, E)$, where V is a non-empty set and E is a subset of the set of unordered pairs of V , i.e. $E \subset \{\{u, v\}; u, v \in V, u \neq v\}$. An element of V (resp. E) is called a *vertex* (resp. an *edge*). We say that two vertices u and v are *adjacent* and write $u \sim v$, if $\{u, v\} \in E$. The number of edges incident at $v \in V$ is called the *degree* of the vertex v and is denoted by $\kappa(v)$. If every vertex of a graph has degree k , the graph is said to be *k -regular*. For a graph, the *adjacency matrix* $A = (A_{uv})$ is defined as

$$A_{uv} = \begin{cases} 1, & u \sim v, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

The adjacency matrix contains full information of the given graph.

An *adjacency algebra* of \mathcal{G} is defined to be the $*$ -algebra generated by A and denoted by $\mathcal{A}(\mathcal{G})$. In order to apply the quantum probability theory to the

Received May 7, 2019

*Department of Mathematical Sciences

©Faculty of Science and Engineering, Saga University

2010 Mathematics Subject Classification: 05C05, 05C12, 46L53

graph \mathcal{G} , we consider the algebraic probability space $(\mathcal{A}(\mathcal{G}), \varphi_o)$, where φ_o is a *vacuum state* defined as

$$\varphi_o(a) = \langle \delta_o, a\delta_o \rangle, \quad a \in \mathcal{A}(\mathcal{G}),$$

where o is a fixed origin in V . A main theme of an application of quantum probability theory for a graph is to find a spectral distribution μ of A , namely, to find a probability distribution μ satisfying

$$\varphi_o(A^m) = \int_{-\infty}^{+\infty} x^m \mu(dx), \quad \text{for } m = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

In order to obtain the distribution μ , there is a strong method called a *quantum decomposition*. For a graph \mathcal{G} , we define a graph distance $\partial_{\mathcal{G}}(u, v)$ as the length of the shortest walk from u to v . Using the graph distance from the origin, we stratify the graph $\mathcal{G} = (V, E)$ into a disjoint union of strata:

$$V = \bigsqcup_{n=0}^{\infty} V_n, \quad \text{where } V_n = \{v \in V; \partial_{\mathcal{G}}(o, v) = n\}. \quad (2)$$

Associated with the stratification (2), we construct an orthonormal system

$$\left\{ \Phi_n = |V_n|^{-1/2} \sum_{v \in V_n} \delta_v; n = 0, 1, 2, \dots \right\}.$$

Here we note that $\{\delta_v; v \in V\}$ is a base of $l^2(V)$. As a subspace of $l^2(V)$ we define $\Gamma(\mathcal{G}) = \text{span}\{\Phi_n\}$.

The adjacency matrix A is regarded as an operator acting in $l^2(V)$ by

$$A\delta_v = \sum_{u \sim v} \delta_u.$$

According to the stratification (2), the adjacency matrix A has the *quantum decomposition*

$$A = A^+ + A^- + A^\circ.$$

The *quantum components* are defined as

$$\begin{aligned} A^+ \sum_{v \in V_n} \delta_v &= \sum_{v \in V_n} \sum_{\substack{u \sim v \\ u \in V_{n+1}}} \delta_u = \sum_{u \in V_{n+1}} \omega_-(u) \delta_u, \\ A^- \sum_{v \in V_n} \delta_v &= \sum_{v \in V_n} \sum_{\substack{u \sim v \\ u \in V_{n-1}}} \delta_u = \sum_{u \in V_{n-1}} \omega_+(u) \delta_u, \\ A^\circ \sum_{v \in V_n} \delta_v &= \sum_{v \in V_n} \sum_{\substack{u \sim v \\ u \in V_n}} \delta_u = \sum_{u \in V_n} \omega_o(u) \delta_u, \end{aligned}$$

where

$$\begin{aligned} \omega_+(v) &= |\{u \in V_{n+1}; u \sim v\}|, \\ \omega_-(v) &= |\{u \in V_{n-1}; u \sim v\}|, \\ \omega_o(v) &= |\{u \in V_n; u \sim v\}|, \quad v \in V_n. \end{aligned}$$

If $\Gamma(\mathcal{G})$ is invariant under A^+ , A^- and A° , namely $A^+\Gamma(\mathcal{G}) \subset \Gamma(\mathcal{G})$, $A^-\Gamma(\mathcal{G}) \subset \Gamma(\mathcal{G})$ and $A^\circ\Gamma(\mathcal{G}) \subset \Gamma(\mathcal{G})$ (these conditions are equivalent that $\omega_+(v)$, $\omega_-(v)$ and $\omega_o(v)$ are constants on each stratum), then we have

$$A^+ \Phi_n = \sqrt{\omega_{n+1}} \Phi_{n+1}, \quad n \geq 0,$$

$$A^- \Phi_n = \sqrt{\omega_n} \Phi_{n-1}, \quad n \geq 1,$$

$$A^\circ \Phi_n = \alpha_{n+1} \Phi_n, \quad n \geq 1,$$

where

$$\omega_n = \frac{|V_n|}{|V_{n-1}|} \omega_-(v)^2, \quad v \in V_n, \quad (3)$$

$$\alpha_n = \omega_o(v), \quad v \in V_{n-1}, \quad n \geq 1. \quad (4)$$

Note that $\omega_1 = \kappa(o)$ and $\alpha_1 = 0$. This pair of two sequences $(\{\omega_n\}, \{\alpha_n\})$ is called the *Jacobi coefficient*.

The Stieltjes transform $G_\mu(z)$ of the spectral distribution μ of A is expanded into the continued fraction by using the Jacobi coefficient:

$$\begin{aligned} G_\mu(z) &= \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\mu(dx)}{z-x} \\ &= \frac{1}{z-\alpha_1} - \frac{\omega_1}{z-\alpha_2} - \frac{\omega_2}{z-\alpha_3} - \frac{\omega_3}{z-\alpha_4} - \dots \end{aligned}$$

Conversely, if $G_\mu(z)$ is given, we can recover the spectral distribution μ by means of the Stieltjes inversion formula:

$$\mu(t) - \mu(s) = -\frac{1}{\pi} \lim_{y \downarrow 0} \int_s^t \Im G_\mu(x+iy) dx.$$

Thus we are able to obtain the spectral distribution of the given graph \mathcal{G} by counting the number of edges between strata provided that $\Gamma(\mathcal{G})$ is invariant under the quantum components.

3 Distance-two graphs of homogeneous trees

3.1 homogeneous trees

A graph is called a *tree* if it has no cycle. The tree is called *d-homogeneous* and denoted by T_d , if it is *d-regular* ($d \geq 2$). A homogeneous tree has infinite vertices, and the stratification (2) has infinite strata. It is noteworthy that the stratification does not depend on the choice of the origin o .

Considering the quantum decomposition of the adjacency matrix of T_d as in the previous section, we can easily verify that

$$\begin{aligned} |V_n| &= \begin{cases} d(d-1)^{n-1}, & n \geq 1, \\ 1, & n = 0, \end{cases} \\ \omega_-(v) &\equiv 1, \quad v \in V_n, n \geq 1, \\ \omega_o(v) &\equiv 0, \quad v \in V_n, n \geq 1. \end{aligned}$$

Therefore, using (3) and (4), we obtain the Jacobi coefficient:

$$\omega_n = \begin{cases} d-1, & n \geq 2, \\ d, & n = 1, \\ \alpha_n = 0, & n \geq 1. \end{cases}$$

The spectral distribution having the Jacobi coefficient above is known as the Kesten distribution with parameter $d, d-1$. Namely, for the adjacency matrix A_d of T_d ,

$$\varphi_o((A_d)^m) = \frac{d}{2\pi} \int_{-2\sqrt{d-1}}^{2\sqrt{d-1}} x^m \frac{\sqrt{4(d-1) - x^2}}{d^2 - x^2} dx$$

holds for $m = 0, 1, 2, \dots$

3.2 Distance-two graphs

Let $\mathcal{G} = (V, E)$ be a graph. For an integer $k \geq 1$ the *distance- k graph* of \mathcal{G} is a graph $\mathcal{G}^{[k]} = (V, E^{[k]})$ with

$$E^{[k]} = \{\{u, v\}; u, v \in V, \partial_{\mathcal{G}}(u, v) = k\}.$$

The distance-one graph of \mathcal{G} coincides with \mathcal{G} itself.

The main aim of the present paper is the following theorem.

Theorem 1. *The spectral distribution of the distance-two graph of a d -homogeneous tree is the free Meixner law with parameter $(d(d-1), (d-1)^2, d-2)$. Namely, for the adjacency matrix $A_d^{[2]}$ of $T_d^{[2]}$,*

$$\begin{aligned} \varphi_o((A_d^{[2]})^m) &= \frac{d}{2\pi} \int_{-d}^{3d-4} x^m \frac{\sqrt{4(d-1)^2 - (x-d+2)^2}}{-x^2 + d(d-2)x + d^2(d-1)} dx \end{aligned}$$

holds for $m = 0, 1, 2, \dots$

Proof: Note that in the stratification (2) for $T_d = (V, E)$ there are no edges of which both of end vertices belong to the same stratum. Let the stratification of $T_d^{[2]} = (V^{[2]}, E^{[2]})$ be

$$V^{[2]} = \bigsqcup_{n=0}^{\infty} V_n^{[2]}$$

where $V_n^{[2]} = \{v \in V; \partial_{T_d^{[2]}}(o, v) = n\}$. Then we have $V_n^{[2]} = V_{2n}$. Since the vertices of the odd-numbered strata V_{2n+1} can never reach from the origin by the even steps, $T_d^{[2]}$ consists of two connected components. However, for convenience' sake, here we consider that $V^{[2]}$ means the connected component including the origin. Up to here, we have verified

$$|V_n^{[2]}| = \begin{cases} d(d-1)^{2n-1}, & n \geq 1, \\ 1, & n = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Now let us consider the number of edges (in $E^{[2]}$) being incident with a vertex $v \in V_n^{[2]}$. First, a vertex connected with $v \in V_{2n}$ ($n \geq 1$) by two steps in T_d lives in V_{2n-2} , V_{2n} or V_{2n+2} . In the above, V_{2n-2} equals $V_{n-1}^{[2]}$ and V_{2n+2} equals $V_{n+1}^{[2]}$. Therefore we have $\omega_n^{[2]}(v) = 1$ ($n \geq 1$). Second, the case that the vertex $v \in V_{2n}$ is connected with $u \in V_{2n}$ by two steps in T_d is just a case where $v \sim w \sim u$ ($w \in V_{2n-1}$). In fact, if $v \sim w$ ($w \in V_{2n+1}$), then w cannot be adjacent to $u \in V_{2n}$ ($u \neq v$). Therefore, we have $\omega_o^{[2]}(v) = d-2$.

Using (3) and (4), we obtain the Jacobi coefficient:

$$\omega_n^{[2]} = \begin{cases} (d-1)^2, & n \geq 2, \\ d(d-1), & n = 1, \end{cases} \quad (6)$$

$$\alpha_n^{[2]} = \begin{cases} d-2, & n \geq 2, \\ 0, & n = 1, \end{cases} \quad (7)$$

According to [5, Definition 4.28], the free Meixner law with parameter (p, q, a) ($p > 0$, $q \geq 0$, $a \in \mathbb{R}$) is characterized by a Jacobi coefficient $(\{p, q, q, \dots\}, \{0, a, a, \dots\})$. The desired result follows since the spectral distribution associated with the Jacobi coefficient (6), (7) is the free Meixner law with parameter $(d(d-1), (d-1)^2, d-2)$. \square

Remark 1. In the case of $k \geq 3$, we cannot apply the method of the quantum decomposition since $\Gamma(T_d^{[k]})$ is not invariant. For example, $V_1^{[3]} = V_3$ but $V_2^{[3]} = V_2 \sqcup V_4 \sqcup V_6$. For $v \in V_6 \subset V_2^{[3]}$ we have $\omega_-^{[3]}(v) = 1$. On the other hand, for $v \in V_4 \subset V_2^{[3]}$ we have $\omega_-^{[3]}(v) = d-2$, and, for $v \in V_2 \subset V_2^{[3]}$ we have $\omega_-^{[3]}(v) = (d-2)(d-1)$. Thus $\omega_-^{[3]}(v)$ is not constant on the stratum.

4 Asymptotic spectral distributions

In this section we consider the asymptotic spectral distribution of distance-two graphs of T_d as d tends to infinity.

In general, let \mathcal{G}_N be a growing graph with parameter N . Let A_N denote the adjacency matrix of \mathcal{G}_N . Suppose $(\mathcal{A}(\mathcal{G}_N), \varphi_N)$ is properly defined. We normalize the adjacency matrix A_N by

$$\bar{A}_N = \frac{A_N - \langle A_N \rangle}{\Sigma_N}, \quad (8)$$

where $\langle A_N \rangle = \varphi_N(A_N)$, $\Sigma_N^2 = \langle (A_N - \langle A_N \rangle)^2 \rangle$. Due to the affine transformation (8), the Jacobi coefficient $(\bar{\omega}_n(N), \bar{\alpha}_n(N))$ associated with \bar{A}_N is given by

$$\begin{aligned} \bar{\omega}_n(N) &= \omega_n(N) / \Sigma_N^2, \\ \bar{\alpha}_n(N) &= (\alpha_n(N) - \langle A_N \rangle) / \Sigma_N \end{aligned}$$

where $(\omega_n(N), \alpha_n(N))$ is the Jacobi coefficient associated with A_N . Therefore, as N tends to infinity, we seek the asymptotic spectral distribution μ associated with the Jacobi coefficient

$$\begin{aligned}\bar{\omega}_n &= \lim_{N \rightarrow \infty} \bar{\omega}_n(N), \\ \bar{\alpha}_n &= \lim_{N \rightarrow \infty} \bar{\alpha}_n(N).\end{aligned}$$

Analogously to (1), we express the result by

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \varphi_N((\bar{A}_N)^m) = \int_{-\infty}^{\infty} x^m \mu(dx), \quad m = 0, 1, 2, \dots$$

Theorem 2. *The asymptotic spectral distribution of the distance-two graph of a d -homogeneous tree is the free Meixner law with parameter $(1, 1, 1)$. Namely, for the adjacency matrix $A_d^{[2]}$ of $T_d^{[2]}$,*

$$\begin{aligned}\lim_{d \rightarrow \infty} \varphi_o \left(\left(\frac{A_d^{[2]}}{\sqrt{d(d-1)}} \right)^m \right) \\ = \frac{1}{2\pi} \int_{-1}^3 x^m \frac{\sqrt{4-(x-1)^2}}{x+1} dx\end{aligned}$$

holds for $m = 0, 1, 2, \dots$

Proof: In the case for $T_d^{[2]}$, we have $\varphi_o(A_d^{[2]}) = 0$ and $\varphi_o((A_d^{[2]})^2) = \kappa(o) = d(d-1)$. Thus $\bar{A}_d^{[2]} = A_d^{[2]}/\sqrt{d(d-1)}$. By the use of (6) and (7), we have

$$\begin{aligned}\bar{\omega}_n &= \begin{cases} \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{(d-1)^2}{d(d-1)} = 1, & n \geq 2, \\ \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{d(d-1)}{d(d-1)} = 1, & n = 1, \end{cases} \\ \bar{\alpha}_n &= \begin{cases} \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{d-2}{\sqrt{d(d-1)}} = 1, & n \geq 2, \\ 0, & n = 1. \end{cases}\end{aligned}$$

The result follows since the spectral distribution associated with the Jacobi coefficient above is the free Meixner law with parameter $(1, 1, 1)$. \square

Remark 2. The asymptotic spectral distribution of the distance- k graph of the d -fold free product graph has been studied in [2], in which the result is $P_k(s)$ where P_k is the Chebychev polynomial of degree k and s is a random variable obeying the semicircle law. Namely, for the normalized adjacency matrix $\bar{A}_d^{[k]}$ of the distance- k graph of the d -fold free product of a graph,

$$\lim_{d \rightarrow \infty} \varphi_o \left((\bar{A}_d^{[k]})^m \right) = \frac{1}{2\pi} \int_{-2}^2 (P_k(x))^m \sqrt{4-x^2} dx \quad (9)$$

holds for $m = 0, 1, 2, \dots$

Note that T_d can be regarded as the d -fold free product of the complete graph with two vertices. Theorem 2 is regarded as the special case of the result (9). In fact, we can verify that because of $P_2(x) = x^2 - 1$,

$$\int_{-1}^3 x^m \frac{\sqrt{4-(x-1)^2}}{x+1} dx = \int_{-2}^2 (x^2-1)^m \sqrt{4-x^2} dx$$

by the use of the integration by substitution.

Acknowledgements. This work is inspired by Mr. Noa Bannai's master thesis.

References

- [1] O. Arizmendi, T. Gaxiola; *Asymptotic spectral distributions of distance- k graphs of star product graphs*, Progress in Probability, XI Symposium of Probability and Stochastic Processes, Springer 69 (2015).
- [2] O. Arizmendi, T. Gaxiola; *On the spectral distributions of distance- k graph of free product graphs*, Infin. Dimens. Anal. Quantum Probab. Relat. Top. vol.19, No.3 (2016) 1650017.
- [3] Y. Hibino; *Asymptotic spectral distributions of distance- k graphs of Hamming graphs*, Commun. Stoch. Anal. Vol. 7, No. 2 (2013) 275–282.
- [4] Y. Hibino, H. H. Lee, N. Obata; *Asymptotic spectral distributions of distance- k graphs of Cartesian product graphs*, Colloq. Math. Vol. 132, No. 1 (2013) 35–52.
- [5] A. Hora, N. Obata; *Quantum Probability and Spectral Analysis of Graphs*, Springer, (2007).
- [6] J. Kurihara, Y. Hibino; *Asymptotic spectral analysis of a generalized N -cube by a Quantum Probabilistic method*, Infin. Dimens. Anal. Quantum Probab. Relat. Top. vol.14, No.3 (2011) 409–417.
- [7] J. Kurihara; *Asymptotic spectral analysis of a distance- k graph of N -fold direct product of a graph*, Commun. Stoch. Anal. **6** (2012), 213–221.
- [8] N. Obata; *Asymptotic spectral distributions of distance- k graphs of large-dimensional hypercubes*, Banach Center Publ. **96** (2012), 287–292.
- [9] N. Obata; *Spectral analysis of growing graphs: A quantum probability point of view*, Springer, (2017).

博士論文要旨及び審査要旨公表

佐賀大学大学院工学系研究科において、博士の学位を授与したので、学位規則（昭和28年文部省令第9号）独8条の規定に基づき、その論文の内容の要旨及び論文審査の結果の要旨をここに公表する。

氏名(本籍) 大村肇 (福岡県)
 学位の種類 博士(理学)
 学位記の番号 甲第636号
 学位授与の日附 平成31年3月26日
 学位論文題名 Wavelet変換に基づく画質劣化評価手法

論文審査委員

(主査) 佐賀大学 教授 皆本晃弥
 (副査) " " 奥村浩
 " " 准教授 廣友雅徳
 " " " 木村拓馬

論文内容の要旨

従来からデジタル画像の画質評価方法については様々な手法が開発されており、その方法は大きく主観評価法と客観評価法の2つに分けられる。主観評価法は、評価対象の画像を人間が何らかの指標に基づき評価する方法であり、人間自身の感覚に近い評価結果が得られる。しかしながら、この方法は、十分な数の評価者の確保や評価実験環境の準備等、多くの時間と労力が必要とされる。一方、客観評価法は、コンピュータで画質劣化を定量的に測定する方法である。既存の客観的画質劣化評価法のうち、PSNR (Peak signal to noise ratio) や SSIM (Structural similarity) が特に広く使われている。しかしながら、これらの客観評価は主観評価と必ずしも一致しない。なぜなら、画像処理には、空間領域や周波数変換を用いた方法があるが、既存の客観評価法は、空間領域、または、周波数領域における特徴量のみを利用しているためである。そこで、本論文では、空間領域と周波数領域の両方の領域を考慮した客観的画質劣化評価方法を提案し、その有効性を実験で示している。

本論文は、全6章で構成されており、第1章では、導入として、従来の画質劣化評価方法のサーベイを踏まえて、研究の背景、研究の目的、研究の方法について述べている。

第2章では、本研究の基礎となる連続 Wavelet 変換 (CWT)、離散 Wavelet 変換 (DWT)、Dual-Tree Complex Discrete Wavelet 変換 (DT-CDWT) の性質について説明している。

第3章では、カラー画像のための画質劣化評価指標について述べており、ここでは医用画像解析で用いられる3つの指標「コントラスト」、「鮮鋭度」、「粒状性」に加えて、「2ノルム評価」と「 ∞ ノルム評価」を画質評価指標として利用することを提案している。また、「コントラスト」を除く4つの指標については、CWTとDWTに基づいた評価式も提案している。さらに、実験により、これらの指標の特

徴およびCWTに基づく評価指標の有用性を示している。

第4章では、第3章で提案した指標に基づいた画質劣化評価法を提案している。ここでは、CWTに基づく評価指標よりも高速に演算できるように、DT-CDWTに基づく評価指標を導入し、それに基づいた画質劣化評価方法を提案している。単純に量的な計算をするだけでなく、条件判断処理も併用している点が本手法の特徴でもある。そして、実験により、本手法の有用性を示している。特に、ぼかし処理とごま塩ノイズの付加に関しては、高い精度で主観評価と合う評価が得られることを示している。

第5章では、第4章までの結果を踏まえて、電子透かし入り画像の画質劣化評価法を開発している。そこでは、DT-CDWTに基づいて Bit-plane Geometric Mean (BGM)、Frequency Geometric Mean (FGM)、Sharpness Geometric Mean (SGM) という3つの指標を開発し、第4章と同様に条件判断処理を併用して処理を行っている。実験により、電子透かし入り画像の画質を公正に評価する上で、DT-CDWTで得られた高周波成分が重要であることを明らかにした。

第6章では、本研究で得られた結果や知見を総括するとともに今後の課題について述べている。

論文審査結果の要旨

本論文の土台となっている一連の研究成果は、第1著者として、査読付き国際学術論文誌に1編、査読付き国際会議論文に2編掲載されている。これら以外にも、Wavelet変換に基づく画像処理に関して査読付き国際会議論文に5編掲載されており、特に、国際会議 ITNG2018 では、Student Best Paper Award を受賞しており、専門分野において高く評価されている。

平成31年2月7日(木)に実施された博士論文公聴会においても開発した画質評価手法のメリットやデメリット、画像圧縮へ対応など種々の説明がなされ、いずれも本人の説明により質問者の理解が得られた。この博士論文公聴会終了後に、博士論文に関連ある内容について口述による最終試験を実施した。最終試験では、開発した画質評価指標の数学的な意味、提案方法で利用しているウェーブレット変換の選定理由、提案手法の汎用性や適用限界などについて質問したところ、申請者からは、自身の研究成果を踏まえた適切な回答がなされた。その結果、画像信号処理、ウェーブレット変換を含む周波数解析、画質劣化評価方法について深い専門知識を有するだけでなく、本研究の有用性、適用限界、新しい展開について深い知見を有していると判断された。

以上のことから、博士論文に関連する専門分野の知識および研究能力を有しており、博士(理学)

の学位を授与するに値すると判断し、審査員全員一致で、合格と判定した。

氏名(本籍) 北御門 雄大 (長崎県)
学位の種類 博士(工学)
学位記の番号 甲第 637 号
学位授与の日附 平成 31 年 3 月 26 日
学位論文題名 単層および積層からなる遷移金属
窒化物薄膜の表面特性に関する研究

論文審査委員

(主査) 佐賀大学 准教授 長谷川 裕之
(副査) " 教授 張 波
" " " 萩原 世也
" " 准教授 大島 史洋

論文内容の要旨

自動車および航空機にかかわる機械部品は、アルミニウム合金やニッケル基超合金を代表とする機械材料を切削加工することにより作製される。これら材料の機械強度、融点を代表とする固有の特性が影響し、工具損傷および工具寿命の低下を導くことから、遷移金属と軽元素からなるセラミック薄膜が 1950 年代初頭より開発され、切削工具の耐摩耗膜として実用化された。近年では、加工液を用いないドライ加工、高強度材料の高速切削が製造現場で行われており、高寿命工具の実現のため、従来の薄膜に比べ、高性能かつ多機能な薄膜が求められている。

本論文では、切削加工分野の現状を踏まえ、プラズマを用いた熱力学的非平衡状態下において、相平衡状態図に出現しない、複雑組成および多様な微細構造を有する遷移金属窒化物を作製している。そして、耐摩耗膜として必要とされる表面特性を包括的に明らかにするとともに、切削試験を通じた応用面での検証を実施している。

本論文は、全 8 章で構成されている。

第 1 章では、序論として、表面処理技術および遷移金属窒化物の変遷について概説し、従来の窒化物薄膜に関する研究の問題点および本研究の目的を述べている。

第 2 章では、X 線分析、機械的試験、熱分析、切削試験の原理および方法をまとめ、本研究で用いた各種評価方法について述べている。

第 3 章では、薄膜の原料になるターゲットの作製に用いた放電プラズマ焼結法、薄膜の作製に用いた高周波マグネトロンスパッタリング法の原理について述べている。

第 4 章では、ターゲット作製の困難さが要因になり、研究事例が少ない $Ti_{1-x}W_xN$ の単層膜を作製し、タングステン(W)含有量に対する表面特性の変化について検証した。W 含有量に依存して、格子定数の変化が見られることから、 $X=0-1.0$ において W 原子

が TiN に固溶した NaCl 型構造を呈することを明らかにした。また、 $X=0.34-0.66$ で最大硬度が得られ、特に、 $X=0.34$ では、高温環境下での気孔および割れの形成が少なく、良好な耐酸化性を発現することを明らかにした。

第 5 章では、相境界の化学組成を持つ $CrAlSiN$ の単層膜を作製し、添加元素である Si が表面特性に与える効果を検証した。 $CrAlSiN$ には六方晶の析出は見られず、立方晶を形成することが確認され、Si を添加により微小硬度が上昇し、耐摩耗性の向上に寄与することを見出した。さらに、熱分析の結果では、薄膜に内在するアモルファス相が酸化の遅延効果を与え、切削試験では、切削抵抗が $CrAlSiN$ の被覆により減少し、工具の初期摩耗が低減することを明らかにした。

第 6 章では、 $CrAlSiN$ および $TiAlSiN$ からなる積層膜を作製するとともに、単層膜との比較を通じて、積層化が薄膜の表面特性に与える効果を検証した。積層構造は、塑性変形量を決定づける転位の移動を抑止し、高硬度化を導くと考えられ、実際に積層構造の形成より微小硬度は最大で 45GPa まで上昇した。上記の硬度値の変化に対応して、積層膜を被覆した工具の摩耗は最小で 77 μm を示した。

第 7 章では、新規性のある窒化物薄膜の創製を目的とし、遷移元素であるジルコニウム(Zr)と典型元素であるアルミニウム(Al)を含有する単層 $Zr_{1-x}Al_xN$ を作製し、表面特性に与える Al 添加効果を解明した。 $X=0-0.26$ では NaCl 型構造、 $X=0.43$ では NaCl 型および Wurtzite 型の混合相、 $X=0.73-1.0$ では Wurtzite 型構造を形成した。また、 $X=0.12$ において最大硬度である 37GPa を示し、摺動試験後の摩耗深さが低減され、良好な耐摩耗性が得られた。

第 8 章では、各章を要約し、本研究を総括した。

論文審査結果の要旨

本論文では、単層構造、積層構造を代表とする微細構造の制御および相境界の不安定領域の活用により遷移金属窒化物の機械特性、耐摩耗性、耐酸化性の向上が図られることを明らかにしており、応用時に求められる表面特性を発現するための有用な知見が示されている。

平成 31 年 1 月 31 日に実施した博士論文公聴会においても種々の質問がなされ、いずれも著者の説明により質問者の理解が得られた。

また、本研究は、審査付学術論文 3 編で報告されており、著者は研究者としての十分な能力を有していると言える。

以上の審査結果に基づき、本論文は博士(工学)の学位を授与するに値すると判断され、審査員全員一致で合格と判定した。

氏名(本籍) SANJEE UDARI SAMARANAYAKE
(スリランカ民主社会主義共和国)

学位の種類 博士(学術)

学位記の番号 甲第638号

学位授与の日附 平成31年3月26日

学位論文題名 A Quantitative Study on Multiple Role Balance Expectations of Emerging Adults and Social Development in Sri Lanka
(スリランカにおける若者の多様な社会的役割に対する期待と社会的発展に関する定量分析)

論文審査委員

(主査)	佐賀大学	准教授	竹村敏彦
(副査)	〃	教授	中西一
〃	〃	〃	亀山嘉大
〃	〃	〃	柴錦春

論文内容の要旨

With the increase in dual-earner couples, conflict and balance between family and work lives have become important issues for families and organizations. Many researchers have reported that work-family imbalance could cause many adverse effects such as psychological problems and decision-making difficulties in individual level and low productivity, less organizational commitment and higher absenteeism in organizational level. Even though many researchers have long been interested in currently active workforce who combine paid work with non-work roles, comparatively very limited attention has been given to the expectations that young people hold prior to occupying these roles. Especially, studies on South Asian emerging adults' future work and family planning were rarely found. More importantly, in a country like Sri Lanka, where traditional Eastern cultural elements are still very powerful, the younger generation has to face much more pressure from society. The youth is the most dynamic mediums of social change and the main capital of the country' furtherance. Therefore, it is important to have a clear image on their future expectations on balancing their family and social life with paid employment for a better future in Sri Lanka. This is the area in which this study seeks to contribute.

The reviewed literature reveals that work-family research in Sri Lanka has been exclusively focused on the females and totally overlooked males and the younger generation. Further, previous studies have been considered only about two or three roles (worker, spouse, parent) and ignored other essential roles (daughter/son, family member, neighbor, and member of the society), which Sri Lankan people generally engage due to Eastern, closed family relation behavior. Additionally,

this study made an insight into Sri Lanka's institutional (state and organizational level) and non-institutional (socio-cultural) context while discussing the available opportunities and constraints for achieving balance in work and non-work roles.

This study's overarching aim, therefore, is to understand how Sri Lankan young generation' plan towards the balancing of multiple life roles and its' determinants, especially the role of social pressure. For that, Lent's Social cognitive career theory's (SCCT) self-management model has been employed as the framework of this study. A self-administered questionnaire survey was conducted to collect data at a leading Sri Lankan government university (students 'population>12,000), in March 2017. The original questionnaire was prepared in English and later translated into Sinhalese; the native language in Sri Lanka. Questionnaires were distributed among 900 unmarried students in major three faculties. After removing participants with an incomplete questionnaire, the final analysis included 725 participants. Therefore, the overall response rate was 80.5%. Data analysis included mainly Structural Equation Modelling with multi-group analysis and other inferential statistics.

The data analysis of the study reveals that young females' self-efficacy feelings to balance multiple roles in the future is higher than male students. Moreover, it exposes that female students' positive outcomes expectations are higher than males and in contrast, young males hold stronger beliefs on negative outcomes of multiple role balance than females do. In addition, the results indicate those female students have a stronger intention for balancing multiple roles in future than male students. Besides, it reveals that students in management faculty have strong beliefs on the positive consequences of balancing work and non-work roles compared to science faculty students. Further, results of moderated regression analysis show that there are not any moderating effects of gender and students' majoring field on the relationships among self-efficacy beliefs, outcome expectations and multiple role balance intentions. Structural Equation Modelling test results indicate that there is a positive and significant effect of perceived social pressure on anticipated multiple roles balance both directly and indirectly through multiple role balance self-efficacy and positive outcome expectations. Further, the results reveal that the effect of perceived social pressure on self-efficacy and anticipated multiple balance is statistically different across the gender.

As a result, one contribution of this study to the Career Self-Management (CSM) literature by using SCCT' self-management model in Sri Lankan context for analyzing the anticipated multiple role balance intentions for the first time. A second contribution is filling the gap on sources of self- efficacy, and outcome expectation by studying the role of perceived social pressure in emerging adults. The third contribution of this study is the inclusion of both positive and negative outcome

expectations individually as the predictors of adaptive behavior which is rarely found in CSM literature. Finally, it would expand the local existing knowledge on opportunities and barriers of institutional and non-institutional context for combining employment with family responsibilities and contributory factors for achieving multiple role balance. Most importantly this study provides possible implications for policymakers, career-family counselors and relevant authorities in Sri Lanka to facilitate a better environment for handling multiple works and non-work roles with minimum role conflict.

論文審査結果の要旨

本論文は、現在世界各国で注目されている女性の社会進出に伴う社会・コミュニティのあり方をテーマとし、この課題に対するデータ分析に基づく解決策を提示するものである。具体的には、スリランカの若者の多様な社会的役割(ワークライフバランス)に関する独自に実施したアンケート調査の結果を多面的にデータ分析することで、スリランカの若者のキャリアに対する考え方を明らかにしている。また、これらの分析結果から、スリランカの若者、とりわけ女性の社会進出につながる政策のあり方やキャリアアカウンセラーが果たすべき役割等についての提案を行っている。この種の研究は、欧米を中心に盛んに行われているものの、スリランカをはじめとする発展途上国における研究は必ずしも多いとはいえない。その意味において、本論文は発展途上国の若者を対象としたワークライフバランスに関する実証研究としては注目されているものであり、今後も更なる研究展開が期待されている分野である。

本論文は全7章で構成されている。

第1章は、序論として、発展途上国におけるワークライフバランスのあり方や女性の社会進出に関するリサーチクエスチョンについて提示し、また本研究を行う学術的意義等について説明している。

第2章は、発展途上国を中心としたワークライフバランスや女性の社会進出に関する先行研究などの整理・考察を行い、本論文の当該分野の研究としての位置づけを行っている。また、スリランカにおける若者のワークライフバランスや女性の社会進出についての現状について説明などを行っている。

第3章では、第2章の内容を受けて、スリランカにおける働き方ならびに働きながら子育てをする女性に対する制度・政策などの動向を概観している。

第4章から第6章は、第1章から第3章の予備的考察などを踏まえて、多角的な視点でもって実証分析を行っている。

第4章では、スリランカの製造業の企業の従業員を対象として実施した調査結果に対して、多変量分

散分析(MANOVA)や相関分析などを行い、労働者の企業や労働に対しての意識について分析をしている。分析の結果、組織コミットメントは属性ごとにその水準が異なること等を明らかにしている。また、組織コミットメントと同僚間の信頼は組織の変化に対する従業員の準備と正の相関関係があること等も明らかにしている。この分析は、個人と組織の関係を調べており、次章以降の分析の基礎となるものである。

第5章では、スリランカの学生を対象として実施した調査結果に対して、自己効力感や複数の役割をバランスさせることの期待と複数の役割をバランスさせる意図との関係について(性別や学部別に見た)分析を行っている。その結果、自己効力感や複数の役割をバランスさせることの期待は複数の役割をバランスさせる意図に正の影響を与えていることを確認し、効果的な労働政策に関する提案を行っている。

第6章では、社会認識キャリア理論(Social Cognitive Career Theory)の拡張モデルを構築し、その検証を試みている。具体的には、第5章で用いたアンケート調査結果に対して構造方程式モデリング(Structural Equation Modelling)という分析手法を採用している。その結果、社会的圧力、自己効力感、ポジティブな期待、ネガティブな期待と複数の役割をバランスさせる意図との関係ならびに、それぞれの要因間との関係が明らかになった。あわせて、性別によってこの関係が異なることも明らかにしている。この結果は、概ね欧米諸国における結果がスリランカにおいても社会認識キャリア理論が成立することを示したものとなっている。

第7章では、第1章から第6章まで総括した内容であり、実証分析の結果を踏まえた(エビデンスベースの)政策提言を行っている。

以上、本論文は、若者のワークライフバランス、女性の社会進出という世界的にも注目されているテーマを取り上げ、スリランカを一つの事例として文献調査、実証分析と総合的な研究を行っているものである。ワークライフバランスや女性の社会進出に関して発展途上国ではこれまであまり研究が行われてこなかったため、その意味においても、本論文はこの分野において大きな学術的意義を有している。また、本論文ではエビデンスに基づき、働きながら子育てをする女性に対する制度・政策についてのあり方についての有益な知見を提示している。

平成31年2月12日に実施した博士論文公聴会において種々の質問がなされ、いずれも著者の説明により質問者の理解が得られた。

また、本研究は、査読付学術論文3編、学会発表2件等で報告されており、著者は研究者としての十分な能力を有していると言える。

以上の審査結果に基づき、本論文は博士(学術)

の学位を授与することに値すると判断され、審査員
全員一致で合格と判定した。

氏名(本籍) Thach Rasmeay (カンボジア)
 学位の種類 博士(学術)
 学位記の番号 甲第 639 号
 学位授与の日附 平成 31 年 3 月 26 日
 学位論文題名 カンボジアの経済発展と所得格差
 に関する研究

論文審査委員

(主査) 佐賀大学 教授 張 韓模
 (副査) " " 澤島 智明
 " " " SALIYA DE SILVA
 " " " 大串 浩一郎
 " " 准教授 中尾 友香梨

論文内容の要旨

カンボジアは、1993 年に新憲法の下で新しい政権が誕生してから、高い実質経済成長率を記録している。特に 2004 年から 2007 年にかけては、4 年間連続で 10% を超す成長率を達成し、2010 年代に入ってから 7% 前後の高度経済成長を続けている。カンボジアは、経済成長とともに、貧困率も改善されている。1 人当たり GNI は 2014 年に 1,100 ドルまで上昇し、貧困率も 2004 年に 50% から 2014 年には 18% に低下した。

ところが、地域別 1 人当たり GNI は格差が拡大する傾向にある。もう一つ、カンボジアの課題は都市部と農村部の所得格差だけではない。2011 年から 2016 年にかけて農村部の上位 20% の所得は 2 倍以上成長したが、下位 20% の所得は横ばい状態である。つまり、カンボジアでは、都市部と農村部の所得格差が拡大する中、農村部内の所得格差も拡大する状態である。本研究は、以上のようなカンボジアの地域間の経済格差、つまり都市部と農村部の所得格差、階層間の所得格差が拡大する状況を背景として、特に農村部においてなぜ所得格差が拡大しているのかという問題意識から出発した。

このような状況を問題意識としている本研究の目的は、カンボジア農村部の所得格差の状況を把握し、原因と対策を明らかにすることである。この研究目的を達成するために、本研究では次の 3 つの仮説を立て、検証した。仮説 1、ドル化は農村部所得にマイナス影響を与えている。仮説 2、カンボジアでは、都市部より農村部において、所得格差に対する意識が高い。仮説 3、カンボジアの SEZ 政策は、農村部における兼業農家と専業農家の所得格差の原因となっている。これらの仮説を検証するために、本研究は、非構造化インタビュー調査、アンケート調査、文献調査に基づいて研究を行った。

本研究は 7 つの章で構成される。第 1 章のはじめには、本研究の問題意識及び研究目的、研究方法、

研究の構成を述べた。

第 2 章では、本論の導入部としてカンボジア経済の成長と課題を取り上げ、カンボジア経済成長を 4 つの時期に区分して検討したのち、GDP 成長率、産業別貢献度、入国者数、FDI、外国貿易などのデータに基づいてカンボジア経済のマクロパフォーマンスを議論し、そして貧困率や経済格差などの課題を検討した。

第 3 章はカンボジアのドル化問題を議論した。現在カンボジアでは、高い経済成長率が続き、マクロ経済指標が大きく改善されている半面、ドル化が全国土に進み、地域経済格差の一因となっている。ドル化によって、国際貿易の面では為替リスクを回避することができると言われるが、農村部と都市部において使用する通貨が異なる問題も発生している。本章では、このことを背景として、2012 年から 2015 年までの農村部家庭のバランスシートを分析することを通じて、リエル紙幣を使う人々に為替損失が発生していることを明らかにした。

第 4 章では、カンボジア人々の階層帰属や所得格差に関する意識、社会状況や特徴を明らかにすることを目的として、都市部と農村部の人々へのアンケート調査を用いて量的分析を行った。本調査の結果は以下のように纏められる。カンボジアでは、社会的地位の高い人は最も所得格差に関する意識が強く、社会全体に対する満足度が低い。さらに、都市部と農村部の所得格差が大きすぎると感じている人は 7 割を超えているが、その中でも農村部の人々が都市部の人々より格差意識が高いことが明らかになった。

第 5 章では、農村部の所得格差の現状とその原因を分析した。カンボジア農村部における所得格差の拡大は FDI 誘致によって外資系企業で働く兼業農家が増加したためであるという仮説を立て、農家のインタビュー調査を通じて仮説を検証した。その結果、兼業農家の平均所得は近年大きく増加しているが、専業農家の所得は相対的に伸び悩み、このことが農村部所得格差の原因であることを明らかにした。

第 6 章では所得格差の原因として経済発展政策と関連性を取り上げた。兼業農家は、所得のうち、賃金収入の割合が増えているが、このことは地方道路の整備状況と大きく関連している。しかしカンボジアの 5 ヶ年開発計画(2014-2018)は、地方道路よりも国道開発を優先している。カンボジアのバランスの取れた経済発展のためには、農村部の所得格差や貧困削減が急務であり、DBST またはコンクリートで舗装した地方道路を増やす必要があることを議論した。最後の第 7 章は本研究の結論と課題である。

以上の内容で構成されるラスメイ氏の研究は、カンボジアにおける所得格差問題の研究において、今までの研究の成果とは異なる別の観点を示したところに、研究のオリジナリティーがある。また、この

分析結果に基づいて、農村部所得格差の縮小に向けて開発政策のアクションプランの積極的な実施を提案しているが、これからこの研究の実践が期待されるところである。

平成 31 年 2 月 12 日に実施した博士論文公聴会においても種々の質問がなされ、いずれも著者の説明により質問者の理解が得られた。

また、本研究は、審査付学術論文 2 編、学会発表 2 件等で報告されており、本研究は博士の学位に値すると言える。

以上の審査結果に基づき、本論文は博士（学術）の学位を授与するに値すると判断され、審査員全員一致で合格と判定した。

論文審査結果の要旨

学位申請者、Thach Rasmey 氏に対して、博士論文審査終了後に最終試験を実施すること、および試験の内容は博士論文に関連する内容について口述試験をおこなうことを事前に通知し、平成 31 年 2 月 12 日に実施した。

口述試験は博士論文を中心として、特にドル化の概念、農家所得の構成比、道路ネットワークの整備状況、開発計画 5 ヶ年計画の内容等について行われたが、申請者自身の研究成果を踏まえた適切な説明がなされた。さらに申請者は、口述試験から開発経済学や国際経済学に関して十分な知識と理論構成力を有していると判断された。

以上に述べたように、本申請者は博士論文を中心とした最終試験では、いずれも十分な内容の知見を示し、最終試験の結果は合格であると審査員全員で判定した。

氏名(本籍) 西萩 一夫 (兵庫県)
学位の種類 博士(工学)
学位記の番号 甲第 640 号
学位授与の日附 平成 31 年 3 月 26 日
学位論文題名 希土類元素ドーブ酸化ガリウムの成長と評価に関する研究

論文審査委員

(主査) 佐賀大学 教授 郭 其新
(副査) " " 大石 敏之
" " 田中 徹
" " 准教授 高橋 和敏

論文内容の要旨

現在使用されている白熱球、蛍光灯などの照明機器は、変換効率が低く、エネルギーの大部分が熱として無駄に消費されている。光と電子との相互作用が大きい半導体材料を用いれば、その変換効率は飛躍的に高まる。半導体材料を用いた発光デバイスとして光の三原色である赤色、緑色、青色発光ダイオードは、既に実用化されており、地球規模の省エネルギー化や二酸化炭素削減などに貢献している。しかし、従来の pn 接合型発光ダイオードの発光波長は、半導体材料のバンドギャップの値に依存し、温度上昇に伴ってバンドギャップが小さくなるため、長波長側へシフトしていく問題がある。希土類元素は、4f 殻内の遷移に起因したその元素固有の波長において温度に依存しない発光を示すことが知られており、既に Eu ドーブ窒化ガリウムを用いた赤色発光ダイオードが開発され、注目を集めている。希土類元素からの発光効率は、母体材料となる半導体のバンドギャップが大きいほど高くなることが報告されており、これまで用いられてきた半導体材料よりも大きなバンドギャップを持つ材料を用いれば、より高効率な発光デバイスの実現が期待される。本研究では、従来用いられてきた窒化ガリウムなどよりも大きなバンドギャップ (4.9eV) を持つ酸化ガリウムに注目し、ホスト材料として酸化ガリウムを用い、ドーブする希土類元素の種類 (Eu, Tm, Er) を変えて、光の 3 原色の実現をアプローチした。より高性能なデバイスの実現とデバイス設計指針を与えるために酸化ガリウム薄膜のヘテロ構造のバンドパラメータ、表面形態、結晶構造、光学特性、ドーブされた希土類原子の局所構造などの評価及び成膜用の基板 (シリコン、サファイア、ヒ化ガリウム) の違いによる影響を明らかにし、モノリシック半導体の実現に一步でも近づけることを目指した。

本研究の論文構成を以下に示す。

第 1 章では本研究の背景と目的を概説した。

第 2 章ではシリコン基板上にパルスレーザ堆積法

を用いて酸化ガリウム薄膜を成長させた。X 線回折法と原子間力顕微鏡を用いて解析した結果、成長された薄膜は表面が滑らかな単斜晶系の構造を持つことが分かった。また、X 線光電子分光法を用いて酸化ガリウムとシリコン界面のバンドオフセット評価を行い、ヘテロ接合の価電子帯オフセット値は $3.5 \pm 0.1 \text{ eV}$ であり、伝導帯オフセット値は $0.2 \pm 0.1 \text{ eV}$ を有するタイプ I のエネルギーバンド構造であることを解明した。

第 3 章ではサファイア基板上にパルスレーザ堆積法を用いて基板温度を変化させ Eu ドーブ酸化ガリウム薄膜成長を行った。X 線ロックアップ及びラマン分光法により基板温度と得られた薄膜の結晶性との関係性を評価した結果、基板温度が 400°C 付近の領域で良好な単斜晶系構造を持つ酸化ガリウムが得られることが分かった。また、シンクロトロン光を用いて X 線吸収端近傍構造分析により Eu をドーブした酸化ガリウム薄膜における Eu イオンの価数は基板温度が増大するにつれ、2 価と 3 価の混合から 3 価のみに変化することを明らかにした。さらに広域 X 線吸収微細構造分析法解析及び第一原理を用いた理論計算により、酸化ガリウムにドーブされた Eu 原子は低い基板温度で成長したアモルファス構造においても酸化ガリウム薄膜中の Ga サイトに置換していることを実証した。

第 4 章ではパルスレーザ堆積法を使用してサファイア基板上に Tm をドーブした酸化ガリウム薄膜を成長させた。エネルギー分散型蛍光 X 線分析スペクトルから、酸化ガリウム薄膜の固相における Tm 組成とターゲット中の Tm 含有量との関係を明らかにした。また、X 線回折法とラマンスペクトル解析により、成長された酸化ガリウム薄膜はすべて単斜晶系であることが分かった。さらに、フォトルミネセンス測定を行い、460, 650 及び 800nm の発光ピークはそれぞれ $^1\text{G}_4$ 励起状態から $^3\text{H}_6$, $^3\text{F}_4$, $^3\text{H}_5$ の状態への Tm^{3+} 4f 殻内遷移であることを示した。

第 5 章ではヒ化ガリウム基板上にパルスレーザ堆積法を用いて、Eu ドーブ酸化ガリウム薄膜の成長を行い、得られた薄膜の結晶構造、表面形態及び光学特性を調べた。エネルギー分散型蛍光 X 線分析スペクトルを解析した結果、酸化ガリウム薄膜の固相における Eu 組成はほぼターゲット中の Eu 含有量に比例して変化することが分かった。X 線光電子分光分析より、ドーブされた Eu 原子は酸化ユーロピウムを形成するために、Ga と置換していることを示唆した。また、X 線回折装置と原子間力顕微鏡の解析により、得られた膜は滑らかな表面を有する単斜晶系酸化ガリウムであることが明らかになった。さらに、フォトルミネセンス測定により、611nm 付近に強い赤色発光が観測され、発光強度が Eu 濃度の増加と共に強くなっていくことを明らかにした。

第6章では本研究で得られた成果を総括した。

論文審査結果の要旨

希土類元素は、4f殻内の遷移に起因したその元素固有の波長において温度に依存しない発光を示すことが知られており、既にEuドーピング窒化ガリウムを用いた赤色発光ダイオードが開発され、注目を集めている。希土類元素の母体材料となる半導体のバンドギャップの大きさにより、デバイスの発光効率が異なることが報告されており、これまで用いられてきた半導体材料より大きなバンドギャップを持つ材料を用いれば、より高効率の発光デバイスの作製が可能となる。酸化ガリウム(Ga_2O_3)は、安定な単斜晶系構造を有しており、直接遷移型のバンド構造を持ち、バンドギャップが4.9eVであることから、希土類元素の母体材料として有望である。本論文では、パルスレーザー堆積法を用いて希土類元素(Eu、Tm)ドーピング Ga_2O_3 の薄膜成長を行い、薄膜のヘテロ構造のバンドパラメータ、表面形態、結晶構造、光学特性、ドーピングされた希土類原子の局所構造などの評価及び成膜用の基板(シリコン、サファイア、ヒ化ガリウム)の違いによる影響を明らかにし、より高性能な光の3原色デバイスの実現とデバイス設計指針を与えている。

本論文は、第1章から第6章で構成されている。

第1章では、本研究の背景、目的及び内容を概説している。

第2章では、パルスレーザー堆積法を用いて、シリコン基板を下地とした Ga_2O_3 薄膜成長を行い、X線光電子分光法により酸化ガリウムとシリコン界面のバンドオフセット測定を行った結果、ヘテロ接合の価電子帯オフセット値は $3.5\pm 0.1\text{eV}$ であり、伝導帯オフセット値は $0.2\pm 0.1\text{eV}$ を有するタイプIのエネルギーバンド構造であることを解明している。

第3章では、パルスレーザー堆積法によるEuドーピング Ga_2O_3 膜の成長実験を行い、X線ロックアップカーブ及びラマン分光法により基板温度と得られた薄膜の結晶性との関係の評価し、基板温度が 400°C 付近の領域で良好な単斜晶系構造を持つ Ga_2O_3 が得られることを明らかにしている。また、シンクロトロン光広域X線吸収微細構造分析法及び第一原理を用いた理論計算により、 Ga_2O_3 にドーピングされたEu原子は低い基板温度で成長したアモルファス構造においても Ga_2O_3 薄膜中のGaサイトに置換していることを見出している。

第4章では、パルスレーザー堆積法を使用してサファイア基板上にTmをドーピングした Ga_2O_3 薄膜を成長させ、 Ga_2O_3 薄膜の固相におけるTm組成とターゲット中のTm含有量との関係を明らかにしている。また、フォトルミネセンス測定を行い、460、650及

び800nmの発光ピークはそれぞれ $^1\text{G}_4$ 励起状態から $^3\text{H}_6$ 、 $^3\text{F}_4$ 、 $^3\text{H}_5$ の状態への Tm^{3+} 4f殻内遷移であることを示している。

第5章では、パルスレーザー堆積法を用いてヒ化ガリウム基板上にEuドーピング Ga_2O_3 薄膜の成長を行い、得られた薄膜の結晶構造、表面形態及び光学特性を調べている。エネルギー分散型蛍光X線分析スペクトルより、 Ga_2O_3 薄膜の固相におけるEu組成はほぼターゲット中のEu含有量に比例して変化することを明らかにしている。また、フォトルミネセンス測定により、611nm付近に強い赤色発光が観測され、発光強度がEu濃度の増加と共に強くなっていくことを実証している。

第6章では、本研究で得られた成果がまとめられている。

以上のように、本論文の研究内容は工学的に貴重な知見を多く含み、工学の進展に寄与するところが大きいと認められる。これまで、4編の査読付論文が国際的に著名な学術論文誌に掲載され、高く評価されている。平成31年1月31日に実施した学位論文公聴会においても種々の質問がなされ、いずれも著者の説明により質問者の理解が得られた。以上の審査結果に基づき、本論文は博士(工学)の学位を授与するに値すると判断され、審査員全員一致で合格と判定した。

氏名(本籍) 原口 翔次郎 (福岡県)
 学位の種類 博士(理学)
 学位記の番号 甲第 641 号
 学位授与の日附 平成 31 年 3 月 26 日
 学位論文題名 A Elucidation of the Active Site Structure in a Photoreceptor Protein by Raman Optical Activity
 (光受容タンパク質における活性部位構造のラマン光学活性分光による解明)

論文審査委員

(主査)	佐賀大学	教授	海野	雅司
(副査)	〃	准教授	成田	貴行
〃	〃	〃	坂口	幸一
〃	〃	〃	藤澤	知績

論文内容の要旨

タンパク質は様々な機能を持ち生命活動の根幹を担う巨大分子であり、補欠分子と呼ばれる分子を活性中心としてもつ色素タンパク質が数多く存在する。特に、光受容タンパク質では発色団と呼ばれる有機化合物を光の検出に使っており、光吸収によって引き起こされた発色団の構造変化がタンパク質の構造変化を引き起こし、信号伝達などの機能を担っている。このような補欠分子の多くは π 電子系を有した化合物で、本来は平面構造であるが、タンパク質中では歪んだ非平面構造であり、この構造の歪みがタンパク質の機能に重要であることが示されてきた。

上記のように補欠分子の構造歪みは重要であるが、その実験的な検出は容易ではない。例えば、X線結晶回折では同一の光受容タンパク質で様々な結晶構造が報告されているが、発色団の構造歪みはそれぞれで異なり正確な構造を得ることは困難である。そこで我々は非平面構造への歪みに関する構造情報が期待できる分光手段として、ラマン光学活性分光

(Raman Optical Activity, ROA) と呼ばれる手法に注目した。しかし、従来開発されてきた ROA 分光装置のほとんどは励起光として可視光を使用しているためこの領域に吸収帯を持つ光受容タンパク質等には応用できなかった。そこで色素タンパク質にも応用可能となる近赤外光を励起光源とする装置を開発して *p*-クマル酸を発色団を持った光受容タンパク質である Photoactive Yellow Protein (PYP) などに応用してきた。更に量子化学計算により ROA スペクトルを解析することで、発色団の歪みに関する詳細な構造情報が得られることを明らかにしてきた。

しかし、ROA 分光を様々な光受容タンパク質に応用するためにはいくつかの課題が残っていた。まず ROA スペクトルはその信号強度が通常のラマン散乱

強度の 10^{-3} 以下と小さいため、ROA 信号強度を増大させる必要がある。また、ROA バンドの強度変化がどのような構造歪みに対応するかはわかっていなかった。そこで本論文では、ROA 散乱強度を増加させる手段として共鳴ラマン効果と呼ばれる手法に注目し、ROA スペクトルの励起波長依存性を世界で初めて検討した。また同位体効果を用いた ROA スペクトルの帰属と量子化学計算による系統的な解析から、ROA バンドの強度変化がどのような構造歪みに対応するか調査した。ROA 分光は水溶液中に存在するタンパク質の活性部位の構造歪みを明らかにできる画期的な研究であり、今後も更なる研究展開が求められている分野である。

本論文は全 6 章で構成されている。

第 1 章は序論として、本論文の背景および目的を述べている。今までの研究により ROA 分光が光受容タンパク質内の活性部位の構造歪みに関する情報を持つことが明らかとなった。しかし、ROA 分光をさまざまな系に応用するためには、ROA 信号強度を増強し、さらに構造歪みが ROA スペクトルにどのような影響を与えるかを明らかにする必要がある。本論文ではこの 2 つを目的として研究を行なった。

第 2 章では、発色団を有した光受容タンパク質の ROA 測定を可能にするために有用である自作の近赤外励起光 (785 nm) の ROA 分光装置について述べている。

第 3 章では、ROA スペクトルの信号強度の増強につながる励起波長依存性について述べている。*Salinibacter ruber* 由来 PYP を対象として選び、近赤外光 (785 nm) および可視光 (532 nm) 励起の ROA スペクトルを測定した。その結果、可視光励起では前期共鳴と呼ばれる効果により信号強度の増大が観測された。しかし、可視光励起では共鳴 ROA と呼ばれる現象により観測した ROA スペクトルの形状はラマンスペクトルと同じであり、構造情報の多くが失われたことがわかった。このことより ROA スペクトルを測定する際には、構造歪みの情報を失わず前期共鳴ラマン効果により適度な信号強度の増大が得られるような励起波長の選択が重要であると示された。

第 4 章では、構造歪みが ROA スペクトルに与える影響を調査するために、*Halorhodospira halophila* 由来 PYP の ROA スペクトルにおいて顕著な信号強度をもつ水素面外変角モード (Hydrogen-out-of-plane, HOOP) を同位体標識試料を用いた実験から帰属した。更に PYP の活性部位モデルを用いた系統的な理論計算を行い、HOOP モードの ROA バンド強度が構造歪みの物差しとなることが示された。

第 5 章では、本論文の総括が行われ、今後の展望が述べられている。

第 6 章では、本論文を執筆するにあたり、ご助力を頂いた方々への謝辞を述べている。

以上本論文では、光受容タンパク質中の活性部位構造解析のために必要な課題について研究を行った。2つの異なる励起波長 ROA 分光装置を用いることで、強度増強のためには励起波長の選択が重要であることを示し、また、同位体標識試料を用いた実験と量子化学計算を用いた解析により、HOOP モードが活性部位の構造歪みへのマーカーとなることが示された。これらの結果は色素タンパク質の機能に關与する活性部位構造を解析する行方上で大変有用な知見である。

平成 31 年 2 月 6 日に実施した学位論文公聴会においても種々の質問がなされ、いずれも著者の説明により質問者の理解が得られた。以上の審査結果に基づき、本論文は博士（理学）の学位を授与するに値すると判断され、審査委員全員一致で合格と判定した。

論文審査結果の要旨

学位申請者、原口翔次郎氏に対して、博士論文審査終了後に最終試験を実施すること、および試験の内容は博士論文に關連する内容について口述試験をおこなうことを事前に通知し、平成 31 年 2 月 6 日に実施した。

口述試験は博士論文を中心として、これに關連ある内容について行った。本論文について、特に、ラマン光学活性分光に關する理論と測定における関係性や研究手法について問うたところ、申請者自身の研究成果を踏まえた適切な説明がなされた。さらに申請者は、口述試験からラマン光学活性分光や測定方法に關して十分な知識と理論構成力を有していると判断された。

以上に述べたように、本申請者は博士論文を中心とした最終試験では、いずれも充分な内容の知見を示し、最終試験の結果は合格であると審査員全員で判定した。

氏名(本籍) Huynh Phuoc Hien
(ベトナム社会主義共和国)
学位の種類 博士(工学)
学位記の番号 甲第 642 号
学位授与の日附 平成 31 年 3 月 26 日
学位論文題名 Experimental Study on Loop Heat
Pipe with Flat Evaporator
(平板型蒸発器を有するループ
ヒートパイプの実験的研究)

論文審査委員

(主査)	佐賀大学	教授	宮良明男
(副査)	〃	〃	光武雄一
〃	〃	〃	木上洋一
〃	〃	准教授	仮屋圭史

論文内容の要旨

Loop heat pipe (LHP), a passive two-phase heat transport device, operates based on the phase changing processes and the natural motivations such as capillary or gravitational force. Different with conventional heat pipe (HP), vapor and liquid in LHP flow in separated pipes and the fine pore wick occurring inside the evaporator only. Hence, LHP accesses some favor characteristics such as flexibility, compact ability, high heat transfer capacity with low thermal resistance and high-reliability characteristics. LHP has been applied successfully and commonly in the thermal management systems functioning on the orbital vehicles or machines like spacecraft, satellites, orbiters which operates in the zero-gravity environment. Nowadays, LHP is considered as one of the potential solutions to the challenges that the cooling system of modern electronics devices is facing such as high heat power and heat flux dissipation, stable and reliable performance as well as electricity consumption or environmental problem. There are numerous experimental and computational studies conducted to evaluate the performance, the phenomenon happening inside the LHP under the effects of different parameters. However, until now LHP has not approved the commercial situation as the normal HP does. One of the reasons can be caused by the complicated structure of evaporator, especially sintered porous wick that increases the LHP manufacturing cost. In this study, a new pattern of evaporator was suggested, and various experiments were conducted to find out the thermal performance of this evaporator as well as the whole LHP operating under different conditions including orientations, working fluids, cooling conditions. From the experimental results, the assumption above boiling and heat transfer process happen inside this evaporator was withdrawn. This assumption can be used as one of the factors to improve the design of LHP in future.

The works done in this thesis can be summarized as follows.

Designing and fabricating the first pattern of the evaporator. This pattern was accompanied with the sintered stainless-steel wick, and water was the working fluid inside the LHP. The LHP's performance was investigated under both gravity-assisted and horizontal orientation condition.

In the experiment that LHP worked in condition advantage in gravity, the condenser was cooled by water at 27.5 °C with mass flow rate at 27 kg/h, the LHP could operate stably in the range of 50 to 520 W (19.2 W/cm²) and maintain the temperature on the top surface of the heating block not be higher than 105 °C. The total thermal resistance of LHP reduced with heat power increment and had the minimum value 0.149 K/W at the heat power of 520 W. For the target of cooling, this LHP could take the heat at the rate of 350 W (12.9 W/cm²) from the heater while the temperature on the top surface of heating block was kept at 85 °C. The start-up characteristics of the LHP under different heat power were analyzed and discussed. Moreover, the experimental results included the changing of evaporation heat transfer coefficient on the heat flux. Through the results, an assumption about boiling phenomenon happening inside the evaporator was introduced. This experiment also examined the cooling performance of the LHP after turning off the heater.

Within the horizontal condition, the performance of LHP was investigated when the inlet temperature of cooling water was adjusted at different values including 18.5 °C, 28.5 °C, 36.5 °C. When cooled by water at 28.5 °C, the LHP could operate in the range of heat load from 10 W to 94 W and maintain temperature at the top surface of heating block lower than 100 °C; however, the LHP demonstrated the weak oscillating behavior under heat load at 10 W. Experimental results also show that the total thermal resistance of LHP, when cooled by water at 28.5 °C and 36.5 °C, are nearly equal together and smaller than the case that cooling water was set at 18.5 °C. This result indicates that LHP can function efficiently with natural water without cooled in advance. Besides, the experiment of horizontal condition also found out the overcharged of working fluid is one of reasons caused the LHP to behave different oscillation characteristics.

However, the first pattern of the evaporator behaved some disadvantage, especially the vapor chamber and compensation chamber could connect with each other, so made the circulation weaker. Therefore, we designed and fabricated the second pattern of the evaporator having some strong points such as prevent the connection between the vapor collector and compensation chamber, easy in changing the wick as well as the base of the evaporator. Within the second pattern, performance of LHP under gravity assisted condition was investigated when operating with different working fluids including water and ethanol. In the experiment, the evaporator's LHP was also equipped with sintered stainless-steel wick. The results show that the performance of water LHP was

almost similar to one working with the first pattern of evaporator although the elevation different between evaporator and condenser was smaller. Comparison between water and ethanol LHP, the LHP with water as working fluid had the better performance. In the case of water LHP, when heating power was changed from 33 to 535 W, the temperature at the top surface of the heating block raised from 38 °C to 110 °C. With the ethanol LHP, this temperature reached the value of 133 °C at the heating power of 395 W. If temperature limitation of microprocessors functioning inside the DCs is recognized at 85 °C, the cooling capability of LHP will be 220 W and 350 W corresponding to the working fluid was ethanol and water respectively. In addition, the discussion about the difference in boiling heating transfer characteristics as well as condenser performances in the cases that water and ethanol were used as working fluid was also presented in this experiment.

論文審査結果の要旨

電子機器の高集積化および高密度化が進み、半導体デバイスやその他の電子機器からの放熱量、特に単位体積もしくは単位面積あたりに換算した放熱量が急激に増加している。しかし、電子機器から放熱された熱を適切に冷却しなければ電子機器が高温になり、安定した動作が保てない。一般に、電子機器の表面温度は 85°C 以下にする必要があると言われていた。そのため種々の電子機器において、それぞれの形状や使用形態に応じた冷却技術により冷却が行われている。

本研究で対象としたループヒートパイプは、冷却媒体が液体から気体に相変化する際の蒸発潜熱を利用して高密度の熱を除去しようとするものであり、ループ内に設置した多孔質体の毛管作用により液を循環させることができる。蒸発潜熱を利用した同様な冷却装置としてサーモサイフォンが上げられるが、多孔質体が無く、重力だけを利用するため、加熱部を常に装置の最下部に設置する必要がある。一方、ループヒートパイプでは冷却部に対して加熱部を水平または上部に設置しても動作する可能性がある。

第 1 章では電子機器の冷却に関する背景や基本的な技術に関する情報が適切にまとめられている。また、ループヒートパイプに関する過去の研究成果に関して文献レビューがなされ、それに基づいて、本研究の目的が明示されている。

第 2 章では実験装置の詳細が示されている。加熱面と直接接触し熱を除去する蒸発器については、加熱面におけるフィン構造の詳細とその上部に設置する多孔質体設置全体構造などの詳細が示されている。

第 3 章では、重力で気液の流れをアシストした場合のループヒートパイプの基本特性に関して詳細な実験データが示されている。作動媒体には水を用い

ている。実験は 50~520 W の加熱条件で行われ、350 W の加熱条件で表面温度が 85°C に達すること、限界熱流束で見られる温度の急上昇が表れないこと、加熱量が大きいほど熱抵抗が小さくなることなどが報告されている。また、蒸発器における現象の物理モデルを構築し、多孔質体とフィンとの構造体における伝熱メカニズムに関する考察を行っている。

第 4 章では、作動媒体にエタノールを使った実験を行い、その特性を調べるとともに、水の実験結果との比較から性能評価を行っている。実験結果より、90 W までの低熱負荷領域ではエタノール性能が高いが、それ以上の高熱負荷では性能が逆転すること、表面温度が 85°C に達する加熱条件が 220 W で、水の場合より低くなることが報告されている。また、そのような結果となる原因について、先に構築した物理モデルと熱物性値の違いから検討している。

第 5 章では、重力による流れのアシストが無い、水平設置の条件での実験結果が示されている。水平設置の場合は、多孔質体の毛管力だけによる流れになるため、液供給能力が低下し、80~90 W 程度の低熱負荷で表面温度が 85°C に達することが報告され、毛管力の大きな多孔質体の探求が課題とされている。

第 6 章では、液供給の振動現象の測定結果が報告され、振動の要因に関する考察がなされている。

第 7 章では、本研究の実験結果の総括が行われると共に、今後の研究課題および方向性に関する提言を行っている。

本研究で得られた成果は、独創的な新しい結果を含んでおり、工業的に広く応用できるものである。

平成 31 年 2 月 1 日に実施した博士論文公聴会では、これらの内容が分かりやすく丁寧に説明され、質問に対しても適切な回答がなされた。なお、本研究の内容は 2 件の査読付き Journal 論文に掲載されるとともに、4 件の国内外の会議で発表されている。

以上のことより、本論文は博士（工学）の学位を授与するに値すると判断され、審査員全員の一致で合格と判定された。

氏名(本籍) 榎谷 聡 士 (佐賀県)
 学位の種類 博士(工学)
 学位記の番号 甲第 643 号
 学位授与の日附 平成 31 年 3 月 26 日
 学位論文題名 シンクロトロン X 線トポグラフィ
 ー法によるワイドギャップ半導体
 ダイヤモンドと酸化ガリウムの格
 子欠陥の評価に関する研究

論文審査委員

(主査) 佐賀大学 教授 嘉 数 誠
 (副査) " " 大 石 敏 之
 " " " 田 中 徹
 " " 准教授 高 橋 和 敏

論文内容の要旨

本研究では次世代の半導体材料として期待されるダイヤモンドおよび酸化ガリウムについて注目し、これらの単結晶中に存在する結晶欠陥の構造を X 線トポグラフィ法により解析したものである。

現在、パソコンや携帯電話などの電子機器は我々の日常生活に深く浸透し、必要不可欠のものとなっている。これらの電子機器の信号処理や電力制御はシリコンを基板とした半導体により支えられている。近年では更なる高度情報化や環境意識の高まりにより、半導体に求められる性能もさらに増している。しかし、半導体応用において近年、シリコンは物性面での性能限界が憂慮され始めている。そのような中、シリコンよりもバンドギャップの広いワイドギャップ半導体が注目されるようになってきた。その中でもダイヤモンドおよび酸化ガリウムは、電力の低損失化、高耐圧化などの性能面で大きくリードしていることから、次世代の半導体材料として期待されている。

ダイヤモンドおよび酸化ガリウムの半導体応用にあたり、課題の一つとして挙げられるのが結晶欠陥である。通常半導体デバイスは基板となる単結晶上に作製されるが、この単結晶は完璧な原子配列をしていわけではなく、局所的なズレ(結晶欠陥)を含んでいる。この結晶欠陥はデバイス動作時にリーク電流の発生や耐圧の低下を引き起こし、多くの場合、デバイス特性を損ねる原因となる。ダイヤモンドや酸化ガリウムに限らず、新材料の開発にあたり、結晶欠陥の抑制や制御は避けては通れない課題である。そこで必要となるのが、結晶中に存在する結晶欠陥の分布や構造を明らかにすることである。

このような背景から、本研究では X 線トポグラフィという手法を用いてダイヤモンドと β - Ga_2O_3 の結晶欠陥評価を行った。結晶欠陥の評価法について

は様々な手法があるが、非破壊で測定できる点、結晶全体の観察ができる点、ダイヤモンドおよび β - Ga_2O_3 が X 線トポグラフィの対象として適切な欠陥密度である点、などからこの手法を用いた。

本論文は 7 章で構成され、ダイヤモンドおよび β - Ga_2O_3 の結晶欠陥を解析した。各章の内容を以下に示す。

第 1 章では序論として、本研究に至る背景と先行研究について述べた。ワイドギャップ半導体が求められる現状を説明した後、ダイヤモンドと β - Ga_2O_3 の特徴をまとめた。さらに結晶欠陥について説明し、その評価手法、先行研究について述べた。

第 2 章では、本研究で用いた解析手法である X 線トポグラフィについて、概要や原理について説明した。次に、観察対象であるダイヤモンドと β - Ga_2O_3 の結晶成長法について述べた。

第 3 章では、高温高压合成(HPHT)ダイヤモンド単結晶中の積層欠陥について解析を行った。X 線トポグラフィにより、積層欠陥に付随する部分転位を調べ、その特性からこれらの積層欠陥がショックレー型積層欠陥であることがわかった。また、成長面を変化させた場合でも、同様の積層欠陥が発生することもわかった。

第 4 章では、第 3 章で観察した HPHT ダイヤモンド単結晶に関して、高温熱処理を行い、結晶欠陥の挙動を調べた。熱処理前に観察されていた

ショックレー型積層欠陥は、熱処理後には消滅しており、1 本の転位として観察された。成長中に発生した積層欠陥を、成長後のプロセスで消滅させる機構を見出した。また、熱処理前に直線状に発生していた転位は熱処理により屈曲運動をおこし、ベンディングすることがわかった。ダイヤモンド結晶において成長後のプロセスで欠陥を抑制・制御できる可能性が示唆された。

第 5 章では、化学気相成長(CVD)により成長した(111)面ダイヤモンド単結晶を用いて、転位とエッチピットの関連を調べた。はじめに、X 線トポグラフィにより結晶内の転位を観察し、これらの転位が刃状転位または混合転位であることを示した。その後、この結晶に対し、エッチング処理を行い、結晶欠陥に対応するエッチピットを形成した。それぞれのエッチピット形状は異なっており、X 線トポグラフィの結果と比べると、混合転位によるエッチピットが刃状転位のエッチピットよりも形状が大きくなることがわかった。この結果から、エッチピット形状により転位の同定を行える可能性を示した。

第 6 章では、Edge-defined Film-fed Growth(EFG)法により作製した β - Ga_2O_3 単結晶、およびハライド気相成長(HVPE)法で成長したエピタキシャル膜の欠陥の観察を行った。EFG 結晶においては成長方向である[010]方向への欠陥が特徴的であり、[010]への

転位および転位列などが観察された。また(001)面においては表面付近にすべり転位と思われる転位が観察された。HVPE膜については、多くが貫通転位であり、基板結晶の欠陥や、ボイド欠陥の端において発生していることがわかった。

最後に第7章は、本論文の結論として、研究の総括および得られた成果や知見をまとめた。また、今後の課題を示した。

論文審査結果の要旨

学位申請者、榊谷聡士氏に対して、博士論文審査終了後に最終試験を実施すること、および試験の内容は博士論文に関連する内容について口述試験を行うことを事前に通知し、平成31年2月14日に実施した。

口述試験は博士論文を中心として、これに関連ある内容について行った。半導体の物理、X線トポグラフィの原理について問うたところ、申請者自身の知識、研究成果を踏まえた適切な説明がなされた。さらに申請者は、口述試験からは半導体の物性、X線回折、結晶に関して十分な知識と理論構成力を有していると判断された。

以上に述べたように、本申請者は博士論文を中心とした最終試験では、いずれも十分な内容の知見を示し、最終試験の結果は合格であると審査員全員で判定した。

氏名(本籍) Md. Hasanuzzaman
(バングラデシュ人民共和国)
学位の種類 博士(工学)
学位記の番号 甲第 644 号
学位授与の日附 平成 31 年 3 月 26 日
学位論文題名 Numerical and Similarity Analysis
on Heat and Mass Transfer of Liquid
Film flowing along an Inclined
Porous Wall
(傾斜した多孔質壁に沿って流下
する液膜の熱及び物質移動に関す
る数値計算及び相似解)

論文審査委員

(主査)	佐賀大学	教授	宮 良 明 男
(副査)	〃	〃	光 武 雄 一
〃	〃	〃	木 上 洋 一
〃	〃	准教授	仮 屋 圭 史

論文内容の要旨

Interfacial wave behavior and flow characteristics of falling liquid films on an inclined porous wall have been studied by means of a numerical simulation. Basic equations are discretized on a staggered grid fixed on a physical space. Using the Navier-Stokes and Darcy-Brinkman equations in the film and porous layer, respectively, the problem is reduced to study of the evolution equation for the free surface of the liquid film derived through a long-wave approximation. Interfacial boundary conditions are treated with an originally proposed method and the wave behavior can be calculated accurately. Small artificial perturbations given at the inflow boundary grow rapidly and then the amplitude of the waves approaches to developed waves. Calculations have been performed in the wide range of physical parameters, in particular for inclined porous wall.

Heat and mass transfer for liquid evaporation along a vertical plate covered with a thin porous layer has been investigated. The continuity, momentum, energy and mass balance equations, which are coupled nonlinear partial differential equations are reduced to a set of two nonlinear ordinary differential equations and solved analytically and numerically by using shooting technique in MATLAB. The effect of various parameters like the Froude number, the porosity, the Darcy number, the Prandtl number, the Lewis number and the driving parameters on the flow, temperature and concentration profiles are presented and discussed. It is clearly viewed that the heat transfer performance is enhanced by the presence of a porous layer. The local Nusselt number and the local Sherwood numbers are computed and analyzed both numerically and graphically.

Similarity solution of heat and mass transfer for the falling film flow on a porous medium in presence of heat

generation or absorption has been modeled by Darcy-Brinkman equations and solved by using similarity technique. Heat generation, thermal radiation and chemical reaction effects are considered. By using appropriate transformations, the governing nonlinear partial equations are transformed into coupled nonlinear ordinary differential equations. Graphs are decorated to explore the influence of physical parameters on the non-dimensional velocity, temperature and concentration distributions. The local Nusselt number and the local Sherwood number are computed and analyzed numerically.

Effect of thermal radiation and chemical reaction on heat and mass transfer flow over a moving porous sheet with suction and blowing has been investigated. Thermal radiation and chemical reaction effects are considered. By using appropriate transformations, the governing nonlinear partial equations are transformed into coupled nonlinear ordinary differential equations. Graphs are decorated to explore the influence of physical parameters on the non-dimensional velocity, temperature and concentration distributions. The skin friction, the local Nusselt number and the local Sherwood number are computed and analyzed numerically.

論文審査結果の要旨

壁面上の液膜流は、発電所のボイラや復水器、冷凍機の蒸発器や凝縮器、化学プラントの蒸留塔、また塗装や皮膜形成その他さまざまな製造プロセスなど、工業的に広く利用されている。また、壁面の濡れ性を高める目的などで壁面に多孔質体が形成され、その内部や上部を液膜が流れる現象も多くみられる。

本研究は、そのような液膜流に関し、数値計算法を適用した研究、また数学的な解析法を用いた研究を行い、液膜流の流動や熱伝達、物質伝達の特性に関して詳細な知見を得ている。

第1章では、研究の背景が説明されるとともに、関連する過去の研究論文のレビューが詳細に行われている。本研究では、数値計算と理論解析の異なる手法を用いるため、それぞれについて基礎的な内容から先端的な内容までを説明している。

第2章では、独自に開発した数値計算プログラムを用いて、液膜表面に波が発生する波状流下液膜の計算が行われている。計算は傾斜した多孔質壁面を流下する波状液膜を対象とし、多孔質内の液の流れは Darcy の法則を適用して計算している。平滑面を流下する波状液膜に観察される孤立波前方の表面張力波が多孔質壁を流下する液膜で現れないことなど、多孔質壁による表面波への影響が示されるとともに、多孔質壁内を含む流れ全体の速度分布から流動特性を考察している。多孔質体内部の速度は遅くなり、壁面でのせん断力に影響が表れるが、気液界面近くの速度の大きさは平滑面上の液膜流と一致する。

第3章では、第2章で取り扱った波状液膜流が壁面から加熱、または冷却される場合の特性を示している。

第4章では、鉛直な薄い多孔質壁面を蒸発しながら流下する層流液膜に関して、相似解を用いた解析が行われている。現象を簡易化した物理モデルを示し、連立偏微分方程式で表される支配方程式を相似変数を用いて常微分方程式に相似変換する手法が詳細に説明されている。常微分方程式を数値的に計算した結果から、Froude 数や Darcy 数, Prandtl 数, Lewis 数が速度分布や温度分布、濃度分布に及ぼす影響を詳細に考察している。例えば、Darcy 数が小さくなると速度が遅くなり、それによって壁面での温度勾配が小さくなる流れ場と温度場の両方に作用する効果などが示されている。

第5章では、多孔質内で発熱や吸熱がある場合について、第4章と同様に相似変換を用いた解析が行われている。Froude 数や Darcy 数, Prandtl 数の影響に加え、発熱または吸熱による温度分布の変化を詳細に示している。

第6章では、スロットから多孔質壁が引き伸ばされながら移動する場合の流れと熱および物質移動が取り扱われている。ここでも相似変換が有効に適用され、境界層内の流れ場および温度場の解析が行われている。ここでは、温度や濃度変化による密度変化が流れ場に及ぼす影響が加えられており、エネルギー式にはふく射伝熱の項も加えられ、熱伝達および物質伝達の特性が詳細に示されている。

第7章では、本研究で取り扱った液膜流の解析結果の総括が行われると共に、今後の研究課題、方向性に関する提言を行っている。

本研究で得られた成果は、独創的な新しい結果を含んでおり、工業的に広く応用できるものである。

平成31年2月1日に実施した博士論文公聴会では、これらの内容が分かりやすく丁寧に説明され、質問に対しても適切な回答がなされた。なお、本研究の内容は4件の査読付き Journal 論文に掲載されるとともに、2件の国際会議で発表されている。

以上のことより、本論文は博士（工学）の学位を授与するに値すると判断され、審査員全員の一致で合格と判定された。

令和元年度理工学部
集報・サイエンテック編集専門委員会

委員長	市川尚志	(数理部門)
委員	山内一宏	(物理学部門)
	上田俊	(情報部門)
	江良正直	(化学部門)
	今井康貴	(機械工学部門)
	福本尚生	(電気電子工学部門)
	李海峰	(都市工学部門)

令和元年6月20日 発行

編集兼 〒840-8502 佐賀市本庄町1
発行者 佐賀大学理工学部

Reports of the Faculty of Science and Engineering,
Saga University, Vol. 48, No.1, June, 2019

Contents

Z ₃ -symmetric lattice QCD simulations at finite chemical potentialHiroaki KOUNO.....	1
Spectral distributions of distance-two graphs of homogeneous trees from a viewpoint of quantum probabilityYuji HIBINO.....	5
Summary and examination of doctoral thesis.....	9