

## 論文

## [1053] 高活性もみがら灰製造法とそれを用いたコンクリートの性質

杉田修一\*1・庄谷征美\*2・磯島康雄\*3

## 1. はじめに

コンクリート用ポゾラン材として用いられている代表的材料の中でフライアッシュや高炉スラグ等は研究の面でも実用の面でも実績のある材料であり、それらの評価は定着している。それらに加えて、近年はそれぞれの超微粉末あるいはシリカフェームがすぐれたポゾラン活性を有することから、高品質コンクリート用混和材料として注目されている。

以上は何れも工業副産物であるが、近年外国ではMehta[1]、国内では山本[2]を初めとする先覚者達によって、農業副産物であるもみがらを焼却して得られたもみがら灰(以下RHAと略記する)を、コンクリート用ポゾラン材として有効活用を計る研究がなされ、その成果が得られつつある。著者らもこの分野の研究を行いつつあり、その成果の一部は文献[3]、[4]、[5]において既に発表した。著者らの成果の概要は、RHAはその焼却条件により性質を大きく変えること、非晶質なRHAほど高活性であること、非晶質なRHAの粉碎粒子には2次凝集を中心とする特異な現象があること、これに伴い練ませ方法に問題が生じること、Luxanら[6]の提案になるCa(OH)<sub>2</sub>飽和溶液の電気伝導率の変化とモルタルの圧縮強度との間にかなりの相関があること、もみがらの灰化には炭化過程を通して焼却(これを2段階焼却法と名付ける)するのが良いこと等である。

本論文において著者はこの「2段階焼却法」の原理に基づいた実用炉の2例を示し、これらの炉から得られたもみがら灰のポゾラン活性の大きさを、電気伝導率の変化の測定およびコンクリートの圧縮強度試験により比較・検討した。その結果、これら2種類の灰はきわめて高いポゾラン活性を示し、実用に耐えうる材料であることが判明した。また、ここに示した焼却炉はRHAの量産に適した型式である。

## 2. もみがらの焼却原理

本節の記述は文献[4]からの引用である。実験には電気炉を用いたので、最初にその概要を示す。内寸法は幅300mm、奥行き250mm、高さ150mm、内容積11.25ℓ、最高温度1150℃である。炉内へのもみがら投入法はいくつかの試行の結果、もみがら800gを炉内に直接投入した。これにより一度の焼却によって約150gのRHAが得られた。

多数の焼却実験の結果、焼却方法を以下の二つにまとめることができた。

焼却方法-1: 常温から所定の焼却温度まで一気に上昇させ、所定温度を2時間維持して焼却する。その後5時間程度経過した後灰を取り出した。短時間(約10分)ではあるがもみがらは炎を出して燃焼し、炉内の温度は設定温度をこえる。得られた灰はやや黒い。

焼却方法-2: 常温から280℃程度まで一気に上昇させ、この温度を1時間30分維持した後、350℃程度まで上昇させる。この温度を1時間30分維持した後、所定温度まで上昇させて2時間

\*1 八戸工業大学 教授 工学部土木工学科(正会員)

\*2 八戸工業大学 教授 工学部土木工学科、工博(正会員)

\*3 八戸工業大学 技術員 工学部土木工学科

維持して焼却する。その後5時間程度経過した後灰を取り出した。もみがらは発火せずに炭化し、その後灰化する。発火しないのでほぼ設定どおりの温度で焼却できる。得られた灰は白色の細かな粉末である。なお、前段の炭化の過程は常温から350℃まで約3時間かけて、徐々に上昇させてもよい。要するに炭化させながら焼却し、発火させずに可燃性ガスを排出するところにポイントがある。焼却過程が炭化過程と灰化過程とに二分されるところから、これを「2段階焼却法」と呼ぶことにする。

### 3. 水酸化カルシウム飽和溶液による電気伝導率

この方法は1989年、Luxanらによってポゾラン材の活性評価法の一つとして提案された。文献[6]にしたがってその要点は以下のようである。

40±1℃に管理されたCa(OH)<sub>2</sub>飽和溶液200ccを用意し、その電気伝導率を測定し、これを初期値とする。次に乾燥して適度に粉砕したポゾラン材5gを投入し、マグネットスターラーを用いて攪拌しながら2分後の伝導率を測定する。この値と初期値との差の大きさがポゾラン活性の大きさに関係する。その差の大きなものほど非晶率は大きく、その目安は表-1のように与えられている。

表-1 ポゾラン活性の目安

ポゾラン活性	伝導率差 mS/cm
なし	0.4 >
普通程度	0.4 ≦ < 1.2
良好	1.2 ≦

### 4. もみがら焼却温度と電気伝導率の関係

本節の図-1に関する記述は文献[3]、[4]からの引用である。電気炉の温度を各種設定し、焼却方法-1および-2によって得られたRHAを各20gとり、乳鉢にて20分間粉砕した。これらRHAの伝導率を測定し、焼却温度との関係を図-1に示した。

図-1によって二つの焼却方法の相違は明瞭である。すなわち焼却方法-1によれば600℃以下の温度域では両者の関係は直線的でありポゾラン活性が大きく、600℃付近に変曲点が存在し、それ以上の温度域ではポゾラン活性が小さくなる。一方、焼却方法-2の場合には実験の温度範囲では1000℃に到るまでほぼ直線な関係が示され、変曲点が存在しない。しかも1000℃で得

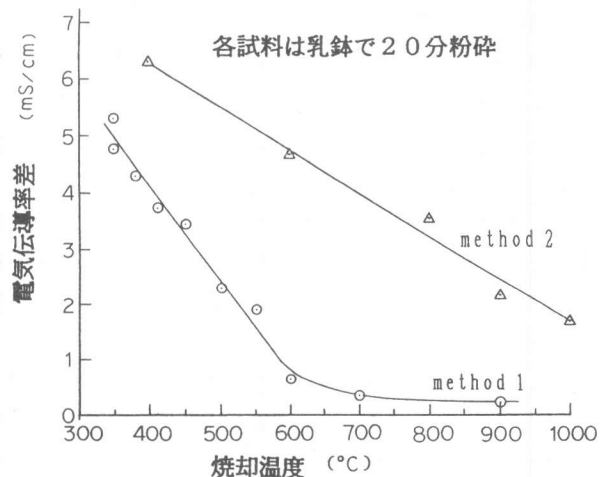


図-1 電気伝導率差～焼却温度

られたRHAにおいても1.2mS/cm以上の伝導率差を示しており、表-1における「良好」なボゾラン活性の範囲に該当する。このように焼却方法-2においては伝導率の焼却温度依存性はより小さい。

次にこのような電気伝導率を測定することが、RHAの非晶率の大きさの推定に対して有効であることを示そう。XRDは結晶構造の解析には大きな威力を発揮するのであるが、非晶質な物質に対する有効性の限界は従来から指摘されている[7]。それに対して電気伝導率を用いる方法は、XRDの有する限界を超えて、非晶率の大きさを反映する一つの指標を得る方法として有効である。図-2に本節の実験に用いられたRHAのXRDを示す。

(a)は焼却方法-1、500°Cで得られたRHAのものである。550°C以下と焼却方法-2で得られた全てのRHAはこれと全く同じであり、重ね合わせても区別はつけられない。

(b)は焼却方法-1、600°Cで得られたRHAで変曲点に位置するものである。(c)はボイラー-燃料灰に対するものであり、図-1において焼却方法-1、900°Cに打点した試料である。図-1および図-2を併せて考えると、Luxanらの方法が高非晶率の領域において有益な情報を提供していることが明かである。

なお、この方法はシリカフェームのボゾラン活性評価にも有効である。伝導率の測定値には非晶率の大きさと比表面積の何れもが反映されているのである。

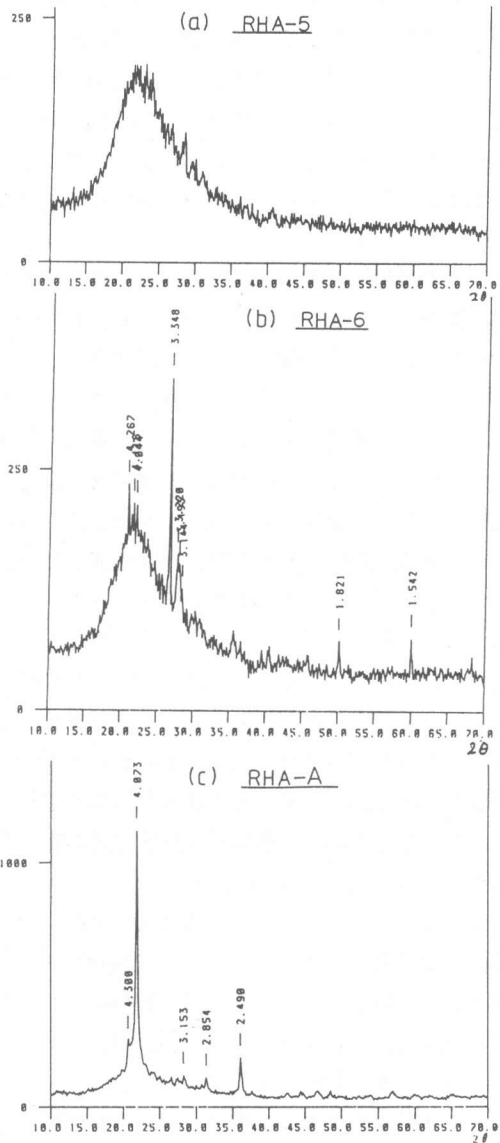


図-2 RHAのX線回折図

### 5. 高活性もみから灰製造炉の設計

これまでの説明から高非晶質RHAを得るには焼却方法-2によるのがよいことは明かである。本節ではこれに準拠した著者の発案になる焼却炉の概要を示す。

#### 5. 1 連続方式

キルンを用いる方式である。1本のキルンを用いる場合は、もみから投入口付近を低温領域、RHA排出口付近を高温領域とした温度勾配を設ける。前者はもみからの炭化域、後者は灰化域である。キルンの勾配は排出されたRHAの状況を見ながら決めるとよい。実験に使用したキルンは直径30cm、長さ3m、温度勾配300°C~600°C、焼却時間は1時間とした。得られた灰は純白の

細粉であり、電気伝導率差は $6.3\text{mS/cm}$ ときわめて大きな値がえられた。ただ、本例のように1本のキルン内に温度勾配を設けると、時間経過と共に低温域の温度が次第に上昇する。所定温度を維持するために、低温域にキルンの外周から風を吹き付けた。このように熱効率が大変低下するので、現在の設計はキルンを低温部(炭化部)および高温部(灰化部)の二部分に分割し、試料の流れは連続している構造とした。このようにすると熱エネルギー効率向上とともにもみがら燃焼熱をも有効に利用しやすい。廃熱をもみがらの乾燥あるいは予熱に利用する構造も可能である。

### 5. 2 バッチ方式

この方式は最初の着火以外はもみがら焼却過程に於て、電気、ガス等の熱源を一切用いず、もみがら自身の燃焼熱により焼却する。「2段階焼却法」に従うことは勿論である。その概要は図-3に示すが、きわめて簡単な構造であり、床、周壁、着火空間、煙突から構成されている。着火空間壁には小孔を多数設けてあり、着火すると火は小孔を通してもみがらに着火する。熱せられた空気は煙突を通して排出され、それに伴って、外部からの空気はもみがら層を通り抜けて着火空間に入り、更に煙突を通して煙と共に外部に排出される。このような空気と煙の流れによつて、着火されたもみがらは発火せずに蒸焼き状態で燃焼が拡散する。炭化はもみがら内部から進行して表面に到り、灰化は表面から内部へ進行する。この実験においては最高温度は灰化時の着火空間付近に生じ、約 $800^{\circ}\text{C}$ が測定された。

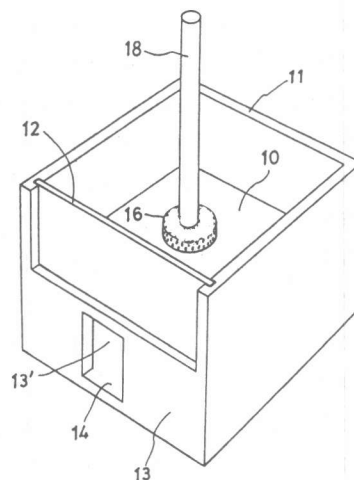


図-3 バッチ式炉

このようにして得られたRHAは灰色であるが、粉碎するとセメントあるいはシリカフェームとほぼ同じ色合いである。伝導率差は $2.4\text{mS/cm}$ と得られ、かなり高度のポゾラン活性が期待される値となっている。なお、筆者は5種類のシリカフェームの伝導率差を測定したが、最大は $1.83\text{mS/cm}$ 、最小は $1.01\text{mS/cm}$ であった[3]、[4]。

### 5. 3 両方式の比較

連続方式の場合はキルン内でもみがらが回転・移動するので全体に焼きむらがなく均等に焼却でき、短時間の焼却で残留炭素も少なくそれ故白色のRHAが得られる。もみがら投入量、キルン勾配、高温域の温度設定等を変えること、すなわち焼却条件を任意にコントロールすることにより性質の異なるRHAを得ることが出来る。焼却に電熱あるいはガス等の熱源を使用するので、キルンの製作と共に生産コストは高いと想像されるが、もみがらの自己燃焼熱も考慮するとかなりの省エネルギーを期待できよう。

バッチ方式の場合は最初の着火以外は熱源を全く必要としないので、ほぼ完全な省エネルギー型の焼却方式である。必要な設備も図-3で見えるように、非常に簡単なものである。一度の焼却でかなりの量のRHAを得ることができ、本実験では約 $80\text{kg}$ の実績がある。ただ、灰化まで数日を要し、もみがらの移動が困難なので、ある程度焼きむらが発生することは避けられない。灰化までに長時間を要するのでキルンに比較して品質の低下は避けられないが、焼却条件を一定にすることで品質管理は楽にできる。

## 6. コンクリートの圧縮強度によるもみから灰の活性評価

両方法で得られたRHAを振動式ボールミルにより1時間粉碎し、これを用いたコンクリートの圧縮強度試験によりRHAの品質評価を行った。

### 6. 1 使用材料

セメント：普通ポルトランドセメント

細骨材：川砂、比重2.59、FM2.90

粗骨材：硬砂岩碎石2505、比重2.68

AE剤：ガイソル

高性能減水剤：NL1450

RHA：連続式、伝導度差6.3mS/cm    バッチ式、伝導度差2.4mS/cm    何れも1時間粉碎

### 6. 2 配合

水結合材比：55%

RHA混入率：0%、5%、10%、15%、20%、30%、40%をセメント質量の内割。

ただし、連続式の場合は試料の都合で15%までとした。

スランプおよび空気量：それぞれ8cmおよび5%

### 6. 3 実験結果

図-4は圧縮強度比とRHA混入率の関係を示す。縦軸はプレーンコンクリートの圧縮強度に対するRHA混入コンクリートの圧縮強度の比率を表し、横軸はRHA混入率を表す。基準としたプレーンコンクリートの圧縮強度は311kgf/cm<sup>2</sup>であった。

連続方式の場合、混入率15%までの結果しかないが、この傾向から判断して混入率の増大が更に強度の増大をもたらすであろうことが推察される。

バッチ方式の場合、図の傾向から

判断すると、最大強度比は20%から30%の間にあると推測され、しかもその値は155%を超えると推察される。40%混入率に対しても125%程度の強度比を有している。連続方式に比較して幾分かきめの値となっている。

ここで得られた結果から、両方式で得られたRHAが高度のボゾラン活性を有しており、実用に十分耐える材料であることが判明した。なお、連続方式から得られたRHAを混入したコンクリートの総合的な性質については、文献[5]に詳細を述べている。

## 7. 考察

文献[3]、[4]で著者は圧縮強度と伝導率の間には、かなりの相関性があることを指摘した。本実験に用いられたRHAの伝導率差は連続方式6.3mS/cm、バッチ方式2.4mS/cmと得られているので、当然前者の強度が後者より大きくなるのが期待されたのであるが、一見矛盾するような結果が得られている。その理由はそれらの論文にも述べられているように、粉碎RHAの有する粉体工

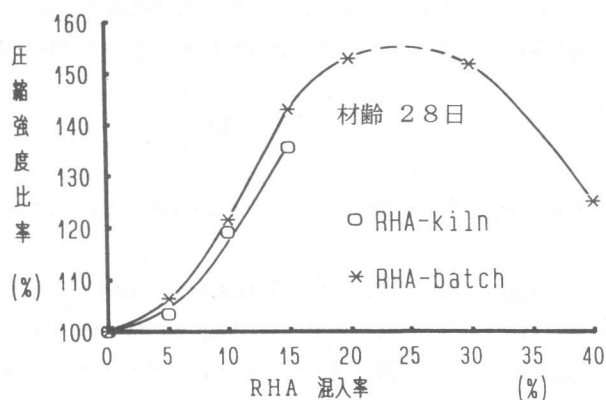


図-4 圧縮強度比率～RHA混入率

学的性質、すなわち粉砕粒子の「2次凝集」の問題が主たる原因であると著者は推測している。RHAの非晶率が大きいほど凝集力が大きくなり、練りませ時における凝集粒子の分散に大きなエネルギーを要するのである。本実験では両者に対して全く同じ練りませ条件である。未発表ではあるが、著者によるモルタルの実験においては練りませ条件の差異が明らかに強度に影響を与える結果となっている。最近、シリカフェームについてこのような研究が行われている[8]。

粉砕エネルギーを大きくすると凝集は進行するので、粉砕レベルと練りませ条件について両面からの検討が是非必要である。

10%以上の混入率の場合は全くブリージングがみられないので、ポゾラン反応と共に強度増加の一因となっているであろう。

本論文で提案したRHA製造方法はスケールアップの問題は今後の問題として、実用化の可能性の高いものである。世界の米産国のほとんどが発展途上国であることを考えると、山本らが高度技術の必要のない焼却設備の必要性を述べているように[2]、ここで提案された「バッチ方式」は何等の高度技術も必要でなく、先進国のみならずいかなる発展途上国においても可能な方式であり、しかも得られたRHAは高度のポゾラン活性を有することから、発展途上国に最も適した方法であると言える。これによってRHAが発展途上国においても高強度コンクリートを始めとする高品質コンクリートの施工を容易にするものと期待される[9]。

#### 参考文献

- [1] P.K.Mehta, Properties of Blended Cement Made From Rice Husk Ash, ACI Journal 74-9, pp.440-442, 1977
- [2] Y.Yamamoto and S.M.Lakho, Production and Utilization of Active Rice Husk Ash as a Substitute for Cement, Proc. of JSCE No.32, pp.157-166, June 1982
- [3] 杉田修一、庄谷征美、徳田弘、もみがら灰のポゾラン活性について、土木学会第45回年次学術講演会、V部門、pp.202-203、1990
- [4] S.Sugita, M.Shoya and H.Tokuda, Evaluation of Pozzolanic Activity of Rice Husk Ash, 4th CANMET-ACI Int. Conf. on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Istanbul, Turkey, May 1992, SP 132-28
- [5] 阿波稔、庄谷征美、杉田修一、もみがらを用いたコンクリートの品質に関する基礎的研究、土木学会第47回年次学術講演会、V部門、pp.692-693、1992
- [6] Luxan, M.P., et al, Rapid Evaluation of Pozzolanic Activity of Natural Products by Conductivity Measurement, Cement Concrete Research, Vol.19, pp.63-68, 1989
- [7] 作花 済夫、アモルフラス、共立出版社
- [8] 大賀宏行、魚本健人、シリカフェームを混和したモルタルの諸特性に及ぼす練混ぜの影響、土木学会第47回年次学術講演会、V部門、pp.680-681、1992
- [9] 杉田修一、無駄から価値への転換、セメント・コンクリート No.550, pp.36-38, 1992年12月号