狭い空間上で地面効果を受けるホバリングロータの空力性能^{*1}

Aerodynamic Performance of a Rotor Hovering in Close Proximity to Confined Area Ground

井 星 正 氣^{*2}・糸 賀 紀 晶^{*2}・白 田 裕 幸^{*2}・粉 川 裕 介^{*2}
Naohiro IBOSHI, Noriaki ITOGA, Hiroyuki USUDA and Yuusuke KONAKAWA

Key Words: Ground Effect, Aerodynamic Performance, Hovering Rotor, Confined Area

Abstract: In this study, effects of the confined area geometry on the aerodynamic performance of the hovering rotor are showed from experiments from standpoints of flight safety. The confined area is simulated putting up vertically a single plate or plural plates on the ground effect plate. The aerodynamic performance of the rotor changes because a part of the rotor wake upward along the walls interferes with the flow field around the rotor. It is shown that the behavior of the steady torque coefficients remarkably depends on the combinations among the space between walls, the wall numbers, and the rotor height, and the required torque coefficient increases at all rotor height compared with that above the ground without walls. And also, there is the required torque coefficient in ground effect which can exceed that out-of-ground effect.

記 号 の 説 明

α_0 : コーニング角
 C_Q/σ : ブレード面積を基準にしたトルク係数
 C_T/σ : ブレード面積を基準にした推力係数
 h : R で無次元化したロータ高さ
 h_w : R で無次元化した壁高さ
 n_w : 壁枚数
 R : ロータ半径
 w_w : R で無次元化した壁間隔
 w_{wr} : R で無次元化した右壁間隔
 θ_0 : コレクティブピッチ角
 σ : ロータソリディティ
 Ω : ロータ回転角速度

1. は じ め に

ヘリコプタは優れたホバリングや低速域における飛行性能を活用して、救難救急、災害派遣、救急医療等に頻繁に用いられているが、今後、このような飛行環境は渓谷やビル群のように障害物に囲まれた狭い空間の地面近傍でのホバリングや、消音壁のある高速道路上のような左右に壁のある場所への離着陸も想定される。しかし、狭い空間上でホバリングまたはそこに着陸進入する場合には、ボルテックスリング状態に陥る可能性が指摘されている¹⁾。ヘリコプタが急降下飛行時にボルテックスリング状態に陥ること

は周知の事実であるが、ヘリコプタが急降下飛行をしなくても狭い空間上の地面近傍でホバリング飛行をする場合にはロータ後流と壁との干渉によるかなりの循環流にもとづいて操縦が困難になるかもしれない。

国土交通省運輸安全委員会の航空事故インフォメーション²⁾にもとづいて整理した地域別事故発生状況を第1図に示す。固定翼航空機の場合は飛行場や場外離着陸場およびその周辺における事故が49%であるのに対して、ヘリコプタの場合には、山林・農地や山岳地といった航空輸送手段以外の任務作業時における事故が47%であり、事故の発生地域は固定翼航空機と際立った相違を示している。特に、大規模災害時などでは、操縦者はほとんど初めての飛行環境での運用を強いられるため、飛行安全上の観点から、ヘリコプタロータの空力性能に対する飛行環境の影響を明らかにすることは重要である。

本研究では、ロータの空力性能に対する狭い空間の影響をロータ後流の一部が障害物の壁に沿って上方に向かう流れとロータおよびロータ後流との間の空力干渉問題と考えて、模型ロータ、地面効果板と壁を用いたロータのホバリング実験により検討する。

ヘリコプタの飛行安全に関する研究としては、奥野らが高層ビル周辺で運用する予定の消火ヘリコプタの安全性を検証する目的で、ビル周辺での強い乱れを伴う風、いわゆるビル風の影響を実験的および解析的に検討している^{3~5)}。一方、糸賀ら⁶⁾と井星ら⁷⁾は高層ビル屋上のヘリポートや艦船甲板上への離着陸時に遭遇するPartial Ground Effectを受けるロータの空力性能について、それぞれ数値解析的および実験的研究を行った。しかし、狭い空間の影響は壁の影響を受けたロータ後流とロータとの空力干渉が主要点

^{*1} © 2010 日本航空宇宙学会

平成 18 年 10 月 18 日、第 44 回飛行機シンポジウムにおいて一部発表。平成 22 年 6 月 23 日原稿受付

^{*2} 防衛大学校システム工学群航空宇宙工学科

第1図 地域別事故発生状況

であり、ボルテックスリング状態に至る因子^{8,9)}を見出すという観点から、ロータの空力性能に対する狭い空間の影響を論じた研究は筆者らの知る限りではない。

実験では、狭い空間を地面効果板上に垂直に立てた複数枚の平板により、地面に沿って放射状に広がるロータ後流の一部を妨げる壁を設けることによって模擬した。狭い空間を表すパラメータは壁高さ、壁間隔、壁長さや壁枚数である。これらの地面効果パラメータを種々に変更して、ロータ高さ（ロータ中心から地面効果板までの垂直距離を表す）に対するホバリングロータの推力、トルクやブレードフラップ角を測定した。本研究では、狭い空間を規定する地面効果パラメータのうち、壁間隔と壁枚数に対するロータ空力性能の特異な依存性を示す。

2. 実験装置および方法

実験装置の概要を第2図に示す。第2図は一对の壁がロータに対して対称に配置された場合を表す。模型ロータは関節型2枚ブレードロータで、実験室2階の床面からトラバース装置を介して垂直につり下げることにより、ロータ後流が模型支持部の影響を受けないようにした。模型ロータの寸法諸元と実験パラメータを第1表に示す。

模型ロータはロータ推力とトルクを測定するための荷重検出器を内蔵し、ブレードフラップ角を測定するためのポテンシオメータをフラッピング軸に取付けている。ロータブレードの回転方向は上方から見て時計回りである。地面効果板の中心はロータ中心の真下に位置するように設置した。地面効果板は水平で剛な表面をもつ正方形板で、一辺の長さは $6.4R$ である。障害物に囲まれた狭い空間は地面効果板上に垂直に立てた1~3枚の平板で、地面に沿ってロータ中心から放射状に広がるロータ後流の一部を妨げる壁を設けることによって模擬した。壁はロータ中心から壁に下ろした垂線の足が壁の中心となるように配置した。狭い空間を表すパラメータは壁高さ、壁間隔、壁長さ、壁枚数である。壁高さ h_w 、壁間隔 w_w 、壁長さ l_w とロータ高さ h はロータ半径 R で割った無次元量で表す。

ロータ高さは模型ロータをトラバース装置で上下方向に移動することにより約0.09ずつ変更した。トラバース装置の最大移動距離は1200 mm (2.11R) である。

本実験では、ロータ高さを変更するごとに推力係数が一

第2図 実験装置の概要

第1表 模型ロータの寸法諸元と実験パラメータ

ロータ半径	569 mm
ブレード翼弦長	60 mm
翼型	NACA0015
ねじり下げ角	なし
ロータソリディティ	0.0671
ロータ回転角速度	94.2 rad/s
フラッピングヒンジオフセット	0.03
コレクティブピッチ角	4.93~10.76°
ロータ高さ	0.43~2.28
壁高さ	0.185, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0
壁間隔	2.5, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0
右壁間隔	1.25, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0
壁長さ	6.4
壁枚数	0, 1, 2, 3
推力係数	0.0470, 0.0740, 0.0950

定になるようにコレクティブピッチ角を変更したが、サイクリック入力とは与えていない。推力係数の基準値は中型ヘリコプタの最大離陸重量と空虚重量のほぼ中間値に相当する $C_T/\sigma = 0.0740$ とした。本実験はホバリング実験であり、前進速度や降下速度を与えていないので、ロータ後流は地面に向かって垂直に降下するため、着陸進入時のロータ後流の方向とは異なることに注意する必要がある。

3. 結果および考察

3.1 狭い空間上で地面効果を受けるホバリングロータの空力性能 ロータの左右対称な位置に一对の壁がある地面近傍でホバリングするロータの空力性能を第3図に示す。壁高さは $h_w = 0.75$ で、壁間隔は $w_w = 6.0, 5.0, 4.0, 3.0, 2.5$ の5とおりである。参照例として、壁のない場合を $w_w = \infty$ と表して、図中に重ね描きした。

第3図(a)はロータの推力係数を $C_T/\sigma = 0.0740$ (一定) とするためにロータ高さ h ごとに行ったコレクティブ入力により決定したコレクティブピッチ角 θ_0 を示す。 θ_0 は本実験範囲のすべての壁間隔とロータ高さ h に対して壁のない場合よりも大きくなる。これは壁に沿って上方に向かうロータ後流の一部がロータと干渉することにより平均インフローを増大させて、有効迎え角を小さくするため

第 3 図 狭い空間上で地面効果を受けるロータの空力性能 ($n_w = 2$)

ある。

コレクティブピッチ角に対応した推力係数 C_T/σ は適切なコレクティブ入力により基準値に対して $\pm 0.25\%$ 以内の精度で、一定に設定できている。

第 3 図 (b), (c) は $C_T/\sigma = 0.0740$ (一定) としたときのロータ高さ h に対するトルク係数 C_Q/σ を示す。第 3 図 (b) は壁間隔が $w_w = 6.0 \sim 4.0$ の場合、第 3 図 (c) は壁間隔が $w_w = 4.0 \sim 2.5$ の場合である。第 3 図 (b) では、一般に、地面効果外といわれているロータ高さが 2.0 より大きな範囲でも、 C_Q/σ は壁がない場合より大きく、ロータ高さが小さくなるとともに増大して極大値をとった後、減少して壁のない場合に近づく。 C_Q/σ が極大値をとるロータ高さは壁間隔が小さくなるとともに小さくなる。第 3 図 (c) では、 C_Q/σ は壁がない場合より大きいことと C_Q/σ が極大値をとるロータ高さは壁間隔が小さくなるとともに小さくなることは第 3 図 (b) と同じであるが、ロータ高さに対する挙動が全く異なっている。すなわち、ロータ高さが地面効果外に近い比較的大きな範囲では、 C_Q/σ はロータ高さが小さくなると緩やかに増大、または壁がない場合と同様に減少するが、壁高さ h_w 近傍のロータ高さで急速に大きくなって極大値をとり、その後、壁のない場合に近づく。壁高さ近傍のロータ高さにおける C_Q/σ の急増は壁に沿って上方に向かう流れによって壁側のロータ面に強い循環流が存在することを表している。さらに、ロータ高さ

が小さくなると、ロータ面に戻る流れの影響よりも地面効果による誘導速度の低減効果の方が効いて C_Q/σ は壁のない場合に近づくと考えられる。これらの挙動は壁に沿って上方に向かうロータ後流の一部とロータとの干渉や壁によるロータ後流構造の変更にもとづくもので、これらの干渉効果はロータ高さや壁間隔の組合せに著しく依存している。

第 3 図 (d) はコーニング角 a_0 を示す。コーニング角はロータ高さが小さくなるとともに減少する。この傾向は壁のない場合と同じで、壁間隔の影響もほとんど見られない。壁がある場合には、壁近傍のブレード方位角で壁に沿う上向き流れの影響を受けるため、インフロー分布はブレード方位角やロータ高さとともに複雑に変化するが⁵¹⁰⁾、第 3 図 (d) を見る限り、ロータ半径方向やブレード方位角方向のインフロー分布変更の影響は定常的には小さいといえる。

これらから、狭い空間上におけるロータの地面効果に対する注意点は、(1) 壁のない、水平な地面上と比べて、すべてのロータ高さでトルク係数が増大する、(2) 地面効果内にもかかわらず、ロータ高さが小さくなるとともにトルク係数が増大して極大値をとり、地面効果外よりも必要トルクが増大するロータ高さが存在する、ことである。このような全般的な特徴は地面効果内では性能的に好ましいという周知の地面効果とは真逆の現象である。

3.2 トルク係数に対する壁間隔の影響 トルク係数に対する壁間隔の影響を第 4 図に示す。第 4 図 (a)～(e) はそ

第4図 トルク係数に対する壁間隔の影響（壁高さ一定）

それぞれ壁高さが $h_w = 0.185, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$ の場合である。ただし、第4図(d)は第3図(b)と(c)を再び一つの図にまとめたものである。第3図(b), (c)で説明した壁間隔とロータ高さに対するトルク係数の挙動の特徴は第4図(c)と(e)に示すそれぞれの壁高さが $h_w = 0.5$ と 1.0 の場合にも明瞭に現れている。さらに、壁高さが大きくなるとともに、壁間隔が $w_w \leq 3.0$ ではトルク係数の極大値と極大値をとるロータ高さも大きくなることが分かる。

一方、壁高さが小さい、 $h_w = 0.185, 0.25$ の場合には、壁間隔が $w_w = 3.0$ のときにも第4図(c)~(e)のように 1.0 より小さいロータ高さでトルク係数が極大値をもつことは

なく、全般的には第3図(b)のようなロータ高さに対する挙動を示す。しかし、これらの壁高さでは壁間隔が $w_w = 2.5$ のときに、ロータ高さに対するトルク係数の挙動が急変する。この場合のトルク係数は、地面効果外近傍から壁のない場合より多少小さく、ロータ高さが小さくなるとともに壁のない場合と同程度の減少率で減少する。しかし、トルク係数は、壁高さが $h_w = 0.185$ の場合には、ロータ高さが $h = 0.672 \sim 0.601$ の間で、 $h_w = 0.25$ の場合には、 $h = 0.987 \sim 0.810$ の間で突然増大し、その後は再び壁のない場合と同様の減少率で減少する。トルク係数が急増するこのロータ高さ間では推力係数の変動も大きい。これらの

第5図 トルク係数に対する壁枚数の影響

例では、流れ場が他の条件とは異なっていて、壁の上端から多少外向き（ロータと反対向き）の流れとなっていることをタフトにより確認している。壁高さが $h_w \leq 0.25$ で、壁間隔が $w_w = 2.5$ におけるトルク係数の突然の増大はロータ高さの間隔が 0.2 以下のわずかな間で起るため、トルク係数が小さく、余剰パワーは十分にあるものの、トルク係数の増大に対してテールロータ推力を増大させるヨー方向のつりあいとテールロータ推力の増大に対してロータ面をテールロータ推力と反対方向に傾斜させて横力のつりあいをわずかなロータ高さ間で同時にとる必要と、推力係数の変動も加わるために、横のつりあいをとることが難しいと考えられる。

3.3 壁枚数の影響 第5図 (a), (b) はロータの右側だけに1枚の壁がある場合 ($n_w = 1$) のロータのコレクティブピッチ角とトルク係数を、第5図 (c), (d) はロータを中心にして取り囲むように3枚の壁がある場合 ($n_w = 3$) の結果を示す。壁高さは $h_w = 0.75$ である。壁枚数が $n_w = 1, 3$ の場合も推力係数は $C_T/\sigma = 0.0740$ (一定) であり、 $n_w = 2$ の場合と同じ精度で一定に設定できている。 $n_w = 3$ の場合の壁配置は $n_w = 2$ の場合の平行平板と直交するようにさらに1枚壁を加えてコの字形とし、ロータ中心から3枚の壁への距離は等しく定めた。そこで、壁間隔は $n_w = 1$ の場合と同様に、ロータ中心から右側の壁までの距離を表

す右壁間隔で示した。これに第3図 (a) と第4図 (d) を含めて壁枚数の影響を検討する。

第5図 (a), (c) から、壁枚数が $n_w = 1, 3$ の場合のコレクティブピッチ角 θ_0 は $n_w = 2$ の場合と同様に、壁のない場合と比べて本実験範囲のロータ高さ全体にわたって大きく、壁に沿うロータ後流とロータとの干渉効果は平均的には有効迎え角を低減する下向きのインフロー増となっていることが分かる。

第5図 (b) から、 $n_w = 1$ のときのロータ高さに対するトルク係数の挙動は $n_w = 2$ のときと同様の傾向を示し、すべての右壁間隔に対する C_Q/σ は $n_w = 2$ の場合の 90~102% の大きさで、壁が1枚だけであるにもかかわらず $n_w = 2$ の場合と同様、トルク係数はかなり大きい。

一方、 $n_w = 3$ の場合には、トルク係数のロータ高さや壁間隔に対する全般的な挙動は $n_w = 2$ と同じであるが、右壁間隔が $w_{wr} = 1.25$ と 1.5 のときには、小さなロータ高さにおけるトルク係数の増大が極めて大きい。これは循環流が非常に強くなっているためと考えられる。一方、右壁間隔 w_{wr} が 2.0 より小さくなると、 C_Q/σ が壁のない場合よりも小さくなるロータ高さの範囲が存在する。その範囲は、 $w_{wr} = 2.0$ では $1.8 < h$ 、 $w_{wr} = 1.5$ では $1.3 < h$ 、 $w_{wr} = 1.25$ では $1.0 < h < 1.3$ となり、右壁間隔が小さくなるとともに小さいロータ高さに移行している。これは、

第6図 トルク係数の極大値に対する壁枚数と壁間隔の影響

$n_w = 3$ の場合には、壁に沿って上方に向かうロータ後流の干渉が大きく、平均的には下向きのインフロー増となっているが、壁側のロータ面にはアップウォッシュとして作用しているものと考えられる。そこで、 $w_{wr} \leq 2.0$ での C_Q/σ の低減はロータ面のインフロー分布の変更によって空気力によるブレード回転方向の加速域が翼端側に広がったためと考えられる。

第6図にトルク係数の極大値に対する壁間隔と壁枚数の影響を示す。横軸の壁間隔は壁枚数 n_w の如何にかかわらず右壁間隔 w_{wr} で表した。縦軸は地面効果外 ($h > 2.0$) でのトルク係数の平均値で正規化したトルク係数の極大値 $(C_Q/\sigma)_{\max0}$ を表す。 $n_w = 2, 3$ では、すべての $(C_Q/\sigma)_{\max0}$ が1より大きく、地面効果内にもかかわらず、地面効果外よりも大きなトルク係数を必要とする、すなわち地面効果内で必要パワーが増大することを示している。特に、 $n_w = 3$ の場合には、 $w_{wr} = 2.0$ で、地面効果外での必要トルク係数より6%増、 $w_{wr} = 1.5$ で14%増、 $w_{wr} = 1.25$ では19%増となって、右壁間隔が小さいと $(C_Q/\sigma)_{\max0}$ は極めて大きくなることが分かる。

3.4 推力係数の影響 第7図は一对の壁がある地面上で地面効果を受けるロータのトルク係数に対する推力係数 C_T/σ の影響を示す。推力係数は $C_T/\sigma = 0.0470, 0.0950, 0.0740$ とし、それぞれ中型ヘリコプタの空虚重量、最大離陸重量、両者の中間値に相当する。壁枚数は $n_w = 2$ 、壁高さと壁間隔はそれぞれ、狭い空間上での地面効果の特徴を良く表している $h_w = 1.0$ と $w_w = 4.0$ とした。

第7図(a)は最大離陸重量から空虚重量に相当する推力係数をとるときのロータ高さに対するトルク係数を示す。図中には、壁のない場合の実験値も重ね描きした。すべての推力係数に対して、トルク係数は、すべてのロータ高さで壁のない場合より大きく、ロータ高さが地面効果外より小さくなるとともに増大して極大値をとり、その後、減少して壁のない場合の値に近づく。

第7図(b)では、第7図(a)のトルク係数を地面効果外でのトルク係数の平均値で正規化した $(C_Q/\sigma)_0$ をロータ高さに対して表した。壁枚数が $n_w = 2$ 、壁高さが $h_w = 1.0$ 、壁間隔が $w_w = 4.0$ という条件では、トルク係数の極大値

(a) 壁の有無の影響

(b) 地面効果外のトルク係数の平均値で正規化したトルク係数

第7図 トルク係数に対する推力係数の影響

は地面効果外よりも4~5%大きくなった。本条件の範囲では、すべての推力係数において、ロータ高さに対するトルク係数の挙動はほぼ一致しており、狭い空間上で地面効果を受けるロータのトルク係数に対する推力係数の影響は小さいことが確かめられた。

4. おわりに

狭い空間上で地面効果を受けるホバリングロータの空力性能を推力係数が一定のもとで実験的に検討し、壁のある地面近傍では周知の地面効果とは逆に必要トルク係数が増大するロータ高さ、壁間隔、壁枚数の組合せが存在することを示した。本研究により得られた知見の詳細はつぎのとおりである。

1) 壁のある地面近傍でホバリングするロータは推力係数が一定のもとでは、壁間隔、壁高さ、壁枚数、ロータ高さのほとんどの組合せにおいて、壁のない場合に比べてトルク係数が増大し、コレクティブピッチ角を増やす必要がある。コレクティブピッチ角の挙動はロータ面にわたる平均インフローの増大を示している。

2) 地面効果内にもかかわらず、ロータ高さが小さくなるとともにトルク係数が増大して極大値をとり、地面効果外よりも必要トルク係数が増大するロータ高さと壁間隔の組合せが存在する。

3) 本実験範囲では、壁高さが $h_w = 0.185, 0.25$ で、壁

間隔が $w_w = 2.5$ の場合には、トルク係数が壁のない場合よりも小さくなる場合がある。しかし、この場合には、1.0 より小さいロータ高さにおいて、ロータ高さの間隔が 0.2 以下のわずかな間でトルク係数が急増し、推力係数の変動増も加わるため、横のつりあいをとることが困難なロータ高さ領域がある。

4) 壁高さが $h_w = 0.75$ のときには、壁枚数が多くなると、トルク係数の極大値は大きくなる。たとえば、壁枚数が $n_w = 3$ のときのトルク係数は地面効果外よりも、右壁間隔が $w_{wr} = 2.0$ で 6% 増、 $w_{wr} = 1.5$ で 14% 増、 $w_{wr} = 1.25$ では 19% 増となる。一方、壁のない場合よりもトルク係数が小さくなるロータ高さ範囲が存在し、その範囲は右壁間隔が $w_{wr} \leq 2.0$ では、右壁間隔が小さくなるとともに小さいロータ高さに移行する。このときもコレクティブピッチ角は壁のない場合よりも大きく、平均インフローは増大しているが、壁に沿って上方に向かうロータ後流の一部は壁側のロータ面にアップウォッシュ効果をもたらしていると考えられる。

5) 壁枚数が $n_w = 2$ 、壁高さが $h_w = 1.0$ 、壁間隔が $w_w = 4.0$ の場合には、推力係数の如何にかかわらず、ロータ高さに対するトルク係数の挙動はほぼ一致しており、その極大値は地面効果外よりも 4~5% 大きい。

参 考 文 献

- 1) Taghizad, A., Jimenez, J., Binet, L. and Heuze, D.: Experimental and Theoretical Investigations to Develop a Model of Rotor Aerodynamics Adapted to Steep Descents, Proc. American Helicopter Society 58th Annual Forum, 2002.
- 2) <http://jtsb.mlit.go.jp/jtsb/aircraft/new/air.asp>
- 3) 奥野善則, 赤松重樹, 齊藤 茂, 原田正志: 風洞実験による高層ビル周辺の風の測定—消火ヘリコプタの安全基準に関する基礎実験—, 航空宇宙技術研究所資料, TM-685, 1995, pp. 1-15.
- 4) 奥野善則, 船引浩平, 原田正志: ヘリコプタによるビル火災消火の模擬実験—その 2 消火効率・安全性に及ぼすビル風の影響—, 航空宇宙技術研究所報告, TR-1293, 1996, pp. 1-18.
- 5) 船引浩平, 奥野善則, 村岡浩治, 若色 薫: ヘリコプタによる火災消火の模擬実験 (その 3・消火ヘリコプタの運用シミュレーション), 航空宇宙技術研究所報告, TR-1308, 1996, pp. 1-16.
- 6) 糸賀紀晶, 井星正氣: Partial Ground Effect を受けるロータのホバリング性能に対する数値計算, ながれ, **23** (2004), pp. 409-420.
- 7) 井星正氣, 糸賀紀晶, 早田泰隆, Prasad, J. V. R.: 有限な斜面上でロータ回転面の一部分が地面効果を受けるロータのホバリング性能, 日本航空宇宙学会論文集, **51** (2003), pp. 433-440.
- 8) Basset, P. M., Chen, C., Prasad, J. V. R. and Kolb, S.: Prediction of Vortex Ring State Boundary of a Helicopter in Descending Flight by Simulation, J. Am. Helicopter Soc., **53** (2008), pp. 139-151.
- 9) Brown, R. E., Leishman, J. G., Newman, S. J. and Perry, F. J.: Blade Twist Effects on Rotor Behavior in the Vortex Ring State, 28th European Rotorcraft Forum Proceedings, Bristol, UK, 2002, pp. 76.1-76.14.
- 10) 堀元光将: 壁がある地面近傍でホバリングするヘリコプタロータの CFD 解析, 防衛大学校第 47 期理工学研究科修士論文, 2010.