

高温雰囲気中における尿素の熱分解挙動*

古畠 朋彦^{*1}, 関 直人^{*2}, 新井 雅隆^{*3}

Decomposition Behavior of Urea in High Temperature Atmosphere

Tomohiko FURUHATA^{*1}, Naoto SEKI and Masataka ARAI

^{*1} Dept. of Mechanical System Engineering, Gunma University
Tenjin-cho 1-5-1, Kiryu, Gunma, 376-8515 Japan

Recently, Urea-SCR system is used for reducing NOx emission from diesel engine. In the Urea-SCR system, aqueous urea is injected into the exhaust gas flow where it evaporates and decomposes to NH₃. It is necessary to clarify the generation process of NH₃ in high temperature atmosphere for the improvement of NOx reduction performance. In this study, the generation behavior of NH₃ and the mass reduction of solid urea and 32.5wt% urea solution were measured in a high temperature vessel. As a result, the start of NH₃ generation became early and the maximum NH₃ concentration increased with increasing temperature in the decompositions of both samples. The start of NH₃ generation in the urea solution decomposition was later than that in solid urea decomposition owing to the evaporation of water. Moreover, the amount of mass reduction rate was increased when N₂ was passed through the vessel. It seemed that the reaction of urea was accelerated because reaction products were removed by the N₂ flow. As for the residue after decomposition, the mass of residue decreased with increasing temperature in the decompositions of both samples. The residues of them were decreased when N₂ was passed through the vessel under lower atmospheric temperature conditions.

Key Words : Diesel Engine, Pollutant, Combustion Products, Chemical Reaction, Urea-SCR, Urea Decomposition

1. 緒 言

ディーゼル車の排出ガスに対するポスト新長期規制のように、世界的にディーゼルエンジンの排出ガスに含まれるNOxとPMの大幅な削減が求められている。新しい規制に対応するためには排出ガスの後処理が不可欠であり、NOxに対しては尿素SCR(Selective Catalytic Reduction:選択触媒還元)やNOx吸収還元触媒により低減する方法が実用化されている。NOx吸収還元触媒では、エンジンにおける空燃比がリーン条件の時に生成したNOxは触媒に吸収されるが、そのNOxを還元する際に一時的に排気管中に燃料を供給する、あるいは空燃比を一時的にリッチにするなどして還元雰囲気にすることから、燃費の点では尿素SCRの方が優れており、大型トラックから乗用車まで広く採用されるようになってきた。

尿素SCRでは、排気管中に尿素水を噴射し、尿素が分解して生成するアンモニアと排ガス中のNOxが触媒上で反応しNOxが還元される。尿素SCRシステムの課題としては、低温時のNOx除去率の向上⁽¹⁾⁽²⁾や、アンモニアスリップ⁽³⁾の抑制が挙げられ、さらには低温時の触媒上への尿素および尿素分解物の堆積も問題視されている⁽⁴⁾。そのために尿素供給方法の最適化⁽⁵⁾⁽⁶⁾や触媒の開発⁽⁷⁾などが進められてきたが、より効果的な解決策を探るためには、まず尿素の排ガス中での熱分解挙動を詳細に把握する必要がある。また、近年では尿素SCRシステムのNOx除去性能の推算を目的としたモデリングが行われているが⁽⁸⁾⁽⁹⁾、高精度なモデル開発のためにも尿素の熱分解過程につ

* 原稿受付 2010年11月25日

^{*1} 正員、群馬大学大学院工学研究科(〒376-8515 群馬県桐生市天神町1-5-1)

^{*2} 東京電力(株)

^{*3} 正員、フェロー、群馬大学大学院工学研究科

E-mail: tfuruhat@gunma-u.ac.jp



いての正確な情報が不可欠である。

そこで本研究では尿素および32.5wt%尿素水溶液を高温容器中で熱分解させ、その際のアンモニア生成挙動や質量減少挙動を測定し、熱分解過程について実験的に検討した。さらに、容器に窒素を流通させながら熱分解を行い、熱分解挙動に対する気流の影響についても調査した。

2. 実験装置および方法

図1は実験装置の概略図である。試料には固体の尿素粉末と、32.5wt%尿素水溶液を用いた。試料は容器中に天秤で保持される。試料の初期質量は固体尿素、尿素水溶液のどちらの場合も30mgとした。容器はステンレス製で、一边の長さが100mmの立方体の三方から円柱をくり抜いたような構造となっており、円形の合成石英製の窓が容器上面と側面に設置されている。容器の内容積は約260mlである。容器の四隅にはヒータが設置されており、容器内雰囲気温度 T_a を500°Cまで上げることができる。容器内温度は熱電対で測定し温度コントローラで制御した。容器内温度が設定値になった後に、天秤に載せた試料を容器内に挿入することで熱分解を開始させた。天秤を側面の窓からビデオカメラで撮影し、その変位から試料の質量減少量を測定した。天秤を容器に挿入した直後は、天秤も不安定で容器内温度も一時的に低下する。天秤の変位の計測は、天秤のゆれが収まった時点（挿入から約10秒後）から開始した。容器内温度は、挿入直後は設定温度から約20°C低下するが、約120秒で設定温度まで回復した。容器中のアンモニア濃度を測定する際には、図2に示すように容器上部にサンプリングプローブの挿入口を設けたステンレス製のふたを設置し、その挿入口からステンレス製サンプリングプローブを挿入して容器内ガスをサンプリングした。サンプリングしたガスは、アンモニア濃度を連続的に測定することができるMEXA-1170NX（堀場製作所）に導入し分析した。試料内温度の測定では、外径0.25mmのシース型熱電対を試料中に挿入し、反応中の試料内温度 T_u を測定した。

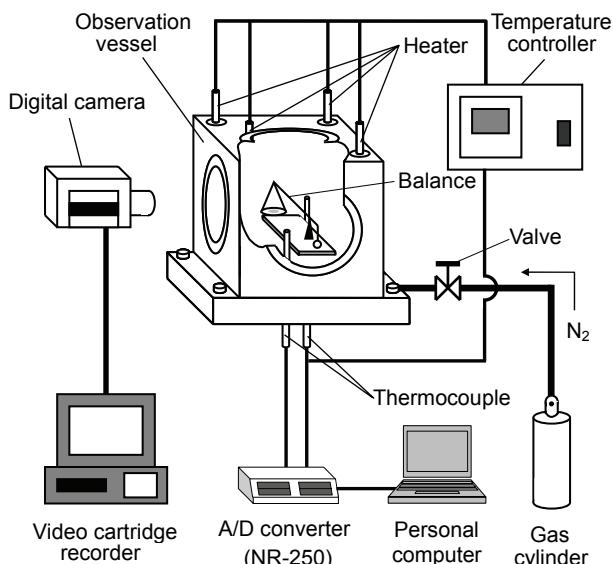


Fig. 1 Experimental apparatus

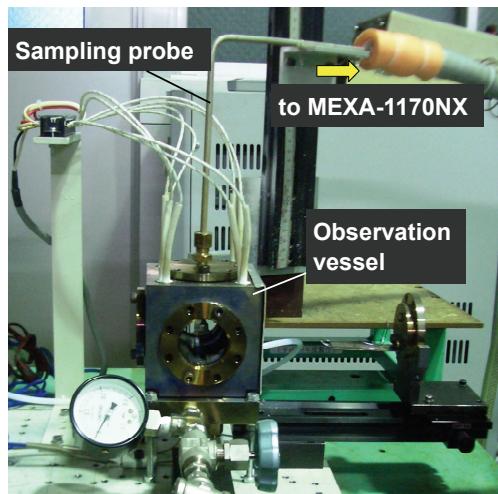


Fig. 2 Measurement of NH₃ concentration in the vessel

実験は、容器に窒素を流通させず空气中で試料を熱分解させる場合と、容器に窒素を流通させながら試料を熱分解させる場合の二通りで行った。窒素を流通させる場合の流量は3L/minとした。

3. 実験結果および考察

3・1 アンモニア生成挙動と質量減少速度

試料を熱分解した際のアンモニア濃度と質量減少量の経時変化を図3と4に示す。図3は固体尿素の、図4は32.5wt%尿素水溶液の結果である。図中の縦軸は、試料質量 M を試料の初期質量 M_0 (30mg)で割った値を示している。この実験では、アンモニア濃度を測定するためのMEXA-1170NXのサンプリングガス吸引流量が3L/minであ

ったため、容器下部から窒素を3L/minで供給することで容器内の圧力低下を防ぎ、外気が容器内に入ることのないようにした。

図3と4のアンモニア濃度の経時変化を見ると、どちらの試料の場合にも、容器内雰囲気温度 T_a が高い方がアンモニアの生成開始が早く、濃度の最大値も高くなっていることがわかる。また、最大値を示した後の濃度の減少は T_a が低いほうが緩やかである。

図3の固体尿素の場合では、質量減少の開始とほぼ同時にアンモニア濃度が急上昇している。この時試料を観察すると、試料は融解し透明な液体状であり、盛んに気泡が発生していた。この気泡は主にアンモニアであると考えられ、質量減少の初期段階で急速にアンモニアが生成することを示している。 $T_a = 200^\circ\text{C}$ の場合には、初期段階での急速なアンモニアの生成後、緩やかな質量減少とともにアンモニア濃度も緩やかに低下している。この時試料は白色の固体状であり、固体が緩慢に熱分解しながらアンモニアを生成していると考えられる。 $T_a = 200^\circ\text{C}$ の場合には、最終的に初期質量の約30%が白色固体として残存した。 $T_a = 400^\circ\text{C}$ の場合には、初期段階で試料は急速に熱分解し、それにあわせてアンモニア濃度も急上昇するが、試料の質量がほぼゼロになるとともにアンモニア濃度もゼロとなった。雰囲気温度が高い場合には熱分解反応が急速に進行することがわかる。 $T_a = 400^\circ\text{C}$ の場合には最終的には残存物はなかった。

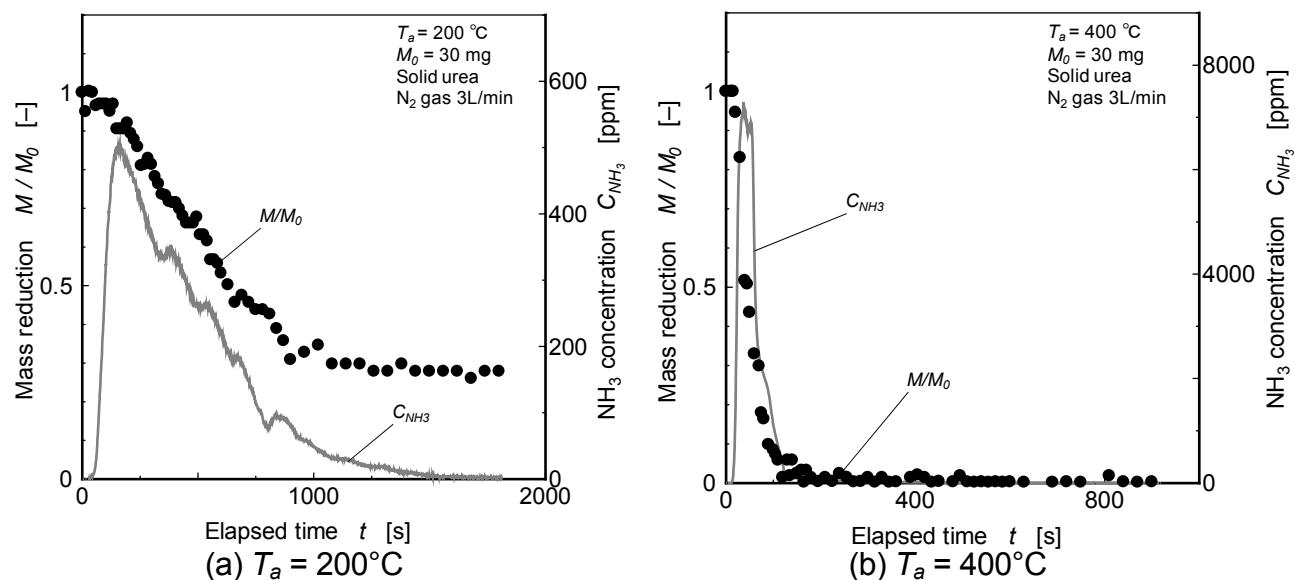


Fig. 3 Temporal changes of NH_3 concentration and mass of sample in solid urea decomposition

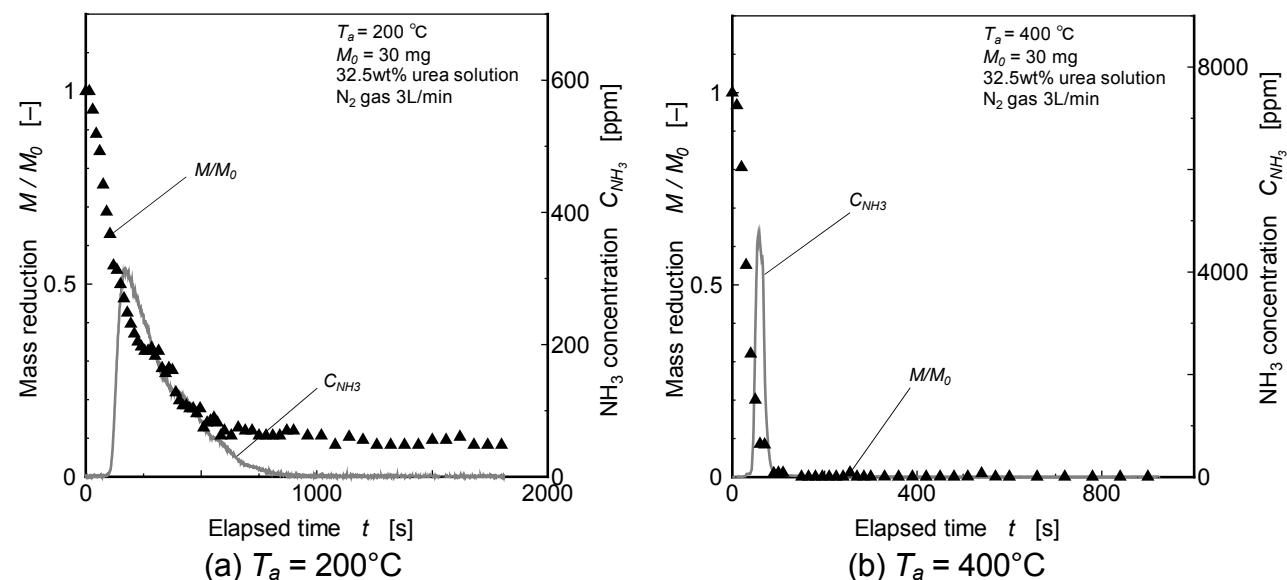


Fig. 4 Temporal changes of NH_3 concentration and mass of sample in 32.5% urea solution decomposition

図4の32.5wt%尿素水溶液では、固体尿素の場合と異なり、開始直後に試料は急激に質量減少しているにもかかわらず、質量減少の開始から少し遅れてアンモニア濃度が上昇していることがわかる。これは、尿素水溶液の熱分解における初期の質量減少は主に水分の蒸発によるものであり、水分の蒸発終了後に尿素の熱分解が開始していることを示していると考えられる。アンモニア濃度が最大値を示している時点の試料は、固体尿素の場合と同様に透明の液体状であり気泡が生じていた。従って、水分蒸発終了後の尿素の熱分解挙動は固体尿素の場合とほぼ同様であると考えられる。 $T_a=200^{\circ}\text{C}$ の場合には試料初期質量の約10%が最終的に白色固体として残存したが、尿素水中の尿素の質量割合が32.5%であることから、初期の尿素質量に対する最終的な残存物の割合は固体尿素の場合でも尿素水の場合でもあまり変わらないことがわかる。このことからも、固体尿素と32.5wt%尿素水溶液の熱分解挙動は、水分の蒸発を除きほぼ同じであると思われる。

尿素からアンモニアを生成する総括反応は以下のようになる。



式(1)は尿素の熱分解を表し、式(2)は尿素の分解により生じたイソシアノ酸（シアノ酸）の加水分解を示している。これより1モルの尿素から2モルのアンモニアが生成した場合を尿素のアンモニアへの転換率が1であるとして、アンモニア濃度の測定結果から尿素の転換率を求めたところ、 $T_a=400^{\circ}\text{C}$ の場合、固体尿素で0.6より小さく、32.5wt%尿素水溶液では0.6より大きくなり、尿素水溶液の方が若干高い転換率を示した。これは、尿素の水溶液ということもあり、加水分解が固体尿素の場合より進行したとも考えられるが、先に述べたように尿素水の熱分解ではアンモニアが主に水分の蒸発後に生成されていることを考えると、加水分解反応がアンモニア生成に大きく寄与しているとは考えにくく、アンモニア濃度変化からの転換率推算が誤差を含んでいることを考慮すると、固体尿素と尿素水で転換率の差はあまりないと言える。ただし、式(2)の加水分解反応が全く進行していないとは言い切れない。加水分解が全くおこらなければ、尿素からアンモニアへの転換率が0.5を越えることはないが、本実験では、転換率は固体尿素および尿素水溶液のどちらの場合でも0.5を越えている。従って、加水分解反応は、アンモニア生成に対する寄与は大きくなっていると考えられる。そこで問題となるのが、反応に必要な水がどこから供給されているのかということであるが、この点は今後の検討課題である。 $T_a=400^{\circ}\text{C}$ の場合には最終的な残存物が無かつたことから、尿素のかなりの割合がアンモニア以外の含窒素化合物として放出されたと推測される。

3・2 容器内への窒素の流通が熱分解挙動に及ぼす影響

実際の尿素SCRシステムでは、排気管内で尿素水が噴霧され、熱分解生成物は熱分解が生じている領域から常に取り除かれている。そこで、容器に窒素を流通させず空气中で試料を熱分解させる場合と、容器に窒素を流通させながら試料を熱分解させる場合の二通りで実験を行い、両者の熱分解挙動を比較した。窒素を流通させる場合には、容器下部から窒素を3L/minで供給した。また、どちらの場合でも容器上部のサンプリングプローブ挿入口にはプローブを挿入せず開放状態とした。従って、容器内のガスはプローブ挿入口から流出することになる。

図5に固体尿素と32.5wt%尿素水溶液の質量減少量の経時変化について、容器内雰囲気温度 T_a が135°C、200°C、300°Cおよび400°Cの場合の結果を示す。尿素の融点は132.7°Cであり、 $T_a=135^{\circ}\text{C}$ は反応が生じる下限の温度に近い条件である。窒素を流通させた場合は"with gas flow"として、流通させない場合は"without gas flow"として示してある。試料内温度は外径0.25mmのシーズ型熱電対を直接試料中に挿入して測定したが、その場合、試料質量の経時変化は測定できない。そこで、同様の条件で試料内温度 T_u のみを測定し、その経時変化も同じグラフ上に示した。

$T_a=135^{\circ}\text{C}$ の場合には窒素流通の有無による差異が顕著に現れており、固体尿素および32.5wt%尿素水溶液のどちらの場合でも容器内に窒素を流通させた場合の方が質量減少速度は大きくなっている。さらに、最終的な残存物の質量も容器内に窒素を流通させた場合の方が少なくなっている。この時、同じ試料では窒素流通の有無による試料内温度の差はほとんどない。従って、質量減少速度の増加は主に容器内に窒素を流通させたためであると考えられる。 $T_a=200^{\circ}\text{C}$ の場合も、窒素流通の有無による差は小さいが、やはり窒素を流通させた場合の方が質量

減少速度は大きくなっている。 $T_a = 300^\circ\text{C}$ の場合では、窒素を流通させた方が初期段階の質量減少速度が大きくなっているが、試料内温度も窒素を流通させた場合の方が早く上昇しており、その影響が表れているとも考えられる。しかし、例えば固体尿素の場合、熱分解後期の開始から600秒以降では、試料内温度はほぼ同じであるにもかかわらず窒素を流通させた方が質量減少量は大きくなっていることから、窒素流通による質量減少の促進効果が現れている。 $T_a = 400^\circ\text{C}$ の場合では、試料内温度は窒素を流通させた場合の方が早く上昇しているが、質量減少速度自体が大きくなり、質量減少に対する窒素流通の効果は明確には確認できない。

以上の結果から、熱分解反応中に反応生成物を除去することにより、熱分解反応が促進され、その効果は反応温度が低いほど高くなることが明らかとなった。なお、固体尿素と32.5wt%尿素水溶液の試料内の温度上昇を比較すると、尿素水の温度上昇の方が遅くなっている。これは尿素水中の水分蒸発の潜熱によるものである。また、 $T_a = 300^\circ\text{C}$ と 400°C の場合には、試料内温度の上昇がおよそ 200°C から 250°C の間で緩やかになっているが、この期間は試料において気泡が激しく発生し、アンモニアの生成が最も盛んな期間を含んでいることから、関連する反応が吸熱反応であることが推察される。

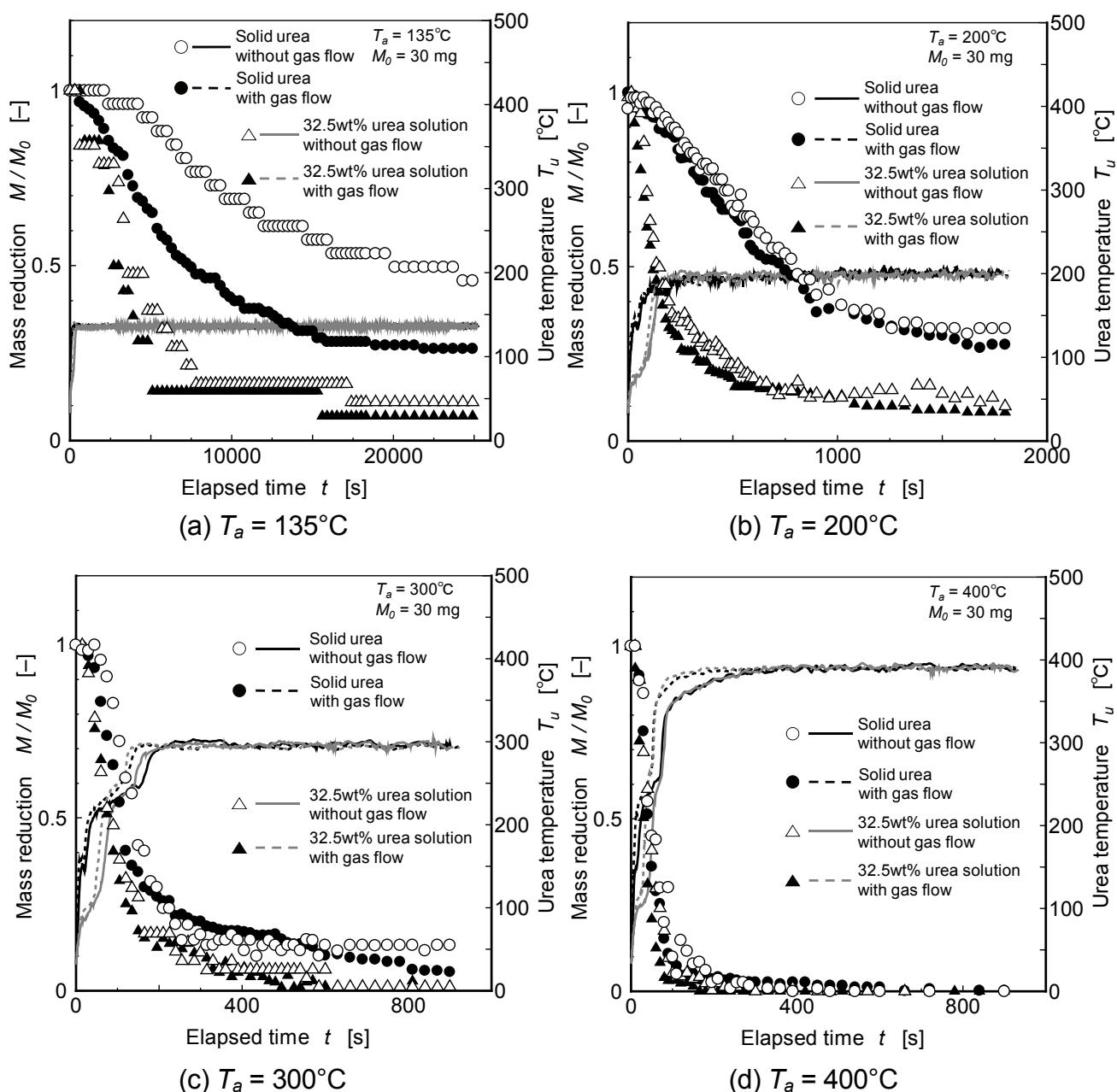


Fig. 5 Temporal changes of mass and internal temperature of decomposition (with and without N_2 gas flow)

3・3 質量減少速度のアレニウスプロット

アンモニア生成反応について検討するために、アンモニア生成中の質量減少速度についてアレニウスプロットを試みた。質量減少速度(dM/dt)の算出例として、図6に雰囲気温度 $T_a = 200^\circ\text{C}$ で、容器に窒素を流通させた場合の固体尿素と尿素水溶液の質量減少について示す。図中の(a)は固体尿素、(b)は尿素水溶液の場合である。図に示すように、アンモニアが生成している期間で試料質量の時間変化の傾きがほぼ一定と見なせる区間における dM/dt の値を求めた。各試料について雰囲気温度 T_a を変えて実験を行い、重量減少速度を求め、アレニウスプロットした結果を図7に示す。

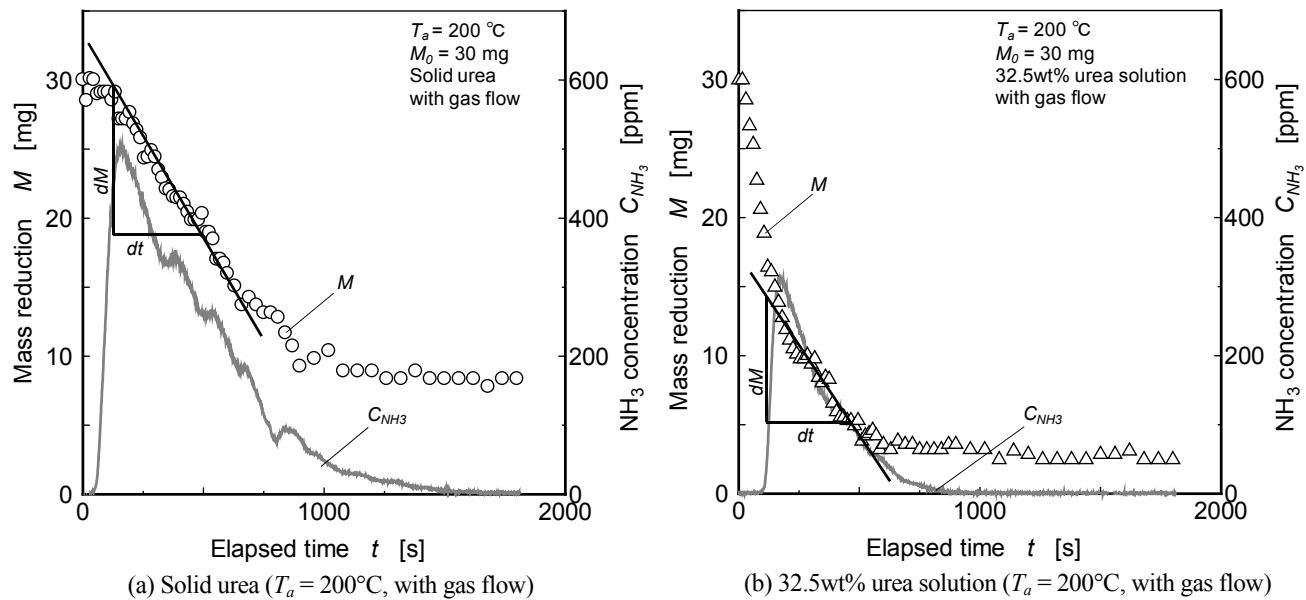


Fig. 6 Examples of evaluation of mass reduction rate in decomposition

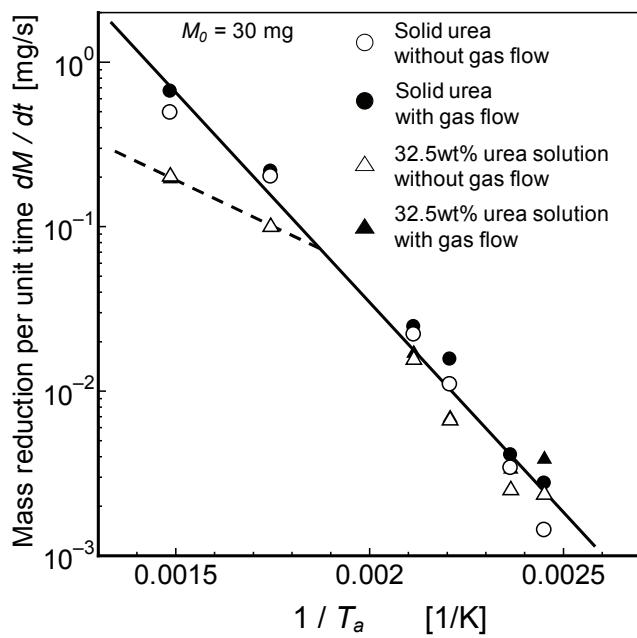


Fig. 7 Arrhenius plot of mass reduction rate in decomposition

図7から、アレニウスプロットの結果は、 $T_a = 300^\circ\text{C}$ と 400°C の尿素水の場合を除きほぼ同一の直線上にあることがわかる。これは、 $T_a = 300^\circ\text{C}$ と 400°C の尿素水の場合を除いて、固体尿素の熱分解においても、尿素水の熱分解においても質量減少を律速している反応は同じであることを意味している。さらに、容器内に窒素を流通させ

た場合と流通させない場合を比較してもプロットの傾きはほとんど変わらないことから、窒素を流通させた場合でも質量減少の律速反応は変わらないと考えられる。窒素を流通させた場合に質量減少速度が大きくなったのは、質量減少の律速反応が変わったためではなく、反応生成物を除去する効果によるものであると推測される。 $T_a = 300^{\circ}\text{C}$ と 400°C の尿素水について、雰囲気温度が高いことから、尿素水中の水分の蒸発と尿素の熱分解がほとんど同時に生じ、質量減少のグラフにおいて両者が分離されず、グラフから求めた dM/dt の値が尿素の分解以外に水の蒸発の影響を含んでいるためにアレニウスプロットの傾きが異なったと考えられる。

3・4 容器内への窒素の流通が質量減少速度に及ぼす影響

アレニウスプロットは縦軸が対数であり、容器内への窒素流通の有無による質量減少速度の差異が明確に現れない。そこで、各雰囲気温度において、容器内に窒素を流通させない場合の質量減少速度に対して、窒素を流通させた場合の質量減少速度が何倍になっているのかを示したのが図8である。

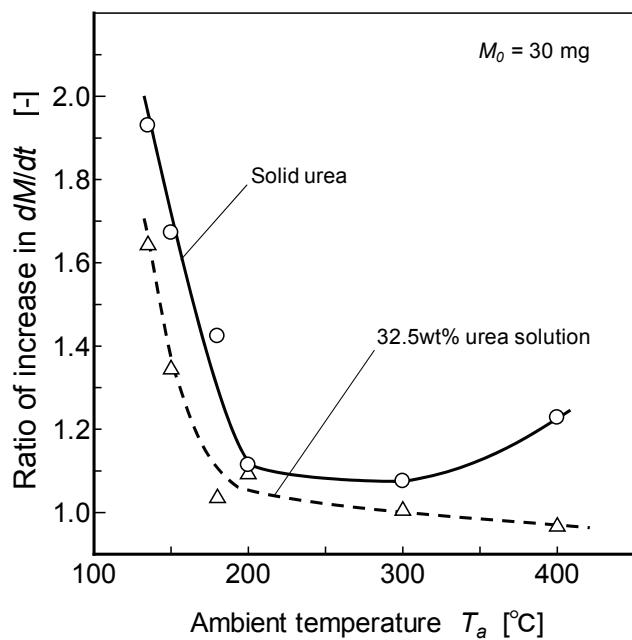
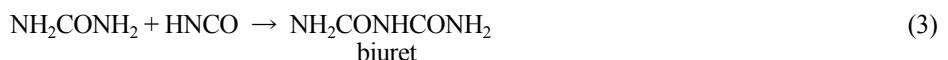


Fig. 8 Ratio of dM/dt (with N_2 gas flow) to dM/dt (without N_2 gas flow)

この図から、固体尿素と尿素水のどちらの場合でも、雰囲気温度 T_a が 200°C 以下で質量減少速度の増加割合が大きくなっている。これは図5に示したように、窒素を流通させた場合には試料内温度が早く上昇するため、結果的に質量減少速度が増加したことによるものである。従って、雰囲気温度 T_a が 200°C 以上では窒素流通の影響は小さいと考えられる。尿素の熱分解において、質量減少は主に式(1)の反応で生じるが、雰囲気温度 T_a が 200°C 以下の場合には、温度が低く式(1)の熱分解反応が遅いため、容器内に窒素を流通させ、反応生成物であるアンモニアを取り除くことによる式(1)の反応に対する促進効果が現れたと考えられる。また、尿素の一部は式(3)のように、式(1)で生成したイソシアヌ酸と反応してビウレット(biuret)を生成することが知られている⁽⁴⁾。



ビウレットの融点は 190°C であり、さらに融点以下でも分解するため、雰囲気温度 T_a が 200°C 以上の場合には、式(1)の反応が速くなるとともに、ビウレットが分解することで式(3)の反応も促進され、結果として尿素の減少速度が大きくなることで、窒素流通による反応生成物除去の効果が相対的に減少したと考えられる。

3・5 容器内への窒素の流通が残存物の質量に及ぼす影響

固体尿素と32.5wt%尿素水溶液を熱分解し、反応後の残存物の質量 M_r を測定した。その結果を図9に示す。縦軸は残存物の質量を初期試料中の尿素質量 M_u で割った値を示している。

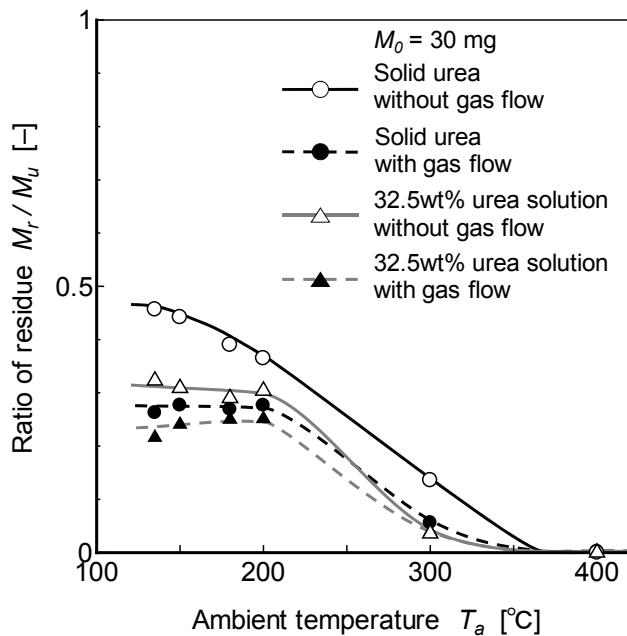
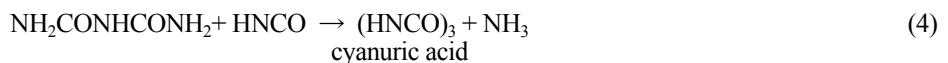


Fig. 9 Effect of ambient temperature on mass of residue

この図から、雰囲気温度 T_a が400°C以下では残存物が生成し、さらに T_a が低いほど残存物の割合は増加し、135°C以上200°C以下では固体尿素で窒素流通がない場合を除きほぼ一定値となることがわかる。

尿素の熱分解反応において、式(3)で生成したビウレットは式(4)のようにイソシアノ酸と反応してシアヌル酸(cyanuric acid)を生成する。その際アンモニアも生成する。



また、シアヌル酸はイソシアノ酸からも直接生成する(式(5))。



さらにシアヌル酸はイソシアノ酸と反応することにより、アンメリド(ammelide)、アンメリーン(ammeline)という化合物を経てメラミン(melamine)を生成する⁽⁴⁾⁽⁶⁾。従って、残存物はビウレット、シアヌル酸、アンメリド、アンメリーンおよびメラミンの混合物であると考えられる。このうちアンメリドとアンメリーンは200°C以上で分解することから、200°C以上で残存物の質量が減少することが説明できる。さらにシアヌル酸は融点が360°C以上であり、高温でシアン酸(沸点23.6°C)に分解し、メラミンも融点が354°Cであるが、270°C以上で分解することから400°Cでは残存物がないことも説明できる。

容器内への窒素流通の影響に関しては、固体尿素と尿素水溶液のどちらの場合でも窒素を流通させた方が残存物は減少している。これは、窒素を流通し、アンモニアを除去することにより、式(1)の反応に加え式(2)の加水分解反応も促進されることで、尿素からビウレットやシアヌル酸になる割合が減少し、その結果残存物が減少したと推測されるが、式(1)で生成したイソシアノ酸も除去されることにより、シアヌル酸からメラミンに至る一連の化合物の生成量が減少したとも考えられる。

4. 結 言

高温容器内で固体尿素および32.5wt%尿素水溶液の熱分解実験を行い以下の結論を得た。

1. 固体尿素と32.5wt%尿素水溶液のどちらの場合でも雰囲気温度が高いほどアンモニアの生成開始は早く、最大濃度も高くなった。尿素水溶液の場合には水分蒸発のために試料の質量減少の開始より遅れてアンモニアが生成した。
2. 容器内に窒素を流通させ、反応生成物を除去しながら熱分解反応を行うと、固体尿素と32.5wt%尿素水溶液のどちらの場合でも窒素を流通させない場合に比べ試料の質量減少速度は増加した。この影響は雰囲気温度が200°C以下で大きくなつた。
3. 固体尿素と32.5wt%尿素水溶液のどちらの場合でも、試料の熱分解後の残存物は雰囲気温度が高いほど少くなり、また雰囲気温度が低温の場合では、容器内に窒素ガスを流通させることにより残存物が少なくなった。

実際の尿素SCRシステムにおいては、尿素は排ガスが流通している排気管中に噴射されるため、尿素の熱分解による反応生成物は、熱分解が生じている領域から常に取り除かれていることになる。従って、本研究で得られた尿素の熱分解挙動は、容器中に窒素を流通させた場合の方がより実際のSCRシステム内における尿素の挙動に近いと思われる。しかしながら、実際の排ガス中には水分が含まれており、尿素の熱分解は常に水分が存在する雰囲気中で進行することになる。さらに尿素は水溶液として噴霧されるため、熱分解反応が生じる領域における水分の濃度は一層高くなると推察されるが、容器中に窒素を流通させた場合には、雰囲気中から水分が除去されている。従って、そこで得られた実験結果が実際の尿素SCRシステムにおける尿素の熱分解挙動を十分再現しているとは言えない。また熱分解後の残存物量と温度の関係から、触媒温度が400°Cを下回る場合には、尿素分解物が触媒上に堆積する可能性があることが示された。

謝 辞

本研究はUDトラックス(株)および(株)小松製作所からの受託研究に関連して行われたものであることを記し、謝意を表する。

文 献

- (1) 村田豊、徳井貞仁、渡辺聰一郎、竹下清人、大聖泰弘、鈴木央一、石井素、”尿素SCRシステムのNOx浄化率向上に関する研究（第1報）—NH₃吸着量制御のコンセプトと過渡運転への適用—”，自動車技術会論文集, Vol. 39, No. 5 (2008), pp.27-32.
- (2) 徳井貞仁、小宮怜、村田豊、大聖泰弘、鈴木央一、石井素、”尿素SCRシステムのNOx浄化率向上に関する研究（第2報）—NO₂/NO比がNOx浄化特性に与える影響—”，自動車技術会論文集, Vol. 40, No. 2 (2009), pp.381-386.
- (3) 鈴木央一、石井素、酒井克治、藤森敬子、”尿素SCR車の規制および未規制成分の排出特性解析”，自動車技術会論文集, Vol. 39, No. 6 (2008), pp.161-166.
- (4) Xu, L., Watkins, W., Snow, R., Graham, G., McCabe, R., Lambert, C., and Carter III, R. O., "Laboratory and Engine Study of Urea-Related Deposits in Diesel Urea-SCR After-Treatment Systems", *SAE Paper*, No. 2007-01-1582 (2007), pp.525-532.
- (5) Kawatari, T., Hamada, Y., Amou, K., Hamada, I., Funabashi, H., Takakura, T., and Nakagome, K., "A Study of a New Aftertreatment System (1): A New Dosing Device for Enhancing Low Temperature Performance of Urea-SCR", *SAE Paper*, No. 2006-01-0642 (2006), pp.221-228.
- (6) Nishioka, A., Sukegawa, Y., Katogi, K., Mamada, H., Kawatari, T., Mulai, T., and Yokota, H., "A Study of a New Aftertreatment System (2): Control of Urea Solution Spray for Urea-SCR", *SAE Paper*, No. 2006-01-0644 (2006), pp.241-247.
- (7) Fedeyko, J. M., Chen, H.-Y., Ballinger, T. H., Weigert, E. C., Chang H.-L., Cox, J. P., and Andersen, P. J., "Development of Thermally Durable Cu/SCR Catalysts", *SAE Paper*, No. 2009-01-0899 (2009), pp.367-373.
- (8) Devarakonda, M., Parekr, G., Johnson, J. H., Strots, V., and Santhanam, S., "Adequacy of Reduced Order Models for Model-Based Control in a Urea-SCR Aftertreatment System", *SAE Paper*, No. 2008-01-0617 (2008), pp.141-158.

- (9) McKinley, T., and Alleyne, A. G, "A Urea Decomposition Modeling Framework for SCR Systems", *SAE Paper*, No. 2009-01-1269 (2009), pp.47-61.
-