土木学会論文集 No. 526／V-29, 43-53, 1995.11

ポゾラン材としてのもみがら灰の有効利用に関する基礎的研究

杉田 修一[1]・庄谷 征美[2]

[1]正会員 八戸工業大学土木工学科教授 (〒031 青森県八戸市妙字大開88-1)
[2]正会員 工博 八戸工業大学土木工学科教授 (〒031 青森県八戸市妙字大開88-1)

もみがら焼却原理として「2段階焼却法」を示し，その原理に基づいて設計された焼却炉の実例を示し，さらにこの炉から生産されたもみがら灰の優れたポゾラン活性をコンクリート強度試験によって確認した．また，もみがら灰の粉砕に伴って発生する2次凝集粒子について検討し，これを防止する一方法として粉砕助剤（ジエチレングリコール）を用いて粉砕を行った．その結果，粉砕助剤の使用はきわめて効果的であることが判明した．また，もみがら灰の高度なブリーディング抑制能力を利用して高水セメント比コンクリート(水結合材比70%)の実験を行ったが，ブリーディングはまったく観察されず，十分実用に供しうる強度のコンクリートを得ることができた．

Key Words: *rice husk ash, two step burning method, electric conductivity, batch system, secondary agglomeration, grinding aids, high water binder ratio concrete*

1. 序 論

工業分野からの廃棄物としてフライアッシュ，高炉スラグ，ニッケルスラグ，石炭灰，シリカフューム等がコンクリート用材料として有効活用が為されていることは周知の通りである．これらに関する知識の集積と実用面での実績は豊富に存在する．天然ポゾラン材として火山灰も一部実用に供されているが，農業分野からはもみがら灰の有効利用に関する研究が最も進んでおり，期待の出来る廃棄物である．稲は土中から吸収する珪酸分の集積度がきわめて高く，とくにもみがら部分に著しい．その焼却灰（以下RHAと記す）中には質量で約90%前後のSiO_2が含有されている．この含有率はフライアッシュよりかなり大きく，良質のシリカフュームに相当する含有率である．葉および茎の部分はもみがらの60-70%位である．このような植物を農学あるいは植物学の分野では「珪酸集積植物」と呼んでおり，稲以外にも麦，竹，笹，とうもろこし，砂糖きび，とくさ（砥草）等が存在する．

もみがら灰のポゾラン材としての本格的研究は海外においてはMehta[1]，わが国においては山本ら[2]の研究を嚆矢とするであろう．また，オートクレーブによる建材の開発，セラミックス，光ファイバー，ニューガラス等いわゆる先端材料と呼ばれている分野に対する有効利用を最も活発に研究しているのは，わが国においては通産省であり，九州工業技術院で開発され，1985年2月公開された建材に関する特許[3]は既に東南アジアにおいて実用に供されている．

山本らは実験室および野外の両面においてかなり大規模な実験を行い，RHA混入モルタル供試体によってRHAの基礎的諸物性について多くの知見を得ている．また，この研究の中でRHAの残留炭素の影響についてMehtaの研究の誤りを正すなど多くの成果を挙げている．さらに，世界の米生産国の殆どがアジアの発展途上国である点を考慮して，「高度技術の必要のない焼却設備の確立」を目標にして，示唆に富む方式を提案している．この方法は現在著者が提案している焼却方法の中の「2段階焼却法」に相当するものと考えられ，著者の研究結果からも十分理解できる方法である．

もみがらは飼料としての用途は殆どなく，わが国では一部がライスセンター運転の熱源として焼却され，あるいはもみがらを破砕し，堆肥として還元使用される以外は野焼きなどの方法で焼却処分されているのが現状である．

SiO_2の鉱物資源は珪石，珪砂，石英等が挙げられる．しかしSiO_2含有率は高いが殆ど結晶化しており，化学的活性は乏しい．これに対して稲は土中から結晶化したSiO_2を吸収する際に，生体の働きによって非晶質に変換して取り込む．化学的活性が期待されるためには非晶率の高いSiO_2でなければならないことを考えると，結晶質を非晶質に変換するこの生体作用はきわめて重要で且つ有意義なことと言わなければならない．また，植物資源の再生産性は鉱物資源と比較して，決定的な利点である．前掲の鉱物資源からのSiO_2を非結晶に加工するために，準アルミ産業と呼ばれるような莫大なエネルギーが消費されることを考えると，植物起源SiO_2の重要性の意味がよく理解できる．

本論文の構成は既往の成果[4)~8)]も踏まえつつ，以下のような構成となっている．

1) 高非晶質RHAを得る焼却原理：2段階焼却法
2) RHAの非晶性の判定：$Ca(OH)_2$飽和溶液の電気伝導率の変化を測定するLuxanの方法
3) 粉砕RHAの2，3の性質：2次凝集特性
4) 2次凝集の一軽減法：粉砕助剤（ジエチレングリコール）の効果
5) 2段階焼却法に基づく焼却炉の設計：連続システムとバッチシステム
6) これら焼却炉から生産されたRHAのポゾラン活性評価：非晶性の判定およびコンクリート強度試験
7) 高水セメント比コンクリートへのRHAの適用：水セメント比70%コンクリートへのRHA混入

2. もみがらの焼却原理

本章では高活性もみがら灰を得る焼却原理について検討した．実験は市販の小型電気炉を用いて行ったが，その諸元は以下のようである．炉内寸法は幅300mm，奥行き250mm，高さ150mm，容積11.25ℓ，最高温度1150℃，温度上昇速度（℃/min）の設定，所定温度とその維持時間の設定が可能で，天版の中央に直径50mmの排気孔を有する．予備実験の結果，もみがらは乾燥質量800gを直接炉内に投入することとした．この方法で一度の焼却により約150gのRHAが得られた．多数の焼却実験の結果，焼却方法を図－1に示すような二つに纏めることができた．

Method－1: 図－1に示されているように，炉内温度を一気に所定の焼却温度まで上昇させ，その温度を2時間維持して焼却する．電源オフの状態で5時間程度経過後RHAを取り出す．図中に点線で示して

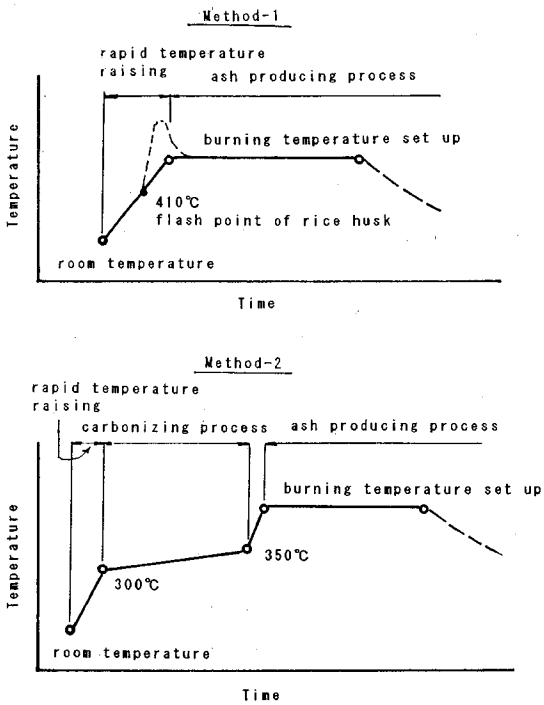


図-1 もみがら焼却法法

いるように，昇温途中でもみがらは発火し，短時間(10－15分)ではあるが炉内温度は設定温度を超える．得られたRHAはやや黒い．

Method－2: 図－1に示されているように，炉内温度を常温から300℃付近にまで一気に上昇させ，350℃程度まで3時間かけてゆっくり上昇させる．その後所定焼却温度まで一気に上昇させ，2時間維持して焼却する．電源オフの状態で5時間経過した後RHAを取り出す．得られたRHAはかなり白い．前段の350℃までの段階ではもみがらは発火することなく，可燃性ガスを排出して炭化する．すなわちこの段階は燻炭の製造過程であり，後段の所定温度における焼却は燻炭の焼却過程，すなわちRHA製造過程である．要するところ，この焼却方法は前段の炭化過程および後段の灰化過程という2段階から構成されることから，「2段階焼却法」と呼ぶことにした．

3. RHAの非晶性判定

RHAの非晶性の判定には以下に述べるLuxanの方法を採用した．Luxanらは1989年，ポゾラン活性評価法の一つとして，図－2にその概要を示すような迅速評価法を提案した[9)]．すなわち，40℃に管理された$Ca(OH)_2$飽和溶液200ccを用意し，そ

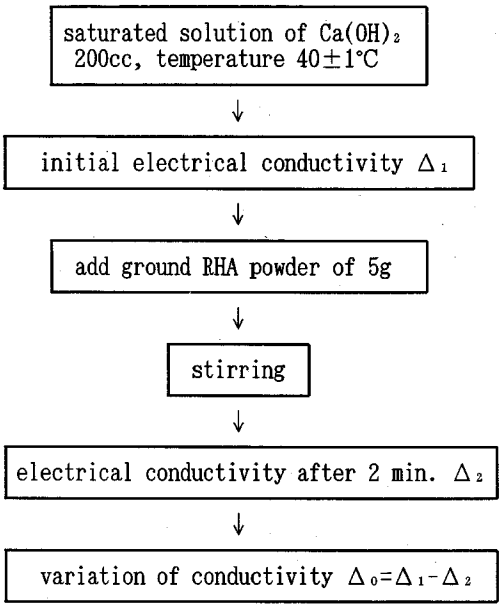


図-2 Luxanの方法

表-1 電気伝導率差Δ_0(mS/cm)の評価

Non	$\Delta_0 < 0.4$
Variable	$0.4 \leqq \Delta_0 \leqq 1.2$
Good	$\Delta_0 > 1.2$

の電気伝導率を測定し，これを初期値Δ_1とする．次に乾燥して適度に粉砕されたポゾラン材50gを投入し，撹拌しながら2分後の伝導率を測定しΔ_2とする．伝導率差$\Delta_0 = \Delta_1 - \Delta_2$の値がポゾラン活性の大きさを反映し，その目安は表-1のように示されている．Δ_0が大きいほどポゾラン活性が大きいことを示す．

一般に粉粒体の化学的活性の大きさは，その比表面積と非晶性とに関係すると考えられるが，従来これら二つの量はそれぞれ別個に論ぜられ，ポゾラン材研究においてその関連が同時に考慮されることがなかった．しかしながら，Luxanの方法における電気伝導率には，これら二つの量が同時に反映されていると考えられるのである．それ故この方法はポゾラン活性を評価する指標として大変優れたものである．また，この方法はRHAのみならず，シリカフュームの品質判定に対しても有効であることを確認した[5]．さらに，表-1に示された活性判定基準はRHAの活性評価によく適合すること，モルタル供試体の圧縮強度と強い相関関係があること，X-線

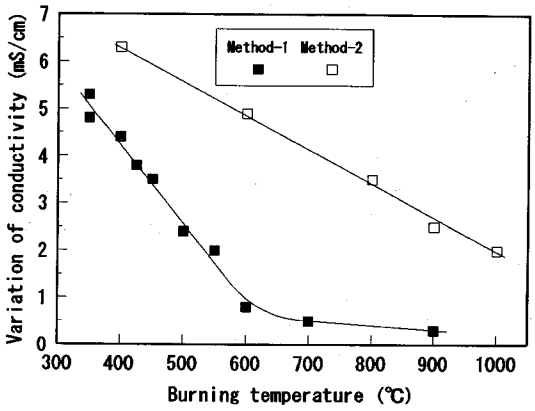


図-3 電気伝導率差と焼却温度

回折によっては判定困難な高非晶率領域[13]における非晶性の判定に有効であること等などを明らかにしている[5),7)]．

次にMethod−1およびMethod−2の方法で焼却したRHAをそれぞれ200gとり，乳鉢にて20分間粉砕した試料の伝導率を測定した．求められた伝導率差Δ_0と焼却温度の関係を示したのが図−3である．この図は焼却方法の差を明瞭に示す結果となっている．すなわち，Method−1においては600℃付近に変曲点を有し，それ以上の温度域においては急速に活性を失い，それ以下の温度域においては低温焼却ほど活性が増加し，両者の関係は直線的である．900℃に相当する位置のデーターはボイラー燃料灰であり，正確な焼却温度は不明である．

Method−2においては実験の温度範囲では両者の関係は直線的であり，変曲点を有しない．1000℃において焼却されたRHAでさえも$\Delta_0 \geqq 1.2$mS/cmの値を示しており，表−1と照合すると良好なポゾラン活性を示すと判断される範囲に属する．また，直線の勾配はMethod−1におけるよりは小さく，Δ_0の温度依存性がより小さい．この点はRHA生産現場における品質管理に際し有利なポイントになるであろう．このように図−3はアモルファスRHAを得る方法として，「2段階焼却法」が有利であることを証明するものである．

4. 実験炉の大型化と粉砕RHAの2次凝集

粉砕RHAの2次凝集の存在については既に報告[5]したが，本章においてはその後の研究成果を述べる．

(1) 電気炉の概要および焼却方法

3章における研究後，もみがら焼却を目的に実験

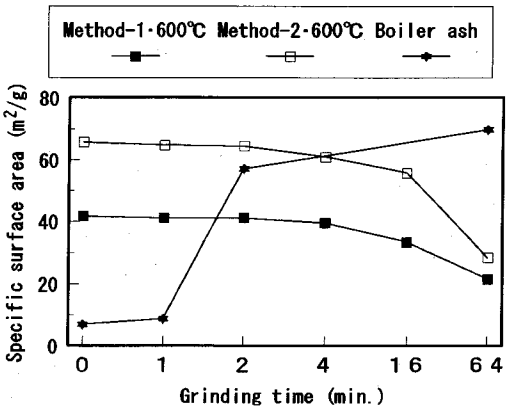


図-4 比表面積と粉砕時間

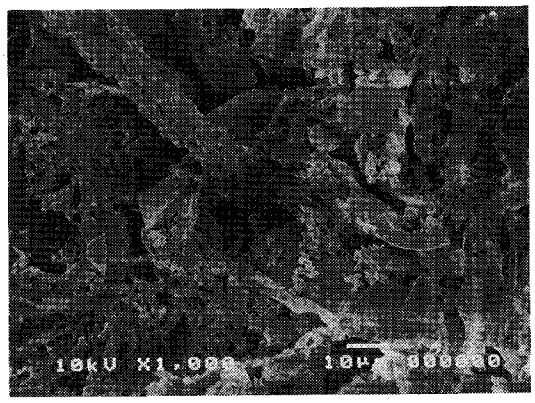
室向きの炉を製作した．内容積は前章で述べた電気炉の約3倍，最高温度800℃，最高450℃の熱風送風可能，排煙筒付き，19通りの焼却条件の設定が可能である．もみがらを入れた2段式容器を炉内に入れて焼却するものである．2kgのもみがらを入れて，約350gのRHAを得ることができる．

本実験における焼却条件を図－1を用いて説明すると，Method－1およびMethod－2の何れも灰化過程における設定温度は600℃，維持時間は3時間，以後電源を切り，もみがら投入後24時間でRHAを取り出した．また，灰化過程に入ってから直ちに450℃の熱風を炉内へ送風し，灰化過程終了後も3時間送風を継続した．Method－2における炭化過程に対しては4時間を維持した．得られたRHAはMethod－1の場合は薄い灰色であり，Method－2の場合は白色であった．このように，前章と本章では用いたRHAの由来が異なることをお断りしておく．

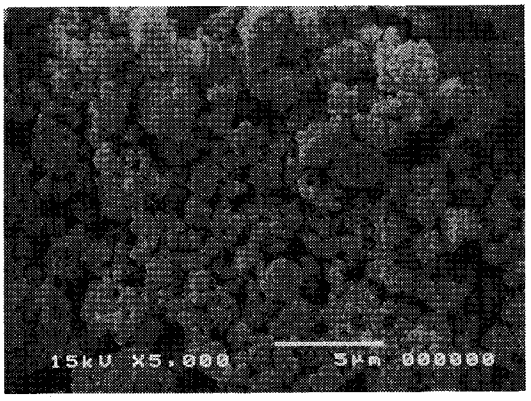
(2) 粉砕時間と比表面積の関係

Method－1およびMethod－2の600℃焼却RHA，ボイラー燃料灰について粉砕時間と比表面積（窒素吸着法による）の関係の一例を図－4に示す．振動式ボールミルを用いて粉砕した．

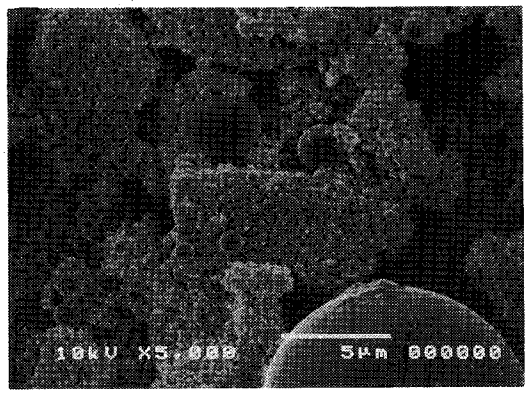
未粉砕のものはMethod－2，Method－1，ボイラー灰の順に小さくなっている．粉砕時間が長くなるにしたがって前二者の比表面積は漸次減少し，後者のそれは増加している．一般に物質は粉砕エネルギーの増大に伴い微粒化する筈であるが，2次凝集を起こした粉粒体は見かけの粒径が大きくなり，比表面積が減少する．前二者のような非晶性に富んだRHAは2次凝集を起こしやすく，凝集力も比較的強いと考えられる．これに対して，後者のようなRHAは結晶質に富み，2次凝集を起こし難く，そ



a) RHA (×1000)
Method-1:600℃
Grinding time:0 min.



b)RHA (×5000)
Method-1:600℃
Grinding time:64 min.



c) Silica fume (×5000)

写真-1 RHAおよびシリカフュームのSEM

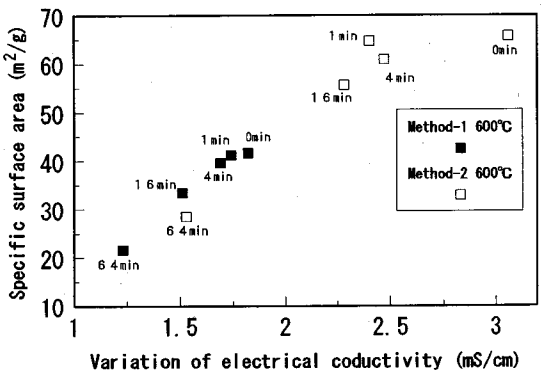


図-5　比表面積と電気伝導率差

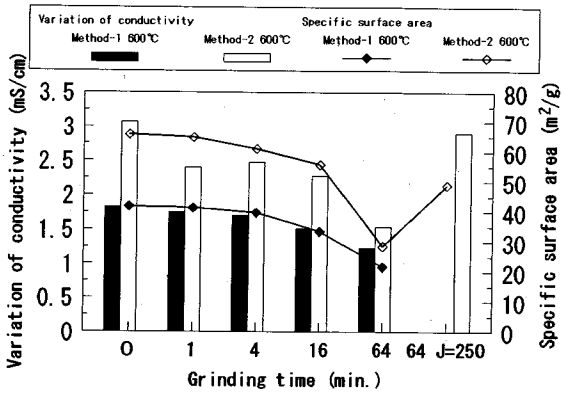


図-6 電気伝導率差，比表面積と粉砕時間

の程度も比較的弱いと考えられる．このような差異が図－4のような結果をもたらしているのである．写真－1に Method-1RHA の SEM 写真を示した．a) は未粉砕，b) は 64 分粉砕のものであるが，後者の場合微粒子が凝集して，ほぼ球体を構成している様子を見ることができる．c) は比較用に示したシリカフュームの SEM であるが，ほぼ 1 μm 以下の粒子が凝集して団塊を構成している様子を明瞭に見ることができる．

粉体工学において，2次凝集の原因はいくつかのものが考えられているが，何れにしても結果的には見かけ上粉砕効果を減じ，RHA のポゾラン効果を減少させる原因となる．

(3) 比表面積と電気伝導率差の関係

上記 Method-1，Method-2 の試料について電気伝導率を測定し，Δ_0を求めて，それらの比表面積との関係を図－5に示した．これによれば両者の関係はほぼ直線的であり，伝導率測定時におけるマグネットスターラーの撹拌力程度では，凝集粒子が殆ど分散しないであろうと推察される．また，Method-1 と Method-2 から得られた RHA の非晶率の相違も明らかに見ることができる．

5．2次凝集の一軽減法

粉砕 RHA の 2 次凝集力が大きい場合には練り混ぜ時において大きな問題を発生する，すなわち，モルタルあるいはコンクリート中での凝集粒子の分散の問題である．この問題は RHA のみならず，シリカフュームの場合にも存在し，これが原因でモルタルあるいはコンクリート供試体による活性評価がしばしば一致しないと考えられる．シリカフュームの凝集は写真－1　c) に SEM の一例を示したが，この写真によると，約 1 μm 以下の粒径を有する粒子については，凝集が存在する可能性が大きいように考えられる．したがって，練混ぜ時において凝集粒子の分散が不十分であれば，ポゾラン活性が十分発揮されず，活性は見掛け上低下して評価される．このような 2 次凝集はクリンカーの粉砕時にも発生している[10),11)]．そこでこれに対する研究を参考に，粉砕助剤を用いて RHA の粉砕を行い，その結果を確認することとした．

図－6は焼却方法別に，粉砕時間別と電気伝導率差Δ_0・比表面積の関係を棒グラフで示したもので，J =250 は粉砕助剤としてジエチレングリコールを RHA1t 当たり 250g 相当量を投入し粉砕したものである．Δ_0（ =2.90mS/m）および比表面積（ =49m^2/g）共顕著な増加を示している．また，この RHA を混入したモルタル（豊浦標準砂使用，水結合材比 55%，砂結合材比 1.8，RHA 混入率はセメント内割で 15%）の 28 日圧縮強度は 61.6MPa を示し，粉砕助剤を使用しない場合に比較して 20% の増加となった．また，ジエチレングリコールを 125g，500g を加え，同様に粉砕した J=125，500 の RHA についてもΔ_0を求めたが，それぞれ 2.77mS/cm，3.32mS/cm であった．

このように，粉砕助剤を使用することは，2 次凝集の軽減にかなり有効であることが示された．しかし，強度試験はモルタルを使用して試されたもので，コンクリートの場合にもこの方法が必要であるか否かは検討することが必要である．コンクリート中における粗骨材の存在およびモルタルミキサに比較して，コンクリートミキサは撹拌力がより強力であるからである．

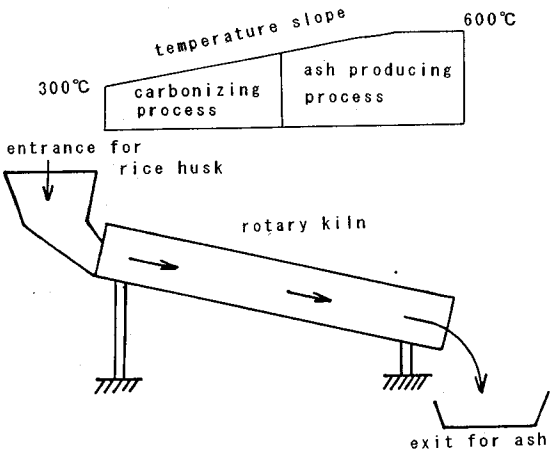


図-7 連続システム

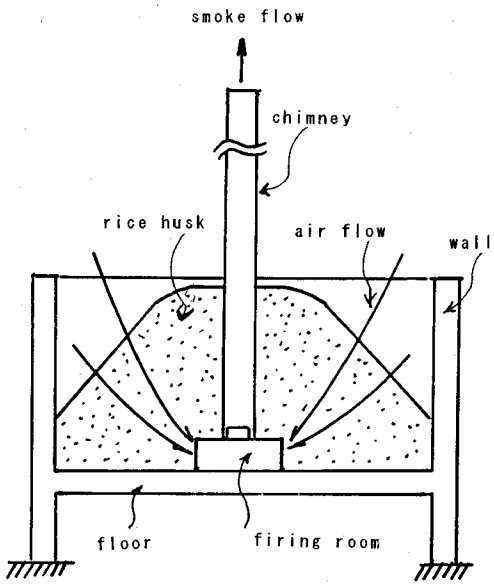


図-8 バッチシステム

6．高活性 RHA 製造炉の設計

図-3の結果から高活性 RHAを得るには Method-2によるのがよいことは明らかである．本章ではこれに準拠した焼却炉の設計方法について提案する．

(1) 連続方式

図-7に示すように外熱式キルンを用いる方式である．1本のキルンを用いて「2段階焼却法」を実現するには，もみが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定する．前者はもみがらの炭化域，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定する．実験に使用したキルンは直径 30 cm，長さ 3m，温度勾配 300 ℃～ 600 ℃，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 6.3mS/ cmときわめて大きな値が得られた．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 300 ℃を維持した．このように熱効率が大変低下するので，この点を改善するために，キルンを低温部（炭化部）および高温部（灰化部）の2部分に分割し，原料の流れは連続している構造とするのがよいと考えている．このようにすると熱エネルギー効率向上ともにもみがら燃焼熱をも有効に利用しやすい．排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．

(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おいて，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ものである．「2段階焼却法」に従うことは勿論である．その断面は図-8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，更に煙突を通って煙と共に外部に放出される．このような空気と煙の流れによって，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 ℃が測定された．このようにして得られた RHAは灰色であるが，粉砕するとセメントあるいはシリカフュームとほぼ同じ色合いである．伝導率差は 2.4mS/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種類のシリカフュームの伝導率差を測定したが，最大は 1.83mS/cm，最小は 1.01mS/cm が得られ[4),5)]，シリカフュームに比較して，本方法の RHAの活性が遜色のないものであることを確認した．

(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，高温域の温度設定などを変えること，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任意の性質を有する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，キルン製作と共に生産コストは高いと考えられるが，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ると考えられる．

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－8で見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，焼却実験では約80kg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し，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，後述するように十分高活性のもみがら灰が得られることを確認できた．焼却条件を一定にすることで，また，「２段階焼却法」によると品質の温度依存性が小さいこともあり，品質管理は比較的容易に行えると考えられる．

何れの方式においても，もみがら投入量を多くすると，灰化までの所要時間が増大し，その結果高温暴露時間が増加するので，得られたRHAの活性は低下する．投入量を減少すると，逆の結果となる．

7．高性能RHA製造炉から生産されたRHAコンクリートの強度

ここでは，前章で述べたバッチ方式炉から生産されたRHA混入コンクリートについて述べる．振動式ボールミルにより１時間粉砕されたRHAを混入したコンクリートの強度試験により，RHAの活性評価を行った．なお，粉砕助剤は使用していない．

(1) 使用材料

セメント：普通ポルトランドセメント　比重3.16
細骨材　：川砂，比重2.66，吸水率1.26%，F.M. 2.46，実積率66.2%
粗骨材　：硬質安山岩砕石最大粒径25mm，比重2.72，吸水率0.28%，F.M. 6.99，実積率57.9%
AE剤　：ヴィンソル
減水剤　：NL－1450
RHA　：バッチ式炉生産RHA，粉砕１時間(振動式ボールミル)，比重2.17，SiO_2含有率90.3%，強熱減量3.1%，伝導率差Δ_0=2.4mS/cm

表-2 圧縮強度(MPa)

Water binder ratio (%)	Days	RHA blending ratio (%)				
		0	10	20	30	40
45	28	37.6	41.5	44.1	45.8	—
	91	43.6	46.6	48.8	49.8	—
55	28	29.2	34.9	37.1	38.2	—
	91	34.2	39.0	41.0	42.2	—
65	28	22.6	29.2	32.2	33.5	29.3
	91	26.0	35.7	36.6	38.5	34.1
70	28	18.7	24.3	28.5	29.3	28.1
	91	23.0	29.9	33.4	36.3	35.0

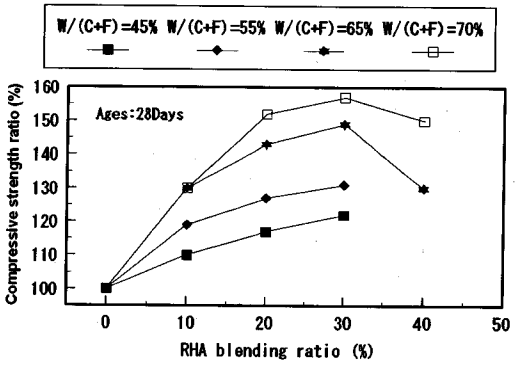


図-9 圧縮強度比とRHA混入率

(2) 配合

水結合材比　：45%，55%，65%，70%
RHA混入率　：0%，10%，20%，30%，40%
をセメント質量の内割

スランプおよび空気量：目標値8cmおよび5%

練混ぜ：ミキサは強制練りミキサ（中山式）を使用し，練り混ぜ時間は以下のようである．

細骨材＋結合材：空練り30秒
モルタル＝細骨材＋結合材＋水：1分30秒
モルタル＋粗骨材：２分

なお，単位量の決定はRHA無混入の最適配合を求め，RHA混入による影響はAE剤および減水剤量を増加することによってスランプ，空気量の調整を行った．

(3) 試験結果

先ずフレッシュコンクリートについて述べる．前述の方針で行った配合であったが，高水セメント比

の場合は問題とするところは殆どなく，スランプおよび空気量は目標値が得られ，ワーカビリチーも良好なコンクリートが得られた．低水結合材比の場合スランプと空気量は目標値が得られたが，RHA混入率が増加するにしたがって粘性が増大し，円柱供試体におけるエントラップドエアーの排除に困難な問題が発生し，配合設計上考慮すべき問題点の存在することが示された．何れの水結合材比においても，RHA無混入の場合にはブリーディングを発生したが，RHA混入の場合には全ての配合において，ブリーディングは全く観察されなかった．ブリーディング抑制効果を確認することを主目的に行った水結合材比70%の場合，RHA無混入の場合には多量のブリーディングを発生したが，RHA混入の場合には10%混入率においても全く観察されなかった．このような完璧なブリーディング抑制効果はシリカフュームの場合に対して説明されていると同じように，RHAの高非晶性と微粉効果によって初期C-S-Hゲルが多量に生成し，これがブリーディング水の水途を絶つと言う説明で理解してよいと考えられる．また，凝結は水結合材比およびRHA混入率によってかなり異なるが，全般的に早く進行するので，施工時には遅延剤の使用も考慮することが必要な場合もあると考えられる．

次にコンクリート圧縮強度について述べる．引張・曲げ強度については割愛する．

表-2は材齢28日および91日の圧縮強度を示したものである．これを基に作成した図-9は圧縮強度とRHA混入率の関係を材齢28日について，縦軸を圧縮強度比率（RHA無混入に対する）で示したものである．

表-2と図-9によればRHA混入の効果は明瞭である．比率の大きさは水結合材比70%が最も高く，RHA混入率30%で157%，水結合材比65%で149%，水結合材比55%の場合は131%，水結合材比45%の場合は122%となっている．一般にポゾラン効果は高水セメント比ほど高いのであるが，本実験の場合には，水結合材比45%および55%，RHA混入率20%以上の場合に，円柱供試体表面および試験後の割裂面に，目視しうる程度の気泡が認められた．これが強度増加を阻害する一因となっている．この点を解決すれば，より高い強度増加が得られる．また，特に注目してよいのは水結合材比70%の結果である．RHA無混入の場合にはブリーディングがきわめて多く，実用的観点からみると現場における施工においては使用される機会が少ない配合である．しかし，RHA混入により，何れの混入率においても全くブリーディングは見られず，圧縮強度で比較すると，例えば28日強度において混入率30%で29.3MPaの圧縮強度を有する．この強度は水セメント比55%のRHA無混入コンクリートの圧縮強度に匹敵するするものである．混入率10%の場合は24.3MPaであり，これは水セメント比60%のRHA無混入コンクリート圧縮強度に相当するものである．

このように高強度に向けての低水結合材比においては，配合設計上解決すべき問題点は存在するものの，通常の施工範囲に属する水結合材比および通常は実構造物へ適用されることの少ない高水結合材比の場合においても，RHAの混入によってブリーディングに原因する内部欠陥の少ない，しかも実用的な強度を有するコンクリートを施工できる可能性が示された．

もみがら灰はSEM写真に依れば，多くの微細孔を有し，軟質の粉体であるから，粉砕し易いものである．そこで試験的に，水結合材比65%の場合について，未粉砕RHAを直接使用する練混ぜ実験を行った．実験は同じ順序で材料を投入したが，結果は超硬練り状態となり，スランプ測定あるいは締固めが困難であった．そしてコンクリートを型枠へ詰めた後，数十分でブリーディングを発生した．これは粉砕RHAのブリーディング抑制能力からは考えられない現象である．この原因は練混ぜ時の加水と同時に，相当量の水がRHA微細孔に吸着されたためと考えられる．RHAの投入順序もあろうが，やはりある程度の粉砕事前処理が必要であることを示すものである．

(4) X線回折，熱重量分析および細孔分布

強度試験を行った後，それらの試料片を用いてX線回折，熱重量分析および細孔分布を測定した．水結合材比55%の結果を以下に示す．

図-10はX線回折の結果である．a)はRHA無混入，b)はRHA30%混入の場合を示す．

ポゾラン効果の一つは$Ca(OH)_2$の減少であるが，a)においては明らかに$Ca(OH)_2$は検出されるのであるが，b)においては検出することが出来なかった．これは水和生成物として$Ca(OH)_2$が極端に少ないことを意味し，CaOの殆どがC-S-Hゲルの生成に消費されたと考えられ，C-S-Hゲルの増加が予測される．別の表現をすればRHAのポゾラン効果が最大限度まで発揮されたといえる．この傾向は実験を行った全ての水結合材比について同様に認められた．

図-11はX線回折と同じ試料片について行った熱分析の結果を示したものである．500℃前後にお

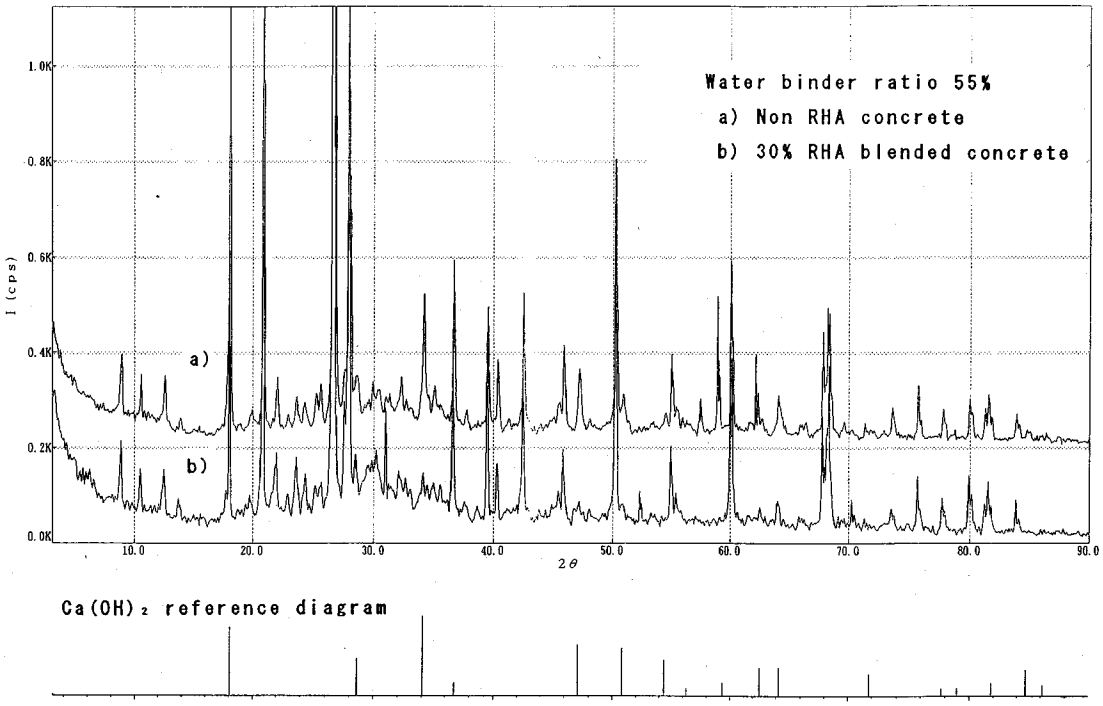


図-10 コンクリートのX線回折図

いて見られるCa(OH)$_2$の分解によると言われる質量減少がRHA無混入の場合には明瞭に観察できるが，RHA混入の場合にはきわめて微量な減少が観察されるだけである．Ca(OH)$_2$の分解以前および以後は両者ともほぼ同様な傾向を示し，最終的な質量減少はRHA無混入が大きく，RHA混入の場合が小さい．この結果はX線回折の結果とも一致し，C−S−Hゲル増加を示すものと考えられる．他の水結合材比の場合についても全く同様な傾向を示している．

図−12はやはり同じ試料片を用いて行った細孔分布測定結果を示したものである．また，表−3は測定結果の主要数値の一覧である．全細孔量は大きな差はないが，その分布は著しく異なり，平均細孔直径はRHA30%混入の場合はRHA無混入の場合の50%弱である．このような内部空隙の細孔化が，強度増進に寄与していることは明らかである．

以上述べたように，本研究の場合には全ての水結合材比において，RHA混入率30%の付近で最大の圧縮強度を示した．換言すれば，RHAのポゾラン活性が最高度に発揮されたと言える．そしてこのようなポゾラン効果が圧縮強度の増加，Ca(OH)$_2$の極端な減少，C−S−Hゲルの増大，および細孔化等によって明らかにされた．このようなRHAコン

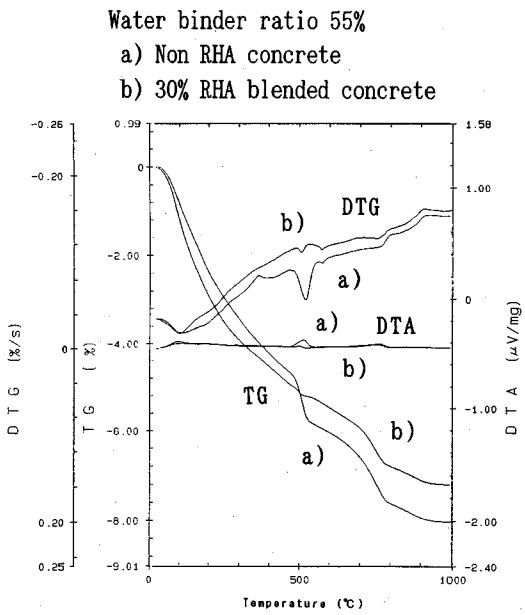


図-11 コンクリートの熱分析図

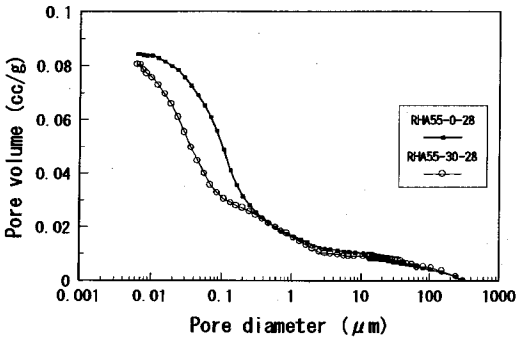


図-12 コンクリートの細孔分布

表-3 細孔分布：W/C+F=55%

Item	Unit	Blending ratio (%)	
		0	30
Volume	cc/g	0.0843	0.0806
Surface area	m^2/g	5.13	10.38
Mean diameter	μm	0.0657	0.0311

クリートの物理的および化学的性質などRHAコンクリートの耐久性に深く関わる問題は大変興味のある問題であり[6]，今後の重要な研究課題である．

8. 考察とまとめ

本研究を以下のように纏める．

1) 高活性RHAを得るためには，「2段階焼却法」の原理に依るのがよい．
2) RHAの非晶性の判定にはLuxanの方法が適当である．
3) 粉砕RHAは2次凝集するが，これは粉砕助剤の使用により軽減することができる．
4) 「2段階焼却法」の原理に基づいて設計された，もみがら焼却炉の例が示された．
5) この炉から生産されたRHAのポゾラン活性はきわめて高く，ブリーディング抑制能力および圧縮強度の増加が著しい．
6) RHA混入率30%付近で最大のポゾラン効果を示したが，圧縮強度増加率は57%(水結合材比70%)，$Ca(OH)_2$は殆ど観察されず，平均細孔径はRHA無混入の場合の50%弱である．
7) 水結合材比70%の場合で示されたように，RHAのブリーディング抑制能力および圧縮強度の増加により，RHAの混入によって在来のコンクリートの水セメント比の適用範囲を拡大することができる．

謝辞：本研究に当たり，八戸セメント（株）常務取締役　林　宣孝氏および住友セメント（株）中央研究所　五十畑　達夫氏からは貴重な助言と助力を与えて戴いた．記して感謝致したい．

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.157-16 6, June, 1982.
3) 特許公報(B2)，昭60-13991.
4) 杉田，庄谷，徳田：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.
5) 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.
6) 阿波，庄谷，杉田：もみがら灰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.
7) 杉田，庄谷，磯島：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，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.15, No. 1, pp.321-326, 1993.
8) S.Sugita, M.Shoya, Shi P.and Y.Isojima: Design of Furnace for Large Quantities of Highly Active Rice Husk Ash, *The 3rd Beijing Int. Symposium on Cement and Concrete*, Vol.2, pp.651-655, Oct., 1993
9) M.P. Luxan et al: Rapid Evaluation of Pozzolanic Activity of Natural Products by conductivity Measurement, Cement Concrete Research, Vol.19, pp.63-68, 1989
10) 岩淵，下林，鈴木：ジエチレングリコールがセメントの諸品質におよぼす影響，セメント技術年報 XXⅢ，pp.163-169，1969.
11) 岩淵：セメントの粉砕助剤に関する補遺的研究，セメント技術年報 XXⅣ，pp.139-147，1970.
12) 荒井　康雄：粉体の材料化学，pp.64，培風館，1988.
13) 作花　済夫：アモルファス，共立出版社，1986.

(1994.11.28受付)

A FUNDAMENTAL STUDY ON THE EFFECTIVE USE FOR RICE HUSK ASH AS A POZZOLANIC MATERIAL

Shuichi SUGITA and Masami SHOYA

Chemical activity of rice husk ash is greatly controlled by the burning condition for rice husks. In this report a burning principle that is named "Two Step Burning Method" and two examples of furnace based on the principle were shown. The rice husk ash produced from these furnaces was very active, and it was confirmed by compressive strength test for concrete specimens. Furthermore, some physical properties for secondary agglomeration of ground rice husk ash were studied. The agglomeration causes to block the dispersion of ground rice husk ash when concrete is mixed. A grinding aid(di-ethylene glycol)was used to prevent that. It was also shown that theuse of the grinding aid was so effective to prevent the agglomeration. Highly active rice husk ash was also very effective to prevent bleeding of fresh concrete even in the case of water binder ratioof 70%. No bleeding was observed, and concrete which had ractical strength for concrete structure was obtained.