急速加圧時の石炭, 夾炭層岩石の温度変化*

島田 莊平¹

Temperature Change of Coals and Coal-Bearing Rocks by Rapid Change of Surrounding Pressure

by Sohei SHIMADA¹

1. Faculty of Engineering, The University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo 113

Gas pressure and rock pressure in coal seams are related to the occurrences of a gas outburst. Prediction of a high stress zone in advance of mining enables the selection of a proper countermeasure against a gas outburst, but it takes much time and cost to measure the underground rock pressure with the mining operations and it is not practical.

In some countries the temperature is measured in order to judge the high stress zone in a coal seam. There are two contradictory ideas about the relationship between temperature and stress in the coal seam; one being that the temperature increases in accordance with the increase of stress, and the other one being that the temperature decreases in accordance with the increase of the stress. These contradictory thoughts come from the following reasons. The temperature rise caused by the stress rise has two reasons. The first one is caused by the direct adiabatic process in coals and rocks and the second one is caused by the low temperature oxidation at the high stress zone where many cracks are generated by the high stress, when the high stress zone is near the surface of the coal seam and the air flows into these cracks. The temperature decrease by the stress rise comes from the gas release from pores in the coal seam having high gas content and gas pressure to the cracks which are generated by the high stress.

To get the fundamental data of the relationship between temperature change and stress change, the author measured the temperature of the coals and rocks obtained in Japanese coal mines by changing the surrounding pressure up to 34 MPa for the confining pressure and the uni-axial compression.

The temperature rise was $0.22 - 0.46\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ MPa}$ for the coals and $0.07 - 0.25\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ MPa}$ for the rocks under confining pressure. These values were too small to apply the measurement of temperature change for the proper prediction of a high stress zone.

KEY WORDS: Coal, Rock, Stress, Temperature Change, Gas Outburst

1. ま え が き

ガス突出の発生にはガス圧と地圧が関係していることはよく知られている。炭層内の地圧の大きい箇所を前もって把握できれば、効果的な突出対策を実施でき突出の防止につながる。現場での直接の地圧測定は費用、作業量の面で現実的でない。外国では、地圧の状態を簡便に判定する方法として、温度による監視を行っている国もある。炭層については、荷が大きくなると温度が上昇するという報告と、減少するという報告がある。温度が上昇する場合は応力の増加が直接温度増加となって現れる場合と、炭層に荷がかかったために炭層内に亀裂が生じ、炭壁面からの距離が小さい場合には空気の流入により酸素が供給され、低温酸化により間接的に温度が増加する場合とがある^{1) 2)}。温度が減少するのは炭

層内のガス包蔵量が多い場合で、荷が作用したため炭層内に亀裂が生じ、ガスが放出され膨張するため温度が低下するものである³⁾。これも間接的な現象と考えられる。

これらの荷の作用による温度変化のうち、直接的な変化の値、すなわち、応力変化によって生じる温度変化に関しては我が国では報告されたものがない。筆者は、応力変化により直接生じる温度変化の基礎データを得るため、石炭および岩石につき、周圧下で圧力を最大34 MPaまで急激に変化させた場合の温度変化と一軸圧縮破壊時の温度変化を測定し、この方法による地圧監視およびガス突出予知の可能性について検討した。

2. 基 礎 考 察

まず初めに、理論的にどの程度の温度変化が考えられるかを検討した。

岩石等を急激に加圧した場合は断熱過程と考えられるので、断熱圧縮時の物体の温度変化について考察する。いま、 q : 熱量、 T : 温度、 s : エントロピー、 C_p : 定圧比熱、 A : 仕事の熱当

* 1993年5月10日受付 7月30日受理 資源・素材学会平成5年度春季大会にて一部発表

1. 正会員 工博 東京大学助教授 工学部資源開発工学科
キーワード: 石炭, 岩石, 応力, 温度変化, ガス突出

量, P : 圧力, v : 比容積 ($v = v(P, T)$) とすると,

$$dq = Tds = C_p dT - AT \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P dP \quad \dots\dots\dots (1)$$

断熱変化ではエントロピーが一定であるので, 上式をゼロとおくと,

$$Tds = 0 = C_p dT - AT \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P dP \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\therefore dT = (AT/C_p) \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P dP \\ = (AT/C_p) v \beta dP \quad \dots\dots\dots (3)$$

となる。ここで, β は体積熱膨張係数である。

いま, 石炭を 0 MPa から 35 MPa に圧縮する場合を想定し, 代表的な値を代入してみると,

$A = 1/427$ (kcal/kg $\cdot$ m), $C_p = 0.25$ (kcal/kg $\cdot$ °C), $v = 1/1.3 \times 10^{-8}$ (m³/kg), $dP = 3.5 \times 10^6$ (kg/m²), $T = 293$ K, α (線膨張係数) = 3×10^{-5} (1/°C), $\beta = 3\alpha = 9 \times 10^{-5}$ (1/°C) とすると, $dT = 0.665$ (°C) となる。すなわち, 石炭については 10 MPa 当たり約 0.2 °C の温度増加となることが分かる。

3. 周圧加圧による測定

3.1 実験装置

実験装置のブロック図を図1に示す。試料への加圧は手押しポンプと圧力容器を用い, 油で試料周囲から加圧した。圧力容器は直径20 cm, 深さ20 cmで, 設計耐圧は70 MPaである。試料は圧力容器内に入るよう石炭については一辺が数cmの塊状になるように, ハンマーで適当な寸法に調整した。岩石試料については直径5 cm, 長さ10 cmのコア抜き試料を使用した。加圧用油が加圧時に試料内部に侵入するのを防ぐため, 試料周囲は図2のようにゲル状のシリコンを用い, 厚さ1cm程度にコーティングした。また試料にはハンドドリルにより, ほぼ中央まで直径3 mmの孔をあけ, その内部に温度測定用のサーミスタを挿入した。油温を測定するため加圧用油内にもサーミスタをセットした。圧力変換器で測定したポンプの圧力(油圧), サーマスタで測定した試料および油内の温度はデジタル・ボルトメータを介してパーソナルコンピュータに記録した。

測定は次のように行った。まず手動によりポンプの圧力を急激に測定圧にあげ, 保持する。圧力を上げ始めてから保持するまでの時間は5-10秒である。加圧し始めると同時にトリガーが作動し温度測定が始まり, 10秒おきに温度を計測する。

3.2 予備測定

一連の測定に先立ち, 油の温度増加を測定した。結果を図3に

図1 実験装置ブロック図(周圧)

図2 試料コーティング方法(石炭)

示す。この加圧時の温度増加は後で示す石炭や岩石の温度増加よりはるかに大きい。

シリコンコーティングをして10秒おきに計測した試料の温度は, 例えば, 加圧時には図4(a)のような経時変化を示した。加圧時には初め温度が上昇し, その後温度が低下し, さらに時間が経過するとゆっくりと温度が上昇した。これは次のように解釈できる。

最初の段階の温度上昇は, コーティングした際の試料とシリコンの間にあった空気の圧縮の影響が出たものと考えられる。石炭の空隙内のガスの圧縮の影響による温度上昇に関しては, 石炭骨格の変形量が小さいことから, この変形により空隙内ガスを圧縮して生じる温度増加はほとんどない。次の段階の温度低下は, こ

図3 油の温度変化

図4(a) 加圧時の温度経時変化(0 MPa → 30 MPa)
(芦別炭, SAMPLE No. 18)

図4(b) 加圧時の温度経時変化(0 MPa → 30 MPa)
(赤平, 11番層炭, SAMPLE No. 17)

図5 芦別頁岩の温度変化(周圧)
(○RUN 67, △RUN 68, □RUN 69)

図6 赤平砂岩の温度変化(周圧)
(○RUN 42, △RUN 43, □RUN 44)

の空気の圧縮熱の試料への拡散によるものと思われる。最後の段階の温度上昇は試料よりも高温になる油からの石炭への熱伝導によるものと考えられる。減圧の場合には、加圧時と全く逆の現象が生じた。このような考察から、加圧時の温度増加の値としては、経時変化での最小値、すなわち図4(b)の破線で示した値を用いた。

3.3 測定結果

測定に使用した試料は、石炭、岩石とも赤平炭鉱および芦別炭鉱で採取したものである。

図5に芦別頁岩の温度上昇測定結果例、図6に赤平砂岩の温度上昇測定結果例を示す(RUN番号は測定順序を示している)。いずれの場合も、周圧の増加とともに温度増加の値が大きくなっており、図は下に凸の曲線となっている。

図7に芦別炭の温度上昇測定結果例、図8に赤平炭の温度上昇測定結果例を示す。岩石の場合と異なり、周囲圧力の増加にかかわらずほぼ線形で温度が上昇している。

これらの実験結果を圧力変化10MPa当たりの温度増加率として表1にまとめた。岩石については周圧の大きさにより、温度増加率が異なるので、測定圧力内での最小値と最大値の範囲で表した。石炭の温度増加率は0.22-0.46(°C/10MPa)で、その平均値は芦別炭が0.31(°C/10MPa)、赤平炭が0.36(°C/10MPa)となる。一方、岩石については周圧によって温度増加率が変化し、0.07-0.25(°C/10MPa)の範囲にある。それぞれの岩石についてみると、赤平砂岩の場合の平均値は0.08-0.18(°C/10MPa)、芦別頁岩の平均値は0.10-0.19(°C/10MPa)となり、石炭の場合の約2-4分の1の温度増加率になっている。

4. 一軸圧縮による測定

ガス突出の発生などを考えると、応力変化が問題になるのは炭壁に近い部分での炭層である。この部分では炭層は静水圧状態ではなく、炭壁面方向に応力が若干解放されているものと考えられる。したがって、上で求めた温度増加率とは異なった温度増加率になることが予想される。周圧でない圧力が作用した場合の石炭、岩石の応力変化と温度との関係を見るため一軸圧縮時の温度増加

図7 芦別炭の温度変化(周圧)
(○RUN 3, △RUN 4, □RUN 5)

図8 赤平炭の温度変化(周圧)
(○RUN 14, △RUN 15, □RUN 16)

表1 加圧時の温度増加率(周圧)

試料名	温度増加率 (°C/10MPa)	平均値 (°C/10MPa)
芦別炭(-)	0.31 0.22 0.31	(0.31)
芦別炭(N2-705L)	0.31 0.22 0.47	
芦別炭(N2-795L)	0.26 0.34	
赤平炭(8番層)	0.27 0.33	(0.36)
赤平炭(11番層)	0.40 0.46	
赤平炭(9番層)	0.37 0.36 0.33	
赤平砂岩	0.07 - 0.16 0.08 - 0.20	(0.08 - 0.18)
芦別頁岩	0.07 - 0.13 0.12 - 0.25	(0.10 - 0.19)

率を測定した。

4.1 実験方法

図9に実験装置ブロック図を示す。試料は中心までドリルで孔を開け、それに温度測定用サーミスタを挿入した。ドリル孔には

1. Press 2. Load Cell
3. Specimen
4. Strain Gauge
5. Thermistor
6. Digital Voltmeter
7. XY-Plotter

図9 実験装置ブロック図

図10 赤平砂岩の応力・ひずみ・温度変化線図

図11 三池炭の応力・ひずみ・温度変化線図

表2 一軸圧縮時の温度増加率

試料	高さ (mm)	直径 (mm)	圧縮方向	圧縮強度 (MPa)	ヤング率 (MPa)	温度増加率 (°C/10MPa)
芦別頁岩 No. 1	101.5	49.2		50.0	1.06×10^4	0.0104
No. 2	101.2	49.4		56.5	1.48×10^4	0.0047
No. 3	100.7	49.4		59.7	1.32×10^4	0.0117
赤平砂岩 No. 1	102.0	49.0		49.7	1.37×10^4	0.0155
No. 2	102.2	49.4		61.8	1.31×10^4	0.0113
No. 3	84.5	49.2		47.9	1.42×10^4	0.0133
赤平炭 #11	94.5	69.0	炭目に平行	2.74	6.5×10^2	0.172
芦別炭 No. 1	62.0	49.5	平行	4.71	---	0.181
(L790) No. 2	56.5	49.8	垂直	2.58	14.8×10^2	0.298
No. 3	48.3	49.2	垂直	2.20	9.4×10^2	0.090
No. 4	51.0	49.3	垂直	2.37	4.0×10^2	----
No. 5	52.5	68.7	平行	11.62	----	0.180
No. 6	39.5	40x40 (*)	不明	5.09	10.2×10^2	0.149
三池炭	68.3	59x46 (*)	炭目に平行	17.05	64.5×10^2	0.123

(*) 角型

サーミスタをセットした後、粉状の試料を埋め込み、外部への熱の流れをできるかぎり少なくするように努めた。温度測定の誤差を少なくするため、試料は測定開始前、一昼夜試験室内に放置して置き、室温と同じ温度になるようにした。圧縮試験機に設けたロードセルにより加圧力を、また試料側面に貼ったひずみゲージにより圧縮時のひずみを、試料が破壊するまで測定した。試料が破壊するまでの時間は加圧開始後30～60秒である。加圧力、ひずみ、温度のデータはデジタル・ボルトメータを介してXYプロッターで記録した。

4.2 実験結果

実験には、周圧作用実験の場合と同じ赤平炭鉱ならびに芦別炭鉱で採取した石炭、岩石と新たに三池炭を使用した。

図10に赤平砂岩の応力・ひずみ・温度変化線図、図11に三池炭の応力・ひずみ・温度変化線図を示す。

一軸圧縮の場合の温度増加率は圧縮破壊強度と破壊までの温度変化から求めた。したがって、これらの値は破壊までの平均的な温度増加率と考えることができる。結果を表2に示す。温度増加率は芦別頁岩で0.01 (°C/10 MPa) 程度、赤平砂岩では0.011～0.016 (°C/10 MPa) となり、周圧作用の場合よりもはるかに小さな値となった。一方、石炭は0.1～0.3 (°C/10 MPa) の温度増加率で、周圧作用の場合の約2分の1に低下した。

5. まとめと考察

石炭および岩石を圧縮した場合の圧力と温度増加の関係を求め

る基礎実験を行った。その結果をまとめると次のようになる。

1) 周圧作用の場合、岩石では0.1～0.2 (°C/10 MPa) 程度の温度増加がみられ、これは圧力によって変化した。石炭では0.3～0.4 (°C/10 MPa) 程度の温度増加がみられ、これは圧力に依存せずほぼ一定であった。

2) 一軸圧縮の場合の温度増加率は、岩石では0.01 (°C/10 MPa) 程度、石炭では0.1～0.3 (°C/10 MPa) 程度となり、いずれの場合も周圧作用時より小さな値となった。

石炭や岩石の圧縮時の破壊・変形過程と温度増加の関係についてはよく分らない点が多い。

この研究で求められたような小さな温度増加を現場で測定し、地圧変化の予知ならびにガス突出の予知に役立たせるためには、非常に正確な測定と測定データの的確な解釈が必要であり、現状では不可能と思われる。炭層内の温度測定により地圧状態を把握しようとするならば、亀裂形成によって起こるガス放出時の温度低下の測定など、間接的な温度変化を測定する方が有望であると思われる。

最後に本研究にあたり、ご協力頂いた東京大学工学部 大村昭士助手に感謝の意を表したい。

引用文献

- 1) Makarov, U. N. : ФТПРПИ, No. 5, p. 108-112, (1982)
- 2) Ettinger, I. L. et al. : ФТПРПИ, No. 5, p. 65-69, (1984)
- 3) Borisinskii, M. I. et al. : УГОЛЬ, No. 3, p. 12-14, (1983)