シャフト炉式廃棄物ガス化溶融システムにおける低 NO_x 燃焼の取り組み

～廃棄物発電の高効率化に向けて～

The development of low NO_x combustion in the shaft-furnace type direct melting system
～Towards high efficiency of waste power generation～

福田　尚倫　Naomichi FUKUDA
環境ソリューション事業部　技術部
プラント技術・開発室

矢野　　亮　Ryoh YANO
環境ソリューション事業部　技術部
プラント技術・開発室　マネジャー

永田　俊美　Toshimi NAGATA
環境ソリューション事業部　技術部
部長

川田　一輝　Kazuteru KAWATA
環境ソリューション事業部　技術部
プラント技術・開発室　室長

松下　晴樹　Haruki MATSUSHITA
環境ソリューション事業部　技術部
プラント技術・開発室

抄　録

廃棄物処理システムの燃焼排ガスに含まれる NO_x の脱硝方式のひとつとして，燃焼室にアンモニアもしくは尿素を直接吹込む無触媒脱硝方式があり，排ガスの再加熱が不要となるため，エネルギーの有効利用と設備の簡素化につながる。一方，無触媒脱硝方式を採用するためには燃焼室で発生する NO_x を可能な限り抑制しなければならない。そこで我々は，当社の主力商品であるシャフト炉式ガス化溶融システムの特徴である独立型燃焼室の利点を活かし，二段及び低空気比燃焼により発生 NO_x を極小化することで，排ガス再循環を用いずに安定的かつ高効率な無触媒脱硝が実現できたため報告する。

Abstract

Selective non-catalytic reduction system in which ammonia or urea is directly blown into the combustion chamber as a method of denitration of NO_x contained in the combustion exhaust gas of the waste treatment system, which makes it unnecessary to reheat the exhaust gas, and leads to simplification of facilities. On the other hand, in order to adopt the selective non-catalytic reduction system, it is necessary to suppress NO_x generation in the combustion chamber as much as possible. Therefore, we take advantage of the independent type turning combustion chamber, which is a characteristic of shaft-furnace type direct melting system, and minimize NO_x generation by two-stage and low excess air ratio combustion, which leads to stable and highly efficient selective non-catalytic reduction without exhaust gas recirculation.

1　緒言

近年，廃棄物発電施設は廃棄物を衛生的に無害化・減容化するだけでなく，安定的な自立・分散型エネルギー供給施設としての役割が注目されている。また，2015年12月の国連気候変動枠組条約第21回締約国会議（COP21）で採択された「パリ協定」や2016年５月に閣議決定された「地球温暖化対策計画」

を踏まえ，廃棄物処理分野においては廃棄物由来の温室効果ガスの削減とエネルギー供給の拡充を図るべく，３R(廃棄物の発生抑制，再使用，再生利用)を推進しつつ，残る再使用・再利用が困難な廃棄物については廃棄物発電等の導入による熱回収の徹底とその熱回収効率向上が求められている[1)]。さらに，2018年６月に閣議決定された「廃棄物処理施設整備計画」においては，2018年度から2022年度までの計画期間中に整備される廃棄物焼却施設の発電効率の平均値を，現状の19%から21%まで向上させる目標が掲げられている[2)]。このような背景の下，廃棄物発電プラントメーカーにおいては廃棄物処理の安全性・安定性を維持しながら，プロセスや設備要素技術の革新によって熱回収効率を向上させ，低炭素社会へ貢献していくことが求められている。

廃棄物発電施設では，その燃焼過程において窒素酸化物(以下，NO_x と略記)が発生する。NO_x には排出基準が設けられており，大気汚染防止法における基準値は250ppm(残存酸素濃度12%換算値，以下明記しない限り NO_x 濃度は本換算値として表記する)であるが，市町村等の上乗せ排出基準があり，250ppm よりも厳しい基準値が適用される場合がほとんどであり，脱硝設備にて基準値以下まで NO_x 分解する必要がある。廃棄物処理システムの燃焼排ガスに含まれる NO_x の脱硝方式には，表１に示すように触媒脱硝方式(以下，SCR と略記)と無触媒脱硝方式(以下，SNCR と略記)の２種類がある。図１に示すように，SCR はアンモニアと触媒を使用して脱硝する一般的な方式であるが，触媒の活性の観点から200℃前後で使用されるため，150～180℃程度の排ガスを蒸気等で再加熱する必要がある。一方，図２に示すように，SNCR は燃焼室にアンモニアもしくは尿素を直接吹込む方式であり，排ガスの再加熱が不要となる。これにより再加熱用の蒸気を発電用に使用できるため，発電効率の向上を図ることができる。さらに，触媒反応装置と排ガス再加熱器が不要となるため，設備の簡素化にもつながる。しかし，SNCR は SCR に比べて脱硝率が低いため，従来，排ガス基準値が50ppm 以下の場合は SNCR を適用することができなかった。排ガス基準が厳しい場合においても，SNCR を適用しエネルギーの有効活用を図るためには，燃焼過程で発生する NO_x をできる限り低減することが必要となる。

本稿では，SNCR で排出 NO_x を50ppm 以下に抑制することを目標とし，当社の主力商品であるシャフト炉式ガス化溶融システムにおいて低 NO_x 燃焼に取り組んだ内容について報告する。

表１　窒素酸化物の脱硝方式
Table. 1　Denitration methods of nitrogen oxides

脱硝方式	概要	メリット	デメリット
触媒脱硝(SCR)	・NO_x とアンモニアを触媒を使用して反応 ・反応温度は200℃前後	・脱硝率が高い	・150～180℃程度の排ガスを200℃まで再加熱するために蒸気が必要
無触媒脱硝(SNCR)	・燃焼室の800～900℃の域に、アンモニア水もしくは尿素水を直接噴霧して NO_x と反応	・排ガスの再加熱が不要なため、エネルギーの有効利用と設備の簡素化につながる	・脱硝率が低いため、排ガス規制が厳しい場合は適用できない

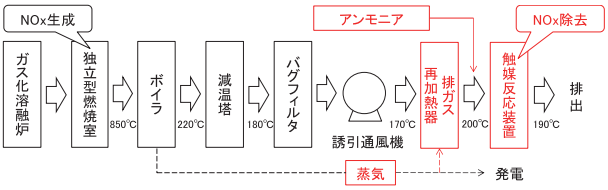

図１　触媒脱硝方式によるシャフト炉式ガス化溶融システムのプロセスフロー
Fig. 1　Process flow of shaft-furnace type direct melting system using selective catalytic reduction

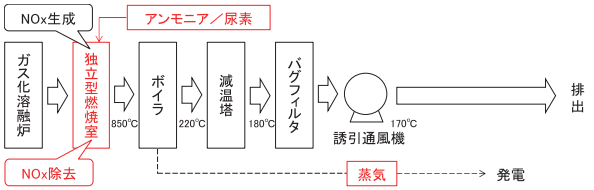

図２　無触媒脱硝方式によるシャフト炉式ガス化溶融システムのプロセスフロー
Fig. 2　Process flow of shaft-furnace type direct melting system using selective non-catalytic reduction

2　シャフト炉式ガス化溶融システムの特徴

図３に当社のシャフト炉式ガス化溶融システムの中核をなすガス化溶融炉及び独立型燃焼室を示す。ガス化溶融炉では，中央上部からコークス・石灰石と共に廃棄物が投入される。廃棄物は乾燥・予熱帯で水分が蒸発された後，炉内を降下し，熱分解ガス化帯で可燃分が熱分解・ガス化される。熱分解後に残った不燃分は，コークスと共に燃焼帯及び溶融帯へと降下する。コークスは炉下部に設置した羽口

(送風ノズル)から供給される空気及び酸素により燃焼され，高温の溶融帯を形成し灰分は完全に溶融される。溶融物は適度な流動性を保ちつつ，炉底部出湯口から水槽に排出・急冷されることで粒状のスラグと鉄分(メタル)となり磁選機で分離回収後有効利用される。

一方，溶融炉内で発生した熱分解ガスは後段の独立型燃焼室に導入され完全燃焼される。熱分解ガスはメインバーナー内部で燃焼用空気と混合されて燃焼する。メインバーナーは旋回流を生み出すように配置されており，旋回燃焼により均一な燃焼を行うことができる。熱分解ガスは燃焼室上部の主燃焼帯において1,050～1,100℃の高温で燃焼したのち，950～1,050℃の高温滞留帯において充分な燃焼時間を確保することでダイオキシンを完全に分解している。

このように，ガス化溶融炉と独立型燃焼室を分離し個別に制御することで，完全溶融と完全燃焼の両立を達成できる点がシャフト炉式ガス化溶融システムの大きな特徴である。特に，燃焼室はガス燃焼が主体であり，固体燃焼に比べて燃焼性が高く，燃焼制御が容易である。また，旋回燃焼方式によりガスと空気の高い混合撹拌性を確保できるという利点を有している。

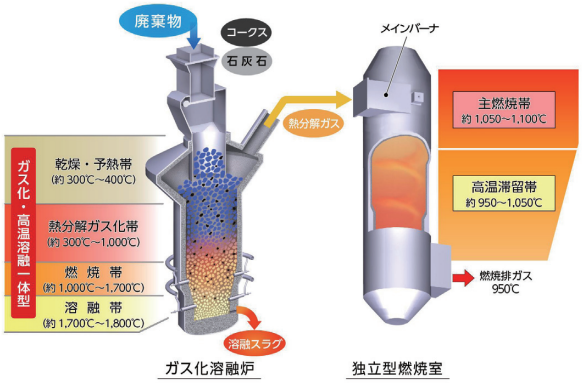

図３　ガス化溶融炉及び独立型燃焼室
Fig. 3　Gasifier and independent type turning combustion chamber

3 NO_x の生成メカニズムと低減対策

燃焼で発生する NO_x を抑制するための低 NO_x 燃焼法は，サーマル NO_x 対策とフューエル NO_x 対策に分けられる[3]。サーマル NO_x は，燃焼空気中の窒素を起源とし，1,500℃以上の高温で生成される。一方，フューエル NO_x は燃料中の窒素分を起源とし，火炎帯とその直後で急速に NO_x に変換し生成する。燃焼室に流入する廃棄物の熱分解ガスは水分を多く含むためカロリーが低く，1,500℃以上の高温に達する可能性は低いことから，発生している NO_x はフューエル NO_x が主体であると考えられる。

低フューエル NO_x 燃焼法としては二段燃焼と低空気比燃焼が知られている。二段燃焼は，一段階目の燃焼を空気比0.8程度の燃料過濃の状態で行わせ，燃料中窒素から生成する NO，HCN，NH_3 を高温域の充分な滞留時間で N_2 に分解したのち，燃焼用空気を追加投入して二段階目に燃焼を完結させるものである。また，燃料中窒素のうち NO_x に変換する割合は変換率と呼ばれ，酸素濃度が高いほど変換率は高くなる。低空気比燃焼は，燃焼が完結する領域での残存酸素濃度を低下させ，NO_x 変換率を抑制するものである。これらの手法を独立型燃焼室に適用し，二段及び低空気比燃焼による低 NO_x 燃焼を図ることとした。

低空気比燃焼では，燃焼空気の吹込み量が減るため，ガスと空気の混合撹拌性が低下し，未燃成分が残存しやすくなる。そのため，排ガスの一部を燃焼室に循環させる排ガス再循環(以下，EGR と略記)を併用し，燃焼場の混合撹拌性を維持して低空気比燃焼を行う場合が一般的である[4]。EGR を併用する場合は，排ガスを循環させるためのダクト，送風機，ダンパが必要であることに加え，排ガスを再循環させる分，通過ガス量が増加するボイラやバグフィルタ等は，設備容量を大きくする必要がある。また，腐食防止のため，運転停止時を含めて再循環ダクト内において結露が生じないように配慮する必要がある。当社のシャフト炉式ガス化溶融システムでは，上述のように旋回燃焼方式による高い混合撹拌性を有していることから，この特徴を活かし，EGR を併用せずに低 NO_x 燃焼を行うことで，設備の簡素化を図ることとした。

4 低 NO_x 燃焼による発生 NO_x 低減

独立型燃焼室の特徴を活かし，EGR を用いず，上述の二段及び低空気比燃焼による低 NO_x 燃焼試

表２　二段及び低空気比燃焼による発生 NO_x 低減試験結果
Table. 2　The results of NO_x reduction test by two-stage and low excess air ratio combustion

	条件1（従来型燃焼）	条件2（低NO_x燃焼）
燃焼空気比（燃焼室単体）	1.3	1.1
バグフィルタ出口NO_x濃度 [ppm/$O_2$12%]	100～140	60～80
煙突CO濃度 [ppm/$O_2$12%]	3.6	2.4
（燃焼室立面） 熱分解ガス 一次空気 二次空気	メインバーナー 酸化雰囲気 （空気比>1.0）	還元雰囲気 （空気比<1.0） 酸化雰囲気 二次空気分散
（燃焼室断面）		

験を実機にて行った。試験結果を表２に示す。

条件１は従来型の燃焼条件であり，燃焼用一次空気をメインバーナー部及びメインバーナーの下部から吹込むとともに，二次空気を旋回の途中から吹込んでいる。一次空気と混合した熱分解ガスは旋回しながら燃焼し，火炎が形成される。燃焼室に流入する可燃成分に対する燃焼空気比は1.0以上であり，燃焼室内部は酸化雰囲気となっている。このとき，燃焼により発生する NO_x をバグフィルタ出口において連続測定した結果，100～140ppm であった。

一方，条件２が低 NO_x 燃焼での燃焼条件である。燃焼室上部の燃焼空気比を1.0未満まで低減するとともに，二次空気の一部を燃焼室中部に分散して吹込んだ。燃焼室上部の領域を還元雰囲気にするとともに，高温での滞留時間を確保することで，NO，HCN，NH_3 を N_2 に分解し，残存する未燃成分は燃焼室中部から吹込んだ二次空気の二段燃焼により完全燃焼させる狙いである。条件２の発生 NO_x 濃度及び排ガス CO 濃度の１時間移動平均値のトレンドグラフを図４に示す。独立型燃焼室の高い混合撹拌性により，不完全燃焼の指標である CO 濃度を条件１と同等レベルに低く抑制しながら，発生 NO_x も60～80ppm まで安定して抑制することができた。

また，二段燃焼による NO_x 低減効果を理論的に検証するために，数値計算を用いた素反応解析を実施した。解析の概念図を図５に示す。二段燃焼を模擬するため，燃焼室を二つの反応器としてモデル化し，各反応器内は完全混合と仮定した。燃焼室に供給する二段階の空気のうち，一次空気の量を空気比0.6から1.1の間で変化させた。残りを二次空気として，全体の空気量は一定とした。熱分解ガスの組成

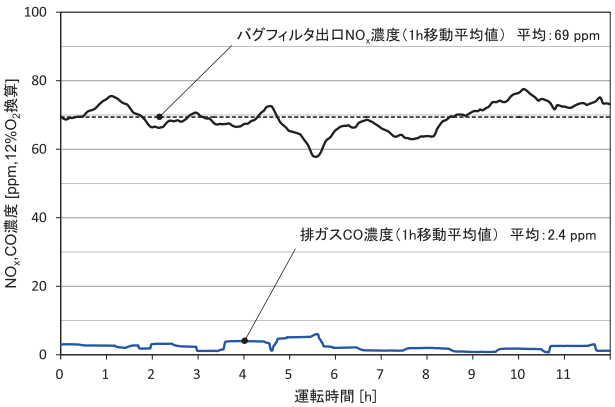

図４　低 NO_x 燃焼条件における発生 NO_x 濃度及び排ガス CO 濃度のトレンドグラフ（表２の条件２に該当）
Fig. 4　Trend graph (corresponding to condition 2 in Table. 2) of the generated NO_x concentration and exhaust gas CO concentration under the low NO_x combustion condition

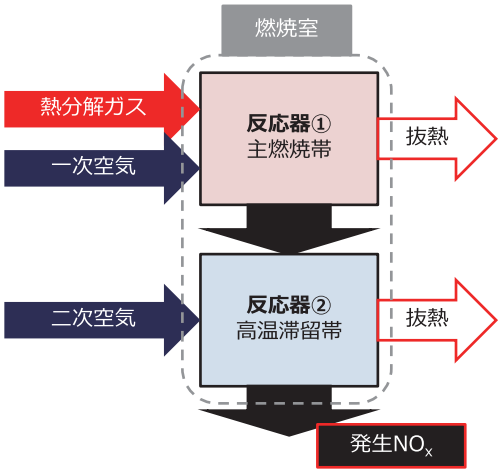

図５　素反応解析の概念図
Fig. 5　Conceptual diagram of elementary reaction analysis

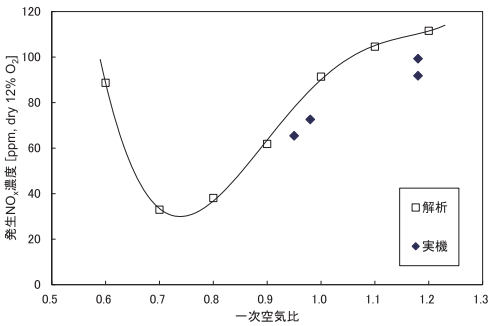

図６　一次空気比と燃焼室発生 NO_x 濃度の関係（解析結果および実機試験結果の比較）
Fig. 6　Relationship between primary air ratio and generated NO_x concentration at combustion chamber (comparison between analysis result and test result at actual plant)

は，実機のサンプリングから定めた。反応解析ソフトは Cantera 2.3.0[5]を使用し，素反応モデル Kilpinen 97[6]を組み込んだ。

解析結果を図６に示す。一次空気の割合を減らし，二次空気の割合を増やすことで，一段階目の燃焼が燃料過濃となり，発生する NO_x が減少する傾向が示された。また発生 NO_x は，一次空気比が0.7～0.8程度のときに最小化できることが示唆された。この傾向について，同条件の実機試験結果と比較すると，図６に示すとおり解析結果の傾向と一致した。以上の結果から，簡易なモデルにおいても二段燃焼の発生 NO_x を大まかに再現できるといえる。

5 低 NO_x 燃焼＋SNCR 試験

ここまでの低 NO_x 燃焼解析と試験結果を踏まえ，一次空気比を調整し，発生 NO_x を可能な限り最小化させた状態での SNCR 検証試験を実施した。図７に実機試験を行った設備のフローを示す。本設備の脱硝方式は元々 SCR であり，25％濃度のアンモニア水を触媒反応装置の上流側で噴霧する仕様となっている。本アンモニア水供給系統を流用し，燃焼室へアンモニア水を噴霧するための配管及びノズルを増設することで SNCR 試験を実施した。アンモニア水を噴霧する温度域が800℃を下回ると，脱硝効率が低下し，脱硝後の NO_x 濃度及び未反応のリークアンモニア濃度の増大を招く。一方，900℃を上回ると噴霧したアンモニア自体が NO_x に酸化分解し，NO_x 濃度が上昇する。そのため，アンモニア水を噴霧する箇所の温度域は800～900℃の範囲となるように選定し，25％濃度のアンモニア水を直接噴霧した。また，バグフィルタ出口に NO_x 及びアンモニアの連続分析計を設置し，脱硝後の NO_x とリークアンモニア濃度の連続測定を行った。リークアンモニアは，上述のように噴霧箇所の温度低下に伴う脱硝効率の低下により増大するだけでなく，アンモニア水の過剰噴霧によっても増大する。５～10ppm を超えると塩化アンモニウムによる白煙の発生が懸念されるため，この値を越えないよう監視を行った。アンモニア水の噴霧量制御は，既存設備の制御を流用し，煙突に設置された排ガス NO_x 連続分析計によりフィードバック制御を行った。

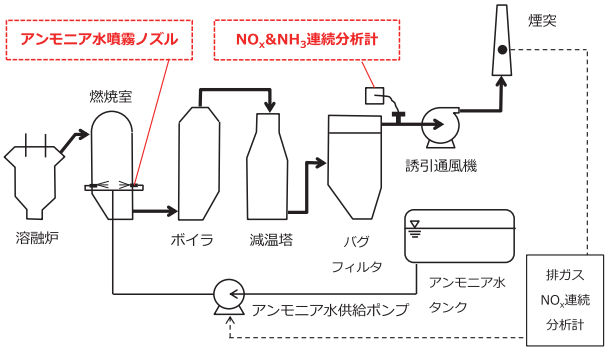

図７　SNCR 試験の設備フロー
Fig. 7　The flow of SNCR test plant

試験結果を図８に示す。図中にはバグフィルタ出口での NO_x 濃度の測定値，すなわち脱硝後の NO_x 濃度の１時間移動平均値と，同一の燃焼状態において別時刻に測定した発生 NO_x 濃度の平均値を示している。SNCR での脱硝後の NO_x 濃度は平均23 ppm となり，50ppm を超過すること無く安定した脱硝を行うことができた。低 NO_x 燃焼による発生 NO_x 濃度を測定した結果，平均61ppm であったことから，脱硝率は以下のように計算される。

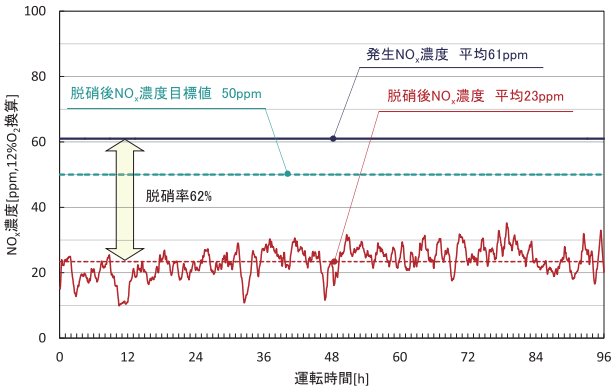

図８　SNCR 試験におけるバグフィルタ出口 NO_x 濃度（１h 移動平均）のトレンドグラフ
Fig. 8　Trend graph of bag filter outlet NO_x concentration (1 hour moving average) in SNCR test

$$脱硝率 = \frac{発生\ NO_x\ 濃度 - 脱硝後\ NO_x\ 濃度}{発生\ NO_x\ 濃度} \times 100$$

$$= \frac{61-23}{61} \times 100 \fallingdotseq 62\%$$

また，リークアンモニア濃度は，白煙発生の目安となる５ppm 以下に抑制することができた。アンモニア水を適正な温度域に噴霧したこと及び独立型燃焼室の高い混合撹拌性により，壁面から直接噴霧したアンモニア水が燃焼排ガスと均一に混合し反応

することで，高い脱硝率が得られた。

以上の試験結果から，①低 NO_x 燃焼により従来100～140ppm であった発生 NO_x を，EGR を用いずに61ppm まで低減し，②アンモニア水の吹込みを最適化した高効率な SNCR を組み合わせることで，排出 NO_x を安定して50ppm 以下に抑制できることが確認できた。

6 結言

シャフト炉式ガス化溶融システムにおける独立型燃焼室において，①二段及び低空気比燃焼により EGR を用いずに発生 NO_x を60～80ppm まで抑制することができた。②素反応解析により二段燃焼を再現でき，一次空気比0.7～0.8程度が発生 NO_x 最小化に最適であると示唆された。③一次空気比の調整を行い，発生 NO_x を可能な限り最小化した状態での SNCR 検証試験を実施し，安定的かつ高効率な脱硝（排出 NO_x 平均23ppm，リークアンモニア５ppm 以下）が可能であることを確認した。

当社が近年開発した低炭素型シャフト炉においては，シャフト炉から発生する熱分解ガスの性状をより均一に保つことができ，燃焼室での燃焼安定性が向上する[7]。そのため，今後はさらなる低空気比燃焼により低 NO_x 化が可能となると考えられる。

今後も廃棄物処理システムにおける低 NO_x 燃焼技術の向上により，廃棄物発電の高効率化並びに低炭素化社会への実現に寄与していく所存である。

参考文献

1）環境省：環境白書／循環型社会白書／生物多様性白書（平成29年度版），日経印刷株式会社，p. 171-172（2017）
2）環境省：廃棄物処理施設整備計画（平成30年６月19日閣議決定），p. 13（2018）
3）水谷幸夫：燃焼工学（第２版），p. 217-219（1989）
4）（公社）全国都市清掃会議：ごみ処理施設整備の計画・設計要領2017改訂版，p. 366-367（2017）
5）Goodwin, D. G., Moffat, H. K. and Speth, R. L., Cantera: An object-oriented software toolkit for chemical kinetics, thermodynamics, and transport processes. http://www.cantera.org, Version 2. 3. 0（2017）
6）Zabetta, E. C. and Kilpinen, P. T., GAS-PHASE CONVERSION OF NH_3 TO N_2 IN GASIFICATION PART II: Testing the Kinetic Model. IFRF Combustion Journal, Article Number 200104（2001）
7）谷口剛，名間瑞樹，永田俊美，泉屋亨，髙田純一：低炭素型シャフト炉における燃焼安定性の向上，第26回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集，p. 359-360（2015）