

12) 石膏型圧力鑄込みによる複雑形状セラミックス成形の実現

平成 23 年度 JST 公募研究—研究成果展開事業 研究成果最適展開支援プログラム

蒲地伸明・副島潔

本研究では、複数の鑄込み口を利用しながらもスラリーの流路を自己判断機能を持った弁機能により制御し合流線のない成形体を得ることができる新しい圧力鑄込み成形技術の確立を目指した。実験計画法により圧力鑄込み制御因子の成形体に与える影響を確認すると同時に本技術の有効性について確認した。さらに、弁機構の改良による耐久性の向上や作業性の改善を行った。結果、複数の鑄込み口を用いながらスラリーの合流線のない緻密な成形体を得ることに成功し、本技術を実用化可能なレベルまで高めることが出来た。本技術により、従来技術では成形不可能であった複雑形状の成形体でも充填不足や合流線が発生することなく安価に成形することが可能となった。

1. はじめに

後加工が困難なセラミックス材料において、圧力鑄込み成形は目的の形状に近い成形体を安価に得る有効な手段である。肥前地区においても、石膏型に泥漿の水分を吸収させることで陶土を固化し成形体を得る圧力鑄込み成形が量産陶磁器の製造に多く利用されている。しかし石膏型を用いて行う圧力鑄込み成形は原理上成形できる形状に制限がある。例えば図 1 に示すような玉縁を持つ形状では、型内に送泥された泥漿が最初に触れる鑄込み口付近が早く脱水固化するために、端部に充填不足が発生し良好な成形体を得ることができない。この問題を解決するために鑄込み口を複数にした場合には、泥漿の合流部にウェルドライン(合流線)と呼ばれる欠陥が発生し、割れや強度の低下を招く。これらの問題を解決するための方法として、複数の鑄込み口を利用しながらも泥漿の流路を自己判断機能を持った弁機能により制御し合流線のない成形体を得る新しい圧力鑄込み型を平成 18~20 年度に実施した研究「圧力鑄込み成形におけるひずみ防止技術の

開発」¹⁻³⁾のなかで考案し、特許⁴⁾を取得した。弁付圧力鑄込み型は図 2a に示すような断面を有する。この図において成形体は矢印 2 で示す空間を泥漿で充填することで得られる。従来の石膏型においては鑄込み口は矢印 3 で示す一か所のみであり、鑄込み口から離れた部分では充填不足が発生する場合があった。充填不足を解消するために鑄込み口 4 を設けたときそのままでは鑄込み口 3,4 それぞれから挿入された泥漿が型内で衝突し割れや歪の原因となっていた。そこで鑄込み口 4 に図 2b、図 2c において矢印 7 で示す弁機構を設ける。この弁機構が存在すると図 2b に矢印 6 で示す方向から流れてきた泥漿はいったん弁 7 によって堰止められる。鑄込み口 3 から挿入された泥漿が鑄込み口 4 に達し、矢印 8 で示すような圧力が弁 7 に加わるこ

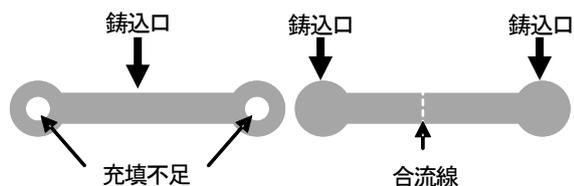


図 1 従来の圧力鑄込み成形で発生する問題の模式図

(左: 鑄込み口付近の脱水固化による充填不足
右: 2つの鑄込み口からの同時鑄込みによる合流線の発生)

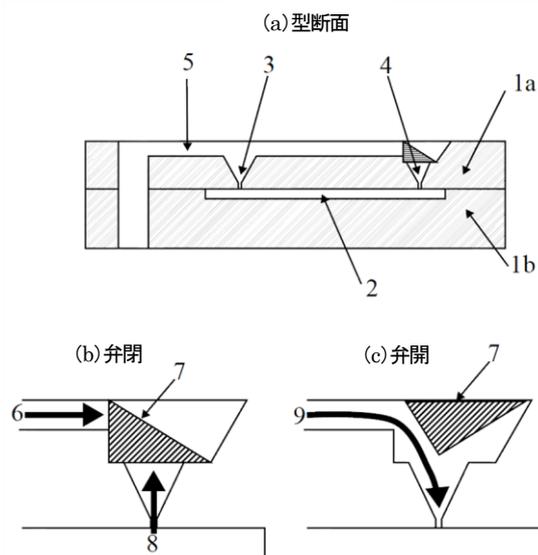


図 2 弁付圧力鑄込み型の動作模式図

とで流路が開放され図 2c に矢印 9 で示すように泥漿送泥が開始される。このとき成形体 2 の鑄込み口 4 の部分においてはすでに泥漿が充填されているので合流線が発生することはなく、不足分の充填のみが行われる。

本研究の目標は上記技術の技術移転のための具体的な型設計・製造技術の確立である。あらかじめ、型の作成時のばらつきを排除するために NC 切削により精密な石膏型を作成した。第一の目的として、圧力鑄込成形の成形体の陶土充填に影響すると考えられる制御因子(型位置(段数)、鑄込圧、鑄込回数等)を実験計画法により統計解析することで、効率のよい型設計のための技術情報を数値的に把握することを目指した。次にこの結果を実際の製品製造のための型設計・鑄込作業に応用することで新しい圧力鑄込成形方法の実用化を目指した。

2. 実験方法

2.1 泥漿調整

天草撰上陶土に水とケイ酸ナトリウム(和光純薬工業(株)製:乾燥重量に対し 0.25mass%)を加え攪拌することにより含水率 24%の泥漿を調整した。他に、成形条件の違いが最終製品に与える影響を正確に把握するために、1250~1350°Cの範囲の焼成で焼下がり量の変動がない耐熱磁器用陶土⁵⁾も試験用の陶土として用いた。耐熱磁器用陶土は解膠剤としてディーフ(太平薬業薬品(株)製)とケイ酸ナトリウムを用い泥漿を調整した。粘度は単一円筒形回転粘度計(東京計器(株)製:DVH-B2)を用いて測定した。

2.2 石膏型作成

実験に使用した試作品形状を図 3 に示す。図 3 の成形体を得るためには一般的に図 4a のように石膏型を設計する。図中グレーで示す部分がスラリーを型内に誘導するための経路で、M で示す鑄込み口 1 つから型内にスラリーが充填される。本研究で使用した新石膏型を図 4b に示す。新石膏型は、中央に M で示す主鑄込み口 1 つと、S で示す弁機構を持った副鑄込み口 4 つを有することを特徴とする。CAD/CAM データを Robert McNeel & Associates 製 Rinoceros 及び VeroSoftware 社製 MACHINING STRATEGIS で作成した後、モデリングマシン(岩間工業所製:MM88F 等)を用いて石膏ブロックを

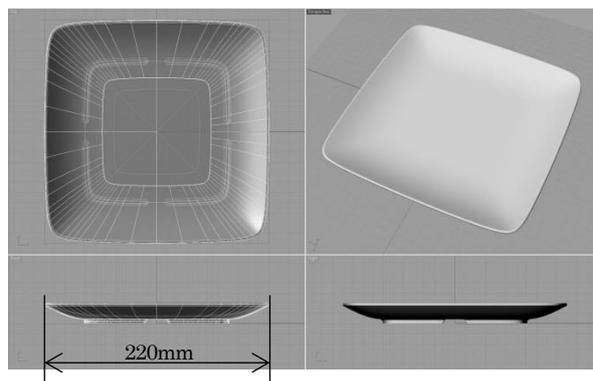


図 3 試作品図面

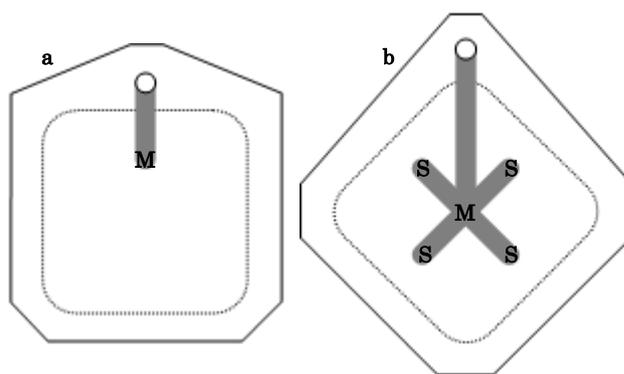


図 4 従来石膏型(a)と新石膏型(b)の上面図

NC 切削することで同一形状の使用型を複数作成し実験用石膏型とした。また、量産時の型製作を想定し、NC 切削によって作成した捨て型より、ケース型を作成し複数の使用型を成型し型の量産性や精度を確認した。

2.3 圧力鑄込み試験

新石膏型の弁機構の効果を確認するために、副鑄込み口をふさぎ主鑄込み口からのみ送泥を行う従来の圧力鑄込み(以降“1H”)、副鑄込み口の弁機構を外し 5 つの鑄込み口からほぼ同時に型内へ送泥が開始される複数口圧力鑄込み(“5H”)、副鑄込み口に弁機構をつけた、新圧力鑄込み(“5HA”)の 3 つのパターンで鑄込み成形を実施し成形体重量や焼成変形、製品外観を確認した。なお、本試験では結果の変動要因をできるだけ排除するために石膏型は 1 段で鑄込み作業を行った。

上記 3 種の鑄込み方法に加え鑄込み圧、石膏型の重ね位置、泥漿含水率の鑄込み条件を 3 水準で変化させた実験を行い成形体重量との各因子の関係について分散分析を行った。

3. 結果と考察

3.1 圧力鋳込み方法と成形体の性状

表1に含水率24%に調整した天草陶土スラリーで実施した圧力鋳込み試験における圧力鋳込み条件と得られた成形体の特性を示す。最も重量の軽い従来型圧力鋳込み成形体は上面図に示す位置に、凹みが生じ陶土の充填不足が顕著であった。本形状を従来の圧力鋳込みで成型することは困難であることが示唆された。一方、複数口圧力鋳込み成形体においては充填は十分であったが上面図に示すように複数の鋳込み口の間でウェルドラインと呼ばれるスラリーの合流線が生じた。新圧力鋳込み成形体は従来圧力鋳込みと複数口圧力鋳込みの中間の重量となったが、凹みは生じなかった。

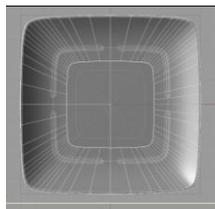
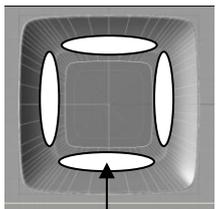
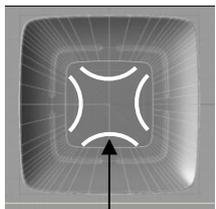
各成形体を焼成した後の断面において、設計通りの理想的なラインを示したのは複数口圧力鋳込みで成形した試作品であった。一方、従来圧力鋳込み成形で成形した試作品は中央部が大きく突き上げた。この現象は鋳込み口に近い中央付近では十分に陶土が充填されているのに対し、鋳込み口から遠い縁部では陶土充填が不足していることを示している。つまり、陶土充填が不足している部分の焼成収縮は大きくなるために縁部の収縮が中央部に比べ大きくなり、縁部と同じように収縮できない中央部が

結果として突き上げる。新圧力鋳込みによる試作品では、従来圧力鋳込み程ではないが若干の中央部の突き上げが観察された。成形体重量の結果と同様に、複数口圧力鋳込みに比べ陶土充填が不均一なことが確認された。

3.2 解膠曲線

B型粘度計を用いて測定した含水率を22.3%と25.0%としたときの耐熱磁器用陶土泥漿の解膠曲線を図5に示す。泥漿には最初ディーフを0.05mass%添加しており、横軸はケイ酸ナトリウムの添加量を示している。また、図中のマーカー“◇”と“□”は含水率22.3%の泥漿における粘度測定開始から1分後2分後の粘度を、“○”と“×”は含水率25.0%における粘度測定開始から1分後2分後の粘度をそれぞれ示している。含水率22.3%の泥漿においてケイ酸ナトリウム添加量が0.175mass%となった時に“◇”と“□”のマーカーが重なっており泥漿が十分に解膠していることがわかる。そこで含水率を22.3%とした時の圧力鋳込み試験用泥漿の分散剤添加量をディーフ0.05mass%、ケイ酸ナトリウム0.175mass%とした。また含水率25.0%の泥漿においては、同程度の粘度が得られるディーフ0.05mass%ケイ酸ナトリウム0.03mass%を圧力鋳込み試験用泥漿の分散剤添加量とした。

表1 圧力鋳込み方法と成形体の各種性状(天草撰上陶土).

圧力鋳込み方法	5HA 新圧力鋳込み	1H 従来圧力鋳込み	5H 複数口圧力鋳込み
鋳込み口数	5 (主×1:弁付き×4)	1	5
成形体重量	458g	455g	464g
成形体凹み	無	有	無
ウェルドライン	無	無	有
上面図		 凹み	 ウェルドライン
焼成後断面写真			

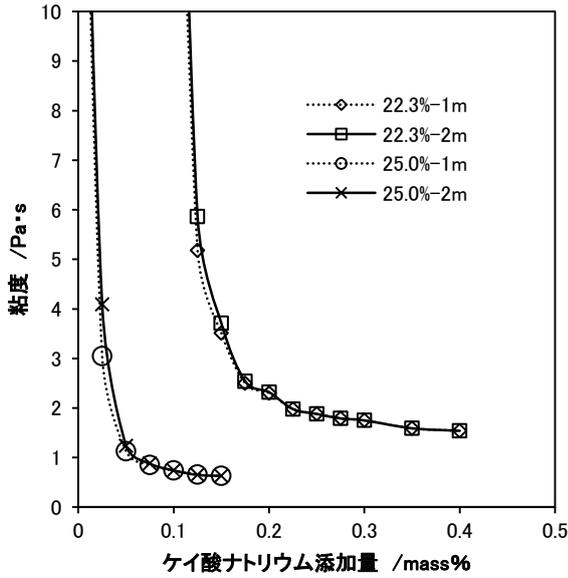


図5 耐熱磁器用陶土の解膠曲線

3.3 圧力鑄込み制御因子と成形体重量の関係

圧力鑄込み制御因子として、鑄込み繰り返し数(1~6回)、型位置(1, 2, 3 段目)、鑄込み方法の(1H, 5H, 5HA)の3因子を選択し直行表に割り付けた。含水率22.3%の耐熱磁器用陶土泥漿を用い鑄込み圧0.20MPaで行った鑄込み試験における各因子の圧力鑄込み成形体の陶土充填に及ぼす影響を図6に示す。本実験はNC切削により作成した3個の石膏型を用いたが、3個の石膏型で成形体重量に若干のばらつきが生じた。そこで、分散分析にはそれぞれの石膏型における成形体重量の平均で、各成形条件における成形体重量を割った値を用い、石膏型の違いによるばらつきが分析に与える影響を排除した。図6の縦軸は上方向が陶土の充填が良いことを示し下方向は充填が悪いことを示す。

この条件で成形体の陶土充填に最も影響を与えるのは型位置という結果になった。鑄込み圧のかけやすさ一番下の型の充填が良く、鑄込み圧のかけにくい3段目の型の充填率が悪くなっている。また鑄込み方法の影響も顕著であった。鑄込み口が中央部1つの1Hがとくに充填が悪く、最も充填が良いのは5Hであった、新圧力鑄込みである5HAは陶土充填で5Hに及ばない結果となった。なお、これらの因子は99%信頼限界で有意であった。鑄込み繰り返し数は99%信頼限界では有意とならなかった。

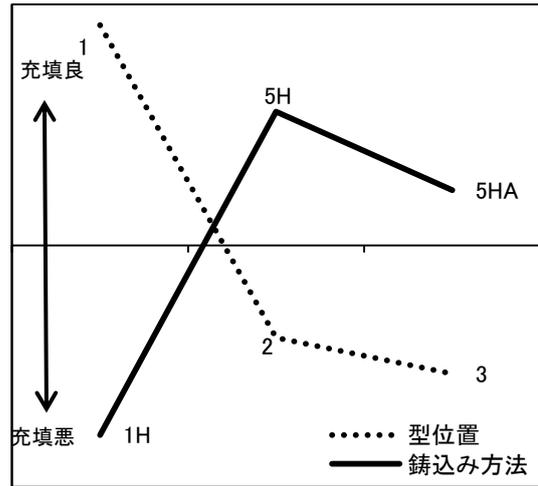


図6 圧力鑄込み制御因子の効果
(耐熱磁器用陶土 含水率22.3%)

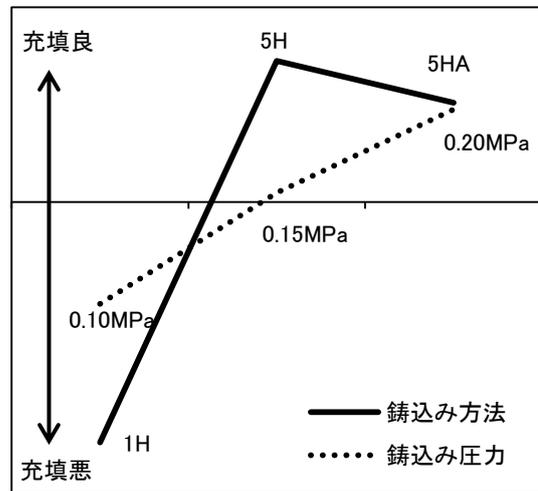


図7 圧力鑄込み制御因子の効果
(耐熱磁器用陶土 含水率25.0%)

た。

圧力鑄込み制御因子として、鑄込み圧力(0.10, 0.15, 0.20MPa)、型位置(1, 2, 3 段目)、鑄込み方法の(“1H,” “5H,” “5HA”)の3因子を選択して、含水率25.0%の耐熱磁器用陶土泥漿を用いて行った鑄込み試験における各因子の圧力鑄込み成形体の陶土充填に及ぼす影響を図7に示す。

含水率25.0%の泥漿では含水率22.3%泥漿で最も影響の大きかった型位置の影響はほとんど現れず有意でなかった。最も影響が大きかったのは鑄込み方法で含水率22.3%泥漿と同様の傾向を示している。また鑄込み圧力は鑄込み圧の増加に従って充填が直線的に良くなる結果となった。

含水率の異なる2種の泥漿で行った鑄込み試験の分析は、型位置の影響をはじめ必ずしも整合性が取れた結果とはなっていない。今後の因子や水準値の設定を見直しさらに詳細な実験が必要となる。

3.4 弁付石膏型の問題点と改良

含水率の異なる2種の耐熱磁器用陶土泥漿、あるいは天草陶土泥漿で行った鑄込み試験で、いずれの条件においても新圧力鑄込みである5HAは陶土充填で5Hに充填率で及ばない結果となり、改良が必要なが判った。また、繰り返し鑄込み試験を行った結果、弁機構について新たに3つの問題点が明らかになった。

① 泥漿漏れ(図8左)

主として弁の横方向の摩耗により弁と石膏型の間に隙間が生じ、弁が作動する前に成形体内部に泥漿が侵入することで、ウェルドラインが発生。

② 動作不良(図8右)

主として弁の縦方向の摩耗により弁上部に隙間が生じ弁作動前に泥漿が弁上部に侵入し、弁が開放動作をしない。

③ 作業性の低下

鑄込み終了後の脱型作業における鑄込み口部分の陶土除去時に、跳ね上がった弁が副鑄込み口上面の大部分を塞いでいるために、エアで弁を取り除く作業が困難となり、作業効率が低下。

問題点1と2に関しては弁の摩耗に加え、型をケース型から量産した時の寸法のばらつきも影響する。そこで48個の弁をケース型から作成し、未使用時の弁寸法のばらつきについて確認した。図9に弁の横方向の寸法の度数

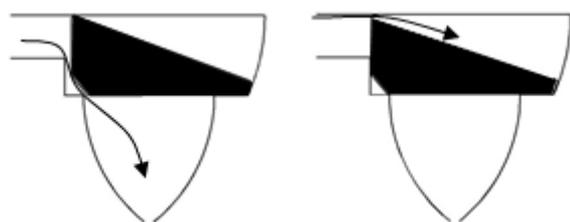


図8 弁機構問題点の模式図
(左:泥漿漏れ 右:弁動作不良)

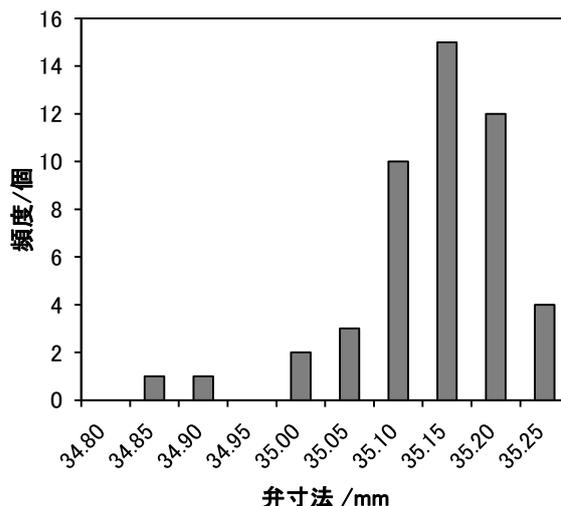


図9 型抜きにより作成した弁寸法のばらつき。

分布を示す。弁寸法の最大値と最小値の差は0.38mmあり弁が動作するための遊びも加えると新品の石膏型においても弁と石膏型の間には0.5mm以上の隙間が生じる可能性があることが明らかになった。

石膏型量産時の寸法のばらつきや使用時における摩耗を製造現場において避けることは困難である。そこで、弁機構部に多少の寸法の変化が発生しても泥漿が漏れないように弁機構の改良を行った。同時に、新圧力鑄込みによって成形した成形体の充填が複数口圧力鑄込みと同程度になるように、弁解放時の弁と石膏型の隙間がより広くなるようにした。具体的には泥漿をせき止める面の角度の検討や、弁のスライド機構の付加により、型や弁が摩耗した状態でも自動的に隙間を埋める方向に弁が移動し、泥漿の漏れを防止する新しい弁機構を開発することができた。

改良石膏型を、実際の型生産ラインで複数個作成した。鑄込み圧力を変化させながら行った鑄込み試験の結果を表2に示す。従来の型では新圧力鑄込み(以下:5HA)の成形体重量は複数口圧力鑄込み(5H)と従来圧力鑄込み(1H)の間であったが、改良型では5Hとの重量差がなくなり充填率が向上した。また0.10~0.20MPaの一般的な圧力鑄込みの鑄込み圧力の範囲で弁は完全に動作し、スラリー漏れも生じなかった。

表2 改良型による圧力鑄込み試験と成形体重量（耐熱磁器用陶土）.

鑄込み方法 鑄込み圧力	5HA 新圧力鑄込み (改良石膏型)	1H 従来圧力鑄込み	5H 複数口圧力鑄込み
0.20MPa	599g	596g	599g
0.15MPa	597g	591g	596g
0.10MPa	595g	587g	594g

また弁がスライドすることにより、鑄込み終了時の副鑄込み口上面における弁の専有面積が減少し脱型時の弁の脱着もスムーズに行えるようになった。作業性を作業時間で評価したところ、改良前の新圧力鑄込み型は従来圧力鑄込みの約1.3倍の作業時間が必要であったのに対し、改良後は約1.1倍と作業性の大幅な向上も実現した。

4. まとめ

圧力鑄込み成形における圧力差を利用し泥漿の流れを制御する新しい石膏型の技術検証と改良を行った。結果、本技術は十分に実用化可能なレベルまで技術開発が進展したといえる。一般に100回の使用回数が求められる型の耐久性に関しては時間の関係で十分な、検証はできなかったが、研究期間に行った20回程程度の使用では泥漿漏れなどの問題はなく、また、弁の摩耗に自然に対応できるような弁機構の開発ができていることから十分な耐久性があると考え。今後、企業への技術移転を図りながら、確認をすすめていく予定である。

謝辞

本研究は平成23年度公募研究-研究成果展開事業研究成果最適展開支援プログラムフェージビリティスタディ【FS】ステージによりJSTの委託研究事業として実施した。研究の実施に関して、多大のご助言をいただきました佐賀県地域産業支援センターの安田誠二科学技術コーディネータに厚くお礼申し上げます。また、関連の事務手続きにご指導をいただきましたJST担当者の方々に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 蒲地伸明, 吉田秀治, 佐賀県窯業技術センター平成18年度研究報告書, 1-5 (2007).
- 2) 蒲地伸明, 吉田秀治, 佐賀県窯業技術センター平成19年度研究報告書, 1-3 (2008).
- 3) 蒲地伸明, 吉田秀治, 佐賀県窯業技術センター平成20年度研究報告書, 5-8 (2009).
- 4) 日本国特許第5181101号.
- 5) 蒲地伸明, 佐賀県窯業技術センター平成15年度研究報告書, 33-36 (2003).