

# 連結部のガタを考慮したパネル多体構造物における展開・構造特性 Structural and Deployment Characteristics of Multiple Folding Panel Structure with Joint Gap

指導教授 宮崎康行

M3025 吉野達也

## 1. 序論

### 1.1. 背景

現在、宇宙望遠鏡や宇宙太陽光発電システム(SSPS)など、科学・商用衛星を問わず、“高精度”且つ“大型”な構造システムの需要が高まっている。それらの構造様式(膜構造、トラス構造、伸展部材等)のひとつにパネル展開構造(Fig.1)がある。パネル展開構造は主に太陽電池パドルやフェーズドアレーアンテナなどに利用されている。



Fig. 1 パネル展開構造 (左:ALOS-2<sup>[1]</sup>, 右:ASTRO-H<sup>[2]</sup>)

それに伴い、従来許容誤差として扱われてきた要素間(ジョイント)の結合誤差(はめあい, ガタ)が無視できないほど高くなっており、結合部のガタを小さくし過ぎてしまうと展開性(展開のしやすさ)に影響し、逆に大きくとってしまえば鏡面精度が悪くなってしまいうため、それぞれの構造・ジョイント箇所に合わせて、展開性や鏡面精度を考慮したジョイントのガタ量の予測が重要となる。その際、構造要素の製造誤差や取り付け誤差、ミッション時の温度条件からも、構造的な精度や構造特性、振動特性が変化し、電波放射や姿勢制御ミッション等に影響を与えることも考慮する必要がある。

これらを確認する上で行う環境試験では、重力下・大気の影響で測定を行うことが難しく、数値解析では結合誤差の影響は接触解析と応答解析を一緒に解く必要があり、固有値解析では非線形を含ませることができないため、解析を行うことが難しい<sup>[3]</sup>。そのため展開信頼性の向上の為、両者の結果の重ね合わせや、低次元化して計算することが望まれる。

また、軌道上で展開された際に太陽電池パドルやフェーズドアレーアンテナを太陽や地球に向けるため、指向制御を行う必要がある。この制御時において展開構造物が系全体への制御・振動特性に大きく影響すると考えられる。特にシンプルなパネル要素よりも、より複雑で小さいジョイント要素が大きく影響すると考えられ、パネル展開構造におけるジョイント要素の系全体の構造特性への影響を考慮することも重要である。

### 1.2. 本研究の目的

今回は実験・理論の基礎的検討として、数値解析によるガタの影響の評価、特に二次元展開構造のミウラ折り(Fig.2 左)をモデルとした剛体パネルの展開における、展開に必要なガタ量を求めることで評価する。また、展開され構造が決定された際に、ジョイント要素が構造全体の特性へ与える影響について、ジョイント数や取り付け位置、材料特性等を変化させることで、多重折り畳み構造(Fig.2 右)の構造特性を解析・評価する。

今回選択したミウラ折りは、数学的にも証明されている最も基本的な二次元展開構造であり、多重折り畳み構造は、収納形状が直方体状で搭載性に優れており、特許にもなっている<sup>[4]</sup>。これらの理由から、この2つを例題として扱うことにする。

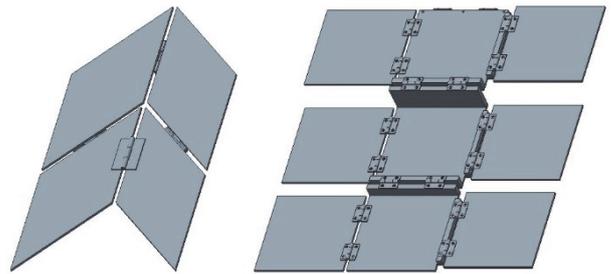


Fig. 2 (左)ミウラ折り, (右)多重折り畳み展開構造

## 2. 展開時過渡応答解析<sup>[5]</sup>

本章では、ミウラ折りをモデルとした剛体パネル4枚から構成される解析モデルを想定し、検証するはめあい(ガタ)の定義や、接触解析を考慮した展開運動を解くために、ペナルティポテンシャルを導入した非線形方程式の最急降下法での解法を導出し、各ジョイントにおける展開中に必要なガタ量を求めることで、解析モデルのパネル展開性の評価を行う。

### 2.1. 解析モデル定義

今回の解析ではミウラ折りをモデルとした4枚の剛体パネルによる展開構造を扱う。以下 Table 1 及び Fig. 3 に解析モデル諸元を示す。

Table 1 ミウラ折り展開モデル諸元

記号	パラメータ
$\alpha$	パネルの角度
$a, b$	パネルの辺の長さ
$h$	パネルの厚み
$\theta$ ( $0^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$ )	パネル 1, 4 とパネル 2, 3 のなす角度
$\beta = \arccos(\cos \alpha / \cos \theta)$	パネル 1, 2 (3, 4) がなす角度
$R_{1 \sim 4}$	各パネルの基底マトリクス
$q_{1 \sim 4}$	各パネルのクォータニオン
$x_{1 \sim 4}$	各パネルの中心位置
$y_{1,2}^j$	ジョイントの取り付け位置
$q_{1,2}^j$	ジョイントのクォータニオン
$x_{1,2}^j$	ジョイントの中心位置
$R_{1,2}^j$	ジョイントの基底マトリクス

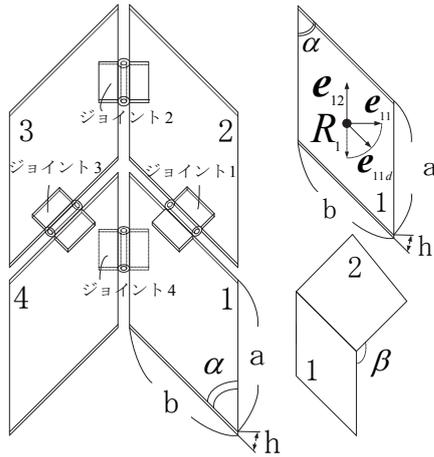


Fig. 3 解析モデルと諸元

## 2.2. ジョイントガタの定義

一般にジョイントは、Fig. 4 左上のように2枚の羽板と1本の軸から構成され、羽板の軸受穴と穴に通す軸の隙間をはめあい(ガタ)として定義できる。ここでは、穴と軸の垂直方向の隙間の  $x$  軸方向のガタを  $g_{ref1}$ 、 $z$  軸方向のガタを  $g_{ref3}$ 、 $y$  軸方向のガタを  $g_{ref2}$  と定義する。

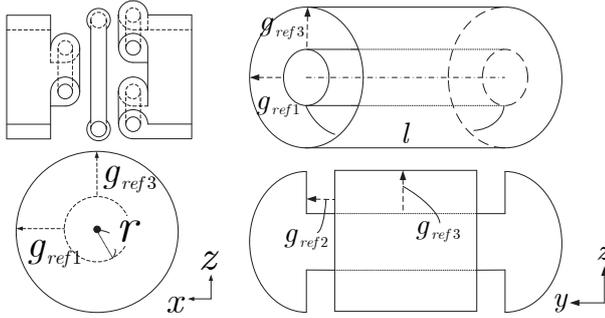


Fig. 4 ジョイントガタの概念図

ガタを解析する上で、如何にシンプルで且つ実際のガタのパターンを包含するものにするかを考慮し、Fig. 5 のように、並進方向と回転方向のガタの2種類を考えた。また、パネル展開運動時に軸と穴が接触した際、それぞれの部材には厚みがあるため、展開運動中にジョイントの軸が軸受穴壁面に食い込むことが想定される。その際の並進運動方向のガタは  $\Delta g_1$  及び  $\Delta g_2$ 、回転運動方向のガタは  $\Delta g_3$  であるため、ジョイントの並進運動は、

$$\mathbf{g} = \mathbf{R}_1^j T \left( \mathbf{x}_2^j - \mathbf{x}_1^j \right) \quad (1)$$

で表すことができ、その食い込み量に対するガタは、

$$\Delta g_1 = \sqrt{\mathbf{g}_{(1)}^2 + \mathbf{g}_{(3)}^2} \quad (2)$$

$$\Delta g_2 = \mathbf{g}_{(2)} \quad (3)$$

$$\Delta g_3 = \sqrt{x_{r0}^2 + z_{r0}^2} \quad (4)$$

と表すことができる。

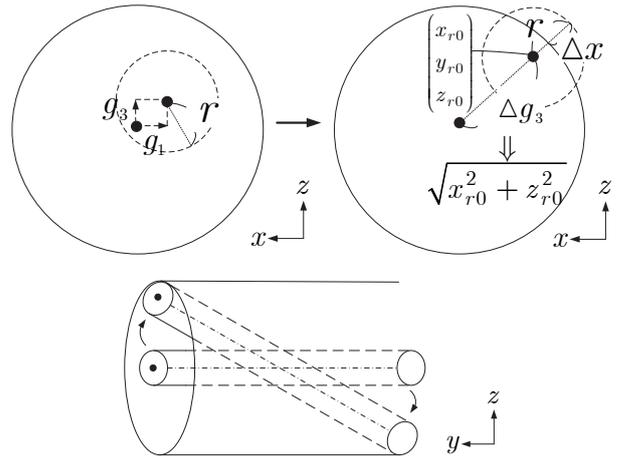


Fig. 5 接触時のジョイントガタの関係

## 2.3. 解析手法

各ジョイントにおける必要ガタ量は、ペナルティポテンシャルを最急降下法で最小化したものを解と判断して算出する。以下に2.2節で定義したガタ及び各パネル要素の位置・姿勢の解析手法を、ペナルティ法及び最急降下法に触れて記す。

### 2.3.1. ペナルティ法

物体が接触した際、物体同士の貫入を許容した際の食い込んだ量をペナルティポテンシャルエネルギーとして用いる。今回の解析モデルから式(5)のように定義する。ここで、添字  $m$  はジョイント、 $i$  はガタ、 $n$  はパネルの番号とする。

$$\Pi = \sum_{m=1}^3 \sum_{i=1}^3 \frac{1}{2} c_i^m k_i^m (\Delta g_i^m - g_{refi}^m)^2 \quad (5)$$

ここで、接触した際の接触力をバネ力とみなしたペナルティ剛性  $k_i^m$  とする。また、接触するためのガタを  $\Delta g_i^m - g_{refi}^m$  として、式(6)のように場合分けを行う。

$$c_i^m = \begin{cases} 1 & \text{if } \Delta g_i^m - g_{refi}^m > 0 \\ 0 & \text{if } \Delta g_i^m - g_{refi}^m \leq 0 \end{cases} \quad (6)$$

$\Delta g_i^m - g_{refi}^m \leq 0$  の場合、軸と穴が接触していないため  $c_i^m$  は0、これよりペナルティ関数  $\Pi$  は0となる。ペナルティ関数をパネルの位置ベクトルとクォータニオンで微分した形は式(7)のように表せられ、各添字の範囲は  $k = \{1, 2, 3\}$ 、

$\alpha = \{1, 2, 3, 4\}$ 、 $n = \{2, 3\}$  である。これにより展開運動時のエネルギーを求める。

$$\frac{\partial \Pi}{\partial x_k^n} = 0, \quad \frac{\partial \Pi}{\partial \tilde{q}_\alpha^n} = 0 \quad (7)$$

また、ペナルティ関数  $\Pi$  を式(8)で表す各パネルの位置と姿勢を表す行列  $\mathbf{z}^n$  ( $p$  は  $\mathbf{z}^n$  の要素番号)で式(9)のように微分すると、ジョイントが接触したときの  $\mathbf{z}^n$  に対するエネルギーを求めることができる。

$$\mathbf{z}^n \equiv \begin{bmatrix} x_1^n & x_2^n & x_3^n & \tilde{q}_1^n & \tilde{q}_2^n & \tilde{q}_3^n & \tilde{q}_4^n \end{bmatrix}^T \quad (8)$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial z_p^n} = \sum_{m=1}^3 \sum_{i=1}^3 c_i^m k_i^m (\Delta g_i^m - g_{refi}^m) \frac{\partial \Delta g_i^m}{\partial z_p^n} = 0 \quad (9)$$

( $p = 1 \sim 7, n = 2, 3$ )

### 2.3.2. 最急降下法

最適化手法の一つである最急降下法を用いて、各パネルの位置・姿勢の複合行列  $z^n$  を求める。最急降下法によるパラメータ修正アルゴリズムは式(10)で表せられる。

$$Z_{n+1} = Z_n - \alpha \left( \frac{\partial \Pi}{\partial Z} \right)_n^T \quad (10)$$

最適化手法には一般的にニュートン法がよく用いられる。ニュートン法は解を収束させる際、最急降下法よりも早く数学的に解に近づく方法であるが、ステップ毎に方程式の二階微分を解かなければいけないため計算が煩雑になり、微分不連続なため収束性が悪い。その分最急降下法は、収束性は劣るものの、収束させる際にエネルギーをパラメータで微分した方向（ローカルでエネルギーが小さい方向）を選択して収束するため、今回の解析では非常に適していると考えられる。また、式(10)の重み係数  $\alpha$  を変えると収束性は変わり、ニュートン法と異なり微分は一階なので比較的計算が容易になる。

### 3. 解析結果・考察

2章の解析理論を基に、プログラムを作成・解析を行った。解析では、一定回数ループしても収束しない場合、ガタを徐々に大きくし再度計算させ収束させることで、展開角度ごとの展開に必要なガタ量を求めた。解析モデルでは、一辺  $a = b = 0.2[m]$ 、角度  $\alpha = 45^\circ$ 、厚さ  $h = 0.01[m]$ 、ガタ  $g_{1\sim 3} = 1.0 \times 10^{-3}[m]$ 、ジョイント長さは一辺  $0.1[m]$  の正方形、ジョイントの軸直径  $6.0 \times 10^{-3}[m]$ 、ペナルティ剛性  $k_v^m = \{1,100\}$ 、取り付け誤差はなしと設定した。以下にパネル展開運動時の展開角と各ジョイントの必要ガタ量の解析結果を示す。

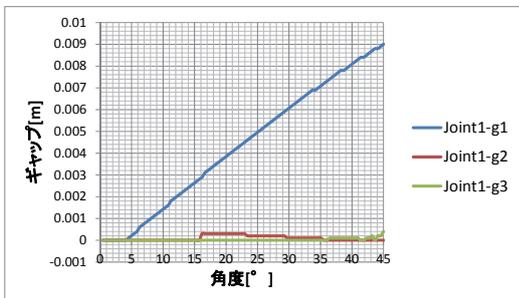


Fig. 6 ジョイント 1 の各ガタ(対称展開,  $k = 1$ )

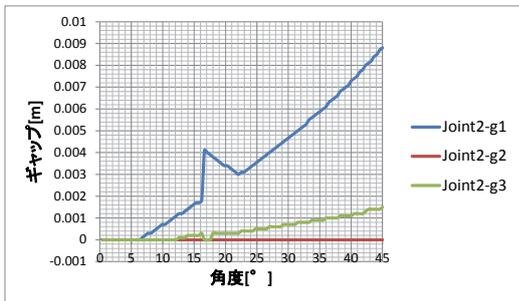


Fig. 7 ジョイント 2 の各ガタ(対称展開,  $k = 1$ )

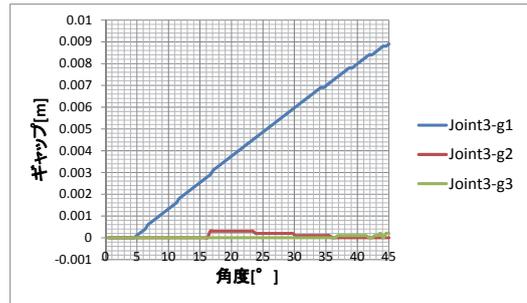


Fig. 8 ジョイント 3 の各ガタ(対称展開,  $k = 1$ )

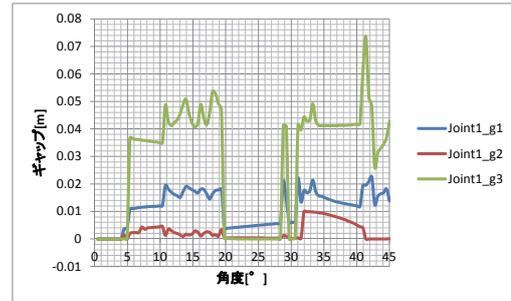


Fig. 9 ジョイント 1 の各ガタ(非対称展開,  $k = 100$ )

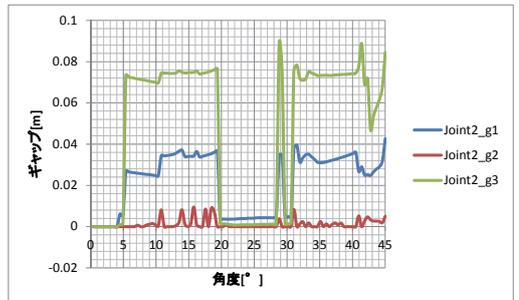


Fig. 10 ジョイント 2 の各ガタ(非対称展開,  $k = 100$ )

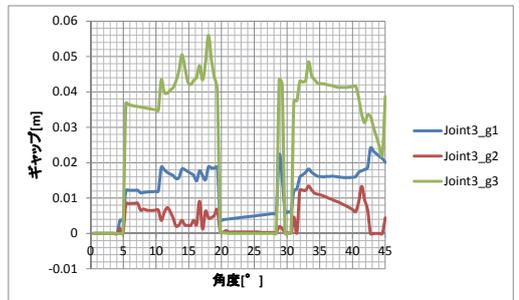


Fig. 11 ジョイント 3 の各ガタ(非対称展開,  $k = 100$ )

Fig.6～8において、ジョイント1・3は対称位置に配置しており、ジョイント1・3におけるガタは各軸とも一致し、対称展開している。対して Fig. 9～11では、ペナルティ剛性を大きくすることでペナルティ項を増大させており、ジョイント1・3の振る舞いが違うことから非対称展開しているだけでなく、必要なギャップ量も大きくなっていることがわかる。ペナルティ剛性の違いによって必要なギャップ量だけでなく、展開角度に対する各軸のギャップ量の振る舞いも複雑に変化しており、数値解析の段階でジョイントガタ量を見積もれることは有用であると考えている。

以上のように当初の目的である各ジョイントに対する各軸のガタを求めることができたが、実際には軌道上での温度条件や部材間の摩擦、材料特性等を考慮して解析する必要がある。特に、地上では重力や大気の影響も考慮しなければ解析との比較ができないため、今後の課題としたい。

#### 4. 展開後構造解析

本章では、パネル展開構造においてパネル・ジョイント要素による系全体の構造特性(剛性：固有振動数)への影響を評価する。具体的には、ジョイントの取り付け位置、要素数などの拘束条件及び部材の材料特性が影響すると仮定し、パネル連結数 2, 3 枚のパネル要素の解析及びそれとの比較のため、多重折り畳み構造の解析を行い評価する。本解析では、汎用有限要素法ソフトウェアである ANSYS®を用いてパネル構造のモーダル解析を行う。

##### 4.1. 解析モデル定義・解析条件

パネル構造の構成要素によって固有振動数の変化に法則性があるかどうかを確認するため、直線的に連結させた 2, 3 枚のパネル、多重折り畳み構造の 9 枚のパネルについて、各枚数と同面積の 1 枚パネル、平面展開、パネル間の傾きや段差を有した展開、部材材料を変化させるという条件のもとモーダル解析を行う。構成要素モデル及び部材材料を以下に示す。材料の違いは硬さの比較としてヤング率のみ変化させた。

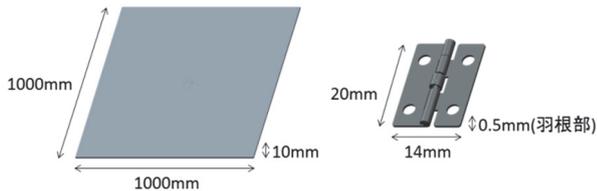


Fig. 12 パネル及びジョイントモデル

Table 2 パネル及びジョイント要素の材料特性

パネル要素・ジョイント要素		
材料	アルミ(柔)	アルミ(硬)
等方性材料		
密度	2700[kg/m <sup>3</sup> ]	2700[kg/m <sup>3</sup> ]
ヤング率	70.3[GPa]	703[GPa]
ポアソン比	0.3[-]	0.3[-]

ANSYS®でモーダル解析を行う際、CAD 上で作成されたモデリングデータを取り込み、微小要素に分割してメッシュを作成・解析を行う。一般的にメッシュを細かくすると精度が上がるものの解析時間が長くなる傾向にあるが、今回は簡易的なモデルのため、メッシュの細かさを”密”に設定する。また、2, 3 枚の解析モデル中のパネル 1 辺、多重折り畳み構造に関しては中央から展開すると想定して、中央底面を完全固定して解析する。

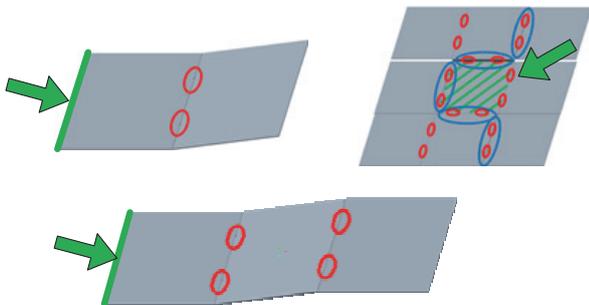


Fig. 13 拘束箇所及びジョイント取り付け位置 (赤枠：ジョイント箇所、青枠：段差箇所)

#### 4.2. 解析結果・考察

以下に 4.1 節を基に行った解析結果及び解析例を示す。

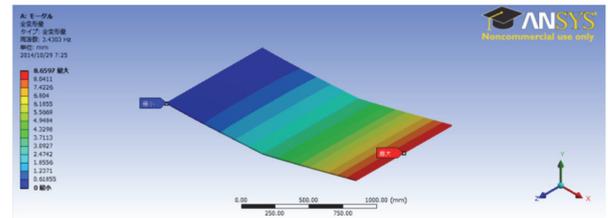


Fig. 14 解析例 (2 枚：パネル間で 10° の傾きあり)

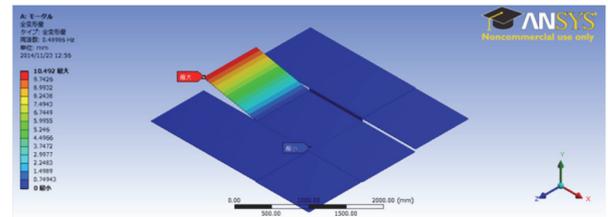


Fig. 15 解析例 (9 枚：パネル間で段差あり)

枚数	傾きありで ヒンジ硬い	傾きあり	平面で ヒンジ硬い	平面	1枚パネルで 同じ面積		
2 枚	3.4619Hz	3.4303Hz	2.2065Hz	2.1283Hz	2.1163Hz		
3 枚	2.227Hz	2.2016Hz	1.0339Hz	0.94844Hz	0.93502Hz		
9 枚	6.0402Hz	6.0038Hz	5.9972Hz	2.652Hz	1.993Hz	1.1413Hz	0.48986Hz

剛性: 高 ← → 剛性: 低

Fig. 11 各枚数の固有振動数の解析結果

解析を行った結果、構成条件において、ジョイントの材質が硬い>接続面に傾きがある>平面に接続>それぞれの枚数と同面積の 1 枚パネル、の順に剛性が低くなる傾向にあった。また、段差を持ったパネルの場合は、段差と傾きを持っている方が、段差のみよりも剛性が高くなった。即ち、展開後のパネル構造の形状精度を高くするためには、ジョイントの材質を硬いものにすればよい。

#### 5. 結論

今回はパネル展開構造におけるジョイントガタの展開性への影響の評価と、展開後のジョイント要素が与える系全体の構造特性を評価し、本研究では以下のことを示した。

- ・ ミウラ折りパネル展開構造において、展開に必要なジョイントガタを求める手法を提案した。
- ・ 多重折り畳み構造におけるモーダル解析において、ジョイント要素の材質を硬いものにすることで、系全体の剛性を大きく向上できることを示した。

#### 6. 参考文献・出典

- [1] JAXA, 陸域観測技術衛星 2 号「だいち 2 号」(ALOS-2). <<http://www.jaxa.jp/projects/sat/alos2/>>(2014 年 12 月)
- [2] JAXA, ASTRO-H 次期 X 線国際天文衛星. <<http://astro-h.isas.jaxa.jp/>>(2014 年 12 月)
- [3] サイバネットシステム(株), サイバネット メカニカル CAE サポートセンター FAQ. <<https://ssl.okweb3.jp/ansys/EokpControl?&tid=208522&event=FE0006>>(2014 年 12 月アクセス)
- [4] 高野忠, 宮崎康行, 「展開型フェーズドアレイアンテナ」, 特許第 5672606 号.
- [5] 磯村哲矢, 連結部の誤差を考慮した剛体パネルの展開性評価法, 日本大学理工学部 修士論文, 2014 年.