

論文 フライアッシュの輸送に伴う CO₂ 排出量に関する検討

青木 雄祐^{*1}・藤木 昭宏^{*2}・岩谷 祐太^{*3}・河合 研至^{*4}

要旨：建設業界では工事そのものが大規模であり、それに伴う環境負荷量も莫大なものとなる。環境負荷低減を推進していくためには、まず環境負荷量を定量的に示すことが不可欠である。本研究では、その一環としてコンクリート材料として用いられているフライアッシュに着目し、石炭火力発電所から輸送される際の利用方法別の輸送に関する CO₂ 排出量を算出した。さらに、輸送手段、輸送先の適正化を図ることにより、現状の総 CO₂ 排出量と比較して、粘土代替利用では最大 50%低減、JIS 灰利用では最大 60%低減、土工材利用では最大 30%低減することができた。

キーワード：フライアッシュ、粘土代替、JIS 灰、土工材、環境負荷、輸送、CO₂ 排出量

1. はじめに

気候変動に関する政府間パネル (IPCC) が 2007 年に取りまとめた第 4 次評価報告書によると、2100 年には平均気温が推定値で 1.8~4°C (最大推計 6.4°C)、海面水位は平均推計で 38.5cm (最大推計 59cm) 上昇するとされている。また、日本の温室効果ガス総排出量は約 13 億 4000 万 t にもおよび、そのうち CO₂ 排出量は 12 億 7400 万 t であった。建設業界にかかわる CO₂ 排出量は全体の 20~30%を占め、地球温暖化に与える影響は大きいと考えられる¹⁾。

2008 年 G8 北海道洞爺湖サミットでは、2050 年までに世界全体の温室効果ガスの排出量を少なくとも、50%削減するという長期的な目標を世界全体の目標として採択することを求めている。現在、構造物の設計は安全性、使用性、耐久性に関しておもに検討されている²⁾。ここに、構造物が環境に負荷を及ぼす影響の程度として環境性能を設定し、要求性能としての環境性能を満足するよう照査、検討を行うことによって環境負荷低減への足がかりとなるとされている。

建設業界、特にコンクリート分野では工事の規模が大きく地球環境に与える影響も非常に大きく、材料製造から輸送、解体、廃棄に至る過程において多くの CO₂ を排出する。しかし、CO₂ 排出量削減の余地は十分に有しており、構造物の材料製造から輸送、解体、廃棄に至る過程において環境負荷量である CO₂ 排出量を定量的に表示することで、削減に関する検討を容易に行うことが可能となる。

本研究では、石炭火力発電所の副産物であるフライアッシュに着目し、その利用方法ごとの発電所からの輸送に関する環境負荷量とそれを低減するための方策につ

いて検討を行った。環境負荷の観点からは産業副産物にかかる環境負荷量は副産物を製品として加工する段階以降で考慮し、副産物排出過程における環境負荷は除外することが一般的である。例えば、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それ以降の輸送に伴う環境負荷量について考慮する。したがって、フライアッシュを利用する際には、フライアッシュに加工する負荷量よりも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考えられる。

また、フライアッシュの排出地点は所在地が限られている石炭火力発電所であり、輸送経路や輸送手段によっては環境負荷量が多くなる可能性がある。そこで、全国各地の石炭火力発電所から排出されるフライアッシュの輸送の在り方について環境負荷の観点から検討を行い、環境負荷低減につながる輸送の在り方を考察した。

2. 調査概要

国内の各電力会社 (北海道電力、東北電力、東京電力、北陸電力、中部電力、関西電力、中国電力³⁾、四国電力、九州電力、沖縄電力、電源開発の 11 社) の石炭火力発電所から排出されるフライアッシュについてヒアリング調査を行った。調査項目としては各発電所から排出されるフライアッシュの利用方法、輸送量、輸送距離、輸送手段、輸送先所在地である。

なお、環境負荷評価を行う対象インベントリは CO₂ 排出量とし、環境負荷量を算出する上で必要なインベントリデータは表-1^{4), 5)} の値を用いた。

*1 広島大学 大学院工学研究科 社会環境システム専攻 (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 工学部第四類 社会基盤工学課程 (正会員)

*4 広島大学 大学院工学研究科 社会環境システム専攻 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^{4), 5)}

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 /*)
トラック	ディーゼル 10t	km*t	1.77E-03	3.96E-02	—	1.22E-01
	ディーゼル 20t	km*t	1.03E-03	2.31E-02	—	7.14E-02
貨物列車		km*t	5.07E-04	—	5.39E-02	2.19E-02
船舶	1000t 級	km*t	1.70E-03	3.40E-02	—	9.99E-02
	2000t 級	km*t	1.05E-03	2.09E-02	—	6.15E-02
	5000t 級	km*t	5.52E-04	1.10E-02	—	3.24E-02

3. フライアッシュの利用と輸送の実態

ヒアリング調査の結果から得られたフライアッシュの利用実態について図-1 に示す。フライアッシュの総排出量は約 690 万 t であり、そのうち約 650 万 t が有効利用されている。内訳としては 62% が粘土代替、6% が JIS 灰、7% が土工材、25% がその他の有効利用に用いられている。有効利用されているフライアッシュの大半が粘土代替利用であり、フライアッシュの利用は粘土代替利用に依存している傾向にある。

また、フライアッシュの利用方法として粘土代替、JIS 灰、土工材として利用される場合の発電所から各取引先までの輸送に伴う環境負荷について検討を行った。各利用方法の輸送経路については図-2 に示すとおりである。ただし、ここで述べている粘土代替とはセメント製造時に用いる粘土の代替品としてフライアッシュを用いる方法、JIS 灰とは JIS A 6201 に適合するように石炭灰を電気集塵機で分級し、それをセメント工場でフライアッシュセメント用の原料として用いる方法である。また、土工材とは、土木工事現場で土工材料として石炭灰を用いる方法である。

表-2 はフライアッシュの利用方法別の輸送手段と輸送量の関係について示したものである。フライアッシュを粘土代替として用いる場合、発電所から排出されたフライアッシュはセメント工場へ輸送される。粘土代替の主な輸送手段は船舶輸送であり輸送手段全体の 83.9% を占める。次いでトラック輸送が 14.4%、貨物列車輸送については 1.8% 程度である。粘土代替は需要量が安定しており流通が盛んであることから、粘土代替の輸送に関する設備が整っている。そのために船舶輸送の割合が非常に高い結果となっている。トラック輸送に関しては、内陸部のセメント工場へ輸送する際に必要となってくるために 2 番目に高い利用率となっている。

フライアッシュを JIS 灰として利用する場合、粘土代替と同様セメント工場へ輸送される。JIS 灰は船舶輸送が 51.1%、トラック輸送が 48.9% と船舶、トラックともに利用されている。JIS 灰は粘土代替と比べると安定した供給が行われておらず、そのため大規模な設備が必要

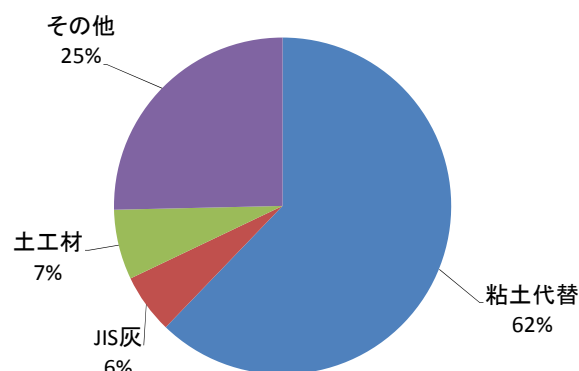


図-1 フライアッシュの利用実態 (電力会社合計)

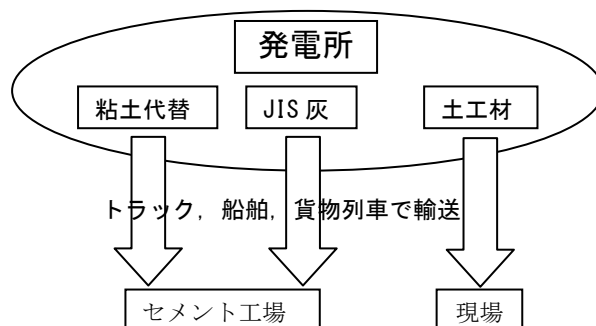


図-2 フライアッシュの利用方法別輸送経路

表-2 フライアッシュの利用方法別輸送手段と輸送量の関係

	船舶	トラック	貨物列車
粘土代替	83.9%	14.4%	1.8%
JIS 灰	51.1%	48.9%	—
土工材	48.0%	52.0%	—

な船舶輸送よりはトラック輸送の方が利用しやすいと考えられる。

土工材の輸送手段の実態は船舶輸送が 48.0%、トラック輸送が 52.0% である。土工材のトラック輸送が多い理

由は、粘土代替や JIS 灰とは異なり現場へ直接輸送するためであり、内陸部の現場が多いことが挙げられる。船舶輸送も行われているが、現場が沿岸部で利用されたものであると考えられる。

4. 調査結果および考察

4.1. 調査結果

ヒアリング調査を行うことによって、各発電所のフライアッシュの利用方法ごとの輸送に関するデータ（粘土代替、JIS 灰、土工材の輸送量、輸送手段、輸送距離、行き先）を明らかにすることができた。ただし、調査によって船舶もしくはトラックの大きさが明らかとならないものが一部あり、それらについては、船舶の場合はデータに応じて船舶 1000t 級もしくは船舶 2000t 級、トラックの場合は 10t トラックであるものと仮定した。

4.2. 粘土代替の輸送に関する環境負荷

粘土代替が発電所から各々のセメント工場へ輸送された場合について輸送距離と輸送手段ごとの CO₂ 排出量を算出した。その結果を図-3 に示す。10t トラックと 20t トラックは運搬能力が船舶と比べて非常に少なく、輸送手段として用いられる場合は比較的発電所から近いセメント工場に限られてくる。そのため、トラック輸送の場合は輸送量が少なく輸送距離も短いため船舶輸送と比べると CO₂ 排出量は少ない。粘土代替が輸送される際に用いられる船舶は船舶 1000t 級、船舶 2000t 級、船舶 5000t 級であり、3 種類とも長距離輸送が行われている。船舶について比較すると、船舶 5000t 級は一括大量輸送が可能であり輸送効率が高いため、長距離輸送の際もあまり CO₂ 排出量は多くない。船舶 2000t 級についても数か所 CO₂ 排出量が多い区間もあるが、全体的には CO₂ 排出量は少ない。船舶 1000t 級は多く利用されており、どの区間においても全体的に CO₂ 排出量が多い。表-1 に示されているように 1t の物を 1km 運ぶ時の CO₂ 排出量は、船舶 5000t 級と比べると船舶 1000t 級は 3 倍以上も多く排出される。そのため、大型船舶輸送が可能であるならば利用した方が CO₂ 排出量の低減につながるといえる。

次に、ヒアリング調査によって明らかとなった粘土代替の輸送実態から CO₂ 排出量低減の可能性を輸送量の配分、輸送先の変更の点について検討を行い、総 CO₂ 排出量の算出を試みた。図-4 はその結果を示したものである。ここで、検討案を作成するための条件について以下に示す。

(1) 輸送先の変更について

まず、日本全体を 10 地域（北海道、東北、関東、北陸、中部、近畿、中国、四国、九州、沖縄）に分割し、発電所を所属地域に分ける。発電所の粘土代替の輸送量

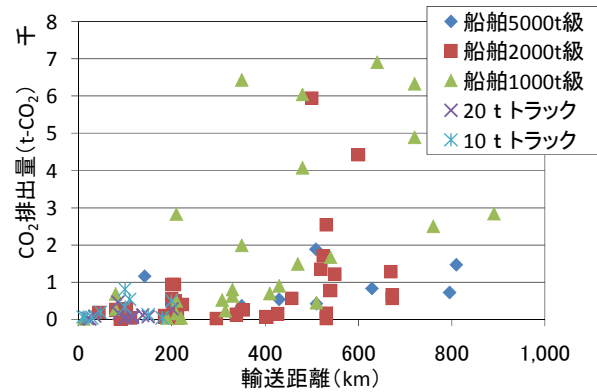


図-3 粘土代替の輸送距離と輸送手段における CO₂ 排出量の分布

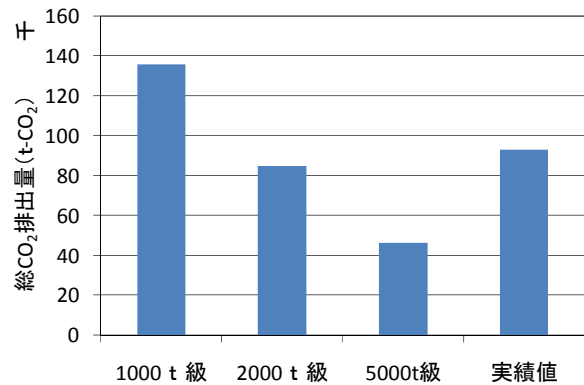


図-4 粘土代替の輸送に伴う総 CO₂ 排出量の 実績値と検討案の比較

を分割した地域ごとに総和をとり、それをその地域の粘土代替供給量とした。輸送先（需要側）であるセメント工場も同様に所属地域ごとに分け、輸送量の総和をとりそれをその地域における粘土代替需要量とした。次に、供給する地域と供給される地域が極力同一となるように各発電所の輸送先を決定し、供給量が需要量より多い場合には供給量が不足している近傍の地域に輸送するようにした。

(2) 輸送距離について

輸送距離は、実績値を参考に最短距離で輸送できるように設定を行った。また、実績値から推定できない場合には想定した輸送ルートでの輸送距離について地図を用いて算出した。

(3) 輸送手段について

大まかな輸送手段（船舶輸送かトラック輸送かの選択）は実績値を参考に設定した。ただし、輸送先の変更によって新たに出てきたルートに関しては、セメント工場が内陸にある場合はトラック輸送、沿岸にある場合は船舶輸送と設定した。さらに、船舶輸送の場合は、利用する船舶について、船舶 1000t 級で固定した場合、船舶 2000t 級で固定した場合、船舶 5000t 級で固定した場合の 3 パ

ターンについて算出を行った。また、トラック輸送に関しては一律 10t トラックで輸送されるものと設定した。

以上の条件を基に粘土代替の輸送に伴う総 CO₂ 排出量について算出した。その結果を図-4 に示す。図-4 に示すとおり検討案では船舶 5000t 級固定が最も CO₂ 排出量が少なく抑えることができ、船舶 2000t 級固定、船舶 1000t 級固定の順となった。船舶 5000t 級固定では、実績値から約 50%も CO₂ 排出量を削減することができる。逆に、船舶 1000t 級固定では 50%も CO₂ 排出量が増加する結果となった。

4.3. JIS 灰の輸送に関する環境負荷

ヒアリング調査の結果から JIS 灰は発電所からセメント工場へ輸送される以外にも排出されるが、用途が不明であったためここでは発電所からセメント工場へ輸送される分以外は除外した。JIS 灰は図-1 でも示したように粘土代替と比較すると排出量は少なく、さらにフライアッシュセメント原料用となると粘土代替の 10 分の 1 にも満たない。

JIS 灰が発電所からセメント工場へ輸送される場合の輸送距離と輸送手段ごとの CO₂ 排出量について図-5 に示す。JIS 灰の輸送では船舶 2000t 級、船舶 1000t 級、20t トラック、10t トラックを利用している。図-5 からわかるように船舶の利用はほとんどなく、主にトラック輸送である。全体的に輸送距離が短く輸送量も多くないことが、トラック輸送が多く利用されている要因であると考えられる。主に利用されている 20t トラックと 10t トラックでは 20t トラックが全体的に CO₂ 排出量が多い。表-1 に示したとおり 20t トラックと 10t トラックの CO₂ 排出量のインベントリデータは 1.5 倍程度の差である。また、輸送距離は数十 km から数百 km オーダーで変化するのに対し、輸送量は数百 t から数万 t のオーダーで変化する。図-5 中の 10t トラックが輸送距離は長い CO₂ 排出量が少ないのは輸送量が非常に少ないためであり、10t トラックより輸送効率のよい 20t トラックが輸送距離は短い CO₂ 排出量が多いのは、非常に多い輸送量の影響が出ているためであると考えられる。

JIS 灰に関しても粘土代替同様、CO₂ 排出量低減の検討案として輸送量の配分、輸送先の変更を行い、総 CO₂ 排出量を算出した。その結果を図-6 に示す。JIS 灰の検討案作成に用いた条件を以下に示す。

(1) 輸送先の変更について

まず、粘土代替同様、日本全体を 10 地域に分割し、発電所を所属地域に分ける。発電所の JIS 灰の輸送量を分割した地域ごとに総和をとり、それをその地域の JIS 灰供給量とした。輸送先（需要側）であるセメント工場も同様に所属地域ごとに分け、輸送量の総和をとりそれをその地域における JIS 灰需要量とした。次に、供給す

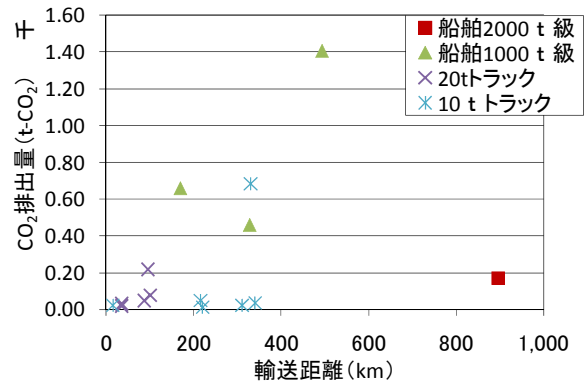


図-5 JIS 灰の輸送距離と輸送手段における CO₂ 排出量の分布

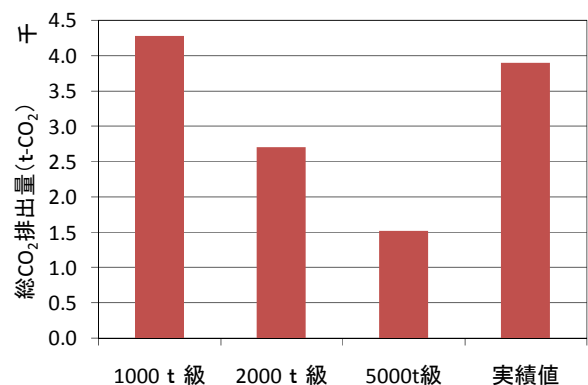


図-6 JIS 灰の輸送に伴う総 CO₂ 排出量の 実績値と検討案の比較

る地域と供給される地域が極力同一となるように各発電所の輸送先を決定した。ただし、JIS 灰の場合は粘土代替とは異なり供給量と需要量が地域内で一致する地域（不足分が無い地域）がほとんどであり同一地域内で需要と供給のバランスが取れている。また、需要のない地域でも供給が可能である地域が 1 か所あり、他の地域での不足分は全てその地域で供給することとした。

(2) 輸送距離について

粘土代替同様、輸送距離は実績値を参考に最短距離で輸送できるように設定を行った。また、実績値から推定できない場合には想定した輸送ルートについて地図を用いて算出した。

(3) 輸送手段について

粘土代替同様、大まかな輸送手段（船舶輸送かトラック輸送かの選択）は実績値を参考に設定した。ただし、輸送先の変更によって新たに出てきたルートに関しては、セメント工場が内陸にある場合はトラック輸送、沿岸にある場合は船舶輸送と設定した。また、トラック輸送を行う区間で輸送量が増加した場合、船舶輸送に変更を行い、その輸送距離に関しては海上ルートを想定して設定を行った。トラック輸送に関しては一律 10t トラッ

クで輸送されるものと設定した。

以上の条件を基に JIS 灰の輸送に伴う総 CO₂ 排出量の実績値と検討案について算出した。図-6 に示すとおり検討案では粘土代替同様、CO₂ 排出量は船舶 5000t 級固定<船舶 2000t 級固定<船舶 1000t 級固定となった。実績値では船舶 5000t 級の利用は見られないので現実的であるとは言えないが、CO₂ 排出量は実績値に比べて半分以上になり、船舶 2000t 級固定でも約 30%程度 CO₂ 排出量が低減できる結果となった。

4.4. 土工材の輸送に関する環境負荷

土工材は粘土代替や JIS 灰とは異なり、図-2 に示すとおり発電所から現場へ直送される。今回の調査では生コン工場へ輸送されるものは得られなかったため、ここでは現場へ直送される土工材の輸送に関する CO₂ 排出量について検討を行った。図-1 より土工材は JIS 灰より利用量が多いが、粘土代替と比べると少ない。土工材は粘土代替や JIS 灰よりも現場に輸送される行程が少ないため、輸送の観点からの環境負荷は有利であるといえる。ただし、土工材の場合は現場の需要に応じて輸送されているため現場ごとに輸送先も輸送量も輸送距離も輸送手段も変化する。

土工材が発電所から現場へ輸送される場合の輸送距離、輸送手段ごとの CO₂ 排出量を図-7 に示す。土工材の輸送手段は船舶 1000t 級、20t トラック、10t トラックである。輸送距離が粘土代替や JIS 灰と比べると短いのは発電所から比較的近くの現場へ輸送されているためである。全体的に船舶 1000t 級の CO₂ 排出量がトラック輸送に比べて多いという結果になった。4.3 でも述べたとおり、輸送に関する CO₂ 排出量は輸送量と輸送距離とインベントリデータに依存する。輸送量と輸送距離のオーダーが異なるため、CO₂ 排出量低減を検討する上で輸送量と輸送距離に応じた輸送手段を選択することが重要となってくる。

土工材に関しても粘土代替、JIS 灰同様、CO₂ 排出量低減の検討案として輸送量の配分、輸送先の変更を行い、総 CO₂ 排出量を算出した。その結果を図-8 に示す。土工材の検討案作成に用いた条件を以下に示す。

(1) 輸送先の変更について

上記同様、日本全体を 10 地域に分割し、発電所を所属地域に分ける。発電所の土工材の輸送量を分割した地域ごとに総和をとり、それをその地域の土工材供給量とした。輸送先（需要側）である現場も同様に所属地域ごとに分け、輸送量の総和をとりそれをその地域における土工材需要量とした。また、供給する地域と供給される地域が極力同一となるように各発電所の輸送先を決定した。ただし、土工材の場合は基本的に供給地域と需要

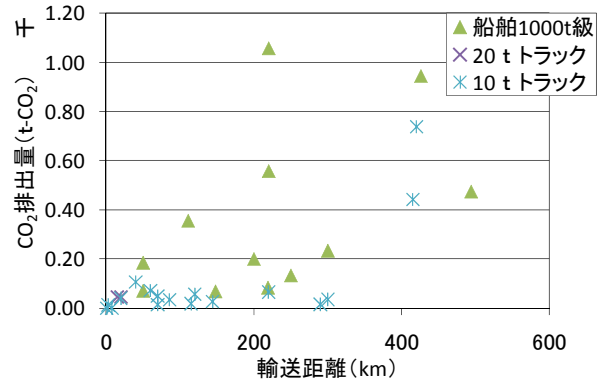


図-7 土工材の輸送距離と輸送手段における CO₂ 排出量の分布

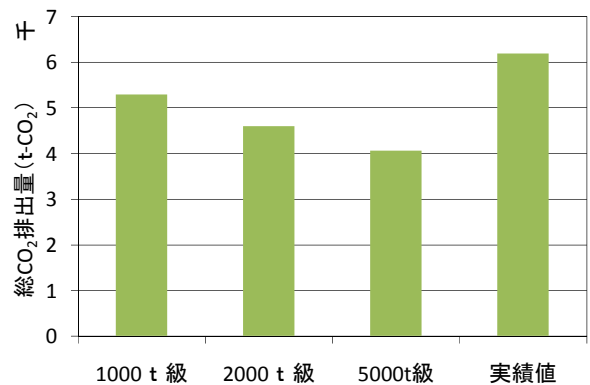


図-8 土工材の輸送に伴う総 CO₂ 排出量の実績値と検討案の比較

地域が一致しているため、変更を行ったのは一部である。

(2) 輸送距離について

供給地域、需要地域がほとんど一致しているため、輸送距離は実績値を用い、不明な場合のみ実績値を参考に最短距離で輸送できるように設定を行った。また、実績値から推定できない場合には想定した輸送ルート of 輸送距離について地図を用いて算出した。

(3) 輸送手段について

輸送距離の設定同様、輸送手段（船舶輸送かトラック輸送かの選択）は実績値を参考に設定した。ただし、粘土代替や JIS 灰同様、輸送先の変更によって新たに出てきたルートに関しては、セメント工場が内陸にある場合はトラック輸送、沿岸にある場合は船舶輸送と設定した。また、トラック輸送に関しては一律 10t トラックで輸送されるものと設定した。

以上の条件を基に土工材の輸送に伴う総 CO₂ 排出量について算出した。図-8 に示すとおり検討案では粘土代替、JIS 灰同様、CO₂ 排出量は船舶 5000t 級固定<船舶 2000t 級固定<船舶 1000t 級固定となった。しかし、粘土代替や JIS 灰とは異なり大幅な CO₂ 排出量低減には至らなかった。これは、調査結果の輸送先と検討案の輸送先

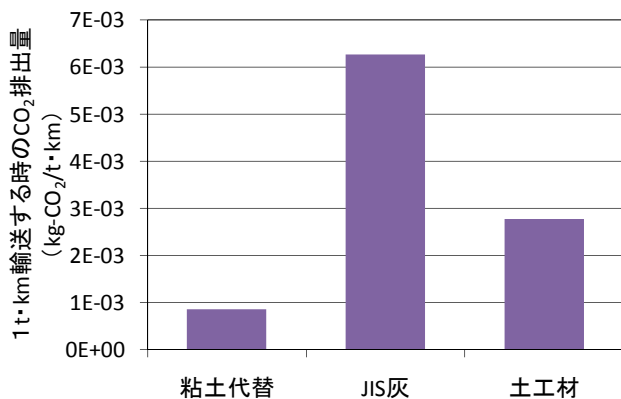


図-9 各利用方法別の輸送に関するCO₂ 排出量インベントリデータ

で変更された箇所が少ないので、それに伴い輸送距離に変化が生じなかったためである。さらに、実績値では船舶の利用は船舶 1000t 級のみであるため検討案の船舶 1000t 級固定とあまり差が生じなかった。しかし、船舶 5000t 級、船舶 2000t 級、船舶 1000t 級のいずれも CO₂ 排出量は実績値より少ないので、検討案が実現されれば CO₂ 排出量を低減できる可能性があることを示している。

5. 各利用方法別の輸送に関する原単位

粘土代替、JIS 灰、土工材について各利用方法別に輸送に関する CO₂ 排出量原単位を算出した。それを図-9 に示す。図-9 はそれぞれを 1t, 1km 輸送した場合の CO₂ 排出量であり、粘土代替の場合が最も小さい CO₂ 排出量で輸送していることになる。次いで土工材が小さいが、粘土代替から比べると約 3 倍もの CO₂ を排出することになる。JIS 灰に関しては粘土代替の約 7 倍、土工材の約 2 倍もの CO₂ を排出するという結果になった。粘土代替の場合は需要量が安定しており、輸送設備がある程度整っているために輸送効率が良いということが考えられる。逆に、JIS 灰は需要が安定していないため輸送設備が十分ではないため輸送効率が悪いということが考えられる。

6. まとめ

本研究では、発電所から排出されるフライアッシュの利用方法別の輸送に関する CO₂ 排出量を算出し、比較、評価を行った。また、実績値と検討案を比較し環境負荷

低減の可能性を探った。これらの結果から明らかとなった事項について以下に示す。

- (1) 輸送に関する CO₂ 排出量は輸送量、輸送距離、輸送手段の 3 項目に依存するため、輸送の観点から CO₂ 排出量を少なくするためには輸送量、輸送距離に応じた輸送手段の選択が必要であることが分かった。
- (2) 実績値と検討案については、粘土代替の場合は最大 50%低減、JIS 灰の場合は最大 60%低減、土工材の場合は最大 30%低減することができた。ただし、今回の場合は船舶の大きさを固定し、トラックに関しては一律 10t トラックと設定したので、より一層 CO₂ 排出量を低減するためにはさらに細かな設定が必要となる。
- (3) 粘土代替の場合は供給量と需要量が多く、その結果輸送に関する設備が整っているため CO₂ 排出量原単位は他の利用方法と比較すると小さい。その反面、JIS 灰の場合は供給量、需要量が少ないため輸送設備が十分でないため CO₂ 排出量原単位が大きい。

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) 環境省：環境循環型社会白書（平成 20 年版），pp.116-118，2008.8
- 2) 土木学会：コンクリート構造物の環境性能照査指針（試案），コンクリートライブラリー125，pp.3-4，2005.11
- 3) 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
- 4) 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.39-40，2004.9
- 5) 土木学会：コンクリートの環境負荷評価，コンクリート技術シリーズ 44，pp.24-38，2002.5