論文内容要旨

モンゴル国におけるフライアッシュの有効利用に関する研究

- 技術開発と現地適用性を中心に -

Study on Effective Utilization of Fly Ash in Mongolia: Focusing on Technology Development and Local Adaptability

東北大学大学院国際文化研究科

国際文化交流論専攻

鹿島大雄

指導教員

ディニル　プシュパラール　教授

木谷　忍　教授

1. 研究の背景

モンゴル国は国内に 1624 億トンの石炭資源を有し [1]，世界でも重要な石炭の輸出国である一方，国内の一次エネルギーの大部分が石炭火力発電により供給されている。モンゴル国における石炭の国内生産量は 2025 年に 9,000 万トンに達することが予想され [2]，また日本との経済連携協定の締結 [3]，さらに，モンゴル南部にあるタバン・トルゴイ炭田に関する日本・モンゴル鉱物資源開発官民合同会議における投資対象としての注目 [4] など，今後さらに炭田開発は加速し，それに伴い石炭消費量も増加していくと考えられる。

石炭火力発電では副産物として燃焼させた石炭の内，約 10％のフライアッシュが発生する [5]。首都ウランバートル市に電力の大部分を供給しているウランバートル第四火力発電所 (以後，第四火力発電所) ，現在建設中の第五火力発電所から排出されるフライアッシュは 2025 年には最大で約 73 万トンに達すると予測されている [6] [7]。

しかし，モンゴル国において，排出されたフライアッシュの学術的検討は未だ少なく，圧縮強度特性が明確でないため，各レディーミクストコンクリート会社も使用を控えた結果 [8]，第四火力発電所付近の灰捨て場に廃棄され，強風時に風で舞い上がっている。この灰捨て場の付近にはゲル地域が広がっており，ゲル地域の住民がフライアッシュを吸引することによる塵肺や珪肺症等の健康被害 [9] [10] に加え，近隣地域の汚染並びに，他国への長距離越境汚染の可能性 [11] [12] も示唆されており，その処理や有効利用法の確立は重要な課題となっているが，現状有効な解決方法は提案されていない。

2. 本研究の目的

本研究では，モンゴル国で排出される大量のフライアッシュの処理や有効利用法として，モンゴル産フライアッシュ及び，そのフライアッシュを混和したコンクリート (以後，フライアッシュコンクリート) の特性について検討する。特に，モンゴル国に適した技術を目指し，フライアッシュの化学的特性，当該地域への適用性に関しても検討し，モンゴル国における建設産業でのフライアッシュコンクリートの利用促進の実現を目的とする。

3. 先行研究と本研究の新規性

フライアッシュを使用している各企業に対してのアンケート調査に関する先行研究として，成田らはフライアッシュコンクリートの利用実態，利用促進に関する阻害要因の把握を目的に，レディーミクストコンクリート工場，施工会社，設計事務所に対してアンケート調査を実施した [13]。その結果，フライアッシュコンクリートの普及のためには，フライアッシュの供給者からの情報提供，安定した品質での大量供給，地域による供給バランスの解消，フライアッシュの使用に関する指針整備の必要性を指摘した。

深瀬らは寒冷地におけるフライアッシュコンクリートの利用実態，利用者の認識の把握を目的

として，北海道内のレディーミクストコンクリート工場，施工会社，設計事務所，コンクリート製品製造工場，発注機関に対してアンケート調査を実施した[14]。その結果，フライアッシュをコンクリート混和材として利用する目的は主として水和熱低減と乾燥収縮によるひび割れの抑制であると報告した。フライアッシュを混和材として使用する効果は，全般的に高評価である一方で，中性化と凍結融解への抵抗性，初期強度や空気連行性に関しては低評価であった。さらに，利用拡大の手法として認知度の向上，設計による仕様指定の必要性を指摘した。

しかし，いずれも日本国内の各企業を対象としたアンケート調査であり，モンゴル国内での状況の把握を目的としたインタビュー調査を実施し，利用実態や利用者の認識，利用促進の阻害要因について考察した研究は存在しない。

モンゴル産フライアッシュに関する先行研究として Narantuya Batmunkh らはモンゴル国内で採取したフライアッシュに対して，化学的検討を行った上で，モルタル試験体を作製し，圧縮強度特性について報告した[15]。

J. Temuujin らはウランバートル第四火力発電所から入手した Baganuur 炭鉱より採取された石炭から排出されたフライアッシュ (以後，Baganuur フライアッシュ)，Shivee ovoo 炭鉱より採取された石炭から排出されたフライアッシュ (以後，Shivee ovoo フライアッシュ) を混和材として使用した硬化体を作成し，建築物への利用可能性について検討した[16]。凍結融解試験の結果， Baganuur フライアッシュは，Shivee ovoo フライアッシュよりもライムや非結晶性のカルシウム化合物の含有量が少なく，硬化体の耐凍害性が優れていると述べた。また，Baganuur フライアッシュ，Shivee ovoo フライアッシュ，各フライアッシュを混和した硬化体の放射線量の測定 (ラジウム，トリウム，カリウム) も実施した。その結果，硬化体の放射線量は，フライアッシュ原粉と比較し，ラジウム，トリウムともに大きく減少し，モンゴル国の基準を満たしたことから，建築物への使用が可能であると報告した。

高カルシウムフライアッシュを混和材として使用した先行研究として，Dan Ravina らはカルシウム含有量が 10 % 以上（ASTM，Class C），10%以下のフライアッシュ（ASTM，Class F）をコンクリート混和材としてそれぞれ多量に混和した際の圧縮強度への影響について報告した[17]。その結果， Class C フライアッシュは反応性の高い結晶質又，非結晶質を多く含有するため反応性が高く，特に早期の段階（材齢 90 日未満）での強度増進が顕著であった。その一方，Class F フライアッシュの反応性は粒径の影響を受けるが，長期的に強度増進が継続した。

L. H. Jiang らは化学組成の異なるフライアッシュを多量に混和したコンクリートの単位水量の減少効果についての報告した[18]。その結果，フライアッシュのカルシウム含有量と圧縮強度には相関関係があるが，高カルシウムフライアッシュ特有の高いアルカリ含有量が強度に影響を与えることを明らかとしている。

Yamei Zhang らは，カルシウム，三酸化硫黄の含有量の高いフライアッシュを多量に混和したコンクリートは水和反応の初期段階でエトリンガイトを生成し，間隙の高密度化が進行するためカルシウム，三酸化硫黄の含有量の低いフライアッシュを混和したコンクリートと比較し，初期

材齢で若干の高い強度を示すと報告している[19]。

C.S. Poon らは Class F フライアッシュを混和材として使用し，刺激剤として硬石膏 (無水硫酸カルシウム) (以後，硫酸カルシウム) を添加し，促進養生を行ったモルタルの特性について検討した[20]。その結果，添加する硫酸カルシウムには適切な量が存在し，Yamei Zhang ら[21] と同様に，初期材齢での強度増進は水和反応の初期段階でのエトリンガイトの形成に起因すると報告した。

しかしモンゴル国内において排出されるフライアッシュに着目した研究は未だ少なく，加えてその中でも高いカルシウム含有量，並びに硫酸カルシウムの有無がコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響に焦点を当てた研究は存在しない。

フライアッシュの簡易的な品質評価方法として，山本らはフライアッシュのポゾラン反応性及びアルカリシリカ反応抑制効果の評価を目的に API 法を提案している[22]。その結果，モルタル試験による活性度指数と API 値に高い相関関係が認められ，フライアッシュのポゾラン反応性を短時間で評価できると報告した。さらに従来法である JIS 法の場合，ポゾラン反応性の評価に数ヵ月を要したが，API 法の場合，1 - 2 日という短時間での評価を可能とした。

楠らはフライアッシュの品質評価として，未燃焼炭素量の元素分析計による定量法，モルタル試験によるフライアッシュコンクリートの品質評価法を提案した[23]。いずれも既存の JIS 法と比較し，簡易的になっており，今後生コン工場においてフライアッシュの品質変動への迅速な対応の実現を示唆した。

しかし，いずれの方法も既存の方法と比較し，短時間で測定できる点は優れているが，高カルシウムフライアッシュにおいても同様の結果が得られるかは検討の余地がある。加えて，いずれの方法も特別な分析機器が必要となり，設備の十分でない場所や現場での測定はできない。

林田らはセメント中の硫酸イオンの定量方法としてホウ酸トリウム-アマランス化合物による比色分析を提案した[24]。本手法では約 30 分程度で硫酸イオンが定量でき，精度，再現性ともに良好であった。

西口らは飼料中のカルシウムの定量方法として，オルトクレゾールフタレインコンプレキソン法によるカルシウムの比色分析をより簡易化した方法を提案した[25]。本手法は簡易的であることに加え，共存元素の影響を受けない利点を有している。

しかし，いずれの方法もフライアッシュの成分分析は想定しておらず，林田の方法は初心者が実施するには少々難解である点，西口らの方法では設備の不足した場所や現場での測定には利用できない点，いずれの方法も特別な分析機器が必要である点などの欠点がある。

以上のように，フライアッシュの利用実態の把握，フライアッシュを混和したコンクリートに関する研究，フライアッシュの品質評価並びに各種定量分析法に関する研究は以前から多くの報告がある。しかし，これらの研究において，技術を実用化するにあたり，当該地域の固有の問題を把握し，物理・化学的手法と当該地域への適用性も含め考察した研究は存在しない。

よって，本研究はモンゴル国固有の問題を把握し，物理・化学的手法とモンゴル国への適用性も含め考察した実用化研究であるという点で新規性を有している。

4. 未解決の問題の要点と研究方法

モンゴル国のフライアッシュの処理や有効利用の障害として，著者らの既往の研究及び文献調査の結果[26) 27) 28)]，以下の (A) から (C) を取り上げた。

(A) 排出されるフライアッシュの性質が変動すること。

(B) 放射性物質を含有していること。

(C) フライアッシュの使用に関する示方書等の基準が存在しないこと。

そこでこの問題解決に向け，第Ⅱ章ではモンゴル国の現状と問題を把握する目的で，文献調査並びに排出されたフライアッシュの化学分析を実施した。文献は各種ジャーナルや現地調査により入手し，化学分析は東北大学及び，宮城県工業試験場で実施した。

第Ⅲ章では現行のモンゴル国におけるフライアッシュの廃棄量を減少させる取り組みや有効利用方法について述べた。モンゴル国では一部排出されたフライアッシュをコンクリート混和材として利用した実用例はあるが，学術的検討が少なく，詳細な検討が必要である。そこで，フライアッシュの供給者である火力発電所，使用者であるレディーミクストコンクリート会社の担当者にインタビューを行い，モンゴル産フライアッシュの利用実態や普及の阻害要因を明らかにした。得られた結果をもとに，上記　(A)，(B)，(C) の問題に関する解決策を提案した。調査手法として，半構造化インタビュー法を用い，解析方法として文献 29) の方法を採用した。

第Ⅳ章では，上記の (A) について実験的に検討した。実験はフライアッシュの性質によって圧縮強度が変動することが明らかとなっていることから，石炭の産地，排出日が異なるフライアッシュを混和材として使用し，コンクリートの圧縮強度に着目して行った。さらに，硫酸カルシウムの有無が圧縮強度に与える影響について考察した後，硫酸カルシウムを有する場合について検討を深め，最も高い圧縮強度を実現するための硫酸カルシウムの最適量についての解明を試みた。実験はモンゴル国の Premium Concrete 社の実験室でモンゴル産のフライアッシュを混和したコンクリート供試体を作成し，圧縮強度試験を実施した。

第Ⅴ章では，第Ⅳ章で得られた知見のモンゴル国での実施を視野に入れ，硫酸カルシウムの量を定量について検討した。現地調査により，化学分析を実施する設備や器具が不十分であることが確認されたため，設備の不足した場所や現場で測定でき，簡便かつ定量精度の高い硫酸カルシウム測定法の開発に着目した。これは，フライアッシュコンクリートの使用促進に大きく寄与するものである。本研究では，温泉法の硫酸バリウム比濁法[30)]と若林が提案した簡易型 DVD 分光器[31) 32) 33) 34)]を組み合わせ，独自の新たな手法を開発した。本手法の開発に必要な化学分析，簡易型 DVD 分光器の最適条件の検討は全て東北大学大学院国際文化研究科で実施した。

第Ⅵ章では，結論として各章のまとめと今後の課題について述べた。以上を通じて，本論文では上記の問題に対し，解決策と具体的な手法を提案した。

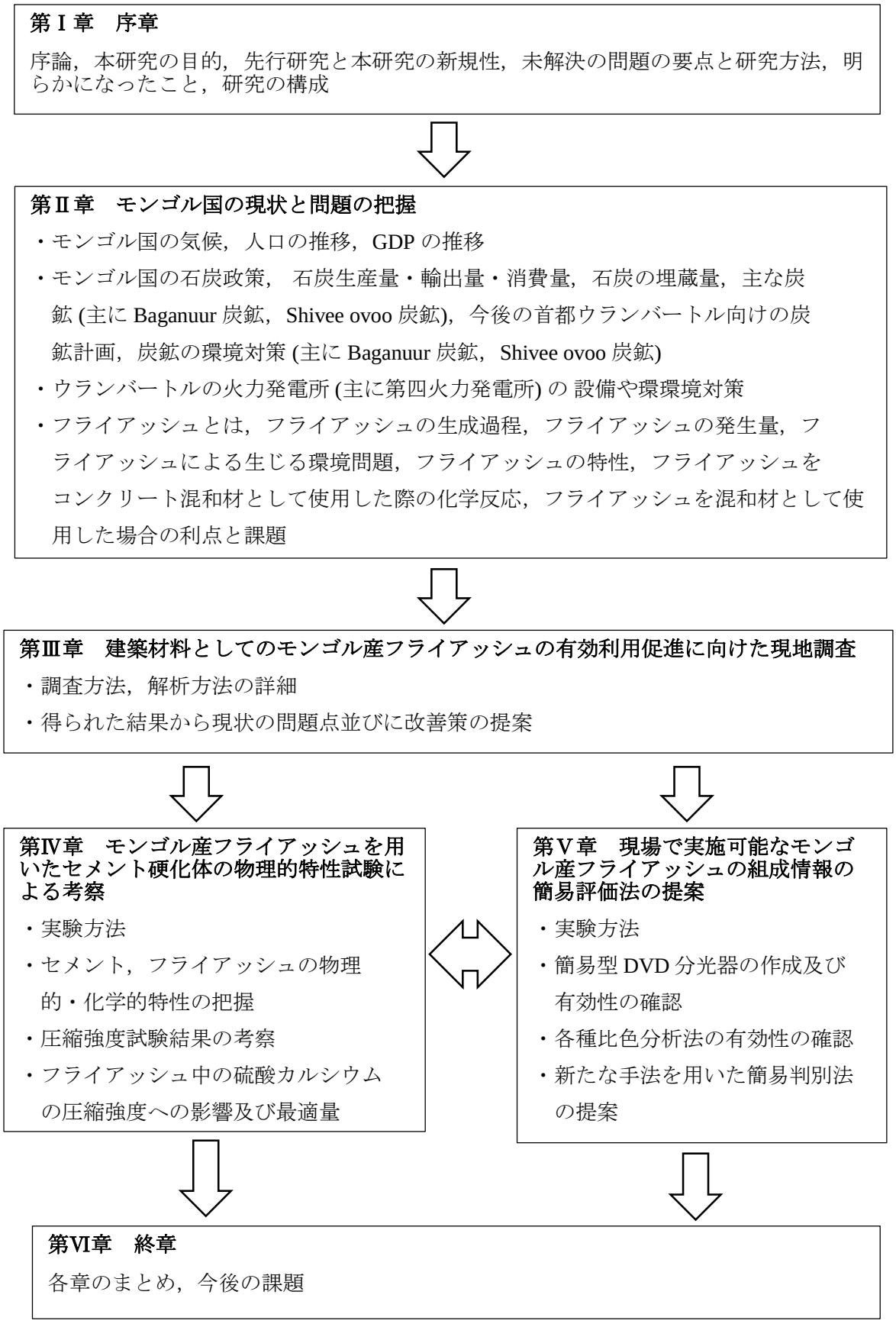

第Ⅰ章　序章
序論，本研究の目的，先行研究と本研究の新規性，未解決の問題の要点と研究方法，明らかになったこと，研究の構成
第Ⅱ章　モンゴル国の現状と問題の把握
・モンゴル国の気候，人口の推移，GDP の推移
・モンゴル国の石炭政策，石炭生産量・輸出量・消費量，石炭の埋蔵量，主な炭鉱 (主に Baganuur 炭鉱，Shivee ovoo 炭鉱)，今後の首都ウランバートル向けの炭鉱計画，炭鉱の環境対策 (主に Baganuur 炭鉱，Shivee ovoo 炭鉱)
・ウランバートルの火力発電所 (主に第四火力発電所) の 設備や環環境対策
・フライアッシュとは，フライアッシュの生成過程，フライアッシュの発生量，フライアッシュによる生じる環境問題，フライアッシュの特性，フライアッシュをコンクリート混和材として使用した際の化学反応，フライアッシュを混和材として使用した場合の利点と課題
第Ⅲ章　建築材料としてのモンゴル産フライアッシュの有効利用促進に向けた現地調査
・調査方法，解析方法の詳細
・得られた結果から現状の問題点並びに改善策の提案
第Ⅳ章　モンゴル産フライアッシュを用いたセメント硬化体の物理的特性試験による考察
・実験方法
・セメント，フライアッシュの物理的・化学的特性の把握
・圧縮強度試験結果の考察
・フライアッシュ中の硫酸カルシウムの圧縮強度への影響及び最適量
第Ⅴ章　現場で実施可能なモンゴル産フライアッシュの組成情報の簡易評価法の提案
・実験方法
・簡易型 DVD 分光器の作成及び有効性の確認
・各種比色分析法の有効性の確認
・新たな手法を用いた簡易判別法の提案
第Ⅵ章　終章
各章のまとめ，今後の課題

図 1　本論文の構成

5. 本論文の構成

本論文の構成を図 1 に示す。第Ⅰ章は，緒言，本研究の目的，先行研究，未解決の問題の要点，研究方法，明らかになったこと，研究の構成について述べた。

第Ⅱ章では，モンゴル国の現状と問題を把握することを目的とし，モンゴル国の現状，モンゴル国の石炭，モンゴル国の火力発電所 (主に第四火力発電所)，第四火力発電所から排出されるフライアッシュについて述べた。

第Ⅲ章では，建築材料としてのモンゴル産フライアッシュの有効利用促進の障害の把握を目的として，現地調査において，インタビューを実施し，得られた結果の解析を行い，フライアッシュの利用実態，普及の障害となっている原因の把握，さらに改善策の提案を行った。

第Ⅳ章では，モンゴル産フライアッシュを用いた硬化体の物理的特性試験による考察として，モンゴル国で排出される性質の異なるフライアッシュを混和材として使用し，コンクリートの圧縮強度特性に与える影響並びに硫酸カルシウムの最適量について検討した。

第Ⅴ章では現場で実施可能なモンゴル産フライアッシュの組成の簡易評価法の提案として，既存の方法を組み合わせた新たな手法を開発し，分析機器が不足した場所で可能な簡易判別法としての有効性について検討した。

第Ⅵ章では結論として各章のまとめと今後の課題について述べた。

6. 各章の内容と結論

6.1 第Ⅰ章

序論，本研究の目的，先行研究と本研究の新規性，未解決の問題の要点と研究方法，明らかになったこと，研究の構成について述べた。

6.2 第Ⅱ章

文献調査並びに，実験研究によってモンゴル国の現状と問題を把握した。以下に本章のまとめとして，明らかとなったことを記述した。

1) モンゴル国は石炭火力発電に依存しており，今後はエネルギーの需要の増加によりさらに石炭消費量は増加していく。

2) フライアッシュを未処理のまま灰捨て場に廃棄することで近隣地域の住民の健康被害や近隣地域の汚染，更には長距離越境汚染などの環境問題が示唆しており，早急な対策が求められている。

3) 第四火力発電所から排出されるフライアッシュは日本のフライアッシュに比べ，高カルシウムであり，石炭の産地や排出日により性質が変動する。これらのフライアッシュをコンクリート混和材に使用した場合，強度もフライアッシュの性質により異なる。

モンゴル国では，2025 年に石炭使用量が 1,500 万トンに達すると予想されており [35]，さらに大量のフライアッシュが発生し，環境汚染が深刻となる可能性がある。また排出されるフライアッシュの性質は日本で排出されるフライアッシュと大きく異なるため，日本の基準等を安易に踏襲

することも難しい。

そのため，モンゴル国の現状に適した利用技術の開発や新たな産業構造を実現させ，フライアッシュの用途の拡大により廃棄量を減少させることが今後の課題である。

6.3 第Ⅲ章

現行のモンゴル国におけるフライアッシュの廃棄量を減少させる取り組みについて述べた。モンゴル国では一部排出されたフライアッシュをコンクリート混和材として利用した実用例はあるが，学術的検討が少なく，詳細な検討が必要である。そこで，第四火力発電所，並びにレディーミクストコンクリート会社にインタビューを実施し，フライアッシュの利用実態や普及の阻害要因を明らかにした。以下に本章で検討した結果，明らかとなったことを示した。

＜火力発電所＞

1) 第四火力発電所から排出されるフライアッシュの性質に変動が生じる原因は選炭していない石炭，並びにボイラーに不向きな石炭を使用しているからである。

2) 第四火力発電所としては，新たにフライアッシュを廃棄する灰捨て場を建設する場合，莫大な費用がかかるため，有効利用促進を望んでいる。

＜各レディーミクストコンクリート会社＞

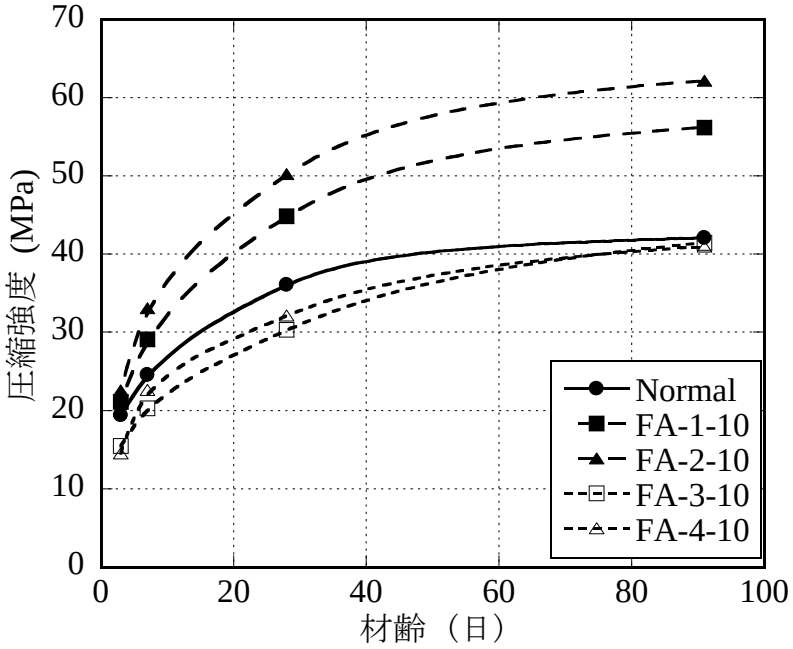
1) 第四火力発電所から供給されるフライアッシュはセメントと比較し，はるかに安価であるためコンクリート混和材として利用している。

2) フライアッシュの供給元である第四火力発電所からはフライアッシュの品質に関する情報提供がされず，加えて，フライアッシュの使用方法に関する基準なども存在しない。そのため，混和材として使用するフライアッシュによってコンクリートの強度や品質に違いが生じ，普及の障害となっている。

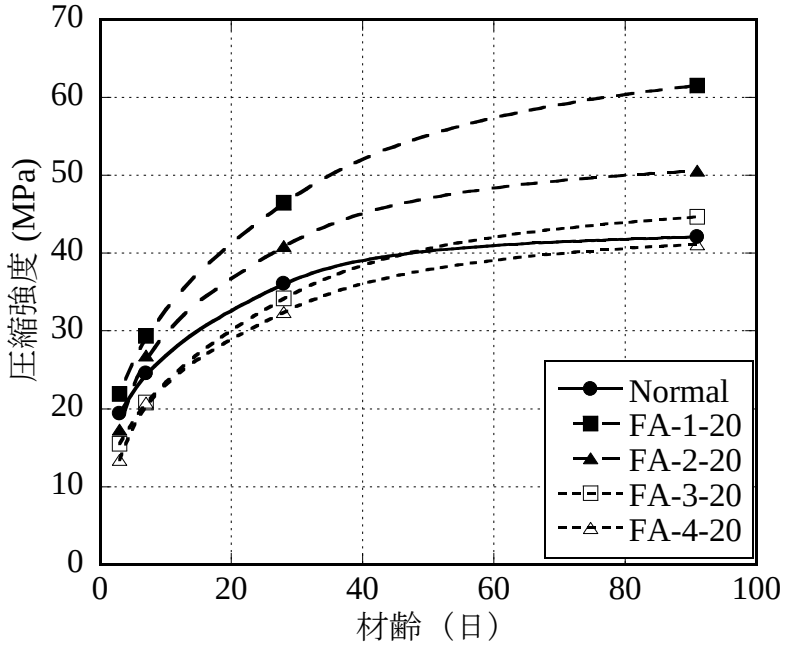
3) フライアッシュを混和材として使用したコンクリートを販売する場合，放射能に関して国が定めた基準を満たす必要がある。

表 1　フライアッシュを混和材として使用したコンクリートの調合

No	FA	W/(C+FA) (%)	FA/(C+FA) (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m^3)					実測スランプ (mm)
					W	C	FA	S	G	
Normal	-	46	0	53	164	356	0	1001	878	200
FA-1-10	FA-1		10		164	320	36	999	878	225
FA-1-20	FA-1		20		163	284	71	996	875	210
FA-1-40	FA-1		40		162	212	141	991	871	205
FA-2-10	FA-2		10		164	320	36	999	878	230
FA-2-20	FA-2		20		164	284	71	997	876	225
FA-3-10	FA-3		10		164	320	36	999	878	210
FA-3-20	FA-3		20		163	284	71	996	876	205
FA-3-40	FA-3		40		163	212	141	992	871	190
FA-4-10	FA-4		10		164	320	36	999	878	215
FA-4-20	FA-4		20		163	284	71	997	876	220



(a) フライアッシュ置換率 10 %



(b) フライアッシュ置換率 20 %

図 2　コンクリートの圧縮強度試験結果

そのため今後の課題として，火力発電所としては，石炭の品質や燃焼方法の改善によるフライアッシュの品質の均一化や，設備の増設によるフライアッシュの利用拡大を図る必要がある。さらに火力発電所，各レディーミクストコンクリート会社共にモンゴル国の現状に適した利用技術や新たな産業構造に加え，フライアッシュの使用に関する示方書等の基準の整備，情報の提供や普及が必要であることを挙げた。モンゴル国の現状に適した方法を提案することで，フライアッシュを活用した新たな産業や製品，更には雇用を生み出すことが可能となり，環境汚染の低減化にもつながるため，非常に重要であると考えられる。

6.4 第Ⅳ章

フライアッシュの性質によって圧縮強度が変動することが明らかとなっていることから，石炭の産地，排出日が異なるフライアッシュを混和材として使用し，コンクリートの圧縮強度試験の結果を述べた。得られた結果を基に，性質の異なるフライアッシュがフライアッシュコンクリートの圧縮強度特性に与える影響，硫酸カルシウムの有無が圧縮強度に与える影響及び，最も高い圧縮強度を実現するための硫酸カルシウムの量について検討した。表 1 にフライアッシュを混和材として使用したコンクリートの調合，図 2 (a)，(b) に各種フライアッシュ置換率 10 %，20 % の圧縮強度試験結果を示した。

FA-1，FA-2 フライアッシュについては，材齢初期の段階で Normal の強度を上回り，FA-1 は置換率 20 % ，FA-2 は置換率 10 % でいずれの材齢においても最も高い圧縮強度を示した　同様に FA-3，FA-4 フライアッシュの場合は 各材齢における強度が低くなる傾向を示した。

以下に本章で検討した結果，明らかとなったことを記述した。

1) 硫酸カルシウムを含有するフライアッシュを混和材として使用した場合，圧縮強度は硫酸カルシウムを含有しないフライアッシュを混和材として使用した場合よりもすべての材齢において高い強度を示した。

2) 第四火力発電所から排出されるフライアッシュの内，硫酸カルシウムを含有するフライアッシュをコンクリート混和材として使用することで初期強度の向上が認められた。以上のことからフライアッシュ中の硫酸カルシウムがコンクリートの強度に影響を与えることが明らかになった。

3) 硫酸カルシウムを含有するフライアッシュを混和材として使用した場合，硫酸カルシウム量には最適量が存在することが明らかとなり，その量はコンクリート 1 m^3 当たり，1.5 - 2.5 kg / m^3 であることが明らかとなった。また，この範囲にない場合，強度は低下することが確認された。

そのため，モンゴル国の各レディーミクストコンクリート会社において本章の知見を実施するためにはフライアッシュ中の硫酸カルシウム量を定量する必要がある。しかし，いずれの企業においても化学分析を実施する設備や器具が不十分であるため，分析設備の不足した場所や現場で測定でき，かつ簡便な方法を開発することが必要である。これはフライアッシュコンクリートの使用促進に大きく寄与し，フライアッシュの廃棄量の減少に非常に効果的であると考えられる。

6.5　第Ⅴ章

第四火力発電所から排出されるフライアッシュは石炭の産地，排出日により性質の変動が大きく，圧縮強度に及ぼす影響が大きいことが普及の障害の一つとなっている。

前章での検討の結果，フライアッシュ中の硫酸カルシウムがコンクリートの強度に影響を与え，かつ硫酸カルシウムの量には最適量が存在することが明らかとなった。そのため，硫酸カルシウム量の定量方法の確立がフライアッシュの有効利用促進に重要となる。しかし，モンゴル国のいずれの企業も化学分析を実施する設備や器具は不十分であり，また特別な機器を必要とせず，現場で実施できる簡易的な定量分析方法の開発に関する先行研究も存在しなかった。そこで，著者は既存の方法を組み合わせた簡便かつ現場で実施できる新たな手法を提案した。以下に本章で検討した結果，明らかとなったことを記述した。

1) 簡易型 DVD 分光器は紫外可視分光光度計と比較した場合，同等の定量精度を有しており，分解能に関しては紫外可視分光光度計よりも優れている。

2) 硫酸バリウム比濁法は硫酸バリウム沈殿法と同等の定量精度を有しており，フライアッシュ中の硫酸イオンの定量分析にも利用できる。

3) 簡易型 DVD 分光器と硫酸バリウム比濁法を組み合わせた新たな手法によりフライアッシュ中の硫酸イオンを定量した結果，既存の方法と同等の結果が得られた。そのため，この新たな手法は現場で測定でき，簡便かつ定量精度が高い方法として，フライアッシュのコンクリート混和材としての有効利用促進に非常に有効である。

今後の課題として，更にモンゴル国に適した方法を開発し，更なるフライアッシュの有効利用促進へ発展させる必要がある。

6.6　第Ⅵ章

これまでの各章で明らかになったことを整理し，さらに今後の課題について述べた。

本論文で開発した方法とこれまでの提案を応用することで，モンゴル国の更なるフライアッシュの有効利用の促進に繋がると期待できる。

7.　参考文献

1) 一般財団法人 石炭エネルギーセンター,『コールノート 2014 年版』, 一般財団法人　石炭エネルギーセンター, 2015, pp.192
2) 同上書, pp.194-195
3) 読売新聞,「日・モンゴル EPA 署名」, 2015.02.11
4) 山下栄二,「第 6 回日本・モンゴル鉱物資源開発官民合同協議会」,『JCOAL Journal』, Vol.26, 2013, pp.28-29
5) 中部電力ホームページ, 入手先〈http://www.chuden.co.jp/energy/ene_energy/thermal/hat_thermal/sekitan/index.html〉, 参照 2015-

11-30

6) 独立行政法人 国際協力機構, 「モンゴル国石炭開発利用マスタープラン調査」, 2013, p.116, 入手先〈http://open_jicareport.jica.go.jp/pdf/12145900.pdf〉, 入手日 2015-10-31

7) 中部電力ホームページ, 前掲載

8) Dinil Pushpalal, Hiroo Kashima, Atsushi Suzuki, O. Batmunkh, G. Oyunbold, 「MIX PROPORTIONING WITH MONGOLIAN FLY ASH」, 『13th Annual Concrete Conference』, 014, pp.145

9) 片山祐規, 後藤知子, 亀田貴之, 唐　寧, 松木篤, 鳥羽陽, 早川和一, 「日本および中国における大気粒子中多環芳香族炭化水素キノンの観測-濃度レベルの把握と発生要因の検討-」, 『大気環境学会誌』, Vol.46, No.1, 2011, pp.20 - 29

10) 香川順, 「粒子状物質の健康リスクの評価」, 『エアロゾル研究』, Vol. 3, No. 2, 1988, pp.124－128

11) 鈴木亮太, 吉野彩子, 兼保直樹, 高見昭憲, 林政彦, 原圭一郎, 渡邉泉, 畠山史郎, 「長崎県福江島・福岡県福岡市におけるエアロゾル金属成分の特徴と発生源推定」, 『大気環境学会誌』, Vol.49, NO.1, 2014, pp.15 - 25

12) 向井人史, 田中敦, 藤井敏博, 「降雪中の鉛同位体比と汚染の長距離輸送との関係」, 『大気環境学会誌』, Vol. 34, No.2, 1999, pp.86 - 102

13) 成田健, 船本憲治, 小川浄, 本田靖博, 高田進治, 嵩英雄, 「フライアッシュを使用したレディーミクストコンクリートの利用に関する実態調査」, 『日本建築学会技術報告集』, Vol.23, No.1-4, 2006, pp.1-4

14) 深瀬孝之, 谷口円, 安藤睦, 濱幸雄, 長谷川拓哉, 齋藤敏樹, 桂修, 牛田健一, 小谷卓司, 小川安良, 会田勝博, 酒井享, 進藤穀幸, 金森重行, 松尾健司, 名和豊春, 「北海道におけるフライアッシュコンクリートに関するアンケート調査結果 寒冷地におけるフライアッシュの有効利用研究委員会中間報告」, 『日本建築学会北海道支部研究報告集』, No.87, 2014, pp.21-24

15) Narantuya Batmunkh, Tetsuya Ishida, H. Nikraz, 「Performance Evaluation of Coal Ash Concrete as Building Materials in Mongolia」, 『 2009 World of Coal Ash (WOCA) Conference』, 2009, pp.1-17

16) J. Temuujin, A. Minjigmaa, B. Davaabal, U. Bayarzul, A. Ankhtuya, Ts. Jadambaa, K.J.D. Mackenzie, 「Utilization of radioactive high-calcium Mongolian flyash for the preparation of alkali-activated geopolymers for safe use as construction materials」, 『Ceramics International』, Vol.40, 2014, pp.16475-16483

17) Dan Ravina, P.K. Mehta, 「Compressive Strength of Low Cement / High Fly Ash Concrete」, 『Cement and Concrete Research』, Vol.18, No.4, 1988, pp.571 - 583

18) L. H. Jiang, V. M. Malhotra, 「Reduction in water demand of non-air-entrained concrete incorporating large volumes of fly ash」, 『Cement and Concrete Research』, Vol.30, No.11, 2000, pp.1785-1789

19) Yamei Zhang, Wei Sun, Lianfei Shang, 「Mechanical Properties of High Performance Concrete Made

with High Calcium Sulfate Fly Ash」, 『Cement and Concrete Research』, Vol.27, No.7, 1997, pp.1093－1098

20) C.S. Poon, S.C .Kou, L. Lam, Z.S. Lin, 「Activation of Fly Ash / Cement Systems Using Calcium Sulfate Anhydrite ($CaSO_4$)」, 『Cement and Concrete Research』, Vol.31, No.6, 2001, pp.873 - 881

21) Yamei Zhang, Wei Sun, Lianfei Shang, 前掲載書

22) 山本武志, 金津努, 「フライアッシュのポゾラン反応性を評価するための促進化学試験法 (API 法) の適用性評価」, 『コンクリート工学年次論文集』, Vol.26, No.1, 2004, pp.171-176

23) 楠貞則, 添田政司, 大和竹史, 「フライアッシュコンクリートの簡易品質評価手法に関する研究」, 『土木学会論文集 E』, Vol.65, No.1, 2009, pp.93-102

24) 林田弘, 永長久彦, 「比色分析によるセメント中の無水硫酸の迅速定量」, 『分析化学』, Vol.12, No.1, 1963, pp.47-54

25) 西口靖彦, 大阪隆志, 安藤貞, 早坂貴代史, 池田順一, 堀兼明, 須賀有子, 福永亜矢子, 「飼料中のマグネシウム，カリウム，カルシウム含量の迅速測定法 2. 比色・比濁法による定量法」, 『近畿中国四国農業研究センター研究報告』, Vol.6, 2007, pp141-151

26) Atsushi Suzuki, Hiroo Kashima, Dinil Pushpalal, O. Batmunkh, 「Prediction Model for Compressive Strength of Fly Ash Concrete」, 『15th Annual Concrete Conference』, 2015, pp.16-20

27) J. Temuujin, A. Minjigmaa, B. Davaabal, U. Bayarzul, A. Ankhtuya, Ts. Jadambaa, K.J.D. Mackenzie, 前掲載書

28) 成田健, 船本憲治, 小川浄, 本田靖博, 高田進治, 嵩英雄, 前掲載書

29) 佐藤郁哉, 『質的データ分析法』, 新曜社, 2008, pp.167-184

30) 環境省自然環境局, 「鉱泉分析法指針 (平成 26 年度改訂)」, 2014, pp.125-126

31) Fumitaka Wakabayashi, 「A DVD Spectroscope : A Simple, High-Resolution Classroom Spectroscope」, 『Journal of Chemical Education』, Vol.83, No.1, 2006, pp.56-58

32) 若林文高, 小川義和, 米田成一, 「潜望鏡型 DVD 分光器の製作と観測スペクトル画像のチャート化」, 『日本科学教育学会年会論文集』, No.30, 2006, p.441

33) 若林文高, 「博物館を基盤とした初等中等教育レベルでの微視的物質観育成のための教育材開発と発展」, 『化学と教育』, Vol.54, No.5, 2006, pp.260-263

34) 若林文高, 国立科学博物館教材資料, 潜望鏡型 DVD 分光器ペーパークラフト

35) 一般財団法人 石炭エネルギーセンター, 前掲載書, pp.194-195

別記様式 博在－Ⅶ－２－②－A

論文審査の結果の要旨

学位の種類	博士（学術）	氏　名	鹿島　大雄
学位論文の題名	モンゴル国におけるフライアッシュの有効利用に関する研究 ―技術開発と現地適用性を中心に―		
論文審査担当者氏名 （主査）　プシュパラール　ディニル 木谷　忍、　劉 庭秀、　重野　芳人、　齋藤　潔			

論文審査の結果の要旨（1,000字内外）

本論文では、モンゴル国で大量に排出されるフライアッシュの適正処理や有効利用方法として、モンゴル産フライアッシュ及び、そのフライアッシュを混和材として使用したコンクリートの特性について分析・考察した。特に、モンゴル国に適した技術開発を目指し、フライアッシュの化学的特性、当該地域への適用性を分析し、モンゴル国の建設産業におけるフライアッシュコンクリートの利用促進を目的とした。

従来からフライアッシュをコンクリート混和材として使用した研究、フライアッシュの品質評価並びに各種定量分析法に関する研究は多数公表されている。しかし、これらの研究において、当該技術を実用化するにあたり、当該地域の固有の問題を把握し、物理・化学的手法を用いて当該地域への適用可能性を考察した研究は存在しない。一方、本研究は、上記の内容を中心に実用化研究を行っており、研究の独創性と新規性が認められる。

本論文では、モンゴル国におけるフライアッシュの処理実態と問題を把握するため、文献調査によりモンゴル国の現状を把握し、排出されたフライアッシュの化学分析を実施することにより、フライアッシュの廃棄量を減少させる取り組みや有効利用方法について調査・分析した。

さらに本論文では、フライアッシュの化学的組成分析による定量データにもとづいて、モンゴル産フライアッシュの特質を把握し、そのフライアッシュを使用したコンクリートの強度特性に与える要因について検討した。また、フライアッシュに含まれる硫酸カルシウムの有無が圧縮強度に与える影響と、最も高い圧縮強度を得るために必要な硫酸カルシウム量の解明も試みた。最終的に、現地の状況に合わせた分析、計量方法として、コンクリートの強度特性に影響を与えるフライアッシュ中の硫酸カルシウムを、簡易測定できる独自の評価法を開発し、開発途上国の環境問題解決に役立つ、実効性の高い方法論を提案した。

なお、本論文内容の一部は、コンクリート工学会、日本建築学会、モンゴルコンクリート学

会等の工学分野を中心とする学会誌、研究発表論文集に掲載された。これらの研究成果はモンゴル国におけるフライアッシュの有効利用の促進に大きく寄与すると考える。以上のように、本論文の執筆者が自立した研究活動を行うに必要な高度な研究能力と学識を有することを示すものである。よって、本論文は、博士（学術）の学位論文として合格と認める。