

亜炭廃坑による地下空洞の特定化と 風化に関する研究

杉井俊夫, 余川弘至, 浅野憲雄, 上野 剛*

Identify Location of Cavity by Mining the Lignite and its Weathering

Toshio Sugii, Hiroshi Yokawa Norio Asano and Goh Ueno*

The underground cavity deterioration that there was made by digging of the lignite under the ground causes the cave-in of the ground surface, and the slant of the structure. This paper considers that we can identify location of underground cavity from the distribution of the Bouguer anomaly of the wide area. However, the Bouguer anomaly is affected by the thickness of the high-density stratum, therefore, authors suggest the technique that removed influence of the stratum thickness by using a simple trend of the Bouguer anomaly. In additional, a strength examination of the dryness and moisture repetition is performed to evaluate a strength drop caused by the hollow weathering of the brown coal. At the same time, ignition loss test is performed, and modification loading strength in consideration of the difference of the different sample suggested. As a result, there were few strength drops if an unsaturated state was kept, but it was elucidated that strength suddenly decreased when underwater state or saturated state curing reached the drying.

Keywords : Lignite, Underground cavity, Bouguer anomaly, Weathering

1. はじめに

亜炭が過去に採掘された地域において、廃坑から 50 年以上が経過した現在でも地表面の陥没や構造物の沈下・傾斜などの被害が発生し問題となっている。その主な原因は、亜炭採掘によりできた地下空洞(以下、亜炭坑)の劣化であるが、豪雨や地震をトリガーとして地表面の陥没や構造物の沈下・傾斜を引き起こしている。東北地方太平洋沖地震においても地下空洞の崩壊に伴い地盤の陥没が多数発生した。今日、発生が危惧されている南海トラフ巨大地震では、名古屋など大都市圏に存在する亜炭坑が崩壊する可能性があり、さらに大きな被害となることが予想される。亜炭坑は、全国各地に残っているが、位置の特定や対策については採鉱にあたった業者がすでに廃業しており、全くといって進んでいないのが現状である。そこで本研究では、亜炭坑の位置およびその深さが公開されている岐阜県御嵩町を例にとり、これまでに調べられた重力データ¹⁾の重力異常(ブーゲー異常)をもとに広域における低重力の分析から地下空洞の存在について抽出すること、また、空洞の風化による劣化から強度低下を把握するために、乾湿繰り返し点載荷試験と強熱減量試験を実施し、新たな強度指標を提案し、検討を行った。

* 大学院学生

2. 重力異常による空洞の特定化

2.1. ブーゲー異常の算出

ブーゲー異常は観測点における重力値に対して、潮汐、機械高およびドリフトに対しての補正を施し絶対重力値を求める。その後、緯度補正、フリーエア補正、ブーゲー補正、地形補正および大気補正の5つの補正を行う²⁾。図-1にブーゲー異常算出までのフローチャートを示す。潮汐補正は、測定の日時における太陽・月の引力効果を取り除くもの。機械高補正は、測定点と機器センサーの位置の高度差を取り除くもの。ドリフト補正は、センサー材料のクリープ効果により時間とともに測定値が単調増加するため、一定時間後に同一測定点で測定を行い、時間による増加量を取り除くもの。緯度補正は、測定点の緯度の違いによる重力差を取り除くもの。フリーエア補正は標高の違いによって生じる地球の引力の違いを、同一の基準面上の値（標高 0m）に引き戻すことで取り除くもの。ブーゲー補正は、観測点と基準面間の物質の引力の影響を取り除くもの。地形補正は、測定点周辺の地形起伏による引力効果を取り除くもの。大気補正は大気の質量による引力を取り除くものである。



写真-1 春日井市不二ガ丘での陥没跡
(2015年3月16日撮影)

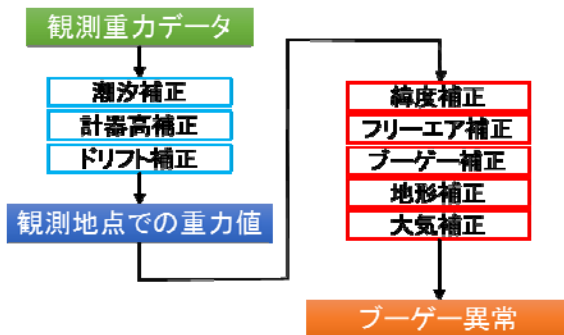


図-1 ブーゲー異常算出までのフローチャート

ブーゲー異常の値は、観測点での重力値（絶対重力値）に5つの補正を行うことで地下の密度構造のみを反映した値として算出される。また、もとの密度構造より仮想密度分を取り去った残差密度構造であり、仮想密度に対して高密度となる測定点ではブーゲー異常の値は正の値で表され、仮想密度に対して低密度となる測定点ではブーゲー異常の値は負の値として表されるものである。式(1)にブーゲー異常の算出式³⁾を示す。

$$BA = g - \gamma + \beta h - BC(\rho) + TC(\rho) + AC \quad (1)$$

ここに、 BA はブーゲー異常、 g は絶対重力値、 γ は正規重力値、 β はフリーエア勾配、 h は標高、 BC はブーゲー補正值、 ρ は補正密度（仮想密度）、 TC は地形補正值、 AC は大気補正值である。なお本研究では、ブーゲー補正および地形補正に必要な地球表面の仮想密度の値を平均的な花こう岩の密度 2.67 g/cm^3 を用いている。

2.2. ブーゲー異常分布

ブーゲー異常の値は地下の密度構造と連動性があると考えられており⁴⁾地下に空洞が存在する場合、ブーゲー異常の値は急激に低下すると考えられる。ブーゲー異常の急激な変化は堆積することで形成される地盤では断層が存在する地点を除き通常起こり得ないと考えられることから、急激なブーゲー異常

の低下を示す地点付近に空洞が存在している可能性が高いと考えられる。地下構造とブーゲー異常の変化のイメージを図-2に示す。

本研究では広域における地下空洞の存在を推定することを目的としているため、垂炭廃坑が多数存在しており、空洞の有無や深度が公開されている岐阜県御嵩町を対象地域とした。図-3に空洞深度分布図を示す。

図-3に空洞深度分布図を示す。

岐阜県御嵩町の地質的特徴は、主に第三紀と第四紀の地質から構成されており、北部の山地は中～後期ジュラ紀の付加コンプレックス砂岩層で構成されている。町の中心を流れる可児川の両岸に沿って第三紀と第四期が広く分布しており、町の東部には後期白亜紀に形成された花こう岩が分布している。図-4に御嵩町の地質図を示す。

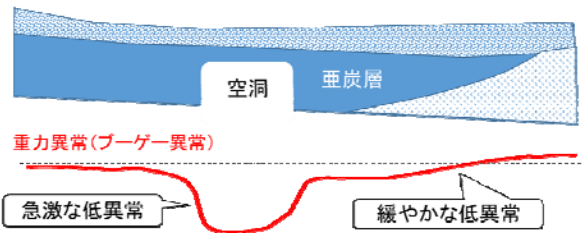


図-2 地下構造とブーゲー異常の変化のイメージ

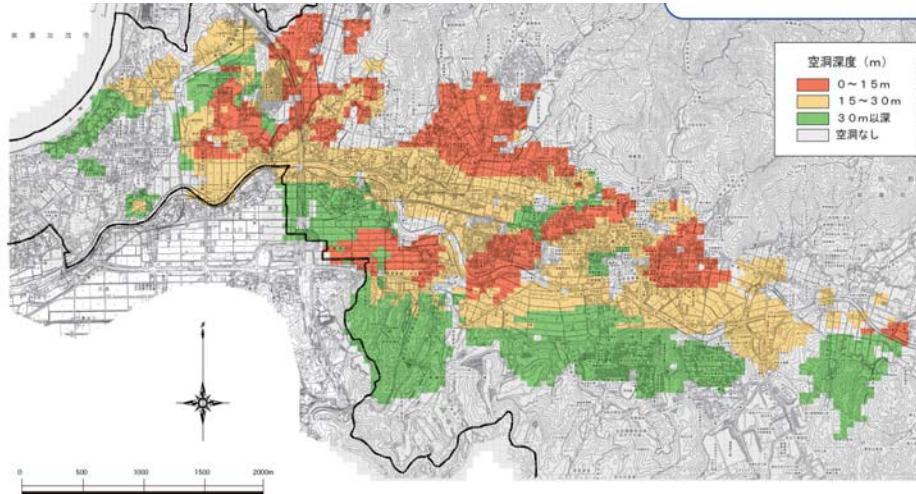


図-3 空洞深度分布図

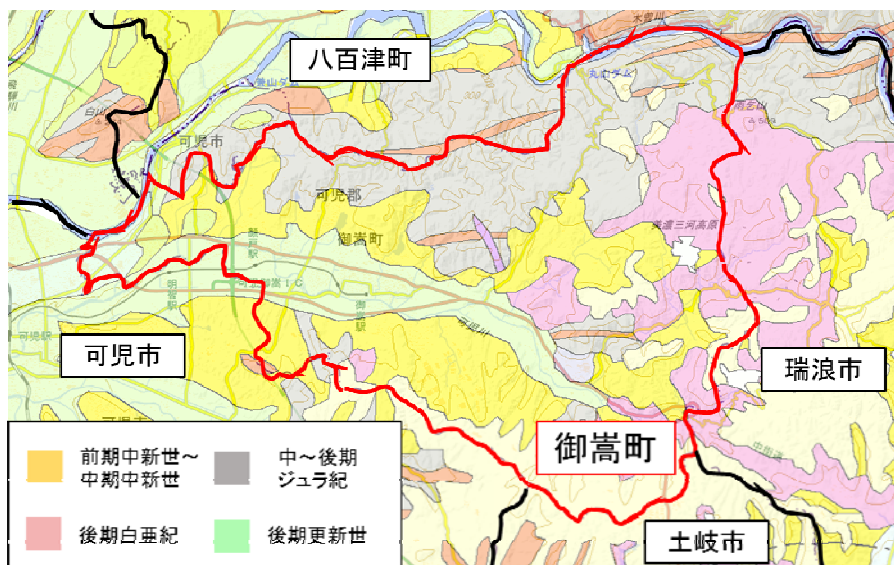


図-4 地質図 (産総研「地質Navi」)

御嵩町において過去に重力測定が行われた測定点がどれほど存在しているのかを重力データより選定し、GISを用いて測定点を御嵩町にプロットする。御嵩町における重力測定点を図-5に示す。

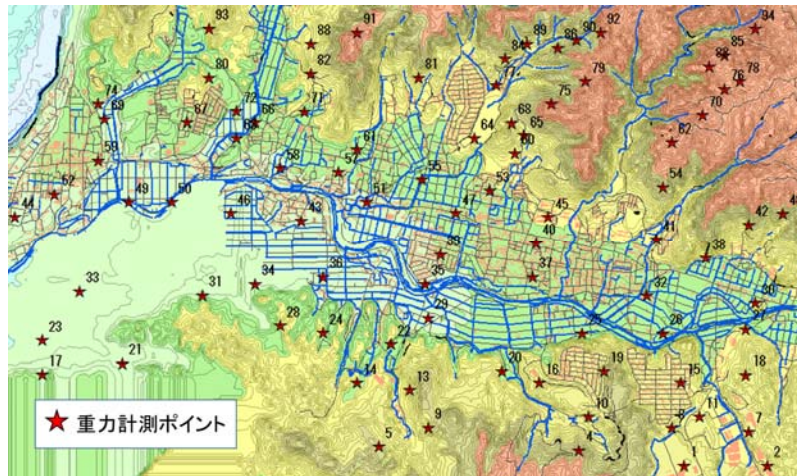


図-5 御嵩町における重力測定点

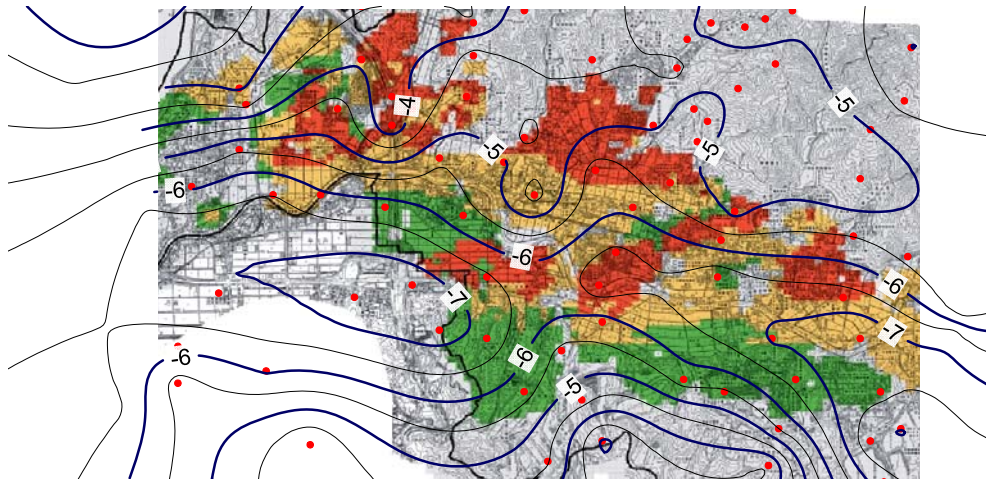


図-6 御嵩町における重力測定点

2.3. ブーゲー異常と空洞跡の関係

図-6は、各測点のブーゲー異常分布図を表したものである。亜炭鉱跡が存在する地域は、ブーゲー異常が低異常の傾向にある。しかし、図-7に示すように地盤の土質密度、すなわち地質構造により重力値（ブーゲー異常）に影響するため、空洞の影響だけで低異常が現れているとは言い難い。そこで、同一地質に近い重力分布の断面を抽出し(図-8)、ブーゲー異常の断面分布を作成することで地下に空洞が存在する可能性のある区間が推定できるか調べた。図-9に第4紀層の同一地質地盤におけるブーゲー異常の分布（東西方向）を示す。御嵩町の亜炭鉱跡の空洞がある点では、低異常のブーゲー異常が観測されており、同一地質地域においては、空洞のない箇所より低異常が観測されることがわかる。

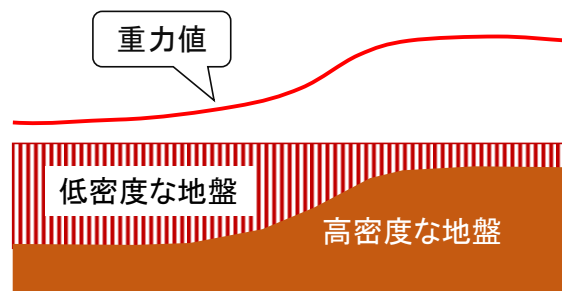


図-7 重力値と地盤密度の関係

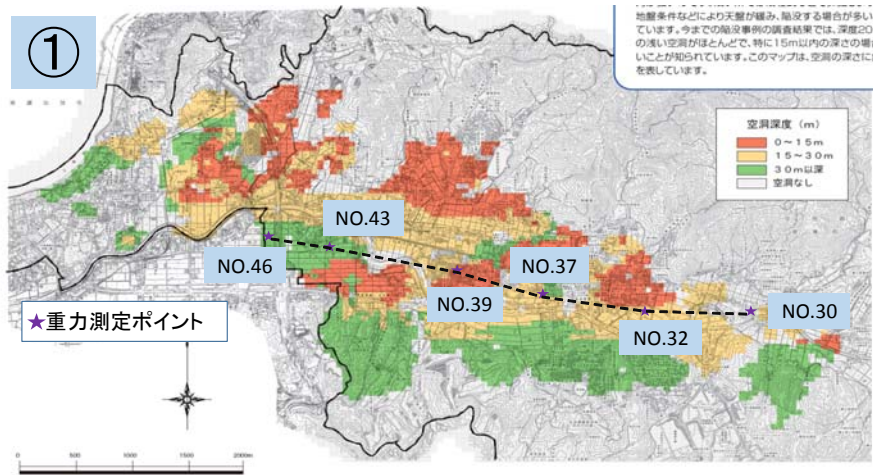


図-8 同一地質での重力測定地点

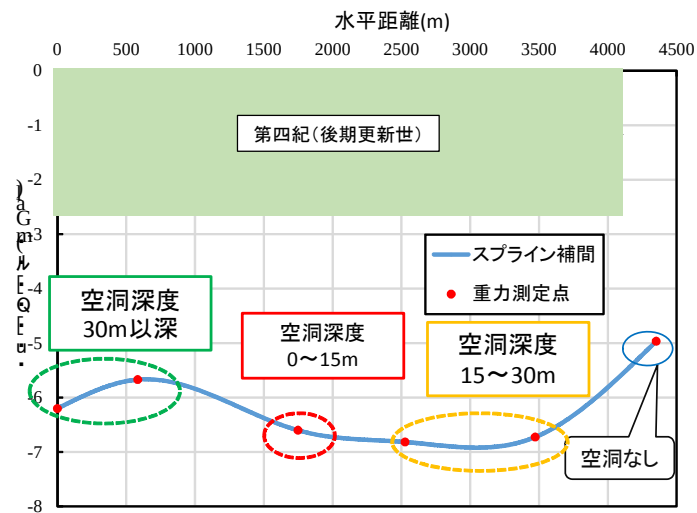


図-9 同一地質でのブーゲー異常

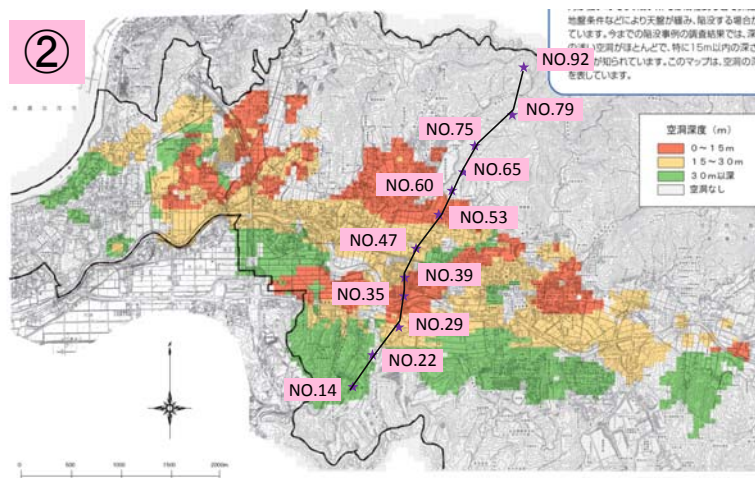


図-10 地質の異なる地点で重力測定地点

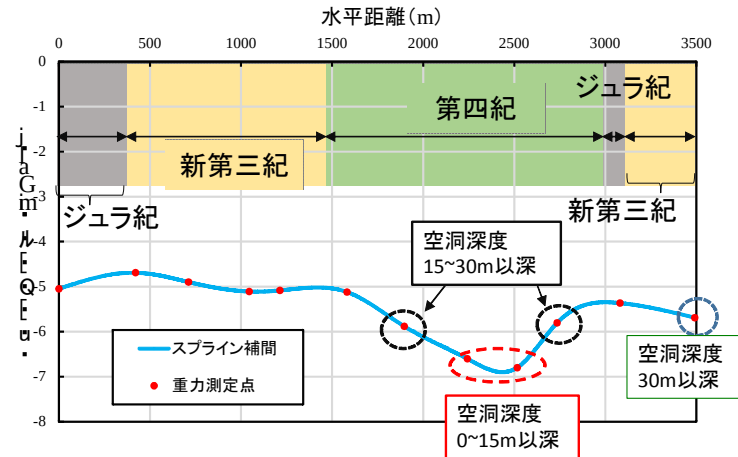


図-11 地質の異なる点でのブーゲー異常

次に、地質が違う場合のブーゲー異常分布について調べるために、さらに南北方向の測定点の断面を図-10に作成した。その点の分布を図-11に示す。第四紀層が他より低異常である傾向が読み取れる。なお、空洞がある場所は第四紀層にあること、また重力値は浅いものほど影響を受けることが知られており、空洞深度が浅いものほど、低異常であることもここから見ることができる。

空洞箇所が低異常であることは空洞箇所とブーゲー異常の分布からは明らかとなったが、密度の小さい亜炭層が第四紀層に含まれ、低異常となることを考えると、逆の低異常箇所である地点から空洞箇所であることを抽出することは難しい。

2.4. 周辺地盤トレンドとブーゲー異常

先の図-7の重力値と地盤密度の関係に示したように、重力値（またはブーゲー異常）は高密度の地層の厚さなどに影響を受ける。野崎ら⁴⁾は、マイクログラビティ調査によりブーゲー異常のデータのばらつきを一つの波形として取り扱い、FFT解析からトレンドとなる長い波形、短い波形によるノイズなどを分類し、地盤の空洞を調べた。著者らはさらに簡便な方法で周辺の地盤のトレンド推定し、そのブーゲー異常残差値から検討した⁵⁾。

図-2に示したように、地質による重力値の変化の勾配は断層や人工的に密度改変（空洞掘削など）を行った場合には急激な変化となることを考慮して、緩やかな変化を周辺地盤のトレンドとして求める。

図-12には、ブーゲー異常の点を3次スプライン補間を行い、そこから微分してブーゲー異常分布の勾配を算出し、同時に絶対値を示したものである。これより、0.002mGal/m以上を急激な変化と捉えて、この区間を除いて周辺地盤のブーゲー異常のトレンド（周辺地盤トレンド）を回帰して算出し破線で図-13に示した。北部(0m)から南部(4000m)の河川に向けて緩やかな波を打ちながら低下している傾向が読みとれる。得られた周辺地盤のトレンドをブーゲー異常から差し引き図-14に示した。ブーゲー異常の残差から空洞の可能性を示すが、第四紀層の中でのトレンドをさらに求める必要があり、そのためにはさらに第四紀層の中でデータが必要となる。

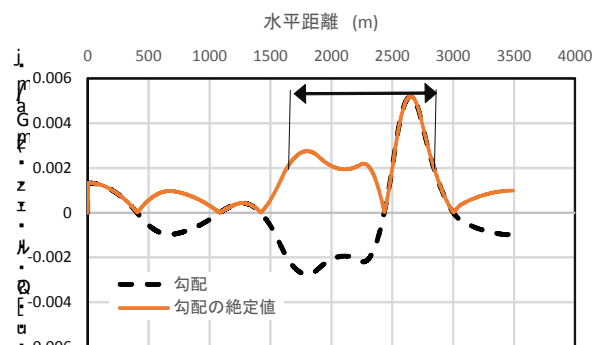


図-12 ブーゲー異常分布勾配

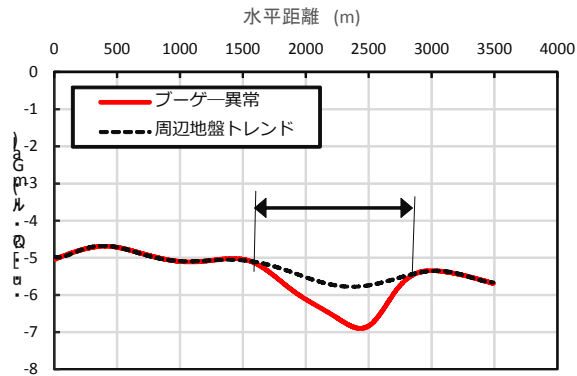


図-13 周辺地盤のトレンド

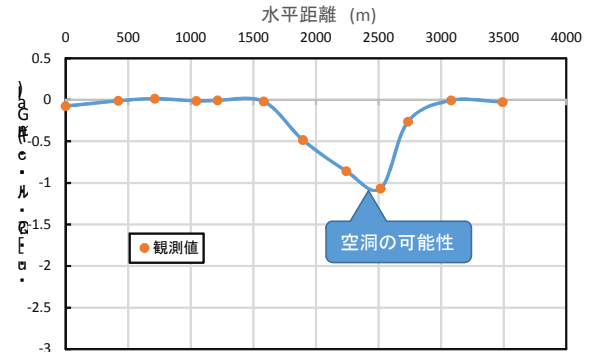


図-14 周辺地盤トレンドから求めたブーゲー異常残差

3. 亜炭鉱養生条件の風化強度特性への影響

3.1. 亜炭の風化

新第三紀の軟岩は、風化しやすい岩盤であることが知られている。風化しやすいゆえに、地震時における崩壊がしやすい岩盤であるということがいえる。地表面に見られる災害の事例としては地滑りや、斜面崩壊などがあげられる。また、地表面下の災害の事例として新第三紀の軟岩の一つである亜炭を原因とした亜炭坑に関する落盤があげられる。廃鉱後、埋め戻すには大規模のため、これまで空気に晒さないように亜炭空洞に水を充填させることで風化を抑えるような簡便な処置がされてきた。しかし、年月が経過し土地開発等によって水環境が大きく変わり、充填された水が漏れたり、枯れるといった空気に晒されるようになり風化が進行していることが考えられる。そこで、次に落盤の原因の一つである亜炭鉱内部の風化に着目し、亜炭鉱周辺の軟岩の風化強度特性を明らかにすることで亜炭鉱の新たな対策として役立てることができると風化特性について調べた⁶⁾⁷⁾。



写真-2 御嵩町の亜炭柱

3.2. 乾湿繰り返しによる風化試験

(1) 風化度を測るための点载荷試験

堆積軟岩は風化の結果薄い形状になりやすく、また亜炭は葉理面が多数存在し軟弱であるため、大きな供試体を作成することが困難ある。本研究では点载荷試験(JGS:3421)⁸⁾を用いて強度を測定し、風化度合いを次のように調べることにした。

- ① 軟岩の強度特性と湿乾繰り返しの影響を求める。その際、通常の岩石試験に用いる供試体の作成が困難となる。通常の岩石試験に比べ、小さな供試体で試験を行うことのできる「点载荷試験」によって力学特性を求める。
- ② 点载荷試験に用いる供試体として、採取してきた岩塊を 5cm 角程度の四角形状に切り供試体を作成する。

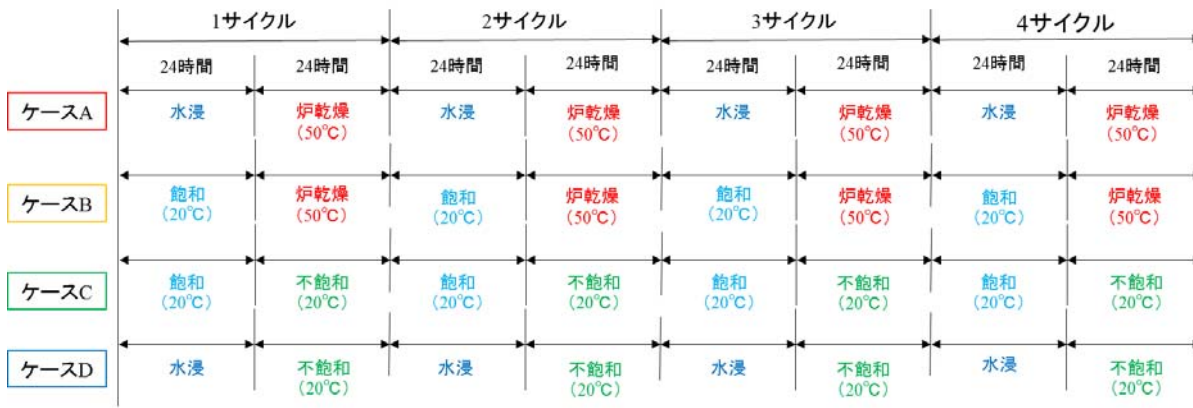


図-15 養生ケース

③供試体の養成条件としては水中養生と空气中湿度調整を用いる。また、乾燥方法も炉乾燥による強制乾燥法と自然空気乾燥による室内乾燥を用いる。この養生と乾燥の条件より図-15 に示すケース A ～D の 4 パターンにおいて、1 サイクルおきに試験を実施した。点載荷強さは式(2), (3)で算出される。

$$I_s = \frac{P}{D_e^2} \quad (2)$$

$$D_e = \frac{4WD}{\pi} \quad (3)$$

ここに、 I_s :点載荷強さ (MN/m²)、 P :破壊荷重 (N)、 D_e :等価コア径 (mm)、 W :供試体長辺幅 (mm)
 D :載荷点間隔 (mm) である。

(2)有機質含有量を測るための強熱減量試験

亜炭層を挟んでいる周辺層（砂岩質岩）の岩石もサンプルとして採取してきており、亜炭と砂岩とを有機物含有量をもって分類する必要がある。有機物含有量を測定する方法として本研究では、強熱減量試験（JIS A 1226）を参考に強熱減量を求めて判定する。

$$L_i = \frac{m_a - m_b}{m_a - m_c} \times 100 \quad (4)$$

ここに、 L_i :強熱減量(%), m_a :炉乾燥試料とるつぼの質量(g),
 m_b :強熱後の試料とるつぼの質量(g)
 m_c :るつぼの質量(g)

3.3. 試験結果

点載荷強さと強熱減量の関係を図-16.1 に、また点載荷強さと湿潤単位体積重量との関係を図-16.2 に示す、点載荷強さと強熱減量の関係は、強熱減量がサイクル回数に影響されないことから、サイクル回数に関わらず強度が低下するにつれて強熱減量は高くなっているといえる。しかし、湿潤単位体積重量が大きくなると点載荷強さが強くなる傾向が得られ、同じ固体条件で破壊まで至る点載荷試験を行うことができないため、サイクルの影響を調べるには、強熱減量と湿潤単位体積重量を用いて実測値の点載荷強さに式(5)に示すように換算することにした。

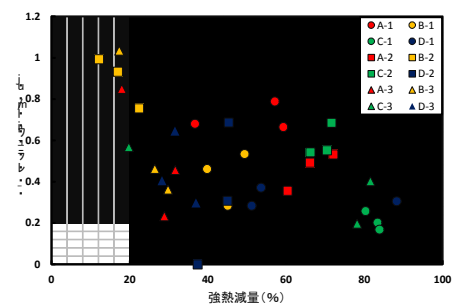


図-16.1 点載荷強さと強熱減量の関係

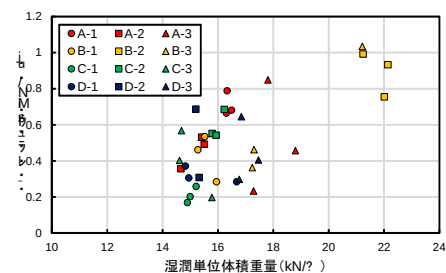


図-16.2 湿潤密度と強熱減量の関係

$$I'_S = \frac{I_S}{\gamma} \times L_i \quad (5)$$

ここに, I'_S : 換算した点载荷強さ, γ : 湿潤単位体積重量である.

換算した点载荷強さとサイクル数の関係を図-17.1~17.4に示す. 「水浸」: 水中養生, 「炉乾燥」: 50℃, 「飽和」: 湿度 90%以上での空気養生, 「不飽和」: 室内養生 40%程度である. この結果から, 「水浸」の水中養生から乾燥になるような状態 (Case-A) では, 3 サイクル目から強度が急激に低下することがわかる. また, 「飽和」: 湿度 90%以上での空気養生という最も現場に近い状態 (Case-B) では 2 サイクル目から急激に強度が低下することがこの結果から推察できる. 一方, Case-C や Case-D の载荷時に不飽和状態である供試体の強度の低下は顕著に現れていないことがわかる. 以上の結果から, 湿度が高い状況から乾燥に至ると強度が急激に低下することから, 亜炭の空洞は少しでも水を貯め, 湿潤状態にしておくことが, 重要であることが明らかとなった.

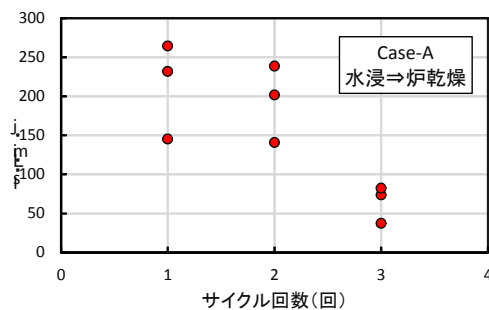


図-17.1 Case-A(水浸→炉乾燥の繰り返し)

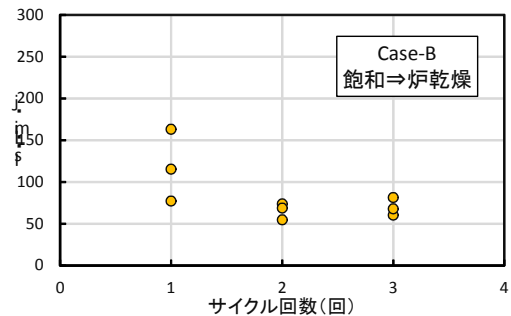


図-17.2 Case-B(飽和→炉乾燥の繰り返し)

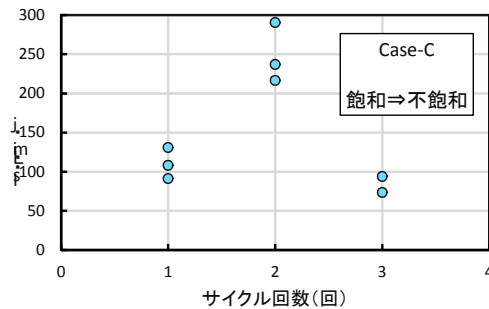


図-17.3 Case-C(飽和→不飽和の繰り返し)

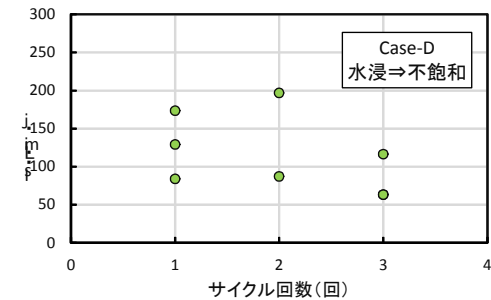


図-17.4 Case-D(水浸→不飽和の繰り返し)

4. おわりに

既存の重力分布のデータと亜炭鉱跡の分布から, 空洞の把握を試みた結果, 以下のことが得られた.

- (1) 亜炭鉱跡地でのブーゲー異常は-5mGal 以下と低異常の分布と相関が得られ, 特に同一地質地盤の中で, 空洞箇所では低異常を観測しており, 空洞深度が浅いほど低異常となることを得た.
- (2) 空洞箇所は低異常となることを明らかにしたが, 逆の低異常箇所が空洞箇所となることは地質構造にブーゲー異常が依存することから, 今後の課題となった.
- (3) ブーゲー異常の勾配 (変化) を使うことで周辺地盤のブーゲー異常のトレンドを簡便に求める方法を提案した. 勾配の閾値については検討が必要である.
- (4) 御嵩町の第四紀層には亜炭が挟まれており, 低重力となることがわかり, 今後その中でのトレンド

を求めていくことが必要と考えられた。

また、亜炭の乾湿繰り返し点載荷試験より次の点が明らかとなった。

- (5) 強熱減量（有機物含有量）が 20% を越えると湿潤密度 1.8g/cm^3 より小さくなり、亜炭の点載荷強度が低下することが得られた。
- (6) 湿度が高い状況から乾燥に至ると強度が急激に低下することを確認し、少しでも不飽和状態以上に空洞を保つ必要があると言える。

謝辞

今回、亜炭のサンプル採取または空洞データ等をご提供いただきました御嵩町役場の関係者各位に記して謝意を表します。また本研究は中部大学総合研究所（第 6 部門）の補助を受けた。

参考文献

- 1) 志知龍一・山本明彦監修：Gravity Database of South-west Japan , Gravity Database of Southwest Japan, Dec . 2001.
- 2) 今野正雄・野村誠紀・佐々木健夫・大角恒雄：高精度重力計による地下構造探査技術の開発，こうえいフォーラム第 12 号, pp.13-14, 2004.
- 3) 工藤健・丸目悠生・山本明彦・志知龍一：東日本北部地域の重力異常，中部大学工学部紀要，第 46 巻, pp.41-50, 2011.
- 4) 野崎京三：マイクログラビティ探査の現状とその利用，応用地質技術年 No.19 , pp.35-36, 1997.
- 5) 上野剛・杉井俊夫・余川弘至・浅野憲雄：重力異常を用いた広域地盤の調査，地下空間シンポジウム論文集報告集，第 21 巻，土木学会，pp.167-170，2016.
- 6) 上野剛・杉井俊夫・浅野憲雄：土木学会第 69 回年次学術講演会概要集，pp.493-494，2014.
- 7) 坂本昭夫：残存地下空洞による地盤の変状とその対策に関する研究，早稲田大学学位申請論文，2006.
- 8) 社団法人地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説，二冊分の 1，地盤工学会，pp.336-339, 2010.