HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	ガス突出モデル実験における側圧加圧過程で供試体内に発生する特徴的現象について
Author(s)	手嶋, 芳博; 氏平, 増之
Citation	北海道大學工學部研究報告, 141, 43-54
Issue Date	1988-07-29
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/42126
Type	departmental bulletin paper
File Information	141_43-54.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

北海道大学工学部研究報告
第141号（昭和63年）

Bulletin of the Faculty of Engineering,
Hokkaido University. No. 141 (1988)

ガス突出モデル実験における側圧加圧過程で供試体内に発生する特徴的現象について

手嶋芳博　氏平増之

（昭和63年3月31日受理）

On the characteristic phenomena that occurs in the process of lateral stress pressurization in a scale model study on coal and gas outburst

Yoshihiro TEJIMA and Masuyuki UJIHIRA

(Received March 31, 1988)

Abstrct

In the present paper, the results of a scale model study on coal and gas outburst in which both pore gas presure and mechanical stress were applied to the model material that consisted of wood rosin are described. In the experiment, even when pore gas pressure was insufficient to bring about outbursts by its pressure, gas outbursts could occur by applying lateral stress. It has been observed that outbursts can occur only when the crak gas pressure gradient appears in the neighbouring range of the exposed surface of the confined test piece by its internal brittle destruction.

1. はじめに

炭鉱におけるガス突出は，採掘切羽の深部化などにより，その危険性が増している。この原因解明のため，わが国，独，露，オーストラリア，中国，ポーランドなどで従来から多くの研究がなされているが，発生機構についてはまだ不明確な点が多く，学問的統一見解が得られていない。[1)2)3)]これは，ガス突出現象が非常に危険な現象であるため坑内における実際の現象を詳細に観察出来ないため，また1回ごとの現象形態がケースによって異なるためである。

筆者らは，ガス突出解明のためにモデル実験をおこなっている。[4)5)6)]現在，行っているモデル実験は，地圧と炭層内のガス圧を考慮したもので，孔隙ガス圧を加えた材料に，地圧に相当する機械的な圧力を加えたモデルを用いガス突出の実験室的再現が可能になっている。本報文では，その実験結果を示し，この実験で発生しているガス突出のメカニズムについて述べる。

2. 実　　験

ガスを包蔵しない石炭・岩石がガス突出したことは無い。また，北海道の場合を例にとると，

資源開発工学科　保安学講座

ガス突出は地表下—100m を超える深度から発生しており，地圧作用下で発生していることも確かである。[7]このため，本実験では無数の孤立した微小孔隙内にガス圧が加えられた供試材料に，地圧に相当する機械的な圧力を加えるという実験モデルを採用している。本章では，モデル実験装置，供試材料の性質，実験方法，計測方法等を述べる。

2．1 実験装置

実験装置は図１に示すごとく，突出発生装置，地圧に相当する機械的な側圧を加える電動油圧ポンプ，ガス圧・側圧・AE・ひずみ測定用計器類からなっている。また，突出発生装置は，250×250×800mm，内容積50l の耐圧容器である。この詳細な寸法を図２に示す。この耐圧容器は図２左側面と上部の一面が取り外せるように作られている。上面の上蓋には，供試材料に側圧を加えるフラットジャッキ取付孔，５箇所の測定孔が設けられており，ガス圧トランスジューサーおよびひずみゲージ等の取付孔として用いられる。また，左側面の上蓋には，ガス圧注入孔，モニター用ブルドン管ガス圧計取付孔，ガス圧トランスジューサー取付孔が設けられている。

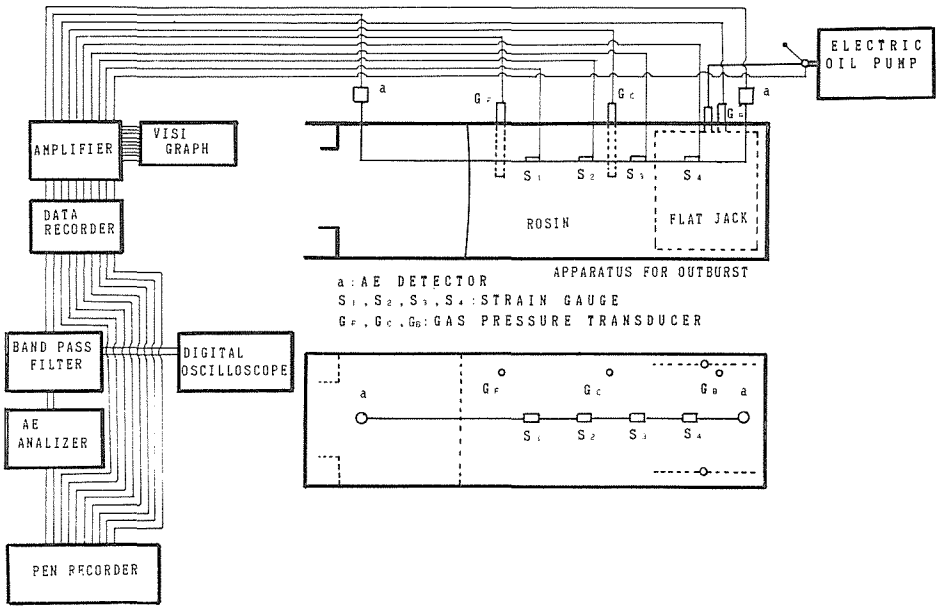


図１ ガス突出モデル実験装置

2．2 供試材料

この実験における供試材料にはロジンを使用した。ロジンは松脂からテレピン油を除いた残りの樹脂で，標準的な融点は90～100℃，比重は1.07～1.08である。これを供試材料として選定した理由は(1)内部に直径50μm 前後の独立した孔隙を無数にかつランダムに分散させることができる。この孔隙にガス圧を加えればガスを包蔵した炭層に類似した状態を再現できる。(2)ロジンの強度は石炭に近く，脆性度も石炭に近い。(3)人体に無害である。等である。孔隙率が０である場合の強度的性質は，現在までに行った強度試験結果では一軸圧縮強度61.4Kgf/m^2，圧裂引張強度4.7 Kgf/cm^2，ヤング率2.77×10^{4}Kgf/cm^{2}等である。

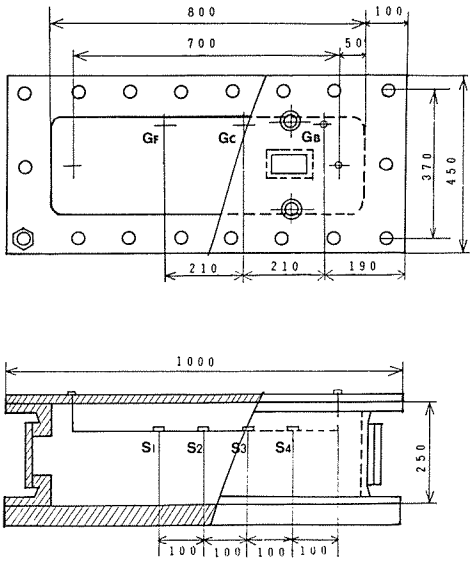


図2　モデル実験用耐圧容器概念図

2．3　実験方法

実験は，供試材料である多孔質ロンジンを作製する準備段階と，実際に突出を発生させる実験段階とにわかれる。

多孔質ロジンの作製は以下の手順に従ってすすめられる。(1)図1の耐圧容器の左端を上にして設置する。(2)耐圧容器に4メッシュ以下に粉砕したロンジンを充塡し，容器左端の上蓋を取り付け密閉して耐圧容器内にガス圧を加える。(3)上の状態の耐圧容器を100℃の熱湯内に設置し内部のロジンを溶解させ再び自然冷却させる。これにより，耐圧容器内部には最初に加えたガス圧と等しい孔隙ガス圧を有する多孔質ロジン（固体）が作製される。孔隙率は7～10%である。

上記のようにして作成されたロジンを用い，実験は次のようにおこなう。(1)耐圧容器左端に多孔質ロジンを作る際に生じた小空間のガスを解放する。(2)耐圧容器左端の上蓋を外し孔隙ガス圧を有する供試材料を大気中に露出させる。(3)油圧ポンプを運転し，耐圧容器内のフラットジャッキに油圧を加える。これにより耐圧容器内部の供試材料に地圧に相当する側圧が加わる。

以上の実験過程の(2)もしくは(3)の時点において突出が発生するが、今回述べる側圧加圧中に発生する突出は(3)の過程で発生する突出を意味する。

2．4　計測方法

このモデル実験においては，供試材料内部で生起する現象を詳細に把握するため，供試体内部のひずみおよびクラックガス圧の計測を行った。供試体内部のひずみは，図2に示すごとく，供試体中に埋設したひずみゲージにより端面側から順に，S1，S2，S3，S4の4測点(10cm間隔)で計測した。ただしS1の端面からの深度は実験ごとに少しずつ異なり、8～11cmであった。供試体内部のクラックガス圧は図2に示すごとく，供試体中に21cm間隔で取り付けられたガス圧トランスジューサーによりGF（端面から2～5cm），GC（端面から23～26cm）の2測点で計測した。この場合のクラックガス圧は供試体内に設けた約12cm³の円筒状空間内部のガス圧であり，実際のクラックガス圧ではなく，それより低い値を持つ見かけ上の値である。

3. 実 験 結 果

本章では側圧加圧過程において突出が発生した実験1例と突出が発生しなかった実験2例を示し，その時に生じた現象と，供試体内部に発生したクラックガス圧分布，ひずみ分布，及び供試体のガス透過性について述べ，このモデル実験において突出が発生する場合と突出が発生しない場合の相違点を示す。

3.1 側圧加圧過程で発生する現象

3.1.1 孔隙ガス圧15Kgf/cm²の場合（突出例）

この実験では供試体孔隙に孔隙ガス圧15Kgf/cm²が加えられている。小空間のガスを解放した後の側圧加圧時のひずみ等の経時変化を図3に示す。ただし，小空間のガス解放時には突出が発生していない。この図において，横軸には時間を分単位で，縦軸には側圧 P_L，AE 累積イベント A_E，AE カウントレート A_C，供試体内のクラックガス圧 G_C，G_F，及びひずみ S_1，S_2，S_3，S_4 を表している。なお，ひずみの符号はプラスを圧縮，マイナスを引張としている。

図3によると，側圧 P_L が20Kgf/cm²から100Kgf/cm²まで徐々に上昇させられる過程で供試体内には特徴的なひずみが生じている。すなわち，フラットジャッキで挟まれている部分の測点 S 4 でのひずみ S_4 は−0.5%の非常に大きい引張ひずみを示している。また，フラットジャッキから3 cm 端面側に外れた点のひずみ測定値 S_3 は−0.2%となり，引張ひずみではあるがその値が S_4 にくらべ小さくなっている。さらに端面に近い測点S2, S1におけるひずみは0.1%以内の圧縮ひずみとなっている。また，同図の A_C，A_E は側圧が100Kgf/cm²迄の範囲で AE 活動が活発となり，供試体内部がひずむ事により内部で破壊が生じていることを示している。この時，供試体内部のクラックガス圧が1.1Kgf/cm²まで上昇している。しかし，ガス圧はその後緩やかに低下している（G_C）。

引き続き側圧を上昇させ，110Kgf/cm²に達した時点で，破壊音とともに突出が発生した。この突出の状況は図4に示すごとくで，端面付近が突出する円錐型の突出であった。突出時の特徴として上げられるのは，値は小さいがクラックガス圧が供試体中央部（測点 GC）のみならず，端面近傍（測点 GF）においても鋭く立ち上がっている点である。突出が終了すると，クラックガス圧は降下している。この時，ひずみは突出時の一時的な側圧緩和にともない急変するが，突出終了とともに元の値に回復している。ひずみが回復する現象は，突出時供試体全域には破壊が及ばず，再度側圧を上昇させれば脆性的な破壊が再度発生し，再度突出しうることを示唆している。事実，引き続き側圧を上昇させる事により同程度の規模の突出が発生している。

上に示した突出は，供試体の脆性的な破壊により，孔隙中のガスが極めて速い速度でクラックに供給されたため，単位時間に露出面に透過しうる量以上のガスが供給され，端面付近においてもクラックガス圧が上昇し，端面付近の未破壊部分を引張破壊して突出したと考えられる。

3.1.2 孔隙ガス圧9 Kgf/cm²の実験（非突出例）

この場合の実験条件は孔隙ガス圧が9 Kgf/cm²であること以外は，3.1.1の実験と同一である。この実験におけるひずみ等の経時変化を図5に示す。本図の横軸，縦軸の種類，尺度等は図3と同じである。側圧加圧過程で，まず側圧を20Kgf/cm²まで上昇させた。この時，S 3，S 4 の測点で−0.1%前後の引張ひずみが生じ，端面側の S 1，S 2 の測点ではわずかな圧縮ひずみが生じている。これに伴い，わずかな AE（A_E，A_C）の発生が認められ供試体中央部のガス圧が上昇し始める。

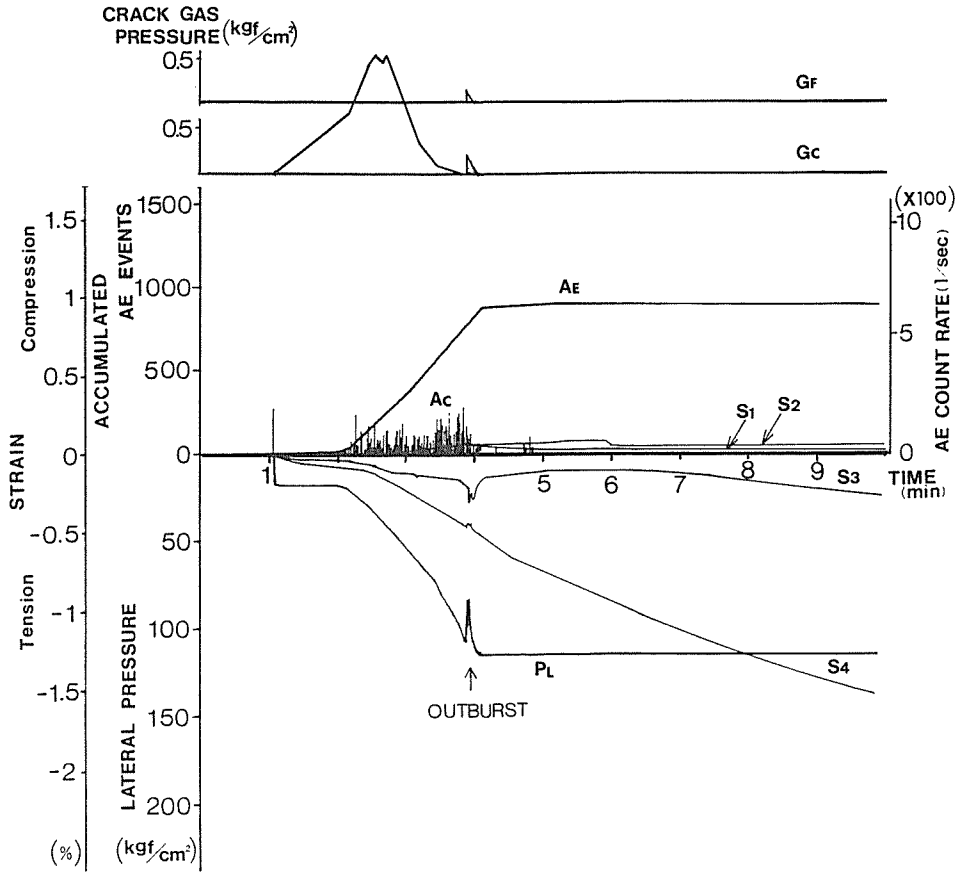


図3　側圧加圧過程におけるひずみ，AE，クラックガス圧の変動(孔隙ガス圧15Kgf/cm²で突出した場合)

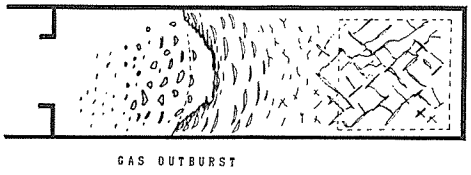


図4　突出発生状況概念図

その後，側圧を185Kgf/cm²まで上昇させる過程で，供試体中央部の測点（S 4，S 3）では，図4の実験と同様に引張ひずみが増加し，端面側の測点S 2，S 1では圧縮ひずみが増大している。図4の実験と同様に，奥部の変位を端面側のアーチ状のクラックゾーンが支持していたためと考えられる。側圧を185Kgf/cm²まで上昇させた時点で奥部の測点S 4では−0.7%，S 3では−0.4%の引張ひずみが，端面側の測点S 2では0.2%，S 1では0.1%の圧縮ひずみが記録されている。これらのひずみは，突出が発生した図4の実験の場合とほぼ同じ値となっており，側圧

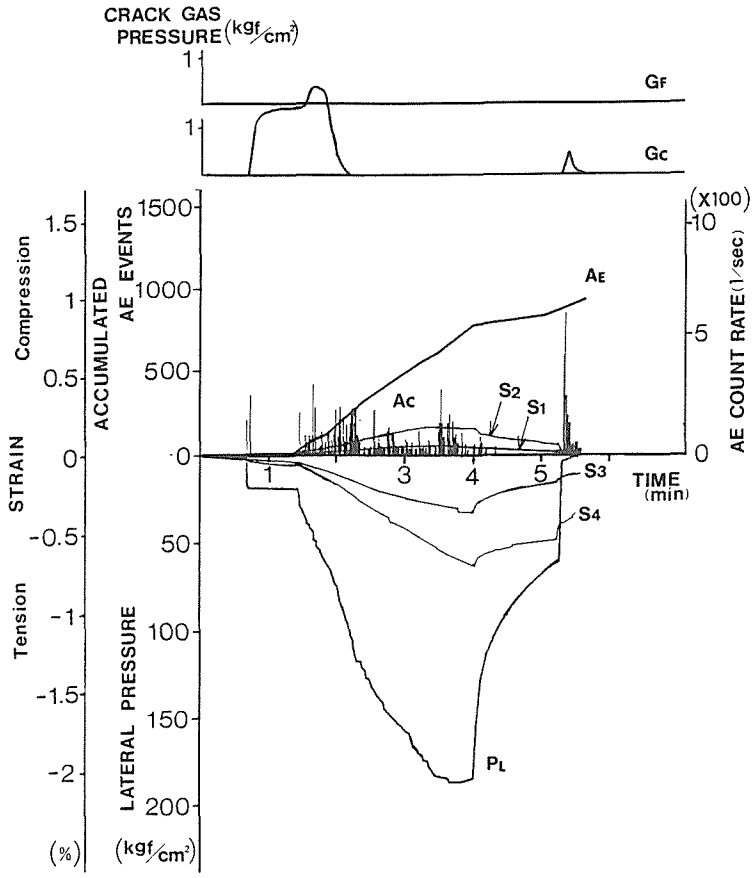


図5 側圧加圧過程におけるひずみ，AE，クラックガス圧の変動(孔隙ガス圧 9 Kgf/cm²で突出しなかった場合)

加圧に伴う供試体の変形状態は，突出した場合と同程度であったとみなされる。側圧加圧の過程ではAE活動も活発であり，供試体中央部ではクラックガス圧が1.7Kgf/cm²まで増加している。しかし，上昇速度が緩慢であり，端面側の測点でのガス圧上昇が全くみられていない。側圧を185 Kgf/cm²まで上昇させても突出していない。

側圧を185Kgf/cm²から降下させていくとひずみが回復する方向に変動，側圧が0 Kgf/cm²まで降下した時点でAE活動が始まり，供試体中央部でクラックガス圧が0.5Kgf/cm²まで上昇するが，やはり立ち上がりが緩慢で，端面付近のクラックガス圧がまったく上昇せず，突出は発生していない。

この実験で突出しなかった理由は，供試体中央部の破壊にともない孔隙から中央部のクラックへ透過したガスの端面付近への供給速度が遅く，端面側のクラックガス圧上昇がなかった点にあると考えられる。

3．1．3 孔隙ガス圧7 Kgf/cm²の実験（非突出例）

この実験における実験条件は孔隙ガス圧が7 Kgf/cm²である事以外は，前出の2例の実験と同様である。実験におけるひずみ等の経時変化を図6に示す。図の横軸，縦軸は前出図3，5と同

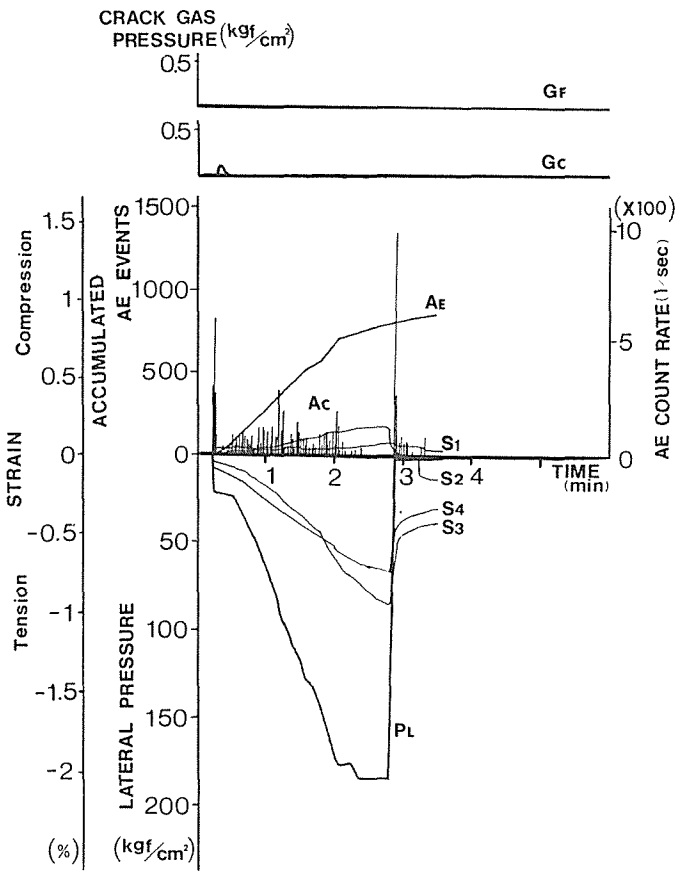


図6　側圧加圧過程におけるひずみ, AE, クラックガス圧の変動(孔隙ガス圧7 Kgf/cm²で突出しなかった場合)

様である。まず, 側圧20 Kgf/cm²を加えると上述の2回の実験の場合と同様に供試体中央部では引張ひずみが生じ, 端面側では圧縮ひずみが生じている。それにともないAEの発生がみられ供試体中央部でクラックガス圧が0.1Kgf/cm²までわずかな上昇を示した。

その後側圧を上昇させると, 185Kgf/cm²に至った時点で奥部の測点S 4では−0.9%, S 3では−0.7%の引張ひずみが, 端面側の測点S 2では0.2%, S 1では0.1%の圧縮ひずみが生じている。ひずみの挙動は前述の2例と殆ど同様である。ただし, クラックガス圧の上昇はみられていない。

側圧を185Kgf/cm²から急激に降下させると, ひずみは弾性的に回復する方向に変動しAEが連続的に発生する。しかし, 孔隙ガス圧9 Kgf/cm²の実験の場合と異なり, クラックガス圧は供試体中央部においても上昇していない。

3.2　供試体内部のクラックガス圧分布

3.1の実験例において, 側圧加圧時, 突出時, 側圧除荷時に, クラックガス圧の上昇がみられた。ここでは, 上記の実験でクラックガス圧が最大値をとる時刻の供試体内のガス圧分布を求めた。ガス圧分布は, 供試体内部の2測点GC, GFにおけるガス圧測定値と, 供試体の端面のガス圧は0, 測点GCより奥の位置のガス圧はGCにおけるガス圧に等しいという境界条件のもとで, スプライン関数を適用して求めた。

1) 突出時のクラックガス圧分布

図7に示したガス圧曲線は，3．1．1で述べたガス圧15Kgf/cm²の実験において側圧加圧中に発生した突出時における供試体内部のクラックガス圧分布である。これによると，クラックガス圧は供試体奥部でも0.18Kgf/cm²で値は小さいが，端面付近にクラックガス圧勾配が生じていることがわかる。この実験のみならず，突出する場合には，端面付近に例外なくクラックガス圧勾配が生ずるというのが共通した特徴である。不安定な脆性的破壊が発生した時に生じる現象と考えられる。

2) 側圧加圧時，突出しない場合のクラックガス圧分布

実験において突出はしていないが側圧加圧中にクラックガス圧が上昇した時のガス圧分布を示しているのが図8，図9である。図8が孔隙ガス圧15Kgf/cm²，図9が孔隙ガス圧9 Kgf/cm²の場合のものである。図8では，供試体奥部でクラックガス圧が1.1Kgf/cm²まで上昇しているが，ガス圧勾配が生じているのは供試体の中央寄りの部分である。図9でも供試体奥部でクラックガス圧が1.7Kgf/cm²まで上昇しているが端面付近ではクラックガス圧の上昇はみられず，クラックガス圧勾配が生じているのは供試体中央寄りの部分である。上記のクラックガス圧分布は，供試体奥部における孔隙からクラックへ供給されるガスの供給速度が遅いために発生したものと考えられる。

3) 側圧除荷時のクラックガス圧分布

図3の実験の側圧除荷時に，供試体内部に発生したクラックガス圧分布を図10に示す。この場

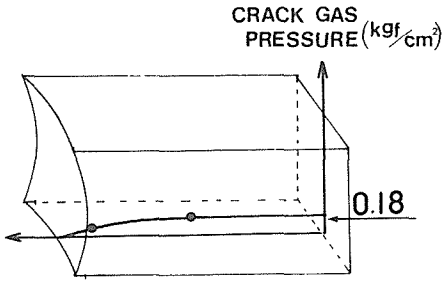


図7 突出した場合の供試体内のガス圧分布例（孔隙ガス圧15 Kgf/cm²）

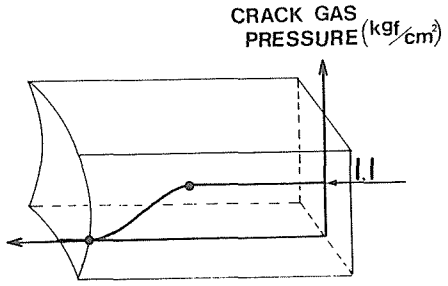


図8 突出しない場合の供試体内のガス圧分布例（その1）（孔隙ガス圧15Kgf/cm²）

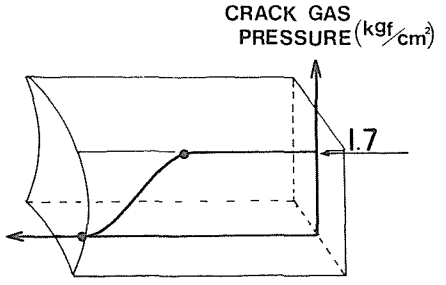


図9 突出しない場合の供試体内のガス圧分布例（その2）（孔隙ガス圧9 kgf/cm²）

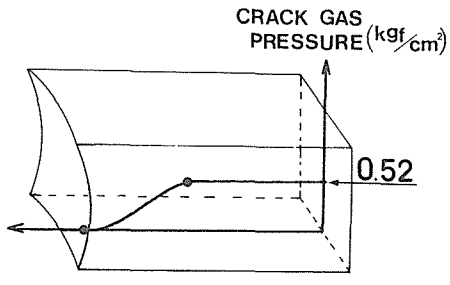


図10 側圧除荷時の供試体内のガス圧分布例（その3）（孔隙ガス圧9 Kgf/cm²）

合も供試体奥部ではクラックガス圧が0.52Kgf/cm²になっているが，端面付近のクラックガス圧上昇はみられず，ガス圧勾配が存在する部分は供試体中央寄りの部分である。荷重除荷時のガス圧は，閉塞されたままのクラックが除荷により拡大，同時に孔隙ガス圧による引張破壊が生じ，孔隙からクラックにガスが解放され発生したと考えられる。ガス供給速度が遅いため端面付近のクラックガス圧上昇はみられず，突出も発生していない。

3．3　供試体内部のひずみ分布

前出の実験例における，側圧加圧時のひずみ変動には共通点が見いだされる。以下に上述3例の実験におけるひずみ分布を示す。

1)　突出時の供試体内のひずみ分布

突生時及びその前後の供試体内のひずみ分布を図11に示す。図においては，供試体内各点の圧縮，引張の状態を矢印とグラフで示している。図の黒マルが突出直前のひずみ状態を示し，白マルは突出直後瞬間的に変化したひずみを示しているが，突出後には再度ほぼ黒マルの状態に回復している。供試体は端面付近のみが破壊して突出し，その他の部分はクラックが生成されてはいてもまだ弾性を保持していることを示している。

2)　側圧加圧時のひずみ分布

側圧を加圧しても突出しない場合の，孔隙ガス圧9 Kgf/cm²，7 Kgf/cm²の実験の供試体内ひずみ分布を図12，13に示す。これらの図におけるひずみのパターンと値は図11の突出した場合のものとほとんど同じである。異なる点は，側圧加圧中に突発的な脆性的破壊が発生しなかった点のみである。

以上，実験で示されたひずみ分布の形状は，突出する場合もしない場合も奥部に応力の集中が生じれば，かえって手前の部分が圧縮をうけガスタイトの原因にもなりうる事を示している。その程度は端面の形状がアーチ状をなしている場合顕著になると考えられる。

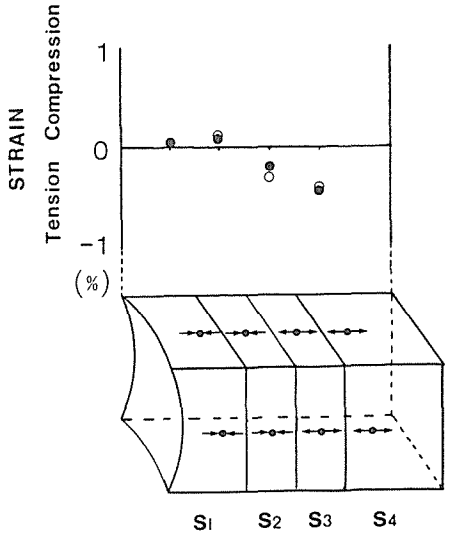


図11　突出前後の供試体のひずみ分布（黒マル：突出前，白マル：突出直後，側圧110Kgf/cm²）

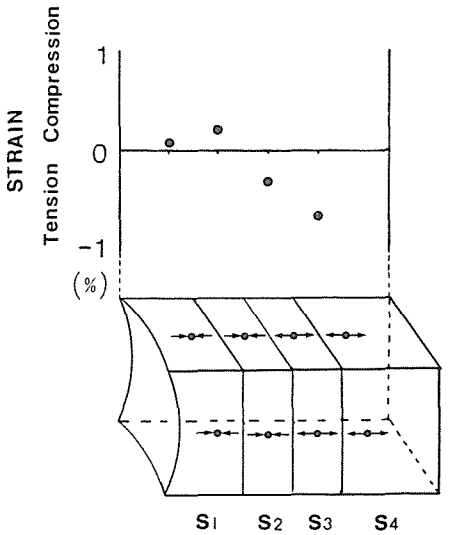


図12　突出しない場合の側圧加圧による供試体のひずみ分布（孔隙ガス圧9 Kgf/cm²，側圧185Kgf/cm²）

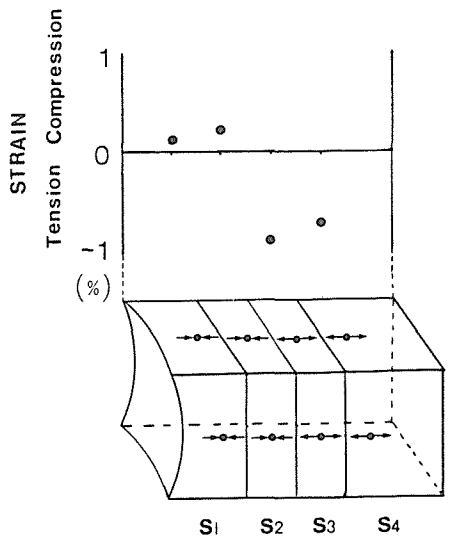


図13 突出しない場合の側圧加圧による供試体のひずみ分布（孔隙ガス圧 7 Kgf/cm², 側圧85Kgf/cm²）

3．4 供試体のガス透過に関する実験

3．1．2の孔隙ガス圧 9 Kgf/cm²の実験終了後，破壊された状態の供試体のガス透過性を調べるため，図14に示したごとく，35Kgf/cm²の窒素ガスを供試体奥部に注入し，供試体のひずみ及びクラックガス圧の変動を測定した。この計測結果を図15に示す。図によると，ガスが流されはじめると，まず最も奥の測点Ｓ 4 で引張ひずみが，またＳ 2 で圧縮ひずみが生じている。これに対しクラックガス圧は奥部の測点 GC で徐々に上昇している。約 4 秒経過後，測定Ｓ 2 のひずみは安定し変動しなくなる。また，奥部のクラックガス圧は0.7Kgf/cm²で安定しているが，端面付近のクラックガス圧はまったく上昇していない。このことは，この時点で，供試体中央部～端面の範囲はガス透過率が非常に高い状態に変化しており，多量のガスが供給された場合でも，その流速が遅い場合には端面付近でガス圧上昇が生じ得ない状態になっている事を示していると考えられる。すなわち，端面付近のクラックガス圧が上昇し突出に至るためには，奥部からのガス供給速度が速いことが必要であると言える。

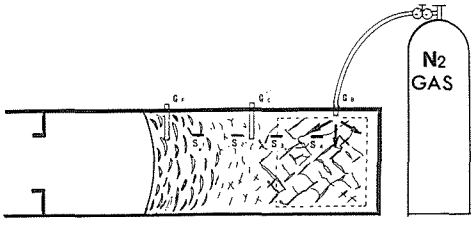


図14 ガス注入によるガス透過性試験

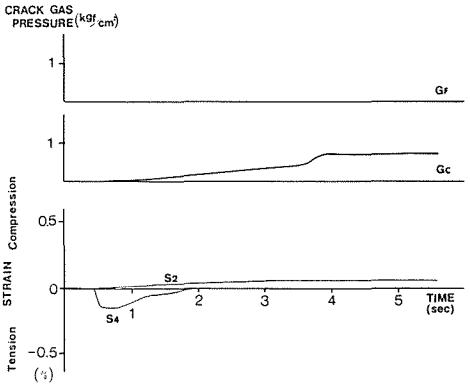


図15　ガス注入によるガス透過性試験結果

4.　モデル実験における突出発生のプロセス

3.で述べた実験結果から，この実験におけるガス突出発生のプロセスは以下のように説明することができる。

(1)　図16—(1)に示すように装置の小空間のガスを解放する事により，供試体端面付近にアーチ状の引張破壊ゾーンが形成される。破壊する範囲は孔隙ガス圧によって異なる。

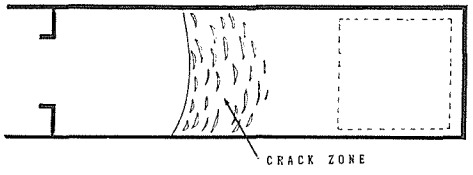
(2)　(1)の状態の供試体に機械的な側圧を加えていくと，図16—(2)に示すように，加圧されている供試体奥部でせん断または引張破壊が発生し，孔隙中のガスがクラックに流れ込む。このガスがクラックを透過して端面付近のクラックゾーンへ流れる。

(3)　端面付近のクラックゾーンに流れ込んだガスが端面付近のクラックガス圧を上昇させる。これにより，図16—(3)に示すごとく，クラックガス圧勾配が端面付近に発生する。

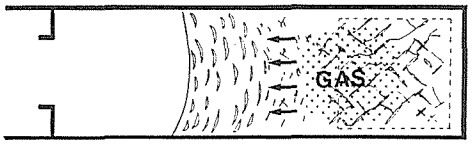
(4)　端面付近に発生したクラックガス圧差により，図16—(4)に示すような引張応力が発生し，クラック間の骨格部が切り離される。

(5)　図4に示したように，切り離された破壊物がグラック前後のガス圧差で加速され運動をはじめる。ガス膨張エネルギーが大きいと強烈な突出となる。

16—(1)



16—(2)



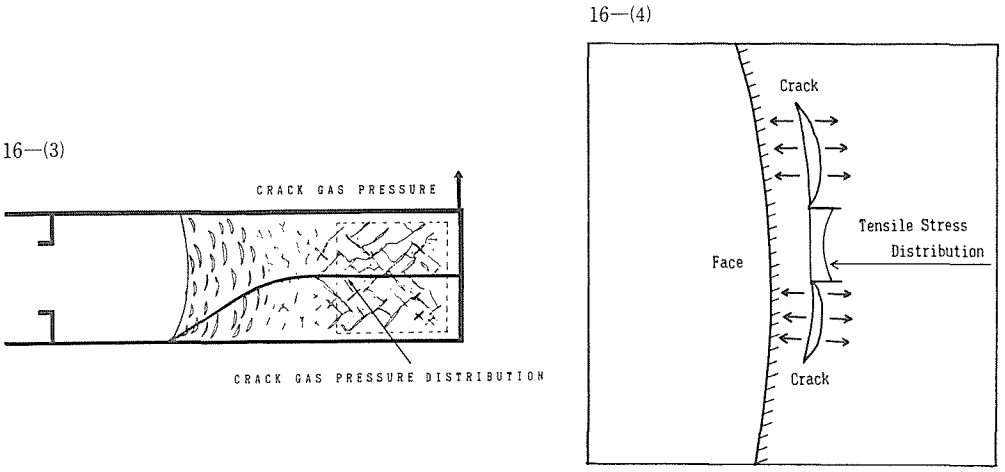


図16 側圧加圧過程で突出する場合のプロセス

5. ま と め

石炭と強度的性質が類似しているロジン内部に，ガスを含んだ無数の孔隙を分散させたモデル材料を用いてガス突出のモデル実験を行った結果，次のような知見が得られた。

(1) 孔隙ガス圧のみではガス突出しない実験条件下にあっても，地圧に相当する機械的な側圧を加えると，円錐型の空洞を持つ突出が発生する。

(2) 側圧が加えられても，孔隙ガス圧が一定値以下では突出しない。

(3) 突出する場合も，突出しない場合も，側圧により供試体内に生ずるひずみはほぼ同一の分布を示す。

(4) 突出が発生する場合には，クラックガス圧が急速に上昇し，供試体端面近傍でも上昇する。突出しない場合には，奥部でクラックガス圧上昇が認められても端面近傍では上昇しない。

(5) 側圧加圧過程で供試体内部に突発的な脆性破壊が生じた時，供試体端面近傍にクラックガス圧勾配が生ずる。

本研究の一部は昭和62年度文部省科学研究費一般(C)によって行なった。また，実験に当っては本学科学生宮沢一君の熱心な協力を得た。記して感謝の意を表する。

参 考 文 献

1) A. J. Hargraves, R. W. Upfold : Proc. of 21st Int. Conference of Safety in Mines Research Inst., Sydney, Australia, P.129-138, (1985)
2) H. Eicker, H. J. Kartenberg : Glückauf-Forschungshefte 47, Nr. 2, P. 77-82, (1986).
3) H. Byston : Proc. of 21st Int. Conference of Safety in Mines Research Inst., Sydney, Australia, P. 111-120, (1985).
4) 氏平増之，磯部俊郎，樋口澄志：日本鉱業会誌，100 (1153)，P.225-232 (1985).
5) 氏平増之，磯部俊郎，樋口澄志：日本鉱業会誌，100 (1155)，P. 397-403 (1985).
6) 氏平増之，磯部俊郎，樋口澄志：日本鉱業会誌，111 (1167)，P. 283-288 (1986).
7) 北海道炭鉱技術会：ガス突出事例の統計解析，P. 80-87 (昭和60年3月).