

ダム用コンクリートにおける フライアッシュ利用の手引き

平成3年5月

貸出し用

(財)国土開発技術研究センター

ダム用コンクリートにおける フライアッシュ利用の手引き

平成3年5月

(財)国土開発技術研究センター

まえがき

近年、多くのダムで採用されているＲＣＤ工法において、ＲＣＤ用コンクリートにはセメントの混合材料としてフライアッシュが多く用いられている。

ＲＣＤ用コンクリートにフライアッシュが用いられる理由は、ＲＣＤ工法の施工上の特色である全面レヤ工法に対応する温度応力上の配慮からセメントの発熱量を抑制する必要があること、セメントに比べ比重がかなり小さいためセメントの一部をフライアッシュによって置き換えることにより、セメント単味の場合に比べ、ペースト量の増大が図られ材料の分離に対して有利に働くこと等が挙げられる。

ＲＣＤ用コンクリートでは通常、２０～３０％がフライアッシュによって置き換えられるため、フライアッシュの適正な品質を確保することがＲＣＤ用コンクリートの品質の確保にとって極めて重要である。

一方、フライアッシュの供給実態をみると、近年、わが国の石炭火力発電所においては国内炭使用から海外炭使用へと移り変わっており、今後新規に立地する発電所もそのほとんどが海外炭を使用することとなるため、長期的には海外炭使用が大半を占める状況となることが想定されている。

この結果、石炭火力発電所の副産物として生産されるフライアッシュの品質も従来とは異なったものとなっている。

本手引き書はこのような背景を受け、長期的な視点に立ったわが国のフライアッシュの生産量、品質の動向を明らかにするとともに、これらを踏まえ、ＲＣＤ用コンクリートを主体に今後のダム用コンクリートにおけるフライアッシュ利用上の留意点について取りまとめたものである。

本検討にあたっては、ダム用コンクリート技術検討委員会（委員長 柳田 力（財）土木研究センター専務理事）を組織し、御指導、御審議を賜った。ここに委員長をはじめ委員各位に対し、深く感謝の意を表する次第である。

平成３年５月

（財）国土開発技術研究センター

ダム用コンクリート技術検討委員会

名 簿

委員長	柳田 力	(財)土木研究センター	専 務 理 事
委 員	小柳 洽	岐阜大学工学部土木工学科	教 授
〃	長瀧 重義	東京工業大学工学部土木工学科	教 授
〃	魚本 健人	東京大学生産技術研究所	助 教 授
〃	竹林 征三	建設省河川局開発課	開 発 調 整 官
〃	上総 周平	〃 〃 〃	課 長 補 佐
〃	小林 茂敏	〃 土木研究所地質化学部	部 長
〃	永山 功	〃 〃 ダム構造研究室	室 長
〃	石破 弘道	〃 四国地建富郷ダム工事事務所	所 長
〃	水野 光章	水資源開発公団企画部	企画調整室長

事務局	大河原 満	(財)国土開発技術研究センター	理 事
〃	渡部 義信	〃 調査第一部	部 長
〃	柳川 城二	〃 〃	参 事
〃	吉栖 伸輔	〃 〃	参 事

用語の定義

- ・石炭灰：クリンカアッシュ、シンダアッシュおよびフライアッシュを総称する。
図－3参照。
- ・クリンカアッシュ：ボイラ内で燃焼された微粉炭の燃え殻（灰）がボイラ内で溶塊となり、ボイラ下部ホッパに落下した石炭灰をいう。砂状の粒体。
- ・シンダアッシュ：ボイラと電気集じん器（E P）との中間に設置された節炭器および空気予熱器の下部ホッパに落下した石炭灰をいう。比較的粗い粉体。
- ・フライアッシュ：通常電気集じん器（E P）で捕集された石炭灰をいう。比較的細かい粉体。
- ・電気集じん器：コロナ放電によって含塵ガス中の粒子に電荷を与え、この帯電粒子を電気力などによってガスから分離するか、または静電凝集により、含じんガス中の粒子の凝集・粗大化をはかり、粒子をガスから分離する装置をいう。E P（electrostatic precipitator）と略称することもある。
- ・空気予熱器：燃焼用などの空気を加熱する装置をいう。
- ・節炭器：ボイラの燃焼ガスを利用する給水加熱器をいう。
- ・E P 灰：電気集じん器（E P）の各ホッパに貯留された石炭灰をいう。ボイラに近いホッパほど粒度が粗い。
- ・不適合 E P 灰：炭種あるいは燃焼条件などによっては分級しても J I S・その他の規格に適合しないものをいう。このような E P 灰は別途処理し、セメント原料・埋立材・その他に利用される。
- ・原粉：電気集じん器（E P）の各ホッパから排出されたフライアッシュをいう。発電所によって粒度が異なる。通常これを分級し、細かくしたものがセメント・コンクリート用混和材として利用されている。
- ・細粉：原粉を分級し、細くなったフライアッシュをいう。セメント・コンクリート用混和材として利用されている。
- ・粗粉：原粉を分級し、粗くなったフライアッシュをいう。セメント原料、埋立材、その他に利用される場合が多い。
- ・メレンブルー吸着量：A Eコンクリートにフライアッシュを用いると、所要の空気量を連行させるための A E 剤の使用量が増加する。この傾向を容易に類推するためフライアッシュにメチレンブルー（色素）を吸着させることが考案され、慣用されている。M. B. 吸着量と略称することもある。土木学会論文集第 3 1 号参照。

目 次

1. 石炭火力発電の概要	1
1.1 石炭火力発電の役割	1
1.2 石炭火力発電の現状と将来	2
1.3 石炭火力発電所のしくみ	6
2. 石炭灰の概要	9
2.1 石炭灰の回収設備および種類	9
2.2 石炭灰の発生量および用途	10
3. フライアッシュの生産	13
3.1 フライアッシュの生産管理	13
3.2 フライアッシュの生産量	14
4. フライアッシュの品質	17
4.1 フライアッシュの品質管理	17
4.2 フライアッシュの品質	23
4.3 フライアッシュの品質試験	34
5. フライアッシュ利用上の留意事項	63
5.1 一 般	63
5.2 品 質	63
5.3 試 料	88
5.4 その他	88
6. むすび	90

1. 石炭火力発電の概要

1.1 石炭火力発電の役割

わが国の電源は、明治以降昭和30年代前半まで、いわゆる「水主火従型」であったが、昭和38年に初めて「火主水従型」に移行した。当時は石炭火力が主力であったが、昭和40年代中頃には石油火力へと移行した。しかし、昭和48年の第1次石油危機、昭和53年のイラン政変を契機とする第2次石油危機以降、電力供給の安定化、供給コストの抑制を目指して電源の多様化が図られ、石炭火力が再び脚光を浴びるようになった。

すなわち、通産省・資源エネルギー庁の昭和63年度電力施設計画による電源構成は表-1に示すとおりであり、石油火力に代わって原子力、石炭火力、LNG火力が増強される見込みである。(注)平成元年度電力施設計画では内需拡大による電力需要増に対応するため、63年度計画を2年以上早く達成するよう大幅な上方修正が行われる予定である。

表-1 年度末電源構成

(単位: 万kW)

(参考)
電事審需給部会
目標
(62年10月)

年度 電源	昭和63年度末		平成5年度末		平成10年度末		2000年度末	
	(実績)	%		%		%		%
水 力	3,613	21.9	3,859	20.3	4,313	20.1	4,400	21
一 般	1,913	11.6	1,974	10.4	2,095	9.8	2,300	11
揚 水	1,700	10.3	1,884	9.9	2,218	10.4	2,100	10
火 力	9,999	60.7	11,290	59.5	12,297	57.4	11,500	54
石 炭	1,112	6.7	1,616	8.5	2,516	11.7	2,300	11
LNG	3,306	20.1	4,117	21.7	4,553	21.2	4,300	20
地 熱	18	0.1	26	0.1	76	0.4	240	1
LPG	100	0.6	100	0.5	150	0.7	4,660	22
石 油	5,463	33.1	5,431	28.6	5,002	23.3		
原 子 力	2,870	17.4	3,838	20.2	4,814	22.5	5,300	25
合 計	16,482	100	18,986	100	21,424	100	21,200	100

- (注) 1. 自家用発電施設を除く。
2. 石炭及びLNGには石油混焼プラントも含む。
3. LNGには天然ガスも含む。

このように、石炭火力が石油代替エネルギーとして再認識されたのは、石炭火力が化石燃料中最も経済性に優れ、石炭の賦存も広範囲かつ豊富で、供給の安定性もあるので、原子力に次ぐベース電源として位置づけ、更に長期的にはミドル電源としての役割が期待されるからであり、今後環境対策・灰処理対策の確立、港湾施設の建設・整備などに十分配慮して開発が進められるものと考えられる。

1.2 石炭火力発電の現状と将来

昭和63年度末における稼働中の石炭火力発電所は表-2および図-1に示すように23ヶ地点（45基、11,119.5MW）である。これらの石炭火力発電所における昭和63年度の石炭消費量は国内炭が約1,000万t、海外炭が約1,500万t（豪州70%、南ア11%、中国9%、カナダ6%、その他4%）であった。これに伴う石炭灰の発生量は約390万t程度と推定される。

また、昭和63年度末における工事中の石炭火力発電所は6ヶ地点（7基、4,900MW）、着工準備中が11ヶ地点（15基、12,200MW）であり、10年後には認可出力がほぼ倍増するものと予想される。これに伴い石炭消費量も平成10年度には4,600万t程度まで増加するものと考えられるが、第8次石炭政策に関する答申（昭和60年9月）でも明らかなように、今後は更に国内炭が減少し、海外炭が主力となることは確実である（表-3、図-1）。

表-2 石炭火力発電所一覧（既設）

（平成元年3月31日現在）

事業者名	発電所名	所在地	号機	認可出力 (MW)	運開年月	転換年月	専・混焼の別
北海道	江別	北海道	2	125	39-1	-	専焼
"	砂川	"	3	125	40-7	-	"
"	奈井江	"	4	125	52-6	-	"
"	苫東厚真	"	1	175	57-1	-	"
"	苫東厚真	"	2	175	43-5	-	"
"	苫東厚真	"	1	175	45-2	-	"
"	苫東厚真	"	2	350	55-10	-	"
"	苫東厚真	"	2	600	60-10	-	"
東北	仙台	宮城	1	175	34-10	*56-8	重油混焼
"	仙台	宮城	2	175	35-11	*58-5	専焼
"	仙台	宮城	3	175	37-6	*58-2	"
東京	横須賀	神奈川	1	265	35-10	*60-2	C O M
"	横須賀	神奈川	2	265	37-9	*60-5	"
中国	下関	山口	1	175	42-3	-	専焼
"	新宇部	"	1	75	33-8	*57-5	"
"	新宇部	"	2	75	34-5	*57-3	"
"	新宇部	"	3	156	37-6	*57-2	"
"	新小野田	"	1	500	61-4	-	"
"	新小野田	"	2	500	62-1	-	"
"	水島	岡山	1	125	36-11	*59-7	"
"	水島	岡山	2	156	38-8	*59-5	"
四国	西条	愛媛	1	156	40-11	*58-7	"
"	西条	愛媛	2	250	45-6	*59-1	"
九州	大村	長崎	2	156	39-8	**57-6	"
"	大村	長崎	1	156	35-9	**58-4	"
電源開発	磯子	神奈川	1	265	42-5	-	"
"	磯子	神奈川	2	265	44-9	-	"
"	高砂	兵庫	1	250	43-7	-	"
"	高砂	兵庫	2	250	44-1	-	"
"	竹原	広島	1	250	42-7	-	"
"	竹原	広島	3	700	58-3	-	"
"	松島	長崎	1	500	56-1	-	"
"	松島	長崎	2	500	56-7	-	"
"	石川石炭	沖縄	1	156	61-11	-	"
"	石川石炭	沖縄	2	156	62-3	-	"
常磐共同	勿来	福島	7	250	45-10	-	重油混焼
"	勿来	福島	8	600	58-9	-	"
"	勿来	福島	9	600	58-12	-	"
住友共同	新居浜西	愛媛	1	75	34-8	-	"
"	新居浜西	愛媛	2	75	37-9	-	"
"	新居浜東	"	1	22.5	44-2	*61-7	"
"	新居浜東	"	2	20	11-12	*61-7	"
富山共同	富山新港	富山	1	250	46-9	*59-11	専焼
"	富山新港	富山	2	250	47-6	*59-12	"
酒田共同	酒田共火	山形	1	350	52-10	*59-9	"
合 計			45基	11,119.5			

* 重油→石炭 転換

** 石炭→重油→石炭 転換

表-3 石炭火力発電所一覧（工事中、着工準備中）
（平成元年3月31日現在）

区 分	事業者名	発電所名	所 在 地	号 機	認可出力 (MW)	運開予定年月	専・混焼の別
工 事 中	東 北	能 代	秋 田	1	600	5- 7	専 焼
	中 部	碧 南	愛 知	1	700	3-10	〃
	〃	〃	〃	2	700	4- 6	〃
	北 陸	敦 賀	福 井	1	500	3-10	〃
	九 州	苓 北	熊 本	1	700	7- 7	〃
	〃	松 浦	長 崎	1	700	元- 7	〃
	電源開発	〃	〃	1	1,000	2- 7	〃
合 計				7 基	4,900		
着 工 準 備 中	東 北	原 町	福 島	1	1,000	9- 7	専 焼
	〃	能 代	秋 田	2	1,000	11年度以降	〃
	〃	〃	〃	3	600	〃	〃
	東 京	常陸那珂	茨 城	1	1,000	15- 7	〃
	中 部	碧 南	愛 知	3	700	5- 6	〃
	北 陸	七尾大田	石 川	1	500	5-10	〃
	中 国	三 隅	島 根	1	700	11年度以降	〃
	〃	〃	〃	2	700	〃	〃
	九 州	松 浦	長 崎	2	700	11年度以降	〃
	〃	松 浦	北 熊	2	700	11- 3	〃
	電源開発	松 浦	長 崎	2	1,000	11年度以降	〃
	〃	常陸那珂	茨 城	1	1,000	17- 7	〃
	相馬共火	新 地	福 島	1	1,000	6- 7	〃
	〃	〃	〃	2	1,000	10- 7	〃
合 計				15基	12,200		

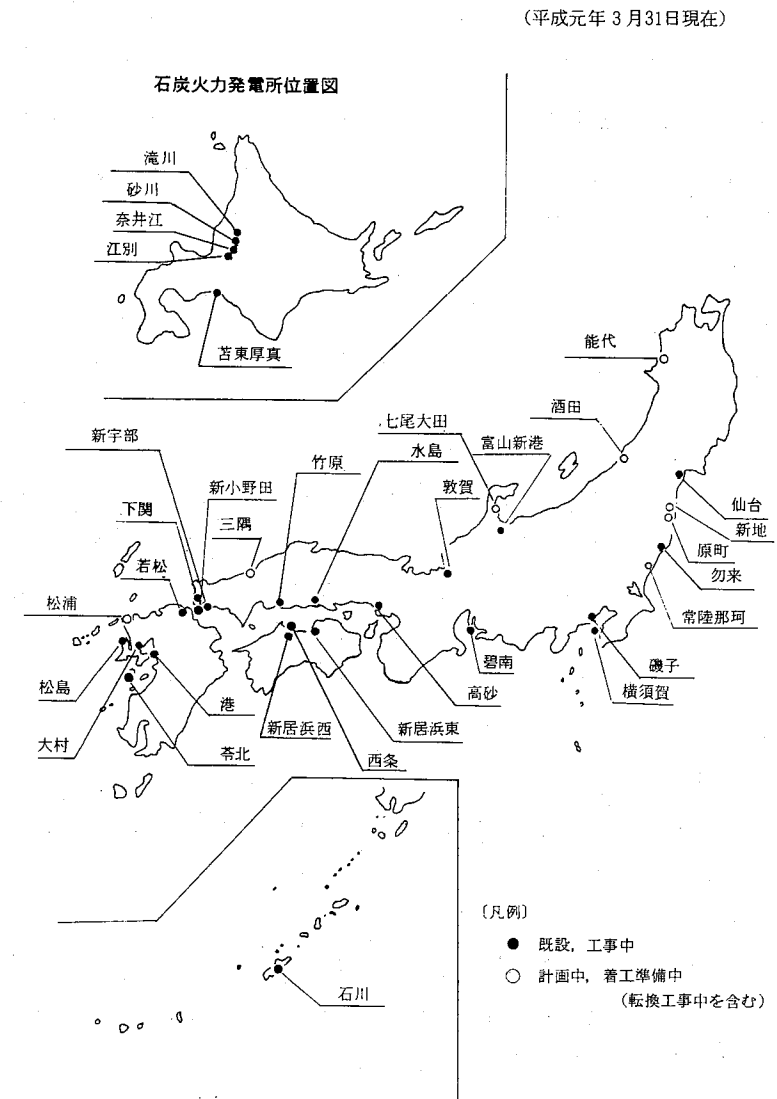


図-1 石炭火力発電所位置図

1.3 石炭火力発電所のしくみ

一般的な臨海型石炭火力発電所の設備（しくみ）を示せば図－2のとおりである。すなわち、主要設備は揚運炭設備、貯炭設備、微粉炭設備、燃焼設備、発電設備等であり、このほか環境保全設備として集塵装置、排煙脱硫装置、排水処理装置等が付設されている。

(1) 揚運炭設備

臨海石炭火力発電所の場合、石炭は専用船で運ばれてくる。この船は、国内炭の場合1,000～5,000 tクラスが多く、海外炭直輸入の場合は20,000～70,000 tクラスが一般的であるが、中には130,000 tクラスの大型船も就航している。発電所に着岸した船の石炭は、揚炭機により荷揚げされ、ベルトコンベヤで貯炭場まで運ばれる。揚炭機はグラブバケットによるバッチ式とバケットコンベヤによる連続式とがある。最大荷役能力は両者とも2,000 t/h程度で差はないが、操作性が良いことと環境面から最近の発電所では連続式を採用するところが多い。

(2) 貯炭設備

貯炭方式には屋外式と屋内式とがあり、屋外式の場合圧縮貯炭と自然積み貯炭に分けられる。最近の大容量の発電ユニットの場合は、石炭の積み付け払出し量が多く、スタッカーやリクレーマなどの大型機械が使用されるので、屋外式では自然積み貯炭が一般的となっている。自然積みでは、蓄熱による自然発火が起こり易く、また豪雨時には石炭山が崩壊し易いため、圧縮貯炭よりきめ細かな管理が要求される。

一方屋内式には、サイロ、ドームあるいは切妻屋根などがある。何れも屋外式に比べて、粉じんや騒音などの環境特性が優れているが、自然発火、炭じん、ガス爆発などの保安対策が必要である。

(3) 微粉炭設備

現状の石炭火力は全て微粉炭焚きである。石炭をミルで200メッシュパス70～80%程度まで乾燥、微粉碎し熱空気でバーナまで搬送する。ミルの種類としてはチューブミル、ボールミル、ローラミルなどがある。

チューブミルは、大型のドラムの中に25～50 mmφの鋼球を多量に入れ、ドラムの回転により鋼球の落下衝撃と摩擦によって石炭を微粉碎する。

ボールミルは、上下リングの間に数個のボールをはさみ、上部リングを定圧で抑えながら下部リングを回転させることによりボールとリングの間に石炭を微粉碎する。

ローラミルは、鉢型皿の上に数個のローラを定圧で抑えながら、鉢型皿を回転させることにより、ローラと鉢型皿間で石炭を微粉碎する。

この3タイプのミルの内、チューブミルは粉碎効率が悪く、新しい石炭火力では使用されていない。

ミルの粉碎能力は、ミル自体の摩耗による低下の他使用する石炭の湿分、発熱量あるいは粉碎性などによって大きく左右される。粉碎能力が低下すると微粉炭粒子が粗くなり、結果としてフライアッシュの未燃分増や比表面積の低下をきたすことになる。

(4) 燃焼設備

ミルで粉碎された微粉炭は、熱風（一次空気）でバーナまで搬送され、バーナから二次空気とともに炉内に吹き込まれ燃焼される。バーナは、微粉炭と空気との混合を良くして、できるだけ完全燃焼させる機能を有している。近年環境対策として、微粉炭の燃焼時に発生する窒素酸化物（NO_x）を極力低減させるため、低NO_xバーナや二段燃焼などが採用されている。これらは燃焼を緩慢にし、火炎の最高温度を低くしてNO_xの発生を抑制しようとするものである。そのため発生する石炭の未燃分は、従来に比べて増加する傾向にある。

(5) 発電設備

石炭火力発電所の発電設備は、蒸気発生装置（ボイラ）がLNGや重原油焚きと異なるほかは、基本的にこれらと同じ機構となっている。

(6) 環境保全設備

環境保全設備としては、排ガス中のばいじんを捕集する集じん装置、NO_xを除去する排煙脱硝装置、いおう酸化物（SO_x）を除去する排煙脱硫装置、排煙脱硫装置が湿式の場合には、脱硫装置から発生する排水あるいは発電所の各工程から発生する排水の処理装置などがある。

このうち集じん装置について述べると、集じん装置には機械式集じん器（MC）と電気集じん器（EP）とがある。ユニット容量が小さい発電所では、このMCとEPとをシリーズに設置しているところが多いが、ユニット容量が大きい新しい発電所では、EPのみ設置しているところが多い。

EPは処理ガスの適用温度によって区分され、150℃前後で処理する低温EPと300～400℃程度で処理する高温EPとがある。EPの集じん性能に影響を及ぼす主要因として灰の電気抵抗が挙げられるが、灰の電気抵抗は炭種によって異なるほか、温度によって大きく変化する。したがって低温または高温EPのどちらを採用するかは、排煙脱硝装置を含めたシステムとしての検討がなされて選定されている。

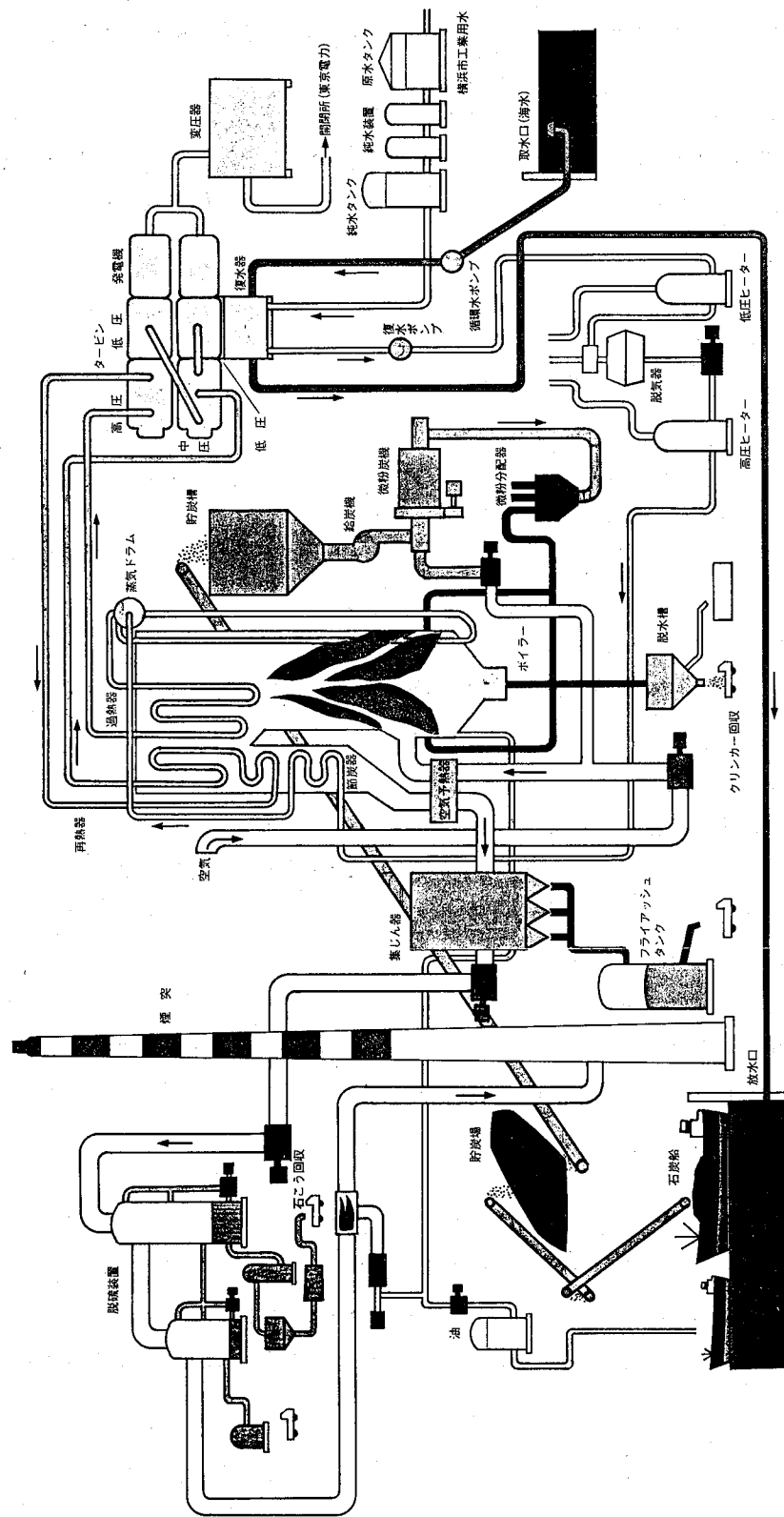


図-2 石炭火力発電所の概念図

2. 石炭灰の概要

2.1 石炭灰の回収設備および種類

石炭火力発電所における石炭灰の回収設備を概念的に示せば図-3に示すとおりである。

すなわち、石炭火力発電所の発電用微粉炭燃焼ボイラで燃焼される石炭は、まずミルによって微粉碎され、ボイラ内に吹き込まれた微粉炭は、炭素および水素などの可燃分が燃焼し、後には無機質の灰分が残る。この灰の一部はボイラ内で溶塊となり、ボイラ下部に落下してクリンカーアッシュとなる。残りの灰は、一部が節炭器や空気予熱器下部に落下してシンダーアッシュとなり、更に残りの灰は電気集じん器によりほぼ全量捕集されEP灰となる（発生箇所による分類）。

フライアッシュの生産には、主としてEP灰が用いられるが、EP灰には炭種や燃焼条件によって不良品も含まれているので、これらの不良品を別途処理し、残りのEP灰を原粉サイロに一旦貯蔵した後、分級し、細粉サイロと粗粉サイロに貯蔵する。通常JIS A6201適合品として市販されているフライアッシュは、細粉あるいは原粉であるが、特記仕様が付加されると細粉のみに限定されることが多い（製品別による分類）。

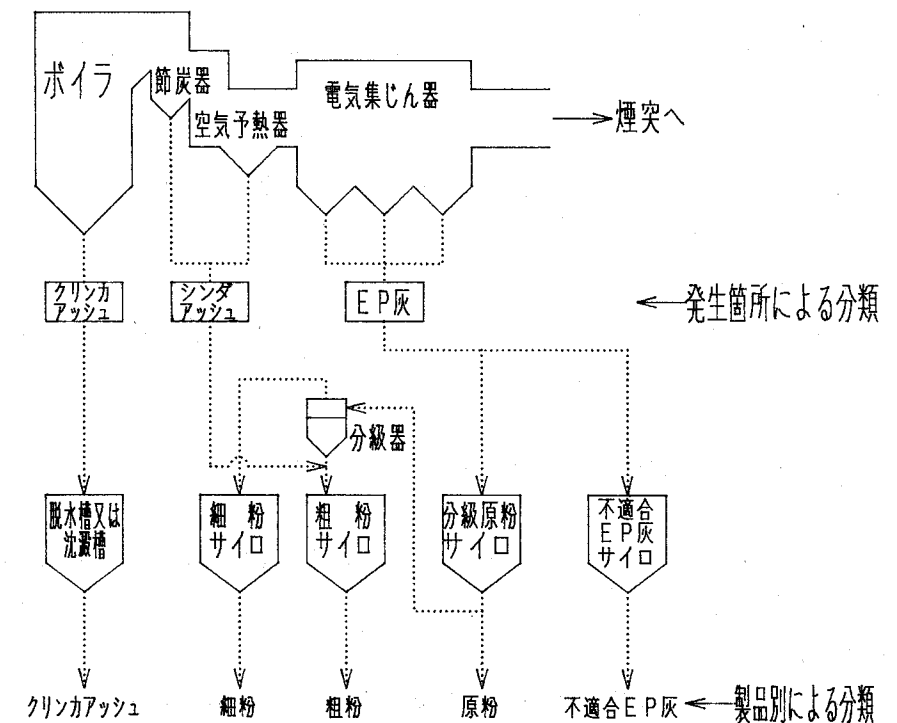


図-3 石炭灰回収設備

2.2 石炭灰の発生量および用途

昭和61年度から昭和63年度までの3ヶ年間ににおける石炭灰の用途別利用量を表-4に示す。なお、表-4に示す各用途の概要は以下のとおりである。

(1) フライアッシュセメント

JIS R5213フライアッシュセメントには、JIS A6201に規定されたフライアッシュ（主として細粉）が用いられる。このほか、JIS R5210普通ポルトランドセメントの混合材としてJIS A6201に規定されたフライアッシュ（主として細粉）が用いられる。

(2) 生コンクリート

コンクリートの練り混ぜ時にセメントや骨材と共にJIS A6201に規定されたフライアッシュ（主として細粉）が用いられる。

(3) セメント二次製品

けい酸カルシウム板などセメント二次製品には、主としてJIS A6201に適合する細粉が用いられる。この場合、ポゾラン効果のほか増量効果も期待されている。

(4) セメント原料

セメント製造時に粘土の代替として、クリンカアッシュ、粗粉、原粉などの各種の石炭灰が利用される。この場合、二酸化けい素が重視される。

(5) 肥料原料

けい酸加里肥料の主原料として原粉が利用される。この場合も二酸化けい素が重視される。

(6) 人工軽量骨材

人工軽量骨材の主原料として原粉が用いられる。この場合、灰の融点および粒度の均一性が重視される。

(7) 道路路盤材

主として、下層路盤材にクリンカアッシュが用いられる。この場合、粒度が重視される。

(8) 道路埋戻材

埋設管布設後の埋戻材として、クリンカアッシュが用いられる。

(9) アスファルトフィラー材

アスファルトフィラー材として、石灰石粉の代わりに原粉が用いられる。この場合、粒度が重視される。

(10) 融雪材

苗圃などの融雪材として原粉あるいは粗粉が用いられる。この場合、肥料効果も期待される。

(11) 土壌改良材

酸性化土壌の改良材として、原粉あるいは粗粉が用いられる。この場合pH調整のほか肥料効果が期待できる。

(12) 排水濾過材

グラウンド、テニスコートなどの排水処理のためのフィルター材としてクリンカアッシュあるいは粗粉が用いられる。また、同様の目的でゴルフ場などでも用いられる。

(13) トンネル裏込材

地下鉄など軟弱地盤のトンネル裏込に、主として原粉が用いられる。この場合は、固化材を添加することが多い。

(14) 炭坑充填材

廃坑の落盤防止のため、グラウト材として粗粉あるいは原粉が用いられる。

表-4 石炭灰の用途別利用量実績

(単位:千t)

用 途	アッシュの種別	昭和61年度	昭和62年度	昭和63年度
フライアッシュセメント	細粉	186	219	170
生コンクリート	細粉	138	124	179
セメント二次製品	細粉	72	84	61
セメント原料	クリンカ、粗粉、原粉	760	832	882
肥料原料	原粉	31	32	30
人工軽量骨材	原粉	38	54	57
道路路盤材	クリンカ、原粉	2	1	0
道路埋戻材	クリンカ	246	152	233
アスファルトフィラー材	原粉	4	4	2
融雪材	粗粉、原粉	7	6	7
土壌改良材	粗粉、原粉	18	19	18
排水濾過材	クリンカ、粗粉	30	29	23
トンネル裏込材	原粉	15	12	28
炭坑充填材	粗粉、原粉	131	221	155
その他		29	34	25
小 計		1,707	1,823	1,870
廃棄処分		1,675	1,960	1,987
合 計		3,382	3,783	3,857

3. フライアッシュの生産

3.1 フライアッシュの生産管理

石炭灰の一般的な回収設備については2.1項で述べたとおりであるが、発電所毎に①燃料炭の品位が異なること、②燃焼温度が抑制されていること、③発電設備の容量、型式、その他が異なること等のため、EP灰の品質も発電所毎に異なる(詳細は次節で述べる)。従って、フライアッシュの生産管理も発電所毎に多少異なるが、大別すれば国内炭火力発電所と海外炭火力発電所とに分類することができる。両者の代表例を示せば以下のとおりである。

(1) 国内炭火力発電所の場合

燃料炭の種類が少なく、それらの品位の変動も小さいので、国内炭火力発電所のフライアッシュの生産管理は比較的容易である。しかし国内炭は海外炭に比べ粉碎性が劣るので、特に粉末度の管理を重点的に行う必要があり、通常次の3段階で必要なチェック項目を決定し、それぞれの基準値を設定し、生産管理を行っている。

すなわち、図-3で示したEP灰については、1日数回試料を採取し、粉末度(ブレン比表面積)、その他(色調、M.B.吸着量など)をチェックし、フライアッシュの生産に適するものだけを原粉サイロに一旦貯蔵する。その後、この原粉を分級器により分級する際、更に原粉と細粉について粉末度、その他をチェックして、細粉サイロに貯蔵する。また、この細粉を市販品として出荷する際にはJIS A6201およびユーザーの要求する全項目について品質試験を行っている。

(2) 海外炭火力発電所の場合

燃料炭の種類が多く、それらの品位の変動も大きく、また一般的にはボイラーの容量が大きいため海外炭火力発電所におけるフライアッシュの生産管理は繁雑であり、製品回収率が低下する。

すなわち、海外炭火力発電所では通常数種類の燃料炭が利用され、これらは通常混合して燃焼されるので、細かく分類すればEP灰の種類も10種類以上になることがある。このため、フライアッシュの生産に不適当な炭種および混炭は事前に掌握し、そのような場合に発生するEP灰については別途処理する必要がある。その後の各工程における生産管理方法としては、国内炭の場合とほぼ同じであるが、海外炭の場合には一般にM.B.吸着量が大きいため粉末度のほかM.B.吸着量を重点的にチェックすることが必要である。また、品質の均一性を確保するため製品貯蔵サイロでのブレンディングも重要である。

3.2 フライアッシュの生産量

平成10年度までのフライアッシュ生産可能性を推定するために、建設省開発課が平成元年8月18日付で、日本フライアッシュ協会に依頼し、同協会が加盟11社26発電所に対するアンケート調査を行った。この結果を用いて平成10年度までのフライアッシュの品種別・用途別生産可能性を国内炭フライアッシュと海外炭フライアッシュとに分類し、更に両者を細粉と原粉とに区別して推定すると、図-4、5に示すとおりとなる。ただし、生産可能性の推定はダムの需要量が明らかでないので、まず全生産可能性を推定し、次に一般需要量を現在とほぼ同程度とし、残りをダム用として数量を算出した。

すなわち、国内炭フライアッシュは細粉が急速に減少し、平成6年度には約6万t程度まで減少するが、原粉は19万t程度維持できるものと予想される。

一方、海外炭フライアッシュはM.B.吸着量は大きい、細粉の生産量が急増し、平成元年度に12万tであったものが平成5年度以降には30万t以上となり、ダム用としても平成3年度には10万t、同5年度には15万t、同10年度には17万tとなり、更に原粉であれば2倍以上の生産量が期待できるものと予想される。

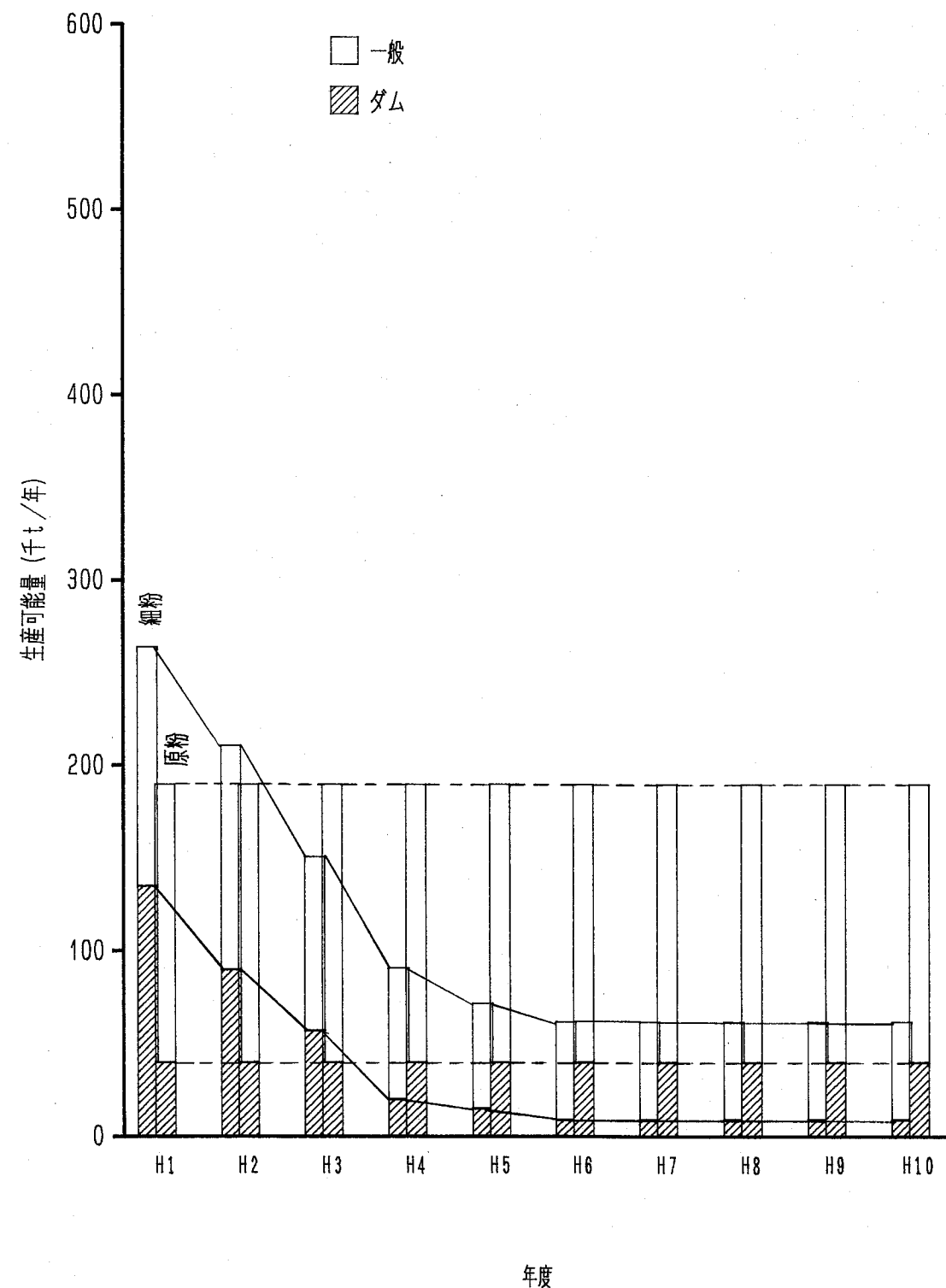


図-4 国内炭フライアッシュの品種別・用途別生産可能性の推定

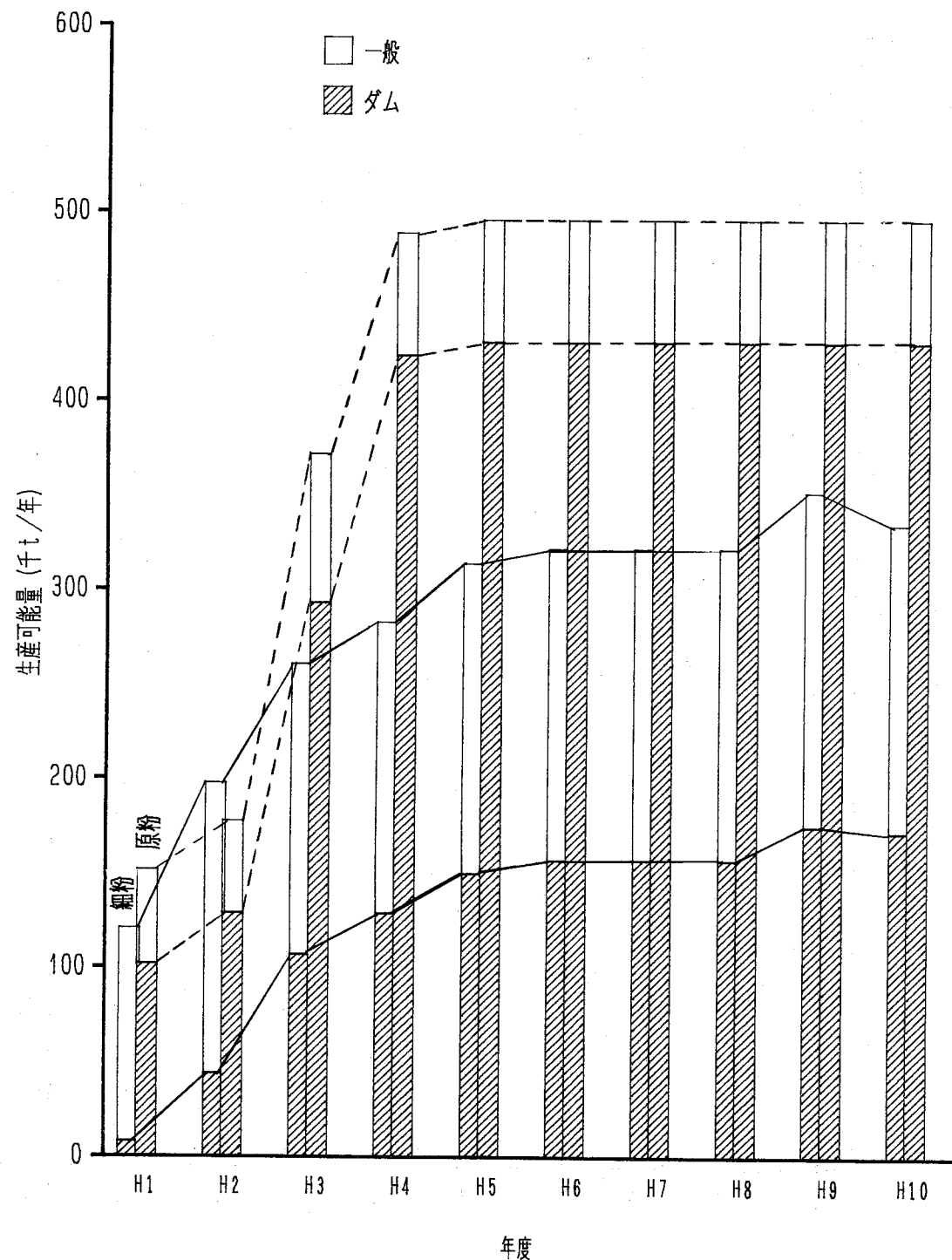


図-5 海外炭フライアッシュの品種別・用途別生産可能量の推定

4. フライアッシュの品質

4.1 フライアッシュの品質管理

前節で述べたように、フライアッシュの品質に影響を及ぼす因子としては、石炭の品位、発電設備、発電負荷、微粉炭燃焼温度等が考えられる。その詳細は以下のとおりであるが、フライアッシュの品質に影響する度合いは発電所毎に異なるので、最終的に所要の品質が得られるよう、各発電所ともそれぞれの工程における基準値を設け品質管理が行われている。

(1) 石炭品位の影響

現在、わが国の石炭火力発電所で利用されている燃料炭の品位は、表-5（国内炭）および表-6～表-7（輸入炭）に示すとおりである。

これらのうち、フライアッシュに影響を及ぼす燃料炭の品位は以下のとおりである。

① 灰の融点

石炭灰は各種の無機成分からなり、ボイラー内で高温にさらされると熔融し、炉壁や伝熱面などに付着し、伝熱性、通気性の低下など種々の障害となるので、灰の融点は高い方が望まれる。しかし、フライアッシュの立場から考えると灰の融点が低いものほど球形粒子が得られ易いので望ましいといえる。一般に灰の融点は輸入炭灰よりも国内炭灰の方が低い。

② 燃料比

固定炭素と揮発分との比を燃料比といい、燃料の適性を示す一つの目安とされている。すなわち、燃料比の小さなものほど、燃焼が容易であり、フライアッシュの強熱減量あるいはM.B.吸着量が小さくなる。一般に石炭の燃料比は輸入炭よりも国内炭の方が小さい。

③ 粉碎性

石炭の粉碎性は一般に石炭化度が進むにつれて大となり、高圧青炭で最大値となるが、無煙炭になるとまた低下する。粉碎性の測定は、試料炭が一定の粒度に達するに要する回転数を測定するボールミル試験法またはハードグローブ法などがある。近年微粉炭燃焼炉の増加に伴い石炭の粉碎性が問題とされるようになった。すなわち、粉碎性の良好なものほど微粉炭粒度が細くなり、燃焼が容易となるので、フライアッシュの粒度も細くなる。一般に石炭の粉碎性は国内炭よりも輸入炭の方が良好である。

表-5 国内炭主要銘柄品位

銘柄	柄	発熱量 Kcal/kg	水分 %	灰分 %	揮発分 %	固定炭素 %	全硫黄 %	灰の融点 ℃	燃料比	粉碎性
三井	別所	5,000	1.8	37.0	27.8	33.4	0.50	1,300	1.20	-
"	川砂	5,000	2.0	34.5	32.9	30.6	0.20	1,360	0.93	-
"	池田	7,350	1.7	12.3	41.7	44.3	1.50	1,300	1.06	-
"	大谷	6,550	1.8	20.8	38.2	39.2	2.00	1,300	1.03	72
三菱	南地	6,100	1.5	25.0	32.5	41.0	0.30	1,270	1.34	66
北炭	新真	5,320	2.6	31.8	32.0	33.6	0.28	1,350	1.05	-
"	幌内	7,190	2.9	9.9	45.2	42.0	0.30	1,200	0.93	-
"	幌内	6,080	3.0	21.6	37.5	37.9	0.26	1,310	1.01	47
"	空知	6,860	2.0	16.8	35.9	45.3	0.41	1,400	1.26	-
"	空知	5,070	2.1	35.4	29.1	33.4	0.40	1,420	1.15	-
住友	平島	5,050	2.5	35.4	29.2	32.9	0.80	1,360	1.13	-
松島	池平	6,110	2.1	23.4	33.3	41.2	1.00	1,450	1.24	-
太平洋	太	6,200	6.0	15.0	41.7	37.3	0.25	1,280	0.89	38
"	太	6,200	6.0	15.0	41.9	37.1	0.25	1,280	0.88	-

出典：コールノート1989年版、ただし粉碎性は電源開発資料

表-6 輸入炭主要銘柄品位

銘柄	柄	発熱量 Kcal/kg	水分 %	灰分 %	揮発分 %	固定炭素 %	全硫黄 %	灰の融点 ℃	燃料比	粉碎性
豪	ブレア	6,520	16.0	8.0	27.2	57.3	0.30	1490~1525	2.11	74
	ドレイク	6,750	9.5	13.0	33.0	51.0	1.00	1,300	1.55	-
	モース	6,900	8.0	15.0	29.0	53.5	0.60	1,600	1.84	68
	ユラ	6,900	10.0	13~15	27~30	52~57	0.60	1,300	1.91	-
	リゴ	7,000	8.0	11.0	32.0	54.0	0.80	1,400	1.69	-
	ワス	6,450	8.0	19.0	29.0	49.5	0.65	1,560	1.71	61
	ハンタ	6,720	8.0	13.5	30.0	53.5	0.30	1,560	1.78	-
	ワレン	6,800	9.0	13.5	34.0	49.5	0.50	1,560	1.46	-
	サクソ	6,800	8.0	14.0	32.5	51.5	0.50	1,460	1.58	-
	マッコー	6,700	8~10	15~17	32~33	49~53	0.4~0.5	1,560	1.69	-
州	ブルーム	6,660	8~10	15~17	29.5~31	49~53	0.4~0.5	-	1.69	-
	ミレー	6,700	8.0	15.0	29.5~31	49~50	1.50	1,580	1.52	-
	レミントン	6,350	8.0	20.0	32~33	42~48	1.00	1,300	1.38	70
	ニユー	6,700	8.0	14.0	30~35	52.0	0.80	1,450	1.68	60
	マスウェル	6,800	8.0	14.0	25.8	54.0	0.50	1,600	2.09	-
	ブルック	6,600	8.0	17.0	30~31	48~49	1.20	1,300 以上	1.59	-

出典：コールノート1989年版、ただし粉碎性は電源開発資料

表 7 輸入炭主要銘柄品位

銘柄	柄	発熱量 Kcal/kg	水分 %	灰分 %	揮発分 %	固定炭素 %	全硫 %	灰の融点 ℃	燃料比	粉碎性
米国	サフラット	6,500 6,990	10.0 10.0	10.1 9.0	38.5 38.5~40	46.5 —	0.55 0.80	1,200 1,300	1.21 —	55 57
カナダ	コーラルバレー オーベットマージュ	6,350 6,050	8.0 8.0	10.0 13.5	35.0 37.0	— 44.0	0.30 0.55	1,250 1350~1400	— 1.19	— —
中国	大 同	6,800	8.0	10~15	25.0	—	1.00	—	—	62
ソ連	クズネツクG-6 ネリェングリンSS クズネツクGK	6800~7100 6,450 6,780	9~12 9.5 8.0	5~14 16.5 11.0	30~36 31.0 40.0	— — —	0.4~0.6 0.20 0.30	— — —	— — —	— — —
南ア	オプデイ メルメ リートス ウイット グッドホー	6,900 6,700 6,400 6,400 6,000	0.8 9.0 9.0 8.0 0.9	10.5 14.0 15~17 16.0 13.5	32.0 30.0 25~27 22~25 28.0	54.5 51~55 54~58 55~59 56.0	0.80 1.00 0.90 1.00 0.70	1,350 1,300 1,350 1,300 1,400	1.70 1.77 2.15 2.42 2.00	— 66 — 71 —
インド	セレホ	6,720	8.4	8.6	34.9	48.1	0.66	1,350	1.38	—
インド	キタデイン	6,500	15.0	6.0	45.0	—	0.30	1,300	—	—

出典：コールノート1989年版、ただし粉碎性は電源開発資料

(2) 発電設備の影響

フライアッシュの品質に影響を及ぼす主な設備としては、次のようなものが考えられる。

① 微粉炭機

微粉炭機の種類としては、チューブミル、ボールミル、ローラミルなどがあり、型式も各種のものがあるが、これらの性能を単純に評価することは困難であり、各発電所の発電規模、石炭の品位（例えば粉碎性）等を考慮して設置されている。しかし、チューブミルの場合、微粉炭の粒度はミルボールの充填率などの影響が大きいため、各発電所ともミルボールの充填率をほぼ一定に保つことにより、微粉炭粒度ひいてはフライアッシュの粒度を一定に保つことを目標にして管理されている。

② ボイラ

微粉炭燃焼ボイラは発電規模、石炭の品位（例えば燃料比、灰の融点）、燃焼条件（例えば石油との混焼）等を考慮して設計され、細部についてはメーカーにより多少の相違はあるが、最近各メーカーとも燃焼方式を改善し、NO_x（窒素酸化物）発生量の低減を図るための対策が講ぜられている。

(3) 発電負荷の影響

わが国における電力の需要量は、10数年前より夏ピーク型といわれてきたが、最近では冬期にもう1つのピークが現れるようになった。従って、発電所の稼働率は夏期および冬期が高く、春期および秋期が低い。これに伴い、春期および秋期には発電始動・停止あるいは負荷変動が多くなり、フライアッシュの品質も変動する。このような場合に発生した品質の劣るフライアッシュはセメント原料・埋立材料・その他の用途に利用されるので、コンクリート混和材としてのフライアッシュの生産量が低下する傾向にある。

(4) 微粉炭燃焼温度の影響

昭和42年の公害対策基本法制定以来、大気汚染、水質汚染、土壌汚染、騒音、振動等に対する各種の環境規制が逐次強化されてきたが、これらのうち、フライアッシュの品質に影響を及ぼすのは、大気中の NO_2 （二酸化窒素）に係る NO_x （窒素酸化物）の排出規制である。しかし、 NO_x は SO_x （硫黄酸化物）にくらべ、発生源が複雑かつ多様なため、脱硝技術の開発が困難であり、現在、多くの発電所では、低 NO_x 対策として、微粉炭燃焼温度を低下することにより NO_x 発生量を抑制する方法が採用されている。（注） NO_x 規制が特に厳しい地域では、更に脱硝装置を設けている。

すなわち、低 NO_x 対策のため、ボイラー内での微粉炭燃焼温度を低下させると（ $1500^\circ\text{C} \rightarrow 1200 \sim 1300^\circ\text{C}$ ）、フライアッシュの強熱減量あるいはM.B.吸着量が増加し、球形粒子含有量が減少する。特に海外炭は燃料比が大きく、灰の融点が高いので、この傾向が著しい。

4.2 フライアッシュの品質

平成元年度に行ったアンケート調査結果から、昭和61年度から同63年度までの3ヶ年間に於ける各発電所の市販フライアッシュの品質を国内炭フライアッシュと海外炭フライアッシュとに分類し、年度別に区分けすると表-8～表-10に示すとおりである。更に、これらフライアッシュの品質を国内炭フライアッシュと海外炭フライアッシュ別にヒストグラムで表すと図-6～図-14に示すとおりである。

表-8 昭和61年度市販フライアッシュ品質比較

試 験 項 目		J I S	国内炭フライアッシュ		海外炭フライアッシュ		
			平 均	範 囲	平 均	範 囲	
化学成分	湿 分 (%)	1 以下	0. 1	0. 0~0. 3	0. 1	0. 0~0. 6	
	強 熱 減 量 (%)	5 以下	2. 0	0. 3~4. 6	2. 7	0. 7~4. 0	
	二 酸 化 け い 素 (%)	45 以上	55. 9	48. 8~61. 8	59. 2	50. 1~67. 5	
物理的性質	比 重	1. 95 以上	2. 20	2. 05~2. 32	2. 24	2. 15~2. 33	
	ブレン比表面積 (cm ² /g)	2, 400 以上	3, 586	2, 820~5, 150	4, 096	3, 081~5, 010	
	90μmふるい残分 (%)	—	0. 5	0. 0~ 2. 1	—	—	
	45μmふるい残分 (%)	—	18. 0	2. 6~32. 1	7. 1	2. 4~19. 5	
	単 位 水 量 比 (%)	102 以下	97	91~101	97	95~102	
	質 圧縮強度比	28日	60 以上	90	61~109	81	66~ 87
		91日	70 以上	100	71~133	96	79~109
M. B. 吸着量 (ug/g)		—	0. 30	0. 04~0. 64	0. 52	0. 18~0. 76	

（注）90 μm ふるい残分は3発電所で実施。
45 μm ふるい残分は11発電所で実施。

表-9 昭和62年度市販フライアッシュ品質比較

試 験 項 目		J I S	国内炭フライアッシュ		海外炭フライアッシュ	
			平 均	範 囲	平 均	範 囲
化 学 成 分	湿 分 (%)	1以下	0.1	0.0~0.4	0.1	0.0~0.6
	強 熱 減 量 (%)	5以下	1.8	0.3~4.4	2.8	1.1~4.4
	二 酸 化 け い 素 (%)	45以上	56.6	48.6~69.7	59.0	50.1~65.6
物 理 的 性 質	比 重	1.95以上	2.20	2.01~2.35	2.22	2.08~2.33
	ブレン比表面積 (cm ² /g)	2,400以上	3,493	2,960~4,750	4,081	2,900~5,000
	90μmふるい残分 (%)	-	0.9	0.3~ 2.5	-	-
	45μmふるい残分 (%)	-	17.5	7.5~29.1	9.0	0.6~18.8
	単 位 水 量 比 (%)	102以下	96	89~101	97	95~100
	圧縮強度比	28日	60以上	82	62~110	80
91日		70以上	101	74~133	95	85~110
M.B.吸着量 (mg/g)		-	0.32	0.05~0.75	0.58	0.19~0.99

（注）90 μm ふるい残分は3発電所で実施。
45 μm ふるい残分は11発電所で実施。

表-10 昭和63年度市販フライアッシュ品質比較

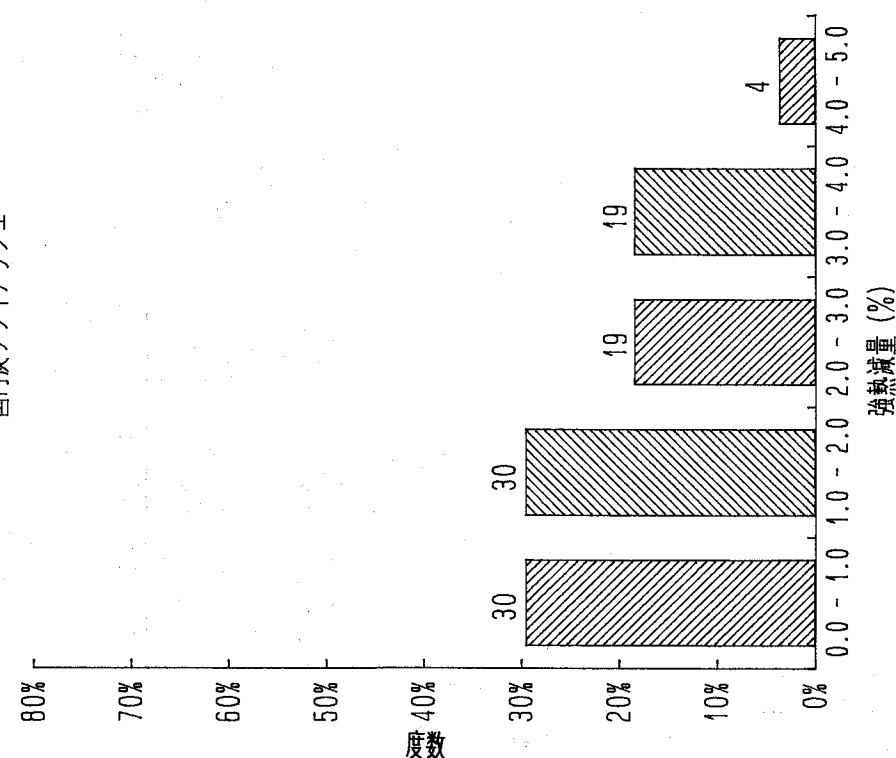
試験項目	J I S	国内炭フライアッシュ		海外炭フライアッシュ	
		平均	範囲	平均	範囲
化学成分					
水分(%)	1以下	0.1	0.0~0.4	0.1	0.0~0.3
強熱減量(%)	5以下	1.8	0.4~4.5	2.7	1.2~4.7
二酸化けい素(%)	45以上	56.7	49.0~72.6	59.8	51.5~70.8
物理的性質					
比重	1.95以上	2.19	2.02~2.28	2.22	2.17~2.35
ブレン比表面積(㎡/g)	2,400以上	3,473	2,780~4,400	4,238	3,024~5,020
90μmふるい残分(%)	-	1.4	0.2~5.3	-	-
45μmふるい残分(%)	-	17.8	7.7~29.0	5.8	1.2~13.0
単位水量比(%)	102以下	96	89~100	97	94~100
圧縮強度比	28日	60以上	81	79	70~84
	91日	70以上	95	94	85~103
M.B.吸着量(㎎/g)	-	0.34	0.05~0.70	0.45	0.17~0.71

(注) 90μmふるい残分は3発電所で実施。
45μmふるい残分は11発電所で実施。

すなわち、海外炭フライアッシュは国内炭フライアッシュに比べ、強熱減量、二酸化けい素、比重およびブレン比表面積が大きく、圧縮強度比がやや小さいことが判る。また、M.B.吸着量も大きい。

この主な理由は、海外炭の場合①燃料比(炭素分と揮発分との比)が大きく、燃焼しにくいので強熱減量が大きくなり、ひいてはM.B.吸着量も大きくなること ②粉碎抵抗が小さく、細くなり易いので、ブレン比表面積が大きくなること ③灰の溶融温度が高く、球形粒子が少ないので、単位水量比が大きく圧縮強度比が小さくなること、等が考えられる。

国内炭フライアッシュ



海外炭フライアッシュ

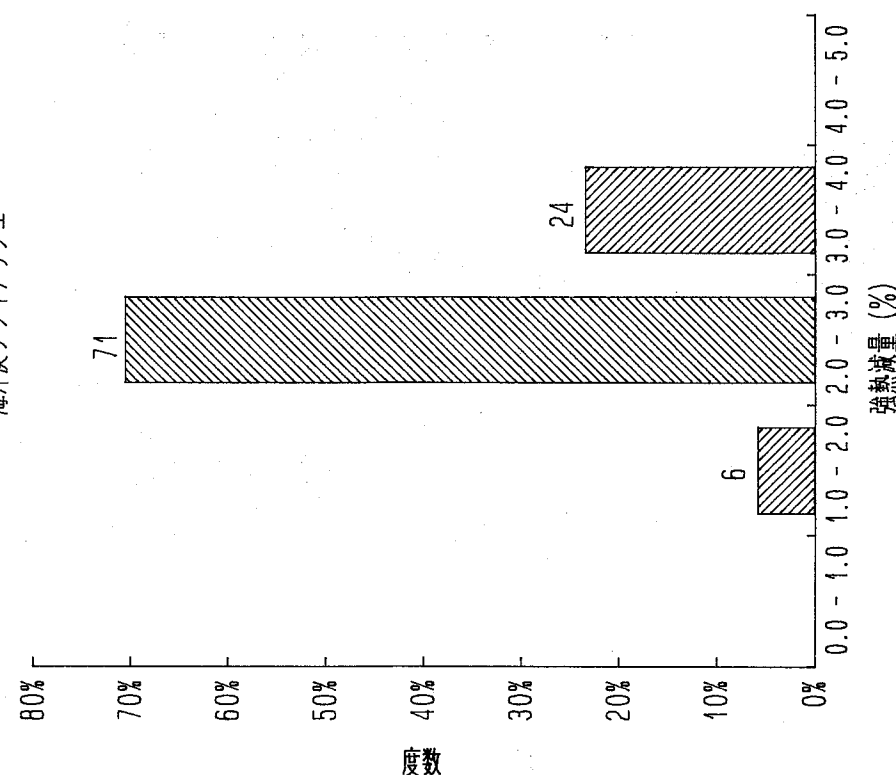


図-6 フライアッシュの品質(強熱減量の分布)

国内炭フライアッシュ

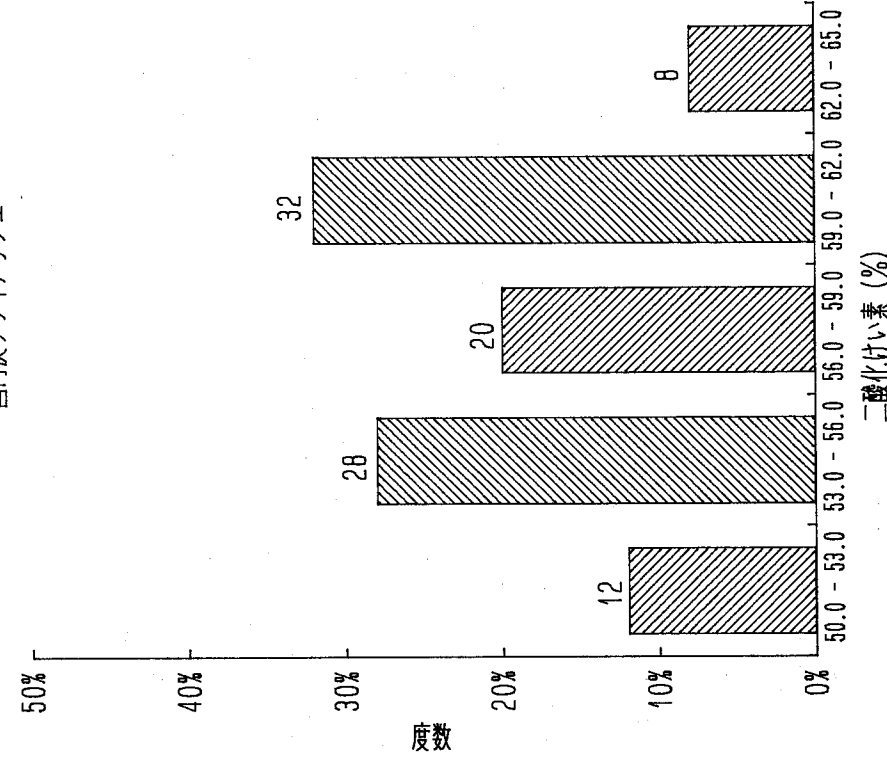
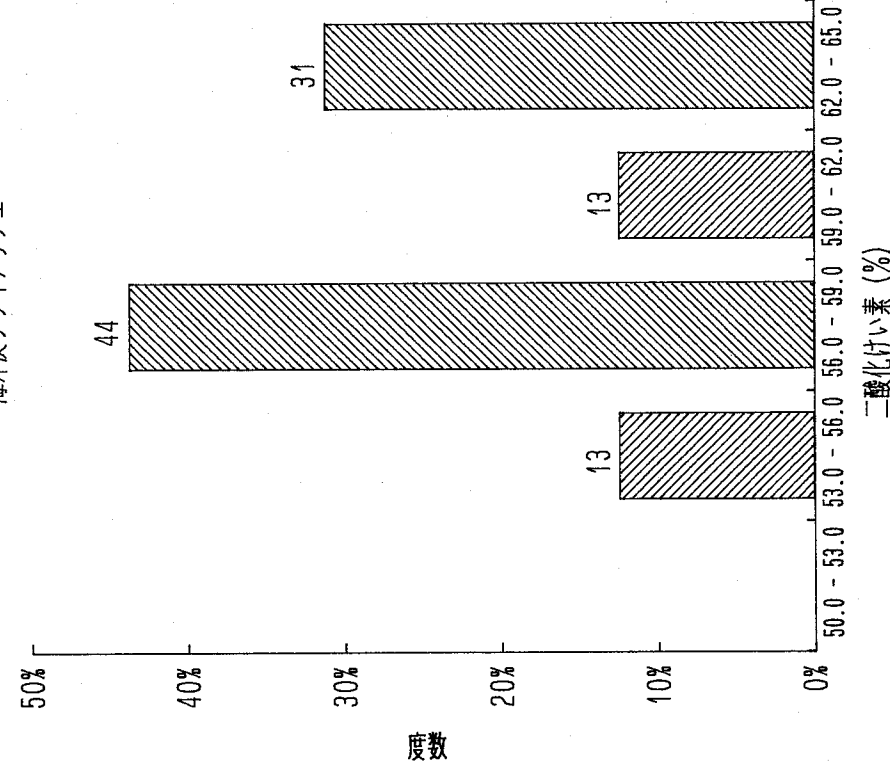
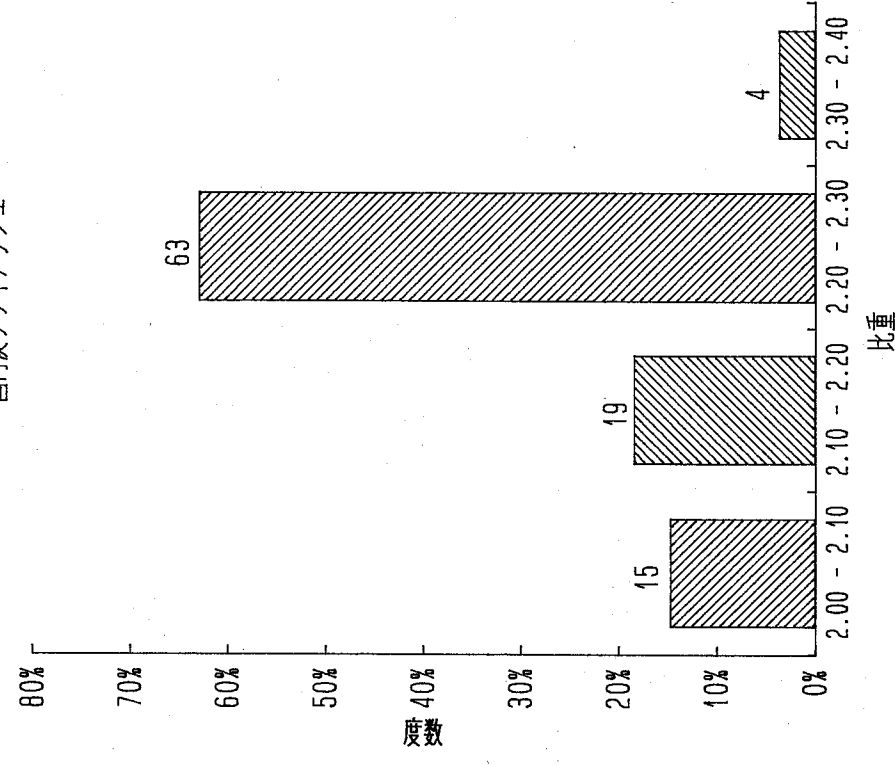


図-7 フライアッシュの品質 (二酸化けい素の分布)

海外炭フライアッシュ



国内炭フライアッシュ



海外炭フライアッシュ

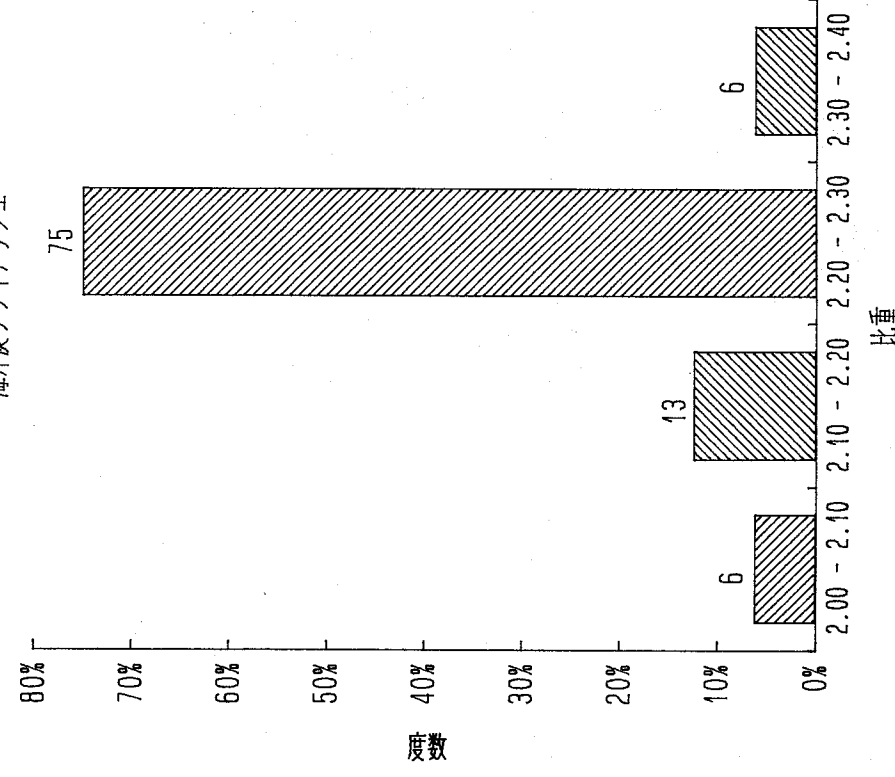


図-8 フライアッシュの品質 (比重の分布)

国内炭フライアッシュ

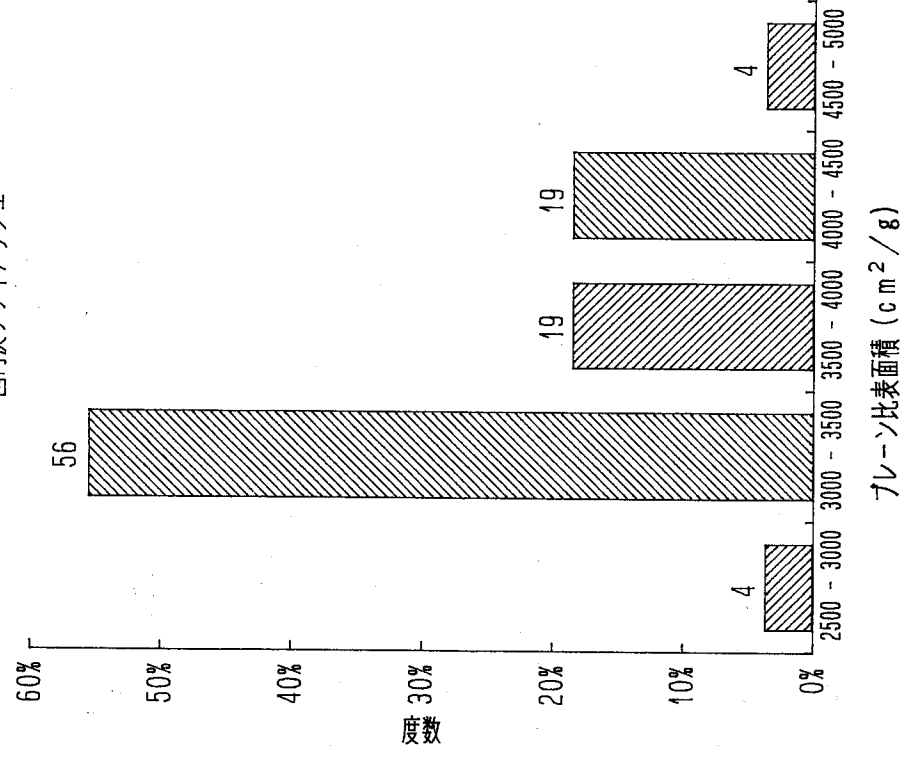
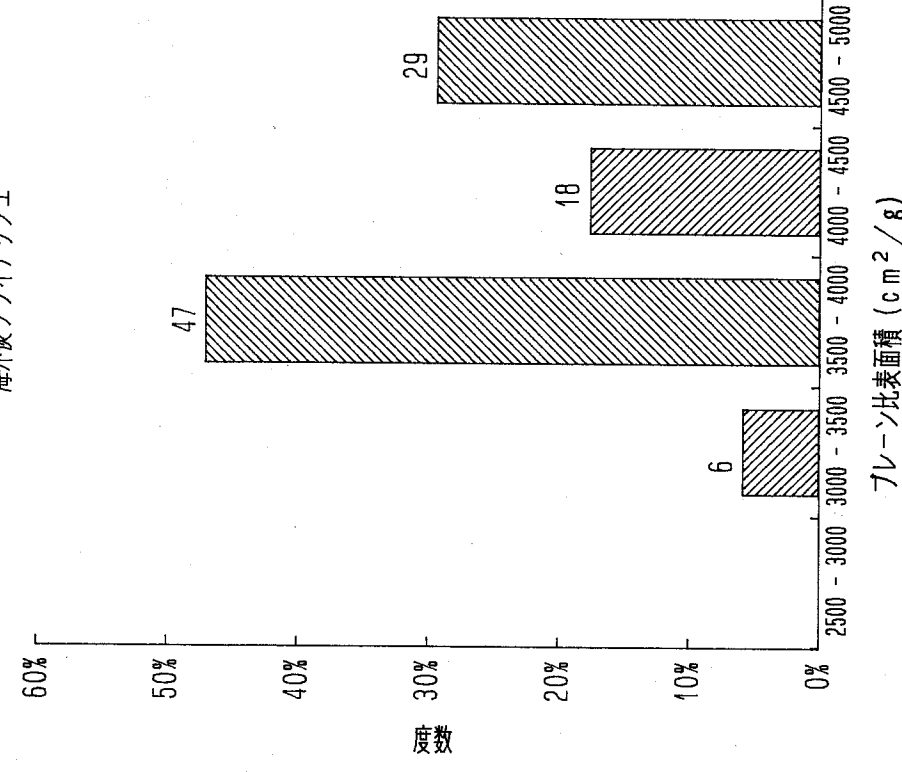
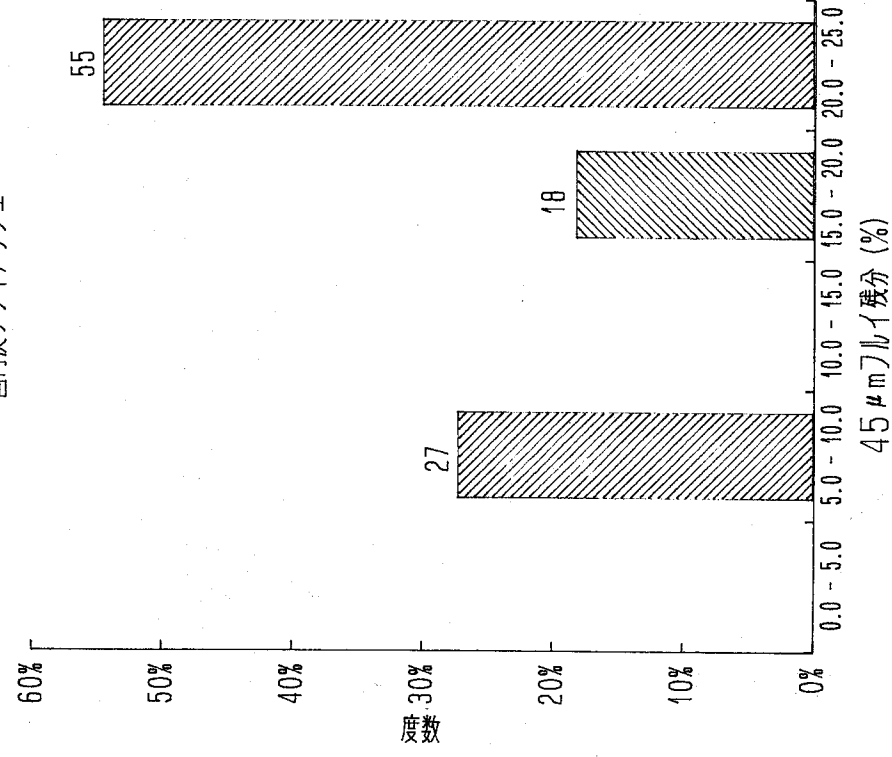


図-9 フライアッシュの品質 (プレーン比表面積の分布)

海外炭フライアッシュ



国内炭フライアッシュ



海外炭フライアッシュ

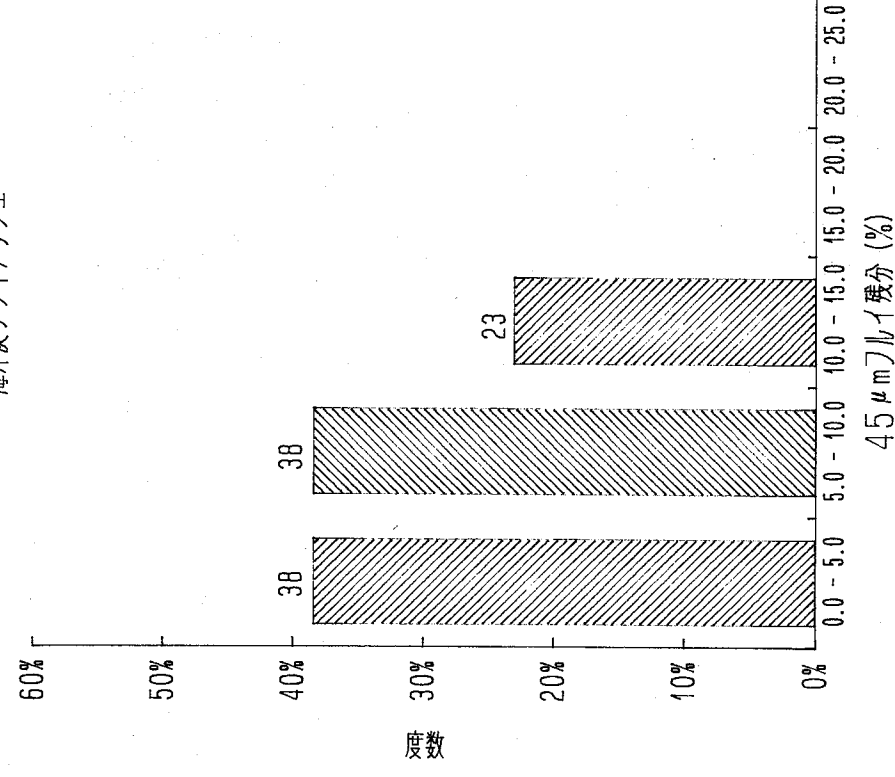
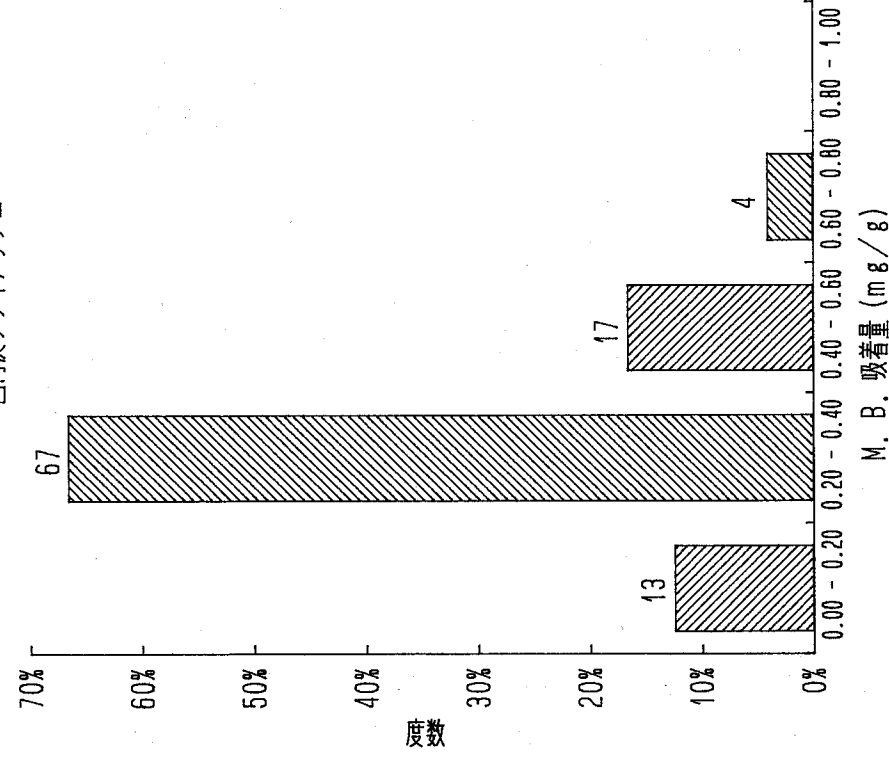


図-10 フライアッシュの品質 (45 μm 残分の分布)

国内炭フライアッシュ



海外炭フライアッシュ

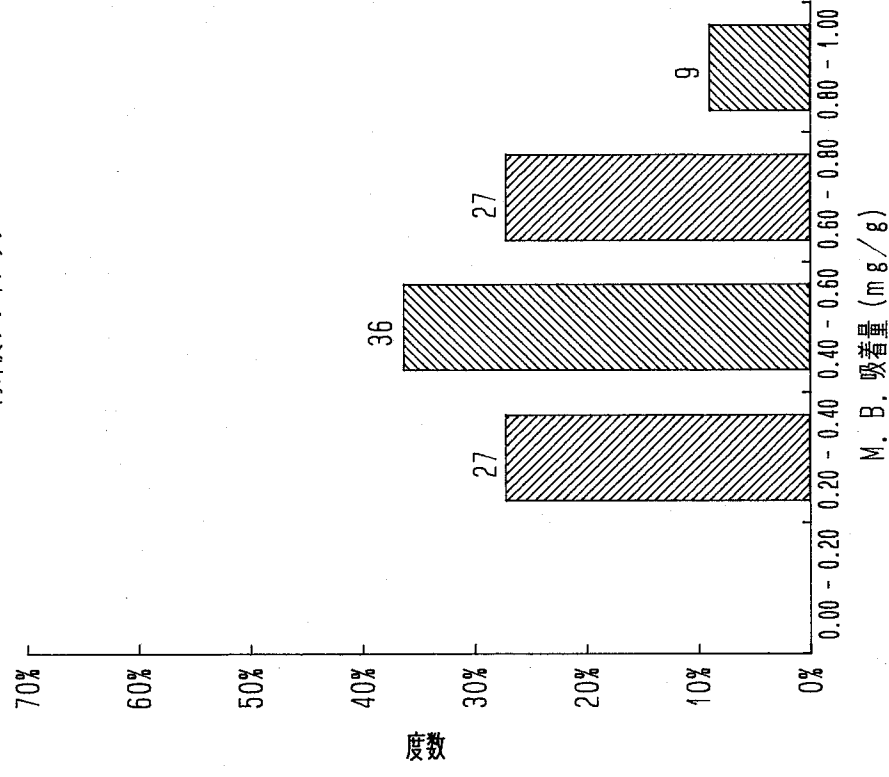
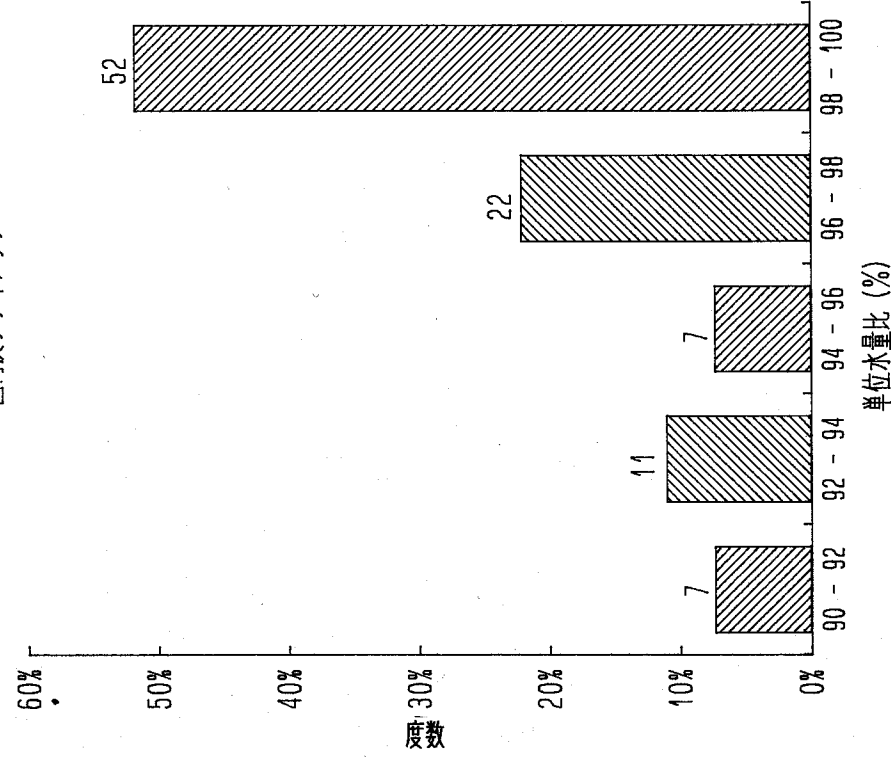


図-11 フライアッシュの品質 (M. B. 吸着量の分布)

国内炭フライアッシュ



海外炭フライアッシュ

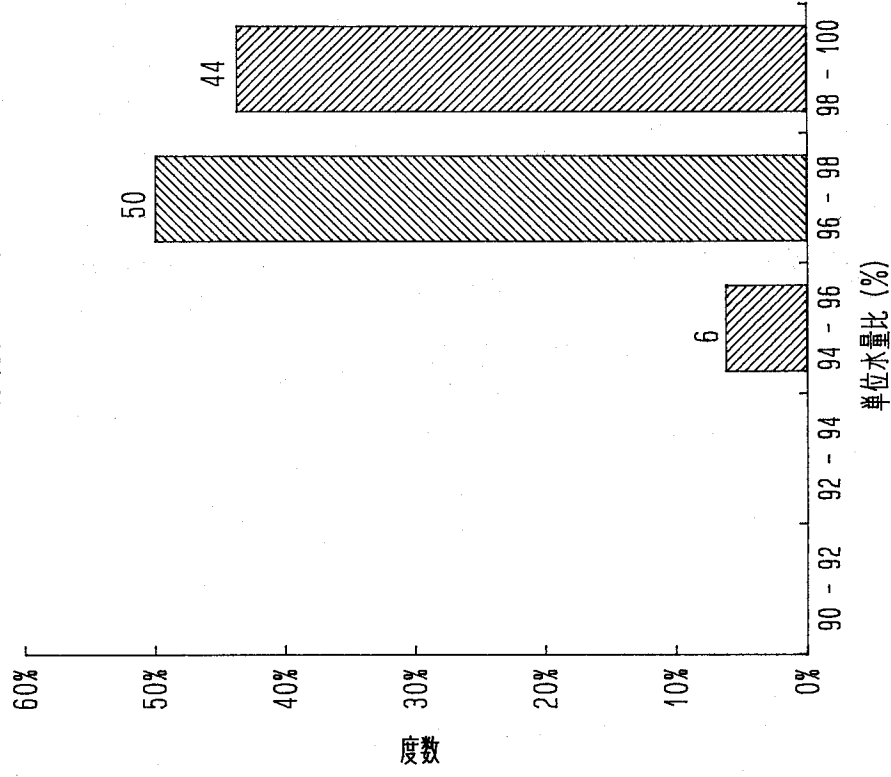


図-12 フライアッシュの品質 (単位水量比の分布)

国内炭フライアッシュ

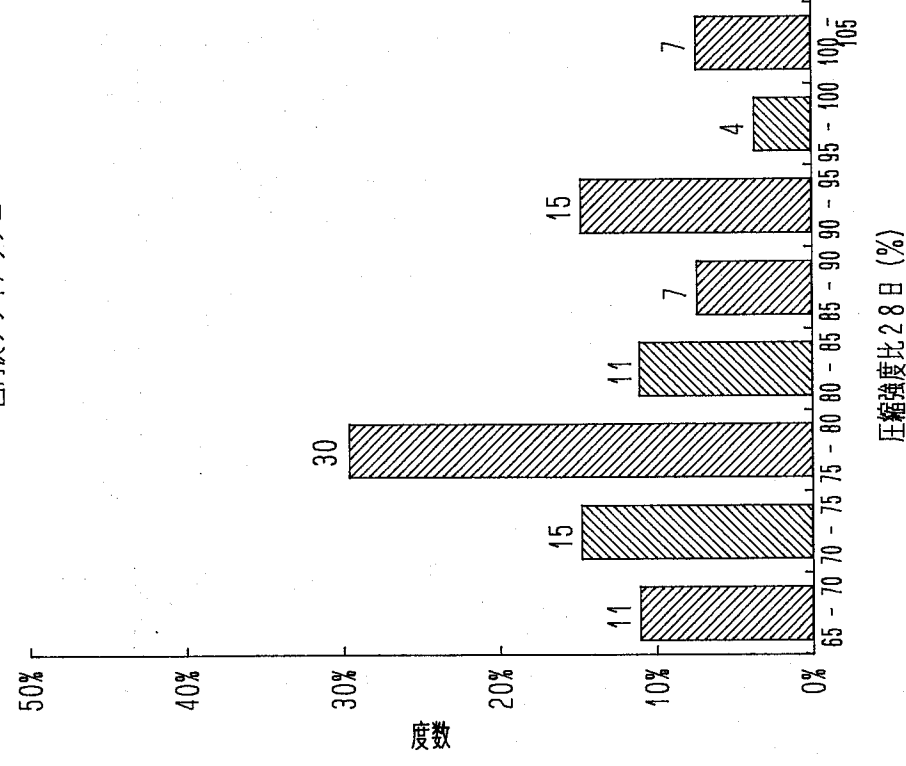
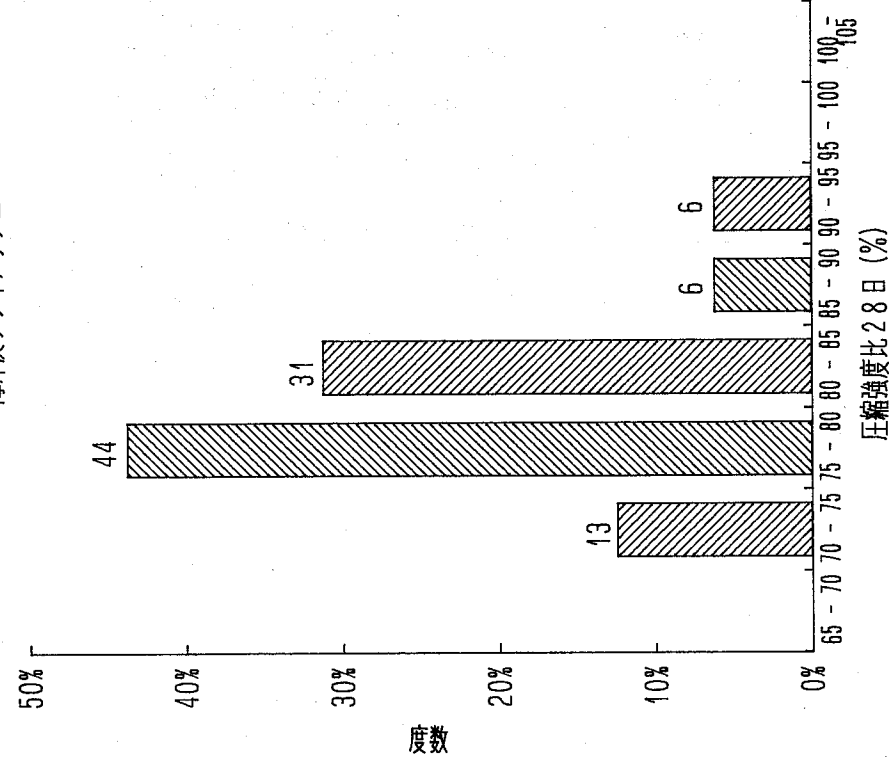


図-13 フライアッシュの品質 (圧縮強度比28日の分布)

海外炭フライアッシュ



国内炭フライアッシュ

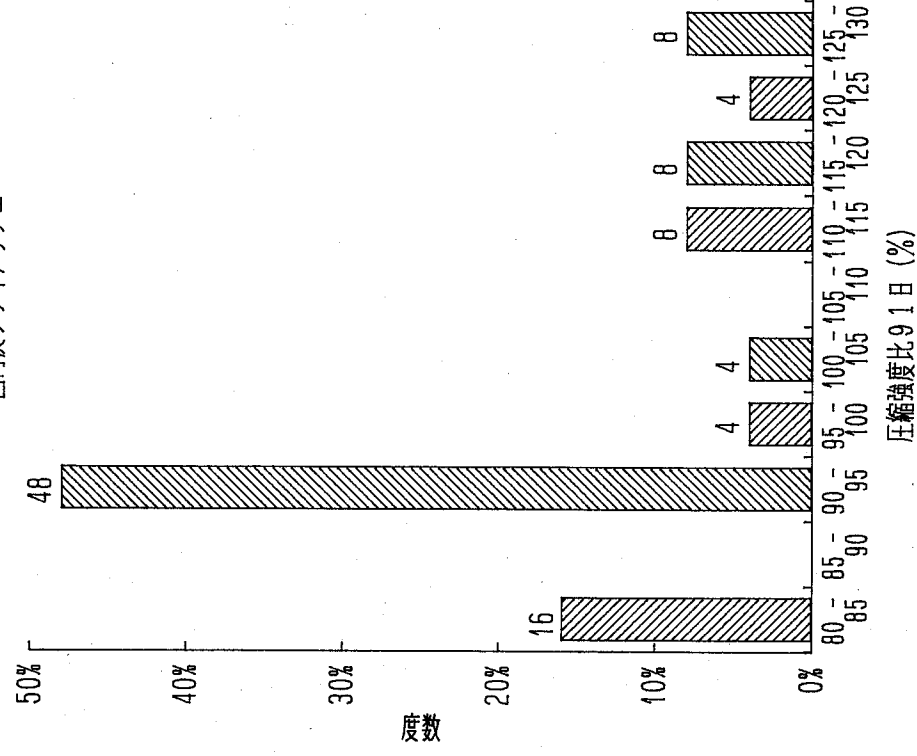
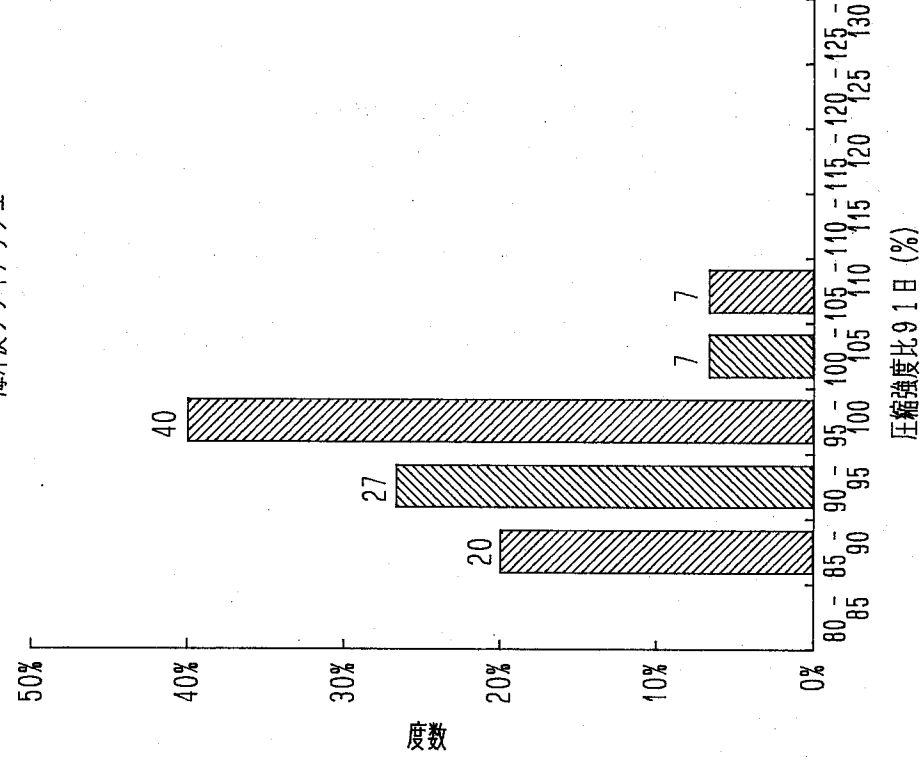


図-14 フライアッシュの品質 (圧縮強度比91日の分布)

海外炭フライアッシュ



4.3 フライアッシュの品質試験

(1) 試験に用いた試料

フライアッシュの品質試験はアンケート調査の結果に基づき、ダム用として供給可能と思われる発電所を選定し、表-11に示す10種類のフライアッシュを採取した。これらのフライアッシュは、主として現在販売されているフライアッシュであるが、F、G、HおよびJは、まだ回収・生産が行われていないため、将来生産可能であると思われる品種のフライアッシュを採取した。これらのフライアッシュにより、海外炭灰と国内炭灰との比較、細粉と原粉との比較およびアンケート調査の確認を行った。

表-11 フライアッシュの品質試験用サンプル

記号	炭種	フライアッシュの品種	供給可能量(千t/年)	備考
A	海外炭	原粉	50~60	
B	海外炭	細粉	25	
C	国内炭	細粉	15~20	
D	国内炭	細粉	10	国内炭で細粉と原粉とを比較する。
E	国内炭	原粉	10~30	
F	海外炭	細粉	40	海外炭で細粉と原粉とを比較する。
G	海外炭	原粉	100	
H	海外炭	原粉	50	
I	海外炭	細粉	10	
J	海外炭	原粉	85	

(2) 試験方法

JIS A6201によった。ただし、45 μ mふるい残分についてはCAJS K-02、M.B.吸着量については土木学会論文集第31号によった。

なお、JIS A6201に基づくフライアッシュのモルタル試験（単位水量比と圧縮強度比）に用いたセメントは、住友セメント㈱の普通ポルトランドセメントであり、その試験成績は表-12に示すとおりである。

表-12 セメントの試験成績

比重		3.16
ブレン比表面積(c㎡/g)		3,250
凝結	水量(%)	27.6
	始発(h-m)	2-24
	終結(h-m)	3-44
安定性		良
圧縮強さ (kgf/c㎡)	3日	165
	7日	266
	28日	417
酸化マグネシウム(%)		1.7
三酸化いおう(%)		2.0
強熱減量(%)		1.2

(3) 試験結果

フライアッシュの試験結果は表-13に示すとおりである。

表-13 フライアッシュの品質試験結果

試料	記号	炭種	品種	強熱減量 (%)	湿分 (%)	二酸化けい素 (%)	M.B. 吸着量 (mg/g)	比重	粉末度		単水量比 (%)	圧縮強度比 (%)		
									ブレン比表面積 (cm ² /g)	45μm 分残 (%)		7日	28日	91日
A	海外炭	原粉	原粉	1.7	0.1	69.9	0.71	2.20	3900	11.3	102	67	70	84
B	海外炭	細粉	細粉	1.5	0.2	69.6	0.33	2.17	3340	18.0	101	68	70	87
C	国内炭	細粉	細粉	2.4	0.0	54.7	0.16	2.18	2710	23.2	97	72	75	92
D	国内炭	原粉	原粉	2.1	0.0	54.8	0.28	2.25	3390	23.2	97	77	78	99
E	国内炭	細粉	細粉	1.9	0.0	52.9	0.29	2.29	3730	13.2	96	79	80	101
F	海外炭	原粉	原粉	3.5	0.1	61.4	0.71	2.16	3230	19.1	101	67	70	84
G	海外炭	細粉	細粉	2.0	0.1	62.1	0.65	2.21	4300	2.9	100	71	76	92
H	海外炭	原粉	原粉	2.7	0.0	69.7	0.60	2.12	3660	22.0	100	68	70	85
I	海外炭	細粉	細粉	2.1	0.1	64.8	0.50	2.22	4010	6.5	98	78	81	101
J	海外炭	原粉	原粉	0.5	0.1	60.8	0.19	2.11	3270	23.6	98	69	72	94
JIS A6201-1977				5	1	45	—	1.95	2400	—	102	—	60	70
				以下	以下	以上		以上	以上		以下		以上	以上

注) H および I は、一部国内炭が混炭されている。

(4) 試験結果の検討

a) 細粉と原粉の品質の比較

データ数が限られているので十分な検討はできないが、表-13に示した細粉(5種)と原粉(5種)の品質を対比すると表-14に示すとおりである。

表-14 フライアッシュ品質比較

試 験 項 目		J I S	細 粉		原 粉		
			平 均	範 囲	平 均	範 囲	
化学成分	湿 分 (%)	1 以下	0. 1	0. 0~0. 2	0. 1	0. 0~0. 1	
	強 熱 減 量 (%)	5 以下	2. 0	1. 5~2. 4	2. 1	0. 5~3. 5	
	二 酸 化 け い 素 (%)	45 以上	60. 8	52. 9~69. 6	63. 3	54. 8~69. 9	
物理的性質	比 重	1. 95 以上	2. 21	2. 17~2. 29	2. 17	2. 11~2. 25	
	ブレン比表面積 (cm ² /g)	2, 400 以上	3, 618	2, 710~4, 300	3, 490	3, 230~3, 900	
	90μmふるい残分 (%)	—	—	—	—	—	
	45μmふるい残分 (%)	—	12. 8	2. 9~23. 2	19. 8	11. 3~23. 6	
	単 位 水 量 比 (%)	102 以下	98	96~101	100	97~102	
質	圧縮強度比	28 日	60 以上	76	70~ 81	72	70~ 78
		91 日	70 以上				
M. B. 吸着量 (mg/g)		—	0. 39	0. 16~0. 65	0. 50	0. 19~0. 71	

すなわち、細粉は原粉に比べ粉末度が細くなる(ブレン比表面積が大きく、45μm ふるい残分が小さい)のは当然であるが、同時に強熱減量、M.B. 吸着量および単位水量比が小さく、比重および圧縮強度比が大きいことが判る。

また、細粉と原粉の品質を比較するには、それぞれ同一発電所のものが適当と考えられるので、国内炭フライアッシュについては表-13のDとE、海外炭フライアッシュについては表-13のFとGを比較してみると、上記と同様の傾向が認められ、原粉よりも細粉の方が望ましいといえる。

ただし、今回試験を行ったフライアッシュは、細粉も原粉も共に JIS A6201 に適合するものであり、両者の品質の相違がどの程度コンクリートの品質に影響を及ぼすかについて更にコンクリート試験を行う必要がある。

b) アンケート調査に対する確認

今回試験を行った10種類のフライアッシュについて別途実施したアンケート調査の結果と対比してみると、表-15に示すとおりである。

すなわち、今回の試験結果は、アンケート調査結果（昭和61～63年度の実績）から、2・3のデータ（主として原粉）が外れるものもあるが、これらは必ずしも出荷品ではないので、サンプリングに問題があったようであり、その他のデータはほぼ中間値を示している。ただし、F、GおよびHは、まだフライアッシュの回収・生産を行っていないため、図-3に示したEP灰の試験値である。

表-15 アンケート調査結果との比較

記号	資 料	品 種	炭 種	強 減 量 (%)	熱 量 (%)	二酸化炭素 (%)	灰 分 (%)	灰 化 率 (%)	灰 化 率 (mg/g)	比 重	粉 末 度 ブレンド 比表面積 (cm ² /g)	45μm 分 残 (%)	位 量 比 (%)	圧縮強度比 (%)		
														7日	28日	91日
A	今回試験結果	原粉	海外炭	1.7	0.1	68.9	0.71	2.20	3900	11.3	102	67	70	84		
	アンケート 調査結果	平均		2.9	0.2	59.4	0.70	2.25	3970	5.7	96	84	109			
		最高		3.7	0.2	70.8	0.90	2.31	4690	13.8	97	94	109			
B	今回試験結果	細粉	海外炭	1.6	0.0	50.1	0.56	2.18	2900	2.4	94	75	109			
	アンケート 調査結果	平均		1.5	0.2	69.6	0.33	2.17	3340	18.0	101	68	70	87		
		最高		2.7	0.1	63.2	0.54	2.19	3873	10.6	99	75	90			
C	今回試験結果	細粉	国内炭	4.4	0.6	67.5	0.90	2.33	3900	13.8	101	82	106			
	アンケート 調査結果	平均		0.7	0.0	54.3	0.30	2.08	3760	5.0	97	70	83			
		最高		2.4	0.0	54.7	0.16	2.18	2710	23.2	97	72	75	92		
D	今回試験結果	細粉	国内炭	2.6	0.2	56.6	0.34	2.07	3303	20.7	99	67	82			
	アンケート 調査結果	平均		3.4	0.4	61.2	0.50	2.20	3650	27.5	101	75	92			
		最高		1.4	0.1	54.0	0.04	2.01	2900	12.1	96	61	71			
E	今回試験結果	原粉	国内炭	2.1	0.0	54.8	0.28	2.25	3390	23.2	97	77	78	99		
	アンケート 調査結果	平均		2.1	0.1	53.3	0.29	2.23	3163		99	73	90			
		最高		3.8	0.2	54.8	0.75	2.27	3400		101	83	102			
F	今回試験結果	細粉	国内炭	1.1	0.1	51.0	0.05	2.16	2890		97	62	74			
	アンケート 調査結果	平均		1.9	0.0	52.9	0.29	2.29	3730	13.2	96	79	80	101		
		最高		1.8	0.1	53.1	0.26	2.29	3500		97	80	99			
G	今回試験結果	細粉	海外炭	3.3	0.2	54.9	0.55	2.35	4100		100	95	115			
	アンケート 調査結果	平均		0.5	0.0	50.9	0.05	2.24	3140		94	65	85			
		最高		3.5	0.1	61.4	0.71	2.16	3230	19.1	101	67	70	84		
H	今回試験結果	原粉	海外炭	4.3			0.70		3409							
	アンケート 調査結果	平均		10.2			0.98		4910							
		最高		1.2			0.28		2320							
I	今回試験結果	細粉	海外炭	2.0	0.1	62.1	0.65	2.21	4300	2.9	100	71	76	92		
	アンケート 調査結果	平均		3.1			0.72		4159							
		最高		7.6			0.99		5930							
J	今回試験結果	細粉	海外炭	0.4			0.30		2720							
	アンケート 調査結果	平均		2.7	0.0	69.7	0.60	2.12	3660	22.0	100	68	70	85		
		最高		3.7			0.53		3640							
K	今回試験結果	細粉	海外炭	10.8			0.91		4330							
	アンケート 調査結果	平均		0.2			0.10		3190							
		最高		2.1	0.1	64.8	0.50	2.22	4010	6.5	98	78	81	101		
L	今回試験結果	細粉	海外炭	2.9	0.1	62.3		2.20	3927	4.1	97	80	96			
	アンケート 調査結果	平均		4.7	0.2	65.9		2.23	4450	6.3	102	88	105			
		最高		1.2	0.0	57.1		2.17	3280	2.0	95	66	79			
M	今回試験結果	原粉	海外炭	0.5	0.1	60.8	0.19	2.11	3270	23.6	98	69	72	94		
	アンケート 調査結果	平均		2.5			0.40		3900							
		最高		3.5			0.60		4200							
N	今回試験結果	細粉	海外炭	0.7			0.20		3300							
	アンケート 調査結果	平均														
		最高														

アンケート調査結果は、昭和61～63年度の実績を記載した。ただし、F、G、Hは現在まだ回収・生産が行われていないのでEP灰の試験値を示した。Jは平成元年年度の実績を記載した。

c) 品質特性値間の相互関係

① 強熱減量とM.B.吸着量との関係

フライアッシュの強熱減量とM.B.吸着量との関係は図-15に示すとおりである。

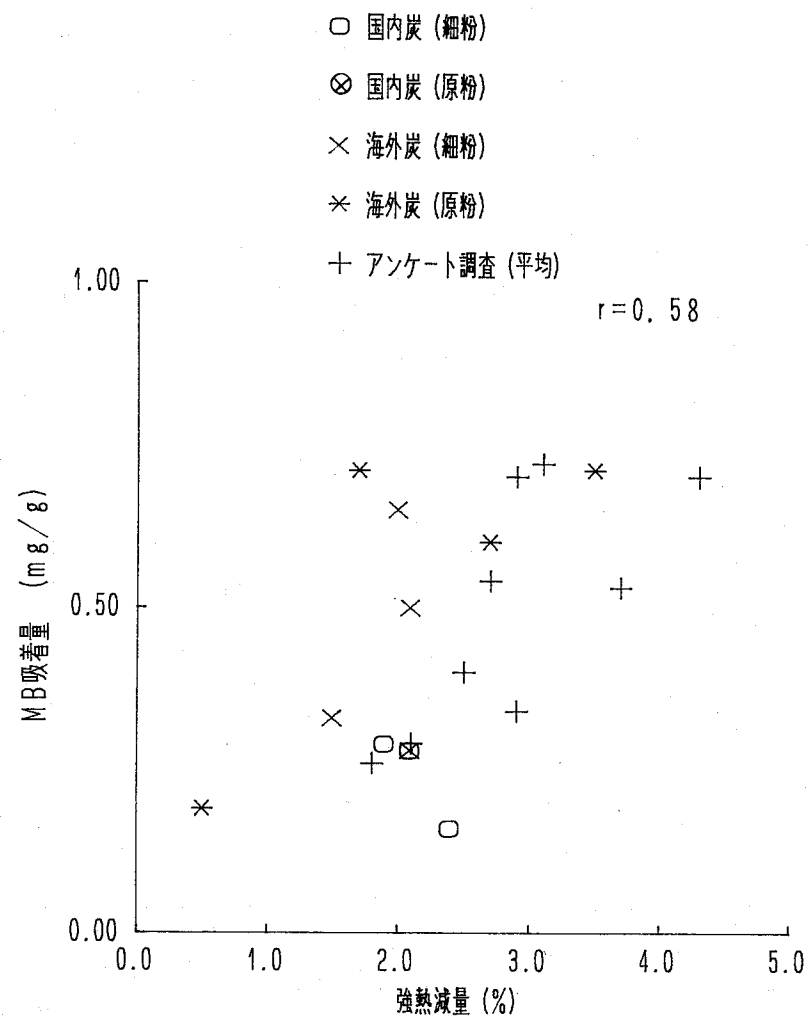


図-15 強熱減量とMB吸着量との関係

すなわちフライアッシュの強熱減量とM.B.吸着量との関係は、ほぼ相関性が認められる。

② ブレーン比表面積と45 μ m残分との関係

フライアッシュのブレーン比表面積と45 μ m残分との関係は図-16に示すとおりである。

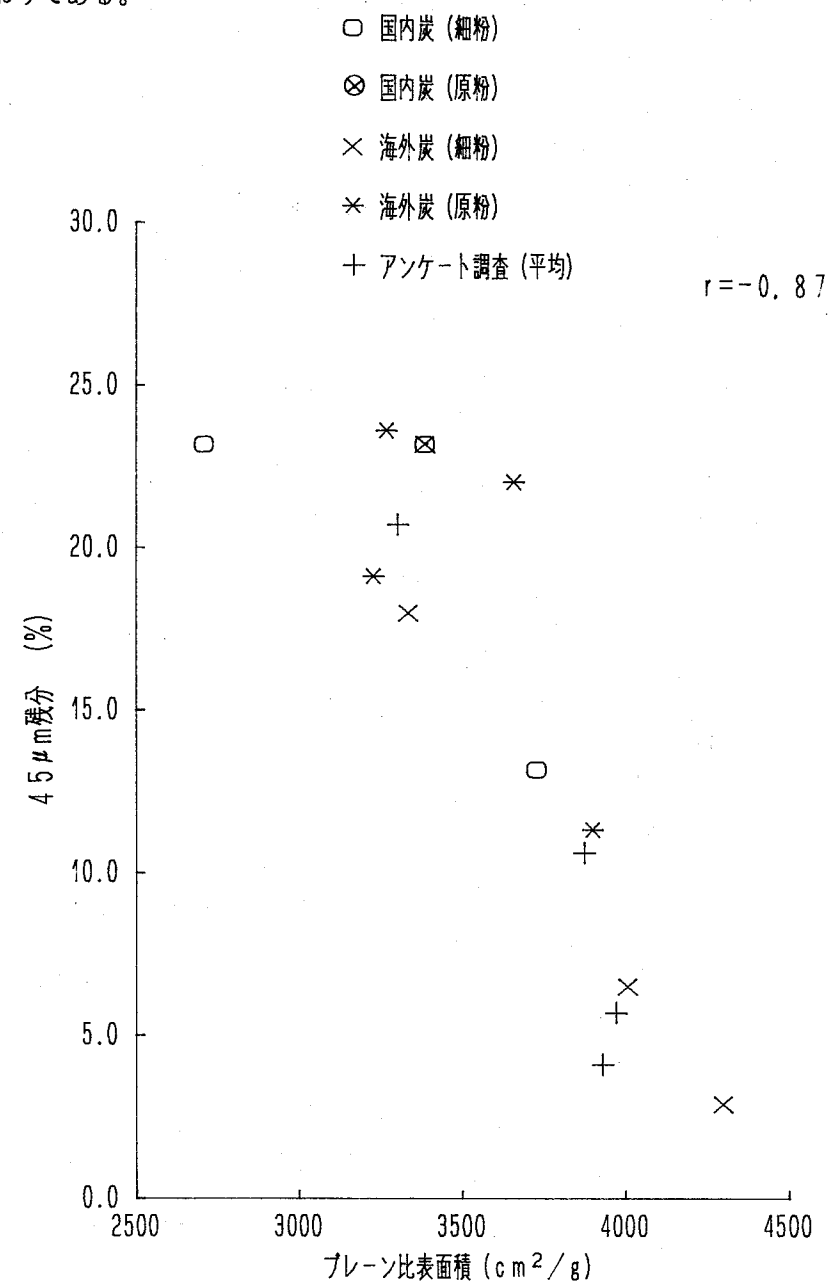


図-16 ブレーン比表面積と45 μ m残分との関係

すなわち、両者の関係は炭種あるいはフライアッシュの品種のいかに拘らず、よい相関性が認められる。

③ ブレーン比表面積と単位水量比との関係

フライアッシュのブレーン比表面積と単位水量比との関係は図-17に示すとおりである。

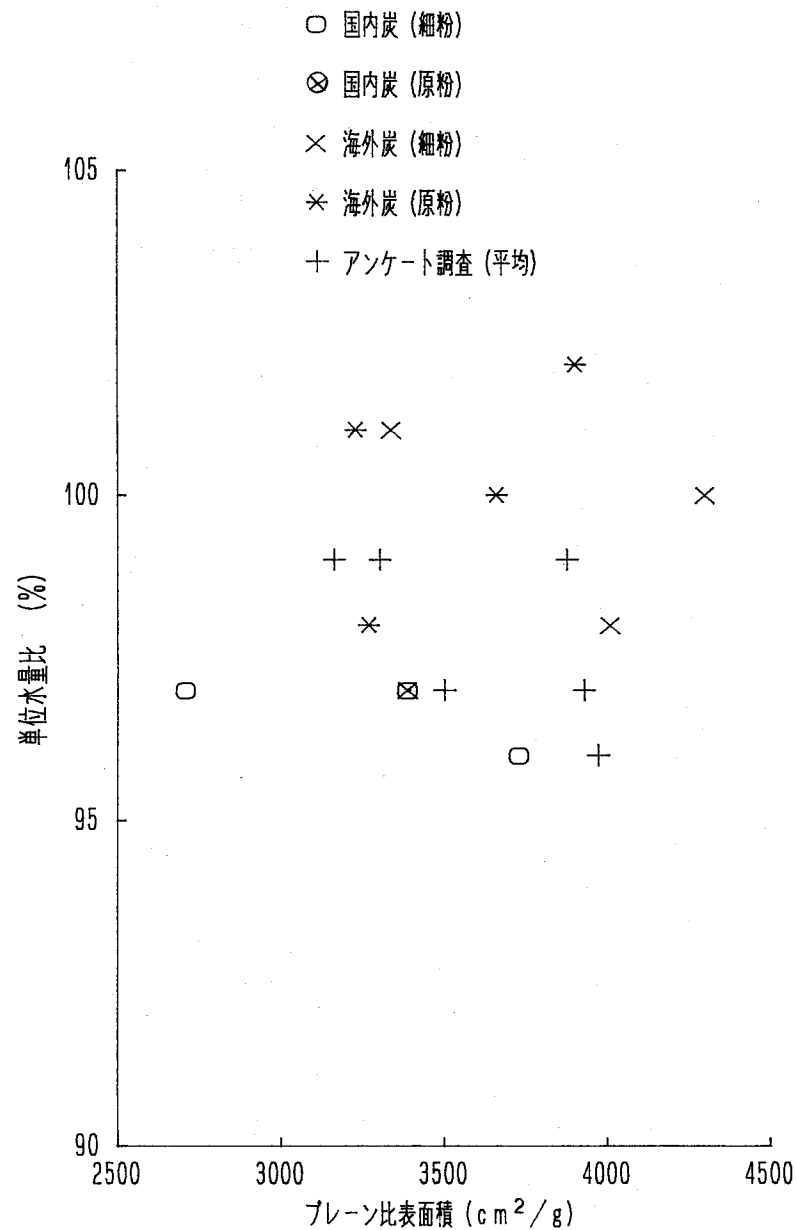


図-17 ブレーン比表面積と単位水量比との関係

すなわち両者の相関関係は認められず、炭種あるいはフライアッシュの品種についてもこのデータからは一定の傾向は認められない。

④ 45 μm 残分と単位水量比との関係

フライアッシュの45 μm 残分と単位水量比との関係は図-18に示すとおりである。

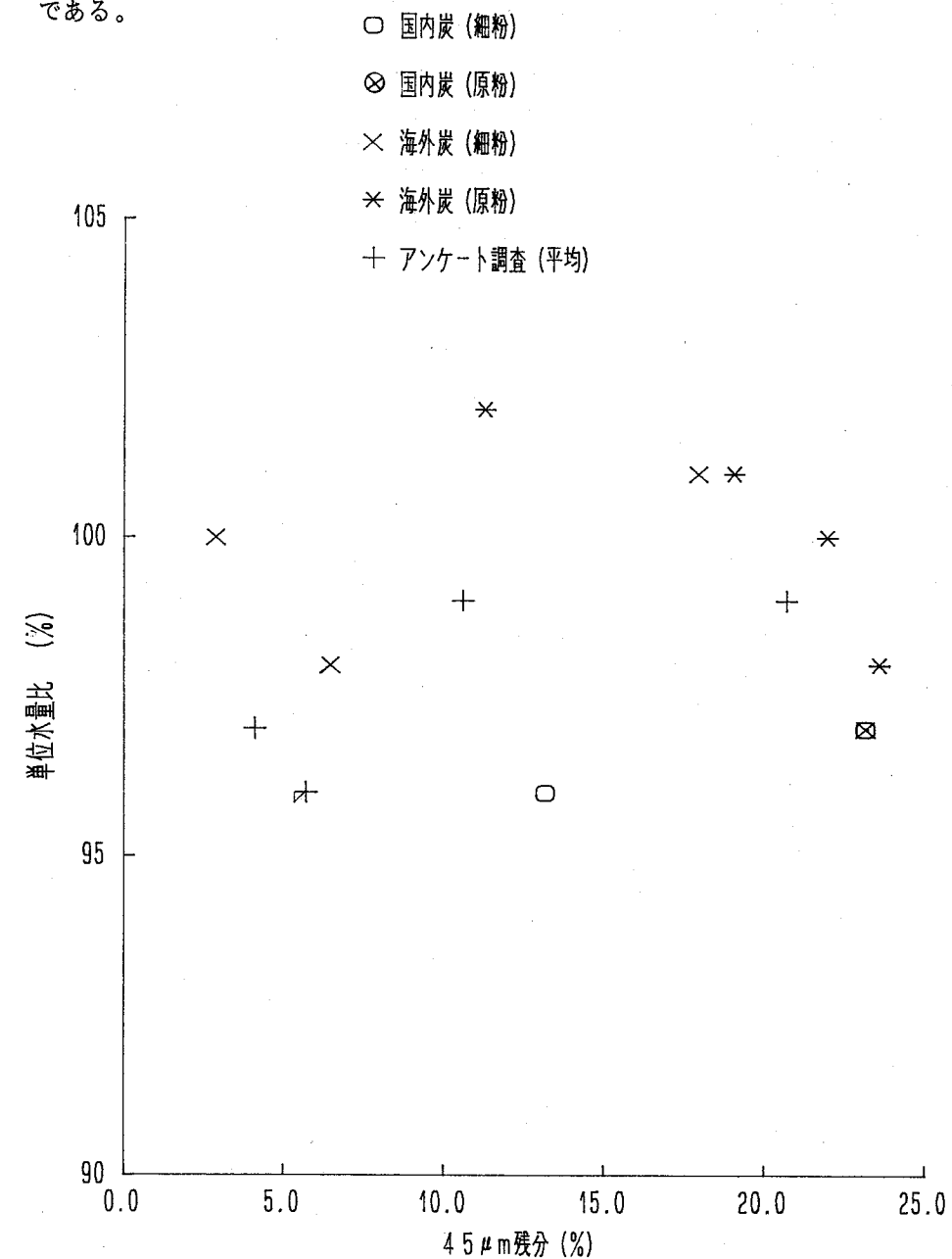


図-18 45 μm 残分と単位水量比との関係

すなわち両者の相関関係は認められず、炭種あるいはフライアッシュの品種についてもこのデータからは一定の傾向は認められない。

⑤ 二酸化けい素と圧縮強度比との関係

フライアッシュの二酸化けい素と圧縮強度比との関係は図-19～21示すとおりである。

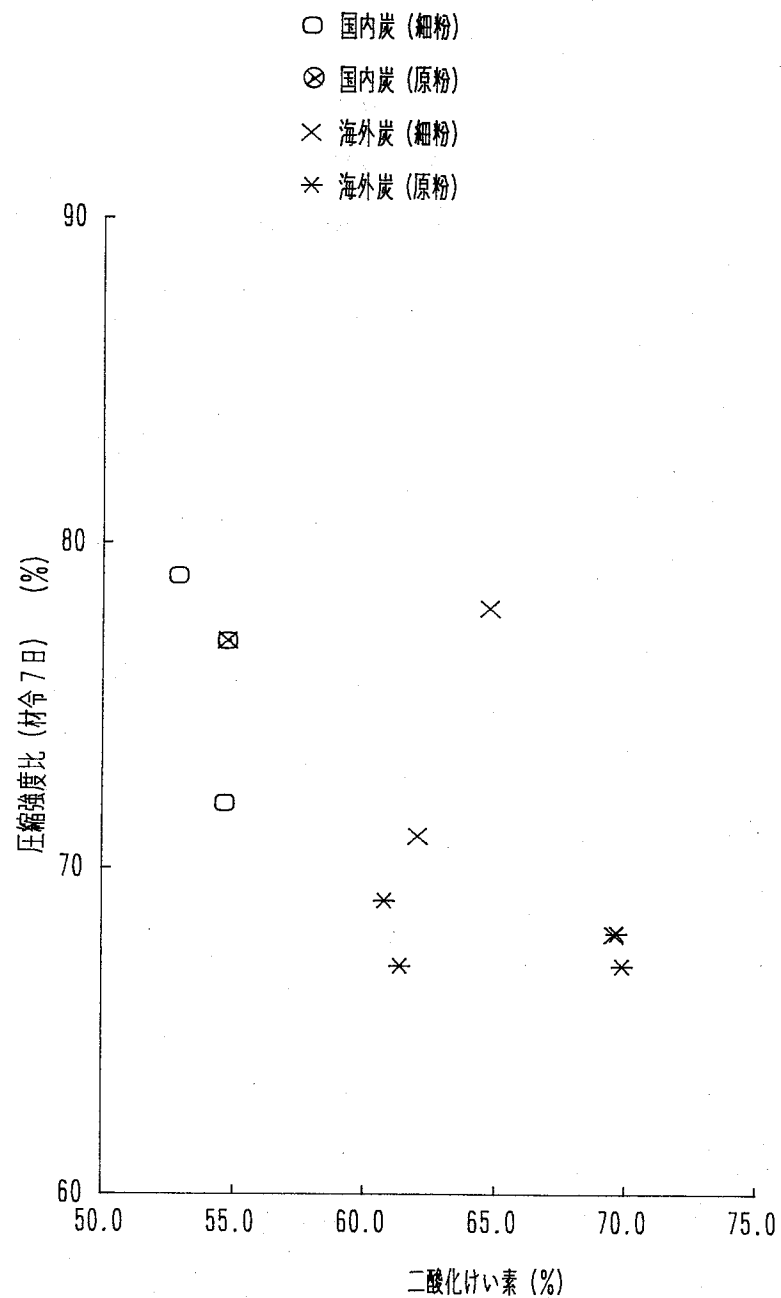


図-19 二酸化けい素と圧縮強度比 (7日) との関係

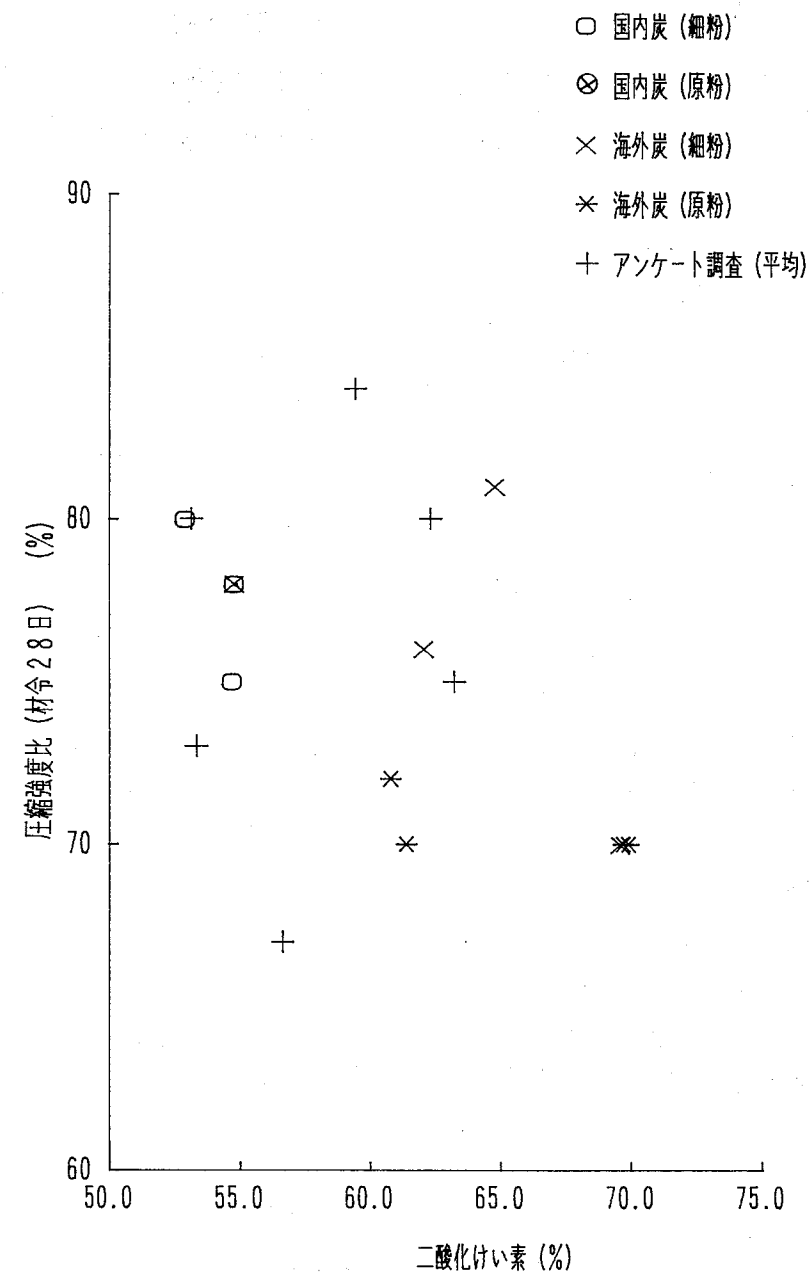


図-20 二酸化けい素と圧縮強度比 (28日) との関係

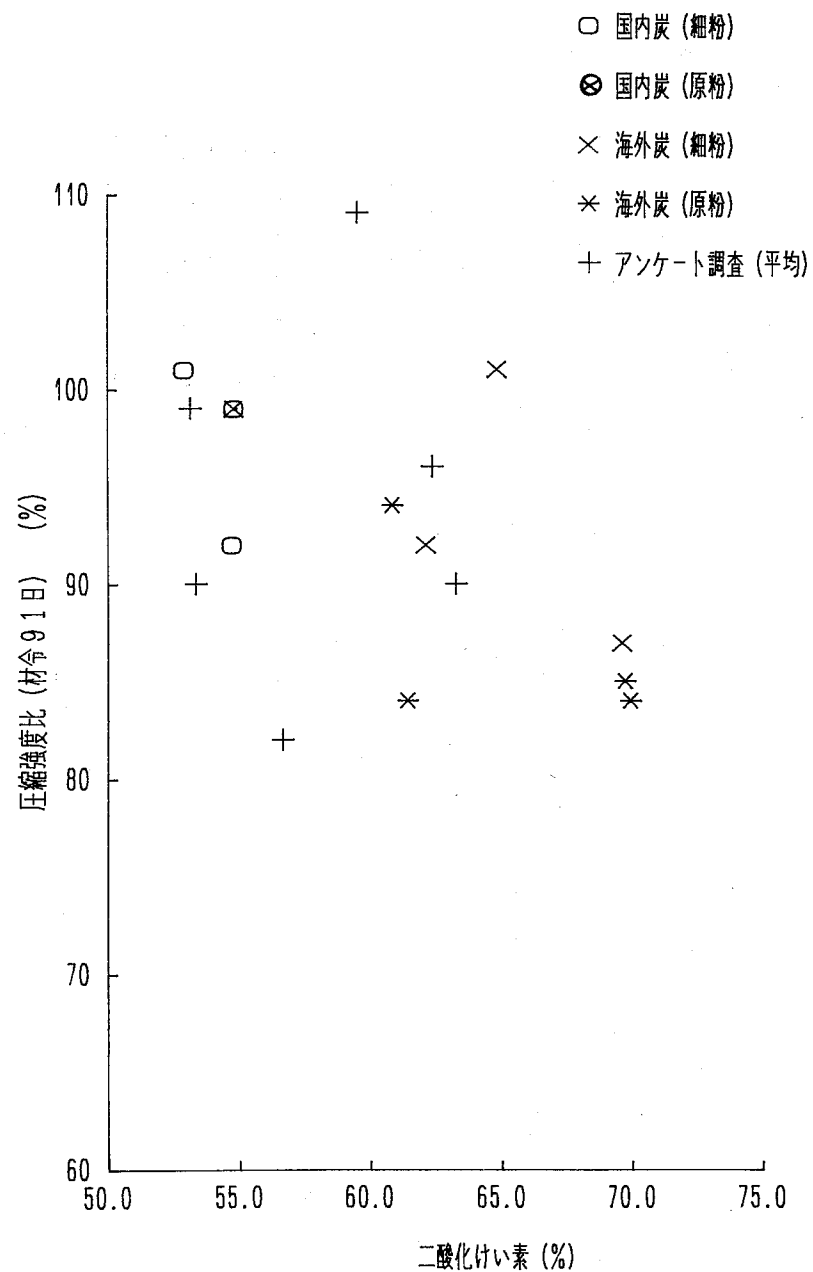


図-21 二酸化けい素と圧縮強度比 (91日) との関係

すなわち、フライアッシュの二酸化けい素含有量と、材令7日、28日および材令91日における圧縮強度比との相関性は認められない。

⑥ 比重と圧縮強度比との関係

フライアッシュの比重と圧縮強度比との関係は図-22～24に示すとおりである。

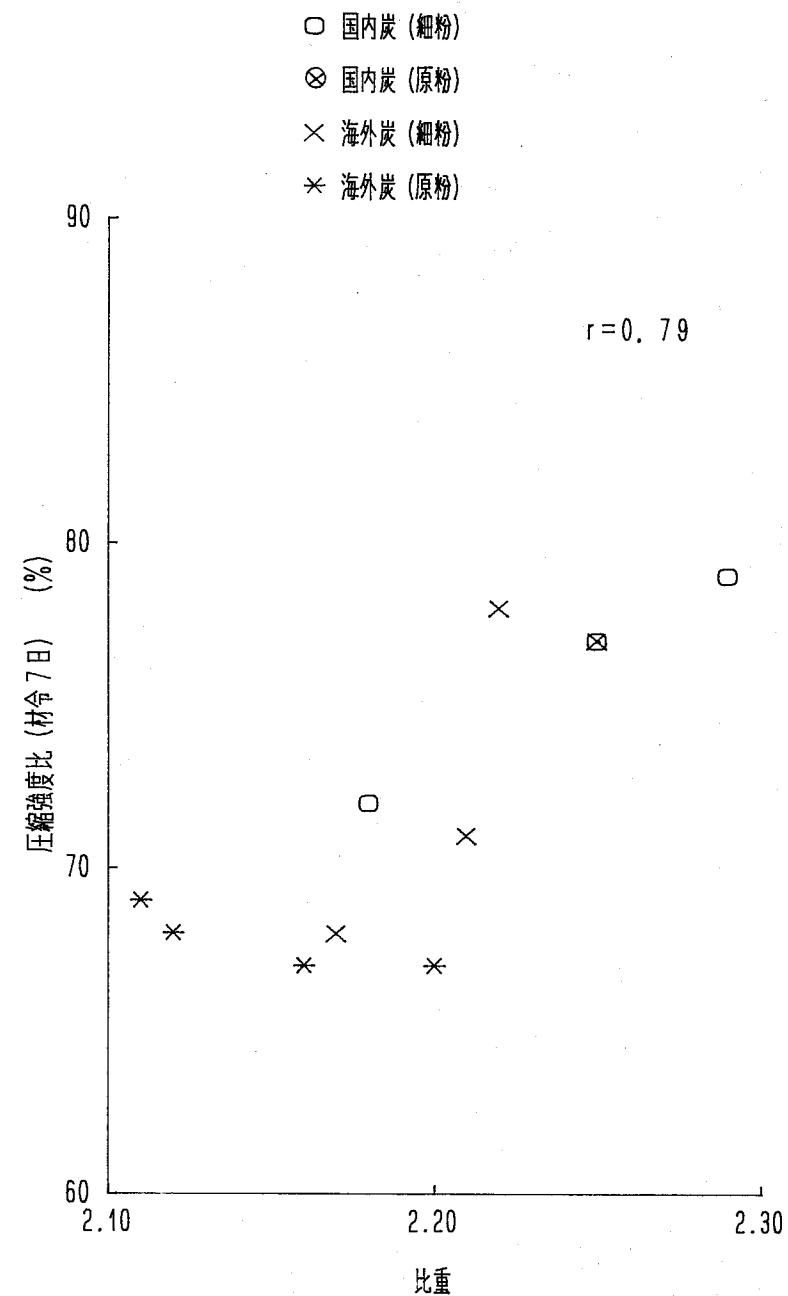


図-22 比重と圧縮強度比 (7日) との関係

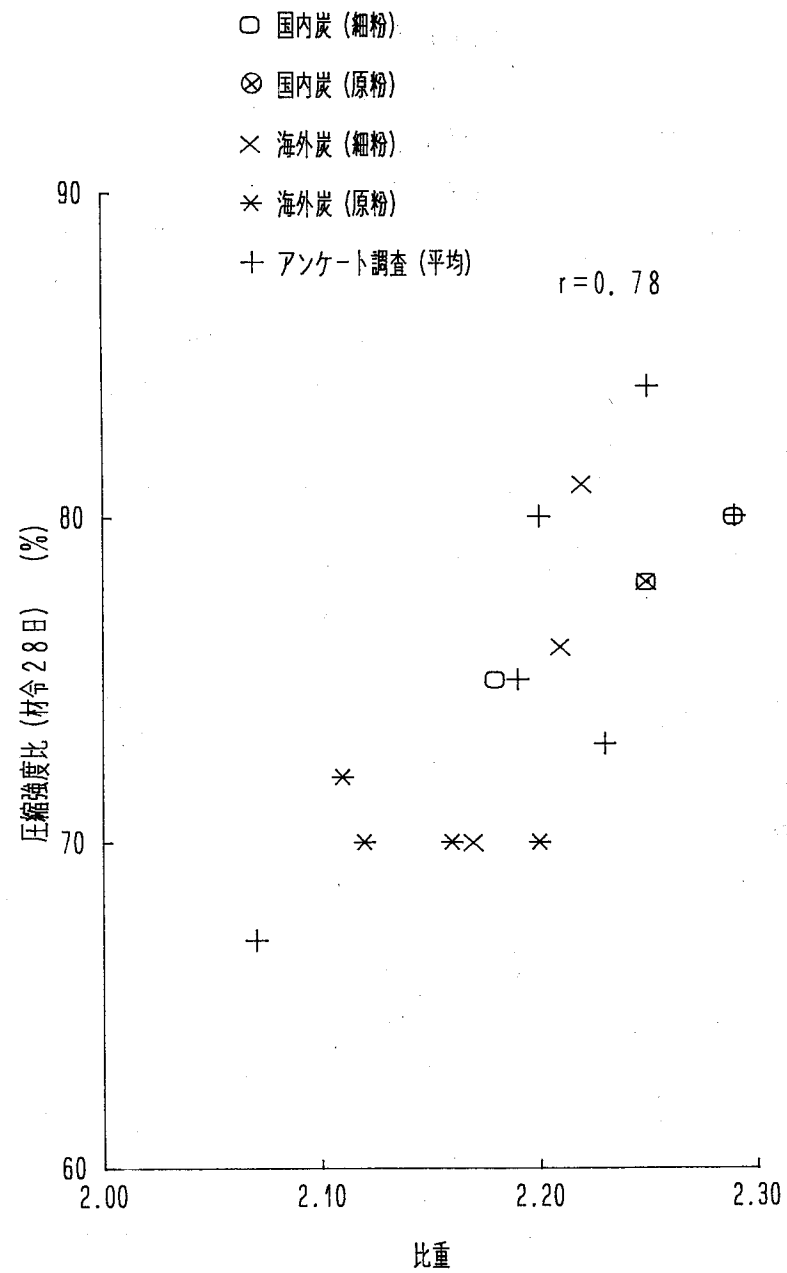


図-23 比重と圧縮強度比 (28日) との関係

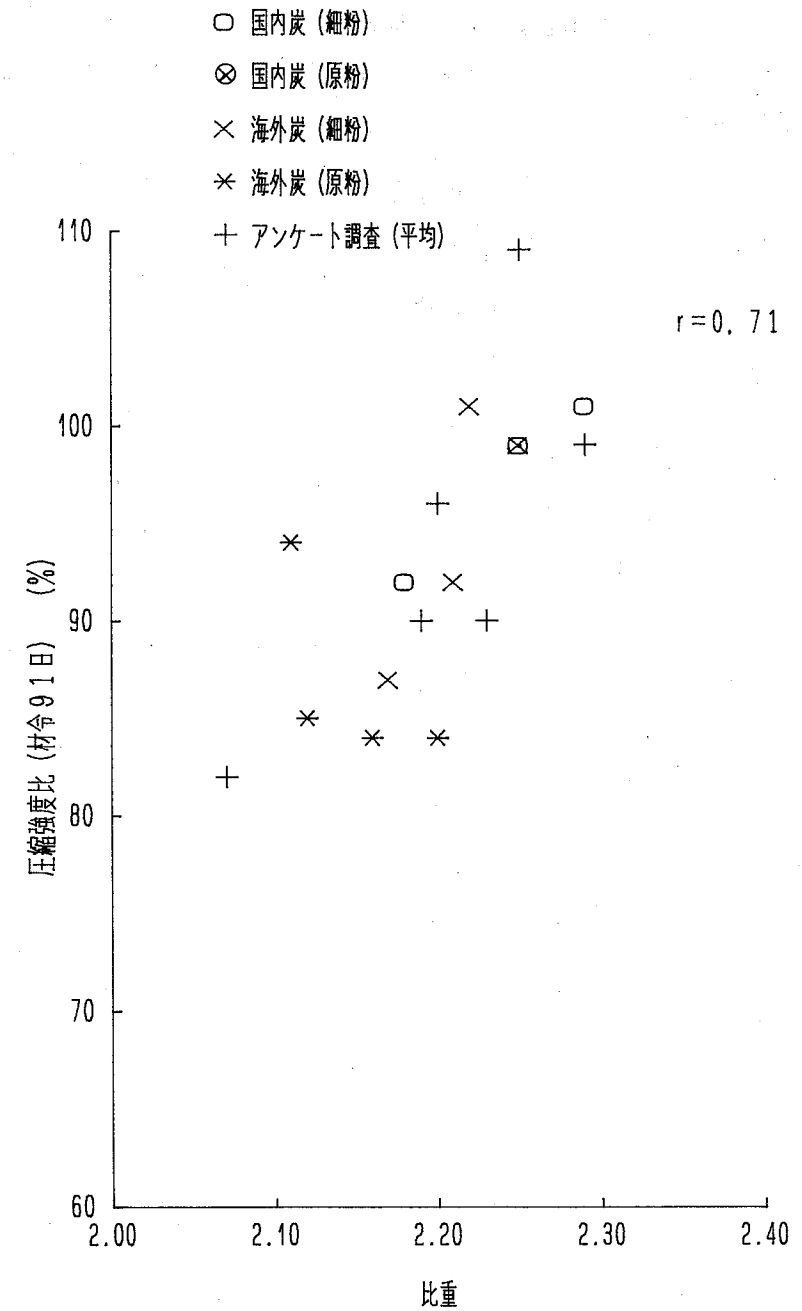


図-24 比重と圧縮強度比 (91日) との関係

すなわち、フライアッシュの比重と材令7日、28日および91日における圧縮強度比との相関性は若材令の方がやや大きい。

⑦ ブレーン比表面積と圧縮強度比との関係

フライアッシュのブレーン比表面積と圧縮強度比との関係は図-25～27に示すとおりである。

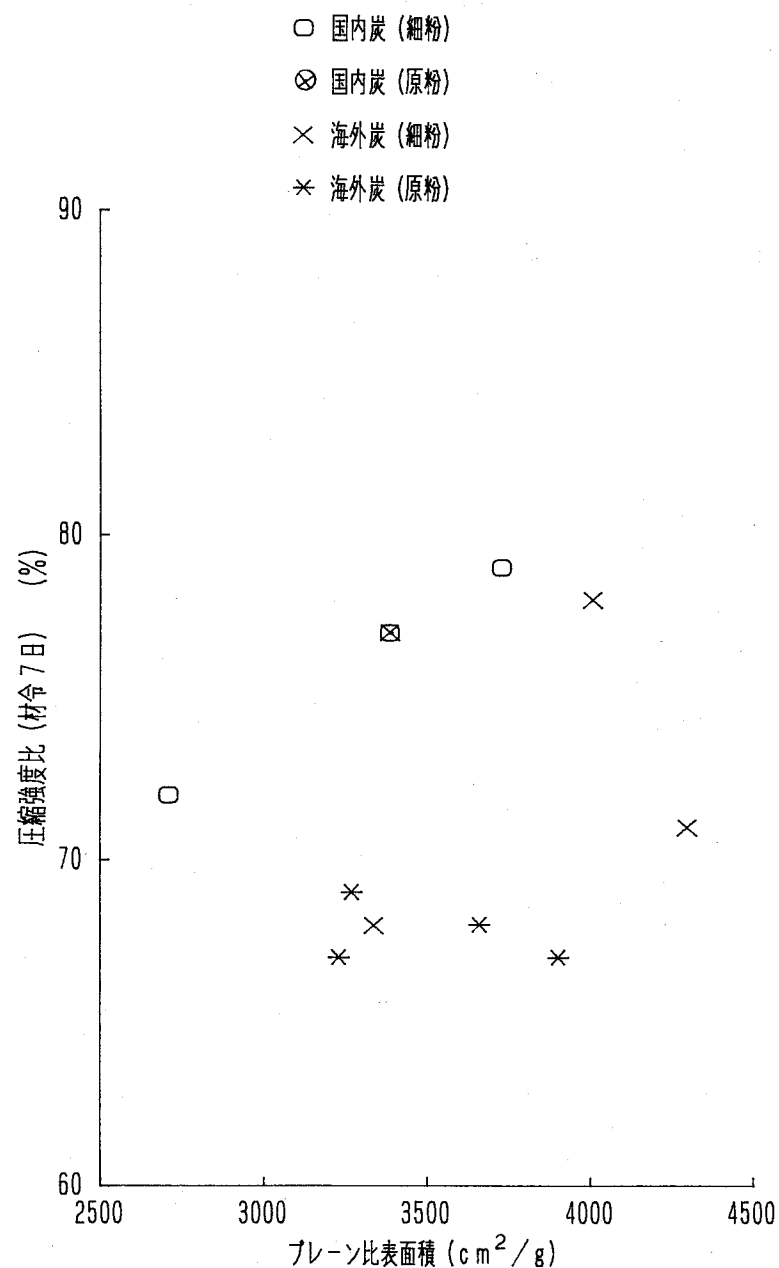


図-25 ブレーン比表面積と圧縮強度比 (7日) との関係

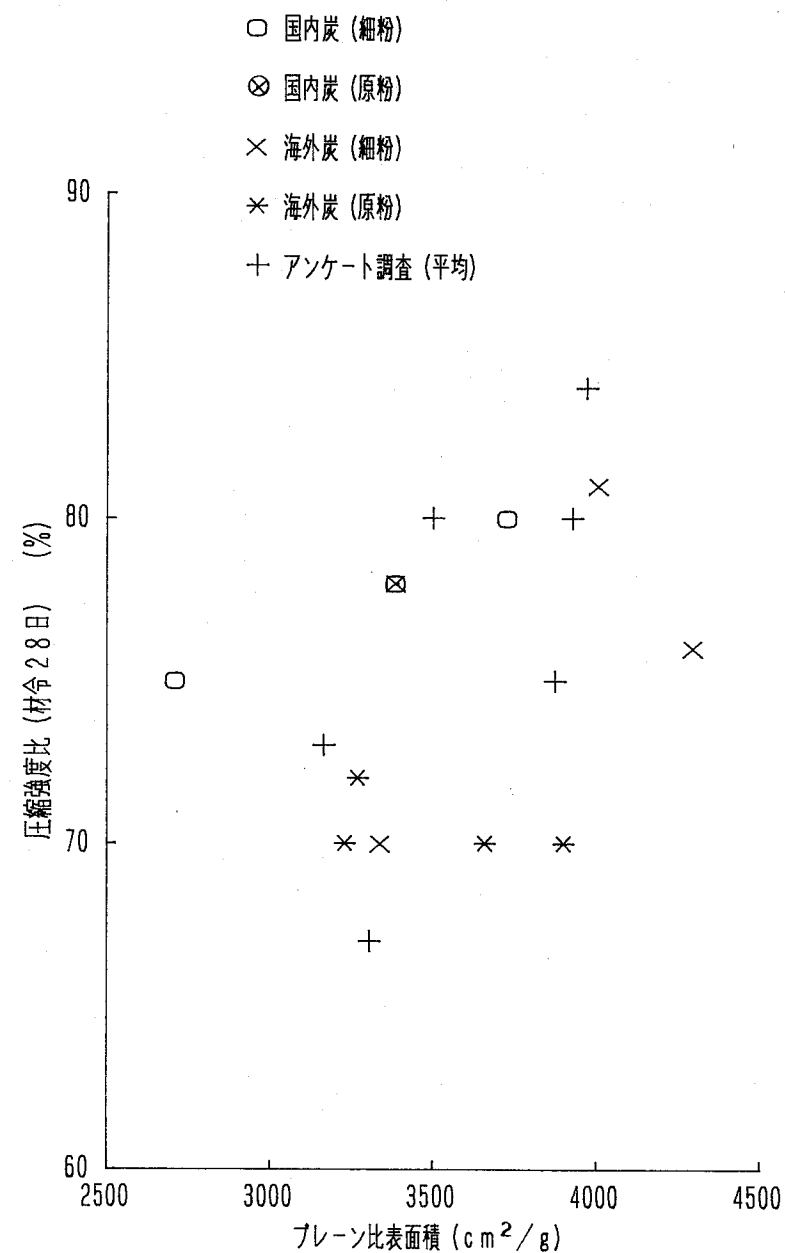


図-26 ブレーン比表面積と圧縮強度比 (28日) との関係

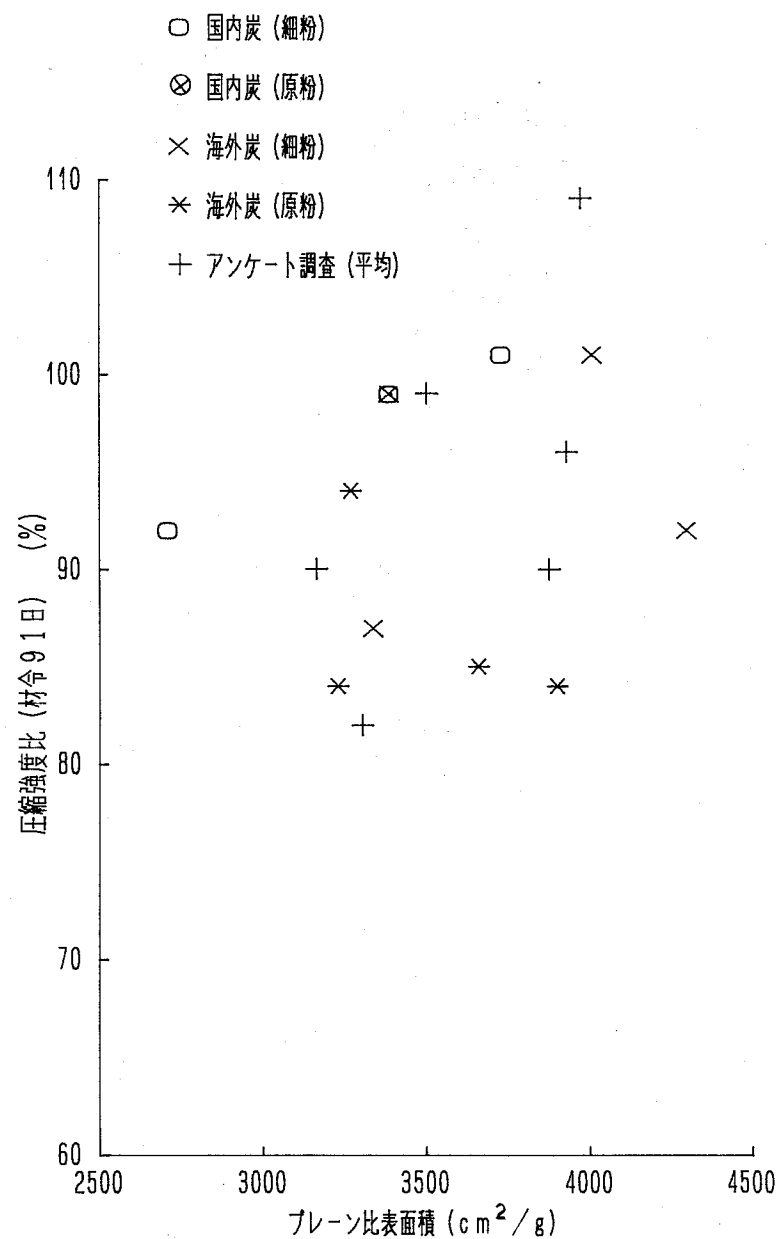


図-27 ブレン比表面積と圧縮強度比（91日）との関係

すなわち、フライアッシュのブレン比表面積と材令7日、28日および91日における圧縮強度比との相関性は認められない。

⑧ 45 μm残分と圧縮強度比との関係

フライアッシュの45 μm残分と圧縮強度比との関係は図-28～30に示すとおりである。

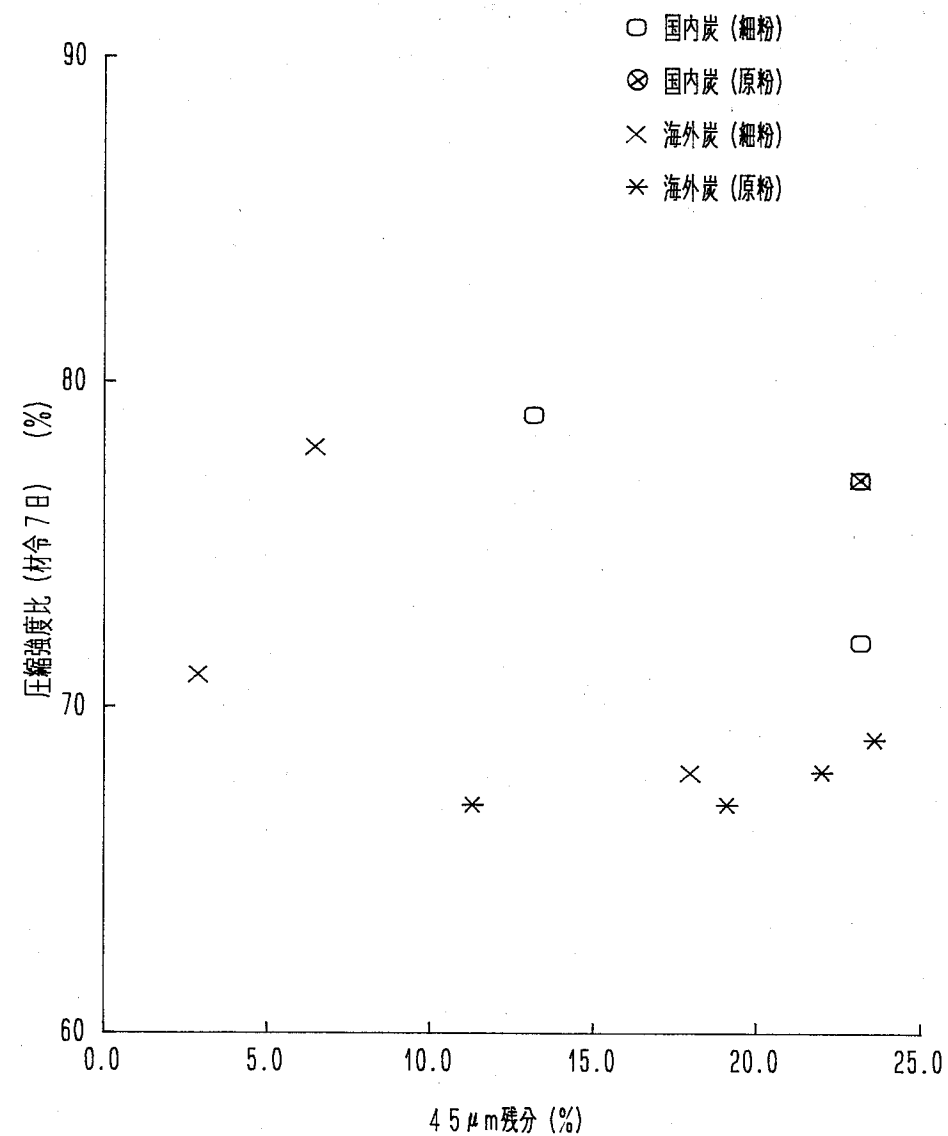


図-28 45 μm残分と圧縮強度比（7日）との関係

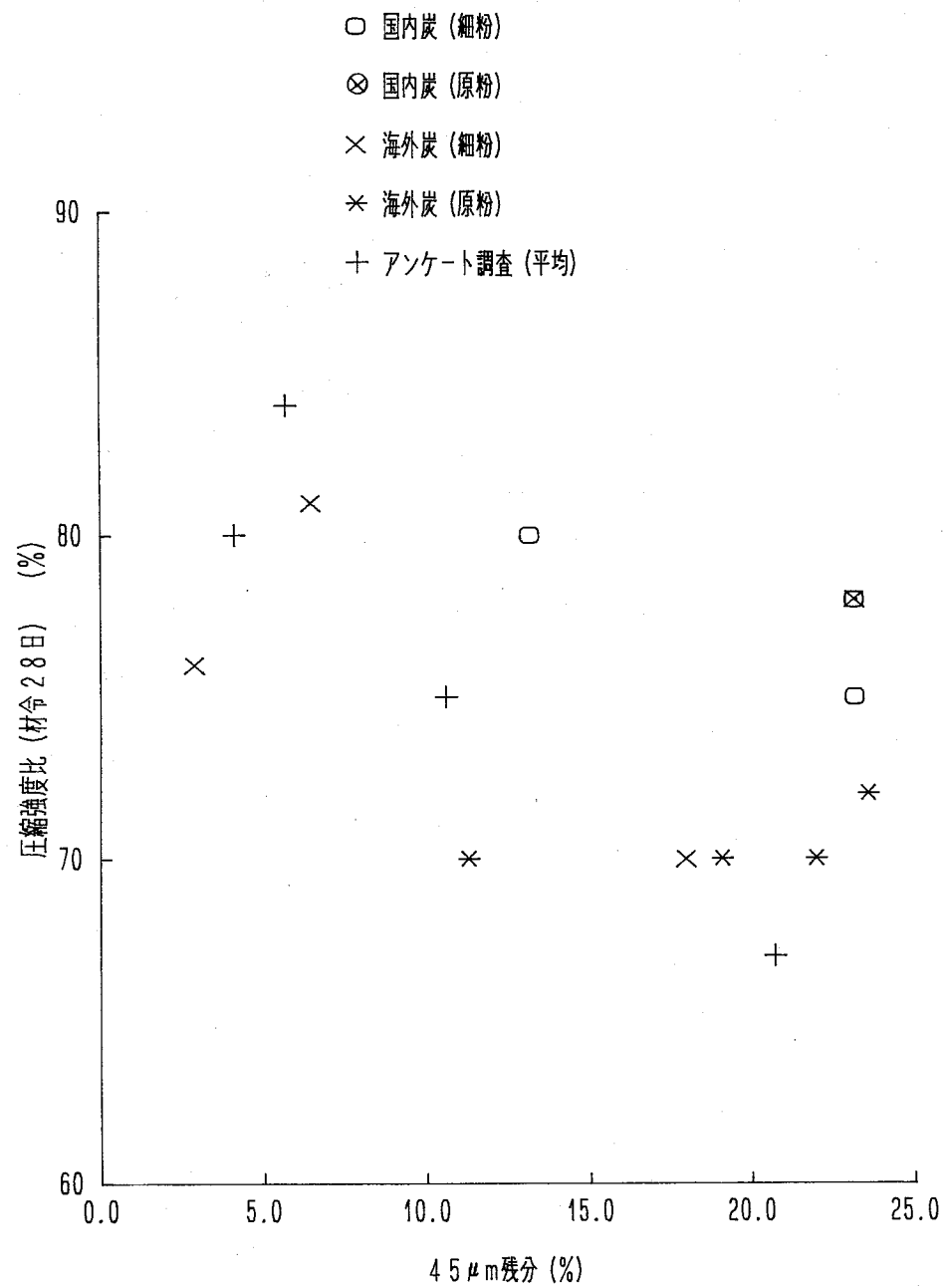


図-29 45 μm 残分と圧縮強度比 (28日) との関係

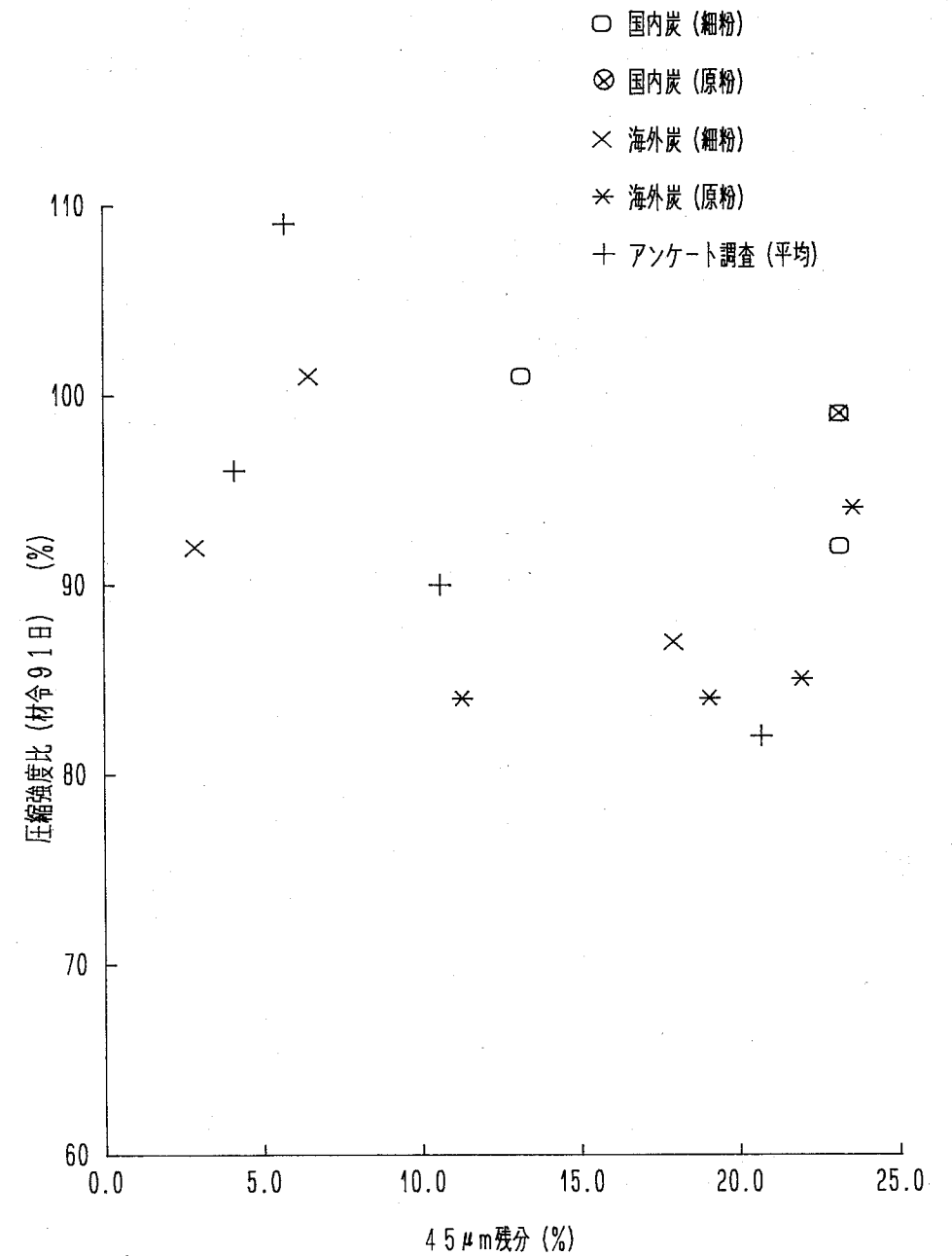


図-30 45 μm 残分と圧縮強度比 (91日) との関係

すなわち、フライアッシュの45 μm 残分と材令7日、28日および91日における圧縮強度比との相関性は認められない。

⑨ 単位水量比と圧縮強度比との関係

フライアッシュの単位水量比と圧縮強度比との関係は図-31～33に示すとおりである。

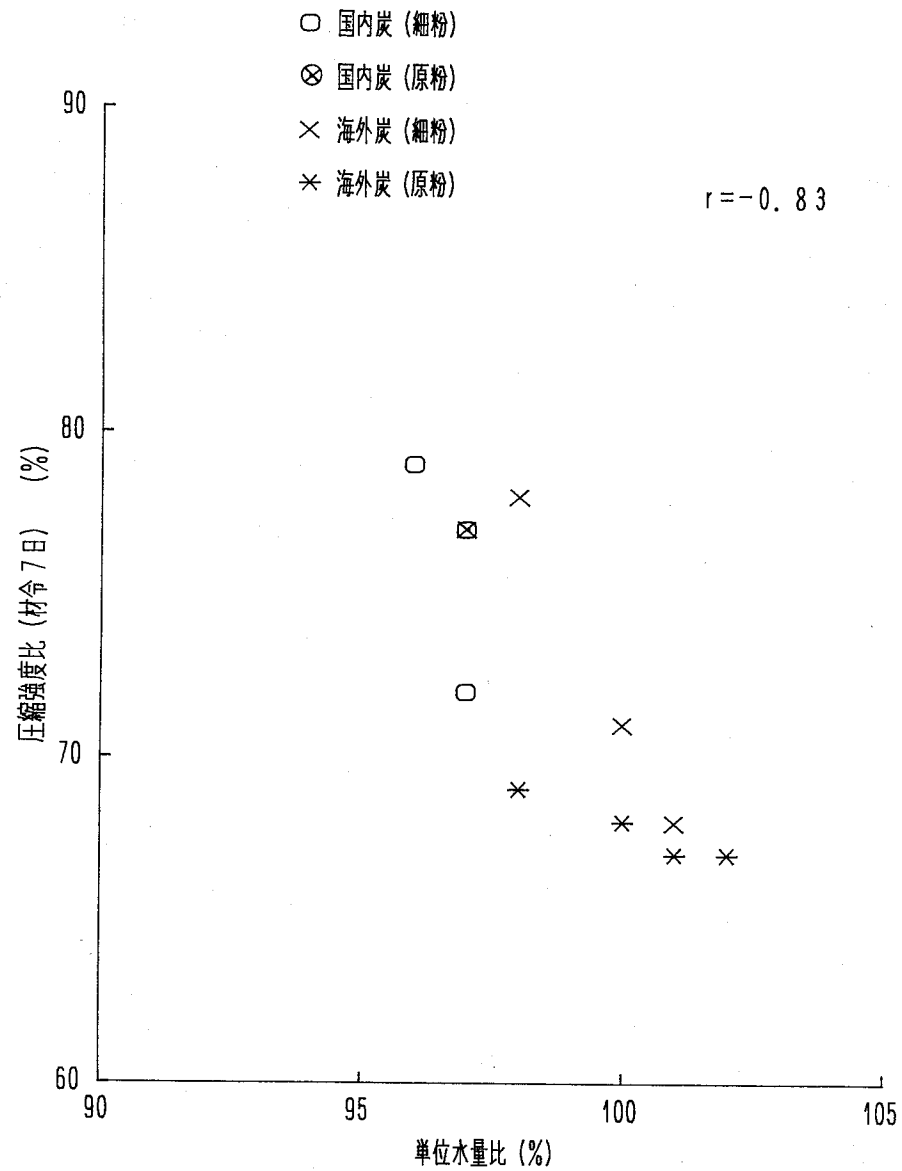


図-31 単位水量比と圧縮強度比 (7日) との関係

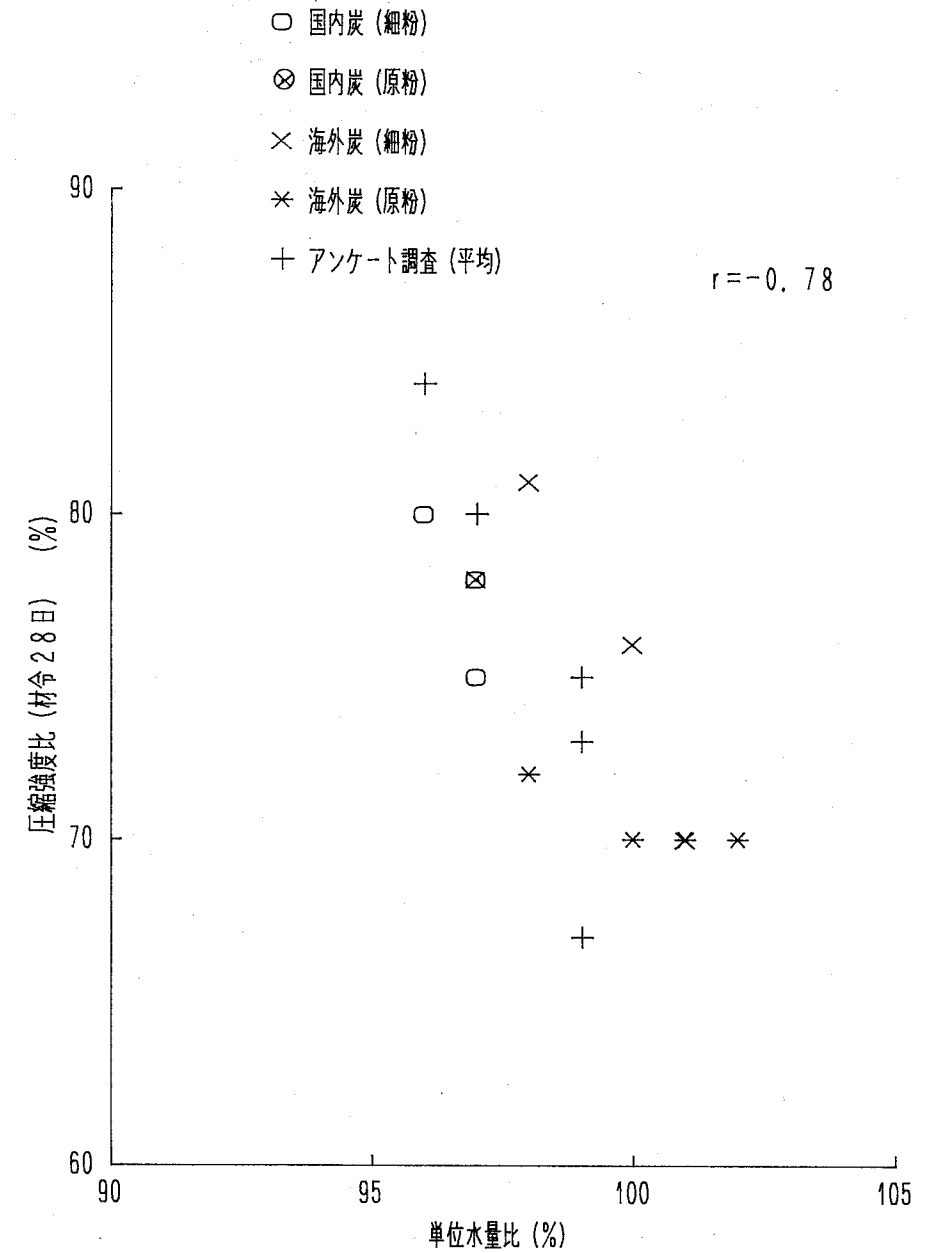


図-32 単位水量比と圧縮強度比 (28日) との関係

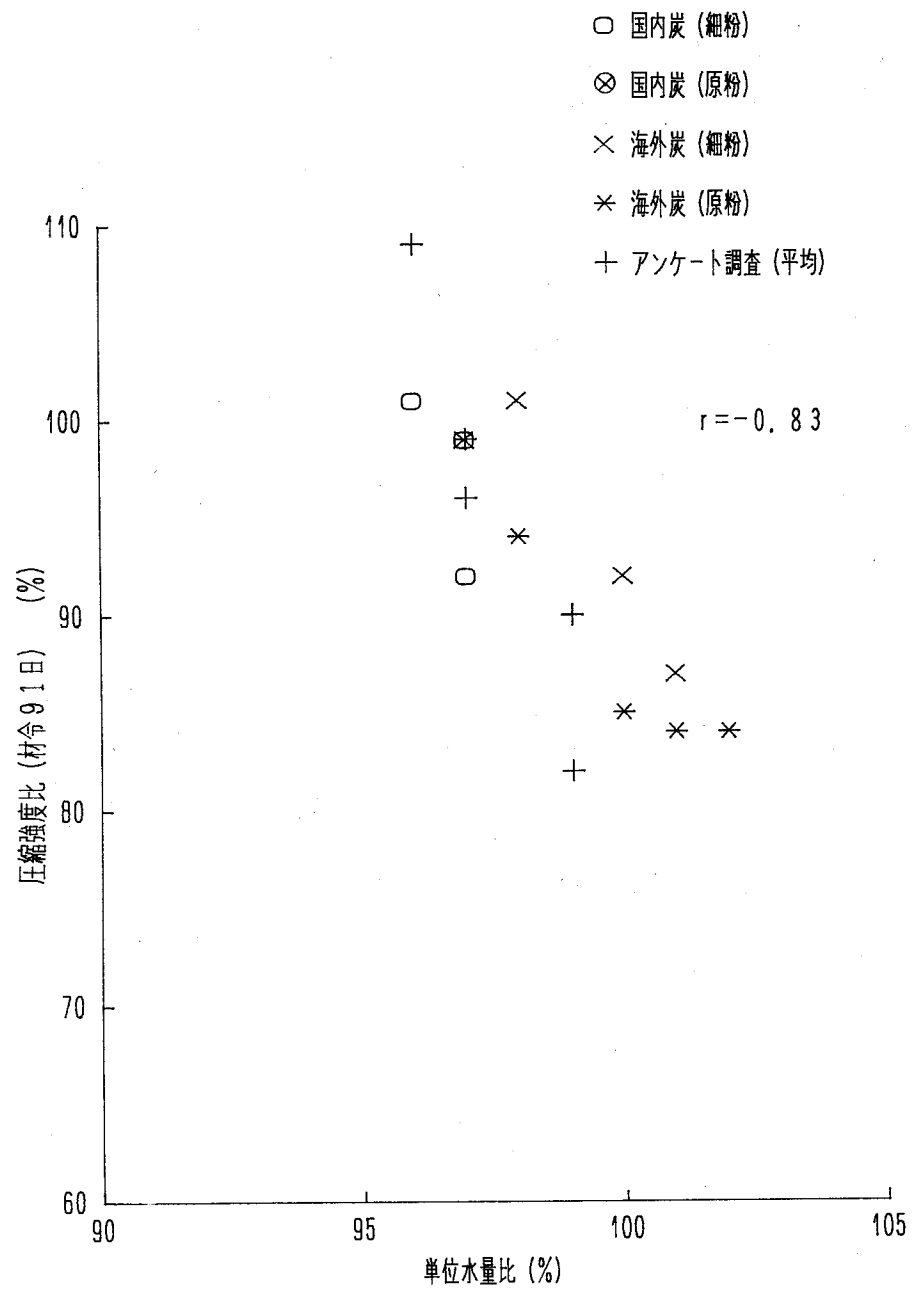


図-33 単位水量比と圧縮強度比 (91日) との関係

すなわち、フライアッシュの単位水量比と材令7日、28日および91日における圧縮強度比は相関性が認められる。

⑩ 材令7日、28日および91日における圧縮強度比の関係

フライアッシュの材令7日、28日および91日における圧縮強度比の関係は図-34~36に示すとおりである。

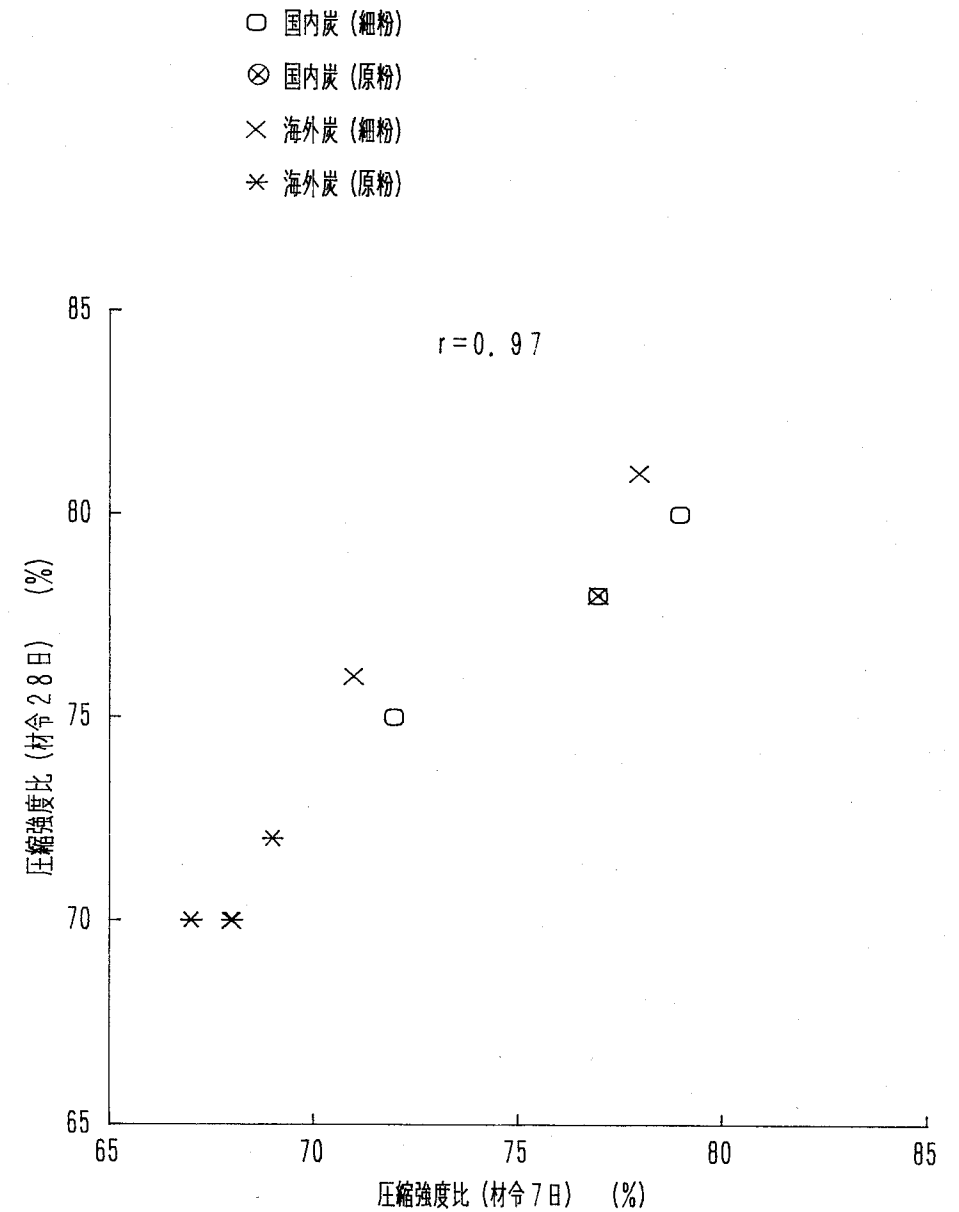


図-34 材令7日の圧縮強度比と材令28日の圧縮強度比との関係

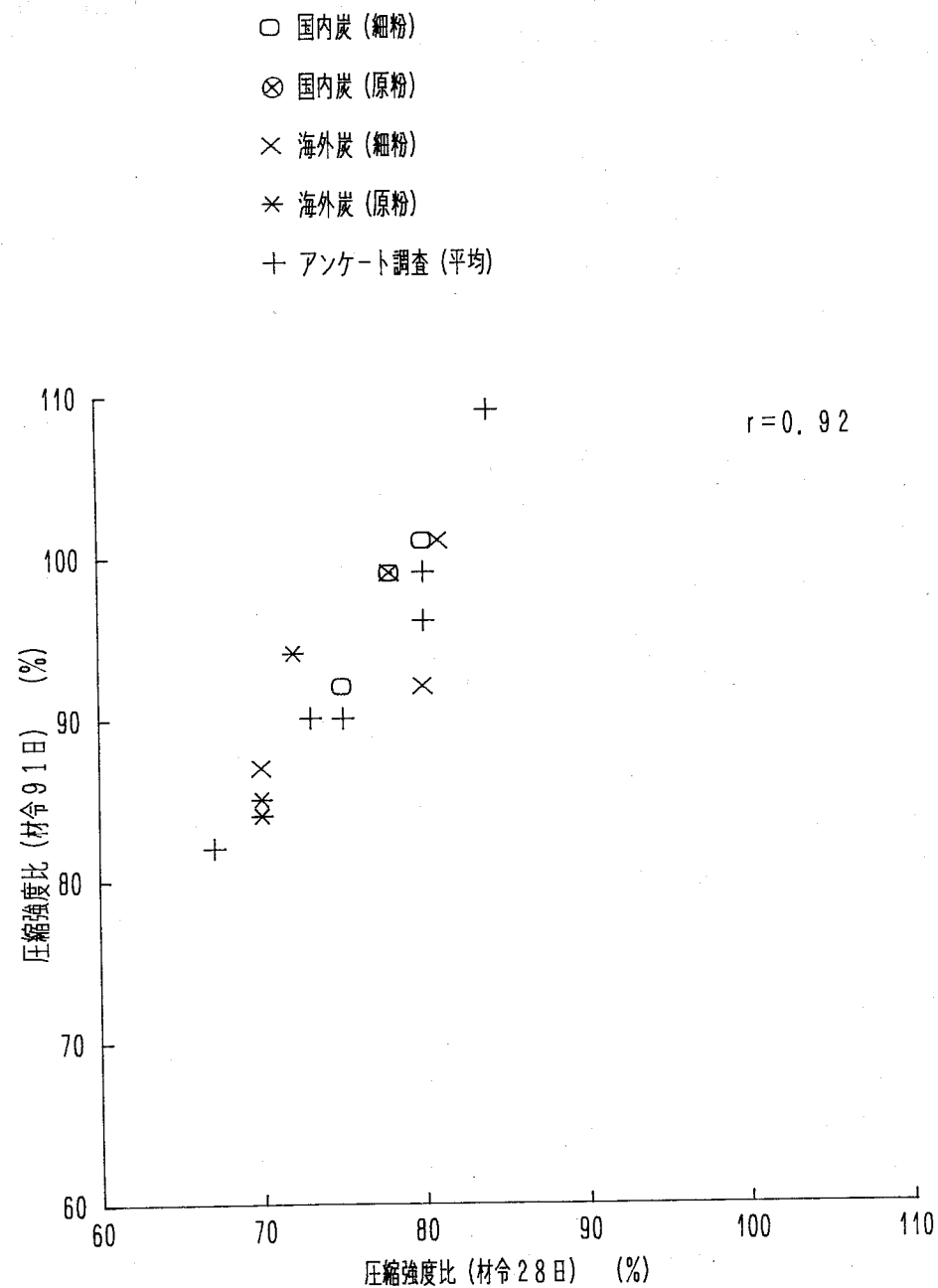


図-35 材令28日の圧縮強度比と材令91日の圧縮強度比との関係

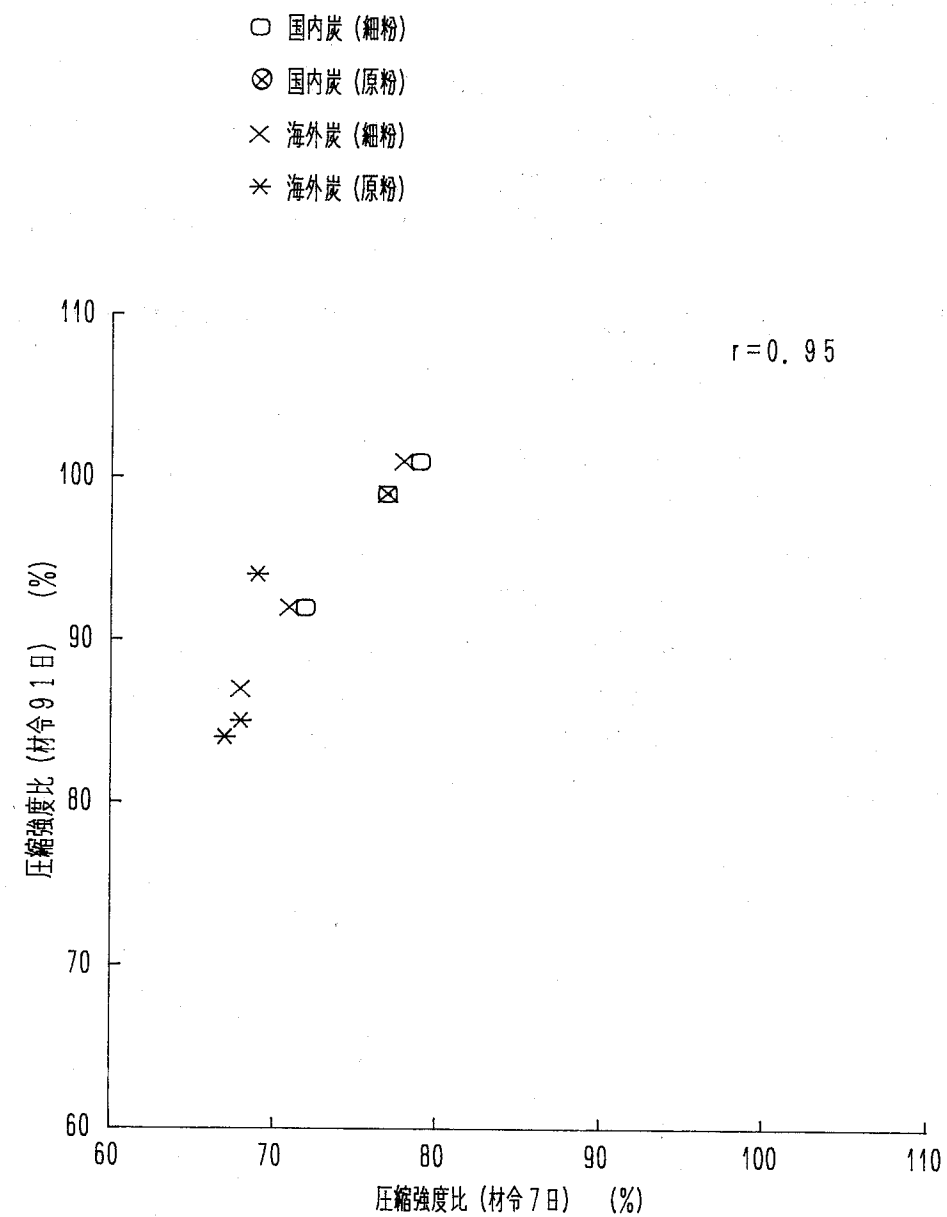


図-36 材令7日の圧縮強度比と材令91日の圧縮強度比との関係

すなわち両者の関係は、炭種あるいはフライアッシュの品種のいかに拘らず、ほぼ相関性が認められる。

(5) 試験結果のまとめ

以上を総括すると、次のことがいえる。

- ① 細粉も原粉も共に JIS A6201 に適合しているが、コンクリート混和材としての品質は細粉の方が優れているものと考えられる。ただし、その程度についてはコンクリート試験を行って確認する必要がある。
- ② ダム用として供給可能な主要発電所の細粉の品質はアンケート調査の結果とほぼ一致する。
- ③ フライアッシュの品質特性値のうち、統計的（危険率 5%）に相関性がみられるものは、次のとおりである。
 - a. 強熱減量と M.B. 吸着量との関係
 - b. ブレーン比表面積と 45 μm ふるい残分との関係
 - c. 比重と圧縮強度比との関係
 - d. 単位水量比と圧縮強度比との関係
 - e. 材令 7 日、28 日および 91 日における圧縮強度比の相互関係

なお本試験は限られた試料について検討したものであるが、更に粉末度については、他の試料を含め次節において詳細に検討する。

5. フライアッシュ利用上の留意事項

5.1 一般

わが国におけるダム建設は、今後 RCD 工法を採用するダムが増加する傾向にあり、これに伴いダム用コンクリートのフライアッシュの需要量も増加するものと考えられる。

一方、わが国におけるフライアッシュの生産は、この 10 年来、石油代替エネルギーとしての石炭火力発電所の増加により量的には増加しつつあるが、これらの石炭火力発電所における石炭はすべて海外炭が利用されており、フライアッシュの品質も、従来の国内炭火力発電所から生産されるものと、やや異なることが認められる。

そこで、以下には、これらの検討結果を踏まえ、ダム用コンクリートにフライアッシュを利用する際の留意点について述べる。

5.2 品質

5.2.1 化学成分

JIS A6201 では、次の 3 項目について規定しているが、特に変更の必要はないものとする。

二酸化けい素	:	45%以上
湿分	:	1%以下
強熱減量	:	5%以下

5.2.2 物理的試験

JIS A6201 では次の 4 項目が規定されている。

比重	:	1.95以上
粉末度	ブレーン比表面積	: 2400 cm^2/g 以上
単位水量比	:	102%以下
圧縮強度比	28日	: 60%以上
	91日	: 70%以上

これらの項目および規定値は、主として国内炭フライアッシュを対象にして定められたものであるが、今後ますます海外炭フライアッシュが増加するものと考えられるので、次の項目について留意する必要がある。

(1) 粉末度

ブレーン比表面積による粉末度の測定は、従来、セメントに適用されていたものであり、フライアッシュはこれを流用したものである。これは、測定方法が比較的簡単でありセメントの実績などから慣用されていることが大きな理由と考えられる。しかし、その原理（空気透過法）から考えると、セメント粒子のように粒径の大小に拘らず、粒子形状が定形の場合は、十分適用可能と考えられるが、フライアッ

ユのように粒径の大小により、粒子形状が異なる場合には、必ずしも適当な測定方法とはいえない。特に海外炭フライアッシュのように溶融点が高い場合には粒子形状は不規則となり易いので、ブレン方法による比表面積の測定が適切であるとは考えられない。ちなみに海外の主要国では表-16に示すようにフライアッシュの粉末度は45μmふるい残分が採用されている。

そこで、フライアッシュの粉末度を表す方法としてブレン方法による比表面積と45μmふるい残分の何れが適当であるかを検討するため、下記の5資料を用いて統計的解析を行った。

- A：フライアッシュによるASR抑制に関する共同研究報告書（土木研究所資料 第2653号 昭和63年3月）
- B：石炭灰の有効利用に関する研究（(財)石炭技術研究所 昭和60年3月）
- C：フライアッシュ品質試験報告書（(財)国土開発技術研究センター 平成2年6月）
- D：石炭灰の有効利用に関する研究（(財)石炭技術研究所 昭和58年3月）
- E：日本フライアッシュ協会資料（1989年10月）

これらの資料はケース毎に試験目的が異なり、それぞれの目的に合うように採取したサンプルのデータであり、一部にJIS規格に適合しないものも含まれているが、これらの資料から海外炭フライアッシュの試験結果だけを抜粋して整理した。その結果は表-17および図-37～41に示すように、個々のデータでは必ずしもそうではないが、5つのデータをプールして全体的にみると、ブレン方法による比表面積よりも45μmふるい残分の方がモルタルの単位水量比および圧縮強度比との相関性が優れていることが判る。

従って、フライアッシュの粉末度を評価する方法としてはブレン方法による比表面積だけでなく、45μmふるい残分についても併用する必要があるものと考えられる。今回の一連の検討で使用したフライアッシュの45μmふるい残分は、最大で30%程度であり、これ以下では単位水量比や圧縮強度比の面からみても、JIS規格を充分満足し、特に大きな品質上の問題はないと考えられるので、25～30%以下をおおよその目安とすることが考えられる。なお、45μmふるい残分とコンクリートの品質に関しては、今後更にデータを蓄積し、検討を行うことが望まれる。

(注) JIS A6201-1977が制定されるまでは45μmふるい残分の測定を行っていたが、当時はふるいそのものを輸入する必要があった。しかし、現在は国産品で信頼できるものが市販されている。

表-16 各国フライアッシュ規格一覧表

国名		アメリカ		イギリス		オーストラリア	日本
(制定年)	規格番号	ASTM C-618(1989)		BS 3892		AS 1138 (1971)	JIS A6201 (1977)
		CLASS F	CLASS C	PART1 (1982)	Grade A Grade B		
化 学 成 分	湿 分 (%)	3.0 以下	3.0 以下	0.5 以下	0.5 以下	1.5 以下	1 以下
	強熱減量 (%)	6.0 以下	6.0 以下	7.0 以下	12.0 以下	8.0 以下	5 以下
	SiO ₂ (%)	—	—	—	—	—	45 以上
	MgO (%)	—	—	4.0 以下	4.0 以下	—	—
	SO ₃ (%)	5.0 以下	5.0 以下	2.5 以下	2.5 以下	2.5 以下	—
物 理 的 性 質	SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ (%)	70 以上	50 以上	—	—	—	—
	有効7mm以下 (asNa ₂ O) (%)	4) 1.5 以下	4) 1.5 以下	—	—	—	—
	粉 7mm以下比表面積 (cm ² /g)	—	—	—	—	—	2400 以上
	末 150μm以下残分 (%)	—	—	—	—	10.0 以下	—
	度 45μm以下残分 (%)	34 以下	34 以下	12.5 以下	30~60	50.0 以下	—
物 理 的 性 質	毛 5) 28日強度比 (%)	75 以上	75 以上	—	—	—	60 以上
	丸 5) 91日強度比 (%)	—	—	—	—	—	70 以上
	7日強度(石灰A-Ⅱ) (psi)	800 以上	—	—	—	—	—
	安定性(オートクレーブ膨張法) (%)	0.8 以下	0.8 以下	—	—	—	—
	乾燥収縮増加度 (%)	4) 0.03 以下	4) 0.03 以下	—	—	—	—
	比 重	—	—	—	—	—	—
	5) 単位水量比	105 以下	105 以下	95 以下	—	—	1.95 以上
	7mm以下反応性(モルタル法14日) (%)	4) 0.02 以下	4) 0.02 以下	—	—	—	102 以下
	粉 7mm以下比表面積 (cm ² /g)	—	—	—	—	—	—
	末 150μm以下残分 (%)	—	—	—	—	—	±450 以下
均 度 45μm以下残分 (%)	±5 以下	±5 以下	—	—	±2.0 以下	—	
比 重	±5 以下	±5 以下	—	—	±5.0 以下	—	
性 単位水量比 (%)	—	—	—	—	—	±5 以下	

1) ASTM C618のClass Fは、無煙炭またはは歴青炭の燃焼灰である。
2) BS3892 Part2は通常のコンクリートに用いる場合、Part2は他のコンクリートに用いる場合に適用される。
3) BS3892 Part2のGrade Aは無煙炭の燃焼灰であり、特に要求があったときに適用される。
4) ASTM C618のうち、本項目は補足的任意選択規格であり、特に要求があったときに適用される。
5) 圧縮強度比および単位水量比に用いる配合は次のとおりである。

対照モルタル配合		試験モルタル配合	
セメント	標準砂	セメント	標準砂
ASTM 500g	1375g	400g	100g
BS 450g	1350g	315g	135g
JIS 520g	1040g	390g	130g

表-17 フライアッシュ特性値間相互の相関係数一覧表

出典	Y軸		44 μ m 7 μ I残分	単位 水量比	圧縮強度 比 28日	圧縮強度 比 91日
A	ブレン 比表面積	データ数	6	6	6	6
		相関係数	-0.6671	0.5782	-0.1121	0.1505
	44 μ m 7 μ I残分	データ数		6	6	6
		相関係数		0.0527	-0.6042	-0.7431
B	ブレン 比表面積	データ数	23	23	23	23
		相関係数	0.5348	0.4125	0.1330	0.0653
	44 μ m 7 μ I残分	データ数		23	23	23
		相関係数		0.2993	0.5516	0.5274
C	ブレン 比表面積	データ数	7	7	7	7
		相関係数	0.8928	-0.0501	0.6285	0.3592
	44 μ m 7 μ I残分	データ数		7	7	7
		相関係数		-0.0068	-0.7082	-0.4263
D	ブレン 比表面積	データ数	8	8	8	8
		相関係数	-0.5095	0.7019	-0.2520	-0.3536
	44 μ m 7 μ I残分	データ数		8	8	8
		相関係数		0.2417	-0.2705	-0.2092
E	ブレン 比表面積	データ数	—	10	10	10
		相関係数	—	0.2519	0.3013	-0.5297
	44 μ m 7 μ I残分	データ数		—	—	—
		相関係数		—	—	—
全 体	ブレン 比表面積	データ数	44	54	54	54
		相関係数	0.6437	0.1318	0.3423	0.1371
	44 μ m 7 μ I残分	データ数		44	44	44
		相関係数		0.3651	0.7378	0.6634

注1) 出典欄の記号は以下の資料を示す。

- A: 土木研究所資料 (第2653号)
- B: 石炭技術研究所資料 (昭和58~59年度)
- C: 国土開発技術研究センター資料 (平成元年度)
- D: 石炭技術研究所資料 (昭和57年度)
- E: 日本フライアッシュ協会資料 (1989年10月)

注2) 相関係数に網掛けを施しているものは、統計的検定 (t検定: 危険率5%) により相関がないとはいえないものを示す。

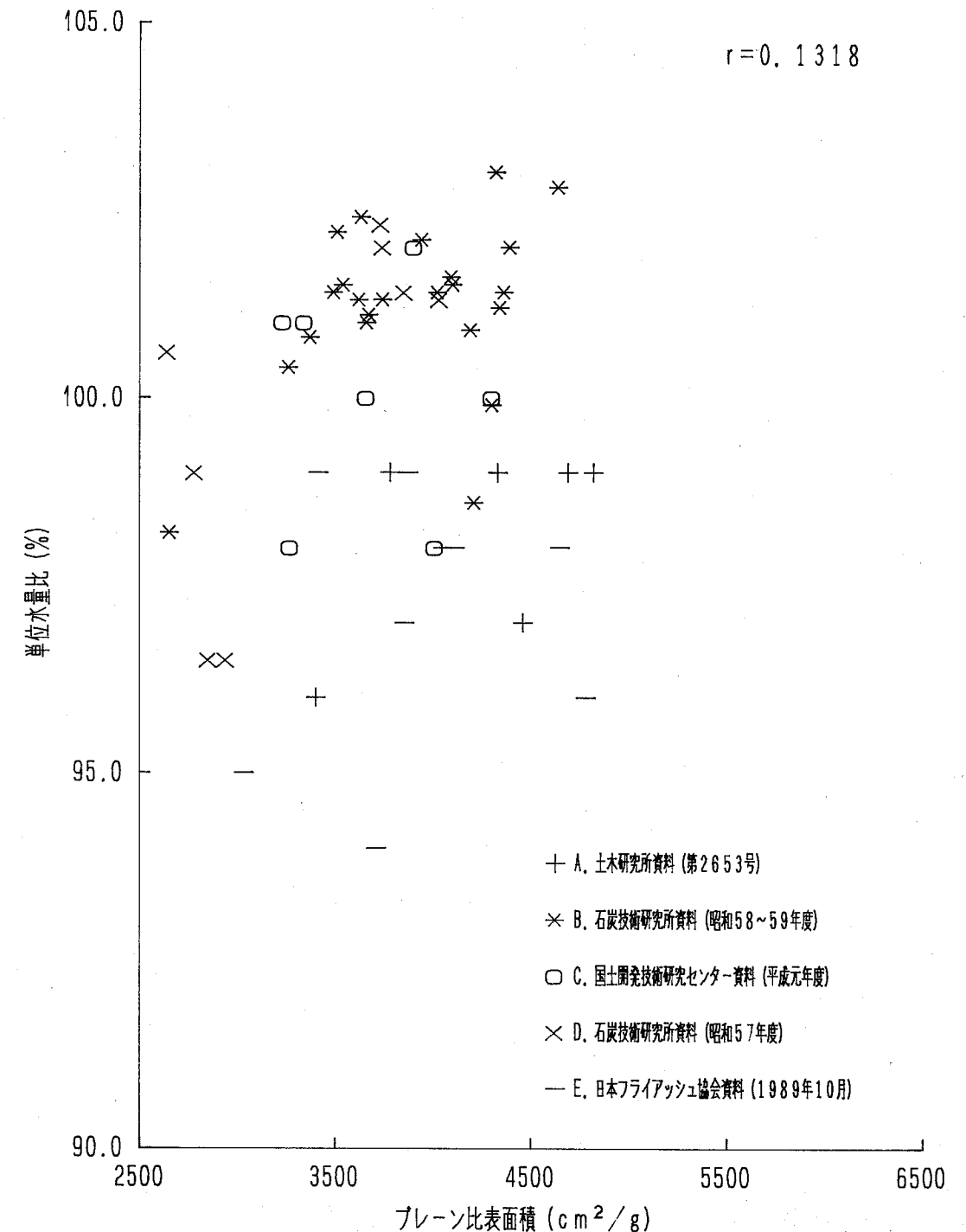


図-37 ブレン比表面積と単位水量比との関係 (海外炭灰)

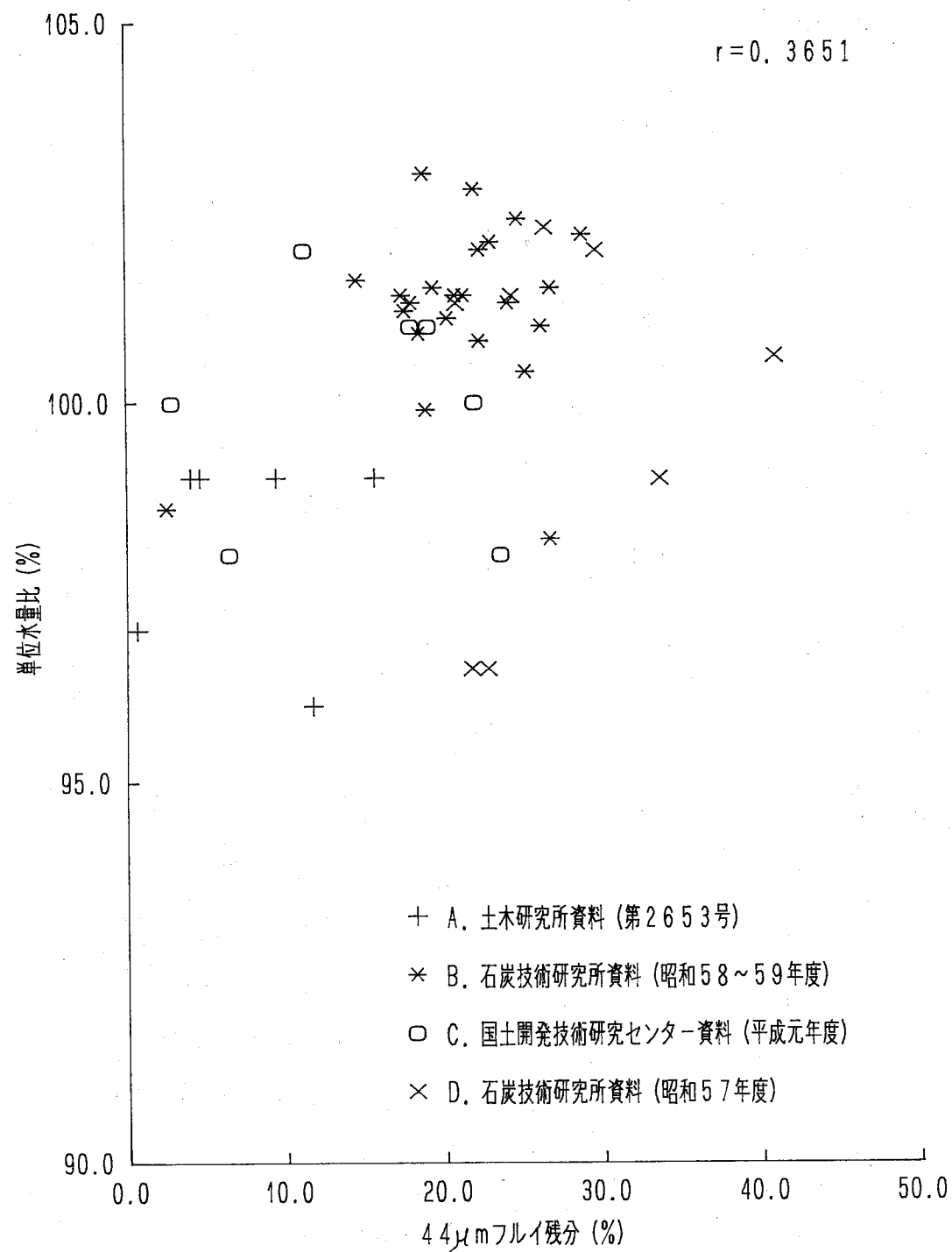


図-38 44 μ mフライ残分と単位水量比との関係 (海外炭灰)

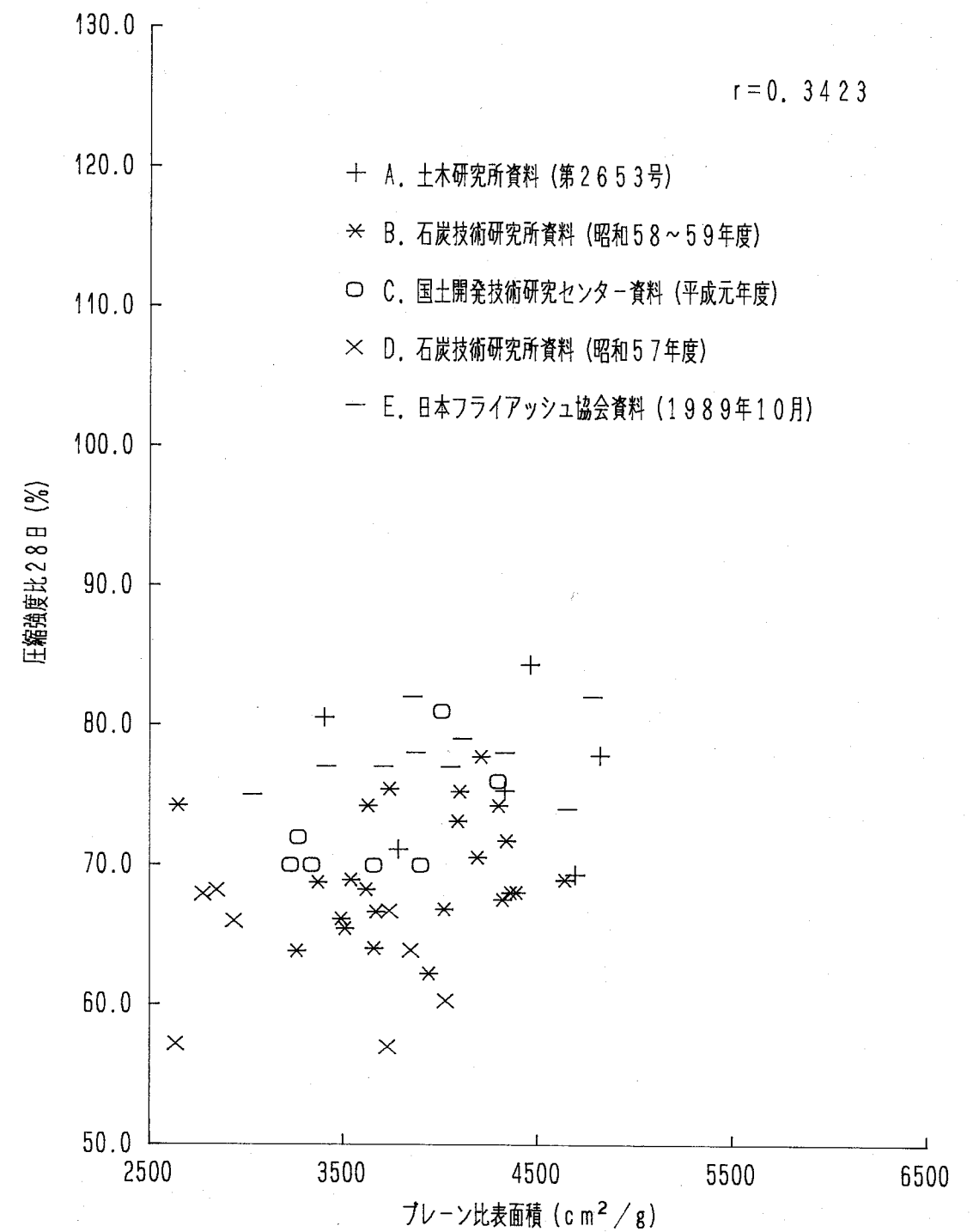


図-39 ブレン比表面積と圧縮強度比28日との関係 (海外炭灰)

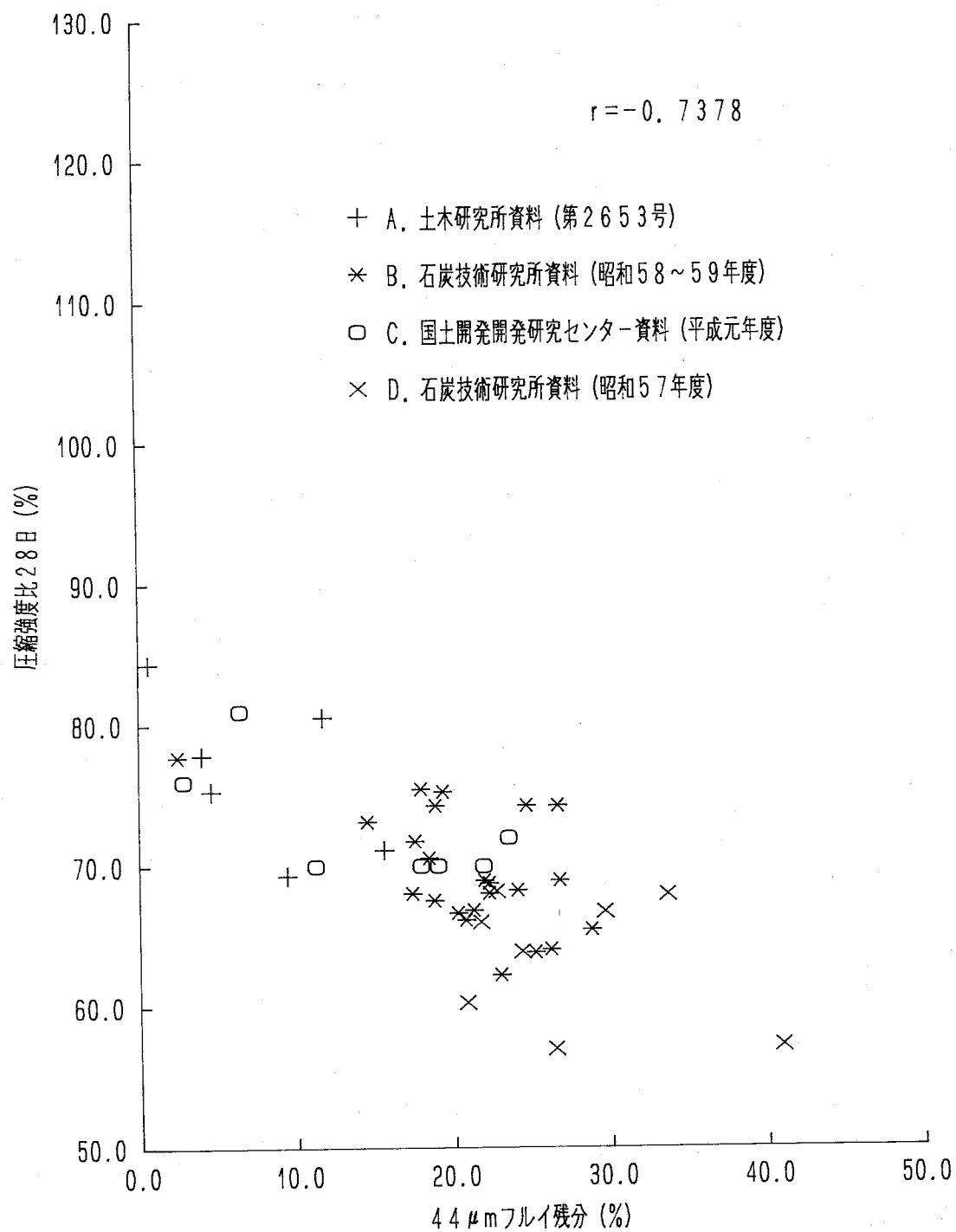


図-40 44 μm フライ残分と圧縮強度比28日との関係 (海外炭灰)

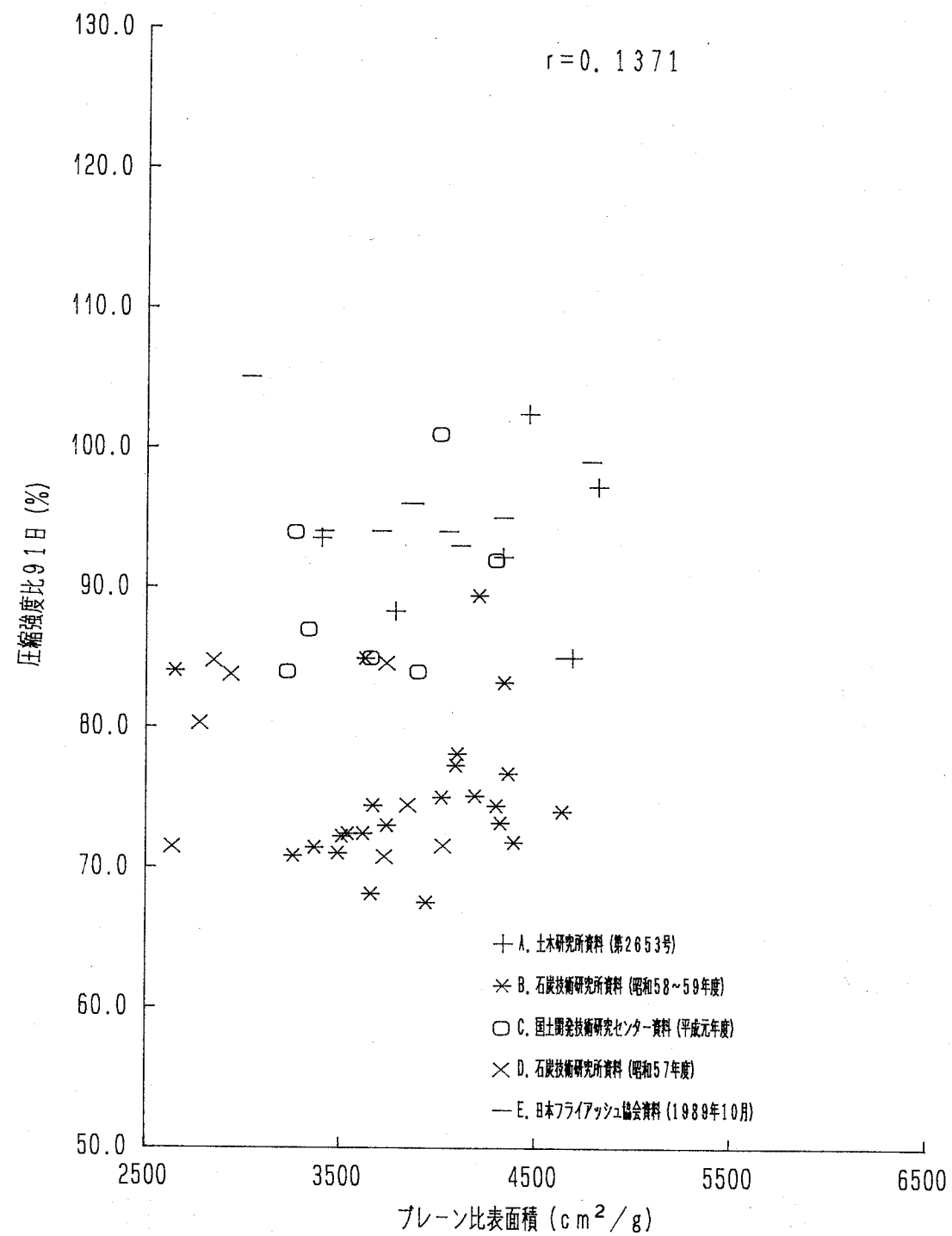


図-41 プレーン比表面積と圧縮強度比91日との関係 (海外炭灰)

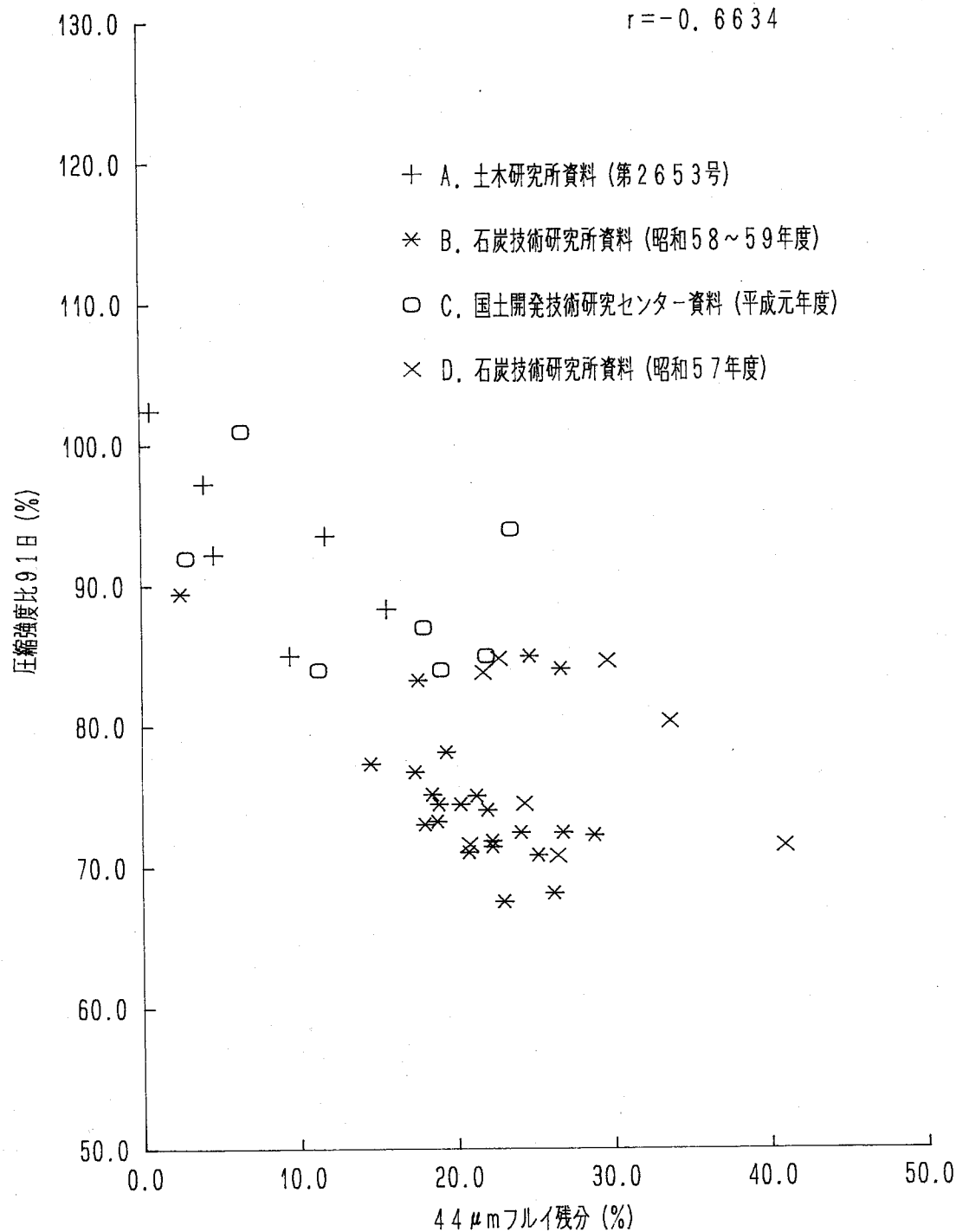


図-42 44 μm フライ残分と圧縮強度比91日との関係 (海外炭)

(2) 単位水量比

良質のフライアッシュをコンクリートに用いる場合の特徴の一つは、コンクリートの単位水量が減少することである。これを確保するため、JIS A6201ではフライアッシュの単位水量比を102%以下と規定しているが、これは過去の実験結果から、コンクリートの単位水量比100%とモルタルの単位水量比102%がほぼ等しいことが確かめられているからであり、これを変更する必要は認められない。ただし、1979年に改訂されたJIS R5210では、普通ポルトランドセメントに5%以下の高炉スラグ、フライアッシュ、シリカ、タンカル等の混合が認められたので、フライアッシュの品質試験を実施する場合には、試験用セメントの影響について留意する必要があるものと考えられる。

(3) 圧縮強度比

ダムなどの、マスコンクリートにフライアッシュが多用されるのは、コンクリートの温度上昇が低いことが大きな理由の一つであるが、これに伴い初期強度が小さくなるので、JIS A6201ではセメントの25%をフライアッシュで置き換えた場合、モルタルの圧縮強度比は材令28日で60%以上、材令91日で70%以上と規定されている。

今後海外炭フライアッシュの増加により、従来の国内炭フライアッシュに比べると強熱減量とM. B. 吸着量が増加し、球形粒子含有量は減少する傾向にあるが、粉末度（ブレン比表面積および45 μmふるい残分）は細くなる傾向にある。その結果、モルタルの単位水量比は球形粒子の減少と粉末度の増加がキャンセルされ、圧縮強度比に大きな影響を与えることはないものと予想されるので、これを変更する必要はないものと考えられる。ただし、フライアッシュのモルタル圧縮強度比は、上記・単位水量比と同様、ベースとなる普通ポルトランドセメントの品質に影響されるので、その影響について留意する必要がある。

5.2.3 物理化学的性質

一般に、海外炭フライアッシュをAEコンクリートに用いると、国内炭フライアッシュに比べ、所定の空気量を連行させるためのAE剤の使用量が増加する。このため、JISおよび外国の規格では強熱減量を規定しているが、わが国では、特記仕様書などによりM.B.吸着量の規定が付加される場合が多い。これはM.B.吸着量の試験方法が簡便であり、コンクリートのAE剤使用量を比較的ストレートに推定することができるからである。

しかし、M.B.吸着量の大きいフライアッシュを用いると、コンクリートに所要の空気量を連行させるためのAE剤の使用量が増加し、コンクリートの品質に何らかの影響を与えることが考えられる。その検討を行うため、表-18に示す4種のフライアッシュ(M.B.吸着量が0.24~0.90mg/g)を用い、まだ固まらないコンクリートに関する試験を行った。その結果は表-19に示すとおりであり、次のことがいえる。

(1) M.B.吸着量と所要AE剤量との関係

フライアッシュのM.B.吸着量が大きくなると、普通AE剤および特殊AE剤共に、コンクリートの所要AE剤量が増加する。図-43参照。

(2) スランプの経時変化

練り上り直後を100%とした相対的なスランプの経時変化は図-44に示すとおりであり、普通AE剤よりも特殊AE剤を使用した方がスランプの変化量が少ない。また、60分後のスランプロスは図-45に示すようにAE剤量が増えても大きな変化がなく、特殊AE剤は普通AE剤に比べて、スランプロスが少ない。なお、M.B.吸着量とスランプロスとの関係も同様である。図-46参照。

(3) 空気量の経時変化

練り上り直後を100%とした相対的な空気量の経時変化および60分後のエアロスもスランプの場合と同様の傾向を示す。図-47、48参照。またM.B.吸着量とエアロスとの関係も同様である。図-49参照。

(4) 凝結時間

所要AE剤量と凝結時間との関係は図-50に示すように、フライアッシュ間に大きな差は認められない。また、M.B.吸着量と凝結との関係も同様である。図-51参照。

以上のようにフライアッシュのM.B.吸着量が大きくなると所要AE剤量が増加するが、この範囲であれば、まだ固まらないコンクリートの性質すなわち、スランプ、空気量等の経時変化および凝結時間には大きな影響を与えないことが判った。従って、

M.B.吸着量の最大値を強熱減量に関するJIS規格値5%以下におおむね対応する0.8mg/g以下に規制すれば、特に大きな問題はないものと考えられる。なお、各ダムにおいて実際に使用するセメント、フライアッシュ、骨材および化学混和剤はそれぞれ異なるので、それらを用いてコンクリート試験を行い、確認する必要がある。

(注) フライアッシュの強熱減量およびM.B.吸着量がAEコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響については既往の文献により明らかにされている。

図-52、53参照

表-18 フライアッシュの試験結果

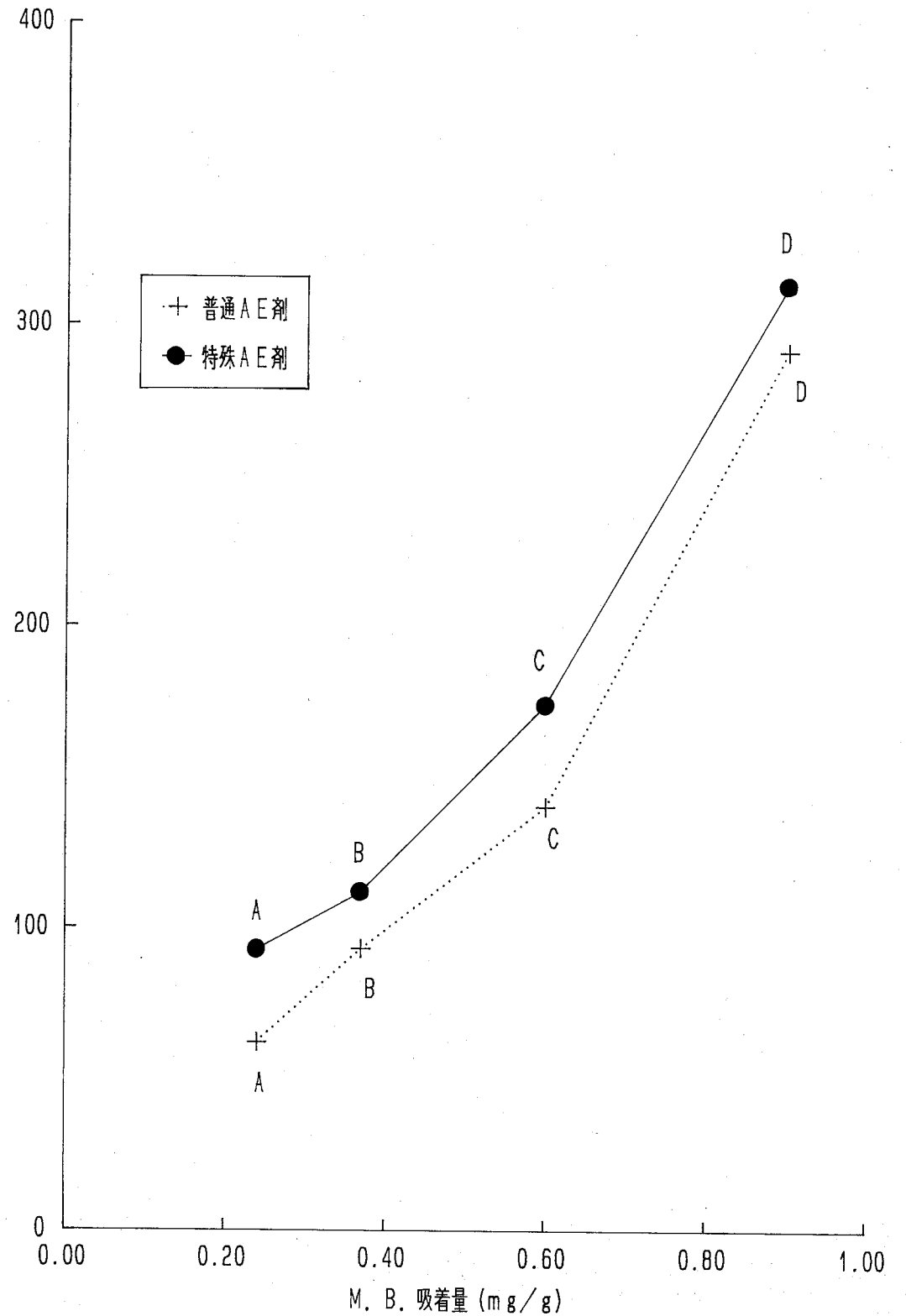
試験項目		試験方法	規格値 JIS A6201 (1977)	フライアッシュ			
				A	B	C	D
物理的性質	比重	JIS A6201	1.95以上	2.17	2.28	2.24	2.13
	粉 末	ブレン比表面積(cm ² /g)	JIS A6201	2400以上	3940	4060	3360
	度	88μmふるい残分(%)	JIS R5201	—	3.1	0.3	3.4
		45μmふるい残分(%)	CAJS K02	—	10.5	3.0	13.0
	単位水量比(%)		JIS A6201	102以下	100	99	102
	圧縮強度比 (%)	7日	JIS A6201	—	68	75	65
		28日		60以上	73	81	71
		91日		70以上	85	92	79
	W ₂₀		注1)	—	58	53	58
	密嵩比重		注2)	—	1.26	1.38	1.28
化学的性質	凝 結	始発 (h-m)	注3)	—	3-40	3-42	3-36
		終結 (h-m)		—	4-51	5-00	4-55
	強熱減量(%)		JIS A6201	5以下	1.4	1.7	3.0
	湿分(%)		JIS A6201	1以下	0.0	0.0	0.0
	SiO ₂		JIS A6201	45以上	64.9	62.5	68.4
	M.B.吸着量(mg/g)		CAJS I61	—	0.24	0.37	0.60

注1) フライアッシュの流動性を表す指標であり、数値が小さい程、流動性がよいとされている。
注2) フライアッシュの品質を表す指標であり、数値が大きい程、品質がよいとされている。
注3) 凝結試験は、普通ポルトランドセメントによる(F/(C+F)=25%)。

表-19 コンクリート試験結果

フレッシュコンクリートの性状		配合										経時変化										凝結 (h-m)		
		W/C (%)		S/a (%)	単位重量 (kg/㎡)						スランプ (cm)				空気量 (%)				変化 量					
					W	C	F	S	G	混和剤 (g/㎡)		直後	20分 後	40分 後	60分 後	変化 量	直後	20分 後			40分 後			60分 後
										減水	AE剤													
フレッシュ コンクリートの 種類	混和剤の種類	45.2	39	140	310	0	742	1177	620	40	4.2	2.8	2.0	1.7	2.5	4.2	3.8	3.2	3.0	1.2	8-29	11-25		
セメント	減水剤+普通AE剤	45.2	39	140	310	0	742	1177	620	40	3.8	2.8	2.5	2.3	1.5	4.0	3.8	3.6	3.5	0.5	8-21	11-18		
	減水剤+特殊AE剤	45.2	39	140	217	93	729	1153	620	62	3.5	2.7	2.0	1.5	2.0	4.5	3.5	3.1	2.8	1.7	10-24	13-18		
A	減水剤+普通AE剤	45.2	39	140	217	93	729	1153	620	93	3.8	3.0	2.9	2.5	1.3	4.4	4.3	3.7	3.7	0.7	10-19	13-16		
B	減水剤+普通AE剤	45.2	39	140	217	93	729	1159	620	93	4.3	3.2	2.0	1.5	2.8	4.0	3.5	3.0	2.4	1.6	10-43	13-54		
	減水剤+特殊AE剤	45.2	39	140	217	93	729	1159	620	112	4.0	3.2	2.4	2.1	1.9	4.0	3.8	3.6	3.2	0.8	10-35	13-48		
C	減水剤+普通AE剤	46.1	39	143	217	93	726	1151	620	140	4.2	2.9	2.1	1.4	2.8	3.9	3.4	3.4	2.3	1.6	10-32	13-27		
	減水剤+特殊AE剤	46.1	39	143	217	93	726	1151	620	174	4.1	3.0	2.4	2.0	2.1	4.3	4.1	4.1	3.4	0.9	10-28	13-24		
D	減水剤+普通AE剤	47.1	39	146	217	93	721	1143	620	291	4.2	2.5	1.5	1.0	3.2	4.1	3.4	2.8	2.2	1.9	10-25	13-19		
	減水剤+特殊AE剤	47.1	39	146	217	93	721	1143	620	313	4.0	3.3	2.3	2.1	1.9	4.6	4.3	3.8	3.6	1.0	10-17	13-15		

所要AE剤量 (g/m³)



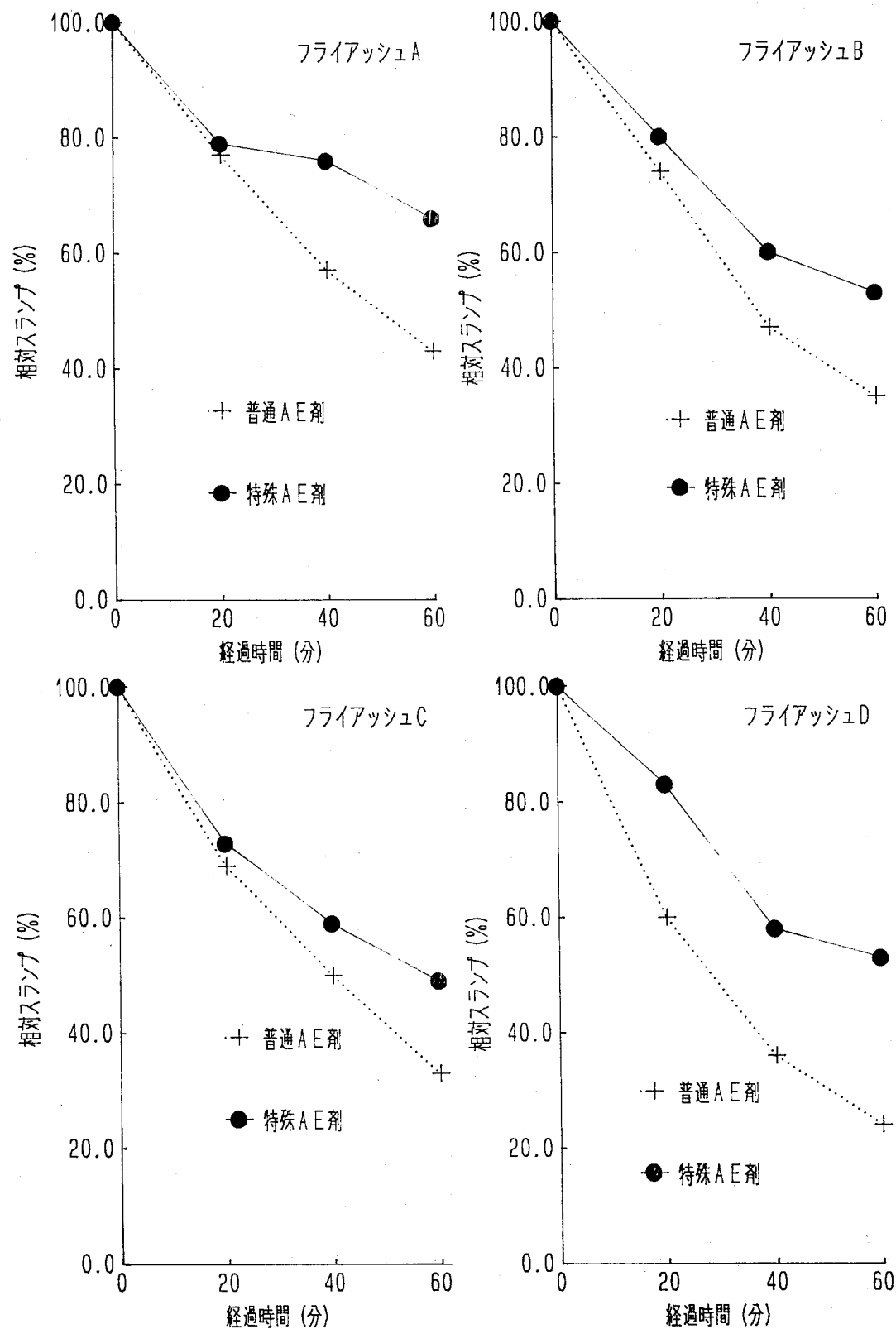


図-44 スランプの経時変化

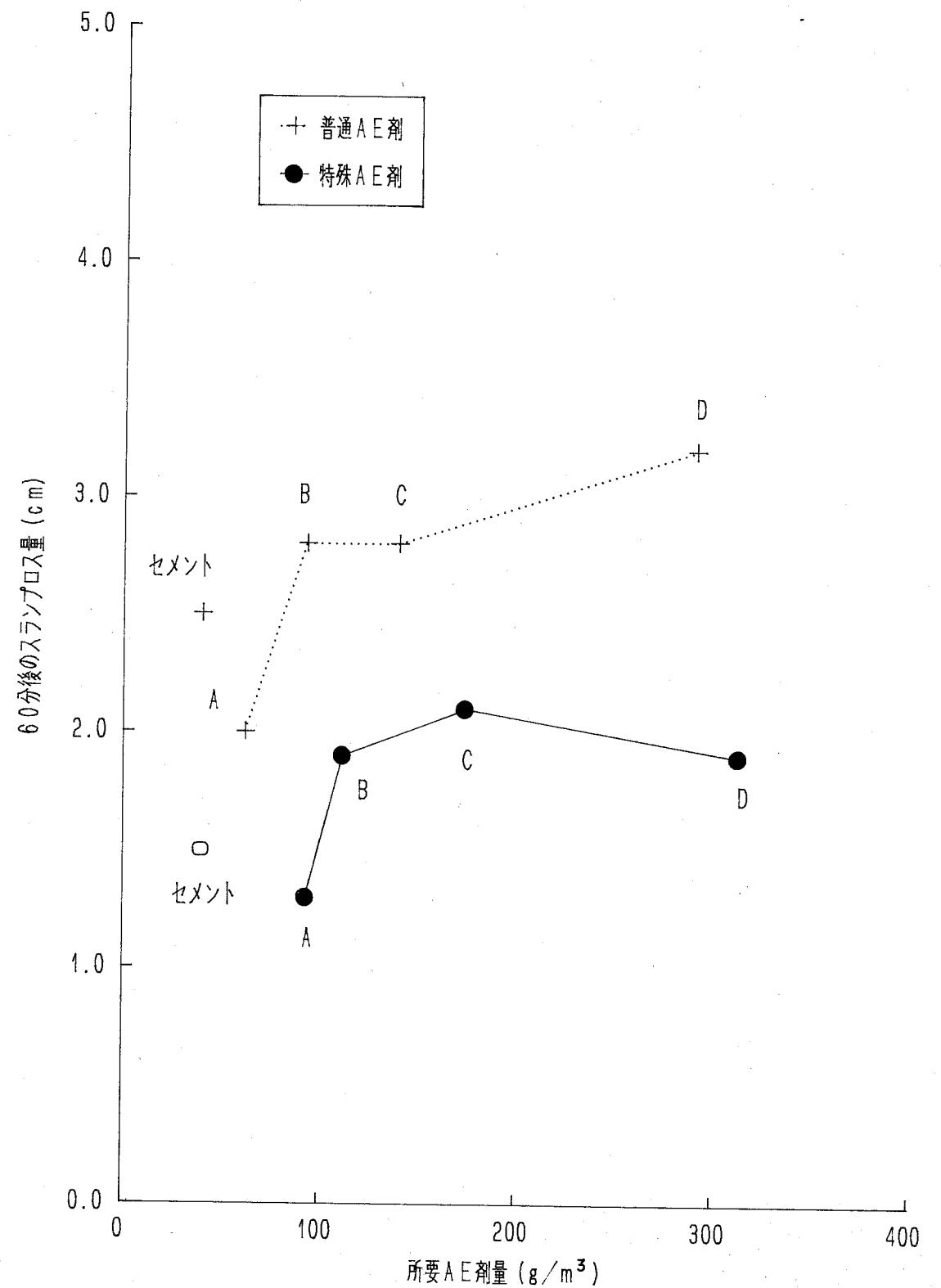


図-45 所要AE剤量と60分後のスランプロス量との関係

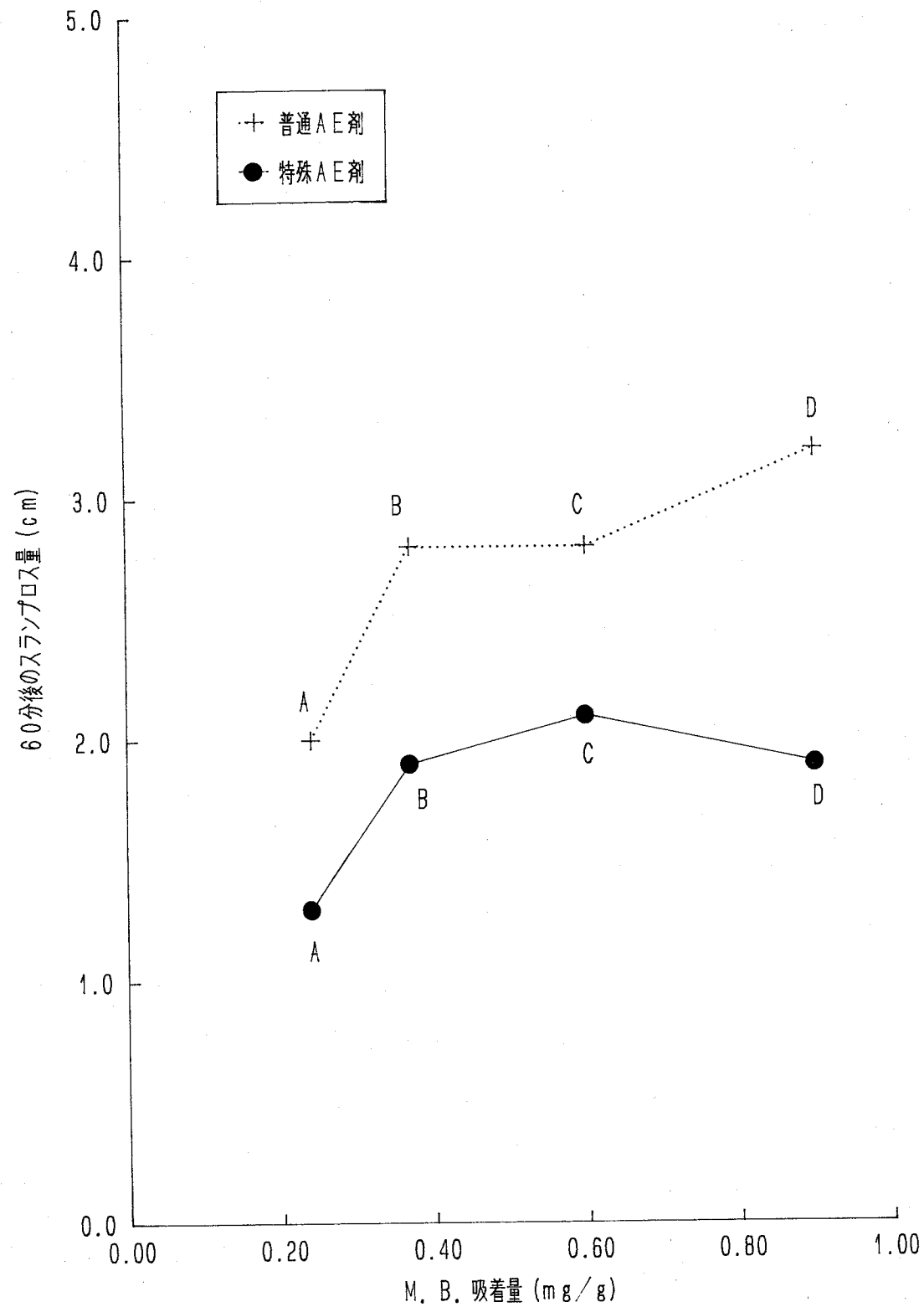


図-46 M. B. 吸着量と60分後のスランプロス量との関係

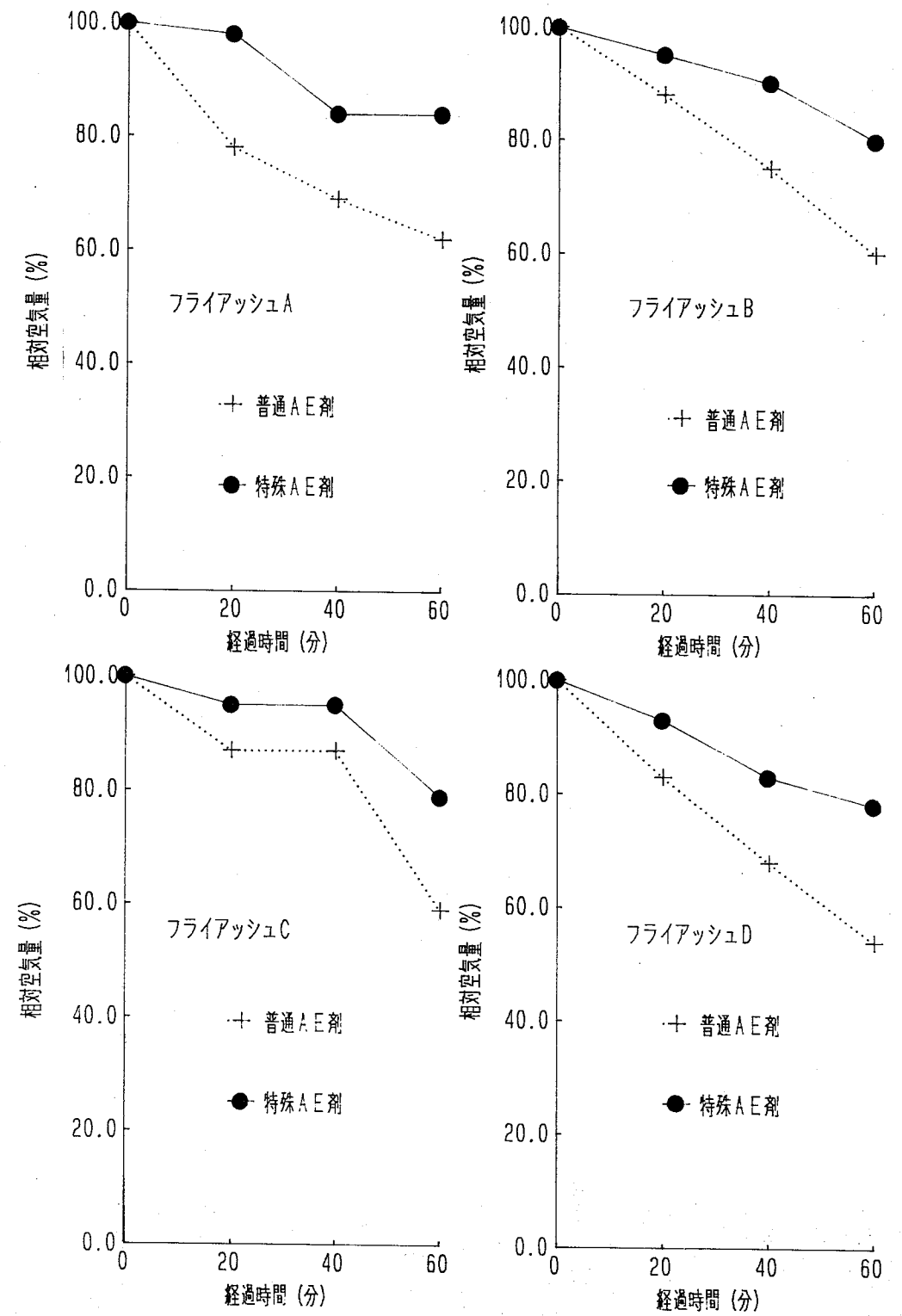


図-47 空気量の経時変化

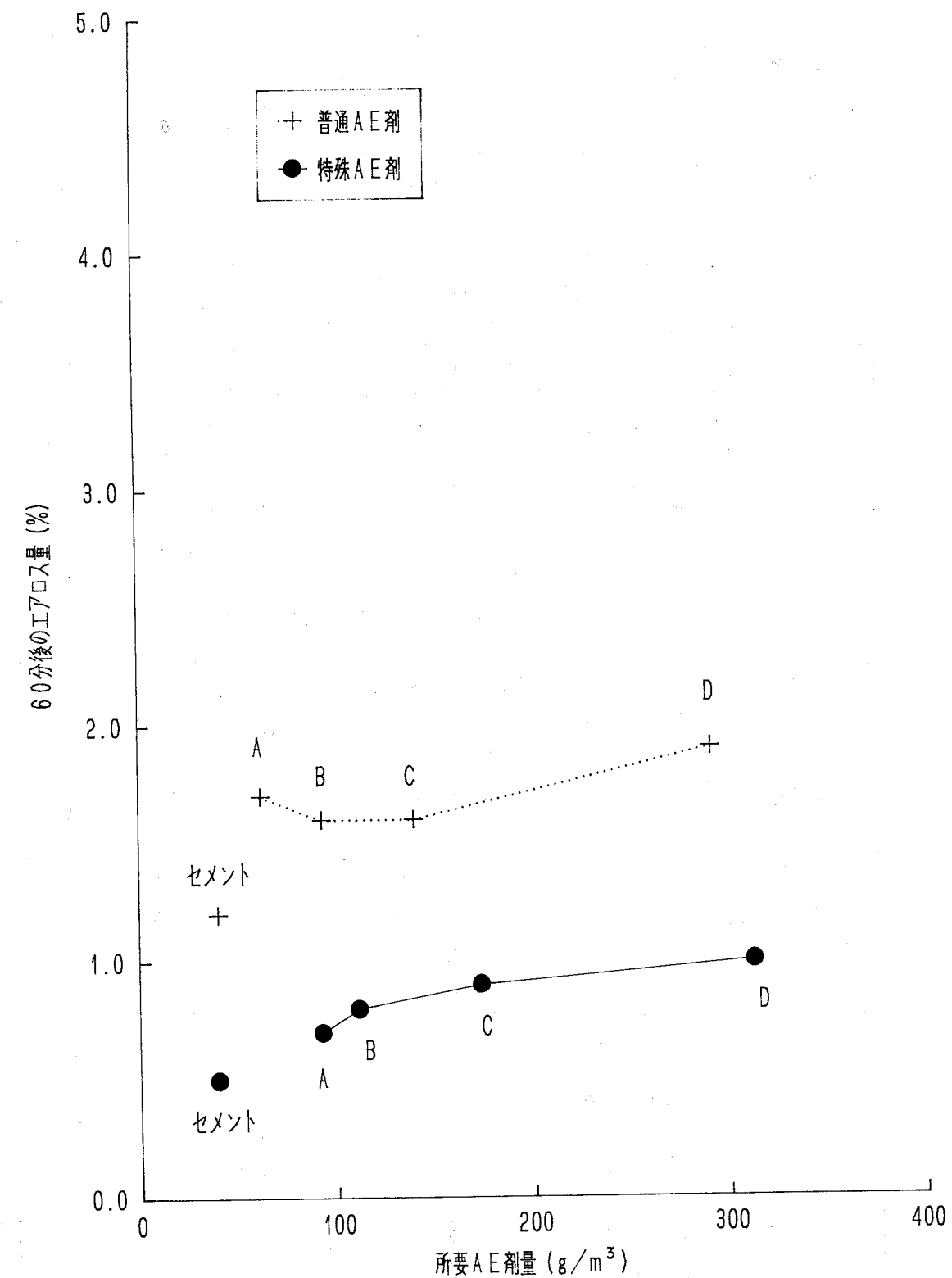


図-48 所要AE剤量と60分後のエアロス量との関係

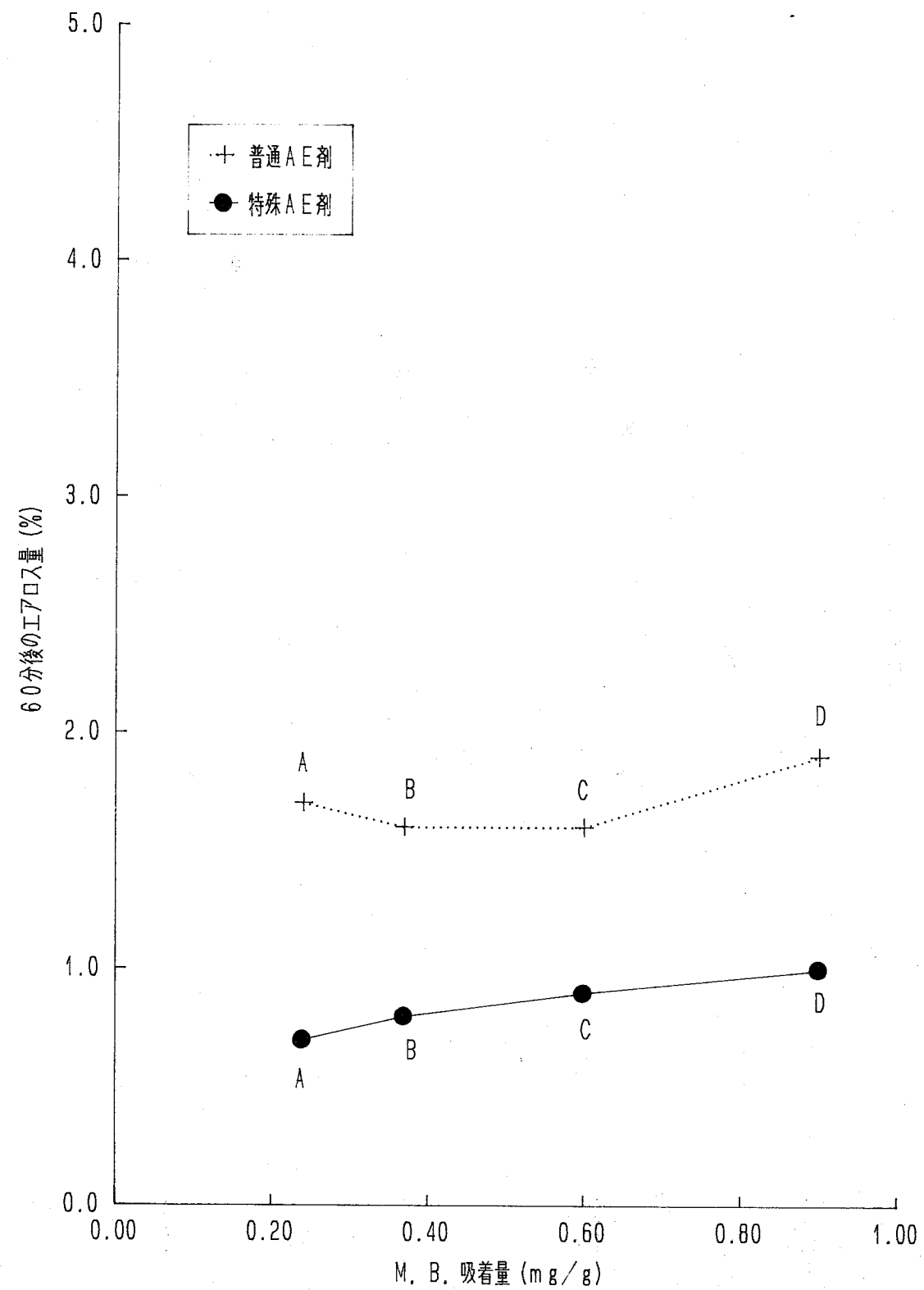


図-49 M, B. 吸着量と60分後のエアロス量との関係

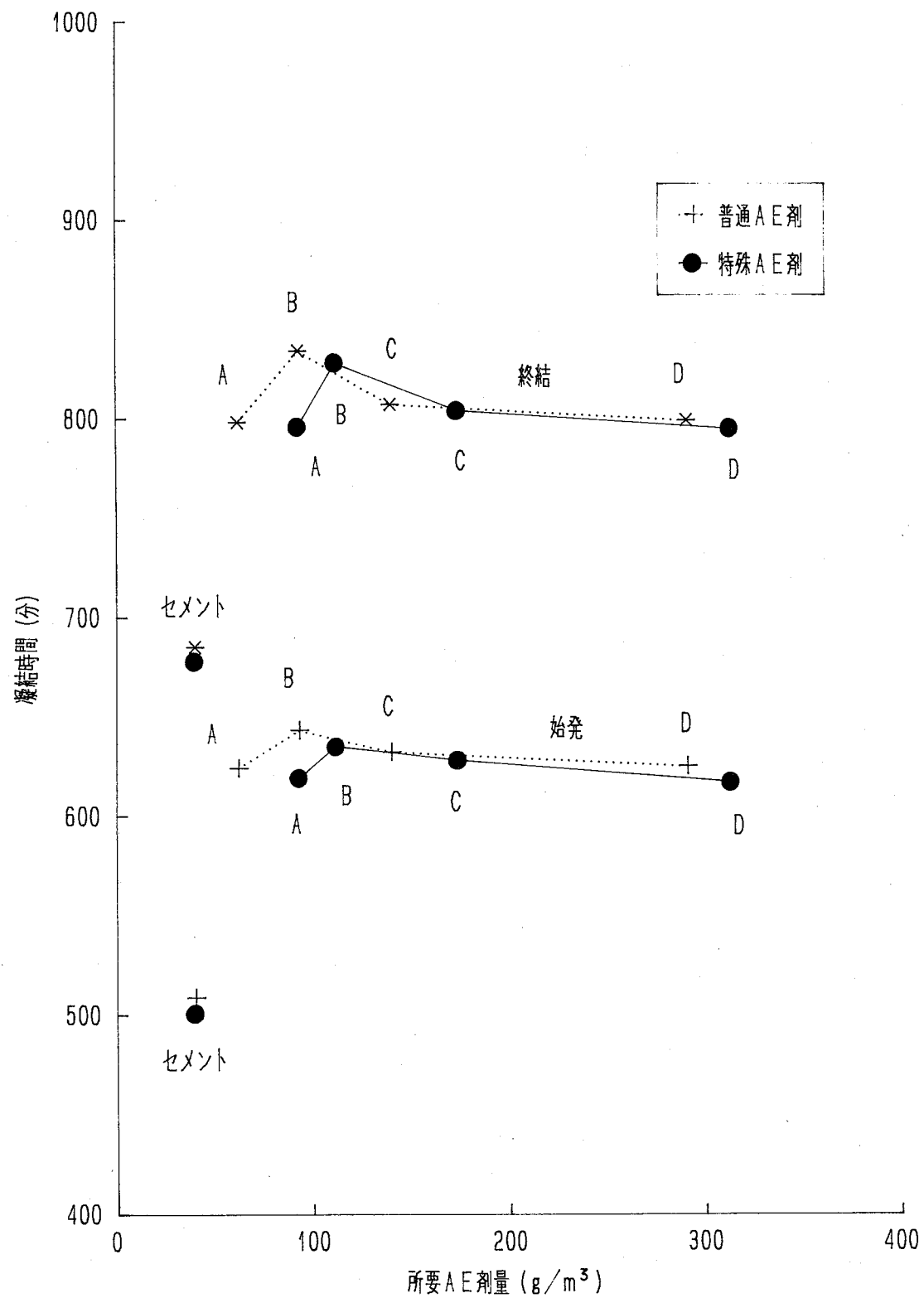


図-50 所要AE剂量と凝結時間との関係

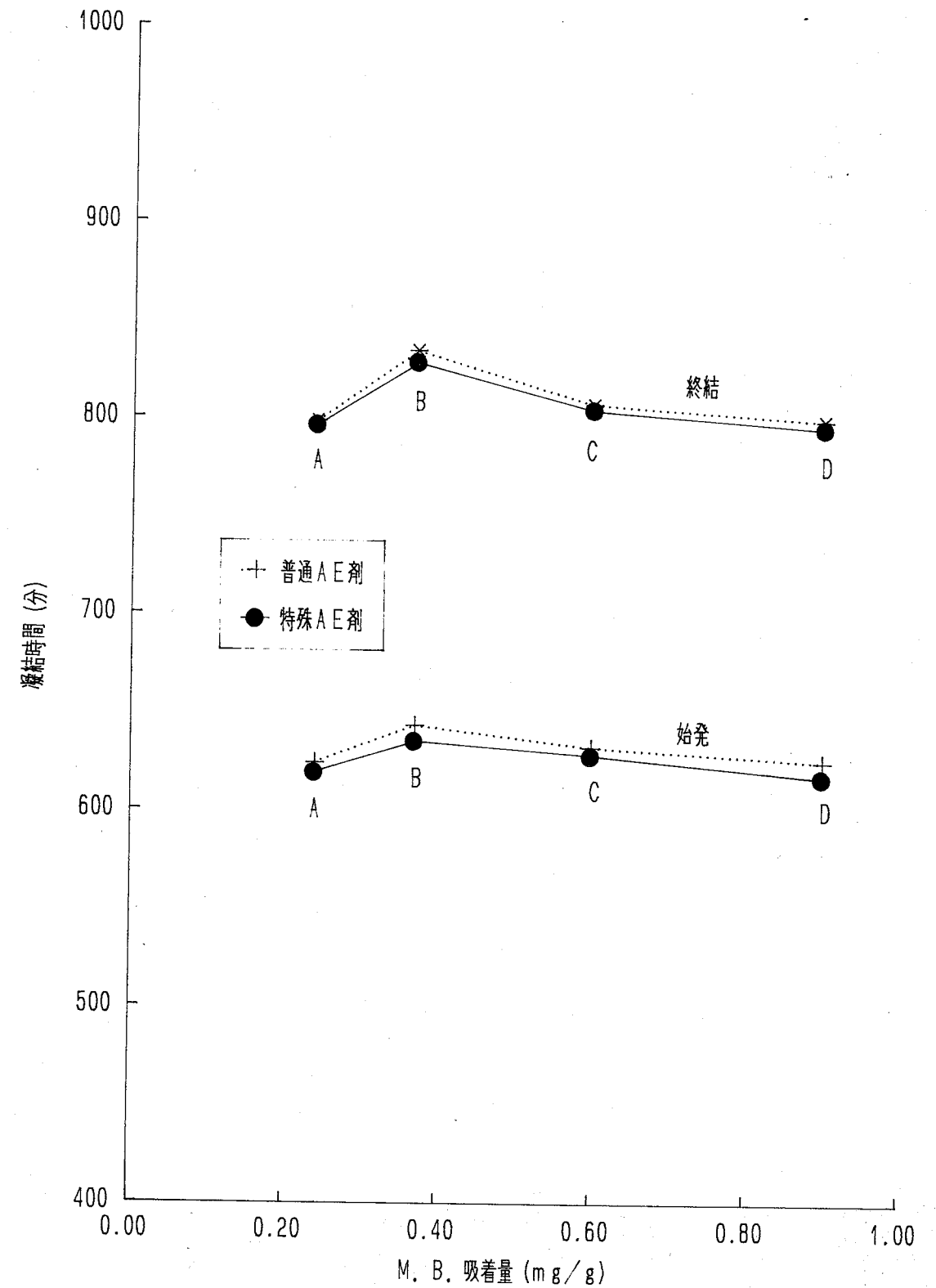


図-51 M.B. 吸着量と凝結時間との関係

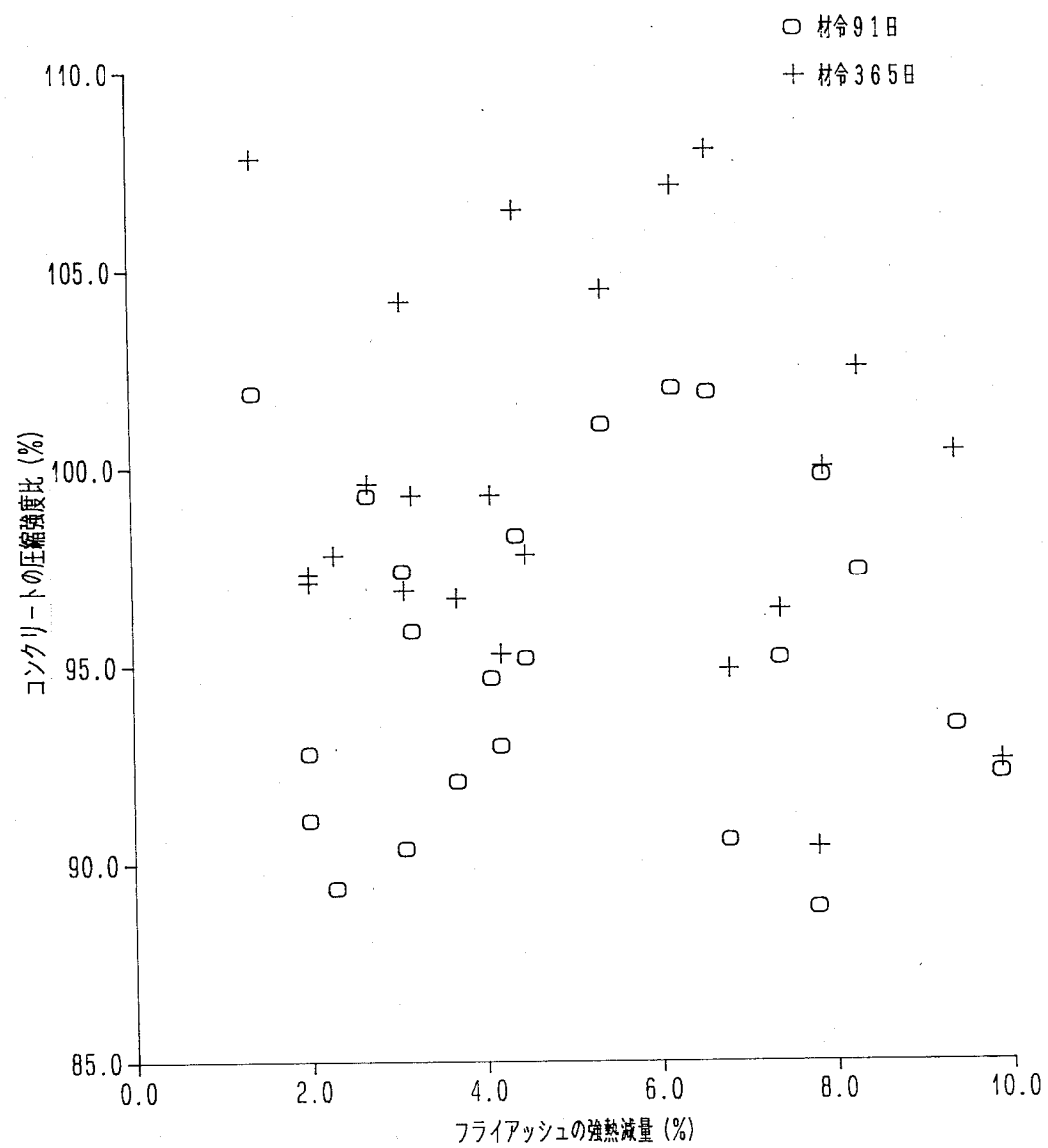


図-52 フライアッシュの強熱減量とコンクリートの圧縮強度比との関係

出典：コンクリート工学 Vol. 28、No.1

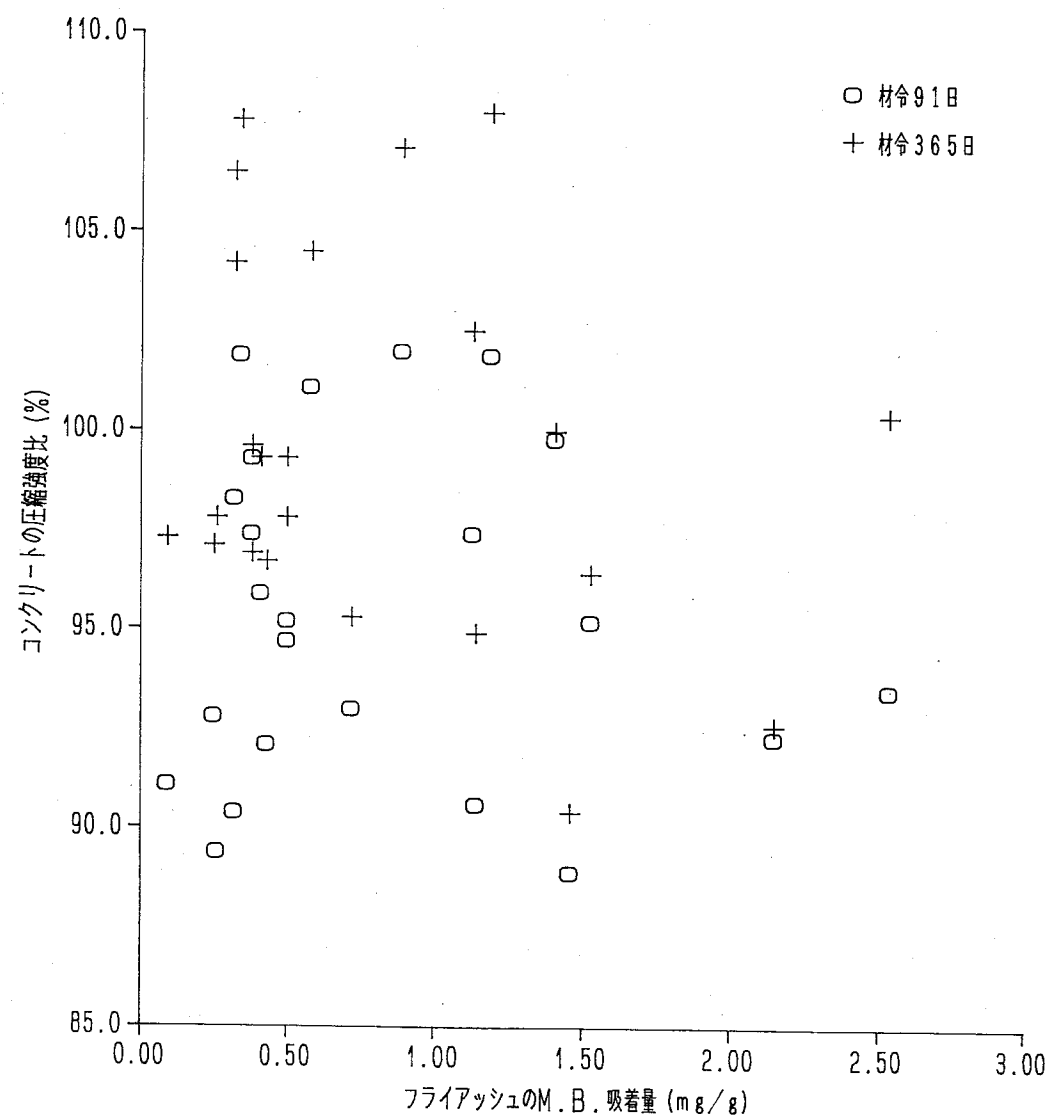


図-53 フライアッシュのM.B. 吸着量とコンクリートの圧縮強度比との関係

出典：コンクリート工学 Vol. 28、No.1

5.2.4 品質の均一性

(1) ブレーン比表面積

JIS A6201では提出見本試料の値より450 cm^2/g 以上異なってはならない、と規定されているが、ダムの場合はこれを更に強化されることがある。

ただし、ブレーン方法による比表面積の測定は、セメント協会で毎年行われる共同試験結果でも $\pm 200\text{cm}^2/\text{g}$ 程度の試験誤差が生ずることが明らかにされているので、この試験誤差も考慮し、更に供給実績などにも留意して判断する必要がある。

(2) M. B. 吸着量

上記のように、JIS化されていないが、コンクリートのAE剤使用量に直接影響するので、空気量の管理を行う上では上限を0.8 mg/g 程度とし、変動幅を規定することが望ましい。

ただし、この場合も限られた資料ではあるが、0.1 mg/g 程度の試験誤差が認められるので、これを確認の上、判断する必要がある。

(3) 単位水量比

JIS A6201では提出見本試料の値より5%以上異なってはならない、と規定されているが、前項で述べたように、ベースとなる普通ポルトランドセメントの品質について考慮の上、判断する必要がある。

5.3 試料

JIS A6201では、試料の数量および採取方法は当事者間の協定による、ことになっているが、ダム用コンクリートに用いるフライアッシュは、予めセメントと混合された、いわゆるフライアッシュセメントの場合が多いので、フライアッシュの混合率を考慮し、試料の数量および採取方法を決定する必要がある。

5.4 その他

参考のため、わが国の主要ダムに於けるフライアッシュの品質規格を表-20に示す。

表-20 国内主要ダムのフライアッシュ品質規格

項目		ダ ム 名	JIS A6201		従 来 工 法			R C D I 法						
			改 定	前 現	行	川	治	浅瀬石川 ¹⁾	上 山 溪	島 地	川 大	川 小	玉 川	宮 ケ 瀬
化 学 成 分	湿 分 (%)		1 以下	1 以下	1 以下	1.5 以下	—	1 以下	1 以下	1 以下	1 以下	1 以下	1 以下	1 以下
	強 熱 減 量 (%)		5 以下	5 以下	5 以下	3 以下	—	5 以下	5 以下	5 以下	5 以下	3.5 以下	5 以下	3.5 以下
	二 酸 化 け い 素 (%)		45 以上	45 以上	45 以上	45 以上	—	45 以上	45 以上	45 以上	45 以上	45 以上	45 以上	45 以上
	ア ル ミ ナ (%)		—	—	—	20 以上	—	—	—	—	—	—	—	—
	マ グ ネ シ ウ ム (%)		—	—	—	3 以下	—	—	—	—	—	—	—	—
	無 水 硫 酸 (%)		—	—	—	2 以下	—	—	—	—	—	—	—	—
物 理 的 性 質	比 重		1.95 以上	1.95 以上	1.95 以上	2.00 以上	—	1.95 以上	1.95 以上	1.95 以上	2.00 以上	2.00 以上	2.00 以上	2.00 以上
	粉 末	フルイ残分 (%)	—	—	—	15 以下	—	—	—	—	—	5 以下	—	5 以下
			25 以下	—	—	25 以下	—	25 以下	—	—	—	20 以下	25 以下	25 以下
	度	ブレン比表面積 (cm ² /g)	2700 以上	2400 以上	2400 以上	2600 以上	—	2700 以上	2400 以上	2400 以上	2400 以上	3000 以上	3000 以上	3000 以上
	単 位 水 量 比 (%)		100 以下	102 以下	102 以下	100 以下	—	100 以下	102 以下	102 以下	102 以下	102 以下	102 以下	102 以下
			63 以上	60 以上	60 以上	60 以上	—	63 以上	60 以上	60 以上	60 以上	60 以上	60 以上	60 以上
品 質 の 均 一 性	圧 縮 強 度 比 (%)	28 日	80 以上	70 以上	100 以上	—	—	80 以上	70 以上	70 以上	70 以上	70 以上	70 以上	70 以上
		91 日	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	メチレンブルー吸着量 (mg/g)		—	—	—	0.4 以下	—	—	—	—	—	0.4 以下	0.8 以下	0.4 以下
	ブレン比表面積 (cm ² /g)		±450	±450	±450	2600 ~ 3400	—	±450	±450	±450	±5%	±300	±350	±300
単 位 水 量 比 (%)		±5	±5	±5	90~100	—	±5	±5	±5	±5	±5	±5	±5	±5
メチレンブルー吸着量 (mg/g)		—	—	—	0.05~0.4	—	—	—	—	—	—	±0.2	±0.2	—

(注) ¹⁾はフライアッシュセメント (JIS R5213) で規定されている。

6. むすび

以上の検討結果を要約すれば次のとおりである。

- (1) わが国の電源は、10数年前の石油危機を契機として、石炭火力発電が再び見直され、通産省・資源エネルギー庁の昭和63年度電力施設計画によると10年後の設備能力は現在の1100万kwから2500万kwまで増強される見通しである。これに伴い、石炭火力発電所における石炭消費量は現在2500万t/年が10年後には4600万t/年となり、石炭灰の発生量も380万t/年から750万t/年まで急増するものと推定される。
- (3) 平成元年度に行ったアンケート調査の結果によると、この380万tの石炭灰のうち、セメント・コンクリート用混和材として45万t/年のフライアッシュが生産・販売されており、10年後には70万t/年程度まで増加するものと考えられるが、今後発生する石炭灰の大半が海外炭燃焼灰であり、フライアッシュの品質も従来の国内炭フライアッシュに比べやや異なるものである。これを考慮するとフライアッシュの生産量は今後急増するとはいえないが、今後とも50万t/年以上が確保され、ダム用としても平成3年度には10万t、同5年度には15万t、同10年度には17万tが充当可能と推定される。(注) 海外炭フライアッシュは粒度が細かく、原粉でもブレン比表面積が3000cm²/g以上となるので、これを対象にすれば、フライアッシュの生産量は倍増する。
- (4) 海外炭フライアッシュの品質は、国内炭フライアッシュに比べ、強熱減量、二酸化けい素、比重およびブレン比表面積が大きく、圧縮強度比がやや小さい。またJIS A6201では規定されていないがM・B・吸着量も大きい。
- (5) フライアッシュの粉末度を評価する方法としては、現在、ブレン方法による比表面積だけが用いられているが、45μmふるい残分についても併用する必要があるものと考えられる。その規制値は、今回の一連の検討結果から25～30%以下をおおよその目安とすることが考えられるが、今後更にデータを蓄積し、検討を行うことが望まれる。
- (6) M・B・吸着量の大きい海外炭フライアッシュを、ダムの外部コンクリート・その他のAEコンクリートに用いると、所要の空気量を連行させるためのAE剤の使用量が増加し、コンクリートの品質への影響が懸念されるので、M・B・吸着量が広範囲となるように試料を採取し、コンクリート試験を行った。その結果、M・B・吸着量が0.8mg/g程度以下であれば、まだ固まらないコンクリートのスランプ、空気量等の経時変化ならびに凝結時間には大きな影響を与えないことが判った。

なお、各ダムにおいて実際に使用するセメント、フライアッシュ、骨材および化学混和剤はそれぞれ異なるので、それらの材料を用いてコンクリート試験を行い、確認する必要がある。

ダム用コンクリートにおける
フライアッシュ利用の手引き 定価 3,800円(税・送料込み)

平成 3年 9月30日 初版発行

監 修 建設省河川局開発課
発 行 (財)国土開発技術研究センター

〒105 東京都港区虎ノ門2-8-10

(第15森ビル 6階)

電話 03-3503-0393(調査第一部)

FAX 03-3592-6699

印刷所 西印刷株式会社