

論文 輸送に伴う環境負荷低減の観点からのフライアッシュ有効利用に関する検討

青木 雄祐^{*1}・藤木 昭宏^{*2}・河合 研至^{*3}

要旨：本論文では、石炭灰の有効利用の観点から、国内の2つの地域の各発電所から排出される石炭灰を利用実績に基づいてその活用方法ごとの輸送による環境への影響についての検討を行った。その結果、石炭灰をセメント原料の一部やフライアッシュセメント原料として利用した場合と、混和材として利用した場合では、混和材として利用したほうが輸送の観点からの環境負荷量は小さいことがわかった。

キーワード：フライアッシュ、石炭灰、環境負荷、輸送

1. はじめに

地球温暖化等の地球規模での環境問題が深刻な状況となっている現在、建設に多くの資源とエネルギーを用いるコンクリート構造物は地球環境に与える影響も非常に大きいと考えられる。有限である資源を有効に利用するためにも、産業副産物の利用を促進し、循環型の社会を形成していくことで、地球環境への負荷も低減できると考えられる。そのためにも、産業副産物の有効利用が循環型社会へどの程度貢献しているのかを定量的に評価する必要がある。

本研究では、産業副産物としてフライアッシュに着目し、環境負荷低減の観点からフライアッシュの有効利用を図る方策について検討することとした。一般的に、産業副産物の環境負荷を考えると、副産物として排出されるまでの過程の環境負荷量はその副産物には付加しないこととしている。すなわち、フライアッシュを利用する場合の環境負荷量は、石炭灰が排出された後にフライアッシュとして加工するために要する工程の環境負荷量と輸送に伴う環境負荷量となる。したがって、フライアッシュの有効利用を図るためには、環境負荷低減の観点からは、輸送に関する環境負荷の比率が比較的大きなウエイトを占めることが予想される。

また、フライアッシュは全国各地で産出されるものではなく、産出される場所が石炭火力発電所の所在地に限定されるため、任意の工事現場においてフライアッシュを利用しようとしたとき、環境負荷の観点からは輸送経路の取り方が問題となり、地域特性が発生することが予想される。これらのことを踏まえ、異なる地域で産出されるフライアッシュについて、その有効利用を図る上での輸送のあり方について検討を行った。

2. 調査方法

国内を北海道、東北、北陸、関東、中部、関西、中国、四国、九州、沖縄の10地域に分割し、それぞれの地域について、石炭火力発電所から排出される石炭灰量、石炭灰の現在の利用実態、利用にあたっての輸送方法、輸送先、輸送量等の調査を実施した。ここでは、それらの中で、2つの地域（A地域、B地域）のデータについて比較検討する。現在、A地域では、3か所の石炭火力発電所から石炭灰が排出されており、B地域では、4か所の石炭火力発電所から石炭灰が排出されている。これらの2つの地域の調査結果から得られたデータを輸送に伴う環境負荷を算出する際の基礎データとした。

なお、調査結果から得られたデータは、2007年度実績である。また、この調査結果の中には、社外秘扱いとされるデータが含まれるため、本論文では地域名や県名の明示を避けるとともに、数値は生データではなく加工した値を表示することとした。

また、環境負荷評価を行うインベントリは、CO₂排出量、NO_x排出量、SO_x排出量、ばいじん排出量を対象とし、環境負荷量を算出するために必要な輸送に関するインベントリデータには、表-1¹⁾の値を用いた。

3. 環境負荷量の算出

現状の、主たるフライアッシュの利用方法としては、フライアッシュセメントへの利用、混和材としての利用、粘土代替としてセメント原料の一部への利用があげられる。これらの利用が行われる場合のそれぞれについて、輸送に伴う環境負荷量の試算を行った。試算で想定した輸送経路を図-1に示す。

まず、発電所から排出される石炭灰を現在の利用実績に基づいて分類する。

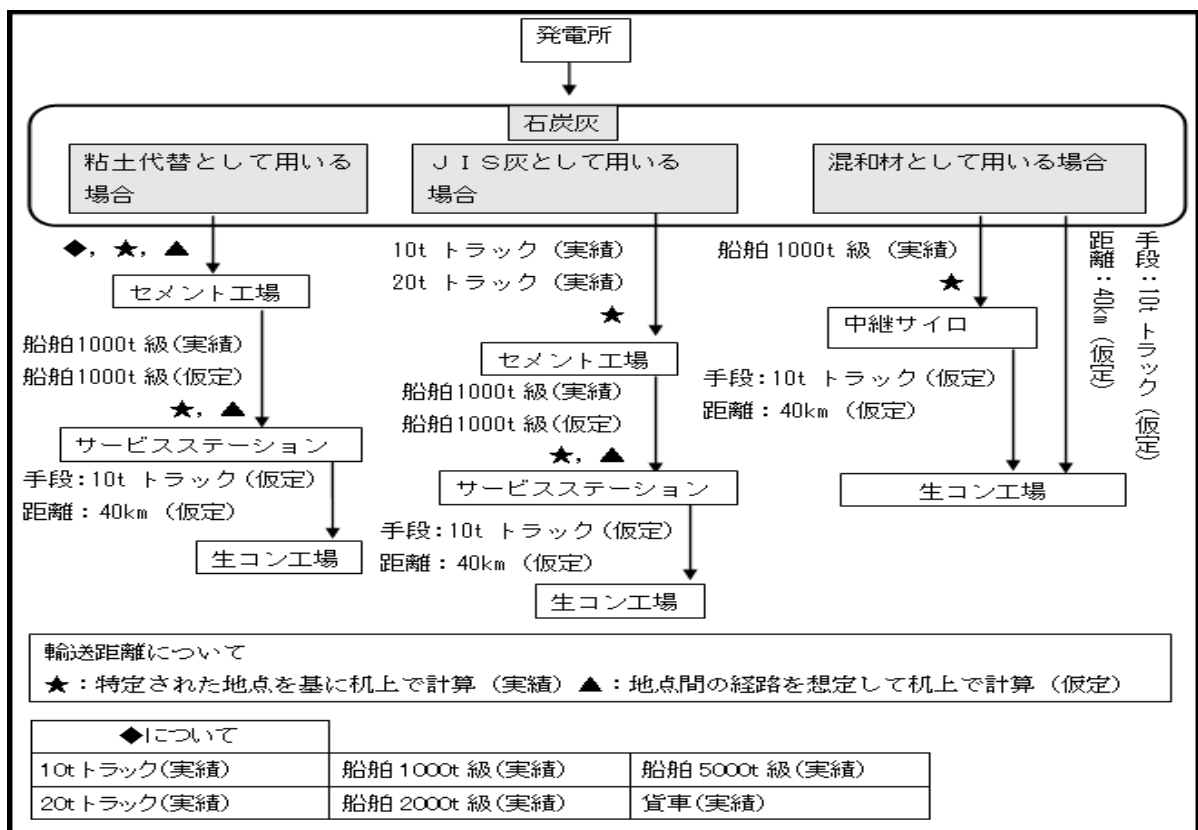
*1 広島大学 工学部第四類 (正会員)

*2 ランデス (株) 本部技術センター研究所所長 修 (工) (正会員)

*3 広島大学 大学院工学研究科 准教授 工博 (正会員)

表－1 輸送に関するインベントリデータ¹⁾

輸送手段		単位 (*)	エネルギー 投入量 (GJ/*)	石油換算 (kg/*)	購入電力 (kWh/*)	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂ /*)	SO _x 排出量 (kg-SO _x /*)	NO _x 排出量 (kg-NO _x /*)	ばいじん 排出量 (kg-PM/*)
トラック	ガソリン2t	km・t	3.00E-03	7.70E-02	-	2.00E-01	6.00E-05	2.50E-04	2.50E-04
	ディーゼル2t	km・t	3.37E-03	7.56E-02	-	2.33E-01	1.79E-04	1.74E-03	1.46E-04
	ディーゼル4t	km・t	2.22E-03	4.97E-02	-	1.53E-01	1.18E-04	1.15E-03	9.64E-05
	ディーゼル10t	km・t	1.77E-03	3.96E-02	-	1.22E-01	9.41E-05	9.14E-04	7.68E-05
	ディーゼル20t	km・t	1.03E-03	2.31E-02	-	7.14E-02	5.49E-05	5.34E-04	4.48E-05
貨車		km・t	5.07E-04	-	5.39E-02	2.00E-02	-	-	-
船舶	500t級	km・t	2.77E-03	5.53E-02	-	1.62E-01	2.80E-03	4.70E-03	7.21E-05
	1000t級	km・t	1.70E-03	3.40E-02	-	9.99E-02	1.72E-03	2.89E-03	4.44E-05
	2000t級	km・t	1.05E-03	2.09E-02	-	6.15E-02	1.06E-03	1.78E-03	2.73E-05
	5000t級	km・t	5.52E-04	1.10E-02	-	3.24E-02	5.59E-04	9.37E-04	1.44E-05
	10000t級	km・t	3.40E-04	6.79E-03	-	1.99E-02	3.44E-04	5.77E-04	8.86E-06



図－1 フライアッシュの利用において設定した輸送経路と輸送手段

粘土代替としてセメント原料の一部に用いる場合、発電所からセメント工場までの輸送手段、輸送量、輸送距離、セメント工場からサービスステーションまでの輸送手段、輸送量は明らかとなったため、これらの値は実績にもとづく値を用いた。ただし、セメント工場からサービスステーションまでの輸送距離は詳細な値が得られなかったため、筆者がそれぞれ距離を机上で算出した値を用いた。図－1に示したように、サービスステーションから生コン工場までの輸送について、輸送手段は10tトラックで輸送距離は40kmと仮定して計算を行っている。また、輸送手段が船舶と判明している大きさが不

明な場合は1000t級の船舶を使用したものとして計算を行った。

JIS灰としてフライアッシュセメントに用いる場合も粘土代替と同様の仮定を設定した。また、JIS灰として用いる場合の加工に伴う環境負荷量を考慮するにあたっては、表－2¹⁾に示されるインベントリデータを使用した。

石炭灰を混和材として用いる場合、輸送経路は図－1に示すとおり、発電所から中継サイロを経由し、中継サイロから各県の県庁所在地の生コン工場へ輸送されるものとした。なお、中継サイロを有しない県もあるので

表－２ 構成材料に関するインベントリデータ¹⁾

構成材料		エネルギー 投入量 (GJ/t)	石油換 算 (kg/t)	購入電力 (kWh/t)	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂ /t)	SO _x 排出量 (kg-SO _x /t)	NO _x 排出量 (kg-NO _x /t)	ばいじん 排出量 (kg-PM/t)
セメント	ポルトランドセメント	3.4	16.24	31.2	765.5	1.22E-01	1.55E+00	3.58E-02
混和材	フライアッシュ	0.43	－	48.2	17.9	6.20E-03	7.54E-03	1.25E-03

その場合は発電所から生コン工場への直送とした。輸送量に関しては、全国生コンクリート協同組合連合会の公表値²⁾の生コン工場の生コン出荷量をもとに、その出荷量の10%までをフライアッシュコンクリート（フライアッシュ混入量：80kg/m³）として有効利用を図った場合の試算結果を用いている。A地域では中継サイロを有しないので、県庁所在地まで直送で輸送されたとし、A地域内の県庁所在地が1か所であるためその輸送距離を80kmとし、輸送手段を10tトラックと仮定した。B地域における発電所から中継サイロまでの輸送距離、輸送手段は、調査結果から明らかとなったため、これらには実績に基づく値を用いた。中継サイロから各県の県庁所在地の生コン工場までの輸送手段と輸送距離は10tトラックで40kmと仮定した。

4. 調査結果および考察

4.1 調査結果

石炭灰の利用実績に関しては、発電所ごとに活用方法

（セメント原料用の粘土代替、フライアッシュセメント原料用のJIS灰、土工材用、土地造成材用、埋立、その他の有効利用）を調査によって明らかにすることができた。また、セメント原料用の粘土代替、フライアッシュセメント原料用のJIS灰に関してはさらに、取引先ならびに取引先ごとの出荷数量等を明らかにすることができ、取引先ごとの追跡調査によって、取引先への石炭灰の輸送手段、輸送量の一部を明らかにすることができた。ただし、これらのデータは内部資料としての扱いに類するものがあるため、ここでは、それらのデータを用いて行った計算結果のみを示し、それについて考察を行っていく。

4.2 粘土代替もしくはJIS灰としての利用実績に基づく環境負荷

A地域とB地域の発電所から発生する石炭灰がセメント原料用の粘土代替あるいはフライアッシュセメント原料用のJIS灰として利用されたときの、輸送に伴う環境負荷量をそれぞれ表－3と表－4に示す。

表－3 発電所から生コン工場までの輸送に伴う環境負荷量（A地域、発電所からの輸送先がセメント会社の場合）

用途		粘土代替	JIS灰	合計
輸送先		セメント会社	セメント会社	
輸送量(t)		276,302	7,784	284,086
発電所～セメント工場	CO ₂ 排出量(kg-CO ₂)	1,311,229	48,353	1,359,582
	SO _x 排出量(kg-SO _x)	20,079	37	20,116
	NO _x 排出量(kg-NO _x)	34,612	362	34,974
	ばいじん排出量(kg-PM)	611	30	641
セメント工場～サービスステーション	CO ₂ 排出量(kg-CO ₂)	7,701,117	217,734	7,918,851
	SO _x 排出量(kg-SO _x)	132,592	3,749	136,341
	NO _x 排出量(kg-NO _x)	222,785	6,299	229,084
	ばいじん排出量(kg-PM)	3,423	97	3,519
サービスステーション～生コン工場	CO ₂ 排出量(kg-CO ₂)	1,348,354	37,986	1,386,340
	SO _x 排出量(kg-SO _x)	1,040	29	1,069
	NO _x 排出量(kg-NO _x)	10,102	285	10,386
	ばいじん排出量(kg-PM)	849	24	873
合計	CO ₂ 排出量(kg-CO ₂)	10,360,700	304,073	10,664,772
	SO _x 排出量(kg-SO _x)	153,711	3,815	157,526
	NO _x 排出量(kg-NO _x)	267,499	6,945	274,444
	ばいじん排出量(kg-PM)	4,883	151	5,034
単位輸送量あたり	CO ₂ 排出量(kg-CO ₂ /t)	37.498	39.064	37.541
	SO _x 排出量(kg-SO _x /t)	0.556	0.490	0.555
	NO _x 排出量(kg-NO _x /t)	0.968	0.892	0.966
	ばいじん排出量(kg-PM/t)	0.018	0.019	0.018

表－４ 発電所から生コン工場までの輸送に伴う環境負荷量(B地域、発電所からの輸送先がセメント会社の場合)

用途		粘土代替	JIS灰	合計
輸送先		セメント会社	セメント会社	
輸送量(t)		293,440	12,994	306,434
発電所～セメント工場	CO ₂ 排出量(kg-CO ₂)	2,340,696	67,284	2,407,980
	SO _x 排出量(kg-SO _x)	35,753	52	35,805
	NO _x 排出量(kg-NO _x)	60,476	504	60,980
	ばいじん排出量(kg-PM)	963	42	1,005
セメント工場～サービスステーション	CO ₂ 排出量(kg-CO ₂)	10,035,944	361,174	10,397,119
	SO _x 排出量(kg-SO _x)	172,791	6,218	179,009
	NO _x 排出量(kg-NO _x)	290,329	10,448	300,778
	ばいじん排出量(kg-PM)	4,460	161	4,621
サービスステーション～生コン工場	CO ₂ 排出量(kg-CO ₂)	1,431,987	63,411	1,495,398
	SO _x 排出量(kg-SO _x)	1,105	49	1,153
	NO _x 排出量(kg-NO _x)	10,728	475	11,203
	ばいじん排出量(kg-PM)	901	40	941
合計	CO ₂ 排出量(kg-CO ₂)	13,808,627	491,869	14,300,497
	SO _x 排出量(kg-SO _x)	209,649	6,319	215,968
	NO _x 排出量(kg-NO _x)	361,533	11,428	372,961
	ばいじん排出量(kg-PM)	6,325	243	6,568
単位輸送量あたり	CO ₂ 排出量(kg-CO ₂ /t)	47.058	37.854	46.667
	SO _x 排出量(kg-SO _x /t)	0.714	0.486	0.705
	NO _x 排出量(kg-NO _x /t)	1.232	0.879	1.217
	ばいじん排出量(kg-PM/t)	0.022	0.019	0.021

ここで、石炭灰を粘土代替として利用する場合は、セメント工場でセメントの一部となるが、石炭灰のみの輸送を考慮するために、セメントの一部となった石炭灰の量と同量がセメント工場からサービスステーションへ、そしてサービスステーションから生コン工場へ輸送されたとして計算を行っている。

粘土代替が発電所からセメント工場、セメント工場からサービスステーションまで輸送されるとき輸送手段は船舶利用が主であり、それに対して JIS 灰ではトラック利用が主たる輸送手段である。表－1に示している通り、船舶利用とトラック利用では単位距離あたりの環境負荷量は船舶利用のほうが小さい。一方、表－3と表－4から、A 地域と B 地域の単位輸送量あたりの環境負荷量を比べると、A 地域のほうは、粘土代替、JIS 灰で環境負荷量はほぼ同じくらいであるのに対し、B 地域のほうは、粘土代替、JIS 灰で環境負荷量に差が生じた。発電所からセメント工場までの輸送で JIS 灰の主な輸送手段はトラック輸送であり、A 地域と B 地域での差はあまり生じない。この差が生じた要因として、発電所からセメント工場までの輸送で粘土代替の輸送手段は船舶輸送であり、その点において両地域の地域特性が影響していると考えられる。A 地域では3か所の発電所のうち石炭灰を粘土代替、JIS 灰として利用する発電所は1か所であった。そのため輸送量が1か所の発電所に集中し、

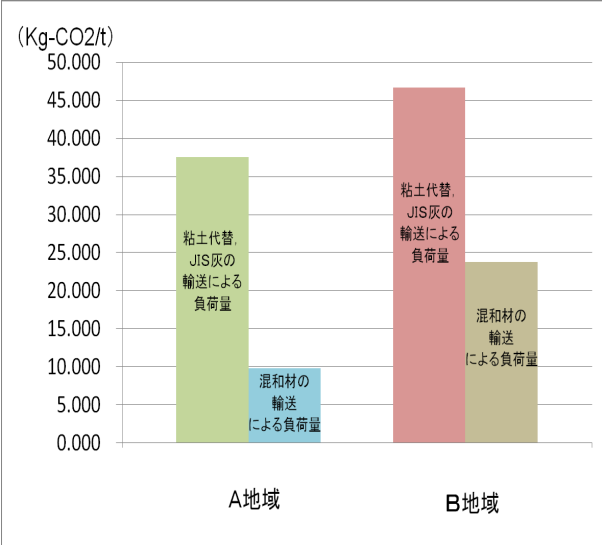
セメント工場への輸送手段として大型の船舶が使用されている。それにより輸送効率が高くなるため、環境負荷量も小さくなっている。一方、B 地域では、発電所からセメント工場へ輸送される石炭灰が複数の発電所から輸送されるため、輸送量が分散し、個々には少量となるにも関わらず、一般的な大きさの船舶が使用されるため、輸送効率が低く、環境負荷量が大きくなっている。また、大型の船舶が使用できる地形であるかどうかという点で、A 地域と B 地域の地域特性の違いであると考えられる。

4.3 混和材としてさらなる有効利用を想定した環境負荷

A 地域と B 地域の発電所から発生する石炭灰を混和材として利用される場合、発電所から中継サイロまでの輸送と中継サイロから各県の県庁所在地の生コン工場へ輸送したときの環境負荷量をそれぞれ表－5、表－6に示す。表－5、表－6から、地域あるいは県によって、単位輸送量あたりの環境負荷量が大きく異なることがわかる。H 県と E 県で輸送手段はいずれも 10t トラックであり、輸送経路も中継サイロを経由せず直送という点で共通している。それぞれの輸送距離が 80km と 40km と異なることから単位輸送量あたりの環境負荷量が H 県は E 県の 2 倍程度となっている。C 県、D 県、F 県、G 県は輸送経路が中継サイロを経由し、輸送手段も同一であることから、発電所から中継サイロまでの輸送距離

表－5 発電所から生コン工場までの輸送に伴う環境負荷量(A地域, 混和材として県庁所在地の生コン工場へ輸送する場合)

県名		H県
輸送量(t)		29,680
発電所～生コン工場 (10tトラック)	CO ₂ 排出量(kg-CO ₂)	289,676
	SOx排出量(kg-SOx)	223
	NOx排出量(kg-NOx)	2,170
	ばいじん排出量(kg-PM)	182
合計	CO ₂ 排出量(kg-CO ₂)	289,676
	SOx排出量(kg-SOx)	223
	NOx排出量(kg-NOx)	2,170
	ばいじん排出量(kg-PM)	182
単位輸送量あたり	CO ₂ 排出量(kg-CO ₂ /t)	9.760
	SOx排出量(kg-SOx/t)	0.008
	NOx排出量(kg-NOx/t)	0.073
	ばいじん排出量(kg-PM/t)	0.006



図－2 各地域の石炭灰の利用方法別の単位輸送量あたりのCO₂排出量(kg-CO₂/t)

表－6 発電所から生コン工場までの輸送に伴う環境負荷量
(B地域, 混和材として県庁所在地の生コン工場へ輸送する場合)

県名		C県	D県	E県	F県	G県
輸送量(t)		12,894	18,269	11,810	7,495	5,391
発電所～各中継サイロ (船舶1000t級)	CO ₂ 排出量(kg-CO ₂)	448,264	447,141	－	74,879	134,640
	SOx排出量(kg-SOx)	7,718	7,699	－	1,289	2,318
	NOx排出量(kg-NOx)	12,968	12,935	－	2,166	3,895
	ばいじん排出量(kg-PM)	199	199	－	33	60
発電所～生コン工場 (10tトラック) (ただし、E県は発電所～ 生コン工場)	CO ₂ 排出量(kg-CO ₂)	62,923	89,152	57,632	36,578	26,308
	SOx排出量(kg-SOx)	49	69	44	28	20
	NOx排出量(kg-NOx)	471	668	432	274	197
	ばいじん排出量(kg-PM)	40	56	36	23	17
合計	CO ₂ 排出量(kg-CO ₂)	511,187	536,293	57,632	111,456	160,948
	SOx排出量(kg-SOx)	7,766	7,767	44	1,317	2,338
	NOx排出量(kg-NOx)	13,439	13,603	432	2,440	4,092
	ばいじん排出量(kg-PM)	239	255	36	56	76
単位輸送量あたり	CO ₂ 排出量(kg-CO ₂ /t)	39.645	29.356	4.880	14.870	29.855
	SOx排出量(kg-SOx/t)	0.602	0.425	0.004	0.176	0.434
	NOx排出量(kg-NOx/t)	1.042	0.745	0.037	0.326	0.759
	ばいじん排出量(kg-PM/t)	0.019	0.014	0.003	0.008	0.014

の差がそのまま単位輸送量あたりの環境負荷量の差となっている。このことから、輸送に伴う環境負荷低減の観点のみからすれば、C県やD県では、大型中継サイロを設置して、大型船舶により発電所から中継サイロへ一括大量輸送するほうが、効率よく輸送でき、その結果、環境負荷量を低減することにつながると考えられる。

4.4 石炭灰の有効利用に関する検討

表－3、表－4と表－5、表－6の単位輸送量あたりのCO₂排出量に関してA地域とB地域の比較を図－2に示

す。ただし、B地域に関しては5つの県の平均値とした。石炭灰をセメント原料用の粘土代替やフライアッシュセメント原料用のJIS灰としてセメント工場へ納入するよりも、混和材として生コン工場へ直販したほうが輸送に関する環境負荷の観点から有利であることがわかる。石炭灰を粘土代替やJIS灰として利用する場合は、発電所からセメント工場、セメント工場からサービスステーション、サービスステーションから生コン工場と3つの経路を経るのに対し、石炭灰を混和材として利用する場

合は発電所から中継サイロ、中継サイロから生コン工場と多くても2つの経路しか経ないので、輸送に関する環境負荷量に大きな差が出るのは明らかである。ここでは、そのことを定量的に明らかにすることができた。

5. 結論

本研究では、循環型社会形成に貢献するために、石炭火力発電所から排出される石炭灰をセメント原料用の粘土代替、フライアッシュセメント原料用の JIS 灰、混和材のそれぞれの輸送に関する環境負荷量を算出し、輸送に関する環境負荷低減の観点からフライアッシュの有効利用について検討した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) フライアッシュの有効利用を考えると、環境負荷の観点からは、輸送に伴う環境負荷量が大きな割合を占め、輸送手段等の選択が重要となる。
- (2) 単位輸送量あたりの環境負荷量で比較したとき、船舶輸送が必ずしもトラック輸送よりも有利となるとは限らない。
- (3) 粘土代替としてセメント原料の一部に利用あるいは

は JIS 灰としてフライアッシュセメントの原料として利用するよりも、混和材として利用したほうが輸送に伴う環境負荷量は小さくなる。

謝辞

本研究で使用した調査データは、筆者の一人が土木学会コンクリート委員会フライアッシュ有効活用研究小委員会の委員会活動を通じて得たものである。調査にご協力いただいた電力会社関係各位に衷心より謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリートの環境負荷評価（その2）、コンクリート技術シリーズ 62, pp.39-40, 2004
 - 2) 全国生コンクリート協同組合連合会：生コン出荷実績, 2006
- 白野武, 斎藤直, 河合研至：フライアッシュの輸送に伴う環境負荷の実態調査, 土木学会第 62 回年次学術講演会講演概要集第 7 部, pp.171-172, 2007