

御嵩町亜炭廃坑における地下空洞内環境について The Environment in the Underground Cavities of Abandoned Lignite Mines in Mitake Town

安部純平¹, 藤井 幸泰², 浅野侃哲³, 上道圭一郎⁴

- 1 名城大学大学院・理工学研究科・社会基盤デザイン工学専攻・243433002@ccmailg.meijo-u.ac.jp
- 2 名城大学・理工学部社会基盤デザイン工学科
- 3 名城大学大学院・理工学研究科・社会基盤デザイン工学専攻
- 4 元名城大学・理工学部社会基盤デザイン工学科

概 要

岐阜県御嵩町の地下に亜炭廃坑跡が存在し、経年劣化や地震動により現在でも年間数件程度の陥没・沈下などが生じている。現在御嵩町では、南海トラフ巨大地震等への早急な対策が求められ、調査や対策が進められているが、亜炭層の劣化に関して十分な研究がなされているとは言えない。室内試験や坑道内での試験を通して研究を進めているが、坑道内の環境に関しても、不明な点が多い。そこで本研究では、亜炭層の強度劣化メカニズムを解明するため、亜炭廃坑内の温湿度や地下水位など地下環境について検討を行った。結果の一例として、坑道内では湿度がほぼ 100%と一定であり、出入口付近と坑道内奥で多少の違いはあるものの冬季を中心とした半年の平均気温は 16℃前後である。一方、坑道からはやや離れているものの同じ亜炭層のボーリング調査に関わる地下水位は季節変動を示しており、環境変化による亜炭残柱の劣化に関わっている可能性が高い。

キーワード：亜炭廃坑，地下環境，針貫入試験

1. はじめに

東海地方には日本の亜炭の 40%以上を産出していた美濃炭田、尾張炭田、三重炭田が存在している¹⁾(図 1)。美濃炭田に属している岐阜県御嵩町の亜炭層は、御嵩町一帯から瑞浪層群の下部層をなす中村累層の中に存在している。1869 年頃から石炭の代用燃料・補助燃料として掘り出し始められ、製紙産業や航空産業、陶磁器産業などの需要増加に加え、地表面下 5m 程と地表に近いところで採掘できたため、安価なコストで大量に採掘された。亜炭採掘最盛期は第 2 次世界大戦中および戦後の燃料不足時代の約 15 年間におけるもので、年間 120~130 万トンも出炭されていた²⁾。御嵩町で亜炭の採掘が盛んになった理由として

- a) 石炭の生産地が北海道や九州が中心で、中京工業地帯に最も近い場所で採掘できた
- b) 農村地帯であることから、労働人口に恵まれていた
- c) 亜炭層が比較的浅い所にあり、小資本で鉱山開発が可能であった

などの好条件が揃っていたことが考えられる³⁾。しかし、1958 年以降はエネルギー革命により石油や重油への依存割合の転換や、海外から低価格の石炭を輸入できるようになったことに加え、落盤事故が相次いだことにより、1967 年頃に御嵩町内の亜炭鉱がすべて閉山となった。これら亜炭鉱の坑道があるのは町全面積 10%程で他の地域は落盤

の危険性はないものの、亜炭廃坑地域が人家や公共施設など人口の多い町中心部にあることで、今もなお地盤の陥没・沈下・傾斜・亀裂により、民家や道路に様々な被害が確認されている⁴⁾。このような多くの陥没事故が発生していることから亜炭掘削後空洞は「負の遺産」として社会問題視されている。また今後、南海トラフ巨大地震の発生により、残柱が崩壊し、広範囲に亘って陥没・沈下による影響が見られることは容易に想像できる。現在、御嵩町では、南海トラフ巨大地震に備えて早急な対策として、空洞充填工事による埋め戻しが行われているが⁵⁾、調査や施工にあたり費用や事業計画の制約から、町に存在している空洞の半分以上は廃坑のまま残されている状態である⁶⁾。空洞充填を行うにあたり、陥没危険度の推定や充填の必要な残存空洞量の推定が必要とされているが、詳細には明らかになっていないのが現状である。空洞充填計画の作成を行うにあたり、対策の優先順位付けも課題となっている。地下空洞内の環境を明らかにすることにより、対策の優先順位などに活かせるかもしれない。そこで本研究では、坑道出入口付近と坑道奥の 2 か所でデータロガーを用いた地下空洞内の温湿度計測並びに携行型針貫入試験機を用いた亜炭残柱の強度測定とボーリング調査により得られたデータから地下水位と降雨量などをまとめ、季節変動の評価を

試みた。



図1 東海地方に存在する亜炭層（文献¹⁾に加筆）

2. 亜炭層と陥没・沈下のメカニズムについて

御嵩町に分布する瑞浪層群下部の土岐夾炭累層中の亜炭層（図2）は、およそ2000万年前（新第三紀）に、メタセコイヤや土が水中に堆積した泥炭が圧密作用や続成作用によって炭化が進んだものである。亜炭の名前の由来は石炭に比べると圧密作用や続成作用などが進んでいないため、炭化度が低く石炭に質が準ずるものとして名付けられた。炭素割合が70%以下のものが亜炭、80%以上のものが石炭とされており（表1）、亜炭は石炭に比べると炭素の量が少なく粘土鉱物や水分など不純物を多く含んでいる。そのため得られる熱量が低く、一旦燃え出すと独特な臭いがある上、煙と灰分が多いという特徴がある。

表1 含有率による石炭の分類 ⁶⁾

	炭素(%)	粘性による分類	燃焼法による分類
泥炭, 亜炭	～70		
褐炭	70～78	非粘結炭	
亜瀝青炭	78～80	非粘結炭	ガス用炭
		微粘結炭	ガス用炭
瀝青炭(低度)	80～83	弱粘結炭	コークス炭
瀝青炭(中度)	83～87	粘結炭	コークス炭
瀝青炭(高度)	87～91	強粘結炭	コークス炭
無煙炭	91～	非粘結炭	無煙炭



図2 亜炭層(可児川の河岸)

御嵩町の亜炭鉱は比較的浅い層に存在していたため残柱式採掘で掘削が行われていた。天端が貧弱な場合は採掘

後数年以内は局所的沈下、いわゆる浅所陥没が発生する。浅所陥没は突発的な現象であるため、予知・予測が困難である。そのため陥没発生後の地盤状態から浅所陥没のメカニズムを考えざるを得なかった。

地表面に発生する変形状態としては主として沈下と陥没が存在する。前者はクラックや滑落面が存在せず一定面積の地表面が下がることを意味し、後者はクラックや滑落面によって区切られた範囲内の面積の地表面が落ち込むことを意味している。炭鉱における浅所陥没と地表沈下の模式図を図3に示す。沈下や陥没などの要因としては土被り厚さ、地盤材料のせん断強度および変形量等があげられる。いずれの場合も坑道周囲は風化・変質しているものの、初期的な変形は見られず安定している。しかし、風化や変質が進行し、クラックが多く発生してくるに従い岩盤はブロック化し岩塊が崩落する。土被りの厚さや地層の強度に応じて天端上部の地層の挙動は異なり、土被りの厚い場合には地表面への影響は地表沈下にとどまり、土被りの薄い場合やせん断強度の低い場合には地表面の陥没として被害が現れる（図4）。

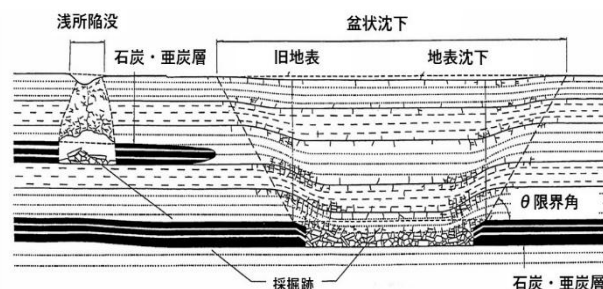
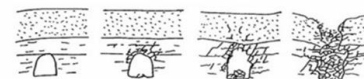
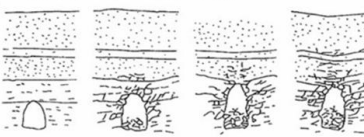


図3 亜炭廃坑における浅所陥没と地表沈下の模式図 ⁷⁾

土被り厚が薄い場合の変形



土被り厚が厚い場合の変形



せん断強度の小さい場合の変形



図4 坑道上部の地山の変形 ⁷⁾

3. 研究手法

3.1 亜炭廃坑内での温湿度計測と針貫入試験

本研究では、亜炭廃坑出入口付近（出入口から約5mの残柱）と亜炭廃坑奥（出入口から約20mの残柱）の2か所に藤田電機製作所の Watch Logger KT-255U（データロガー）の温湿度計を設置し、廃坑内での温度・湿度を計測した。温湿度計は水浸することがないように、地面から1.5m程の



図5 亜炭廃坑出入口に設置したデータロガー



図7 針貫入試験機（携行型）⁹⁾



図8 Watch Logger KT-255U



図6 亜炭廃坑奥に設置したデータロガー

高さに設置した。計測期間は2023年11月から2024年4月の半年間で、10分間隔で計測を行った。残柱の強度測定にあたり現地で用いやすく非破壊でできる針貫入試験を行った。亜炭残柱の層理面に対して水平方向に3回針貫入を行い、式(1)で示す針貫入勾配の平均を算出した。

$$Np = \frac{P}{L} \quad (1)$$

ここに、 Np ：針貫入勾配（N/mm）、 P ：貫入荷重（N）、 L ：針貫入長さ（mm）である

3.2 地下水位と雨量調査

地下空洞内の地下水の変動により亜炭廃坑内が湿潤状態と乾燥状態を繰り返すことで乾湿風化し、残柱の劣化が進行している可能性がある。そこで充填工事に関わるボーリング調査データをもとに、降雨量による地下水位の季節変動をまとめた。対象地点は年間を通して地下水位と雨量の計測が行っていたK-6、既設4～6、9の5カ所である。計測期間は2023年1月から2024年2月で、月別平均地下水位と月別総雨量の関係について比較検討を行った。

4. 研究結果

4.1 亜炭廃坑内での温湿度・針貫入試験結果

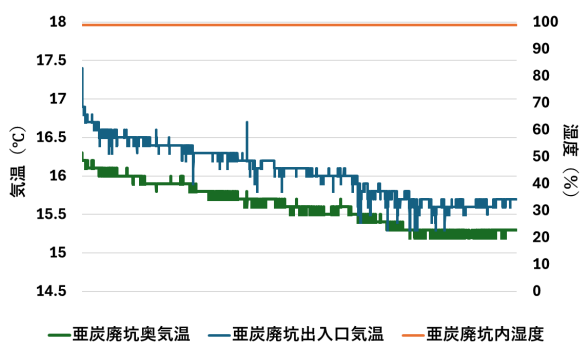


図9 亜炭廃坑内の気温・湿度変化

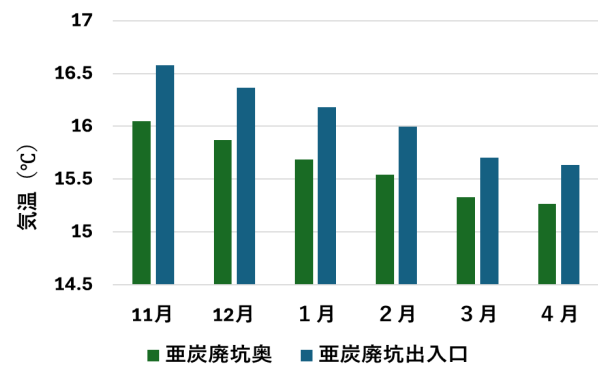


図10 亜炭鉱内の月別平均気温の変化

表2 亜炭残柱の針貫入勾配

廃坑 出入口	貫入力 (N)	貫入長さ (mm)	針貫入勾配 (N/mm)	平均 (N/mm)
1回目	100	6.2	16.1	15.8
2回目	100	6.3	15.9	
3回目	100	6.5	15.4	
廃坑奥	貫入力 (N)	貫入長さ (mm)	針貫入勾配 (N/mm)	平均 (N/mm)
1回目	100	3.8	26.3	27.4
2回目	100	3.9	25.6	
3回目	100	3.3	30.3	

2023年11月から2024年4月までの亜炭廃坑内の気温・湿度の変化を図4.1に示す。湿度変化を橙色、亜炭廃坑出入口の温度変化を青色、亜炭廃坑奥の温度変化を緑色の線で示す。湿度の変化において、亜炭廃坑出入口、亜炭廃坑奥どちらにおいても地下水の影響によりほぼ100%で一定であることが確認できる。温度の変化において、亜炭廃坑

出入口での最高気温が 17.4℃、最低気温が 15.3℃、平均気温が 16.1℃であり、亜炭廃坑奥の最高気温が 16.3℃、最低気温が 15.2℃、平均気温が 15.6℃である。亜炭廃坑出入口における気温較差は 2.1℃であるのに対し、亜炭廃坑奥における気温較差は 1.1℃とわずかに小さい値を示している。このことから亜炭廃坑出入口は亜炭廃坑奥に比べ気温変化が大きいことが確認できる。また図 4.2 から亜炭廃坑奥は亜炭廃坑出入口に比べ気温が低いことも確認できる。なお 2024 年 5 月から 8 月までのデータ取得に失敗したが、9 月以降のデータ取得を現在継続中である。

表 2 に亜炭廃坑内で行った針貫入試験結果を示す。亜炭廃坑出入口の平均針貫入勾配は 15.8N/mm であり、亜炭廃坑奥の平均針貫入勾配は 27.4N/mm と亜炭廃坑出入口より亜炭廃坑奥の方が大きな値を示していることが確認できた。

4.2 地下水位と雨量調査結果

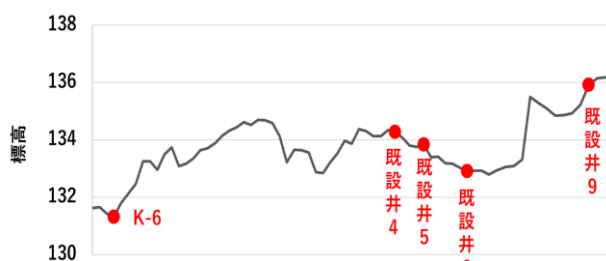


図11 対象地点の標高断面図

図 11 に本研究のボーリング対象地点 K-6、既設井 4～6、9 の標高断面図を示す。図 12 は 2023 年 1 月から 2023 年 12 月まで、図 13～16 は 2023 年 4 月から 2024 年 2 月までのボーリング対象地点別の標高、月別の平均地下水位と総雨量の関係を示す。標高を黄緑色、平均地下水位を橙色、総雨量を水色で示す。まず K-6 について標高は 131.31m、最高地下水位が 131.26m で最大総雨量が 442.5mm でありいずれも 6 月に観測され、最低地下水位が 130.42m で最小総雨量が 1.5mm でありいずれも 1 月に観測され、地下水位較差は 0.845m である。また地下水位と総雨量の相関係数を算出すると 0.773 であり強い相関関係が見られる。次に既設井 4 について標高は 134.27m、最高地下水位が 132.50m で最大総雨量が 442.5mm でいずれも 6 月に観測され、最低地下水位が 131.16m で 12 月に観測され、最小総雨量が 31.5mm で 1 月に観測され、地下水位較差は 1.342m である。また地下水位と総雨量の相関係数を算出すると 0.797 であり強い相関関係が見られる。次に既設井 5 の標高は 133.84m、最高地下水位が 132.59m で最大総雨量が 442.5mm でありいずれも 6 月に観測され、最低地下水位が 130.29m、最小総雨量が 31.5mm でありいずれも 1 月に観測され、地下水位較差は 2.296m である。また地下水位と総雨量の相関係数を算出すると 0.798 であり強い相関関係が見られる。次に既設井 6 について標高は 132.91m、最高地下水位が 131.49m で最大総雨量が 442.5mm であり

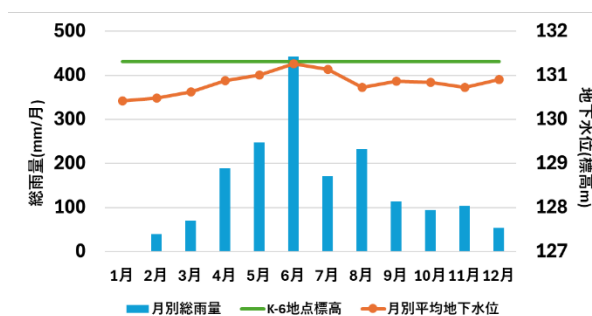


図12 K-6での平均地下水位と総雨量の関係

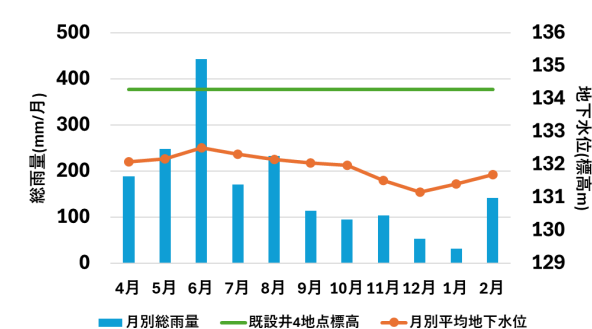


図13 既設井4での平均地下水位と総雨量の関係

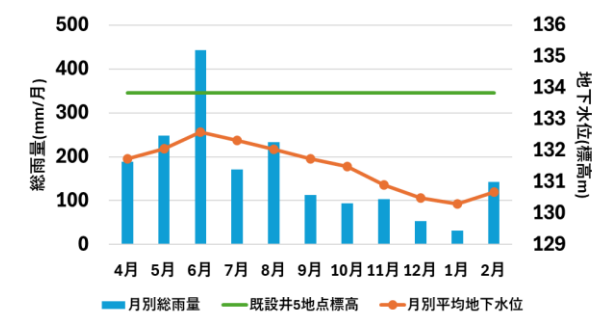


図14 既設井5での平均地下水位と総雨量の関係

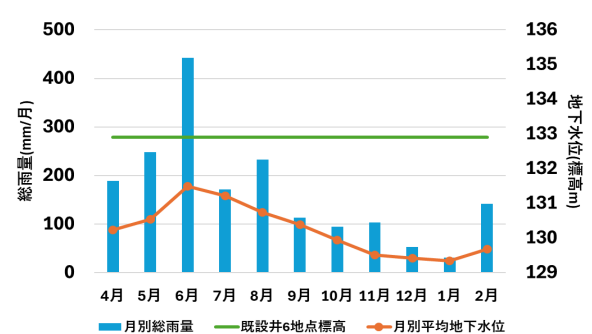


図15 既設井6での平均地下水位と総雨量の関係

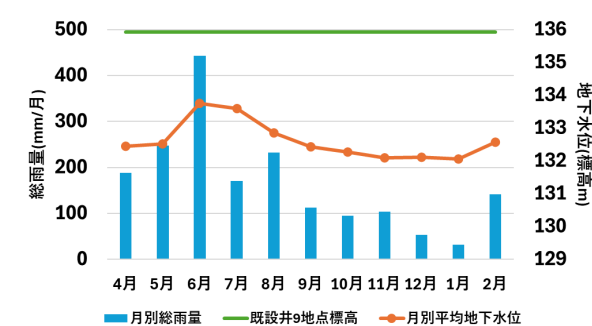


図16 既設井9での平均地下水位と総雨量の関係

いずれも 6 月に観測され、最低地下水位が 129.35m、最小総雨量 31.5mm でありいずれも 1 月に観測され、地下水位較差は 2.144m である。また地下水位と総雨量の相関係数を算出すると 0.834 であり強い相関関係が見られる。次に既設井 9 について標高は 135.92m、最高地下水位が 133.76m で最大総雨量が 442.5mm でありいずれも 6 月に観測され、最低地下水位が 132.06m、最小総雨量が 31.5mm でありいずれも 1 月に観測され、地下水位較差は 1.700m である。また地下水位と総雨量の相関係数を算出すると 0.793 であり強い相関関係が見られる。

5. 考察

本研究では、亜炭廃坑内で温湿度計測と針貫入試験、地下水位と雨量調査の結果をもとに亜炭廃坑内の季節変化の検討を行った。亜炭廃坑内では坑道出入口や坑道奥どちらの地点においても季節に関係なく湿度がほぼ 100% であることが確認できた。気温について、亜炭廃坑奥に比べ亜炭廃坑出入口では、気温較差が大きくなっていることから外気による影響を受けやすいことが確認できる。また月別の平均気温で比べると亜炭廃坑出入口の方が亜炭廃坑奥よりも 0.4～0.5℃程高いことも確認できた。

亜炭廃坑内で行った針貫入試験において、平均針貫入勾配で比較した結果、亜炭廃坑出入口に比べ亜炭廃坑奥では 11.6N/mm 大きな値を示したことから、亜炭廃坑出入口では亜炭廃坑奥に比べ外気による影響により劣化が進み、強度が低くなったと考えられる。わずかな温度差であっても、経年劣化が進んでいることを確認できた。ところで亜炭廃坑奥と亜炭廃坑出入口では、土被り厚の大きさが異なることも考えられる。土被り厚の違いによって亜炭残柱にかかる上載荷重が変わると考えられるため、今後は上載荷重の違いによる強度変化の検討も必要である。

ボーリング対象地点 5 箇所において、最も雨量の多い時期である 6 月に最高地下水位となり、最も雨量の少ない時期である 12 月や 1 月に最低地下水位となったことに加え、総雨量と平均地下水位の相関係数が 0.773～0.834 と強い相関関係を示したことから、御嵩町における地下水位の季節変動を確認することができた。また亜炭層は浅い場所であれば地下 2～5m 程に存在している。既設井 4～6、9 の地下水位が地下 1.77m～3.86m の位置にあることから、比較的標高が高く浅い場所に存在している亜炭層は、雨量の多い時期に地下水位が高くなることで浸水し、雨量の少ない時期に地下水位が低くなることでやや乾燥することにより、乾燥湿潤による劣化の影響を受けていると考えられる⁹⁾。地下水位較差が 2m 程度であることを考慮すると、亜炭廃坑跡の高さと同程度と考えられる。これらのことから雨量と地下水位の季節変動が亜炭残柱の劣化に関わっている可能性が高いと考えられる。

6. まとめ

本研究では、亜炭廃坑内で温湿度計測と針貫入試験を実施し、廃坑内での湿度がほぼ一定であっても、わずかな温度変化の違いによって亜炭層の劣化が進みやすいことを確認できた。さらに地下水位の季節変化により地下水位較差が 2m 程度であることを確認でき、亜炭廃坑内でこのような地下水位変化が起きている場合、乾燥湿潤による強度低下が起きている可能性が高いことを確認できた。

謝辞

本研究を実施するにあたり、現地での温湿度計測ならびに針貫入試験やボーリングデータの提供に加え論文作成資料に関して、御嵩町の亜炭鉱廃坑対策室にお世話になった。また地下水位のデータについては、充填工事の施工を実施している飛鳥建設より頂いた。紙面を借りてお礼申し上げる。

参 考 文 献

- 1) 一般社団法人充填技術協会：石炭・亜炭鉱業の趨勢，東海地方の亜炭田，入手先＜<https://www.juten-tc.jp/%e6%8a%80%e8%a1%93%e6%83%85%e5%a0%b1/%e5%9c%b0%e4%b8%8b%e7%a9%ba%e6%b4%9e%e3%81%a8%e6%b5%85%e6%89%80%e9%99%a5%e6%b2%a1/%e7%9f%b3%e7%82%ad%e3%83%bb%e4%ba%9c%e7%82%ad%e9%89%b1%e6%a5%ad%e3%81%ae%e8%b6%a8%e5%8b%a2/2/>>.
- 2) 川本朧万：亜炭掘削跡空洞の充填事業の変遷，一般社団法人充填技術協会，pp.9-25，2015.
- 3) 国土交通省中部地方整備局：～路面陥没を未然に防ぐため～国道 21 号亜炭鉱廃坑跡の空洞充填について，入手先＜<https://www.cbr.mlit.go.jp/kikaku/2019kannai/pdf/sa08.pdf>>.
- 4) ひろたみを：御嵩の亜炭鉱，株式会社リヨン社，pp.3-9，2002.
- 5) 御嵩町ホームページ：御嵩町ハザードマップについて，pp.21-22，入手先＜<https://www.town.mitake.lg.jp/portal/life-process/disaster-prevention/hazard-map/post0004992/>>.
- 6) 平野勝巳，古川茂樹，菅野元行，真下清，鈴木庸一，山口達明：新・有機資源化学—エネルギー・環境問題に対処する，三共出版株式会社，p.49，2014.
- 7) 川本朧万：地盤陥没災害と地下空洞調査について，物理探査，Vol.58，No.6，pp.589-597，2005.
- 8) 公益社団法人地盤工学会：針貫入試験，地盤調査の方法と解説，丸善出版株式会社，pp.426-432，2013.
- 9) 安部純平，藤井幸泰，浅野侃哲：亜炭層の風化過程と強度変化についての研究～乾湿風化過程の強度低下について～，令和 5 年度土木学会中部支部研究発表，2024.