

# Reservoir Theory による採掘跡岩盤の挙動の判定

中 嶋 滋 夫\*

## 1. 緒 言

世界の石炭産業において用いられる生産方式は大別して、露天掘 (Open Cut Mining) と坑内掘 (Underground Mining) に分けられ、坑内掘では採掘作業面を幅広く採った長壁式採炭方式 (Longwall Mining Method) がその主力である。長壁式採炭方式は、浅い領域の採掘段階を終えて、深部採掘に移行する場合に用いられる。世界の主要産炭国の石炭賦存状況は様々であるが、長壁式採炭法は、国土面積が比較的狭隘で資源量に乏しく、その割に生産負荷の大きな我が国を始め、英・独・仏・伊などの先進国がいち早く露天掘から転換し、深度に比例して大きくなる地圧による様々な障害を乗り越えて生産性を向上する試みが図られてきた。

我が国の生産技術は明治期以来石炭生産に先駆的な役割を果たしてきた欧州技術を、最初は単なる模倣として応用してきたに過ぎない。1970年代にいたり、劣悪な採掘条件と、増大する採掘深度に対応し、その頃から台頭してきた低廉で豊富な中東輸入原油に対抗するためにも、欧州技術の模倣から脱却し、独自技術を開発して劣悪条件下にも高生産性を達成する努力が払われた。多くの試練や、試行錯誤ののち、我が国独自の生産技術は国内において世界記録を達成し、これが世界の石炭産業の関心を招き、我が国技術を導入する産炭国 (豪・米・中国) が現れた。現在は我が国の SD 採炭方式と呼称する基礎技術を踏襲し、これに各国独自の改善を施したものが、世界の主流生産方式として普及・定着するに至っている<sup>1-3)</sup>。

我が国でこのような高度機械化方式開発の母胎となった太平洋炭鉱において、筆者は技術開発責任者として採炭技術を考究する一方で、坑内生産方式を完成させるために不可避の坑内生産に伴う空洞化した領域の上部岩盤の挙動について研究を行った。

本論文はそれらのうち、採炭切羽に発生する周期圧問題を、ガス抜き理論を用いて解明したものである。

長壁式採炭切羽における採掘跡の岩盤挙動を判定することは、切羽の地圧現象を解明する上での重要な手がかりと考えられが、諸般の制約のため、採掘跡の相当上部層の展開とか、あるいは破壊の収束した時期におけるの観測例はあっても、稼行中の切羽の採掘跡の状況を知ることは甚だ困難であった。

しかし切羽の安全性を高め、合わせて経済的に利用するため、採掘跡のガス抜きが隆盛を見るに

---

\*東洋大学国際地域学部; Faculty of Regional Development Studies, Toyo University

及んで、例えば Bohr Hole Camera による孔壁の観察、あるいは Reservoir Theory の応用<sup>4~6)</sup> 等によって、地圧研究の分野にも曙光が見出されつつある。

筆者は、石炭産業で行われているガス抜きの実測データに対して Darcy の法則を応用して検討したところ、地圧現象と破壊岩盤の示す Permeability (透過性) との関連性について興味ある結果を得た。

## 2. ガス抜き状況

太平洋炭鉱のガス抜きに関して概略を述べると、本層から約30m上位の礫岩層までの間に分布している約2m厚の炭層からの発生ガスを対象として、一般に切羽前方からの水平長孔ガス抜き法を実施している。メタンガスの吸着は、炭層のみに限られ、周辺岩盤内には包蔵されていない。しかし、炭層からのガス湧出についてみても、炭層内の有効孔隙は小さいので、地山の状態では炭層からのガス湧出もなく、天盤が弛緩、破壊されて初めてガスの放散が開始される。この点は、ガス抜き孔に誘導されるガスの全量が、採掘跡天盤の破壊によってもたらされることを意味し、透過性の判定上極めて有利である。

## 3. 弛緩・破壊岩盤内のガスの透過に関する Darcy の法則の適応性

ガス抜きを施行する際、ガス孔口元では、ガス誘導量、誘導負圧及びガス濃度を測定することが出来る。破碎された石炭から放出されたガスは、速やかに切羽通気と平衡するので、口元で測定した負圧は、そのガスが口元に到達するまでに消費される全圧力を示している。すなわち、

$$P_m = \Delta P_r + \Delta P_h \cdots \cdots (3-1)$$

ここに  $\Delta P_r$  : 採掘跡破碎圏通過時の消費圧力

$\Delta P_h$  : ガス抜き孔内の消費圧力

$\Delta P_h$  は本来誘導量の自乗に比例するが、実用上のガス抜きの場合は、ガス抜き孔内での消費圧力は少なく、 $P_m$  とガス誘導量の関係は、直線近似となる。例えば当鉱の場合は300~400mmまで、イギリスのヘイグ炭鉱<sup>7)</sup> では760mm (水柱) までの範囲で直線性が保たれ、従って Darcy の法則が適用可能であると考えられる。

## 4. 採掘による岩盤破壊の範囲及びガス放出圏について

Darcy の法則を適用するためには、ガスの透過距離・断面及びガス放出の状態等を正確に求めねばならない。以下これらにつき検討する。

### (1) 採掘の影響を受ける高さ

包蔵ガスの放散を可能ならしめるような擾乱の起こる範囲は、例えばルイゼンタール炭鉱<sup>8)</sup> では、切羽面長を直径として上盤に描いた半円形のドームに相当すると言われる。当鉱の切羽面長は

概ね100m前後であるから、ガス抜きの対象となる上位炭層群の分布する切羽直上20~30mまでの部分は、すべて採掘の影響により乱されることになる。

この点は実際、当鉱2番層が本層上部30m程度に賦存し、本層採掘後数年ののちにロングウォール

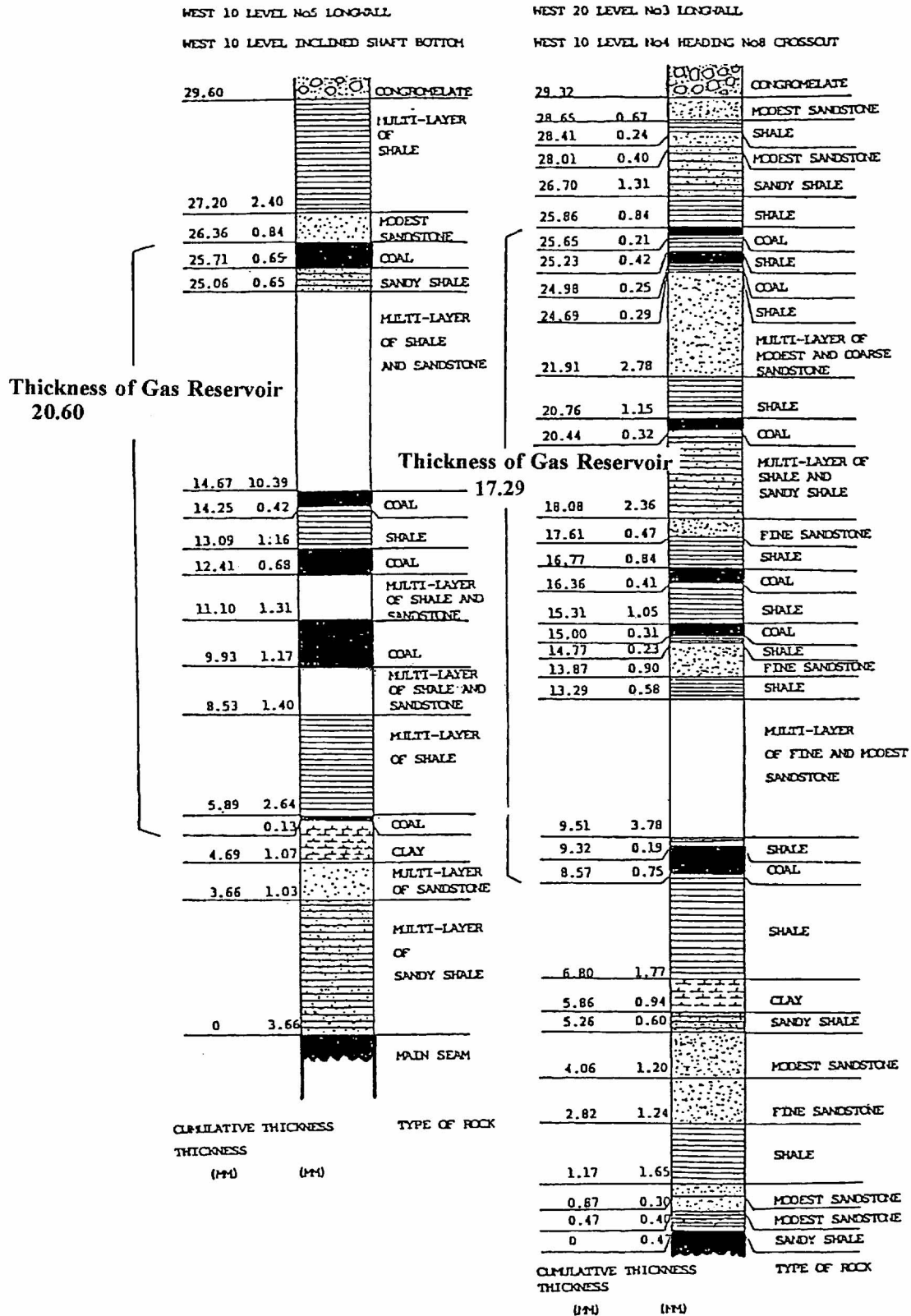


Fig.1 Stratigraphic Column of Coal Measured Rocks above Main Seam

で採掘された結果、全くガスを喪失しているところから、当鉱の場合についても稼行炭層上部30m程度の範囲については、採掘により弛緩し、良好なガス源となっているものと考えられる。従って、計算対象となるガス誘導層の厚さは Fig.1 に示す各ロング毎の実際の上部炭層賦存幅とすることが出来、当鉱の場合、その厚さは20m前後である。

## (2) 天盤の破断角

切羽の稼行条件及び自然条件に差違がなければ、採掘による岩盤の弛緩・破壊はほぼ一定の位置

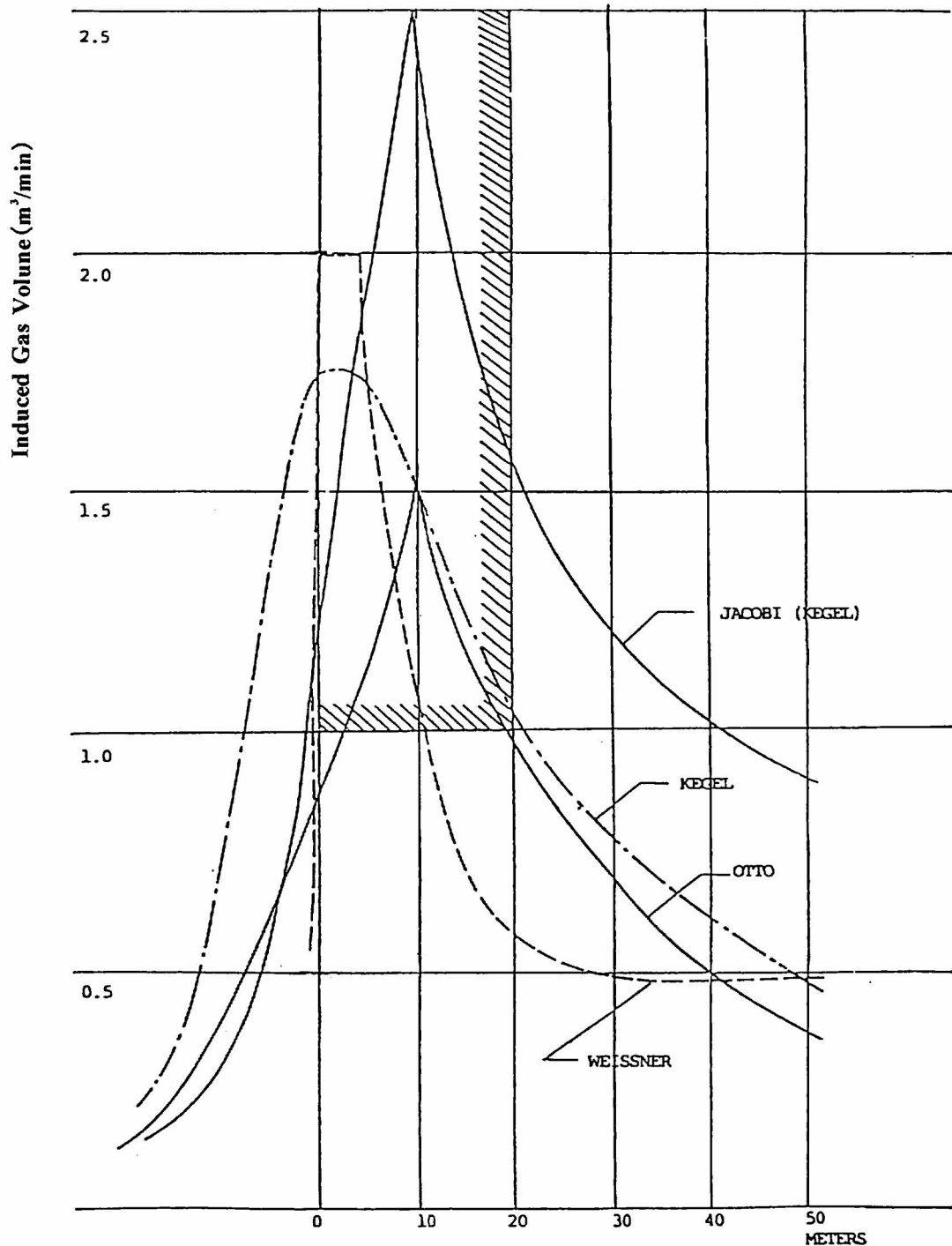


Fig.2 Relationship between Methane Gase Volume induced by Borehole and Distance from Face Line

から急激に開始されるものと思われる。すなわち、地山内に穿たれたガス抜き孔孔端に切羽が接近してくると、孔口密閉圧は一次高められたのち、切羽通気と平衡し、ここにガスの誘導が開始されるが、このこの時ガス抜き孔孔端は、その高さの如何に関わらず、切羽面より古洞側にほぼ60度の角度で延長した破碎面上に点綴される。

破碎面の前方では、採掘の影響は未だ微弱であり、小規模の亀裂が生成するにしても、それはガスの発生誘導を可能とするほどのものではない。従って、切羽の接近により、ガス量は徐々に増加するものではなく、破碎面を境界として、突発的に発生する。

### (3) ガス放出圏

採掘の影響は、切羽の周辺にガス抜きの対象となる炭層があれば、極めて鋭敏に付加ガスの発生となって現れる。ドイツの例<sup>9)</sup>によれば、ガス発生のサイクルは、切羽採掘のサイクルに数時間の遅れで随伴している。採掘様式も当然ガスの発生、すなわち岩盤の弛緩に関与し、跡バラシ採掘ではガスの湧出は活発であるが、全充填切羽では僅少である。

上位天盤の破壊の程度もまた発生ガス量の多寡に密接なつながりを持つ。粉碎した太平洋炭の放出ガス量半減期は7時間とされ<sup>9)</sup>、速やかである。一方成層状態の炭層に僅かな亀裂の生成された破壊の初期状態では、ガス湧出速度は比較的大塊のガス圧特性<sup>10)</sup>から推して緩慢であり、長期間にわたり一様にガスの発生が持続するものと考えられる。従って粉碎炭のガス放出特性から、単純に採掘跡のガス放出特性を類推することは、上部炭層の破碎の状態も不明である故困難である。

一方、天盤貫層法を行う場合は、採掘跡の位置によるガス放出量の変化を追求することが出来る。実例によれば<sup>8,11,12,13)</sup>、何れも切羽直上の破碎面の縁辺部に非常に活発な放出圏があり、誘導ガス量はこの部分に鋭い尖頭値を示している (Fig.2)。破碎面の移行により、採掘の影響圏内に入った岩盤は、包蔵ガスの活発な放出を可能とするような急激でかつ著しい破碎作用を蒙るものであろう。

このように、大部分のガスが短時間で放散するとき、切羽前方からの水平長孔法を行い、かつガス誘導量がそれに見合う場合は、ガス抜きの対象となる範囲は常に切羽縁辺部に限定されることになる。具体的な計算対象となるガス放出圏幅としては、当鉱の1孔当たりの通常状態におけるガス誘導量は第1～2表に示すように  $1\text{m}^3/\text{min}$ 以上  $2\text{m}^3/\text{min}$ 程度であって、多少の石炭質の差違はあっても Fig.2 に示すドイツの事例におけるガス誘導量に類似している。従ってこの天盤貫層方式の現場で把握したガス誘導範囲は、当鉱でも適用可能と考えられ、図中の  $1\text{m}^3/\text{min}$ 以上のガス誘導を維持するガス放出圏の幅は概ね20m程度であり、従って計算上はガス放出圏の幅を20mとした。

## 5. 切羽元周辺における弛緩した天盤の透過性

### (1) 水平方向の透過性

透過性の計算に要する諸元は、前項までの検討によるすべて既知量とすることが出来た。その結果、一般に切羽前方からのガス抜きによるガスの透過のメカニズムは Fig.3. A, B のように考えられる。

すなわちガスはガス抜き孔の周辺を除きWhなる断面を水平方向に透過するので、透過速度は

$$V = \frac{Qg}{Wh} \dots\dots (5-1)$$

ここに

V : 透過速度 (cm/sec)

Qg : ガス誘導量 (cm<sup>3</sup>/sec)

W : ガス透過層の幅 (cm)

h : ガス透過層の厚さ (cm)

また Darcy の法則により

$$V = \frac{Kh}{\mu} \cdot \frac{dP}{dl} \dots\dots (5-2)$$

ここに

Kh : 水平方向の透過性 (Darcy)

$\mu$  : 粘性係数 (C.P)

$$\therefore \frac{Qg}{Wh} = \frac{Kh}{\mu} \cdot \frac{dP}{dl} \dots\dots (5-3)$$

ここに平均等価距離を  $\bar{L}$ 、口元負圧を P とすれば

$$\frac{Qg}{Wh} \int_0^L dl = \frac{Kh}{\mu} \int_0^P dP$$

$$\therefore Qg = \frac{KhWhP}{\mu L} \dots\dots (5-4)$$

ガスはガス抜き孔の両端から誘導されるので

$$Qg = \frac{2KhWhP}{\mu \bar{L}} \dots\dots (5-5)$$

$$\therefore Kh = \frac{Qg\mu \bar{L}}{2WhP} \dots\dots (5-6)$$

(5-4) 式は Darcy の Linear Flow の式に相当する<sup>5,6)</sup>。

(5-4) 式は本来  $QgP = QaPa$ ,

$$P = \frac{P1 + P2}{2}$$

であるから、

$$Qa = \frac{KhWh}{2\mu L Pa} (P_1^2 - P_2^2)$$

となり、さらに誘導圧力、誘導量、透過物質等の条件によって種々の補正が必要であるが<sup>21,22)</sup> 実用上は (5-4) 式をもって近似解とすることが出来る。

(5-6) 式を用いて定常状態、すなわち孔詰まりや周期的な異常負圧の状態を除いた場合につき Kh

を求めた結果を第5-1～5-2表に示す。この結果によれば、水平方向の透過性は、6～12Darcy 程度であって、切羽の稼行条件、地質条件が等しければ、ほぼ一定の値を取るものと考えられる。

(2) 垂直方向の透過性

水平長後方により切羽前方からガス抜きを行う場合のガス抜き座は、経済的に理由から、炭層レベルの僅か上部に設けることが普通であるから、切羽進行に伴いガス抜き孔の有効ガス抜き位置は、次第に切羽天盤に近づき、一定の限界を超えて切羽に接近すれば直接天盤に発達した亀裂を通じて切羽通気がガス抜き孔に漏洩し、ガス濃度が低下する。

この時、ガス誘導量と通気漏洩量に関してそれぞれ次式が成り立つ。

$$Q_g = \frac{2KhWhPg}{\mu L} \dots\dots (5-7)$$

$$Q_a = \frac{KvWhPg}{\mu La} \dots\dots(5-8)$$

上記の2式について、負圧と誘導量に関しては

$$P_g = P_a$$

$$Q_g = nQ_a$$

なる関係が成り立つ。

通気漏洩量の dimension に関しては、次のように考えることが出来る。

(a) h'について

前述のように、水平方向のガスの透過層厚さとしては、Fig.2に見られる実績から、1m<sup>3</sup>/min以上のガスが誘導される天盤の通常弛緩状態に関しては、切羽元より20m程度の厚さが適当と考えられる。これに対し、通気の漏洩に関しては、直接天盤は、通常切羽元より10mの範囲を超えることなく崩落し、上部岩盤の沈下と相まって古洞を閉塞してしまうので、h'=10m程度と見なされる。

(b) La について

通気の漏洩距離は、明らかに切羽天盤からボアホール位置までと見ることが出来る。La は切羽の

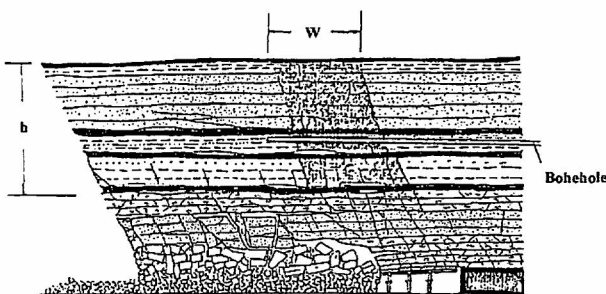


Fig.3-A Methane Gas penetrating Area

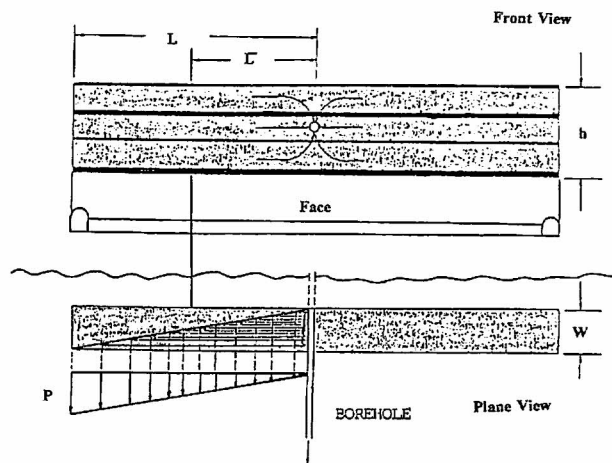


Fig.3-B Mechanism of Methane Gas Penetration (Linear Flow)

進行に従って変化する。

第5-1 表透過性計算表 西20型3号ロング (20片4号卸6目抜き No.71ボーリング)

Date	Gas Induced Volume		Negative Pressure	Kh
	m <sup>3</sup> /min	cm <sup>3</sup> /sec	kg/cm <sup>2</sup>	Darcy
6.Feb	1.68	28,000	0.0110	11.23
7	1.68	28,000	0.0116	10.64
8	2.02	33,670	0.0140	10.61
9	2.02	33,670	0.0140	10.61
10	1.90	31,670	0.0106	13.18
12	2.37	39,500	0.0166	10.49
13	1.34	22,300	0.0070	14.05
14	0.78	13,000	0.0076	7.54
15	1.16	19,300	0.0070	12.16
16	0.62	10,300	0.0070	6.49
17	0.45	7,500	0.0040	8.27
19	0.59	9,800	0.0030	14.41
20	0.70	11,670	0.0060	8.58

L = 30m (切羽面長120m)    W = 20m    h = 17m

$$K_h = \frac{Q_g \times 0.01 \times 3 \times 10^3}{2 \times 2 \times 10^3 \times 1.7 \times 10^3 \times P} = 4.41 \times 10^{-6} \frac{Q_g}{P}$$

第5-2 表透過性計算表 西20型5号ロング (20片西6号卸8目抜き下枝 No.51ボーリング)

Date	Gas Induced Volume		Negative Pressure	Kh
	m <sup>3</sup> /min	cm <sup>3</sup> /sec	kg/cm <sup>2</sup>	Darcy
18.Feb	2.30	38,300	0.0140	7.50
19	2.30	38,300	0.0140	7.50
20	1.75	29,200	0.0150	5.33
21	1.85	30,800	0.0060	14.07
22	1.82	30,300	0.0140	5.93
23	2.05	34,200	0.0125	7.50
28	1.72	28,700	0.0090	8.74
1.Mar	2.18	36,300	0.0120	8.29
2	2.10	35,000	0.0128	7.49
3	2.02	33,700	0.0130	7.10
4	1.96	32,700	0.0120	7.47

L = 23m (切羽面長90m)    W = 20m    h = 21m

$$K_h = \frac{Q_g \times 0.01 \times 2.3 \times 10^3}{2 \times 2 \times 10^3 \times 2.1 \times 10^3 \times P} = 2.74 \times 10^{-6} \frac{Q_g}{P}$$

(c) W'について

通気の漏洩は、ボアホール位置の切羽天盤への接近距離が15m程度から発生し、これに対する通気の吸引可能範囲は約100m、すなわち切羽全面にわたるが、通気漏洩が垂直方向である限り、このような低いボアホール位置での切羽全域からの通気漏洩は考え難く、ボアホールの存在する近辺の直



接天盤からの局部漏洩と見なすのが妥当である。W' は h', La と異なり、未知数であるが、ボアホールの位置と無関係に一定に値をとることは、通気漏洩方向が常に垂直方向であることを原則とする限り不自然であり、ここに最も簡単な場合として  $f(W') = mL_a$  なる関係のあることが想定される。

以上の検討から (5-5) 式及び (5-7) 式を整理すると

$$Q_g = nQ_a, \quad P_g = P_a, \quad W' = mL_a$$

であるから

$$\frac{2K_h W h P}{\mu L} = \frac{n L_v W' h' P}{\mu L_a}$$

$$\therefore \frac{K_v}{K_h} = \frac{2Wh}{n \cdot mh'L} \dots\dots (5-9)$$

が求められる。n, m は係数である。

### (3) 層位と $K_v/K_h$ の関係

第 (5-8) 式の右辺に関しては、n のみを変数であり、他は切羽条件毎に一定の常数であるが、うち m は未知数である。従って (5-9) 式を

$$\frac{K_v}{K_h} = \frac{1}{n} C \dots\dots (5-10)$$

とおくことが出来る。上記 C には未知数が含まれていて  $K_v/K_h$  の絶対値を求めることは出来ないの  
で、ボアホールの存在する層位と  $1/n$  の関係を実測値により求めると Fig.4 が得られた。Fig.5 及び Fig.6 はその基礎データと  $K_h$  の計算結果を示す。

Fig.4 に明らかなように  $K_v/K_h$  と天盤層位との間には、一定の傾向が認められ、12~20m 以上の層位においては  $k_v/K_h = 0$  で通気漏洩がなく、ボアホールの位置が下がると漸次指数関数的に通気漏洩量が増加し、ある一定の層位においては無限大となる。

次にこれらの層位と  $1/n$  の実測値につき指数回帰曲線を求めた。これを Fig.7 に示す。

指数回帰曲線は

3号ロングの場合

$$Y = 5.29 (1 - 0.84e^{-0.65x}) \quad (r^2 = 0.77, n = 16)$$

5号ロングの場合

$$Y = 9.03 (1 - 0.90e^{-3.36x}) \quad (r^2 = 0.99, n = 11)$$

であって、共に有意な指数回帰であり、概ね 6~10m の層位で  $1/n$  の値は無限大となることが明らかとなった。3号ロングと5号ロングにおける通気漏洩の差違は、自然条件の差ではなく、切羽進行速度の差と考えられる。すなわち3号ロングの出炭実績は西10片ロングに比べれば最良で累層平均出炭能率 8.05 t / 人を記録したが、西10片の切羽では 7 t / 人台であり、特に始発近辺における3号ロングの高速進行が地圧による擾乱天盤厚さを最低限に抑制することに効果があったものと考えられる。

また、切羽の高速進行の効果は、単に岩盤層の擾乱高さの差違ばかりではなく、擾乱の程度もま

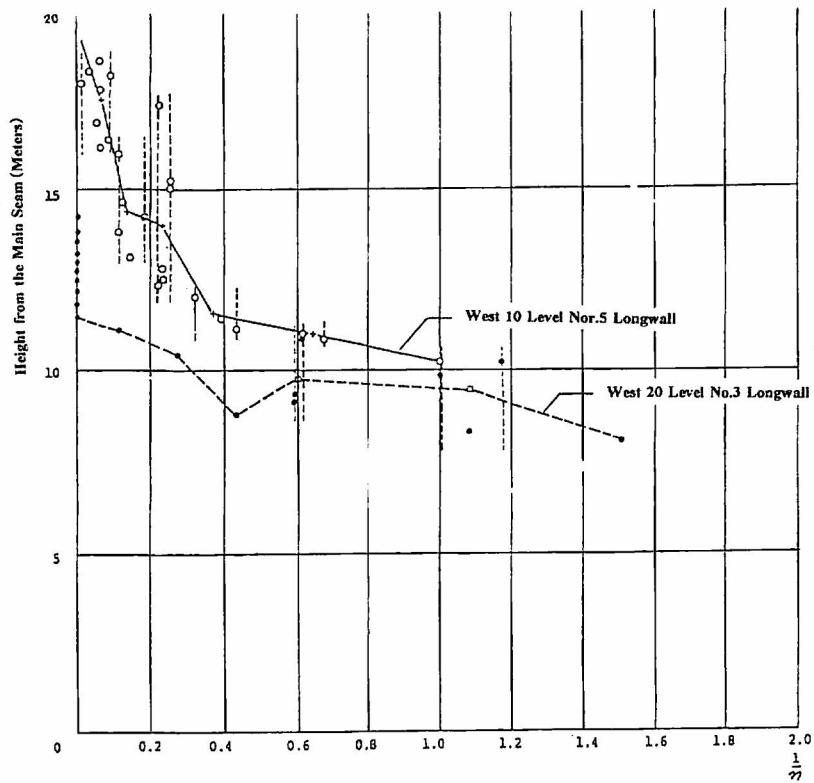


Fig.4 Relation between Gas-Air Induced Ratio (1/n) and Height from the Main Seam

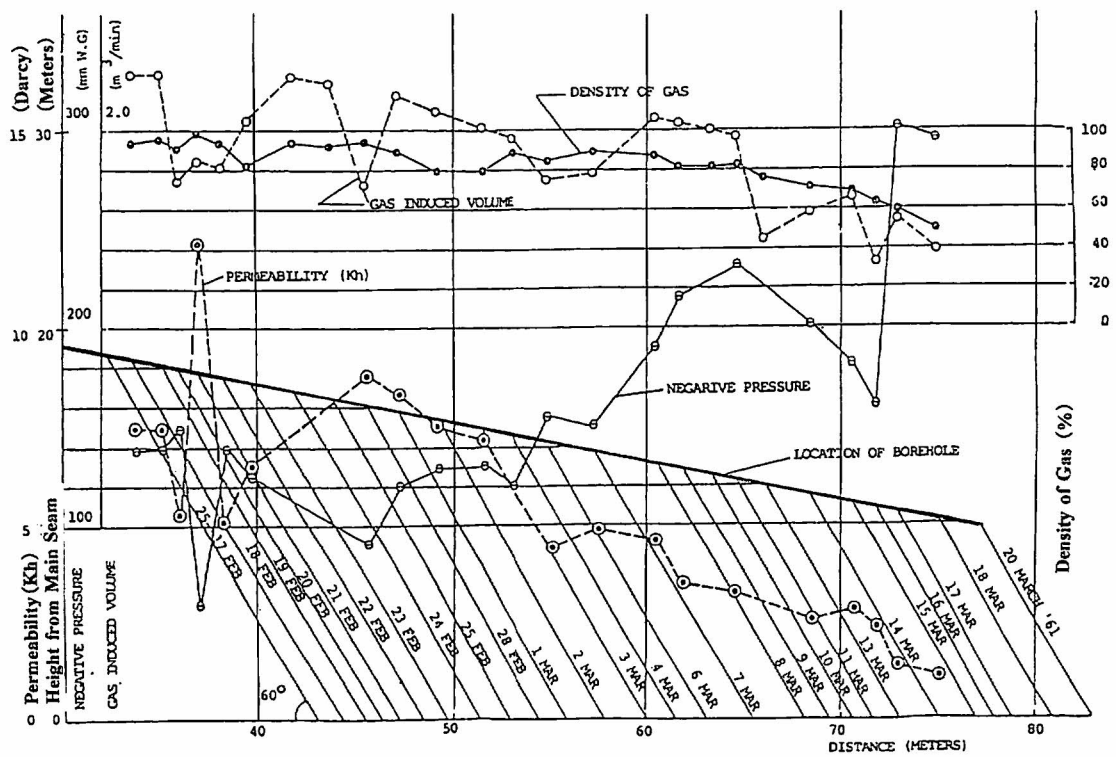


Fig.5 Relationship between Height from Main Seam and Situation of Gas Penetration West 10 Level No.5 Longwall

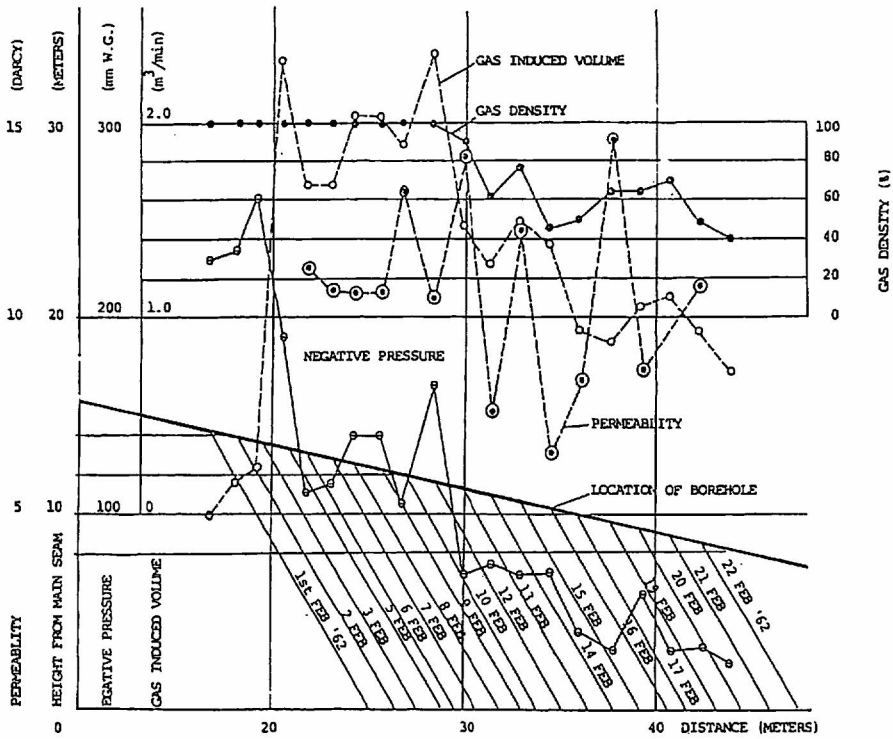


Fig.6 Relationship between Height from Main Seam and Situation of Gas Penetration West 20 Level No.3 Longwall

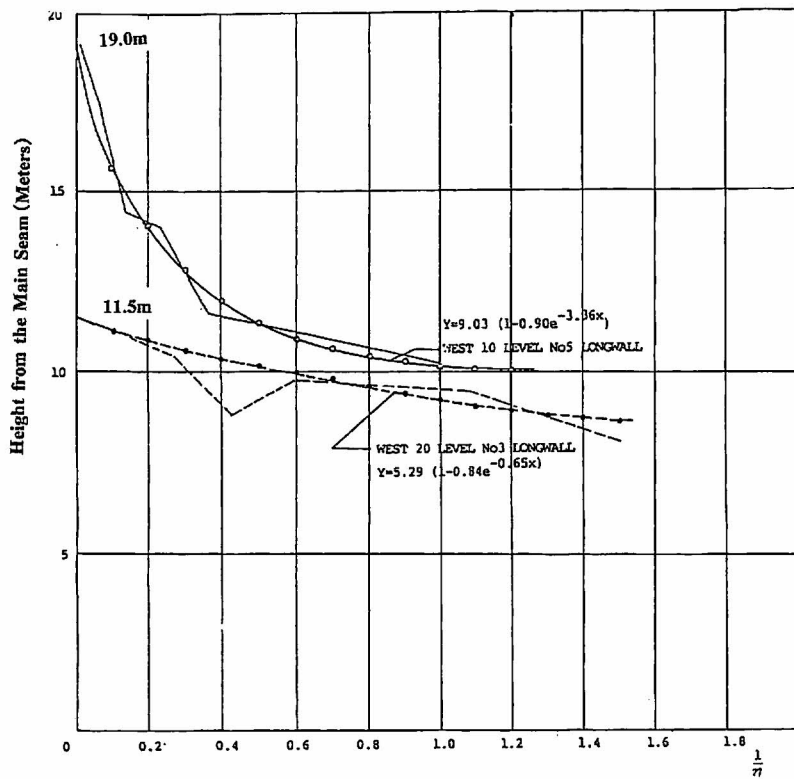


Fig.7 Exponential Curve Fittings of Rock Height & (1/n) Characteristics

た第5-1表と第5-2表を見るとおり異なり、切羽進行が早く、岩盤の擾乱高さの低い3号ロングの場合、透過性もまた7~8Darcy程度と小さく、5号ロングの場合は10Darcy前後と乱され方が大きい。この結果は、同じく太平洋炭鉱において、切羽進行、破断角及び天盤の乱れについて別途筆者らが観測した結果とも一致する<sup>15)</sup>。

Fig.7に示した $1/n$ の値が無限大になる層位よりも下の、いわゆる直接天盤の擾乱の状態については、現場観測による実態から、天盤に発生する垂直方向の亀裂は、層間剝離によって発生する水平方向の岩盤の乱れと略略同等と見なすことが出来る。すなわち地山採掘の採炭切羽においては、天盤面に発達して目視に耐える亀裂が認められるばかりでなく、古洞の崩落に際して目視可能な5~6mの範囲では、崩落岩塊は一般に細かく砕け、決して剝離した単位岩盤層が、古洞方向に長大なスパンのままブロック上に崩落することはない<sup>16)</sup>。

Fig.8~10は天盤状態の著しく悪化した累層採掘の下層ロングにおいて、下層の直接天盤である本下層間の合い盤が崩落したため、本層古洞の崩落ズリが下層ロングに二次崩落したものを取り明けた状態を筆者が観測したものである。崩落の直接原因は、化石水の異常浸透による天盤の軟弱化で、下層ロング天盤からは、崩落以前に滴水があった。このため粘土を含む下層下盤の軟弱化を生じ、これが下層ロングの曳き柱作業を大幅に遅延させた。この結果通常30mに維持している安定距離は、40m弱に引き離された。これらはFig.8~10に見られる共通の事象であり、従って図は本層ロングの40m古洞を観察していることになる。本層の古洞ズリは、約40度の安息角の範囲はすべて二次崩落し、崩落しないで吊っている天盤の高さは最高6mであり、またこの吊り天盤のスパンは最大12mに及び、いくつかの著しい亀裂が認められるものの、まだ岩塊状に破壊されていない。

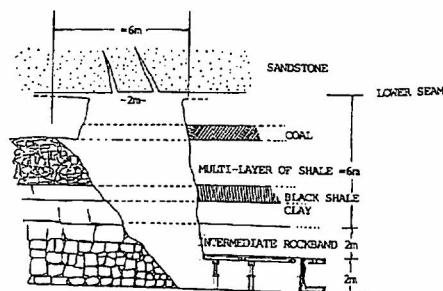


Fig.8 Goaf Fall observed at West 10 Level No.5  
Lower Longwall Face Observed by the  
Author 22nd Second Shift August '61

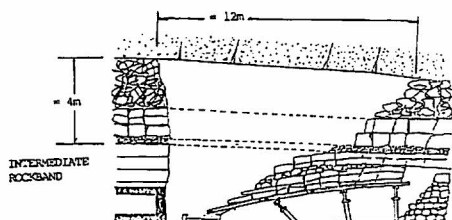


Fig.9 Roof Fall observed at West 10 Level No.6  
Lower Longwall Observed by the Author  
22nd Second Shift Dec '61

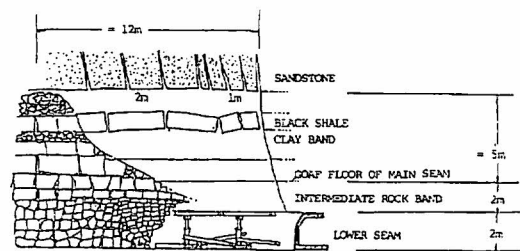


Fig.10 Goaf Fall observed at West 20 Level No.3  
Lower Longwall Observed by the Author  
26nd 1st Shift June '62

これらの観察を通じて、直接天盤のKv/Kh比と7~8m以上の上部層のそれとでは著しく差違のあることがわかる。さらに本層ロング採掘後20~30m上部の二番層を採掘した経験によれば<sup>17)</sup>、旧本層ロングの始終掘部分を除き、採掘の影響による上下盤岩盤の破壊亀裂はなく、この点で二番層切羽操業には何らの支障もなかった。ただ二番層ガスは完全に逸散し若干炭層の軟化したことが認められ、長年のホーベル採炭の支障となってきた硬炭質故の切り込み深さの減少(30mm/回)が、二番層切羽のみは100mm/回に達する切り込み深さが得られ、シュミットハンマー指数では本層未採掘部分の二番層硬さが50であるのに比し、本層採掘部分の二番層硬さは最大20程度に軟化していることが明らかとなった。

これらの経験から、層位毎の岩盤の乱れをKv/Kh比の観点から整理すると、本層上部20~30mの位置における岩盤層ではKv/Kh=0であり、ただKhについてはガスを十分に誘導するだけの透過性がある。7~12m上部の岩盤層は切羽元から40mの古洞において、まだ長大なスパンで吊り天盤を構成しており、若干の亀裂は認められるものの、Fig.1に見られる性質の異なる岩石層毎に発生する層間剝離の頻度と、均一、一定な隙間の状態によるガス誘導の有効性に比べれば、垂直方向の透過性はまだ非常に小さな段階にあると見なされるのである。

一方、炭層上部5~6mまでのいわゆる直接天盤では垂直方向の亀裂の発生も著しく、古洞ズリの細かく碎ける点からも、両方向への透過性はほぼ等しい状態に変化していると考えられる。

以上の検討により、実技の面から捉えた層位毎の岩盤の乱れから言って、Fig.7においてはKv/Kh=1となる層位は、これら漸近線の収束度の大なる部分にあると見て差し支えなく、従って5号ロングの場合は19~10mの上部岩盤において亀裂が発達し、10m以下ではKv/Kh=1となり、また3号ロングの場合は、12~6mの上部岩盤において亀裂が発達し、6m以下ではKv/Kh=1となる岩盤の著しい乱れがあるといえよう。

## 6. 地山炭層の透過性

前述のように、切羽元周辺の透過性は水平方向では10Darcy程度、垂直方向では層位により異なることが明らかとなったが、これらの値が地山の状態に対してどの程度変化を示しているか検討する必要がある。

地山炭層の透過性は炭壁注水の実測値より算定可能と考えられる。すなわち、Fig.11に示すように炭壁内に注水を行ったとき、圧力水の浸透状態は、孔の周辺では放射状に移動するが、上下盤が炭層に比し安定していれば、一定距離以上では炭層内を直進する。

故に長さWに対する部分ではDarcyのLinear Flowの式が成り立つ。

$$Q_L = \frac{2WhK_0P}{\mu L} \dots\dots (6-1)$$

ここに

W: 注水長 (cm)

- $h$  : 層厚 (cm)  
 $P$  : 注水圧力 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )  
 $\mu$  : 水の粘性係数 (C.P.)  
 $K_0$  : 地山炭層の透過性 (Darcy)  
 $L$  : 透過距離 (cm)

注水孔末端では、日炭高松の場合<sup>18)</sup>のように非常に浸透量の少ない例もあるが、一般には孔端から深部方向への放射状に浸透する<sup>19)</sup>。

従って末端の浸透を Radial Flow とすれば

$$V = \frac{Q_r}{\pi r h} \dots\dots (6-2)$$

注水孔末端の注水速度は Darcy の法則により

$$V = \frac{K_0}{\mu} \cdot \frac{dP}{dr} \dots\dots (6-3)$$

従って

$$\frac{Q}{\pi r h} = \frac{K_0}{\mu} \cdot \frac{dP}{dr}$$

$$\frac{Q_r}{\pi h} \int_r^1 \frac{dr}{r} = \frac{K_0}{\mu} \int_0^P dP$$

$$\therefore Q_r = \frac{\pi h K_0 P}{\mu \ln \cdot 1/r} \dots\dots (6-4)$$

注水は注水孔の両端から同様に浸透するので

$$Q_r = \frac{\pi h K_0 P}{\mu \ln \cdot 1/r} \dots\dots (6-5)$$

全注水量は

$$Q_t = Q_l + Q_r \dots\dots (6-6)$$

$$\begin{aligned}
 Q_t &= \frac{2\pi h K_0 P}{\mu l} + \frac{2\pi h K_0 P}{\mu \ln \cdot 1/r} \\
 &= \frac{2Wh K_0 P}{\mu} \left( \frac{W}{l} + \frac{\pi}{\ln \cdot 1/r_v} \right) \dots\dots (6-7)
 \end{aligned}$$

$$\therefore K_0 = \frac{Q_t \mu}{2hP \left( \frac{W}{l} + \frac{\pi}{\ln \cdot 1/r_v} \right)} \dots\dots (6-8)$$

となる。

第 6-8 式に炭鉱で実測した高圧注水に関する諸数値<sup>20)</sup> を代入すれば、

$$Q_t = 1,170 \text{cm}^3/\text{sec}$$

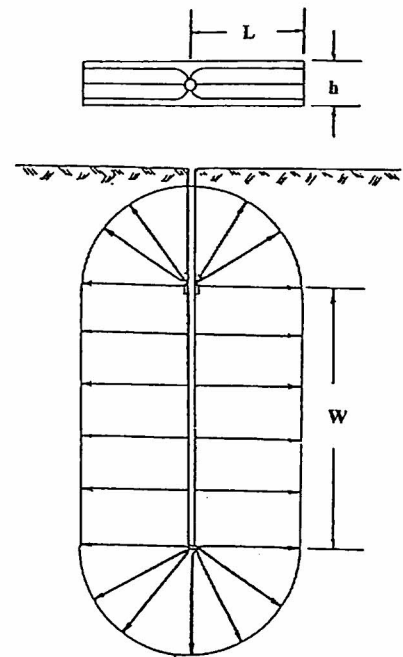


Fig.11 Mechanism of High Pressure Water Penetration into Coal Seam

$$\begin{aligned}
 h &= 180\text{cm} \\
 W &= 1,000\text{cm} \\
 l &= 500\text{cm} \\
 P &= 94\text{kg/cm}^2 \\
 r_w &= 5\text{cm} \\
 \mu &= 1.0 \\
 K_0 &= \frac{1,170 \times 1.0}{2 \times 180 \times 94 \left( \frac{1,000}{500} + \frac{3.14}{4.6} \right)} \\
 &= 1.3 \times 10^{-2}\text{Darcy}
 \end{aligned}$$

以上のように、第 6-8 式で求めた地山炭層の透過性は  $1.3 \times 10^{-2}\text{Darcy}$  であって、破碎面内の切羽元天盤は約 6~12Darcy の値を示すから、採掘の影響を受けた岩盤の透過性は地山の状態で最も大きい透過性を持つ石炭層に比しても 500~1,000 倍に増加していることになる。また、ここで求めた地山炭壁に透過性は上下盤の透過性<sup>21)</sup> に対して  $10^5$  倍を示し、 $K_0$  の測定の際の上下盤への逸水は無視できることが明らかとなった。また、破碎面内の切羽元天盤は、地山の岩盤から見ると  $10^8$  倍の透過性を示す変化を受けたことがわかる。

### 7. 切羽元周辺における天盤の挙動

切羽前方からの水平長孔ガス抜きより計算した透過性から、破碎面縁辺の岩盤の挙動を考察すれば、概ね Fig.12 の状態を呈している。前述のように、未採掘状態では、ガスの放出は殆どない。既に求めたように地山炭層の透過性は  $1.3 \times 10^{-2}\text{Darcy}$  で、岩石のそれはさらに小さいから、100mm 程度の負圧はなきに等しいのである。

従って、ガスの誘導が可能となったことは、岩盤の構成状態が採掘の影響によって変化し、有効

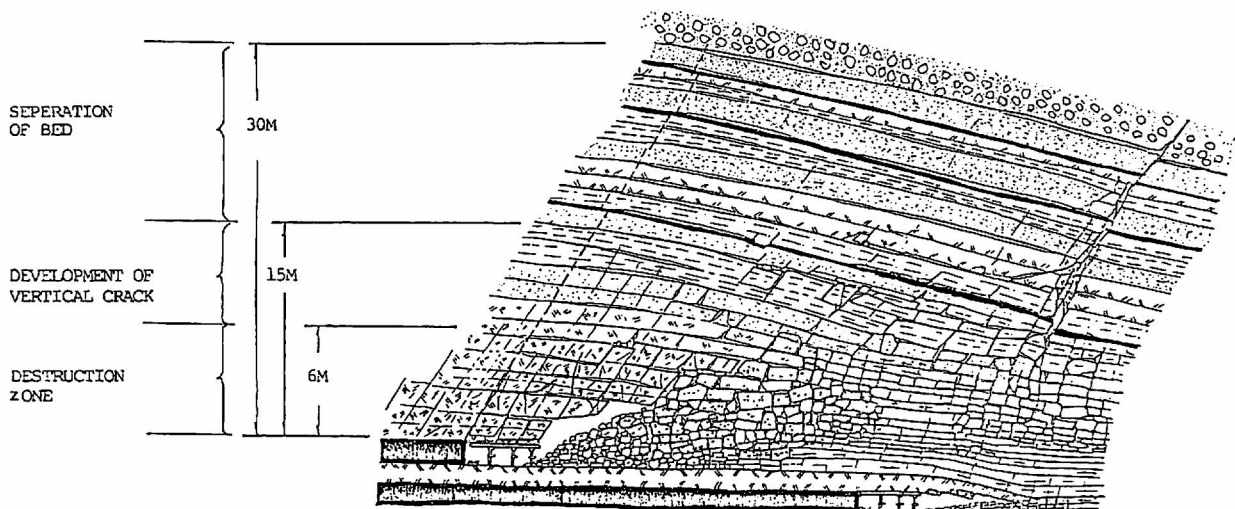


Fig.12 Destruction of Goaf obtained by Permeability of Methane Gas and Leak of Air

間隙の増加に伴い、透過性が著しく大になったことを意味する。しかもガス誘導量は、切羽進行に対して緩慢に増加するのではなく、ある位置から短時間内に急激に増加してのち  $Q/P$  の値は概ね一定となるので、切羽面に対するガス発生圏の相対的位置は極めて正確に割り出せる。

このような岩盤の破碎面は一様に切羽より古洞向きに約60度の角度をなす。すなわち破碎面は切羽採掘の影響を受けて切羽直上岩盤の透過性が大となる境界面である。破断面より古洞側の縁辺部の岩盤は、水平方向の透過性が通常の状態である一定値であるのに反し、垂直方向の透過性は層位によって異なるのが特徴的である。すなわち稼行炭層の11~19m以上の層位では、 $K_v$ はほとんど0で、それ以降6~10mまでの中間層においては、これが急激に増加し、直接天盤では方向性が失われ、 $K_h$ と等しくなる。

本来岩石は物理的性質に方向性があり、圧縮強度なども然りであるが、透過性もこの傾向が顕著で層面の方向に大な性質を示す<sup>22)</sup>。しかし地山夾炭層からのガス誘導は不可能なこと、及び破碎面内の採掘の影響により乱された岩盤領域から通常  $1\text{m}^3/\text{min}$ 以上のガス誘導が可能となること、そしてその場合の水平方向の透過性が地山状態の500~1,000倍の値を示すことから言って、11~19m以上の上部岩盤層は少なくともガス抜き対象炭層の賦存する30m上部までの範囲にあっては、一方的に水平方向にのみ透過性の大きくなるような特異な状態に変化したものと見なされる。

この現象は、性質の異なる岩石毎にこの範囲の岩盤が層間剝離し、単位岩層はほとんど損なわれていないいわゆる吊り天盤状態を構成しているものと解釈できよう。因みに Fig.13に稼行炭層上位の層状図とボーリングコアの採取状態を示すが、コア採集時に例外なく性質の異なる岩石毎に剝離し、岩石自体の破壊に先立ち接合面が剝離しやすいことを示している。

これに対し直接天盤には著しく亀裂が発達し、透過性については方向性が失われており、両者の中間の層位において単位岩層が亀裂の生成により逐次梁としての性質を失っていく。

## 8. 地圧現象と透過性の関係

当鉱の夾炭岩石については、その強度は一般的なものであり、砂質頁岩ないし砂岩の場合、やや圧縮強度の大のものが見受けられるが、均一で厚い単位岩盤層は少なく、Fig.13のように性質の異なる岩盤の互層で構成されている。しかしそれにも関わらず、15m以上の層位では単位岩盤層がほとんど損なわれないうまま吊り天盤を構成している。なお30m以上の上部においては厚さ30~50mの礫岩層がある。このように直接天盤部分の十分な高さの範囲が薄い互層で構成されている場合の地圧現象は、直接天盤の厚くて強固な場合の地圧の発動とは異なり、破碎ズリ上に横たえられた梁の挙動によるものであるから、例え吊り天盤を構成する15m以上の上部に厚くて強固な岩盤層が存在するにしても、切羽支保に与える影響は比較的緩慢で微弱なものに過ぎない。しかし、このような場合の吊り天盤の周期的崩落による地圧の周期性があるとすれば、直接天盤としてある場合の短いサイクルに比べるとより破碎周期が長大化し、累層採掘の切羽構造と本層面の吊り天盤の支承が古洞向きに60度の破碎面にあると見れば、懸垂長が略20mになれば吊り天盤の自由端が下層切羽直上に達



CUMULATIVE THICKNESS METERS	THICKNESS METERS		TYPE OF ROCK	CODE DIA		NO
			CONGLOMELATE	M.M 56		24
0.17	0.17		COALLY SHALE	57		23
0.27	0.10		MODEST SANDSTONE	57		22
0.76	0.49		SANDY SHALE	57		21
1.16	0.40		MODEST SANDSTONE	57		20
1.52	0.36		SANDY SHALE	57		19
2.18	0.66		MODEST SANDSTONE	57		18
2.63	0.45		SANDY SHALE	57		17
4.18	1.55		SHALE	57		16
5.82	1.64		MODEST SANDSTONE	57		15
5.85	0.03		SHALE			14
6.31	0.46		COAL			13
6.34	0.03		SHALE	57		12
6.54	0.20		MODEST SANDSTONE	57		11
6.80	0.26		SHALE			10
7.26	0.46		FINE SANDSTONE	57		9
7.73	0.47		MODEST SANDSTONE	57		8
7.99	0.26		SHALE	57		7
8.29	0.30		FINE SANDSTONE	57		6
8.39	0.10		SHALE	56		5
8.49	0.10		SHALE	56		4
8.68	0.19		SHALE			3
8.90	0.22		COAL			2
9.26	0.36		SANDY SHALE			1

Fig.13 Sytratigraphic Column at 20-30 Meters above from Main Seam and Peeling Off at each Rock Binding Portion, Observed by Drilling, Kushiro Colliery

することにより、下層切羽支保にも周期圧の影響が現れることになる。

以上の見地に立って太平洋炭鉱の西10片6号下層ロングで行った切羽支保の荷重測定結果を Fig. 14に示す。当鉱で使用の切羽支保は、三井三池製作所製フェロタイプ水圧鉄柱で、荷重測定は、専用圧力計により行った<sup>23)</sup>。図中の荷重値を示す各点は、切羽全長を等分割し、各列10点宛設けた測定点のうち、ゼルボ一点以内の荷重値の切羽進行に伴う変化を求めることや、切羽下盤の性状<sup>24)</sup>を考慮して、2列柱目の約10本分の測定値の平均値を示したものである。

Fig.14の左端の荷重増加は、当該累層ロングの初圧の時期に見られたもので、先行する本層ロングにおいて、切羽、古洞の状態から大荷の来襲が認められ、同時にこの時点から急激なガスの放出が

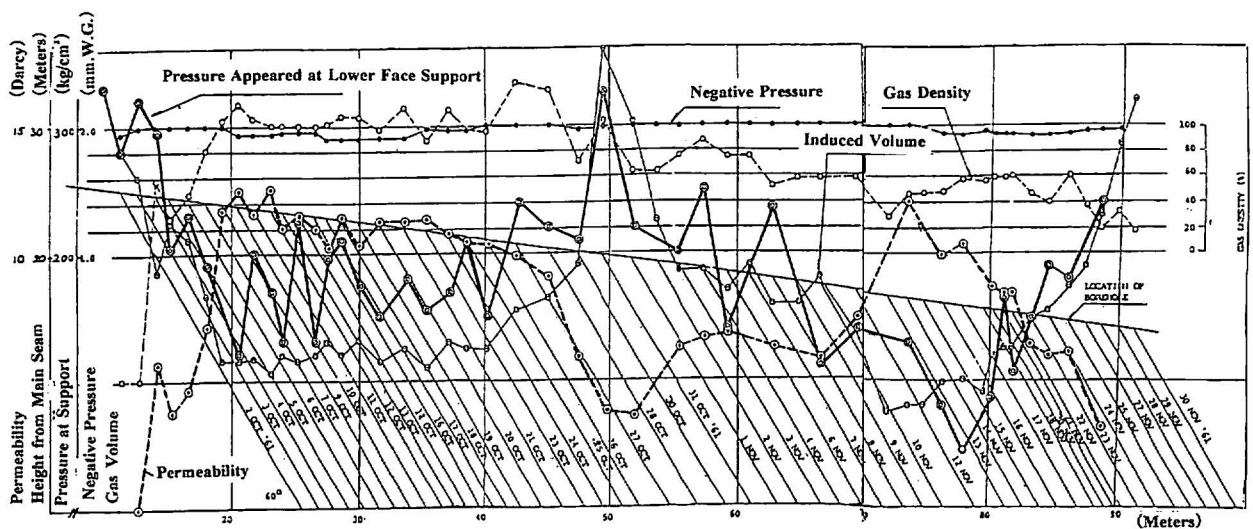


Fig.14 Relationship between Permeability and Pressure appeared at Lower Longwall Face Support West No.10 Level, No.6 Multi-Lift Longwall Main Longwall Advanced Distance from Face Standing Point

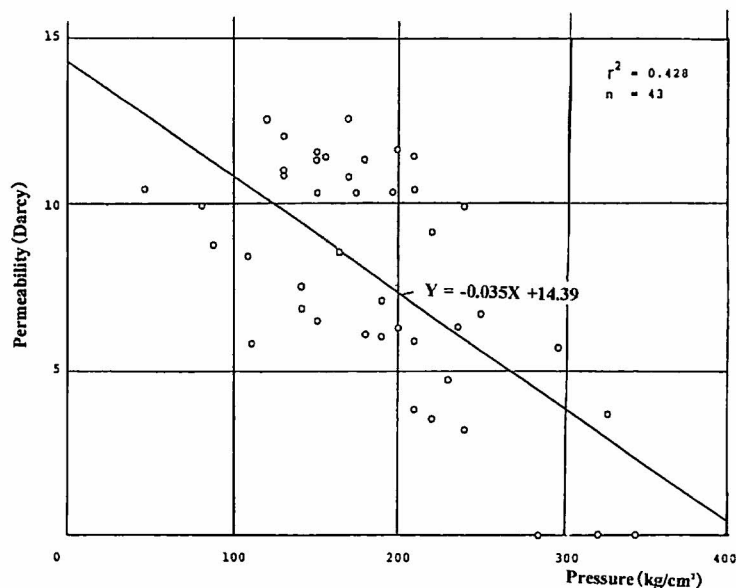


Fig.15 Linear Curve Fittings of Horizontal Permeability of Disturbed Roof Strata and Earth Pressure appeared at Longwall Face Support.

始まっている。ボーリング孔端と切羽面を結んでいわゆる破碎面の角度は60度である。11月末期にガス抜き孔崩壊のため、ガス誘導不能となったが、それまでの2ヶ月間に荷重値は3回極大点に達している。

当該ロングのが資料から求めた水平方向の透過性を同図中に示しているが、切羽支保にかかる荷重と透過性の間に密接な関係のあることは、一見明らかであり、両者の決定係数を求めると

$$r^2 = 0.428$$

$$\text{ただし } n = 43$$

であって、支保にかかる荷重と弛緩岩盤の示す透過性との間には、高度に有意な負の相関関係のあるのが認められる (Fig.15)。

両者の関係が負になることは次のように考えることが出来る。すなわち、崩落ズリを等経球体と見なした理論増積率から求めた採掘跡の自然充填高さは

$$H = \frac{h}{0.34} \dots\dots (8-1)^{25)}$$

ここに H：稼行切羽天盤からの充填高さ

h：稼行丈

となる。累層稼行丈を4.6mとすれば充填高さは13m程度となり、良好な吊り天盤状態を構成する領域はちょうど自然充填高さ近辺より上部の位置に存在する。従って、この部分以上では岩盤が崩壊するにしても、変位量は著しく抑制され、周期的に吊り天盤が破断した場合、成層状態で開いていた隙間が閉じることになる。このため、重圧の来襲により吊り天盤が破断すれば、隙間の閉じることにより、ガスの通過は困難となり、透過性は小になると考えられる。下層切羽に掛かる荷は、吊り天盤の崩壊時に最大となるから、透過性と荷重の相関関係は負になるものである。

#### 参考文献

- 1) 中嶋滋夫「自走支保切羽における実験的研究(その1) —我が国における採炭方式の変遷(第1報)」、資源・素材学会誌、2001年11月号
- 2) 中嶋滋夫「総合システム化した高層採炭切羽の開発(渡辺賞)」、日本鉱業会誌、Vol.90, No.1037 ('74-7), (1974)
- 3) 中嶋滋夫「シールド枠とカッターによる長壁式採炭技術の開発(科学技術功労者)」、科学技術庁第24回科学技術功労者業績概要、1982年4月
- 4~6) 佐藤 進「太平洋炭鉱における炭層ガスとガス抜きに関する研究(1~3報)」、日本鉱業会誌、Vol.76, No. 861, Vol.77, No.873, Vol.77, No.880
- 7) OEEC 偏、永井三郎訳「炭鉱のガス抜きと炭鉱のガス利用」
- 8) Gerhard OTTO「ガス湧出の多い二つの切羽の監視結果」、Glückauf(日本語版)、Bd.11, Nr.11, 1962
- 9) 山崎豊彦「本邦炭層中のガス組成とガス排出に関する研究」、日本鉱業会誌、75巻、851号
- 10) 山崎豊彦「炭層中のガスについて」、九炭技連誌、第10巻第4号
- 11) 野島通彦「大島鉱業所における地山を主とする坑道ガス抜き法の確立とそれに伴う企業合理化について」、日本鉱業会誌、第76巻第865号

- 12) Gerhard OTTO 「採掘された炭層の上下にある坑道周辺のガス湧出と変位」、Glückauf, Bd.12, Nr.87, 1963
- 13) KEGEL 「ガス湧出の問題」、Glückauf, Bd.12 Nr.5, 1963
- 14) WEISNER 「坑内作業における地圧作用」、Glückauf, Bd.6, Nr.2, 1957
- 15) 岸本義明 「SD方式による総合的高速切羽の開発について」、日本鉱業会誌、1969年6月
- 16) NAKAJIMA [Eine Entwicklung des Schreitausbaus in Japan], Glückauf, 5 Juli 1973
- 17) 阿美長充 「薄層の完全機械化採掘について」、日本鉱業会誌、1965年6月
- 18) 南家英二 「日炭高松における高圧注水の実績及び計画」、九炭技連誌、Vol.14, No.12
- 19) アー・イー・クセノフォントワ 「炭鉱での高圧注水と炭層の水力学パラメーターの計算」、ウーゴリ（日本語版）、25号、1961年
- 20) 太平洋炭鉱春採炭炭壁注水班 「高圧炭壁注水について」社内版、昭和40年
- 21) 中野実ほか 「夾炭岩石の浸透性と膠着物質の膨潤性について」、日本鉱業会誌、第76巻第867号
- 22) K. DREKOPH, F. BECKMANN 「ルール石炭紀砂岩のガス透過性」、Glückauf（日本語版）、Bd.4, Nr.4, 1955
- 23) 中嶋滋夫 「累層始発採炭法に関する考察」、北海道鉱山学会誌、第18巻第5号
- 24) 中嶋滋夫 「軟弱下盤の採炭切羽における自走支保の適用性」、第19巻第4号
- 25) 磯部俊郎 「緩傾斜長壁式採炭切羽における地圧現象に対する理論的及び実験的研究」昭和30年