

令和 5 年 5 月 2 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K05393

研究課題名（和文）石炭の地下ガス化におけるラジアルフラクチャリング現象の解明

研究課題名（英文）Mechanism of radial fracturing developed in Underground Coal Gasification

研究代表者

児玉 淳一（Kodama, Jun-ichi）

北海道大学・工学研究院・准教授

研究者番号：70241411

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：石炭の地下ガス化におけるリンキング孔の周辺に形成される放射状き裂の発生メカニズムを解明するため、石炭試料を対象に加熱実験を行い、Digital Image Correlationを用いて試料表面のひずみを計測するとともに、石炭の粘結性と放射状き裂の関係について検討した。その結果、温度が上昇するとひずみが集中するゾーンが現れ、き裂はひずみの集中ゾーンに発生すること、粘結性の低い石炭では放射状き裂は認められず、放射状き裂の発生は石炭の粘結性に依存することなどが明らかとなった。さらに、数値シミュレーションの結果から、500℃以上の温度での石炭の熱収縮が放射状き裂を発生させることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

放射状き裂の発生・拡大は、炭層内へ酸化剤を浸透しやすくするため、石炭の地下ガス化ガス化におけるガス化効率を向上させると期待できる。本研究の成果から、石炭の地下ガス化は粘結性の高い炭層で実施した方が効率的であり、また、500℃以上の温度領域を広範囲に拡大させることができれば、ガス化効率が向上すると予想できる。このように、本研究では、石炭の地下ガス化におけるガス化効率を向上させるためのいくつかの貴重な知見が得られており、これらの成果は、プロジェクトのサイトの選定やガス化方法の開発のための貴重な指標となり、石炭の地下ガス化プロジェクトの実用化の推進に貢献すると考える。

研究成果の概要（英文）：To elucidate the mechanism of radial crack formation around the linking hole in underground coal gasification, heating experiments were conducted on coal samples using Digital Image Correlation to measure the surface strain and investigate the relationship between coal viscosity and radial cracks. The results showed that strain increased with temperature and that zones of concentrated strain appeared at higher temperatures, leading to the formation of cracks. Radial cracks were not observed in coals with low cohesion, indicating that their initiation depends on the cohesion of the coal. Additionally, thermal contraction of coal above 500°C was found to cause radial crack initiation.

研究分野：岩盤力学 資源開発工学

キーワード：石炭地下ガス化 ラジアルフラクチャリング DIC 粘結性 熱応力解析 加熱・冷却 ひずみ 高温

1. 研究開始当初の背景

地下に賦存している石炭をその場で燃焼・ガス化し、有益なガスを回収・利用する技術である石炭の地下ガス化 (Underground Coal Gasification: UCG) は、汚染物質の排出を低減できる環境負荷の小さな石炭エネルギーの抽出技術である (図 1)。UCG ではメタンに加え水素も生産でき、また、燃焼・ガス化により形成される地下空洞は CO₂ の貯留にも利用できるため、指向性ボーリングの技術が進歩した昨今、世界的に注目され始め、欧州や豪州では国策として技術開発が進められている。

上述の背景の下、筆者らは、北海道の石狩炭田を対象に、UCG に関する模型実験や現場試験を実施してきている。そして、燃焼・ガス化領域の推定手法や、急傾斜の炭層を対象としたガス化技術の開発に成功するとともに、石炭エネルギーの回収率の向上を左右する炭層の特異な破壊現象 (ラジアルフラクチャリング) を発見するに至った。ここでラジアルフラクチャリングとは、リンキング孔 (注入孔と生産孔を結ぶ孔: 図 1) に沿った石炭の燃焼・ガス化により、燃焼空洞から石炭層内に放射状の引張型のき裂 (図 2) が発生する現象をいう。近年急速に開発が進んだシェールガスの生産では、根源岩中に人工的に破壊き裂を導入することにより、シェールガスの回収率の飛躍的な向上に成功しているが、UCG においても、炭層内での破壊き裂の発生は石炭エネルギーの回収率の向上をもたらすと期待できる。すなわち、注入ガス (酸化剤) が炭層内の広い範囲に流入すると、炭層の燃焼が活発化して高温状態が維持されるため、石炭のガス化反応は促進する。多様な賦存状態・環境にある炭層内でのラジアルフラクチャリングの促進技術の開発には、その発生のプロセスとメカニズムの解明が必要不可欠となる。

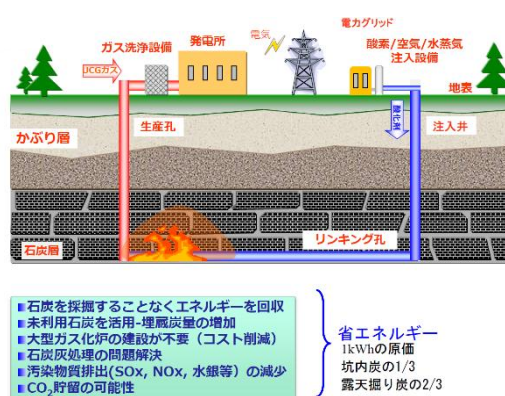


図 1 UCG の概略

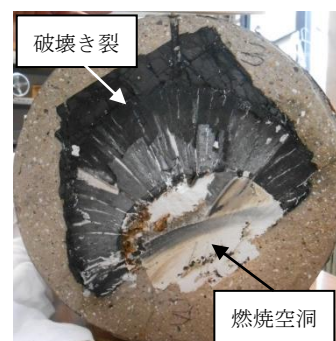


図 2 燃焼空洞から発生した放射状のき裂 (塊炭)

2. 研究の目的

本研究では、UCG 模型実験で認められたラジアルフラクチャリング (図 2) に着目し、以下の検討を行う。

(1) ラジアルフラクチャリングの発生のプロセスとメカニズムの解明: 引張型のき裂であるラジアルフラクチャリング (RAF) の発生メカニズムとして、以下の2つが考えられる。① 燃焼・ガス化プロセスでの熱収縮による引張応力の発生、② 消火プロセスでの温度勾配による引張応力の発生。微粉炭を乾留してコークスを作製するプロセスでは、微粉炭の性質が変化し、温度が 500°C を越えると、多環芳香族分子が縮重合してセミコークスは収縮することが明らかにされている。この微粉炭の乾留の場合と同じく、石炭ブロックでも熱収縮が起こると、上記①のメカニズムで石炭層にき裂が発生する可能性がある。すなわち、燃焼・ガス化プロセスでは温度が 500°C を越えると石炭は熱収縮に転じ、このときに生じる引張の熱応力によりき裂が発生する。一方、上記②は次のように考えられる。温度が上昇して石炭が膨張し続けると、燃焼・ガス化プロセスでは圧縮の熱応力が発生することになるが、石炭の熔融・軟化が起きるとこの圧縮応力は解放される。続く消火プロセスにおいて、温度が低下すると石炭は再固化・収縮し、このときに発生する引張の熱応力によりき裂が発生する。以上の2つの仮説を踏まえて、本研究では、加熱過程と冷却過程における石炭の熱変形特性の温度依存性を明らかにするとともに、RAF の発生温度を調べ、ラジアルフラクチャリングの発生プロセスを明らかにしたうえで、その発生メカニズムについて考察する。

(2) 燃焼中における石炭の熱変形の計測手法の開発: RAF の発生プロセス・メカニズムの解明には、石炭の熱変形の計測が必要となる。しかし、加熱により石炭の温度は 1,000°C 以上になるため、ひずみゲージなどの一般的な固体の変形計測手法は使えない。本研究では、画像解析により固体の表面の変形を計測できる DIC (Digital Image Correlation) を用いて石炭試料のひずみの計測を試みるが、その計測精度は計測・解析条件に大きく左右されると考えられる。このため、今回の試験条件下における適切な計測・解析条件を見出し、高温状態かつ燃焼現象を伴う固体の3次元変形計測手法を確立する。

(3) ラジアルフラクチャリングの発生に与える石炭の粘結性の影響の把握: RAF は熱応力

に起因すると考えられるため、その発生の有無は、石炭の熱的性質や力学的性質に依存すると予想される。本研究では、石炭の粘結性がラジアルフラクチャリングの有無やき裂長さに与える影響について検討する。

3. 研究の方法

(1) デジタル画像相関法による石炭の熱変形の計測手法の確立：図3のように、10cm程度の角柱状の石炭試料の中心に作孔した孔に設置したヒーターの温度を制御して、孔の表面を室温から約600℃まで加熱しながら、供試体の前面をサーモカメラとデジタルビデオカメラで撮影する。DICによるひずみの解析のために、石炭試料の前面には白色のペン等でランダムなマーキングをしておく。そして、DICによる石炭の変形計測における適切な計測・解析条件を求める。具体的には、ランダムマーキングのパターンやマークの大きさ、照明（ライト）の明るさ、ビデオカメラの位置などを調整する。なお、試験中は排気装置により生成ガスを排気するなど、良好な撮影環境を維持する。

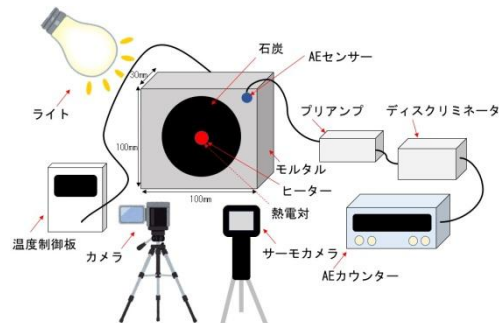


図3 加熱・冷却実験の概要

(2) ラジアルフラクチャリングの観察と石炭の粘結性の影響に関する検討：粘結性が異なる石炭試料を用意し、上記(1)で確立した計測・解析条件の下で石炭の加熱・冷却実験を行う。実験終了後に撮影画像を精査し、き裂の発生を観察するとともに、DIC専用の解析ソフトを用いて温度とひずみの関係を明らかにする。石炭試料は、粘結性の高い瀝青炭と低い褐炭とし、工業分析を実施する。そして、RAFの発生の有無と石炭の粘結性（炭種）との関係を明らかにする。

(3) 熱・力学モデルによるラジアルフラクチャリングの解釈：既往の研究で観察された明瞭なRAF(図2)を対象に、数値解析モデルを作製して熱応力解析を実施する。そして、引張の熱応力が発生する温度と発生領域を分析し、熱・力学モデルに基づき実験結果を合理的に解釈する。解析に用いる物性値は文献調査により推定する。

4. 研究成果

(1) デジタル画像相関法による石炭の熱変形の計測手法の確立に関する成果：

供試体と表面撮影用のカメラの距離を1mに設定すると、燃焼中の石炭表面の画像を鮮明にかつ効率良く撮影できた。また、排気装置による生成ガスの排気は画像を鮮明に保つ効果があり、照明（ライト）を用いて夜間に撮影することにより、安定した画像が得られた。黒色の耐熱ペイントコートを石炭表面に塗布した後、色彩が一樣になるようにコーティングすることにより石炭の不均一性による計測結果のばらつきを小さくすることができた。油性のホワイトペンを用いて、白のマーキングをすることにより、画像のコントラストが強くなり、ひずみの分析が容易になった(図4)。なお、マーキングのサイズを直径約1mmにすることにより、供試体の表面の全域のひずみを分析できた。

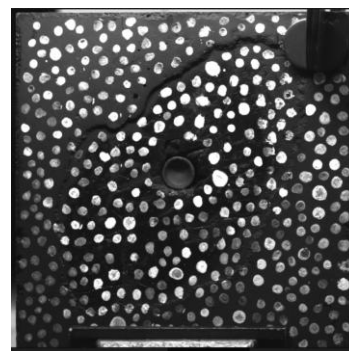


図4 黒色の耐熱ペイントを塗布した後にホワイトペンでマーキングした供試体

(2) ラジアルフラクチャリングの観察と石炭の粘結性の影響に関する成果：

温度の上昇とともに石炭試料は次第に膨張し、温度が400～500℃の間で膨張量が急に大きくなるが、温度が500℃以上になると、粘結性の高い石炭では、逆に収縮挙動に転じ、ラジアルフラクチャリングが発生した。ひずみの分布は温度の分布と対応し、円孔表面に近づくほどひずみの値が大きくなる傾向が見られたが、既存のき裂に沿ってひずみが大きくなる特徴も見られた。また、き裂の進展によりひずみの値が大きくなり、ひずみの変化とき裂の伸長には良い対応関係が認められた。一方、粘結性の低い石炭試料では、ラジアルフラクチャリングは観察できず、モルタル部分から石炭中の円孔に向かう単一のき裂が発生し、このき裂が円孔の反対側へと伸長した(図5)。このことから、き裂の発生は石炭の粘結性に依存し、粘結性が低い石炭ではラジアルフラクチャリングが認められないことが明らかになった。なお、加熱により、石炭表面では伸長変形が見られるが、伸びひずみの増加は表面内で一様ではなく、伸びひずみが卓越して増加するゾーンが出現した。そして、このゾーン内の最大伸びひずみの値が約0.8%に達すると、き裂の発生が認められたことから、伸びひずみ0.8%がき裂の発生条件として使用できる。



図5 DICで計測した石炭表面の主ひずみの分布の例

(3) 熱・力学モデルによるラジアルフラクチャリングの解釈に関する成果：

500°C以上の温度領域では石炭が収縮変形を示すと仮定すると、円孔周辺の応力状態は引張となり（図6）、円孔の温度が600°Cに達する途中で引張応力は、石炭の一般的な引張強度（約1~5MPa）より大きくなった。また、引張応力が石炭の引張強度を上回る領域の寸法は、実験でラジアルフラクチャリングが形成された領域の寸法とほぼ一致した。したがって、粘結性の高い石炭でのラジアルフラクチャリングは、500°C以上での石炭の熱収縮のため生じる引張応力により発生したものと解釈できる。

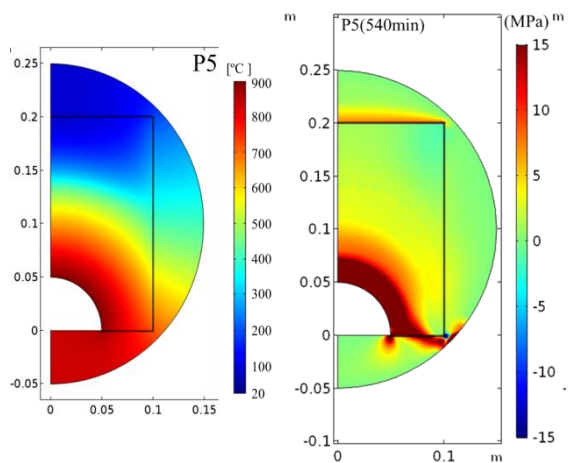


図6 数値シミュレーションで推定した供試体の表面温度と主応力の分布

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 池田雅裕, 児玉淳一, 出口剛太, 濱中晃弘, 板倉賢一, 高橋一弘, 福田大祐, 藤井義明
2. 発表標題 三笠市での水素利用型UCGに関するプレF/S
3. 学会等名 資源・素材2021（札幌）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 濱中晃弘, 板倉賢一, 蘇発強, 高橋一弘, 児玉淳一, 出口剛太
2. 発表標題 最近の石炭地下ガス化（UCG）模擬実験の取り組みと水素生成に関する考察
3. 学会等名 資源・素材2021（札幌）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 安藤勇太, 濱中晃弘, 板倉賢一, 笹岡孝司, 島田英樹, 児玉淳一, 出口剛太
2. 発表標題 石炭地下ガス化（UCG）システムにおける反応領域の推定に向けたAE計測の適用性
3. 学会等名 資源・素材2021（札幌）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuki Ando, Akihiro Hamanaka, Ken-ichi Itakura, Takashi Sasaoka, Hideki Shimada, Jun-ichi Kodama, Gota Deguchi
2. 発表標題 Applicability of AE Monitoring for Estimating Gasification Zone in Underground Coal Gasification (UCG)
3. 学会等名 International Symposium on Earth Science and Technology 2021（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 安藤勇太, 濱中晃弘, 板倉賢一, 蘇発強, 児玉淳一, 出口剛太
2. 発表標題 大規模UCG模型実験における反応領域の推定に向けたAE計測の適用性
3. 学会等名 資源・素材学会2022年度春季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 濱中晃弘, 板倉賢一, 蘇発強, 高橋一弘, 児玉淳一, 出口剛太
2. 発表標題 石炭地下ガス化 (UCG) 模擬実験によるガス化制御に関するこれまでの知見
3. 学会等名 資源・素材学会2022年度春季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yoshimitsu MAKABE, Akihiro HAMANAKA, Ken-ichi ITAKURA, Jun-ichi KODAMA, Gota DEGUCHI, Nuhindro Priagung WIDODO, Budi SULISTIANTO, Takashi SASAOKA, Hideki SHIMADA
2. 発表標題 Experimental Study on Co-axial System with A Horizontal Well of Underground Coal Gasification to Evaluate Gasification Efficiency
3. 学会等名 Proc. of International Symposium on Earth Science and Technology (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 濱中晃弘, 眞壁良充, 板倉賢一, 笹岡孝司, 島田英樹, 児玉淳一, 出口剛太
2. 発表標題 石炭地下ガス化におけるガス化反応領域のモニタリングのための AE計測の適用性に関する基礎的研究
3. 学会等名 資源・素材2020 (仙台)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	佐分利 禎 (SABURI TEI) (40415782)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・エネルギー・環境領域・主任研究員 (82626)	
研究 分担者	福田 大祐 (FUKUDA DAISUKE) (80647181)	北海道大学・工学研究院・准教授 (10101)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------