

氏 名	壹 岐 典 彦
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学位授与年月日	平成 5 年 3 月 25 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 精密工学専攻
学 位 論 文 題 目	石炭・水スラリーの噴霧燃焼機構に関する 基礎的研究
指 導 教 官	東北大学教授 永井 伸樹
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 永井 伸樹 東北大学教授 斎藤正三郎 東北大学教授 太田 照和 東北大学教授 榎本 兵治

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 緒 論

石炭微粒子を水に分散させた高濃度石炭・水スラリー (Coal-Water Mixture, CWM) は、30 %の水を含んだ液状燃料であるため、粉塵爆発の恐れがなく、パイプ輸送、タンク貯蔵などが可能になり、ハンドリングも容易である。反面、水分を含むため、単位重量あたりの発熱量の低、着火・保炎の難化等の短所が考えられる。また、石炭を成分とするため燃焼装置の熱負荷の低下、灰の処理などの問題を抱えている。

CWMの燃焼は液体燃料とも固体燃料とも異なるため、最適な燃焼装置の設計には燃焼中のCWM噴霧の挙動について知ることが必要であり、その基礎研究として個々の液滴の燃焼挙動を調べるのが大切である。そこで本研究ではCWM液滴の燃焼現象を詳しく観察するため、単一懸垂液滴燃焼の実験を行い、燃焼現象を表現するモデルをつくり、数値計算を行う。さらに実際の噴霧に近い状態での燃焼を調べるため、非懸垂状態の液滴を燃焼させる。

第 2 章 単一懸垂 CWM 液滴の燃焼

電気炉内の高温空気雰囲気中に、CWM液滴を石英糸または熱電対に懸垂して挿入し、その燃焼現象を観察する。温度範囲を広く、粒径範囲も広く設定し、さらに乾燥させたCWM粒子や原炭粒子と燃焼現象を比較して、CWM液滴燃焼における雰囲気温度、粒径、水分、石炭粒子の凝集体という構造の影響を調べる。

図1は脱灰済みCWM液滴の燃焼の一例である。液滴は高温雰囲気内に挿入されると、まず、水分を蒸発しCWM粒子となり(a)、温度が急激に上昇、揮発分ガスを生成・放出し始め、これが着火して火炎燃焼を開始する(b)、着火直後の火炎はほぼ球状であるが、すぐに上昇気流が発生し上方に伸びた火炎となる。次にCWM粒子内部からの揮発分ガスの急激な噴出により火炎が変形する(c)、この解き粒子内部からの噴出物が表面に付着する。揮発分ガスの火炎燃焼が終了すると(e)、固定炭素と灰を主としたチャーが残る。粒子内部からの噴出物は速やかに燃焼して消滅し、チャーの粒径は初期粒径に近づき(f)、後はゆっくりと燃焼する。雰囲気温度が900°C以下と比較的低温の場合、着火前に粒子表面に突起が観察され、多量の揮発分の放出がすでに行われているとみられるが、1000°C以上の場合は火炎着火時にはじめて粒子表面が著しく変形し、揮発分の放出開始から着火までの時間遅れが非常に短いと思われる。また、雰囲気温度が高いほどチャーは破碎しやすく、チャー燃焼時間が極端に短くなる。

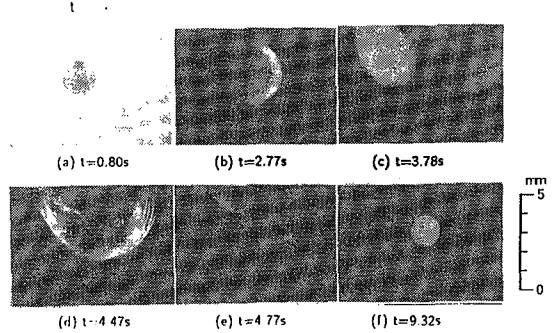


図1：CWM液滴燃焼 (Do=1.8mm, Ta=1000°C)

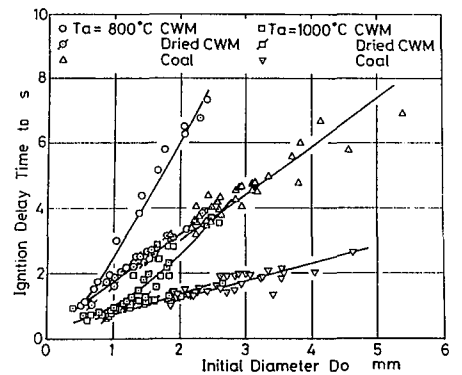


図2：着火遅れ時間

電子顕微鏡写真より、着火遅れ期間のCWM粒子の表面は滑らかではなく、割れ目や、溶融固化物とみられる丸い粒があちらこちらに見られ、表面は着火前でもかなり高温になっていることがわかる。

図2は着火遅れ時間を示す。CWM液滴と乾燥CWM粒子とでは水分蒸発のため差を生じるが、乾燥CWM粒子と原炭粒子とでは大きな差はみられず、原炭粒子の集合体であるか、単一の石炭粒子であるかという構造の影響は小さいことがわかる。

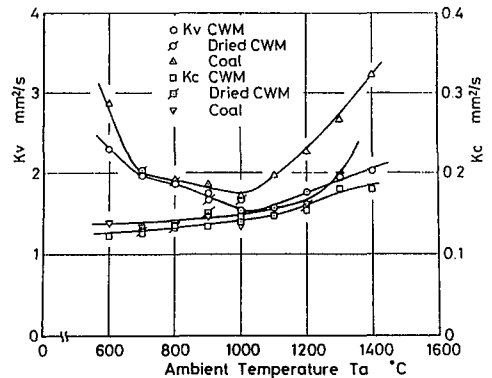


図3：揮発分燃焼速度係数・チャー燃焼速度係数

揮発分燃焼時間 t_v とチャー燃焼時間 t_c は、図3のように初期粒径 D_0 の2乗に比例しており、初期粒径の2乗則が成り立っている。揮発分燃焼時間は雰囲気温度 T_a が1000°Cで極大になっている。これは T_a が1000°C以下の場合では T_a の低下とともに揮発分ガスの生成・放出速度が低下し、可燃混合気の形成が遅れ、燃焼せずに拡散する揮発分の総量が増大し、その結果火炎燃焼する揮発分の

量が減少するためと考えられる。また、原炭粒子はCWM粒子に比べて高温雰囲気下で表面が吹き飛びやすく揮発分燃焼速度係数 K_v が大きくなっており、単一の石炭粒子とその凝集体との構造の違いによる影響が見られる。チャー燃焼時間は雰囲気温度 T とともに単調に減少しており、CWM液滴、乾燥CWM粒子、原炭粒子のいずれの場合もほぼ等しく、水分の影響も構造の影響も少ない。

未脱灰のCWM液滴において質量は時間に対してほぼ単調に減少するが、着火時は初期質量の70%よりも大きく、水分に相当するほどの質量減少はない。

第3章 CWM液滴燃焼の数値解析

本解析モデルでは、球対称を仮定しており、CWM液滴は周囲空気からの熱伝達やふく射により加熱され、水分を蒸発し、乾燥部分の石炭ガスが酸素と反応し発熱して、周囲空気の温度が急激に上昇し、着火に至るとし、液滴周りのエネルギーの保存則、各成分について質量保存則、連続の式について球対称の一次元非定常方程式を解く。蒸発面が徐々に液滴中心に近づくため、境界固定法を用いて計算する。

計算結果において着火遅れ時間は雰囲気温度により大きく変化する。揮発分燃焼時間は図4のように粒径 D の2乗に対してほぼ比例するが、やや上に凸の曲線であり、計算では粒径が大きいほど相対的に燃焼時間が短めになる。雰囲気温度の影響は実験結果と同様に小さい。

着火時の粒子温度は粒径が小さいほど高くなる傾向があるが、懸垂液滴の燃焼実験結果に比べて雰囲気温度に対する依存性は小さい。

CWM、液滴の質量は着火遅れの間はおもに水分の蒸発により減少し、揮発分燃焼中はおもに揮発分の放出により減少する。水分の蒸発期間と揮発分の生成・放出期間が重なっており、蒸発量が減少するところに揮発分放出が盛んとなるため、粒径1.0mm、1000℃の場合には液滴質量はほぼ単調に減少していく。

第4章 飛行CWM液滴の生成実験

単一懸垂液滴は噴霧に比べて液滴径が大きく、液滴の自由に運動できないため、非懸垂状態の微小液滴の燃焼を観察することにし、液滴生成法を検討した。本研究ではノズル管路の閉塞の恐れが無いこと、液滴の初速度がわかることなどの利点があるため、回転式アトマイザを採用する。

試作回転体では、周縁からCWMが紐状に伸びるが、紐は長くは伸びずに切れてしまい、大きな主滴とその後方に小さな余滴が生成する。主滴も余滴も大きさにばらつきがあり、液滴群は50 μ m以下の液滴の個数が多い粒度分布をもつ。また、回転数が大きくなると、平均粒径が減少する。

ダブルパルス法を用いて飛行中の液滴の写真撮影を行い、液滴は回転体の周速度に等しい初速度

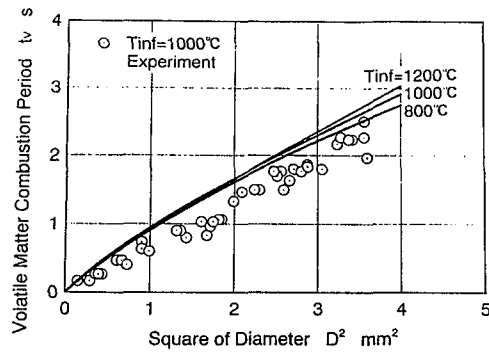


図4：揮発分燃焼時間と粒径の2乗

で回転体外周の接線方向に飛び出すことを確認した。

第5章 加熱炉内を飛行する CWM 液滴の蒸発・燃焼実験

回転微粒化により生成した CWM 液滴群の一部を電気炉内の高温空気雰囲気中に挿入する。液滴は炉内を列状して上昇し、加熱され乾燥し、CWM 粒子となって着火・燃焼し、非懸垂状態の小液滴の燃焼挙動が観察できる。

飛行液滴をサンプリングして、走査型電子顕微鏡で観察したところ、外観が単一懸垂液滴の燃焼実験で得られた試料と類似しており、懸垂液滴と同様の燃焼挙動を示すと考えられる。なお、試料の中には懸垂液滴では得難い中空の試料も観察され、飛行液滴では 1 mm 以下の小さな液滴でも内部から勢いのよい噴出があり、破裂する可能性があることがわかる。

未脱灰の CWM について、炉内から加熱および燃焼中の液滴を多数採取して、JIS 規格に準じて工業分析し、灰分をトレーサーとして他の各成分の質量減少割合を求めた結果、図 5 のように雰囲気温度が 800°C、回転体の回転数が 10000rpm の場合には、炉出口までに液滴中の可熱成分の 20% 以上が加熱により失われることが示された。そのうち、揮発分 50% 程度、固定炭素は 20% 未満が燃焼している。

第6章 飛行 CWM 液滴の蒸発・燃焼過程

CWM 液滴を粒径不変の球体、炉内空気流は一樣として抗力係数を求め、液滴の飛行速度を計算し、実験とよく一致する結果を得たため、計算により炉内移動距離と滞留時間の関係を求めた。懸垂液滴実験の燃焼時間のデータより液滴質量の時間変化を近似し、液滴径毎に炉内移動距離に対する質量変化を求め、液滴群の質量分布をもとに群全体の質量減少割合を計算した。その結果、図 5 のように計算値は炉入口付近では実験値より小さくなるものの、炉出口付近で実験値とほぼ等しくなっており、懸垂液滴のデータをもとにして飛行液滴群の燃焼の進行状態はおおよその計算が可能である。

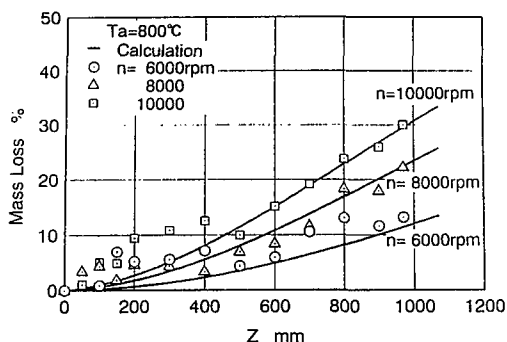


図 5：質量減少割合の推定 (Ta=800°C)

第7章 結 論

1. 懸垂 CWM 液滴と原炭粒子の燃焼は類似しており、両者の相違点は CWM 液滴は水分の蒸発のため着火遅れが長く、原炭の単一粒子は表面が吹き飛ぶため揮発分燃焼が短くなることである。
2. CWM 液滴の着火遅れ中の水分の蒸発と揮発分の生成とは同時に行われている可能性が高い。
3. 着火時の粒子温度は粒径が小さいほど高くなる傾向がある。

4. 採集した試料の電子顕微鏡観察において、粒径の小さな CWM 液滴でも、液滴の状態変化は懸垂法で得られた大きな CWM 液滴のものと外観が類似しており、1 mm以下の液滴でも大きな液滴と同様に破裂する可能性がある。
5. 飛行 CWM 液滴群の燃焼進行状態は懸垂液滴のデータよりおおよその計算が可能である。

審査結果の要旨

近年石油代替燃料として開発された高濃度石炭・水スラリー燃料（CWM）は、粉碎した石炭微粒子に水を分散させた液状燃料であり、パイプ輸送やタンク貯蔵が可能でハンドリングも容易であるため、その実用化が期待されている。本論文は、高粘度流体でしかも約30%の水分を含むCWMの基本的な燃料特性を求めて噴霧燃料機構を推定するため、単一懸垂液滴や飛行微小液滴群について、加熱、蒸発、燃焼の一連の過程を実験と理論解析の両面から解明した成果をまとめたもので、全編7章よりなる。

第1章は緒言であり、CWMの問題点と本研究の目的について述べている。

第2章では、石英糸または熱電対に懸垂したCWM液滴を電気炉内に挿入し、種々の条件下で基本的な燃焼過程を詳細に調べている。すなわち、CWMは含有水分の蒸発期間後半から揮発分ガスを生成・放出してガス燃焼を開始し、液滴内部から急激なガス噴出と火炎変形を伴う燃焼のあとに固形炭素分のチャー燃焼に移り、灰分を残して燃焼を終了するという典型的な燃焼現象を示すこと、低温雰囲気では小液滴はガス燃焼過程がないままにチャー燃焼に移行すること、雰囲気温度が高いほどガス噴出によるチャーの破碎頻度が高くなるが原炭粒子ほどではないこと、乾燥CWM粒子や原炭粒子と比較して、着火遅れ時間は水分蒸発時間分だけ長くなるが、微粒子集合体としての構造の特異性を示すきわだった現象はなく、揮発分およびチャー燃焼時間については同じく初期粒径の2乗則が成立する、などの有用な知見を得ている。

第3章では、単一CWM液滴燃焼について球対称一次元非定常モデルによる数値解析を行い、水分が蒸発して乾燥した部分から揮発分が加熱生成されると仮定して、加熱から揮発分燃焼までの過程を計算した結果、着火遅れ時間は雰囲気温度に大きく依存して変化し、揮発分燃焼時間はほぼ粒径の2乗に比例するが雰囲気温度の影響は小さいなど、実験に近い結果を得たほか、着火時の粒子温度や水分蒸発および揮発分放出時の質量変化を求めている。

第4章では、懸垂の影響を除去して粒径1mm以下の小液滴の燃焼過程を調べる実験手法として、粒径50 μm 以下の粒子を多く含むCWM液滴群を回転カップによって作る方法を開発し、第5章では、液滴列を高温炉内に導入して非懸垂飛行状態での加熱・着火・燃焼過程を調べ、燃焼挙動や粒子状態は基本的に懸垂液滴と大差がないことや、液滴内部からのガス噴出によって燃焼中に液滴が破裂する可能性があることなどを見出し、液滴の水分、揮発分および固形炭素分の質量減少割合を灰分をトレーサにして求めている。続いて第6章では、炉内燃焼期間中の各成分の変化速度を仮定して粒度分布を持つ液滴群全体の質量減少割合を計算し、実験値とほぼ一致する結果を得ている。これらはCWMの噴霧燃焼過程の推定に役立つ有用な成果である。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、高濃度石炭・水スラリー燃料の基本的な燃焼機構を解明するとともに、実用噴霧燃焼方式の設計に役立つ有用な知見と基礎データを提供したものであり、燃料および燃料工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。