

ご 案 内

「佐賀大学理工学集報」は毎年2回発行されます。
発行の期日は下記のようになっています。

記

各 巻	第 1 号	原稿締切	5 月 1 日
		発行	6 月20日
	第 2 号	原稿締切	11月 1 日
		発行	12月20日

INFORMATION

“Reports of Science and Engineering, Saga University” is published two times a year. The important dates are as follows:

the closing date for No.1, May 1,

the date to be published, June 20,

and

the closing date for No.2, November 1,

the date to be published, December 20.

佐 賀 大 学

理 工 学 集 報

第44巻 第2号

目 次

Golden number and an angle bisector of a triangle.....	石橋 真・神崎 正則...	1
ローラン級数環と同型な量子ウォーク.....	遠藤 隆...	9
博士論文要旨及び審査要旨公表.....		17

平成27年12月

佐賀大学大学院工学系研究科

【お詫び】

第44巻第2号に掲載の論文

「Golden number and an angle bisector of a triangle

.....石橋真・神崎 正則」(1～8ページ)

については、担当者の編集ミスにより誤った原稿が掲載されてしまったため、石橋先生及び神崎先生からの申し出により、投稿を取り消すこととさせていただきます。

ローラン級数環と同型な量子ウォーク

遠藤 隆*

Quantum Walking Isomorphic to Laurent Series Ring

By
Takasi ENDO

Abstract: A simple continuous-time quantum walk system on the one-dimensional lattice space is isomorphic to Laurent series ring. Time development of the quantum walker is calculated in terms of simple algebraic operations on the ring.

Key words: Quantum walk, Laurent series ring

1. はじめに

量子ウォークは、ランダムウォークの量子版として興味を持たれてきたが、現在では様々な量子系の現象を記述する単純なモデルとして興味を持たれ、さらに量子計算への応用が期待されている。¹⁻³⁾

我々は、今まで初期状態に拡張がある場合の運動や、量子ウォークエコーなどの現象について調べてきた。この計算は両側 $\mathbb{Z}$ 変換を用いることで単純化できることを既に報告している。⁴⁾

両側 $\mathbb{Z}$ 変換は、変数 z が複素数なのでローラン級数になっている。そこで、このことを一般化し、 z を形式的な変数 (不定元) とみなして、そのローラン級数環を考え、この環における計算を数学的に根拠付ける。

そのため、まず量子ウォークの運動を表現する量子状態 (ケットベクトル) を変換する演算子の集合が、ローラン級数環と同じ代数構造を持ち、環として同型になっていることを示す。次に、既に得られたいくつかの結果について、ローラン級数環における初等的な計算を実行することで、より簡単に同一の結果が得られることを示す。特に量子ウォークエコーの導出が極めて簡単に説明できることを示す。

2. 量子ウォーク系

離散的二次元空間の連続時間量子ウォークを表現するヒルベルト空間を考える。

まず、状態 (ケットベクトル) 空間として、一次元格子上のベクトル空間を考え、

$$L = \left\{ \sum_{k \in \mathbb{Z}} c_k |k\rangle \mid k \in \mathbb{Z}, c_k \in \mathbb{C} \right\} \quad (1)$$

と表す。ここで、 $\mathbb{Z} = \{\dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots\}$ は整数の指標集合であり、 $\mathbb{C}$ は複素数体である。 $|k\rangle$ は、ケットベクトルである。物理的なモデルとしては、格子点の間隔が等しいと想定することが多いが、以下の議論では特にこの仮定は必要ない。

状態空間の双対空間は、

$$L^* = \left\{ \sum_{k \in \mathbb{Z}} c_k^* \langle k| \mid k \in \mathbb{Z}, c_k \in \mathbb{C} \right\} \quad (2)$$

と表すことができる。これによって、内積を次のように定義する。

$$\begin{aligned} \left(\sum_{k \in \mathbb{Z}} a_k |k\rangle, \sum_{k \in \mathbb{Z}} b_k |k\rangle \right) &= \sum_{k \in \mathbb{Z}} a_k^* \langle k| \cdot \sum_{k \in \mathbb{Z}} b_k |k\rangle \\ &= \sum_{k, k' \in \mathbb{Z}} a_k^* b_k \langle k'|k\rangle = \sum_{k \in \mathbb{Z}} a_k^* b_k \end{aligned} \quad (3)$$

ここで基底 $\{|k\rangle | k \in \mathbb{Z}\}$ は、正規直交基底なので、 $\langle k'|k\rangle = \delta_{k'k}$ である。

次に、この状態空間に作用する演算子の集合を考える。量子ウォークにおいて基本となる演算子は、次の二つのシフト演算子である。

$$\begin{aligned} \hat{z} &= \sum_{k \in \mathbb{Z}} |k-1\rangle \langle k| \\ \hat{z}^{-1} &= \sum_{k \in \mathbb{Z}} |k+1\rangle \langle k| \end{aligned} \quad (4)$$

この演算子は、格子点上を一つ左または右にシフトする。重要なことは、この演算子は、全ての格子点において一様に作用するというであり、その結果、交換可能な演算子となっている。ただし格子点が有限の場合は、調和振動子の生成消滅演算子と同様に非可換である。

また、容易に分かるが、二つのシフト演算子は、互いに逆演算になっている。すなわち、 $\hat{z}^{-1}\hat{z} = \hat{z}\hat{z}^{-1} = 1$ である。このことによりシフト演算子の形式的級数の集合は、可換環を構成することがわかる。

この二つのシフト演算子を不定元とする形式的ローラン級数環を、

$$\mathbb{C}((\hat{z})) = \left\{ \sum_{n \in \mathbb{Z}} a_n \hat{z}^n \mid a_n \in \mathbb{C} \right\} \quad (5)$$

と表す。

任意の基底状態 $|k\rangle \in L$ は、原点 $|0\rangle \in L$ にシフト演算子を作用させて、

$$|k\rangle = \hat{z}^{-k} |0\rangle \quad (6)$$

によって得られる。したがって、状態空間は、原点を通る $\mathbb{C}((\hat{z}))$ の軌跡 $L = \mathbb{C}((\hat{z}))|0\rangle$ に一致する。また、双対空間についても、 $L^* = \langle 0 | \mathbb{C}((\hat{z}))$ となる。すなわち、

$$\langle k| = \langle 0 | \hat{z}^k \quad (7)$$

である。

任意のケットベクトル $|\alpha\rangle = \sum_{k \in \mathbb{Z}} a_k |k\rangle$ は、原点とシフト演算子で表すことができる。すなわち、

$$|\alpha\rangle = \sum_{k \in \mathbb{Z}} a_k |k\rangle = \sum_{k \in \mathbb{Z}} a_k \hat{z}^{-k} |0\rangle \quad (8)$$

ブラベクトルも同様である。

$$\langle \alpha| = \sum_{k \in \mathbb{Z}} \langle k| a_k^* = \sum_{k \in \mathbb{Z}} \langle 0| \hat{z}^k a_k^* \quad (9)$$

また、

$$\langle k|\alpha\rangle = \langle 0| \hat{z}^k \sum_{k' \in \mathbb{Z}} a_{k'} \hat{z}^{-k'} |0\rangle = \sum_{k' \in \mathbb{Z}} a_{k'} \delta_{kk'} = a_k \quad (10)$$

となることから、 $\langle k|$ は、 $-k$ 次の項の係数を引き出す演算になっていることがわかる。

内積は、 $|\beta\rangle = \sum_{n \in \mathbb{Z}} b_n \hat{z}^{-n} |0\rangle$ として、

$$\langle \alpha|\beta\rangle = \langle 0| \sum_{n \in \mathbb{Z}} a_n^* \hat{z}^n \sum_{n \in \mathbb{Z}} b_n \hat{z}^{-n} |0\rangle = \sum_{n \in \mathbb{Z}} a_n^* b_n \quad (11)$$

で与えられる。

以上のことから、 $\mathbb{C}((\hat{z}))$ が、次のように通常の加法及び乗法による可換環の構造を持つことがわかる。

$$\text{零元} \quad 0 = \sum_{n \in \mathbb{Z}} 0 \hat{z}^n \in \mathbb{C}((\hat{z})) \quad (12)$$

$$\text{単位元} \quad 1 = \hat{z}^0 \in \mathbb{C}((\hat{z})) \quad (13)$$

$$\text{加法} \quad \sum_{n \in \mathbb{Z}} a_n \hat{z}^n + \sum_{n \in \mathbb{Z}} b_n \hat{z}^n = \sum_{n \in \mathbb{Z}} (a_n + b_n) \hat{z}^n \quad (14)$$

$$\text{乗法} \quad \sum_{n \in \mathbb{Z}} a_n \hat{z}^n \cdot \sum_{n \in \mathbb{Z}} b_n \hat{z}^n = \sum_{n \in \mathbb{Z}} \sum_{r \in \mathbb{Z}} a_r b_{n-r} \hat{z}^n \quad (15)$$

3. ローラン級数環

シフト演算子 $\hat{z}, \hat{z}^{-1}$ をそれぞれ形式的な複素変数 z, z^{-1} に置き換えることで、通常のローラン級数環 $\mathbb{C}((z))$ を得る。両者は同型である。すなわち

$$\mathbb{C}((\hat{z})) \cong \mathbb{C}((z)) \quad (16)$$

となる。

$\mathbb{C}((z))$ が作用するベクトル (状態) 空間を

$$L(z) = \left\{ \sum_{k \in \mathbb{Z}} c_k |k\rangle \mid k \in \mathbb{Z}, c_k \in \mathbb{C} \right\} \quad (17)$$

と表すことにする。ここで,

$$|k\rangle = z^{-k} |0\rangle = z^{-k} \quad (18)$$

であり, ただの有理式に過ぎないが, $|k\rangle \in L$ との対応関係を明示するために, あえて括弧 $[\]$ を用いて $|k\rangle$ と表した。また, $|0\rangle = z^0 = 1$ なので, $L(z) = \mathbb{C}((z)) |0\rangle$ は, 実は $\mathbb{C}((z))$ と同じ集合であるが, 役割が異なるので, あえてこのように表記する。

双対空間も同様に,

$$[k] = [0] |z^k \quad (19)$$

と定義すると,

$$L^*(z) = \left\{ \sum_{k \in \mathbb{Z}} c_k^* [k] \mid k \in \mathbb{Z}, c_k \in \mathbb{C} \right\} \quad (20)$$

と表すことができる。

なお, $[0] |z^k = z^k$ ではないので, 注意が必要である。 $|0\rangle = 1 \in \mathbb{C} \subset \mathbb{C}((z))$ であるが, $[0]$ は, 0 次の係数を引き出す射影演算子であって, 複素数や変数そのものとは全く異なるものである。具体的には, $[0]$ は,

$$[0] = \frac{1}{2\pi i} \oint dz \frac{1}{z} \quad (21)$$

と表すことが可能であり, $\mathbb{C}((z))$ に属さないことは明らかである。(なお, 本論文においては実際にこの計算を実行する必要はない。)

基底 $\{|k\rangle \mid k \in \mathbb{Z}\}$ の直交性は次のように示される。

$$[k' | k] = [0 | z^{k'} z^{-k} | 0] = [0 | z^{k'-k} | 0] = \delta_{k'k} \quad (22)$$

状態空間とその双対空間は同型であるが, 両者の要素を同時に用いて計算するときは, 明確に区別しなければならない。混乱を避けるために, 単なる複素数や複素変数であっても, 括弧 $[\]$ を用いて表記することにする。

さて, ローラン級数の集合 $\mathbb{C}((z))$ も, 次のような可換環の構造を持つ。

$$\text{零元} \quad 0 = \sum_{n \in \mathbb{Z}} 0 z^n \in \mathbb{C}((z)) \quad (23)$$

$$\text{単位元} \quad 1 = z^0 \in \mathbb{C}((z)) \quad (24)$$

$$\text{加法} \quad \sum_{n \in \mathbb{Z}} a_n z^n + \sum_{n \in \mathbb{Z}} b_n z^n = \sum_{n \in \mathbb{Z}} (a_n + b_n) z^n \quad (25)$$

$$\text{乗法} \quad \sum_{n \in \mathbb{Z}} a_n z^n \cdot \sum_{n \in \mathbb{Z}} b_n z^n = \sum_{n \in \mathbb{Z}} \sum_{r \in \mathbb{Z}} a_r b_{n-r} z^n \quad (26)$$

なお, 加法や乗法の演算は, それぞれの環ごとに異なる記号を用いるべきであるが, 混乱が生じない限り, 同一の記号を用いる。

ブラベクトルやケットベクトルに対応するものは,

$$|\alpha\rangle = \sum_{n \in \mathbb{Z}} a_n z^{-n} |0\rangle$$

$$[\alpha] = [0 | \sum_{n \in \mathbb{Z}} a_n^* z^n \quad (27)$$

となる。これを用いて, 内積を求めると,

$$[\alpha | \beta] = [0 | \sum_{n \in \mathbb{Z}} a_n^* z^n \cdot \sum_{n \in \mathbb{Z}} b_n z^{-n} | 0] = \sum_{n \in \mathbb{Z}} a_n^* b_n \quad (28)$$

となり, $\mathbb{C}((\hat{z}))$ と同じ結果になる。

同じ内積が得られるので, ヒルベルト空間としても $\mathbb{C}((\hat{z})) \cong \mathbb{C}((z))$ と言える。ただし, 一般のヒルベルト空間で用いる演算子が全て含まれているわけではない。後で用いるが, 次の微分演算子

$$\sum_{k \in \mathbb{Z}} |k\rangle k [k] = z \frac{\partial}{\partial z} \quad (29)$$

は, $\mathbb{C}((z))$ に含まれない。ここで考えている空間的に一様な量子ウォークでは, このような演算子は含まれない。しかし, 物理量の期待値を求める場合やポテンシャルを導入する場合など, 計算の範囲を拡げるためには, このような演算子も含める必要があるが, その場合は非可換環になる。

4. 応用

以上に述べたことから、量子ウォーク系の運動は、ローラン級数環に置き換えて計算することができる。しかも、以下に挙げる例に示されるように、ローラン級数環における計算は、四則計算などの単純な計算になる。

最も単純な量子ウォークのハミルトニアンは、

$$\hat{H} = \frac{\hbar}{2} (\chi \hat{z} + \chi^* \hat{z}^{-1}) \quad (30)$$

であるが、これは、次のようにローラン級数に写される。

$$\hat{H} = \frac{\hbar}{2} (\chi \hat{z} + \chi^* \hat{z}^{-1}) \mapsto H = \frac{\hbar}{2} (\chi z + \chi^* z^{-1}) \quad (31)$$

量子ウォークの運動（時間発展）を与えるユニタリ演算子は、次のように写される。

$$\hat{U}(t) = \exp\left(-i \frac{t}{\hbar} \hat{H}\right) \mapsto U(t) = \exp\left(-i \frac{t}{\hbar} H\right) \quad (32)$$

χ が純虚数の場合 $\chi = i\Omega$ とおくと、

$$H = \frac{1}{2} i \hbar \Omega (z - z^{-1}) \quad (33)$$

なので

$$U(t) = \exp\left(-i \frac{Ht}{\hbar}\right) = \exp\left(\frac{1}{2} (z - z^{-1}) \Omega t\right) \quad (34)$$

となる。なお、次のベッセル関数の公式

$$\exp\left(\frac{1}{2} (z - z^{-1}) \Omega t\right) = \sum_k z^k J_k(\chi t) \quad (35)$$

を用いると、

$$U(t) = \sum_k z^k J_k(\chi t) \quad (36)$$

となる。これは実数係数の級数であり、

$U(t) \in \mathbb{R}((z)) \subset \mathbb{C}((z))$ となっている。すなわ

ちユニタリー変換が $\mathbb{C}((z))$ に含まれるため、時間発展が全て級数の単純な積の計算に帰着することになる。

元の量子ウォーク系に戻すと、

$$\hat{U}(t) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} \hat{z}^k J_k(\chi t) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} \sum_{k' \in \mathbb{Z}} J_k(\chi t) |k' - k\rangle \langle k'| \quad (37)$$

である。

以下では、この場合の運動

$$|\Psi(t)\rangle = U(t) |\Psi(0)\rangle \quad (38)$$

を考察する。（これ以外に、ユニタリー変換が $\mathbb{C}((z))$ に含まれるものは無数にあるが、本論文では簡単な例のみ取りあげる。）

(1) 重心の運動

原点から出発する量子ウォークは、左右対称に確率密度が広がるので、重心は原点に留まる。すなわち、

$$\langle k \rangle = \sum_{k \in \mathbb{Z}} k |J_k(\Omega t)|^2 = 0 \quad (39)$$

である。この計算ではベッセル関数の公式を利用しているが、ローラン級数環の計算に置き換えると、以下のようにもっと簡単になる。

まず、

$$z \frac{\partial}{\partial z} z^k |0\rangle = k z^k |0\rangle \quad (40)$$

であるから、演算子 $z \frac{\partial}{\partial z}$ の期待値が k の期待値になることがわかる。すなわち、

$$\langle k \rangle = [0 | U^{-1}(t) \left(z \frac{\partial}{\partial z} \right) U(t) | 0] \quad (41)$$

となる。この計算は、単純な級数の微分計算であり、

$$\begin{aligned} & U^{-1}(t) z \frac{\partial}{\partial z} U(t) \\ &= \exp \left(-\frac{1}{2} (z - z^{-1}) \Omega t \right) z \frac{\partial}{\partial z} \exp \left(\frac{1}{2} (z - z^{-1}) \Omega t \right) \\ &= \frac{1}{2} \Omega t (z + z^{-1}) \end{aligned} \quad (42)$$

と求められる。

明らかに 0 次の項が存在しないので、

$$\langle k \rangle = \frac{1}{2} \Omega t [0 | (z + z^{-1}) | 0] = 0 \quad (43)$$

となる。ベッセル関数の公式を用いることなく、同じ結果が得られた。

(2) 分散の時間変化

量子ウォークの確率密度の分散、すなわち k の 2 次のモーメントは、

$$\left(z \frac{\partial}{\partial z} \right)^2 z^k | 0] = k^2 z^k | 0] \quad (44)$$

という関係を利用して

$$\langle k^2 \rangle = [0 | U^{-1} \left(z \frac{\partial}{\partial z} \right)^2 U | 0] \quad (45)$$

によって求められる。すると、

$$\begin{aligned} & U^{-1}(t) \left(z \frac{\partial}{\partial z} \right)^2 U(t) \\ &= \frac{1}{2} \Omega t (z - z^{-1}) + \left(\frac{1}{2} \Omega t \right)^2 (z^2 + 2z^0 + z^{-2}) \end{aligned} \quad (46)$$

となるので、0 次の項の係数から、

$$\langle k^2 \rangle = \frac{1}{2} (\Omega t)^2 \quad (47)$$

が得られ、分散が時間の自乗に比例していることがわかる。(古典的なランダムウォークでは、時間の 1 乗に比例するので、量子ウォークはランダムウォークより速く拡散する。)

この計算も、単純な計算になっていて、ベッセル関数の公式を必要としない。

古典的な確率分布において、級数である確率母関数を用いてモーメントを計算することがあるが、ここで示したように、量子ウォークにおいては、ローラン級数であるユニタリー変換が一種の母関数の役割を果たしていることがわかる。

(3) 初期状態に拡がりがある場合

初期状態に拡がりがある場合は、様々な位置から拡がる波動関数が干渉するため、時間発展が著しく異なる。

初期状態が原点に局在している場合は、

$$|\Psi(0)\rangle = |0\rangle = 1 \quad (48)$$

としたが、初期状態として $2N+1$ 個の点に拡がっている波束を考える。すなわち、

$$|\Psi(0)\rangle = \frac{1}{\sqrt{2N+1}} \sum_{k=-N}^N |k\rangle = \frac{1}{\sqrt{2N+1}} \sum_{k=-N}^N z^{-k} \quad (49)$$

すると、重心は、

$$\langle k \rangle = [\Psi(t) | z \frac{\partial}{\partial z} | \Psi(t)] \quad (50)$$

を計算することになる。

$$\begin{aligned} z \frac{\partial}{\partial z} |\Psi(t)\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2N+1}} z \frac{\partial}{\partial z} e^{\frac{1}{2}\Omega t(z-z^{-1})} \sum_{k=-N}^N z^k \\ &= \frac{1}{2} \Omega t (z+z^{-1}) \sum_{k=-N}^N z^k + \sum_{k=-N}^N k z^k e^{\frac{1}{2}\Omega t(z-z^{-1})} \end{aligned} \quad (51)$$

となるので、

$$\begin{aligned} \langle k | &= \langle \Psi(t) | z \frac{\partial}{\partial z} | \Psi(t) \rangle \\ &= \langle 0 | \frac{1}{2N+1} \sum_{k=-N}^N z^{-k} \left(\frac{1}{2} \Omega t (z+z^{-1}) \sum_{k=-N}^N z^k + \sum_{k=-N}^N k z^k \right) | 0 \rangle \\ &= \frac{1}{2N+1} \langle 0 | \left(\frac{1}{2} \Omega t (z+z^{-1}) \sum_{k=-N}^N z^{-k} \sum_{k=-N}^N z^k + \sum_{k=-N}^N z^{-k} \sum_{k=-N}^N k z^k \right) | 0 \rangle \\ &= \frac{1}{2N+1} \left((2N) \Omega t + N \sum_{k=-N}^N k \right) \\ &= \frac{2N}{2N+1} \Omega t \end{aligned} \quad (52)$$

となる。

このように、初期状態が広がっていると、重心が一定の速度で一方向に進むことがわかる。⁶⁾

(4) 等速度運動

初期状態として、

$$|\Psi(0)\rangle = \frac{1}{\sqrt{2N+1}} \sum_{k=-N}^{+N} e^{ik\theta} |k\rangle \quad (53)$$

を考える。これは、 $A = (2N+1)^{-1/2}$ として、

$$|\Psi(0)\rangle = A \sum_{k=-\infty}^{+\infty} e^{ik\theta} z^{-k} |0\rangle \quad (54)$$

と書ける。時間発展は、

$$|\Psi(t)\rangle = A e^{\frac{1}{2}\Omega t(z-z^{-1})} \sum_{k=-N}^{+N} e^{ik\theta} z^{-k} \quad (55)$$

で与えられる。

このときの重心の期待値は、

$$\begin{aligned} \langle k \rangle &= |A|^2 \langle 0 | e^{-\frac{1}{2}\Omega t(z-z^{-1})} \sum_{k=-N}^{+N} (e^{i\theta} z)^k z \frac{\partial}{\partial z} e^{\frac{1}{2}\Omega t(z-z^{-1})} \sum_{k=-N}^{+N} (e^{-i\theta} z)^{-k} | 0 \rangle \\ &= |A|^2 \langle 0 | \sum_{k=-N}^{+N} (e^{-i\theta} z)^k \left(\frac{\Omega t}{2} (z+z^{-1}) \sum_{k=-N}^{+N} (e^{-i\theta} z)^{-k} + \sum_{k=-N}^{+N} (-k) e^{i\theta} z^{-k} \right) | 0 \rangle \\ &= \frac{2N}{2N+1} (e^{i\theta} + e^{-i\theta}) \frac{1}{2} \Omega t + \sum_{k=-N}^{+N} (-k) \\ &= \frac{2N}{2N+1} \Omega t \cos \theta \end{aligned} \quad (56)$$

となり、

$$v = \frac{2N}{2N+1} \Omega \cos \theta \quad (57)$$

の速度で運動することになる。当然のことながら、 $\theta=0$ とすれば、(3) の結果と同じになる。⁶⁾

$N \gg 1$ のときは、 $v = \Omega \cos \theta$ となる。

このことから、隣接格子点間の位相差がある場合、その干渉効果が量子ウォークの速度を決めていることがわかる。

(5) 量子ウォークエコー

上で述べた通り、量子ウォークの運動は、干渉効果があるため、位相変化に対して敏感である。我々は、このことを利用して、量子ウォークにおける時間反転と等価な現象を見出している。⁷⁾

位相反転パルス演算子に相当する演算子として符号反転パルス P を次のように定義する。

$$P \Psi(z) = \Psi(-z) P \quad (58)$$

すなわち、級数展開の変数 z を $-z$ に置き換える操作である。右辺に P を残しているのは、級数が複数の級数の積になっている場合、たとえば、

$$\begin{aligned} PB(z)A(z)|0\rangle &= B(-z)PA(z)|0\rangle \\ &= B(-z)A(-z)|0\rangle \end{aligned} \quad (59)$$

となるからである。

今考えているユニタリー変換は、

$$U(t) = \exp\left(\frac{1}{2}(z-z^{-1})\Omega t\right) \quad (60)$$

であるので、これにこの操作を行うと、

$$\begin{aligned}
 P U(t) &= P \exp\left(\frac{1}{2}(z - z^{-1})\Omega t\right) \\
 &= \exp\left(-\frac{1}{2}(z - z^{-1})\Omega t\right) P = U(-t)P
 \end{aligned} \tag{61}$$

となる。すなわち、 z の符号反転が時間の符号反転と等価になっている。

なおスピンエコーでは、原子核や電子のスピンを磁場 H_z 中で反転することで、自由歳差運動のハミルトニアンが反転する。これは、磁場が反転した場合と等価である。⁸⁾ いずれにしても、ハミルトニアンが反転し、スピンは逆向きに歳差運動を始める。これは、ユニタリー変換において、時間の符号を反転することと等しい。

量子ウォークエコーにおいても、位相反転によってハミルトニアンが反転しており、スピンエコーと類似の現象になっていることがわかる。

以上のことから、時間 t_1 だけ自由にウォークした後、パルスを作用させると、その後のウォークは

$$U(t)P U(t_1) = U(t - t_1)P \tag{62}$$

となる。このことから、符号反転パルスを作用させてから、それまでの経過時間と同じだけ時間が経過すると、すなわち $t = t_1$ では、

$$U(t_1)P U(t_1) = U(0)P = P \tag{63}$$

となり、元の状態と（各項の係数の符号を除いて）同じになる。符号を反転しても、その瞬間の確率分布は係数の絶対値の自乗で与えられるので同じになるから、元の分布に戻ったことになる。

このように、ローラン級数環を用いた量子ウォークエコーの導出が極めて簡単になることは、注目に値する。

5. ま と め

1次元連続時間量子ウォーク系をローラン級数環に置き換えることで、計算が簡単になることがわかった。ここで取りあげた例だけでなく、様々なハミ

ルトニアンや初期状態に対しても応用が可能である。

今後の展開としては、離散時間量子ウォーク系を、複素数体上の 2×2 行列から成る線形変換によって記述することが考えられる。この場合は、有限時間（ステップ）では有限次数となるので、適当な冪乗を掛けることで多項式環に変換することができる。また、級数の次数も有限になるため、数式処理ソフトを用いて計算することが可能になる。

離散時間量子ウォークの場合は、ローラン級数の形式的変数 z を両側 Z 変換の変数と見なすと、遅延回路によって実装することが可能になるので、量子ウォークと等価な電子回路を製作することも可能になるであろう。無限級数になる場合は、再帰形のフィルタを考えることになるであろう。

また連続時間量子ウォークの場合は、変数 z を複素平面の単位円上に制限することで、周波数変調と同じ表式が得られるので、周波数変調回路によってシミュレーションすることも可能になる。

このように、同一構造を持つ代数を利用して量子力学を記述することは、計算の見通しを立てやすくするので、重要な手法であり、また等価回路によるシミュレーション手法の開発の手がかりが得られる。

参 考 文 献

- 1) 今野紀雄：『量子ウォークの数理』，（産業図書，2008年）
- 2) Salvador Elias Venegas-Andraca: "Quantum Walks for Computer Scientists", (Morgan & Claypool, 2008).
- 3) Kia Manouchehri, Jingbo Wang: "Physical Implementation of Quantum Walks", (Springer, 2014, Berlin).
- 4) 遠藤 隆, 香月健一郎, 豊島耕一, 平良 豊: 「 Z 変換による量子ウォークの計算」, 佐賀大学理工学部集報, 第38巻, 第2号, 1~6頁 (2009)
- 5) T. Endo, S. Osano, K. Toyoshima and Y. Hirayoshi: "Ballistic Quantum Walk in a Discrete 1D System", J. Phys. Soc. Jpn., Vol. 78, No. 6 (2009) p.064004.
- 6) T. Endo, K. Katsuki, K. Toyoshima, and Y. Hirayoshi: "Ballistic Quantum Walk of a Phase-Modulated Wave Packet", J. Phys. Soc. Jpn., Vol. 81, No.3 (2012), 034002.
- 7) T. Endo: "Quantum Walk Echoes", J. Phys. Soc. Jpn., Vol.83, (2014) 044007.
- 8) A. Abragam: *The principle of nuclear magnetism*, (Oxford Univ. Press, 1961, Oxford).

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 (国籍) 孟 冬冬 (中国)
 学位の種類 博士 (理学)
 学位記の番号 甲第 565 号
 学位授与の日附 平成 27 年 9 月 24 日
 学位論文題名 Raman Spectroscopic Study
 on the Ferroelectricity in Multiferroic
 Materials CuO and $\text{Co}_2(\text{OH/D})_3\text{X}$ (マルチフェ
 ロ物質 CuO 及び $\text{Co}_2(\text{OH/D})_3\text{X}$ の強誘電性に関
 するラマン分光研究)

論文審査員

(主査)	佐賀大学	教 授	鄭 旭光
(副査)	"	"	郭 其新
"	"	"	杉山 晃
"	"	准教授	真木 一
"	"	"	東 純平

論文内容の要旨

磁性 (フェロマグネチック) と強誘電性 (フェロエレクトロニック) が共存するマルチフェロ現象は革新的なデバイスを産出できることから関心を持たれている。実在するマルチフェロ物質が限られている中、近年佐賀大学グループはすでに磁性物質として確立したコバルト系水酸塩化物 $\text{Co}_2(\text{OH/D})_3\text{X}$ ($\text{X}=\text{Cl}, \text{Br}$) が新たに強誘電性を併せ持つ可能性を示唆した。しかし、強誘電性の確立及びメカニズムの解明が望まれている。また、佐賀大学グループが過去に強誘電異常を報告し、後に最高の強誘電転移温度 ($T_c = 230 \text{ K}$) を持つマルチフェロ物質として確立された CuO においてもマルチフェロのメカニズムは完全に解明されていない。

本論文は、ラマン分光等により CuO およびコバルト系水酸塩化物の格子と磁性の相関を精査し、これら物質のマルチフェロ性の確立及び解明を目的としている。

本論文は全 5 章で構成されている。第 1 章では序論として本論文に関係する理論背景及び関係物質の構造と磁性について記述した後、本研究の目

的と意義が記されている。第 2 章ではラマン分光の原理と応用について記述した後、本論文に用いた CuO 単結晶及び $\text{Co}_2(\text{OH/D})_3\text{X}$ 多結晶体のラマン低温測定法が記述されている。第 3 章では CuO 単結晶の誘電率測定結果をふまえ、77K から室温までラマン分光特性を調査し、強誘電転移の際に同時に起こった格子振動の異常変化をラマン分光測定により初めて見出している。さらに低温磁気秩序相において振動周波数と強度が $(1 - T/T_c)^{2\beta}$

($T_c = 170 \text{ K}$, $\beta = 0.35$) にしたがって変化する格子モードの出現を明らかにし、強い磁気・格子相関の存在を示している。強誘電転移に伴う格子振動の詳細分析から磁気・格子強相関が CuO₆ 八面体にひずみをもたらし、強誘電性を引き起こすと推察している。第 4 章では新規マルチフェロ物質として提唱された $\text{Co}_2(\text{OD})_3\text{Cl}$ について、 $\text{Co}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$ と重水素化 $\text{Co}_2(\text{OD})_3\text{Cl}$ の比較ラマン分光測定を行って、水素と重水素の秩序化を見出している。 $\text{Co}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$ ではすでに水素の部分秩序化が起こり、 $\text{Co}_2(\text{OD})_3\text{Cl}$ では同位体効果により $T_c = 230 \text{ K}$ で重水素の秩序化が起こることを明らかにしている。さらに、 $\text{Co}_2(\text{OH/D})_3\text{Br}$ 物質についても同様な結果を得ている。本論文によってコバルト系水酸塩化物の強誘電転移が立証されるとともに、重水素の秩序が強誘電転移の重要な決定要素であることを明らかにしている。さらにラマン分光の詳細解析により重水素の秩序化に伴う微小構造相転移を示唆している。第 5 章では以上の研究結果をまとめ、マルチフェロ研究領域に対する貢献と影響について述べている。

以上、本論文はラマン分光等により CuO およびコバルト系水酸塩化物の格子と磁性の相関を精査した。磁性体であるコバルト系水酸塩化物 $\text{Co}_2(\text{OH/D})_3\text{X}$ ($\text{X}=\text{Cl}, \text{Br}$) の新規強誘電転移を立証し、すでにマルチフェロ物質として知られている CuO についても磁気・格子の相関について新しい知見を得ている。本研究はマルチフェロの研

究に有用な知見が示されている。

論文審査結果の要旨

学位申請者、孟 冬冬氏に対して、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 27 年 8 月 11 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。マルチフェロとラマン分光について、特に、格子振動と磁性との関係や研究手法について問ったところ、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、口述試験から物性物理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。以上の理由により、提出された論文は、博士(理学)の学位を授与するにふさわしいものであると、審査員全員の一致によって判断した。

氏 名 (国籍) STEEVA GAILY RONDONUWU
(インドネシア共和国)
学位の種類 博士 (工学)
学位記の番号 甲第 566 号
学位授与の日附 平成 27 年 9 月 24 日
学位論文題名 Behavior of vacuum
consolidation with and without surcharge load
(真空及び真空・載荷重併用による地盤の圧密挙動)

論文審査員

(主査) 佐賀大学 教授 柴 錦 春
(副査) " " 石 橋 孝 治
" " 日 野 剛 徳
" " 准教授 末 次 大 輔
" アジア工科大学 名誉教授 Dennes T. Bergado

論文内容の要旨

一連のオエドメーター及び三軸型圧密試験により真空圧、真空圧と載荷重併用における粘性土の圧密特性を検討した。また、現場・室内の真空圧密試験結果との比較により、真空圧密における地盤中の応力状態を明らかにした。

真空圧は等方圧密応力増分であり、それにより地盤の圧密沈下とともに内向き（圧密領域中心向き）の側方変形が生じる。このような地盤変形に伴って、地盤中の水平方向の土圧は変化する。試験結果により地表から深さ約 5m まで、地盤中の水平土圧は主働土圧に近く、それ以深は主働と静止土圧の間になっていることを、初めて明らかにした。

また、圧密理論により、室内圧密時間と現場の圧密時間をマッチングする式を導いた。この式を用いて、不攪乱試料の室内圧密試験結果から現場の沈下曲線、地盤側方変形分布を予測する方法を確立した。

載荷重により、地盤の沈下とともに外向き（載荷領域から離れる）側方変位が発生する。真空圧と載荷重を併用する場合、地盤の側方変位を抑える効果がある。試験結果、圧密理論に基づいて、一定の真空圧と載荷重の割合で、地盤の側方変位が最小になる載荷重の載荷速度を決める方法(式)を提案した。

本博士論文は 5 章構成である。

第 1 章は、研究の目的、概要を述べている。

第 2 章は、真空圧、真空圧と載荷重併用における粘性土の圧密に関するリテラチャーをレビューしている。

第 3 章では、まず三軸型圧密試験装置、方法及び不攪乱有明粘土試料による試験結果を述べている。次に現場と室内真空圧密試験結果とを比較し、室内試験結果による現場沈下曲線、深さ方向の側方変形分布予測法を説明している。

第 4 章は、まず径向（水平方向）排水室内オエド

メーター圧密試験方法を記入している。次に真空圧と載荷重併用の室内オエドメーター及び三軸圧密試験結果を述べている。さらに、室内試験結果に基づいて、一定の真空圧と載荷重の割合で、地盤の側方変位を最小にする載荷重の載荷速度を決める（設計）方法を説明している。

第 5 章は、研究のまとめである。

以上のように本研究は真空圧、真空圧と載荷重併用における粘性土地盤の変形特性、変形予測法、特に真空圧と載荷重併用の場合、地盤の側方変位を最小にするために、載荷重の載荷速度の決定法の確立に貢献がある。

平成 27 年 8 月 19 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。学外審査員が本博士論文は博士学位の授与に値すると審査報告書に記述している。以上の審査結果に基づき、本博士論文は博士（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。

論文審査結果の要旨

学位申請者、Steeva Gaily Rondonuwu 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ものに対して口述試験を行うことを事前に通知し、平成 27 年 8 月 19 日に実施した。

口述試験は博士論文を中心として、これに関連のある内容について行った。真空圧と載荷重を併用する場合、地盤の変形特性及び影響要因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、口述試験から軟弱地盤改良のプレローディング工法に関して十分な知識と地盤の側方変位を最小限にする工法開発の研究に対する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 (国籍) BRUCE WILLIAM LANDER
(イギリス)
学位の種類 博士 (学術)
学位記の番号 甲第 567 号
学位授与の日附 平成 27 年 9 月 24 日
学位論文題名 The influence of Blended Learning
technology on contemporary society (現代社会におけ
るブレンデッドラーニングテクノロジーの活用効
果)

論文審査員

(主査)	佐賀大学	教授	山下	宗利
(副査)	"	"	帯屋	洋之
"	"	"	張本	燦
"	"	"	澤島	智明
"	愛知教育大学	"	倉本	哲男

論文内容の要旨

人類の進歩は、テクノロジーの発達と共に歩んでいると総括しても過言ではない。翻って、未来の社会発展の見地から、教育分野におけるテクノロジー活用論も、益々、重要性を帯びている。既にそのことは、現代社会の根本をなす重要素として認識されており、「テクノロジーと教育」の融合に関する課題は、もはや避けては通れない社会的・人類的課題を内包するとも考察できよう。

本研究は、現代社会における Blended Learning Technology の社会科学的な効果性に関する理論的・実証的研究である。換言すれば、Computer Aided Language Learning (CALL) 等を含む Blended Learning Technology を分析視点に設定し、現代社会とテクノロジーの関係・発展性を研究対象として把握した上で、その一断面を論じた研究と位置づけられる。

本研究における Blended Learning Technology とは、大学レベルの言語習得(本研究では English Learning) にテクノロジーを導入し、その学習効果を向上するための方法論・システム論として

定義される。

本研究では、第 2 章において CALL 等の Blended Learning Technology に関する先行研究を “Academic Achievement”, “Learner Autonomy”, “Lesson study”, “Technology Without the Knowhow” 等の重要概念に焦点化して丁寧な整理を行った。次に、それらの先行研究を総括した上で、当該研究の残余部分 (Gaps in the Research) には、Quizlet research が該当することが見出された。

本研究の Research Questions は以下のように設定された。

1. Blended Learning Technology (CALL 等。主として Quizlet) を導入することにより、学習者の言語スキル、及び主体的学習・学習意欲の向上 (Learner Autonomy) が図られたのか。また、その導入により TOEIC 等の客観的スコアが上昇したのか。
2. 担当の大学教師群は、Blended Learning Technology の意義・重要性を認識し、授業改善、及び Teaching の質的向上を図ることができたのか。
3. Blended Learning Technology の導入により、学習者は、生涯的・社会的視野 (時間と空間/Macro level) において、その学習の有効性を認識できたのか。

その Research Questions を補足する意味で、研究の全体構造 (理論的枠) は次頁に示す通りである。更に、その全体構造に対応して、第 3 章は、Survey 1 (主として量的研究) と Survey 2 (主として質的研究) で構成されている。

● Survey 1

ここでは、相関係数・因子分析、更にはパス解析によって分析した。結果的に Blended Learning Technology の有意性が確認された。これに加えて、自由記述回答を分析し、Text-mining 方法論によって学習者の深層心理も解析した。

● Survey 2

データ収集と分析方法論は、時間経過に従い、学習者の発達に関する自由記述回答を基本データとした。これを単なる主観的解釈にならぬように「間主観法」を前提とする KJ methods によって、それぞれ後期の week 5, week 10, week 15 を分析し、各 week の比較考察を加えた。

以上より第 4 章では、Quizlet flashcards, E-learning tool, Online dictionaries 等の digital flashcards を使用した Blended Learning Technology を導入することにより、学習者の言語スキル、及び主体的学習・学習意欲の向上 (Learner Autonomy) が図られ、TOEIC 等の客観的スコアが上昇すると結論づけられた。

こうした Blended Learning Technology の導入により、時間と空間を意味する Macro-level においても、学習者が有効性を認識できたと考察可能であり、以上の考察から、本研究の重要概念でもある“Learner Autonomy”についても有意であったと総括できよう。

論文審査結果の要旨

学位申請者, Bruce William Lander 氏に対し、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 27 年 8 月 6 日に実施した。

口述試験は博士論文を中心として、これに関連する内容について行った。ブレンデッドラーニングの効果について、特に、教師による一斉授業と各種機器を活用した場合との差異や研究手法について質問したところ、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、口述試験から科学的分析手法や言語教育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、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 (国籍) MD. MONARUL ISLAM
 (バングラディシュ人民共和国)
 学位の種類 博士 (学術)
 学位記の番号 甲第 568 号
 学位授与の日附 平成 27 年 9 月 24 日
 学位論文題名 Studies on synthesis, structures and
 reactions of novel meta-bridged macrocyclic aromatic
 compounds (新規メタ架橋大環状芳香族化合物の合
 成・構造及び反応性に関する研究)

論文審査員

(主査)	佐賀大学	教授	大 和 武 彦
(副査)	"	"	北 村 二 雄
"	"	"	花 本 猛 士
"	"	准教授	竹 下 道 範

論文内容の要旨

Cyclophanes have attracted a great deal of attention due to unusual high molecular strain geometry, interesting NMR spectral, stereo-chemical aspects of mobility and conformation. A series of *syn*-[3.3]metacyclophanes (MCPs) containing internal substituted benzyloxy group have been synthesized by the modified (*p*-tolylsulfonyl)-methyl isocyanide (TosMIC) coupling reaction, followed by acid treatment and Wolff-Kishner reduction. Single crystal X-ray analysis of *syn*-6,15-di-*tert*-butyl-9-benzyloxy-18-methoxy[3.3]MCP-2,11-dione shows that the bridge adopts a chair-boat like structure and this conformation minimizes dipole-dipole interactions between the two carbonyl groups. Interesting results were obtained by treatment of *syn*-6,15-di-*tert*-butyl-9-methoxy-18-methyl[3.3]MCP-2,11-diones with trimethylsilyl iodide (TMSI) which leads to form a dihydrofuran moiety.

6,15,22-Tri-*tert*-butyl-9,18,25-trimethoxy[3.3.1]MCP bearing two propane bridges, has been prepared in five steps from *p-tert*-butylanisole in 25% overall yield, using as the cyclization reagent, followed by Wolff-Kishner reduction. 6,15,22-Tri-*tert*-butyl-9,18,25-trihydroxy[3.3.1]MCP, which is regarded as an uncompleted

"homocalix[3]arene" has been prepared from trimethoxy[3.3.1]MCP. *O*-Methylation of trihydroxy[3.3.1]MCP with MeI in presence of K₂CO₃ afforded C₁-symmetric novel inherent chiral calixarene analogue di-*O*-methylated metacyclophane.

Symmetrical and unsymmetrical calixarene analogue [1.1.1]MCPs containing both benzene and benzofuran rings linked by methylene bridge are synthesized by demethylation of 6,15,22-tri-*tert*-butyl-9,18,25-trimethoxy[3.3.1]MCP-diones with TMSI. Crystal structure of symmetrical monohydroxy[1.1.1]MCP was found to belong to the orthorhombic crystal system with space group Pccn and adopts spherical shaped *cone* conformation and hydroxyl group form intramolecular hydrogen bonding with oxygen of benzofuran ring. *O*-Methylation at the lower rim of an unsymmetrical monohydroxy[1.1.1]MCP afforded C₁ symmetric novel inherent chiral calixarene analogue macrocyclic [1.1.1]MCP.

Highly flexible calixarene analogue 6,14,22-tri-*tert*-butylcalix[3]benzofurans have been synthesized by modified TosMIC coupling reaction, followed by acid treatment and intramolecular cyclization of 6,15,24-tri-*tert*-butyl-9,18,27-tri-methoxy[3.3.3]MCP-triones. ¹H NMR analyses of calix[3]benzofuran demonstrate that they adopt drastically different conformations in solution and undergo very fast conformational changes relative to the NMR time scale but at -50°C exists as two conformers *cone* and *saddle* in the ratio of 83:17.

In summary, various types of calixarene analogue metacyclophanes containing three arene rings were synthesized as well as their conformational structures also discussed by X-ray analysis, Density function theory (DFT)-computational study and variable-temperature NMR.

論文審査結果の要旨

フェノール-ホルマリン系環状オリゴマーであるカリックスアレーンは、その特異な構造とそれに基づく優れた分子認識機能を持つことから、近年、基礎、応用の両面から活発な研究が行われている。本物質の分子認識機能向上、あるいは分子認識に加えて他の機能を併せ持つ機能物質を得るために種々の化学修飾がなされているが、そのほとんどは lower rim のフェノール性水酸基と upper rim のパラ位に限られていた。本研究では、架橋鎖に着目し大環状部位へ官能基を導入した新規メタ架橋大環状芳香族化合物の合成・構造特性及び反応性について述べている。本学位論文成果は2章から5章に著されており、6章においてそれらの総括をしている。

第1章では分子識別能に基づく超分子レセプターの概論および本研究の意義と目的について述べている。

第2章では、TosMIC 法を用いる段階的合成ルートにより、架橋鎖にカルボニル基を有する二架橋 [3. 3] メタシクロファンジオン類の合成について論じている。生成する [3. 3] メタシクロファンジオン類の立体配座異性体である *syn* および *anti* 異性体の収率がメタシクロファンの内部置換基の種類により、大きく影響を受けることを明らかにしている。さらに、*syn* および *anti* 異性体の構造をプロトン核磁気共鳴分光法 (^1H NMR)、単結晶 X 線構造解析および密度汎関数理論 (Density Function Theory) 計算に基づいて考察している。

第3章では三架橋大環状芳香族化合物である [3. 3. 1] メタシクロファンジオン類の合成および Lewis 酸との反応により新規ベンゾフラン環を有する [1. 1. 1] メタシクロファン類への変換について論じている。光学活性シフト試薬存在下での ^1H NMR スペクトル測定およびキラルカラムを用いる HPLC 測定により鏡像異性体の存在を確認している。さらに、光学分割し、円二色性 (CD) スペクトル及び旋光度を測定している。光学分割した [3. 3. 1] メタシクロファンの鏡像異性体は溶液状態で 150°C まで加熱してもラセミ化を起こさないことを明らかにしている。本結果はキラル人工レセプターの分子設計指針を示す興味深い結果といえる。

第4章では、ヘキサホトリカルボニルカリックス [3] アレーントリメトキシ体の合成および脱保護反応によりトリヒドロキシトリケトン体の合成に成功している。本トリケトン体は、不安定で徐々にフェノール性水酸基とカルボニル基との脱水縮合によってベンゾフラン環へ変換し、新規なカリックス [3] ベンゾフランの合成に成功している。さらに、単結晶 X 線構造解析により 3 つのベンゾフラン酸素がキャビティの内側を向いていること、および1対の鏡像異性体

が互いにパッキングしカプセル状構造を形成していることが判明した。

第5章では、機能性官能基の導入を目的にカリックス [3] ベンゾフランの反応性について検討し、フラン環への求電子置換反応が容易に進行することを明らかにしている。本結果は超分子カプセルの構築の分子設計の重要な指針となり、今後の展開が期待される。

第6章では、本論文の総括を示すとともに、分子認識に基づく超分子システムが関与する新しい分野への応用および今後の展望も含めて言及している。

以上、本論文では、機能性大環状化合物としてヘテロ環骨格を有する不斉ホモカリックス [3] アレーン類の構築に関する興味ある知見が数多く得られている。本研究成果は、人工レセプターの構築への重要な指針を与え、今後の分子認識化学のみならず超分子化学に寄与することが大きい。

平成 27 年 8 月 3 日公聴会において博士論文の内容及び参考論文の関連事項などについての説明を受けるとともに、質疑応答を行った。それに対して、今後の展望も含めて同氏により明確に解説され、的確な応答があった。

よって、本論文は、博士 (学術) の博士論文に値するものと認める。

氏 名 (国籍) APICHAT SUDDEEPPONG (タイ王国)
 学位の種類 博士 (工学)
 学位記の番号 甲第 569 号
 学位授与の日附 平成 27 年 9 月 24 日
 学位論文題名 Permanent deformation of clayey
 soils induced by static unloading-reloading
 cycles (静的除荷・再載荷サイクルによる粘性土の
 塑性変形)

論文審査員

(主査)	佐賀大学	教 授	柴 錦 春
(副査)	"	"	石 橋 孝 治
"	"	"	日 野 剛 徳
"	"	准教授	坂 井 晃
"	中国上海交通大学		
		教 授	沈 水 龍

論文内容の要旨

広域地盤沈下は粘性土地盤地域に位置するすべての都市が経験した、あるいは直面している問題である。地盤沈下の主な原因は地下水の過剰汲み上げであるが、一部の地域において、平均地下水位は回復基調にあるにもかかわらず、地盤沈下は進んでいる。当然このような地域にも自然現象として、地下水位の季節的日々の変化が発生している。今までこういった現象を説明、シミュレーションする理論・方法はなかった。Apichat Suddeepong 氏の研究は、このような現象に着目し、室内圧密試験を用いて、試料の塑性変形における繰返し除荷・載荷、一般の除荷過程あるいは再載荷過程において、小さい除荷・載荷 (載荷・除荷) サイクルの影響を実験的に検討した。

試験結果により、繰返し除荷・載荷による試料の塑性変形の増加；除荷過程に小さい再載荷・除荷サイクルによる塑性変形の増加；再載荷過程に小さい再除荷・載荷サイクルによる塑性変形の減少を明らかにした。室内試験結果に基づいて、過圧密領域において、試料の塑性変形における除荷・載荷、載荷・除荷サイクルの影響を考慮できるモデルを提案した。提案したモデルは室内試験結果を十分説明でき、シミュレートできることを確認した。さらに提案したモデルを 5 つの現場の観測結果のシミュレーションに応用した。シミュレートした軟弱な粘性土層の圧縮量と実測値との比較検討により、提案モデルは広域地盤沈下量のシミュレーションと予測に応用できることが分かった。

Apichat Suddeepong 氏の博士論文は 6 章構成である。

第 1 章は、研究の背景と目的を述べている。

第 2 章は、リテラチャーレビューである。既存の

地盤沈下予測法をレビューし、それらの方法の欠点および研究が必要なポイントを指摘した。

第 3 章は、室内圧密試験の結果を詳細に記述している。主に試料の塑性変形における静的繰返し除荷の影響を実験的に検討した。

第 4 章に、新しいモデルを提案し、室内試験結果を用いて、その有用性を確認した。

第 5 章には、提案したモデルを 5 つの現場事例のシミュレーションに応用し、実測値とシミュレーション値との比較検討により、提案モデルが現場に応用でき、広域地盤沈下の予測に役に立つことを証明した。

第 6 章に、研究成果のまとめと本研究の将来の発展を述べている。

本博士論文は、粘性土における静的繰返し荷重による圧密変形理論に貢献があり、成果は広域地盤沈下の予測において高い応用価値がある。

平成 27 年 8 月 6 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。学外審査員から本博士論文は博士学位の授与に値する承認をレポートの形で得た。以上の審査結果に基づき、本博士論文は博士 (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。

論文審査結果の要旨

学位申請者、Apichat Suddeepong 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ものに対して口述試験を行うことを事前に通知し、平成 27 年 8 月 6 日に実施した。

口述試験は博士論文を中心として、これに関連のある内容について行った。静的載荷一除荷、或は除荷一載荷によって、地盤に塑性的な沈下が発生するメカニズム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、口述試験から粘性土の構成式に良く用いられる弾塑性理論に関して十分な知識とこの方面の研究に対する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 (国籍) TOMMY JANSEN
 (インドネシア共和国)
 学位の種類 博士 (工学)
 学位記の番号 甲第 570 号
 学位授与の日附 平成 27 年 9 月 24 日
 学位論文題名 THE EFFECT OF TIDAL CURRENTS AND
 STORM SURGE TO SEDIMENT TRANSPORT IN THE NORTH
 ARIAKE SEA, JAPAN (北部有明海における土砂輸送に
 対する潮流と高潮の影響)

論文審査員

(主査)	佐賀大学	教授	大串 浩一郎
(副査)	"	"	荒木 宏之
"	"	"	山西 博幸
"	"	准教授	Narumol Vongthanasunthorn

論文内容の要旨

Sedimentation process influences many situations that are important to humanity. Any deposition reduces the capacity of reservoirs, interferes with harbor operation and closes or modified the path of water course in rivers or coast line.

The Ariake Sea in Japan is a typical semi-enclosed shallow sea being rich in fishery products. It supports the local economy through fishing and the cultivation grounds of fish and shellfish. The amount of fishery products decrease in recent years. One of the reasons is that the seabed deposit has being deteriorated. It is considered that the decline in the shellfish production was the most serious signal of the environmental degradation of the Ariake bay.

In this dissertation, the prediction of tidal flow, wind effect and suspended sediment transport are simulated to be accordant to natural occurrence by using 3-D hydrodynamic and mud transport models. The objective of this study is to evaluate the condition of sediment concentration and its transport on the aquatic environment of north Ariake Sea caused by tidal currents, storm surge and the assessment to sediment transport rates, pathways and as references in the northern Ariake Sea.

Model simulations were undertaken with applying tide at Nagasaki and storm surge (Typhoon Songda 200418) and time simulation from 28 August to 7 September, 2004. There are two scenarios; first scenario is the sediment changes which is affected by tide alone, and the second scenario is affected by tide and wind concurrent took place. In the first set of simulation only tidal current was considered. Applying with tidal forcing or tidal currents concurrent with storm surge, an established morphology in the estuaries of the Chikugo and the Kase Rivers show typical characteristics of the mouths of both rivers, with tidal flats existence in those places. Model simulation shows the area where higher or lower suspended sediment concentration appears in the north Ariake Sea as well. The condition of sediment concentration can influence the transparency so that it might disturb the fish and shellfish cultivation and the north Ariake Sea environment in general.

The intrusion of saltwater to the upstream of Chikugo and Kase Rivers supported the generation of suspended sediment concentration in around the mouth of river, because the intrusion of saltwater can create the disturbance of water in this area. The highest suspended sediment concentration location is near the river mouth affected by flooding and behavior of suspended sediment concentration from north to south at spring and neap tides. Storm surge affected the erosion taking place at most areas in the north Ariake Sea and influenced the most to suspended sediment during strong wind period.

This dissertation is comprised of six chapters.

In the first chapter, introduction of this study is discussed. The background of sediment transport as a core in this study and its existence with background to the Ariake Sea as the study area, are presented in this chapter as well.

In the second chapter, literature review is summarized regarding to various sedimentation models as the support to the core of this study. An overview of hydrodynamic model and mud transport model and how to use the tools to simulate the model.

In the third chapter, the calculation method, model setting and the types of necessary data are presented for the computational tools and calculation in the previous chapter as well.

The forth chapter presents salinity condition in general and specific to Chikugo and Kase River estuaries from the simulation results of the hydrodynamic model, affected by tide and tide-wind concurrent. The intrusion of salt water to both rivers can be measured by placing some of stratification checking points from the mouth to upstream of the rivers.

In the fifth chapter, simulation results of the tools hydrodynamic and mud transport models affected by tide and tide-wind concurrent to the North Ariake Sea are discussed. The existences of sediment concentration in nearshore as well as offshore are discussed as well.

In this study, the results of research based on the simulation of computational model of suspended sediment concentration and salinity changes in the north Ariake Sea can be concluded as follows:

- The effect of tidal currents to deposition took place more to the north and almost along nearshore and river mouth, while erosion occurred more in the south.
- The effect of tidal currents by mass balance analysis show that in offshore of the north Ariake Sea the pattern of sediment transport is dominated by erosion pattern at both spring and neap tides, while in nearshore of the north Ariake Sea are dominated by deposition pattern at spring tide, conversely at neap tide dominated by erosion pattern.
- The highest suspended sediment concentration took place near the river mouth caused by flooding towards the offshore.
- Wind combined with tide affects the erosion taking place at almost all the points in basin of the north Ariake Sea.
- Salinity intrusion process takes place in the estuary of Chikugo and Kase Rivers to the upstream, approximately 4.2 km in Chikugo River and 1.2 km in Kase River. Maximum suspended sediment concentration occurred at

about 5.0 km upstream from the river mouth in Chikugo River, while about 1.2 km upstream from the river mouth in Kase River.

The tidal current is an important cause that should be counted to sediment resuspension, while storm surge influenced the most to suspended sediment during strong wind period.

This study shows the phenomena in the north Ariake Sea, in which tidal flats keep exist and the concentration of sediment is higher around Chikugo and Kase River estuaries and nearshore, and the resuspension of sediment keep occurring at offshore of the north Ariake Sea.

論文審査結果の要旨

土砂堆積過程には、洗掘、輸送、堆積、圧縮等の基礎的過程が含まれる。土砂を含む水域における人間活動では、土砂の堆積により多くの問題が発生する。例えば、貯水池容量の減少、港の運用の制限、河川や沿岸部の閉塞などである。

ところで、九州の半閉鎖性内湾の一つである有明海は、多くの水産生物に富む浅海域である。しかしながら、近年、漁獲量の大幅な減少が起きており、その理由の一つとして底質の悪化が指摘されてきた。底質の悪化により貧酸素水塊の発生や二枚貝類の斃死、赤潮の大量発生など他の様々な要因との相互作用により結果的に水産業の危機に瀕している。

有明海の底質に影響を与えるものとして、底質を形成する土砂自身の挙動が挙げられる。この土砂輸送の駆動力としての流れとしては、潮流と風によって生じられる吹送流等がある。吹送流の中で最大のものは台風によって引き起こされる高潮である。

本論文は、潮流と高潮によって北部有明海の土砂輸送がどのように影響を受け、その結果として何が起きているのかについて、3次元流動モデルならびに3次元土砂輸送モデルを用いて詳細に解析し、検討を行った研究である。本研究の目的は、潮流や高潮への応答としての北部有明海の水環境への土砂濃度や土砂輸送の条件を予測し、土砂輸送フラックスの推定と北部有明海における寄与度を明らかにすることである。

本論文は全6章で構成されている。

第1章は序論であり、土砂堆積過程の概略と、研究対象海域の北部有明海における土砂堆積過程の特徴を述べ、さらに本論文の構成を示している。

第2章では、様々な土砂堆積モデルに関する既往研究のレビューを行っている。さらに、3次元流動モデルならびに土砂輸送モデルの概要とそのモデルの適用法について示している。

第3章では、前章で示した数値計算モデルの詳細と北部有明海において実際に計算を行うための各基礎的過程のモデル設定並びに必要なデータタイプを

示している。

第4章では、エスチャリーにおける一般的な塩分分布の特性を示し、さらに、北部有明海奥部に注ぐ一級河川である筑後川と嘉瀬川のエスチャリーにおける塩分分布を、潮汐と風の影響を考慮した流動モデルの結果から求めている。両河川への塩水侵入を詳細に調べ、河口から上流域に至る区間の塩淡水層と土砂濃度分布の特性等について述べている。

第5章では、潮汐のみ、あるいは潮汐と高潮によって北部有明海で影響を受ける流れや土砂輸送についてシミュレーションを行っている。陸側と沖側における土砂濃度の比較と土砂の堆積あるいは洗掘の傾向についての評価を行っている。

第6章は結論であり、各章で見出された事を整理・議論するとともに、研究の将来への展望が示されている。

本論文は、3次元流動モデルを用いて北部有明海における潮汐と高潮を再現し、さらに土砂輸送モデルによって土砂堆積過程を詳細に調べることににより、通常は陸側への土砂堆積傾向を有する有明海において、高潮による洗掘により堆積土砂のリセットが行われていることを定量的に評価している。また、北部有明海に流入する河川エスチャリーの塩水侵入の状況を調べることににより、土砂輸送特性との関連性等の基礎情報を示しており、今後の北部有明海海域における底質環境の長期的な変化予測を行うために非常に有用な知見を与えている。

本研究のこれまでの成果は、審査付学術論文2編、審査付国際会議シンポジウム論文2編などに報告されている。平成27年8月6日に実施した博士論文公聴会では、学位申請者により研究成果が分かりやすく発表された。公聴会には20名の参加者があり、種々の質問がなされたが、そのいずれに対しても学位申請者からの確かな回答が示された。

本論文は工学的、学術的価値があり、博士(工学)の学位に十分値すると判断され、審査員全員一致で合格と判定した。

氏 名 (国籍) 趙 文文 (中華人民共和国)
 学位の種類 博士 (工学)
 学位記の番号 甲第 571 号
 学位授与の日附 平成 27 年 9 月 24 日
 学位論文題名 Sodium containing layered metal oxide: A promising sodium ion intercalation cathode material and precursor for the synthesis of lithium excess layered cathode material by reductive ion exchange method. (ナトリウム含有層状化合物: 優れたナトリウムインターカレーション材料および還元イオン交換法によるリチウム過剰層状系材料合成の前駆体)

論文審査員

(主査)	佐賀大学	教授	野 口 英 行
(副査)	"	"	渡 孝 則
"	"	"	赤 津 隆
"	"	准教授	矢 田 光 徳

論文内容の要旨

本論文は現代社会においてエネルギー貯蔵用として重要な地位を占めるに至った非水系電池 (ナトリウムおよびリチウムイオン電池) に使用される新材料の開発を目指したものである。ここでタイトルとしたナトリウム含有化合物はそれ自身がナトリウム電池正極材料となるし, 本研究で開発したリチウム電池正極材料合成の出発原料ともなる。そこで本論文第 1 章では研究の背景となるリチウム電池正極材料, およびナトリウム電池正極材料の現状と課題に関して記述し, 本研究が何を目指すのかを示している。

本論文第 2 章では, 申請者が開発した還元イオン交換法 ($\text{LiNO}_3\text{-LiI}$ 熔融塩に浸漬する手法) を用いて P3 型 $\text{Na}_{2/3}\text{Ni}_{1/3}\text{Mn}_{2/3}\text{O}_2$ を処理するとイオン交換反応と Li_2O の挿入が同時に進行し, リチウム過剰層状系化合物が生成することを述べている。この手法は P3 型の化合物のみならず層状構造の P2 型化合物にも適応可能であるが高い反応温度を必要とする。なお, トンネル構造の化合物 ($\text{Na}_{0.44}\text{MnO}_2$) では反応は完全には進まない。本合成法をもちいて合成したリチウム過剰層状化合物

は従来の手法で合成した化合物と類似の充放電曲線を示すが 1 サイクル目のクーロン効率が著しく高く, リチウム過剰層状系材料の一つの問題点を克服している。

第 3 章では 3 つの合成法 (固相法, スプレードライ法, 共沈法) を用いて前駆体となる $\text{Na}_{2/3}\text{Ni}_{1/3}\text{Mn}_{2/3}\text{O}_2$ を合成し, 還元イオン交換処理した場合, 粉体特性の及ぼす影響について検討し, 粒度分布が小さく, 且つ適度な比表面積, 密度をもつ共沈法で合成した前駆体を用いた方が優れた電気化学特性を示すことを明らかにし, 量産化を図る場合は共沈法で前駆体を合成することが望ましいことも示した。

第 4 章では還元イオン交換法のメカニズムを明らかにしている。この反応系ではイオン交換反応と Li_2O の挿入反応が同時に進行するため, あらかじめ前駆体を $\text{LiNO}_3\text{-LiCl}$ 熔融塩中でイオン交換処理し $\text{Li}_{2/3}\text{Ni}_{1/3}\text{Mn}_{2/3}\text{O}_2$ とした試料を用いて反応機構を検討している。その結果, 前駆体はまず LiI と反応し, 還元されると同時に前駆体中に Li^+ イオンが挿入され, その後 LiNO_3 により酸化され LiO^- が挿入されることを明らかにした。即ち, 二つの反応を合わせると前駆体中に Li_2O が挿入されることになる。

第 5 章では, P2 型 $\text{Na}_{2/3}\text{Ni}_{1/3}\text{Mn}_{2/3}\text{O}_2$ がナトリウムイオン電池材料として注目をあび, 且つこの材料がサイクル特性に課題があること注目し, Ni サイト ($\text{Mg}^{2+}, \text{Al}^{3+}, \text{Fe}^{3+}$ 等) あるいは Mn (Ti^{4+}) サイトの置換によるサイクル特性改善を試みた。金属置換は放電曲線の形状をステップ状の多段曲線からスロープ状の曲線へと大きく変化させる。充電電圧が若干増加するため, 充電上限電圧を上げ, 初回充電容量を $\text{Na}_{2/3}\text{Ni}_{1/3}\text{Mn}_{2/3}\text{O}$ と同レベルにしても充放電曲線の形状は保たれ, かつサイクル特性も著しく改善できることを明らかにした。長期サイクル後の電極の XRD 測定より, 金属置換が構造破壊を防止することを明らかにしている。

第6章では、本論文の成果を簡潔にまとめてあり、リチウム電池およびナトリウム電池正極材料の分野で大きな進歩をもたらした。

論文審査結果の要旨

学位論文はリチウム電池用正極材料開発に新しい手法を導入するもので、本法の導入により将来の正極材料とされるリチウム過剰型層状化合物の問題点の一つを解決したことは実用的にも価値が高い。また、資源戦略の観点から最近研究が進んでいるナトリウム電池用の正極材料に関しても金属置換が高電圧部の容量劣化の防止に有効なことを見出している。これらの成果は電池材料に関する研究を大きく前進させ、学位論文として十分なレベルにあることが認識させられた。

平成27年7月27日に実施した学位論文公聴会においても、30分以上にわたり種々の質問がなされたが、何れの質問にたいしても明快な説明がなされ、十分に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 (国籍) JEE YOUNG KIM (大韓民国)
学位の種類 博士 (工学)
学位記の番号 甲第 572 号
学位授与の日附 平成 27 年 9 月 24 日
学位論文題名 Research on the Interfacial Properties, Extraction Equilibria, and Kinetics of Various Types Calix[4]arene Derivatives for Extractive Separation of Precious Metals
(貴金属抽出分離のためのさまざまなカリックス [4] アレーン誘導体の界面特性, 抽出平衡, および抽出速度に関する研究)

論文審査員

(主査)	佐賀大学	教授	大 渡 啓 介
(副査)	"	"	野 口 英 行
"	"	"	大 和 武 彦
"	"	准教授	川喜田 英 孝

論文内容の要旨

貴金属の需要量は年々増加し, またその純度も向上している。貴金属の供給は鉱石からの供給では不足し, 自動車廃触媒などの使用済み部品からのリサイクルが求められている。しかし, 貴金属の分離や精製は貴金属類の類似した化学的性質や多くの化学種の精製のために困難で複雑である。これらの需要を満たすため, 鉱石や使用済み材料からの新たな回収法が求められている。溶媒抽出法は溶質の二相間の分配の違いを利用した湿式精錬法である。金属に対する高選択性や多段連続操作による高効率性といった長所があり, 貴金属回収に適した方法である。しかし, 貴金属分離は困難であるため, より高性能な抽出試薬の開発が望まれている。

カリックスアレーンは化学修飾容易な複数のフェノール基と三次元的に配置した環状構造を有する魅力的なホスト化合物である。イオン認識機能は特徴の1つであり, 特異的なレセプターとなる。カリックスアレーンによる金属類の抽出は, バッチ法によりものが主流であり, 抽出速度に関連する研究については報告がほとんどない。

第1章では, 研究背景に加え, 問題提起と本研

究の目的について述べる。

本論文の前半部分では, *p*-*t*-オクチルカリックス [4] アレーンケトンとアミド誘導体を用いてバッチ法による硝酸系における貴金属の抽出について検討した。後半部分では, さまざまな *p*-*t*-オクチルカリックス [4] アレーン誘導体による貴金属の抽出速度に及ぼす界面活性に着眼し, 検討した。

具体的に, 第2章では *p*-*t*-オクチルカリックス [4] アレーンメチルケトンおよびフェニル誘導体を用いてバッチ法による硝酸系における貴金属の抽出について検討した。また, これらケトン誘導体によるパラジウム抽出のスロープ分析を行い, 抽出反応を決定した。

第3章では, *p*-*t*-オクチルカリックス [4] アレーンジベンジルアミドおよびジエチルアミド誘導体を用いてバッチ法による硝酸系における貴金属の抽出挙動について検討した。また, これらケトン誘導体によるパラジウム抽出のスロープ分析を行い, 抽出反応を決定した。

第2章と第3章の結果から, *p*-*t*-オクチルカリックス [4] アレーン誘導体におけるわずかな官能基や構造の相違によって銀と2価パラジウムの抽出挙動に大きく影響を及ぼすことを明らかとした。しかしながら, *p*-*t*-オクチルカリックス [4] アレーンメチルケトン誘導体による銀の抽出平衡には72時間を要することが明らかとなった。そこで, 後半部分では抽出速度について検討した。

第4章では, さまざまな *p*-*t*-オクチルカリックス [4] アレーン誘導体の液液界面現象について液滴体積法による界面張力測定を行って検討した。*p*-*t*-オクチルカリックス [4] アレーン誘導体の界面張力は, 官能基の種類や側鎖によって異なり, また銀の抽出速度に著しく影響を与えることが明らかとなった。この結果から, 液液界面における物質移動メカニズムと抽出反応における律速段階が提案された。

第5章では, *p*-*t*-オクチルカリックス [4] アレー

ンメチルケトン誘導体による硝酸媒体における銀の抽出速度について、改良ルイス反応器を用いて検討した。攪拌速度、温度、抽出試薬濃度、銀イオン濃度、硝酸濃度などの異なった因子が検討された。抽出試薬濃度と硝酸濃度に反応速度依存性が観られたことから、抽出速度にはこの2つの化学種が関与していることが分かった。

第6章では総括を行った。

以上、本論文は先端材料の原料である貴金属類の効率的回収を目的として、さまざまなカリックス[4]アレーン誘導体による貴金属の抽出挙動をバッチ法や反応速度に基づいて検討した。また、これら誘導体の液液界面挙動についても検討した。その結果、さまざまなカリックス[4]アレーン誘導体の官能基やわずかな構造の違いによって界面挙動が異なり、結果として銀の抽出速度に大きく影響を及ぼすことが分かった。この結果から、極性を高めることやプロトネーションを起こすことで液液界面吸着性が高まり、抽出速度を改善できることが示唆されるという有用な知見が示された。

平成27年8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（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。

論文審査結果の要旨

学位申請者、Jee Young Kim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27年8月6日に実施した。

口述試験は博士論文を中心として、これに関連ある内容について行った。白金族金属の回収技術、ホスト分子化学、大環状化合物、抽出試薬の界面張力と抽出速度、本分離剤の有用性などについて、

特に、新規の分離剤母体の構造特性や合成法、対象とする金属イオンに対する抽出性能や分離性能に及ぼす分離剤母体の構造効果と官能基の効果との相関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、口述試験から分離工学やホストゲスト化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 (国籍) Xu Fang (中華人民共和国)
 学位の種類 博士 (工学)
 学位記の番号 甲第 573 号
 学位授与の日附 平成 27 年 9 月 24 日
 学位論文題名 Method for predicting lateral displacement of PVD-improved deposits under embankment loading (PVD 改良地盤における盛土荷重による側方変形予測法)

論文審査員

(主査) 佐賀大学 教授 柴 錦 春
 (副査) " " 石 橋 孝 治
 " " " 日 野 剛 徳
 " " 准教授 末 次 大 輔
 " スラナリー工科大学
 教授 Suksun Horpibusuk

論文内容の要旨

道路、鉄道等の盛土を建設する際、盛土荷重による地盤沈下や地盤の側方変位の予測は主要な設計項目である。今までの地盤工学の設計理論と方法で、沈下量について、かなり精度の高い予測ができていたが、地盤の側方変位について正しく予測することは至難の業である。また、軟弱な粘性土地盤に盛土を建設するには、多くの場合、軟弱地盤の圧密を促進するために、プラスチックボードドレーン (PVD) を地盤中に打設する。このような背景を踏まえて、Xu Fang 氏は PVD 改良地盤における盛土荷重、ならびに盛土荷重と真空圧併用による地盤の側方変形に及ぼす影響要因の究明、側方変位の最大値を予測する方法の確立を目標とする研究を実施した。本研究は室内大型モデル試験と現場事例の分析・検討を中心に進められた。まず、地盤の側方変位に影響を及ぼす主要な要因は、(1) 盛土荷重の大きさ、(2) 盛土荷重の載荷速度、(3) 真空圧がある場合、真空圧と盛土荷重の比、(4) 地盤の非排水せん断強度、(5) 地盤の圧縮性および (6) 圧密特性であることを明らかにした。また、地盤の側方変位の予測にこれらの要因を考慮できるように、一つの総合的パラメーターとして、荷重とせん断強度比 (RLS) が提案された。

さらに、地盤の側方変位の最大値 (δm) を盛土中心部地表面の沈下量 (S_f) で割って、正規化側方変位 ($NLD = \delta m / S_f$) と定義した。そして、RLS 値により、NLD を予測する方法が提案され、新しい現場事例および新たに行ったモデル試験結果により、提案法の有効性が確認された。

Xu Fang 氏の博士論文は 6 章で構成されている。

第 1 章は、研究の背景と目的を述べている。

第 2 章は、既存の盛土荷重による地盤の側方変位

予測法をレビューしている。

第 3 章には、室内大型モデル試験および試験結果を詳しく記述している。

第 4 章には、世界各地から収集された 30 以上の現場事例と分析結果を説明している。

第 5 章は、室内モデル試験、現場事例の分析結果に基づいて、盛土、盛土プラス真空圧における PVD 改良した地盤の側方変位の最大値を予測する方法を提案し、実証されたことを記述している。

第 6 章は、研究のまとめと結論を述べている。

Xu Fang 氏の研究により提案された盛土、盛土プラス真空圧による地盤の側方変位予測法は、数値シミュレーション以外に唯一の方法である。そして、この成果は道路、鉄道盛土荷重による地盤変形に関する設計、予測精度の向上につながると考え、軟弱地盤地域における地盤工学に貢献があると評価する。

平成 27 年 8 月 6 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。学外審査員が本博士論文は博士学位の授与に値すると審査報告書に記述している。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。

論文審査結果の要旨

学位申請者、Xu Fang 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ものに対して口述試験を行うことを事前に通知し、平成 27 年 8 月 6 日に実施した。

口述試験は博士論文を中心として、これに関連のある内容について行った。盛土荷重によるプラスチックドレーンで改良した軟弱地盤中の最大側方変位の発生位置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、口述試験から軟弱地盤圧密変形の予測法に関して十分な知識、この方面の最先端研究に対する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。

平成27年度工学系研究科
集報・サイエンテック編集専門委員会

委員長	伊藤幸広	(都市工学専攻)
委員	加藤孝盛	(数理科学専攻)
	房安貴弘	(物理科学専攻)
	木村拓馬	(知能情報システム学専攻)
	江良正直	(循環物質化学専攻)
	飯屋圭史	(機械システム工学専攻)
	三沢達也	(電気電子工学専攻)
	赤津隆	(先端融合工学専攻)

平成27年12月11日 印刷

平成27年12月18日 発行

〒840-8502 佐賀市本庄町 1
編集兼 佐賀大学大学院工学系研究科
発行者

〒849-0932 佐賀市鍋島町八戸溝1449- 2
印刷 (株) 昭 和 堂

Reports of Science and Engineering,
Saga University, Vol. 44, No. 2, December, 2015

Contents

Golden number and an angle bisector of a triangle	Makoto ISHIBASHI and Masanori KÔZAKI... 1
Quantum Walking Isomorphic to Laurent Series Ring	Takasi ENDO... 9
Summary and examination of doctoral thesis	17

Published by Graduate School of Science and Engineering,
Saga University,
1 Honjo-machi, Saga-shi 840-8502 , JAPAN