

掘進切羽における吹き出し通気に関する研究

中山, 伸介
九州共立大学工学部環境サイエンス学科

<https://doi.org/10.15017/13816>

出版情報：エネルギー史研究：石炭を中心として. 21, pp.1-33, 2006-03-22. 九州大学附属図書館付設
記録資料館産業経済資料部門
バージョン：
権利関係：

掘進切羽における吹き出し通気に関する研究

中山 伸 介

はじめに

わが国では、莫大な石炭埋蔵量が確認されているにもかかわらず、環境と操業費等の問題により、2002年の太平洋炭鉱閉山以後、大規模な石炭採掘は行われていない。しかし、石油の生産がピークを迎えると予測される今世紀半ば以降、わが国における一次エネルギーの安定供給のため、かつて「黒ダイヤ」と称された石炭が再び注目を浴びる日が訪れるに違いない。

その日が再来するまで、わが国は何としてでも自国での採掘技術とその技術者を温存しておく必要があると筆者は信じている。現在、JICAやJCOALなどの機関を通して、日本の高度な Underground Mining（坑内掘り）技術が、フィリピン、インドネシア、中国などの国々を中心に、技術指導という形で広められている。

わが国で培われてきた石炭採掘技術が自国の発展に大きく寄与してきたことは誰も疑う余地のない事実であり、それを風化させることはわが国の近代文化の一部を黙殺するのに等しい。わが国が石炭を再び採掘することになれば、いったいどのような技術者たちがわが国のエネルギー源確保のためにその任務を担うのであろうか？

さて、わが国で稼動していた石炭鉱山はそのほとんどが坑内掘りにより採掘されていた。坑内掘りにおける通気制御技術は、岩盤制御や地下水制御などに並ぶ、最も重要な保安技術の一つである。坑内における通気とは、網の目のように張り巡らされた坑道中の空気の流れを示す。通気には、空気の新鮮さの観点から言えば入気と排気の2種類あり、人体の血管に例えれば前者は酸素を多く含む動脈であり、後者は老廃物を含む静脈に相当する。

入気と排気をうまくコントロールすることは、坑内における作業環境と経済性ならびに安全性を向上させることにつながる。

入気と排気が激しく混合する箇所の一つに掘進切羽がある。掘進切羽は、坑道の先端部に位置しているため、掘削機械や発破による掘削で常に新鮮な岩盤や石炭が露出する。作業環境を向上させるため、岩盤から放出される熱や粉じん、メタンガスなどを大量の新鮮な空気を送り込むことにより希釈・排除する必要がある。しかし掘進切羽における通気の制御は、現場の経験によるところが多く、現在まで大学などの研究機関で調査された例はわが国ではほとんど見られない。

本論文は、筆者が平成12年に九州大学より取得した博士論文（掘進切羽における吹き出し通気的最適化に関する研究：乙1368号）を要約したものであり、かなり専門的な数式や理論が出てくるが、閉山に追い込まれた三池炭鉱、池島炭鉱、そして旧通産省の試験炭鉱などにおいて調査し

て得られた大変貴重なデータを満載している。海外、あるいは将来のわが国における保安技術の指針に何らかの参考になれば幸いである。

第1章 序 論

1・1 本論文の背景と目的

坑道を構築していく作業の先端部である掘進切羽は、他の箇所比べて地山に近いので、ガス・熱の坑道内への流入や発破・機械掘削による粉じんの発生量が比較的多い。作業環境を悪化させるこれらのガス・粉じん・熱を安全なレベルまで希釈し掘進切羽の外に排除するために、掘進切羽では、通常、風管と局部ファンを組み合わせた通気法が用いられる。現在まで、これに関する種々の研究が行われてきているが、現場の流れが複雑で測定が困難であるため、種々の仮定に基づいた研究が多く、通気の流れ自体とそれに伴う問題を詳細に検討したものは少ない。従って、現在でもなお具体的な通気の技術的指針は確立されておらず、風管の位置や風量などの通気条件は現場の経験で決められているのが現状である。さらに、わが国の炭坑の保安規則では、切羽面周辺の熱や粉じんを希釈・排除するための十分な風量を確保するために、風管の吹き出し口を切羽面から7m以内に設置するよう義務づけているが、これに関する科学的根拠はどこにも見出すことはできない。最近では機械掘削法の導入によりガスと粉じんが共存することも多いため、現場の経験や上述の保安規則に基づく通気法では、このような複雑な掘進切羽の環境を一定レベルに維持し管理することが困難となりつつある。このため今後ますます増えると予想されるこのような複雑な条件を有する掘進切羽において、より質の高い作業環境を実現するためには、より合理的な技術的指針の確立が不可欠である。

本論文は、このような観点から、掘進切羽における通気法の中で最も広く採用されている吹き出し通気に関する基本的技術指針を得るために行った研究をまとめたものである。本研究の問題は、次の2つに区別される。

第1は、吹き出し通気を行う掘進切羽の基本的な流れおよび通気条件の違いが流れに与える影響を、現場実測、室内実験および数値解析により明らかにすること、第2は掘進切羽で発生する主要なガスで、特に石炭鉱山で重要なメタンガスの濃度分布に対して通気条件の違いが及ぼす影響を現場実測、室内実験および数値解析により明らかにすることである。本研究では、特に断らないかぎり、ガスとしてメタンを考えることにする。

第2章 掘進切羽における流れの風速測定と観察

2・1 緒 言

今後、掘進切羽においてはさらに掘進速度の増大や深度増加に伴うガス滲出量の増大、あるいは掘進機材使用の増加などに伴う通気条件の複雑化が進行することが予想され、そこで発生するガス、粉じん、熱等の挙動に大きな影響を与える空気の流れの構造を明らかにしておくことは、

適切な通気法を求めようとして不可欠である。

しかし、これまでに室内実験や現場での流れの可視化、および風速の測定がさまざまな研究者によって行われてきたにもかかわらず、それらの多くは、部分的な観察と測定にとどまっており、基本的な流れの構造を詳細に把握するまでには至っていない。

そこで本章では、超音波風速計を用いて掘進切羽の実規模模型の風速を3次的に測定した結果およびレーザーライトシートによる流れの可視化実験の結果を検討し、掘進切羽における空気の基本な流れの構造、および通気条件の違いが流れのパターンに与える影響を明らかにする。さらに、実際の現場の流れを把握するために行った、金属鉱山の掘進切羽における流れの測定結果についても検討する。

2・2 実規模の模型における風速測定

2・2・1 実験装置

図2・1と写真2・1に、旧通産省・資源環境技術総合研究所九州石炭鉱山技術試験センター(福岡県直方市)内に設置した実験装置の概要を示す。この装置は、高さ2.4m、幅2.8m、長さ14mであり、坑道軸方向に0.5m間隔に設置した直径約0.02mの鉄パイプと、その上に被せた厚いビニールシートからなる。切羽面に相当する面には、風管から吹き出す噴流によるビニールシートのばたつきを防ぐためベニヤ板を使用している。吹き出し風量約 $1\text{ m}^3/\text{s}$ 、定格500kWのファンは模型坑道の開放端近くに組んだアングルの台の上に設置し、その吹き出し側に直径0.48mのビニール製の風管が取り付けられている。なおこのビニール風管の吹き出し口には、噴流の方向を安定させるために長さ1mのブリキ板の筒が接続されている。各測点の3方向速度成分の測定には超音波風速計(カイジョー製:WA-390)を使用した。写真2・2に示す風速計の超音波振動子の測定範囲は $0\sim 10\text{ m/s}$ 、測定精度は $\pm 2\%$ である。風管の吹き出し口に設置した風速監視用の無指向性熱式風速計(リオン製:AM-03)の測定範囲は $0.05\sim 20\text{ m/s}$ 、測定精度は $\pm 2\%$ である。

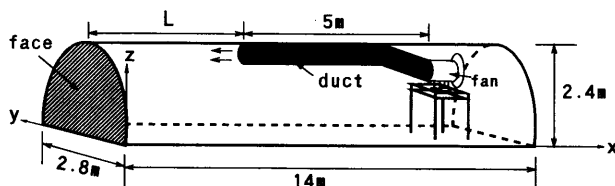


図2・1 実験装置の概要

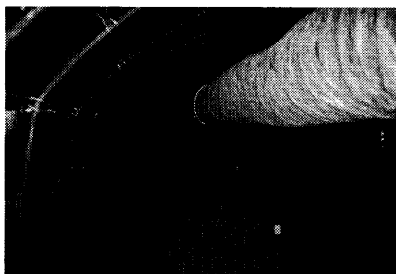


写真2・1 実規模模型坑道内部

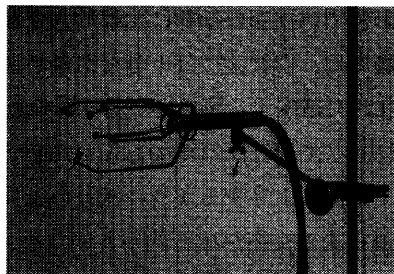


写真2・2 超音波送受信プローブ

2・2・2 実験方法

図2・2に切羽面に平行な断面上の測定点を示す。この測定点に三脚を用いて超音波振動子を設置した。この超音波振動子から得られた3方向の風速の信号は、1つの測定点につき毎秒1回の割合で、RS-232C回線を通してコンピュータに30秒間取り込まれた。この30秒間の風速の平均値をその測定点の風速とした。本実験では、まず風管の吹き出し口と切羽面の間隔（以後、風管距離とよぶ）の違いによる流れへの影響を調べるため、風管を天井の中央部に固定し、風管距離を5, 7, 10mと変えて測定を行った。実際の現場では、天井付近に岩盤の崩壊を防ぐための支保が設置されていることにより、風管が壁面から離れて設置される場合があることや、作業上、設置する機材の関係および人間の移動があることなどの理由から、風管が天井の中央に接していない場合もある。そこで、天井と風管の間隔の違いによる流れへの影響を調べるため、図2・2に示すように、風管距離を7mに固定し、風管を天井から0.3m吊り下げた場合と、切羽面に向かって右側の天井の隅に設置した場合の風速測定も行った。これらの測定条件をまとめて表2・1に示す。

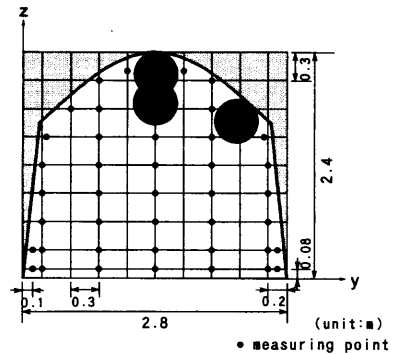


図2・2 測定断面(x-y断面)

表2・1 実験条件

実験番号	風管設置位置
1	L= 5m, H=0m
2	L= 7m, H=0m
3	L=10m, H=0m
4	L= 7m, H=0.3m
5	L= 7m, 天井隅

L: 風管吹き出し口と切羽面の間隔(風管距離)
H: 天井中央と風管上部の間隔、風管吹き出し速度(=6.61m/s)

2・3 風速の測定結果および考察

2・3・1 風管と切羽面の間隔が流れに及ぼす影響

風管距離の違いが流れに与える影響を明らかにするために、風管を天井の中央部に固定し、風管距離Lを5, 7, 10mに変えて測定した結果¹⁾を検討する。

図2・3(a)~(c)は、風管距離Lが5, 7, 10mの場合の坑道中央鉛直断面における速度ベクトル図である。いずれの条件においても風管から吹き出した噴流は上下に広がりながら切羽面に到達し、向きを変えて戻りの流れに転じている。特に風管距離が最も短い5mの場合、切羽面に衝突する運動量が大きいため、戻りの流れと切羽面を降下する流れ、および噴流の3つの主要な流れの影響で切羽面の手前に比較的大きな渦が形成されている様子が現れている。この場合、実際の現場では、切羽面には十分な風量が届くが、切羽面で生じたガスや粉じん等がこの渦の中に取り込まれて循環する可能性があるものと考えられる。

それに対して風管距離が最も長い10mの場合、Wesely²⁾や鈴木ら³⁾が報告しているように、切羽面の下部から上昇する戻りの流れの上昇角と運動量が比較的小さく、噴流と戻りの流れの間で生じる運動量の交換が比較的小さいため、風管距離Lが5mの場合に現れる渦は見られない。したがって、実際の現場では切羽面で生じる有害物質が渦の中に取り込まれ、循環することは比較

的少ないと考えられる。

これら2つの場合のほぼ中間にあたる風管距離Lが7mの場合、図(b)に示すように、風管距離Lが5mの場合に比べて渦は小さく、切羽面近傍の流れや戻りの流れの大きさは風管距離Lが10mの場合よりも大きい。

切羽面近傍の流れを比較すると、風管距離Lが長いほど切羽面近くでの速度の減衰が早くなる。これは、風管距離Lが長くなるにしたがって、切羽面近傍での噴流の広がりが大きくなり、この噴流に接する戻りの流れの面積も大きくなるため、噴流自体の有する運動量が急速に低下するためであると考えられる。

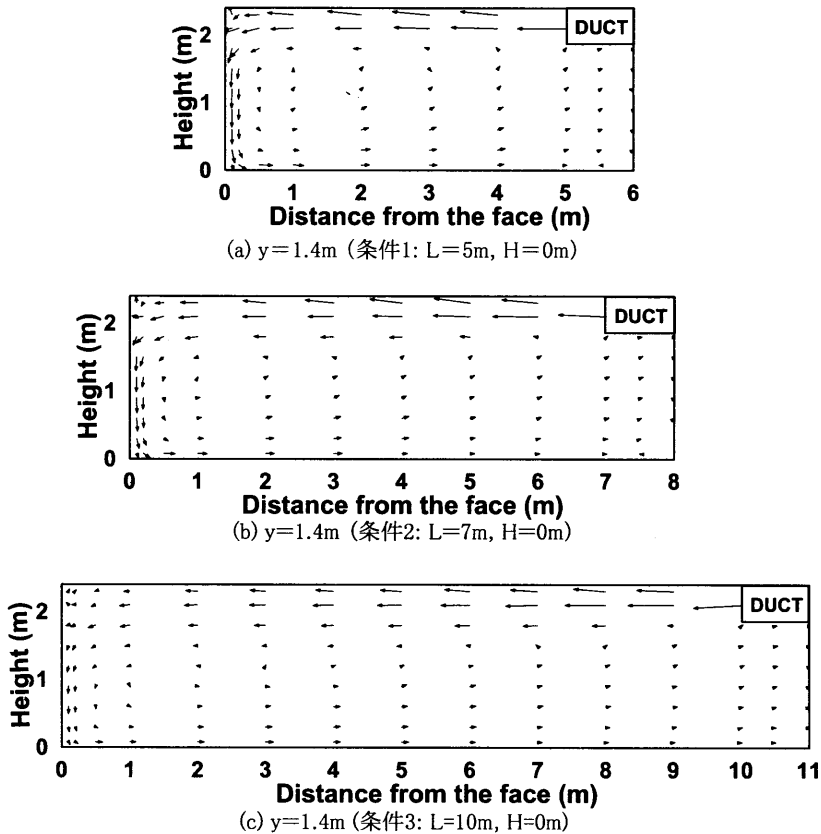


図2・3 坑道中央鉛直断面の速度ベクトル

風管距離の違いが流れのパターンに与える影響をさらに詳しく調べるために、切羽面に平行な断面における坑道軸方向の速度成分の等速度線図を比較する。図2・4、図2・5がそれぞれ風管距離Lが5mと10mの場合の結果である。これらの図で、上段の図(a)は、断面に垂直な速度成分の等速度線図を示す。下段の図(b)は、絶対速度 ($\sqrt{u^2 + v^2 + w^2}$) の等速度線図である。図(a)の白色(負)の領域は風管の吹き出し口から切羽面に向かう流れを、灰色(正)を示す領域は切羽面から風管の方向へ戻る流れを表す。L=5mとL=10の場合の $z=0.1\text{m}$ の断面を比較すると、後者の方が、天井付近の灰色の領域が大きい。これは、風管距離Lが長くなるほど、切羽面付近の噴流の運動量が小さくなるため、戻りの流れの影響を大きく受けていることを示している。従って、

現場では風管距離が長くなると切羽面の天井付近において切羽面に向かう流れと戻りの流れが混在することにより、切羽面で発生する有毒物質が停滞しやすい状態にあると考えられるため注意を要する。

戻りの流れの速度の最大値を示す領域は、図2・4、図2・5ともに、切羽面近傍と風管近傍を除いて、床面近くと側壁下部付近に現れている。したがって、現場において、より効果的な排気を行うためには、この戻りの流れを乱さないよう機械類の置き方を工夫する必要があると思われる。また風管周辺の流れ、特に風管の両脇の流れは、きわめて遅いため、現場で経験的にも知られているようにメタンガスなどの有害物質が停滞しやすい状態にあり、注意を要する。

絶対速度の等速度線図を示す図2・4と図2・5(b)の $z=0.1\text{m}$ の断面では、切羽面上を下降する流れが存在するため、図(a)の坑道軸方向の分布と大きく異なり、中央付近に最大値が現れている。他の断面については、軸方向の速度が卓越するため、図(a)によく似た分布を示している。

以上、風管距離の違いが流れに与える影響について検討したが、風管距離 L が短くなると切羽面まで噴流が届きやすくなるという点ではよいが、渦が生じやすいため、とくに粉じんの制御等については、不利になるものと考えられる。

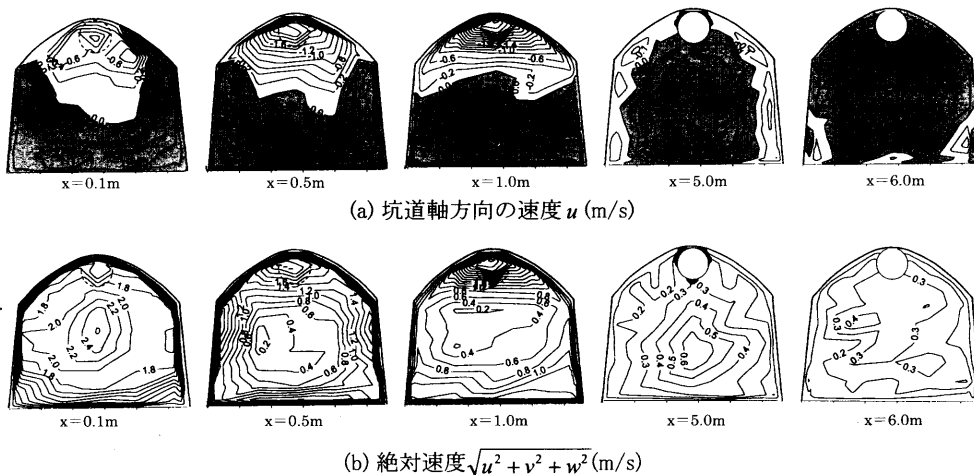


図2・4 切羽面に平行な断面における等速度線図 (条件1 : $L=5\text{m}$, 天井中央, $H=0\text{m}$)

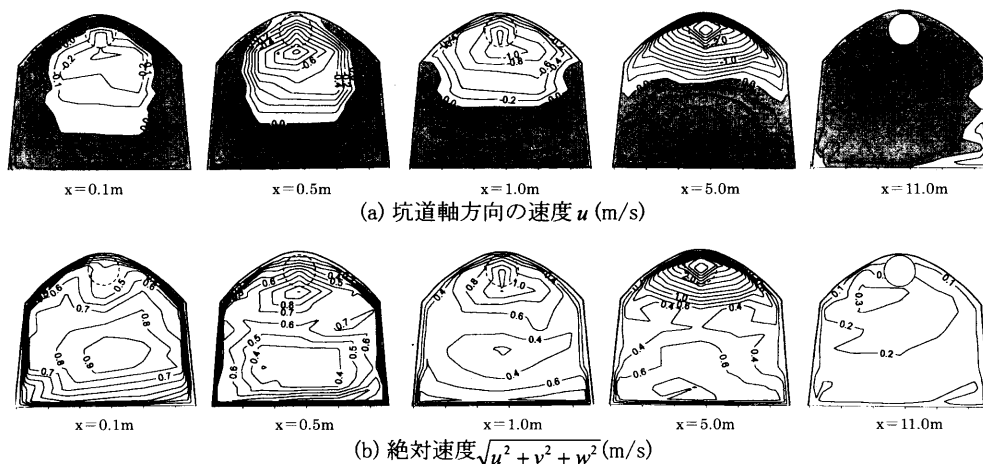


図2・5 切羽面に平行な断面における等速度線図 (条件3 : $L=10\text{m}$, 天井中央, $H=0\text{m}$)

また風管距離が長すぎると噴流が切羽面まで届きにくくなるため、現場では渦と戻りの流れの大きさのバランスを考えた上で風管の設置を行う必要がある。

2・3・2 天井と風管の間隔が流れに及ぼす影響

天井と風管の間隔の違いが流れに与える影響を明らかにするため、風管距離を7m一定とし、風管を図2・2に示すように天井の中央に設置した場合、天井の隅に設置した場合、天井中央部から0.3m離して設置した場合の測定結果を検討する。

図2・6(a)に風管を天井中央部から0.3m離して設置した場合のベクトル図を示す。風管が天井の中央にある場合の図2・3(b)に比べ、図2・6(a)の方が噴流は早く減衰している。これは、風管が天井から離れると、風管が天井に接している場合に比べ、噴流が周囲の流体と接する面積が増えるため、両方の流体に間て生じる運動量の交換が大きくなることや、噴流が床面に近づくと戻りの流れから受ける影響が大きくなることによるものと考えられる。

図2・6(b)は、図2・2に示すように、風管が天井の隅にある場合の風管の中心付近を通る鉛直断面のベクトル図である。この断面では、切羽面から風管方向へ戻ってくる流れが少ないため、噴流の減衰は小さい。

図2・6(d)は、風管が設置されていない側の壁面付近における流れのベクトル図である。この断面の速度ベクトルはすべて切羽面から風管の方向へと向かっている。したがってこの断面ではガスや粉じん等は他の断面に比べて渦に取り込まれにくいものと考えられる。一方、後述する風管を天井に設置した場合の同じ断面の速度ベクトル図を示す図2・7(c)には、渦が現れているため、この付近で有害物質が循環する可能性があるものと考えられる。

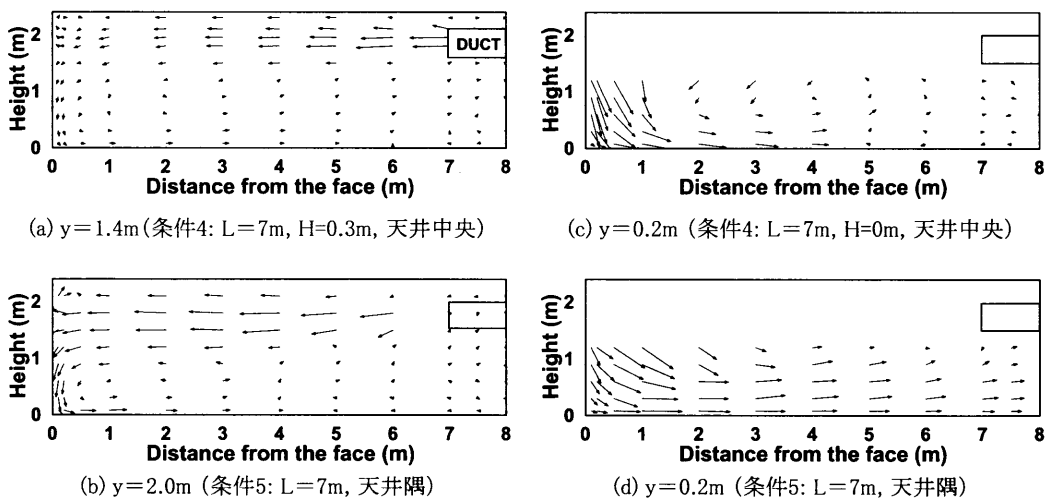


図2・6 坑道軸方向鉛直断面の速度ベクトル

図2・7(a)および(b)はそれぞれ、風管が天井の中央にある場合と天井の隅にある場合の床面付近 ($y=0.3\text{m}$) の速度ベクトル図である。前者の場合、ベクトルはすべて切羽面から風管の方向へ一様に向かっている。一方、後者では図の右上部、つまり風管の吹き出し口の下部にあたる

領域に、切羽面に向かう流れと戻りの流れの境界付近によどみが生じている。したがって、ラドンなどの空気よりも重いガスが発生する現場では、床面付近にガスや粉じん等が停滞することがあり得るので注意を要する。

図2・7(c)と(d)はそれぞれ、風管が天井の中央にある場合と天井の隅にある場合の天井付近における流れのベクトル図である。前者の場合、風管から吹き出した噴流はすべて切羽面に一様に向かっている。一方、後者の場合、図の上半分（風管が設置されている側の側壁付近）には切羽面に向かう流れが見られるが、図の下半分には切羽面に向かう流れと切羽面から戻り流れが混在するため、複雑で遅い流れが見られる。したがって、メタンガスなどの空気よりも軽いガスが発生する現場では、風管を可能な限り天井の中央に設置した方が、ガスは天井に溜まりにくいと考えられる。

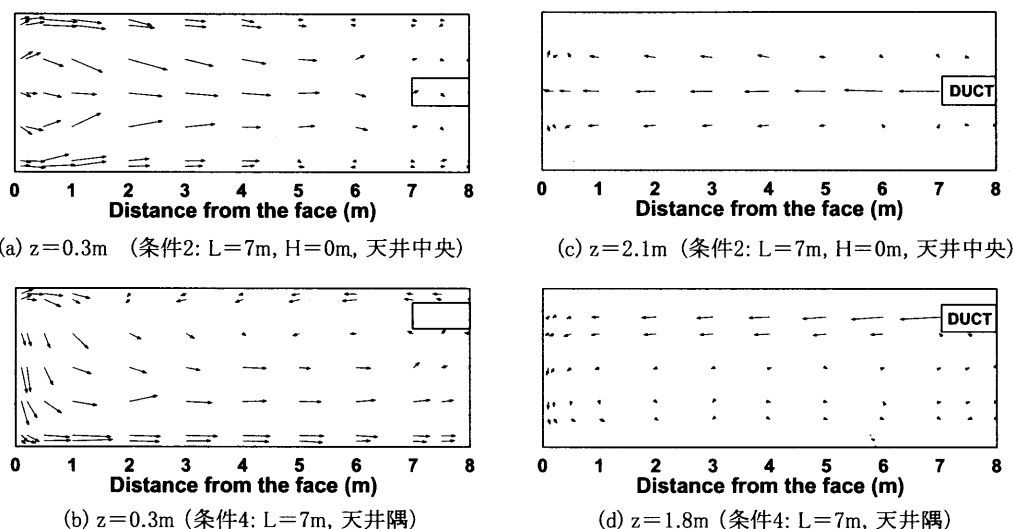


図2・7 坑道軸方向水平断面の速度ベクトル

図2・8と図2・9は、風管をそれぞれ天井中央と天井隅に設置した場合の、切羽面に平行な断面における等速度線図である。これらの図のうち、上段の図(a)は、断面に垂直な速度成分の等速度線図を示す。図2・9(a)の $z=0.5\text{m}$ から $z=5\text{m}$ までの天井付近に、切羽面に向かう流れと戻りの流れの境界が現れている。この境界付近では流れが遅く複雑であるため、メタンガスなどの空気よりも軽いガスが発生する現場では、それらが停滞しやすいものと考えられる。図2・8の風管を天井に設置した場合の流れと比べても、このような現場では、風管を天井中央に近づけることにより、天井付近のガスを効果的に希釈・排除できるものと考えられる。

また、戻りの流れの速度の最大値が現れる場所については、風管が天井中央にある場合は床面付近に見られ、風管が天井の隅にある場合は、風管が設置されていない側の側壁と床面付近に見られる。

図2・8と図2・9の下段の図(b)は、3方向の絶対速度の等速度線図である。切羽面に最も近い $z=0.1\text{m}$ の断面では、切羽面上を下降する流れが存在するため、図(a)の坑道軸方向の分布と大きく異なり、中央付近に最大値が現れている。他の断面については、軸方向の速度が卓越するため、図(a)によく似た分布を示している。

以上、風管と天井の間隔の違いが流れに与える影響について検討したが、風管を天井の隅に設置すると、天井付近に流れの停滞する領域が、また床面付近には渦が現れることが明らかとなった。従って、空気と比重差のあるガスが発生する現場では、それらの停滞に注意を要する。

メタンガスが停滞しやすい天井付近の流れをさらに詳しく調べるために、風管が天井隅に設置された場合の、天井の中央から0.1m離れた箇所の速度成分と切羽面からの距離の関係について検討する。図2・10に、各速度成分と絶対速度および切羽面からの距離の関係を示す。切羽面から2m以下の領域では、どの速度成分も大きいですが、切羽面から3m以上離れると徐々に低下することがわかる。坑道の軸方向の速度(z速度)は、切羽面から3m以上離れると吹き出し速度の1/20にも満たない0.3m/s以下まで低下し、メタンガスレーヤの形成を防ぐのに必要といわれる1m/s以上の風速⁴⁾が確保できていないことがわかる。また、8m付近では、速度の負号が変わり、戻りの流れから切羽面に向かう流れへと逆転する複雑な流れを示している。従って、この図からも、図2・6(b)でも指摘したように、現場で風管を天井隅に設置した場合にはメタンガスなどの停滞に注意すべきであることがわかる。

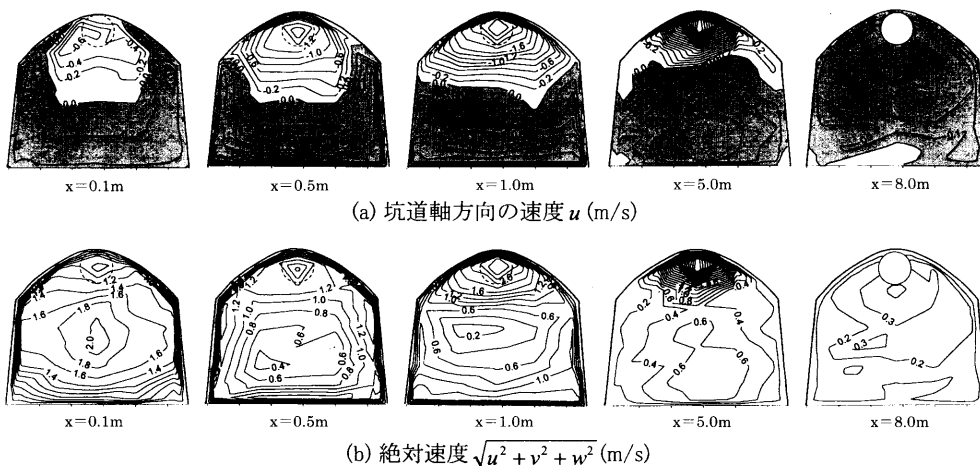


図2・8 切羽面に平行な断面における等速度線図 (条件2 : L=7m, 天井中央, H=0m)

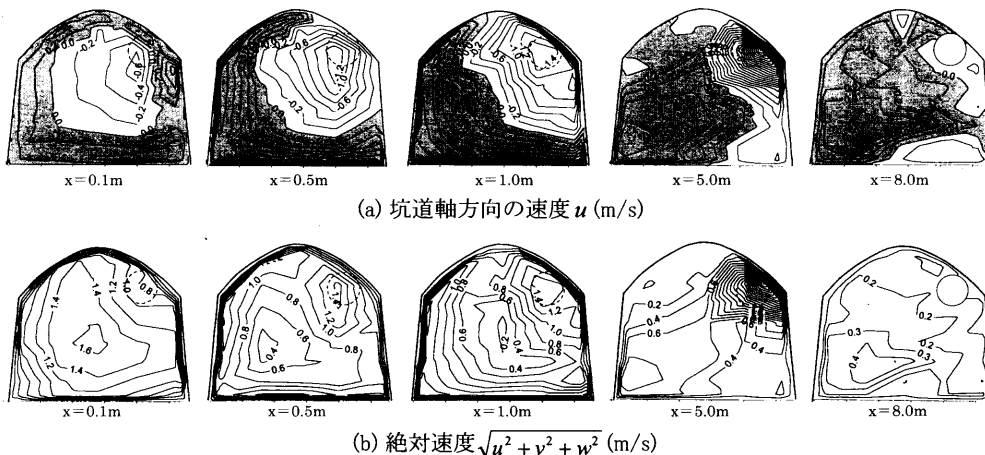


図2・9 切羽面に平行な断面における等速度線図 (条件4 : L=7m, 天井隅)

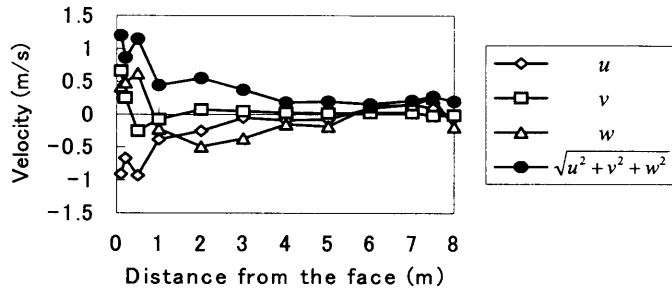


図2・10 天井付近の速度成分と切羽面からの距離の関係
($y = 1.4\text{m}$, $z = 2.3\text{m}$: 条件4, $L = 7\text{m}$, 天井隅)

2・3・3 鉱山における実測

実際の掘進切羽の流れは、室内実験の流れと比較して基本的な流れは一致すると思われるが、支保などの障害物や、壁面の凹凸の影響により細部において異なるものと考えられる。従って、室内実験で得られた結果を役立てるには、実際の流れとの違いを把握しておく必要がある。そこで、住友金属(株)菱刈鉱山の本山坑の掘進切羽 (40ML2SLW18BH0-2W) において3次元の風速測定を行った結果について検討する。

図2・11に、掘進切羽の概略を示す。図中に示すように坑道の敷幅は2.8m、高さは3.5mである。天井中央に直径0.6mのビニール風管が設置され、切羽と風管出口の間隔は7m、風管出口の風速は11.8m/sで測定期間中一定であった。測定の間隔は水平・垂直ともに0.5mとした。最も低い測点は床面から0.25m、最も壁に近い測点は壁から0.15mの位置にある。測定には、3成分の風速分布を得るために超音波風速計を用いた。

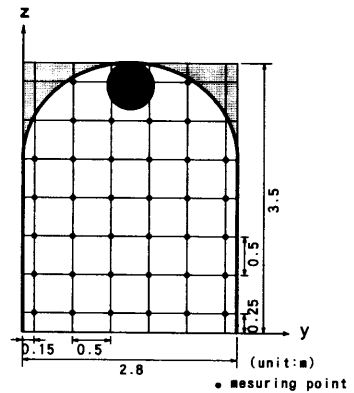


図2・11 菱刈鉱山の掘進切羽の測定断面

図2・12 (a) (b) に速度ベクトル ($\sqrt{u^2 + w^2}$) の図を示す。ベクトルが描かれていない箇所は坑道形状の関係で測定ができなかった箇所である。実験室における測定に比べると測点が粗く、傾向がつかみにくい、切羽面に衝突した噴流が向きを大きく変え、戻りの流れとなる点や、噴流と戻りの流れの境界付近の流れが遅い点などが実規模実験の流れとよく似ている。

図2・12(c)は切羽面から0.5mの位置の切羽面に平行な断面の速度ベクトルである。この結果によれば、やや左下方向に傾いているが、全体としては室内実験と同様なパターンを示しているとしてよいものと考えられる。左下方向に傾いた理由としては、風管の先端部の設置方向のずれなどが流れの方向に影響を及ぼしたのと考えられる。

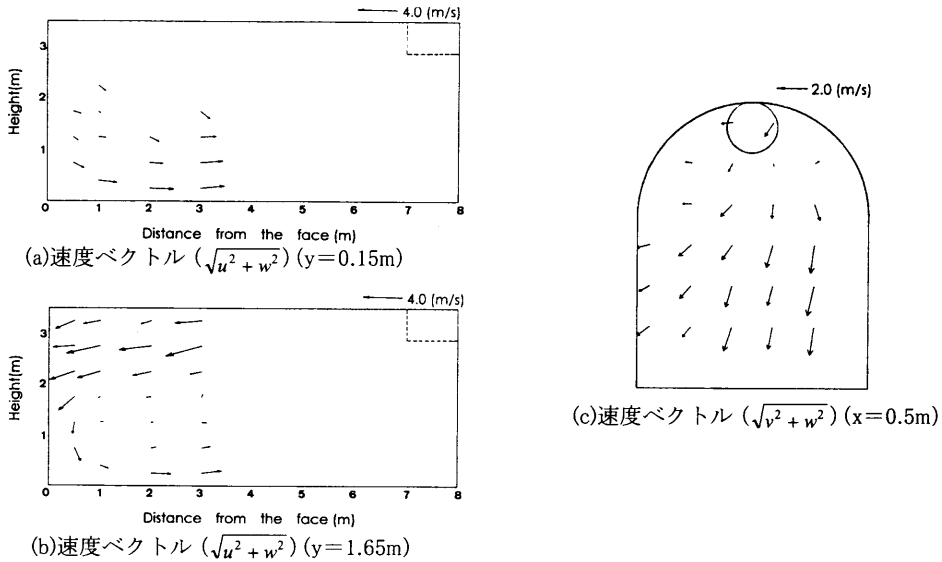


図2・12 実際の現場における速度ベクトル(菱刈鉱山)

2・4 可視化実験

2・4・1 実験装置

前述のように、噴流と戻りの流れの間に生じる渦は、ガスや粉じん等の排除効果に大きな影響を及ぼす可能性のあることを指摘した。より効果的な通気法を見出すためには、この渦の動きをより詳細に調べる必要がある。しかし、前述の平均流速の結果からだけでは、流れの大きさや向きを把握することはできても、それらの動き、たとえば乱れの程度などを把握することは困難である。さらに、流れのよどみ領域もほぼ把握することができたが、その領域がどの程度、またどのようによどむかについては、先の風速測定の結果からだけでは詳細に把握することは困難である。

そこで、この渦の動きをより詳細に把握するために、流れの可視化を行うことにする。

掘進切羽における流れを肉眼で直接確認するために流れの可視化実験を行った。図2・13に高さと幅が0.18mの正方形断面を有し、坑道部の長さが1.3mの水槽模型の概略図を示す。実際の掘進切羽のほぼ1/20縮尺のこの水槽の天井中央部に、外径0.04m、内径0.03mの亚克力製の風管を設置する。水槽内の水は、坑道の後部からポンプを通して風管に送り込まれる。

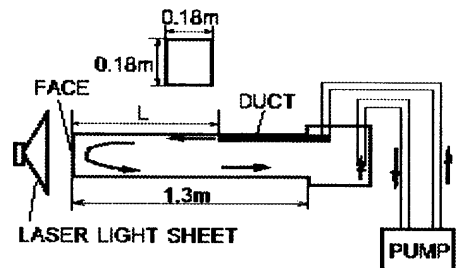


図2・13 掘進切羽の水槽実験装置の概略

2・4・2 実験方法

粒径 $7 \times 10^{-4}\text{m}$ 、比重1.05のポリスチレン粒子を予め水槽内に投入しておき、レーザーライト

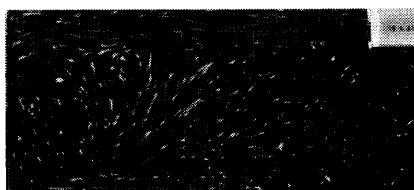
シートを切羽面の外側から水槽の中央鉛直断面に照射し、その断面上で光る粒子を水槽の真横から一眼レフカメラで撮影する。ポンプの吐出量と、風管から吹き出す水の速度はそれぞれ $3.92 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{s}$ と $5.54 \text{m}/\text{s}$ である。風管の内径を代表寸法とした計算したレイノルズ数はこの場合、約170000となる。このレイノルズ数を用いて計算した実際の空気の風量と風速は、それぞれ $1.17 \text{m}^3/\text{s}$ 、 $4.5 \text{m}/\text{s}$ である。

2・4・3 実験結果および考察

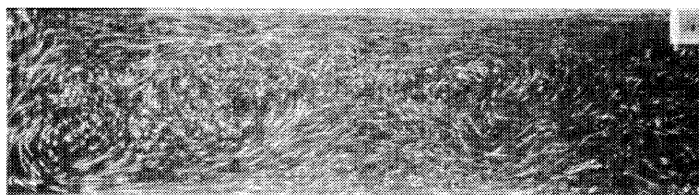
写真2・3(a)は、風管を天井に固定し、風管距離を 0.35m (実規模換算で 7m)に設定した場合の坑道中央鉛直断面の流れである。切羽面の手前まで噴流があまり減衰していないことや、噴流が切羽面の手前で向きを大きく転じて戻りの流れとなり、この流れの一部がエントレインメントとして噴流に取り込まれて反時計回りの渦を形成している点などは、実規模の模型を用いた測定結果と一致する。

写真2・3(b)に、風管距離が 0.7m (実規模に換算して 14m)の場合の坑道中央鉛直断面における流れを示す。風管距離が短い写真2・3(a)に比べ、切羽面付近の流れが小さい。また、坑道下部を左から右へと流れる戻りの流れは、上下に大きく蛇行している様子も写し出されている。これは、戻りの流れの上部と切羽面に向かう噴流の境界において、活発な運動量の交換が行われる際に発生するいくつもの小さい渦が、戻りの流れに変動をもたらしているためであると考えられる。

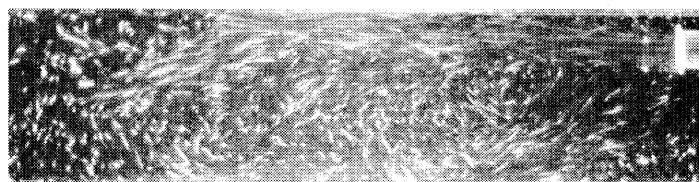
写真2・3(c)は、風管距離 0.7m (実規模換算で 14m)、天井との間隔が 0.02m (実規模換算で 0.4m)の場合の中央鉛直断面の流れである。風管を天井から離れた場合、噴流と周囲の流体との



(a)風管距離 $L=0.35 \text{m}$, $H=0 \text{cm}$ (実規模換算 $L=7 \text{m}$)



(b)風管距離 $L=0.7 \text{m}$, $H=0 \text{cm}$ (実規模換算 $L=14 \text{m}$)



(c)風管距離 $L=0.7 \text{m}$, $H=0.02 \text{m}$ (実規模換算 $L=14 \text{m}$)

写真2・3 中央鉛直断面の流れの可視化写真

運動量の交換が活発になるため、実規模模型の風速測定でも明らかになったように風管を天井に設置した場合の写真(b)と比べると、噴流の勢いは小さい。

2・5 結 言

本章では3次元の超音波風速計を用いた実規模の模型坑道と現場における風速測定及びレーザーライトシートによる流れの可視化実験の結果について検討し、掘進切羽の空気の基本的な流れの構造と、通気条件の違いが流れに与える影響を明らかにした。その結果は次のように要約される。

- (1) 風管から吹き出した噴流が切羽面に到達し、向きを変えて戻りの流れに転じるが、その戻りの流れと切羽面を降下する流れ、そして噴流の3つの主要な流れが合流し、切羽面の近くに比較的大きな渦が形成される。風管と切羽面の間隔が短いほどこの渦は強くなるため、現場では粉じんやガス、熱等がこの渦の中に取り込まれ、循環する傾向にあると考えられる。逆に切羽面と風管の間隔が長い場合には、渦は比較的小さいため熱や有害物質は戻りの流れに運ばれて比較的スムーズに切羽の外に運ばれると考えられる。しかし、切羽面と風管の間隔が長すぎると噴流が切羽面まで届かなくなるため、現場では渦と戻りの流れの強さのバランスを考えた上で風管を設置すべきである。
- (2) 戻りの流れの最大速度が現れる領域は、風管が天井の中央に設置されている場合には坑道の左右の壁面と床面の端に現れ、風管が天井の隅に設置されている場合には風管が設置されていない側の床面の隅に現れる。したがって、通気によって切羽面付近で生じるガスや粉じん、熱等を効果的に排除するためには、この流れをできる限り妨げないように機械類を設置する必要がある。
- (3) 風管が天井中央に設置されている場合と、風管が天井の隅に設置されている場合の風管の吹き出し口と切羽面の間における天井付近の流れを比較すると、前者の場合、噴流が天井付近を通り過ぎるので流れは大きい、後者の場合には天井中央から風管が設置されていない側の天井の隅にかけて、流れはきわめて小さい。後者の場合、メタンガスなどの空気よりも軽いガスが発生する現場では、この領域にそれが停滞する可能性があるため注意を要する。また、風管周辺については、風管の位置にかかわらず、その周辺の流れが遅いため、メタンガスなどの空気よりも軽いガスの停滞に注意を要する。
- (4) 風管が天井中央に設置されている場合と、風管が天井の隅に設置されている場合における床面付近の流れを比較すると、前者の場合には床面全面にわたって比較的大きい戻りの流れが見られるが、後者の場合には風管の吹き出し口の下部にあたる付近に渦が現れる。ラドンなどの空気よりも重いガスが発生する現場では、後者の場合、この領域にそれが停滞する可能性があるため注意を要する。空気と密度差のあるガスが発生する現場では、より

効果的な通気を行うためにも、風管はできる限り天井中央に設置するべきであると考えられる。

- (5) 風管と壁面の間隔が大きいほど、噴流とその周囲の流体との間で生じる運動量の交換が活発になるため、噴流の減衰が大きくなり遠くまで届きにくくなる。従って、現場ではできる限り風管を壁面付近に設置すべきである。

第3章 掘進切羽における空気の流れの数値解析と実験との比較

3・1 緒言

第2章では、風管通気における基本的な流れの構造と風管の位置が流れに及ぼす影響を明らかにするために行った室内実験と現場実験の結果を検討した。これらの実験方法は、流れ場を明らかにするための有効な手段ではあるが、掘進切羽の流れ場が3次元的で複雑であることや種々の理由から、実験条件が限定されるという欠点を有する。そこで、これらの実験結果を補い、より多くの通気条件下における流れを明らかにするために、3次元乱流の検討が可能な数値流体力学的手法（Computational Fluid Dynamics : CFD）を用いることにする。この方法は、定量的なデータを短時間に得ることができる有効な手法であるが、計算が容易でないため、これまで掘進切羽における空気の流れの解析に応用された例はきわめて少なく、実験値との詳細な比較検討を行ったものは皆無である。

一方、他の工学的分野ではこの手法と実験との比較や問題点の検討が数多く行われているだけでなく、今日では実験結果を補足するための重要なツールとして研究や開発に多用されている。鉱山の通気分野においても、この手法を測定が困難な掘進切羽における空気の流れや有害物質の挙動の予測に応用すれば、通気の技術的指針の確立に役立つ情報を得ることができるものと考えられる。例えば、この手法をメタンガスの濃度分布の解析に用いれば、濃度と風速の両方の分布データを得ることができるため、それらの関係を詳細に検討することができる。

このような意味から、掘進切羽における空気の流れやガスの流動等の検討に用いる有力な手段として数値流体力学プログラムを開発した。本章では、まずこのプログラムの内容について述べ、次いで前章に示した実験結果等との対比を行い、精度を検討する。最後にこの手法を用いて噴流の減衰特性を調べた。

3・2 解析方法

3・2・1 支配方程式

切羽空間の大部分は乱流場となるため、数値解析を行うためには、Navier-Stokes方程式（以下N.S.方程式と略す）と乱流モデルを用いる必要がある。乱流モデルには、現在まで1方程式モデルや2方程式モデル、応力方程式モデル、応力代数式モデル、LES (Large Eddy Simulation) と数多

くのモデルが提案されている。これらのモデルの中で、レイノルズ応力を2個の変動の特性量に関する微分方程式を解くことによって求める2方程式モデルは、比較的広い問題に適用され、良い結果を与えている。また、この2方程式モデルの中で、LaunderとSpalding¹⁾によって提案された、乱れのエネルギー k とその散逸率 ε を用いてレイノルズ応力を評価する、いわゆる $k-\varepsilon$ モデルがよく用いられている。そこで、本研究でも、この $k-\varepsilon$ モデルにより解析を行うこととする。

本解析に用いる基礎式は、式(3.1)に示す連続の式と、式(3.2)に示すN.S.方程式および $k-\varepsilon$ の輸送方程式である。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}\phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\phi) + S \quad (3.2)$$

ここに t :時間(s), \mathbf{u} :速度ベクトル(m/s), ρ :空気の密度(kg/m³)であり、式(3.2)の ϕ とそれぞれの ϕ に対する Γ と S は表3・1に示すとおりである。表3・1において、 u : x 軸方向の速度(m/s), v : y 軸方向の速度(m/s), w : z 軸方向の速度(m/s), μ :分子粘性係数(Pa・s), μ_t :循環粘性係数(Pa・s), P :圧力(Pa), k :乱流エネルギー(m²/s²), ε :エネルギー散逸率(m²/s³), G_k (Pa/s):散逸関数であり、 μ_t と G_k はそれぞれ式(3.3), 式(3.4)で表すことができる。式中の定数である C_D , σ_k , σ_ε , C_1 , C_2 は表3・2に示すLaunderら¹⁾の値を用いる。

表3・1 それぞれの ϕ に対する Γ と S

ϕ	Γ	S
u	$\mu_t + \mu$	$-\frac{\partial P}{\partial x}$
v	$\mu_t + \mu$	$-\frac{\partial P}{\partial y}$
w	$\mu_t + \mu$	$-\frac{\partial P}{\partial z}$
k	$\mu_t + \frac{\mu_t}{\sigma_k}$	$G_k - \rho\varepsilon$
ε	$\mu_t + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}$	$C_1 G_k \frac{\varepsilon}{k} - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$

表3・2 それぞれの方程式に対する定数

σ_k	σ_ε	C_D	C_1	C_2
1.0	1.3	0.09	1.44	1.92

$$\mu_t = C_D \rho k^2 / \varepsilon \quad (3.3)$$

$$G_k = \mu_t \left[2 \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right\} + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right] \quad (3.4)$$

3・2・2 境界条件

次式の壁面から第1点目の速度 U は、香月らの方法²⁾にならってニュートン法を使って求める。

$$\frac{U}{u_\tau} = \frac{1}{\kappa} \ln(y^+ E) \quad (3.5)$$

ここに、 $y^+ = yu_\tau/\nu$, $u_\tau = \sqrt{\tau_w/\rho}$, y : 壁面に隣接するセルの計算格子点, u_τ : 摩擦速度 (m/s), τ_w : 壁面せん断応力 ($\text{kg/m}\cdot\text{s}^2$), $E=9.7$, $\kappa = 0.42$ である。

壁面上の乱流エネルギー k とその散逸率 ε はLaunderら¹⁾によれば、それぞれ式 (3.6)、式 (3.7) から求められる。

$$k = \frac{u_\tau^2}{\sqrt{C_\mu}} \quad (3.6)$$

$$\varepsilon = \frac{u_\tau^3}{\kappa y} \quad (3.7)$$

噴流の吹き出口における乱流エネルギー k とその散逸率 ε の値は流れが、 k の生成・散逸に関して等方的であると仮定し、Launder¹⁾らにならってそれぞれ式 (3.8) と式 (3.9) より定める。

$$k_{in} = 0.005u_{in}^2 \quad (3.8)$$

$$\varepsilon_{in} = C_D \cdot \frac{k_{in}^{3/2}}{0.03R} \quad (3.9)$$

ここに、 u_{in} : 吹き出し口の噴出速度 (m/s), C_D : 0.09, R : 噴流吹き出し口の半径 (m) である。

3・2・3 壁面噴流の計算精度の検証

計算の精度を調べるため、Rajaratnamらにより報告されている無限平板上の円形噴流の実験結果³⁾と本研究で用いた計算方法による計算結果を比較する。

計算のモデルは図3・1に示すようであり、10m/sの速度一様の噴流が吹き出す直径0.5mの風管を、高さ6m、長さ20mの一端の底面に設置し、幅 B を6mと3mの2種類に変えて壁面噴流の計算を行う。図3・2は、計算領域の幅 B を3mおよび6mに設定した場合の、吹き出し口から5.7mにおける風管側の壁面に垂直な速度分布図である。縦軸は、噴流軸を通り風管から x 離れた断面に

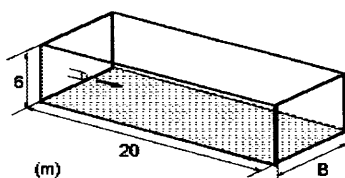


図3・1 計算精度の検証モデル

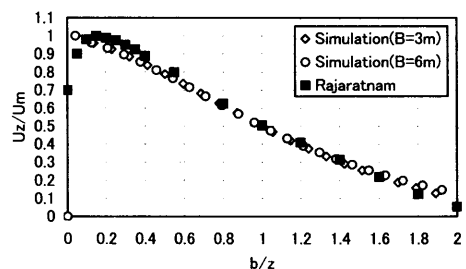


図3・2 噴流の軸方向速度と壁面からの距離の関係

おける速度 U_z をその断面の最大速度 U_m で除した無次元速度を表しており、横軸は、壁面からの距離 z を、速度が $U_m/2$ となる点の壁面からの距離 b で除したものである。

まず、幅 B が3mと6mの場合の U_z/U_m の値を見ると、両者はよく一致している。また、これらの値はRajaratnumの値とも、 $b/z < 0.4$ 以外でよく一致していることがわかる。これらのことから、 $B = 3\text{m}$, 6m に対する値は、無限平板の場合と同様に扱うことができ、かつその精度は十分であると判断される^{4) 5)}。

3・3 数値解析と実験との比較および考察

3・3・1 解析条件

掘進切羽における流れの数値解析の精度を検証するため、第2章で得られた実験結果と比較し検討を行う⁶⁾。解析条件を表3・3に、本解析モデルと計算領域の分割図の一例をそれぞれ図3・3および図3・4に示す。また本解析では、噴流の吹き出し口における速度分布は1/7乗則で与えられるものと仮定する⁷⁾。吹き出し口の各セルの位置と風速の関係をそれぞれ図3・5と

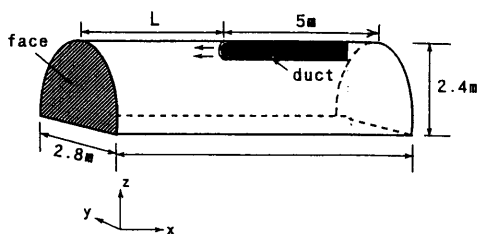


図3・3 計算モデル

表3・3 解析条件

解析番号	風管設置位置
1	L= 5m, 天井中央, H=0m
2	L= 7m, 天井中央, H=0m
3	L=10m, 天井中央, H=0m
4	L= 7m, 天井中央, H=0.3m
5	L= 7m, 天井隅

L: 風管吹き出し口と切羽面の間隔
H: 天井と風管との間隔

表3・4 風管吹き出し口における各セルの設定速度

セル番号	各セルの吹き出し速度 (m/s)
1	6.426
2	5.931
3	4.857
4	6.149
5	5.483
6	5.716
7	4.281
8	4.857

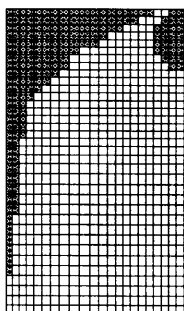


図3・4 計算領域の分割(y-z断面)

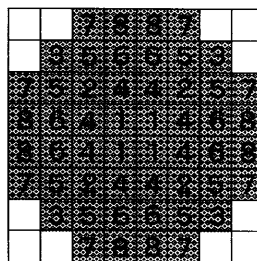


図3・5 1/7乗則に基づく吹き出し速度の設定

表3・4に示す。なお1/7乗則を解析的に積分して求められる単位時間当たりの吹き出し量の合計と、各セルに離散化した速度の吹き出し量の合計との間には若干の差があるため、前者の吹き出し量の合計に合致するように、両者の吹き出し量の合計の差を各セルに均等に分配して修正する。

3・3・2 解析結果と実験結果との比較

風管が天井の中央部にあり、風管距離が $L = 5\text{ m}$ の場合の実験結果と解析結果を図3・6に示す。坑道中央鉛直断面の数値解析結果(a)図と実験結果を示す図2・3(a)の比較から、実験結果の方が全体的に速度は小さいが、切羽面に向かう流れと戻りの流れの境界や循環の中心位置は良く一致していることがわかる。実験結果の方が速度が小さい理由としては、吹き出し口から吹き出す噴流の乱れが関係しているものと考えられる。すなわち、ファンの吹き出し側に整流板を取り付けていないことから生じる大きな乱れ成分を伴った噴流と、その周囲の流体のとの運動量の交換が活発となり、噴流が減衰しやすいことが考えられる。

実験で得られた切羽面に平行な断面における坑道軸方向の等速度線図を図3・6(b)に、数値解析より得られた等速度線図を図(c)に示す。図中の白色、灰色の領域はそれぞれ切羽面に向かう流れと切羽面から戻ってくる流れが占める領域を示す。切羽面から1 mの断面($x = 1\text{ m}$)では、両図ともに中心部分を除き、床面付近に戻りの流れの最大値が現れていることなど、全体的により一致が見られる。また、灰色の戻りの流れの領域が凸の形状を示す $x = 2\text{ m}$ の断面においても、数値解析は良く再現していることがわかる。しかし、 $x = 4\text{ m}$ の断面では、両者の間で戻りの流れ

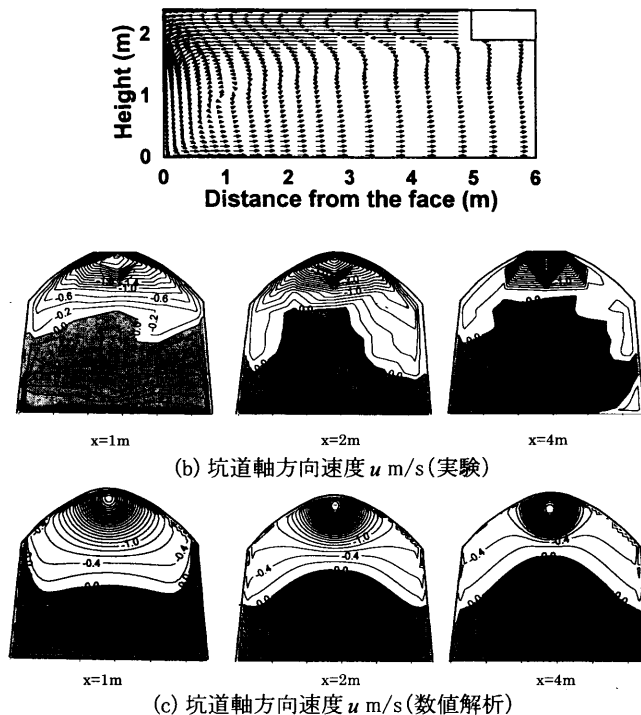


図3・6 実験値と解析値との比較 (条件1: $L = 5\text{ m}$, 天井中央, $H = 0\text{ m}$)

の分布に違いが見られる。この理由としては、この断面が風管に近く、循環に流れが取り込まれる影響により流れが複雑になり、他の断面に比べ計算や測定の精度が低下するためであると考えられる。

風管が天井中央にあり、風管距離が7mの場合の実験結果と数値解析の結果を図3・7に示す。図3・7(a)に示す坑道の中央鉛直断面上の速度ベクトル図と図2・3(b)に示す実験結果の比較から、数値解析の方が速度は全体的に大きいのが、 $L=5\text{m}$ の場合と同様、流れのパターンがよく一致していることがわかる。 $x=1\text{m}$ の断面における坑道軸方向の速度成分を比較すると、数値解析の方が全体的にやや速度が大きいのが、戻りの流れの領域が凹型でその両端が側壁の上部まで達している点が一致している。この断面から2m離れた $x=3\text{m}$ の断面では、戻りの流れの領域が中央部で盛り上がっていることから、 $L=5\text{m}$ の場合と同様、戻りの流れは坑道中央に向かいつつ側壁下部から上昇に転じていると考えられる。しかし、風管の吹き出し口に近い $x=5\text{m}$ の断面では、前述のように流れが複雑であるため戻りの流れの分布に違いが見られる。

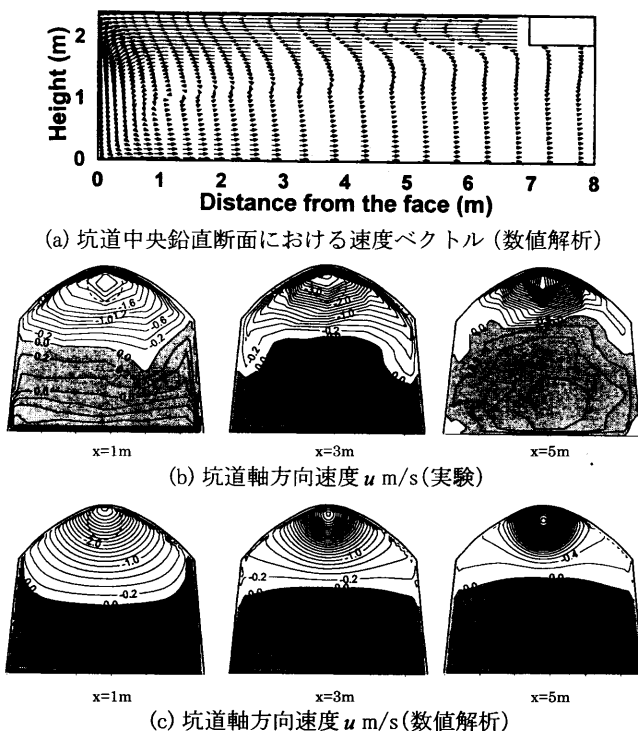


図3・7 実験値と解析値との比較 (条件2: $L=7\text{m}$, 天井中央, $H=0\text{m}$)

図3・8に示す風管距離 $L=10\text{m}$ の場合も、坑道の中央鉛直断面の流れの速度ベクトルを示す図3・8(a)と図2・3(c)の実験結果を比較すると、数値解析の方が全体的に速度は大きいのが、流れのパターンはよく一致していることがわかる。切羽面に平行な断面の等速度線の分布についても、切羽面から1m離れた $x=1\text{m}$ の断面において、実験と数値解析ともに灰色の戻りの流れの領域が凹型であることや、戻りの流れの最大値が床面の両隅に現れているなど、よい一致が見られる。しかし、風管の吹き出し口に近い $x=8\text{m}$ の断面を比較すると、実験では戻りの流れの最大値は坑道中央付近に現れているが、数値解析では床面の両端に現れているなどの違いが見られ

る。これは前述のように風管の吹き出し口の近くでは循環により生じた流れの影響により流れが複雑になり、計算や測定の精度が低下するためであると考えられる。

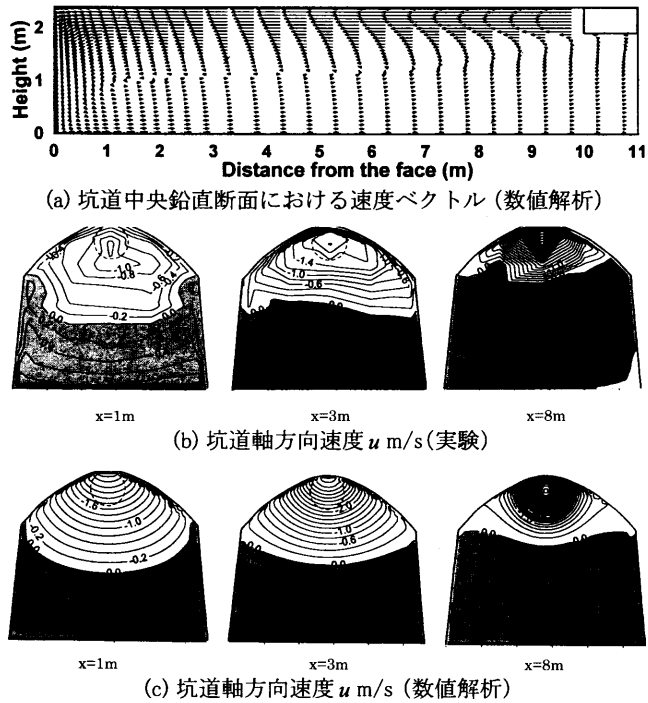


図3・8 実験値と解析値との比較 (条件3 : $L = 10\text{m}$, 天井中央, $H = 0\text{m}$)

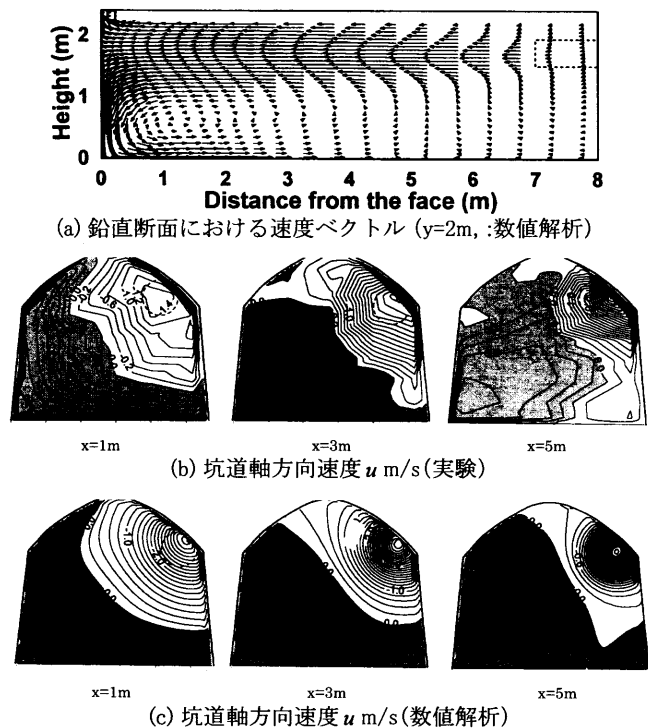


図3・9 実験値と解析値との比較 (条件5 : $L = 7\text{m}$, 天井隅)

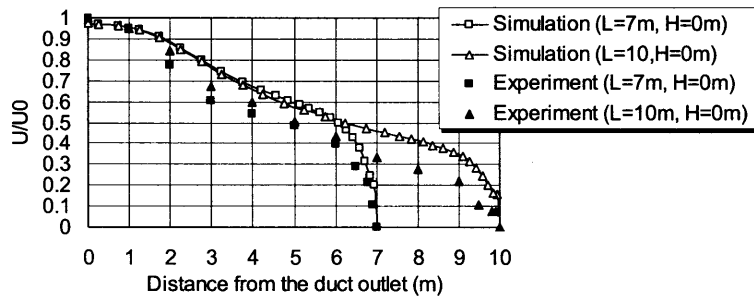
風管距離が7mで、風管が天井の隅にある場合の実験結果と数値解析の結果を図3・9に示す。図3・9(a)は風管が設置されていない側の壁から2m離れた、風管に接する断面の速度ベクトル図である。同じ断面の実験結果である図2・6(b)と比較しても全体的に速度は大きいのが、流れの傾向は一致している。図3・9(b)と(c)に示す $x = 1\text{m}$ と 3m の断面では、切羽面に向かう流れと戻りの流れの境界の位置や、戻りの流れの最大速度の位置が良く一致していることがわかる。 $x = 5\text{m}$ の断面では、前述のように風管付近で流れが複雑になるため、数値解析の結果と実験結果の間で戻りの流れの分布にやや違いが見られる。しかし風管が天井の中央に設置されている場合に比べて、実験結果に近い。

このように、風管の位置にかかわらず、切羽面に近いほど数値解析と実験値は一致する。しかし、風管付近では、循環に流れが取り込まれる影響により流れが複雑になるため両結果に違いが見られる。

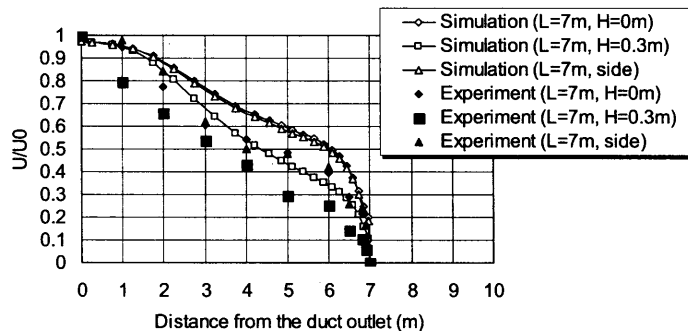
3・3・3 掘進切羽における噴流の減衰特性

風管を用いた局部通気の重要な役割の一つとして、ガスや粉じんを制御することがある。通気が多い場合にはメタンガスが拡散されるが、粉じんが空气中に舞いやすくなるなどの相反する状況を作りだしてしまうため、これらを効果的に制御するためには噴流の減衰特性を把握しておく必要がある。そこで、噴流の減衰の程度について、実験結果と数値解析結果を比較し、数値解析がどの程度この減衰を予測できるかを調べた。

最初に、風管の吹き出し口と切羽面の間隔が噴流の減衰に与える影響を調べるため、噴流軸上



(a) 風管距離(L)の違いによる影響



(b) 風管と天井の間隔(H)の違いによる影響

図3・10 風管軸上の絶対速度と風管吹き出し口からの距離の関係

における噴流の絶対速度の分布を図3・10(a)に示した。縦軸は風管の中心軸の速度を吹き出し口の最大速度で除した無次元の速度を、横軸は風管の吹き出し口からの距離を表す。両者に共通している点は風管の吹き出し口付近と切羽面近くを除いて数値解析の方が大きい、減衰の程度がよく似ていることである。風管距離が7mの場合には、風管距離が10mに比べて、実験と数値解析の差が大きい、これは噴流の切羽面の衝突による乱れを伴う反転が強いためであると考えられる。

また、図3・10(b)に示す、風管距離を7m一定とし、風管を天井、風管を天井の中央、天井の隅、天井の中央から0.3m離れた場合の結果からも、数値解析と実験値の減衰の程度がよく似ていることがわかる。

これらの比較から、基本的な流れを把握するためには、十分な示唆を与えられるものと考えられる。

3・4 結 言

本章では、本章以降で風速測定やメタンガスの濃度測定の結果を補足するために開発した数値流体力学プログラムの精度を検証するために、第2章で検討した掘進切羽の基本的な空気の流れの実験結果と、開発した数値流体力学プログラムの解析結果の比較と検討を行った。その結果、風管に近い領域の戻りの流れを除いて、基本的な流れの構造が一致することが確認できた。以下に示す実験結果と異なる点を考慮すれば、本解析法による結果を通気の技術的指針の確立に利用できると思われる。

- (1) 坑道の横から見た鉛直断面上の速度ベクトル図を比較すると、全体的に流れのパターンは一致しているが、数値解析の方がやや大きい。実験側の原因としては、凹凸の多い風管から吹き出す噴流が大きく乱れているため、噴流とその周囲との間で生じる運動量の交換が比較的大きくなり、噴流が早く減衰することが考えられる。数値解析側の原因としては、乱流モデルの定数が適切でないため、乱流成分が正しく計算されていないことが考えられる。
- (2) 切羽面に平行な断面における坑道軸方向の等速度線図を比較すると、切羽面に近い領域では実験値と数値解析は良く一致するが、切羽面から離れるにしたがって、一致しなくなる。これは風管に近づくにつれて、循環に流れが取り込まれる影響により流れが複雑になり、他の断面に比べて計算や測定の精度が低下するためであると考えられる。
- (3) 噴流の中心軸上の減衰曲線を比較すると、風管の吹き出し口付近と切羽面近くを除いて数値解析の方が大きい、減衰の程度がよく似ている。したがって、基本的な流れを把握するためには、十分な示唆を与えられるものと考えられる。

第4章 実際の掘進切羽におけるメタンガスの濃度分布

4・1 緒言

筆者は室内実験の結果を検討し、基本的な濃度分布およびメタンガスの滲出量と通気量の違いが濃度分布に与える影響を明らかにした。実際の現場の濃度分布も基本的には室内実験のものとおおよそ一致するものと考えられるが、壁面の凹凸や機械類が存在することや室内実験のようにメタンガスが必ずしも切羽面のみから滲出するとは限らないなどの理由から、実際の現場の濃度分布は細部において室内実験のものと異なることが予想される。

したがって、通気の技術的指針を得るためには室内実験だけでなく、実際の現場の濃度分布をも把握しておく必要があると思われる。そこで本章ではまず、実際の炭鉱の掘進切羽におけるメタンガスの濃度を高精度のガス検出器を用いて測定した結果について検討し、その基本的な濃度分布を明らかにする。さらに、第3章で精度の検証を行った数値流体力学プログラムを用いて検討を加え、メタンガスの濃度分布に密接な関係がある通気の流れのパターンとメタンガスの濃度分布の関係を明らかにする。

4・2 実測方法

測定を行った掘進切羽は、三池炭鉱420m本層西20卸関係4箇所、池島炭鉱第2南東6号払関係2箇所、いずれも沿層坑道であり、ロードヘッダにより掘進中である¹⁾。各箇所名と測定時の状況を表4・1に、風管出口（入気）風量およびそのメタンガス濃度の実測値を表4・2に示す。この中で三池4の入気メタン濃度が他の三池3箇所に比べて高いが、これは三池3の排気を入気としているためであると考えられる。

掘進現場内の測定位置や測点数は、測定時の現場状況と第5章で述べた模型実験や前述の解析の結果を基に、図4・1に示す位置を基本とした。つまり、①風管出口と切羽面間の3、4断面で各断面につき15～25点、②風管出口後方10m及び20m程度の断面内の15～25点、③風管出口付近

表4・1 実測掘進切羽箇所及びその状況

実測掘進切羽 略称	箇所名	有効断面積 (規格) m ²	掘進作業の状況
三池1	連卸	15.0	作業一時中止中(3日間)
三池2	東排気道	12.7	作業中(枠付、ボルトセットのためRH停止)
三池3	切替坑道	12.7	作業中(枠付、ボルトセットのためRH停止、一時運転)
三池4	東2昇排気道	12.7	作業一時中止中(1週間)
池島1	払ゲート	12.4	作業一時中止中(2日間)
池島2	払座	13.6	作業中(枠付、風管延長のためRH停止、一時運転)

註) 三井1～三池4；三池炭鉱420m本層西20卸関係
池島1・池島2；池島炭鉱第二南東6号払関係
RH；ロードヘッダ、三池4の入気は三池3の排気

表4・2 通気風量、メタン滲出量等

切羽 略称	風管出口の		切羽出口の	
	風量 m ³ /s,	メタン濃度%	メタン濃度%	メタン滲出量 m ³ /s
三池1	3.5	0.02	0.09	0.003
三池2	3.7	0.02	0.10	0.003
三池3	5.5	0.02	0.12	0.006
三池4	4.4	0.08	0.14	0.003
池島1	3.8	0.10	0.41	0.012
池島2	4.2	0.13	0.43	0.013

の風管周囲近傍、である。なお、ロードヘッダ稼働中はその作業範囲には立ち入れないので②の測定のみを行った。

測定に用いた計器は、自動吸引式本質安全防爆構造可燃性ガス検知器 XP-311型及び XP-316型（新コスモス電器製）のメタン仕様である。前者の最大計測濃度は5%、精度は0.05%、後者のそれは各々1%、0.025%であり、吸引量はいずれも $5 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{s}$ である。測定に当たっては少なくとも30秒以上吸引して読みとった。

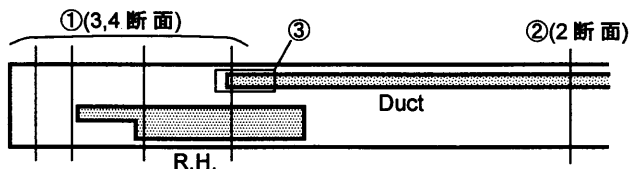


図4・1 基本的な測定断面位置

4・3 解析方法

流れ場を求めるために必要な基礎式は、すでに第3章で述べたように連続の式とN.S.方程式、乱流エネルギー k とその散逸率 ϵ の輸送方程式である。メタンガスの質量分率を求めるための基礎式は式(4.1)に示すように、N.S.方程式、乱流エネルギー k とその散逸率 ϵ と同じ対流・拡散方程式で表すことができる。また、空気とメタンガスの混合気体の密度およびメタンガスの体積分率は、それぞれ式(4.2)と式(4.3)で求められる。なお、乱流シュミット数と層流シュミット数は0.7に設定する。また濃度に関する境界条件については、メタンガスが滲出する切羽面を除いて、濃度勾配を0とおく。

$$\frac{\partial(\rho_{mix} C_{mas})}{\partial t} + \text{div}(\rho_{mix} u C_{mas}) = \text{div}(\Gamma \text{grad} C_{mas}) \quad (4.1)$$

$$\rho_{mix} = \left(\frac{1 - C_{mas}}{\rho_{air}} + \frac{C_{mas}}{\rho_{gas}} \right)^{-1} \quad (4.2)$$

$$C_{vol} = C_{mas} \frac{\rho_{mix}}{\rho_{gas}} \quad (4.3)$$

ここに t : 時間 (s), u : 速度ベクトル (m/s), ρ_{mix} : 計算セルの混合気体の密度 (kg/m³), ρ_{air} : 空気の密度 (kg/m³), ρ_{gas} : メタンガスの密度 (kg/m³), C_{mas} : メタンガスの質量分率 (kg/kg), C_{vol} : メタンガスの体積分率 (m³/m³)

計算モデルの坑道寸法、通気風量、滲出メタン量、風管やロードヘッダ (RH) の位置などの諸条件は、実測現場や前述の実測結果に合わせて表4・3のように設定する。また、図4・2に、

解析モデル図の例として池島1の坑道軸方向鉛直断面（x-z面）と坑道軸方向垂直断面（y-z面）を透視的に示す。なお、設定した切羽内には、メタンガスは切羽面からと風管出口（入気）からの2断面から流入するように設定した。また、風管内の流れが十分発達した乱流であると判断されるため、風管の吹き出し口には、第3章の解析と同じくように1/7乗則から得られる速度分布を与えた²⁾。

表4・3 解析に用いた流量およびメタン濃度（三池1、三池4、池島1）

切羽名	流量およびメタン濃度	引立面	風管出口
三池1	流量 (m ³ /s)	空気	0
		メタン	0.147
	メタン濃度 (-)	体積分率	1.0
		質量分率	1.0
三池4	流量 (m ³ /s)	空気	0
		メタン	0.16
	メタン濃度 (-)	体積分率	1.0
		質量分率	1.0
池島1	流量 (m ³ /s)	空気	0
		メタン	0.72
	メタン濃度 (-)	体積分率	1.0
		質量分率	1.0

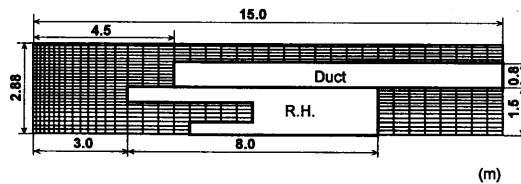


図4・2 解析モデルの例（池島1）

4・4 実測と解析の結果と考察

各切羽の基本的な測定点（図4・1の①、②の各断面の測点）におけるメタン濃度範囲や平均濃度等を表4・4に示す。なお、表中の測定断面位置や風管出口（入気）位置は切羽切羽面からの距離であり、ロードヘッダ稼働中のデータは省いている。この表に見られるように、メタン濃度は十分低く、例えば各測点における最大濃度は三池で0.16%、池島で0.65%、平均濃度は各々0.09%、0.29%である。また、各切羽におけるメタン滲出量を、切羽面から最遠位置の測定断面の平均メタン濃度と風管出口における風量およびメタン濃度から求めると、前掲表4・3に示すようである。三池では約0.2~0.3m³/min、池島では0.7~0.8m³/min程度である。

図4・3は三池1における切羽に向かっている断面上の実測と数値解析のメタンガスの濃度分布図である。直径1mの風管は坑道の左天井部に位置している。またロードヘッダの中心は、10m位置のほぼ中央にある。なお、図中の床面付近に描かれた曲線は、掘削された岩石や石炭の場所をスケッチしたものである。数値解析では、この部分についての境界条件は与えておらず、床面は滑らかであると仮定している。

表4・4 各測定断面の位置および測定断面におけるメタン濃度

切羽名：三池1 風管出口位置：引立面から6.2m						
距離 m	0.5	1.5	5	6	16	26
濃度 % 平均	0.04(29)	0.03(15)	0.03(5)	0.03(15)	0.09(12)	0.08(15)
濃度 % 範囲	0.06-0.03	0.04-0.03	0.04-0.03	0.04-0.03	0.09-0.08	0.10-0.07
切羽名：三池2 風管出口位置：引立面から6.5m						
距離 m	3	16.5	26.5			
濃度 % 平均	0.04(13)	0.10(9)	0.10(9)			
濃度 % 範囲	0.06-0.03	0.11-0.09	0.11-0.09			
切羽名：三池3 風管出口位置：引立面から4m						
距離 m	0.3	2.1	9	14		
濃度 % 平均	0.09(9)	0.09(8)	0.11(25)	0.12(5)		
濃度 % 範囲	0.10-0.08	0.09-0.07	0.13-0.09	0.13-0.11		
切羽名：三池4 風管出口位置：引立面から6.8m						
距離 m	0	1.8	4.2	6.6	16.6	21.6
濃度 % 平均	0.12(15)	0.12(15)	0.12(9)	0.12(15)	0.13(28)	0.14(29)
濃度 % 範囲	0.13-0.11	0.13-0.11	0.14-0.10	0.13-0.09	0.16-0.11	0.15-0.13
切羽名：池島1 風管出口位置：引立面から4.2m						
距離 m	0	1.05	3.15	4.2	14.7	25.2
濃度 % 平均	0.20(19)	0.20(19)	0.23(12)	0.22(19)	0.39(15)	0.41(16)
濃度 % 範囲	0.31-0.18	0.24-0.18	0.34-0.19	0.31-0.19	0.65-0.27	0.50-0.31
切羽名：池島2 風管出口位置：引立面から6.4m						
距離 m	0	3.15	6.3	11.55	16.8	27.3
濃度 % 平均	0.24(13)	0.25(15)	0.28(14)	0.30(19)	0.32(26)	0.43(26)
濃度 % 範囲	0.30-0.19	0.30-0.21	0.41-0.25	0.45-0.26	0.55-0.27	0.49-0.33

註：濃度の平均値の次の()内数値は測定点数

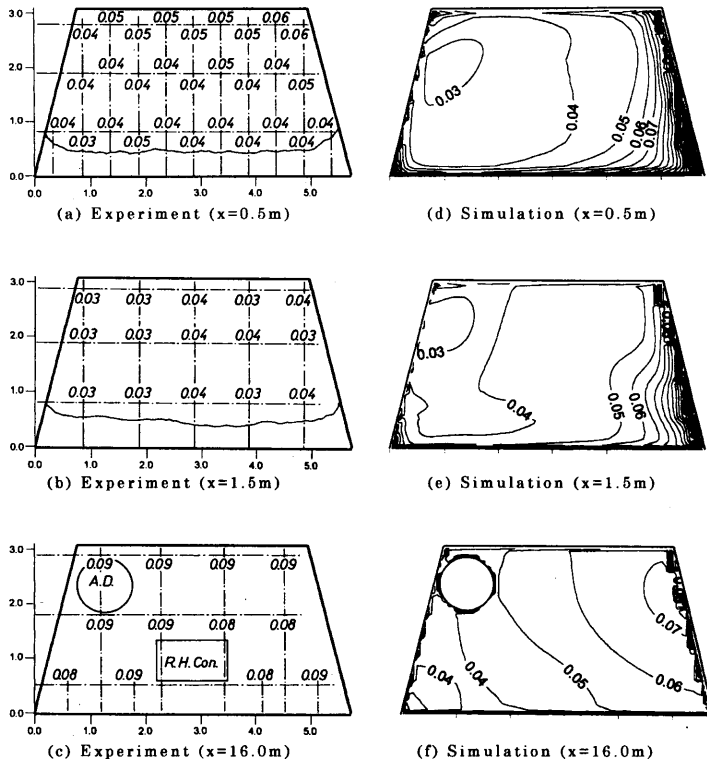


図4・3 切羽面に平行な断面のメタンガスの濃度分布(三池1)

切羽面から0.5m離れた実測の結果を図4・3(a)に示す。噴流が衝突する左半分でやや濃度が低く、流れが淀む天井の中央部から右天井部にかけてやや濃度が高い。同じ断面の解析結果の(d)図でも、噴流が衝突する左半分で濃度が低く、切羽面を洗い流した後の戻り流れが集中する右側の天井付近から床面にかけて濃度が高い、などの同じ傾向が現れている。しかし、メタンガスが切羽面のみから滲出する境界条件を与えているため、数値解析の結果の方が全体的に濃度は高い。

切羽面から1.5m離れた実測の(b)図と数値解析の図4・3(e)を比較すると、両図とも坑道の大部分において0.03~0.04%を示しており大きな違いは見られないが、実測の方が全体的に濃度は一様である。切羽面から16m離れた風管を含む断面でも実測結果には数値解析解析のような明瞭な濃度差は見られない。

三池4の実測と数値解析で得られた濃度分布図を図4・4に示す。この図の坑道右側の天井付近に直径0.7mの風管を設置している。切羽面上の濃度分布図を示す図4・4(a)と図4・4(d)を比較すると、実測と数値解析ともに風管から吹き出す噴流が衝突する坑道の右端中央部で濃度が低く、戻り流れが通り抜けると考えられる坑道左下隅でやや高い。三井1の数値解析の結果と同じく、切羽面からのみメタンガスが滲出する境界条件を設定しているため、この断面では全体的に数値解析の方が濃度は高い。

図4・4(b)と図4・4(e)図は、切羽面から6.6m離れた、風管の吹き出し口の直前の断面における実測と数値解析で得られた濃度分布図である。流れが淀む坑道左壁面付近と右床面付近で濃度が高いことや、噴流が通り抜けると考えられる右壁面の中央部で低いことなどが共通している。

図4・4(c)と図4・4(f)図は、それぞれ風管の吹き出し口から9.8m後方の断面における実測

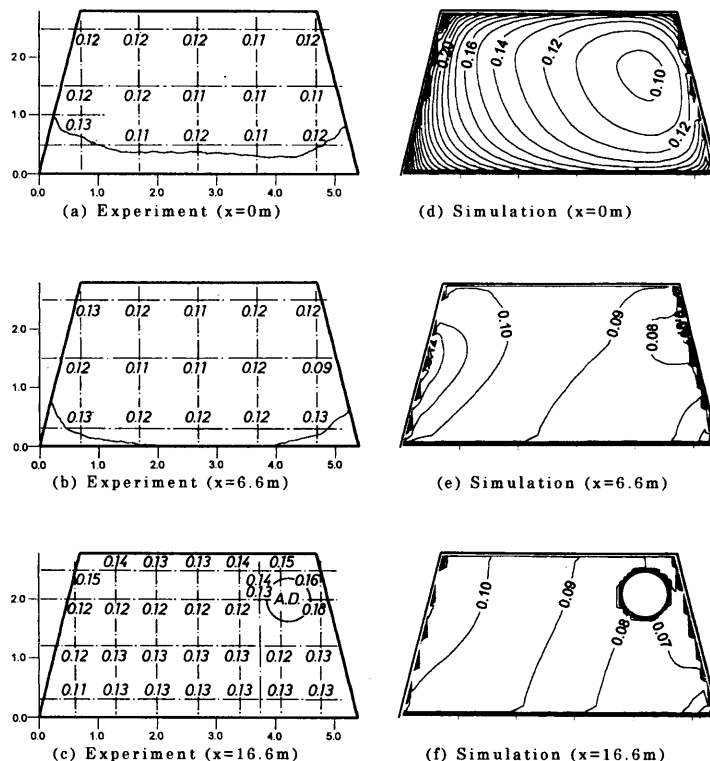


図4・4 切羽面に平行な断面のメタンガスの濃度分布(三池4)

結果と数値解析の結果である。実測では風管付近や天井付近で濃度が高いが、数値解析ではそのような傾向は見られない。これは、実測では壁面付近の成木などの影響があるため、流れが停滞しやすい状況にあるためと考えられる。

図4・5は池島1の実測と数値解析の結果を比較したものである。切羽面上の実測結果を示す図4・5(a)図では、風管から吹き出した噴流が衝突する天井のやや左側で濃度が低く、同様の傾向が数値解析結果の(b)図でも見られる。通気が淀みやすい坑道の床面と右側壁の隅では、実測と解析ともに濃度は高い。

切羽面から1.05m離れている実測の図4・5(b)と数値解析の図4・5(g)には、噴流が通り過ぎる左の側壁付近で濃度が低い。また、図の右の床面隅には、戻り流れが通り過ぎるため濃度の高い領域が現れている。

切羽面から3.15mの濃度分布図を示している実測結果の図(c)及び数値解析の結果の図(h)はともに戻り流れが存在する左右の床面付近で濃度が高く、逆に天井付近では比較的低いことがわかる。このように床面の濃度が高くなる分布は、メタンガスの滲出量に比べ通気量が十分多い場合の室内実験の結果を示す図5・3に似ている。

図4・5(d)と図4・5(i)は、それぞれ切羽面から4.2m離れた、風管の吹き出し口を含む断面の実験と数値解析から得られた濃度分布図である。実験、数値解析ともに、天井右隅の風管の吹き出し口と壁面の間では、流れが複雑で遅いため、比較的濃度が高い。また、床面の両隅でも濃度が高いが、これは同じ断面の速度を示す図4・6(a)の戻り流れが大きい領域と一致する。

切羽面から14.7m離れた断面の実験と数値解析から得られた濃度分布図をそれぞれ図4・5(e)と図4・5(j)に示す。風管の吹き出し口から10.2mの位置にあるこの断面では、メタンガスの浮力による上向きの流れが卓越するため、実験、数値解析ともに、天井付近の濃度が高い。図4・6(b)の速度分布図に示す戻り流れが大きい天井の右隅で、濃度が最も高い。

図4・7は三池1の坑道中央鉛直断面上のメタンガス濃度分布図である。実測結果の(a)図は切羽面から26m、数値解析結果の(b)図は15mまでの分布を示している。実測では、切羽面の近傍で0.04%の濃度を示し、切羽面から16mの位置では天井付近で約2倍の0.09%の濃度を示している。数値解析でも実測と同様の分布を示しているが、ロードヘッダの後方では、実測に比べて濃度は低い。

図4・8に池島1の坑道中央鉛直断面上のメタンガス濃度分布図を示す。実測結果の(a)図は切羽面から26m、数値解析結果の(b)図は15mまでの分布を示している。池島1でも、三池1と同様の分布を示しているが比較的濃度差が明確である。実測、数値解析ともに、通気によるメタンガスの希釈が行われている切羽面付近では濃度は低い。ロードヘッダよりも後方では、戻り流れが低下し、メタンガスの浮力による流れが増加するため、濃度は高い。

以上のように、実測の結果と数値解析の結果を比較したが、解析結果と実測の濃度のオーダーはほぼ同じで、特にメタンガス湧出量の多い池島1では、両結果が良く一致することがわかった。

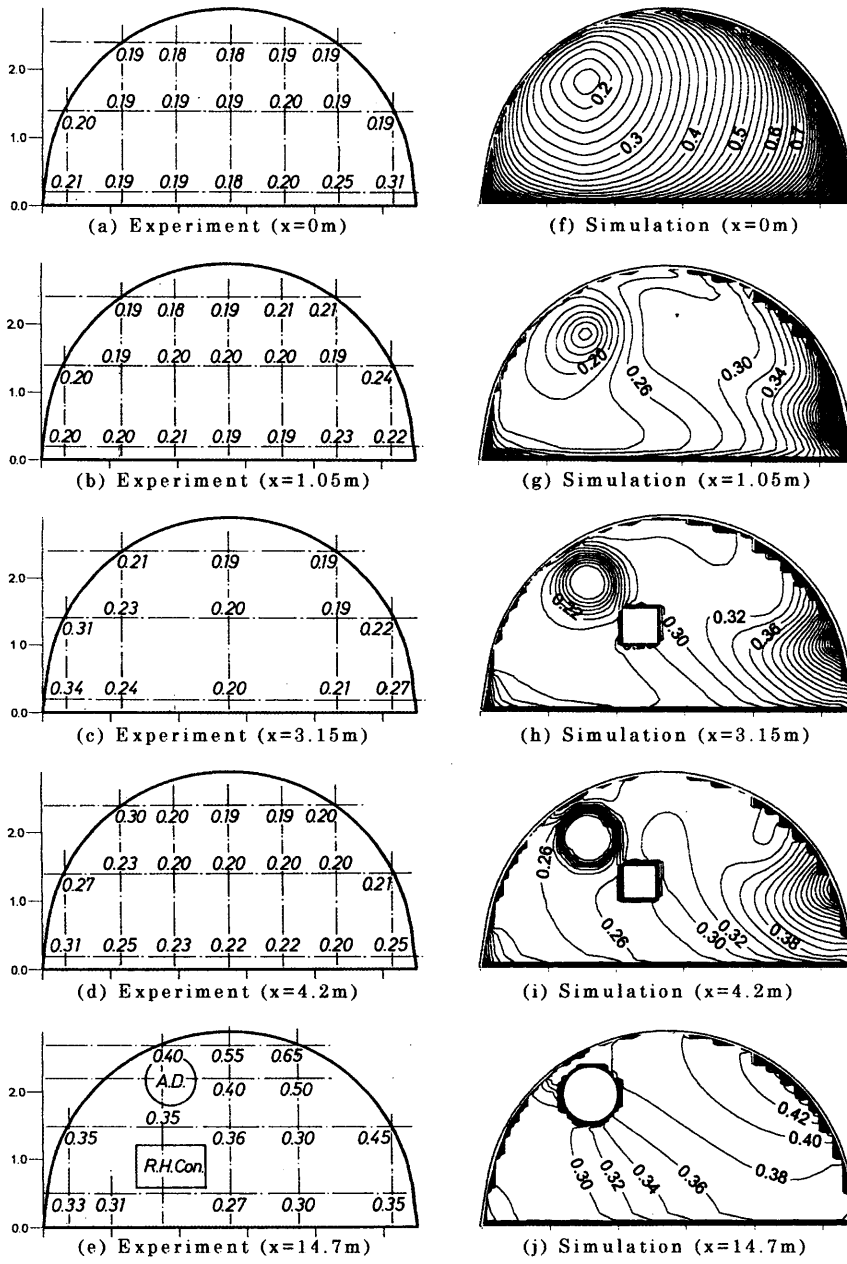


図4・5 切羽面に平行な断面のメタンガス濃度分布 (池島1)

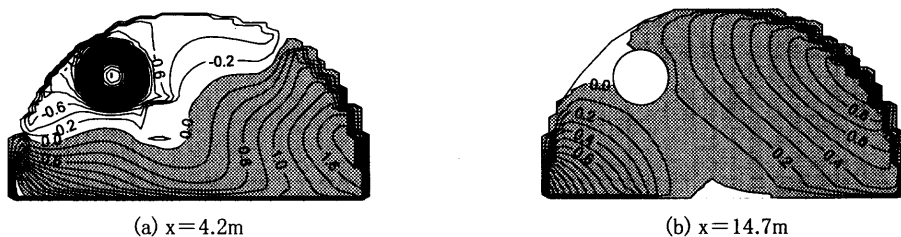
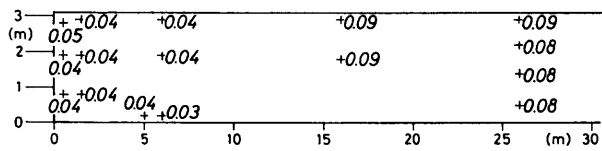
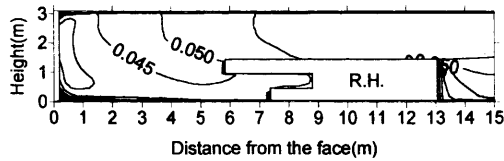


図4・6 切羽面に平行な断面における坑道の軸方向速度 u m/s

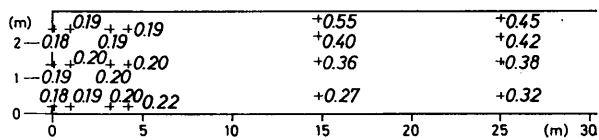


(a) Measuring

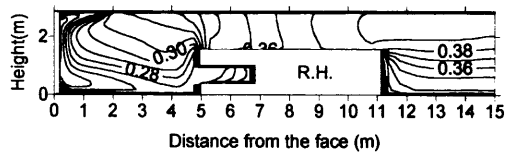


(b) Simulation

図4・7 坑道中央鉛直断面のメタンガス濃度分布(三池1)



(a) Measuring



(b) Simulation

図4・8 坑道中央鉛直断面のメタンガス濃度分布(池島1)

4・5 結 言

本章では、実際の掘進切羽におけるメタンガスの濃度分布を明らかにするためにおこなった、メタンガスの濃度の測定結果とさらに検討を加えるために行った数値解析の結果について検討した。その結果、基本的な濃度分布、および濃度分布と空気の流れのパターンとの関係が明らかとなり、いくつかの技術的指針が得られた。本章を要約すると以下ようになる。

- 1) 現場におけるメタンガスの測定結果と、数値流体力学解析プログラムを用いたメタンガスの濃度の解析結果の比較から、メタンガスが切羽面からのみ滲出する条件を与えているため数値解析の方が濃度の高低差が大きいが、実用上十分と考えられる一致が見られ、このシミュレーション手法の有効性が確認された。特に、メタンガスの滲出量大きいほど、数値解析と実測値はよく一致する。
- 2) 切羽面と風管に挟まれた領域では、床面と左右の側壁付近、特に風管が設置されていない側の壁面と床面の隅に濃度の高い領域が現れる。これらの領域は、切羽面を洗い流した後の戻りの流れが通り過ぎる領域と一致する。メタンガスを効果的に排除するためには、このよう

な領域に機械類を設置しないか、あるいは設置する場合でも、流れの妨げにならないように設置する必要がある。

- 3) 風管の吹き出し口より後方では、戻りの流れの低下とメタンガスの浮力による流れの増加により、メタンガスが天井付近に集まるため濃度が高くなる。現場で経験的に知られているように、風管と天井に挟まれた領域でも、戻りの流れがきわめて遅いため濃度は高い。したがって現場では、常にこのような領域の濃度を監視する必要がある。また、メタンガスの停滞を防ぐために、補助の風管を取り付けて新鮮な空気を送る必要もあると思われる。

第5章 総 括

本論文は、通気の技術的指針を得るために、掘進切羽で発生するガスや粉じんを希釈・排除する主要な手段の一つである吹き出し通気による流れ場の特性を室内実験と現場計測により調べ、風管の位置および風管吹き出し風量の違いが空気の流速分布やガス拡散に及ぼす影響を明らかにした。掘進切羽の速度分布は複雑であり、影響を与える因子も多く、またその影響も複雑であり、これを実験のみによって解明するには困難であるので、数値流体力学的手法も加えてこれを検討した。

本研究で得られた主要な結論を要約すれば以下のとおりである。

第1章の序論では、吹き出し通気を行う掘進切羽における流れ場と風管から吹き出す噴流の到達距離に関する過去の研究を展望し、掘進切羽における基本的な流れの構造や、通気条件の違いが流れに及ぼす影響に関する系統的な研究が現在までほとんど行われていないことを指摘した。さらに、風管の設置要件を規定している鉱山保安規則の不備な箇所を述べて、本研究の必要性を明らかにし、本論文の背景および目的を述べた。

第2章では、吹き出し通気を行う掘進切羽の基本的な流れの構造と、風管と切羽面の間隔や風管と天井の間隔の違いが流れに及ぼす影響を明らかにするために行った室内実験と現場実測の結果を検討した。その結果、ガスを掘進切羽から効果的に排除するためには、循環と戻り流れの大きさのバランスを考慮した上で風管を設置すべきであること、さらにメタンガスなどの空気よりも軽いガスが発生する場合に、風管を天井の隅に設置すれば、天井付近の再循環の流れによりメタンガスが天井付近に停滞する可能性のあることなどを示した。

第3章では、本章以降において実験結果を更に検討するために用いた数値流体解析プログラムの精度を確認するために、第2章で行った実験のデータとの比較と検討を行った。その結果、数値解析の方が全体的に速度ベクトルがやや大きいものの、両者には実用上十分と考えられる一致が見られ、k-ε乱流モデルとSIMPLE法を組み合わせた本数値解析法による有用性が確認された。風管距離が長い場合ほど、また風管が天井中央よりも天井隅にある場合に、またどの場合でも切羽

面に近い領域ほど実験値に良く一致することを明らかにした。

第4章では、実際の掘進切羽におけるメタンガスの濃度分布を明らかにするために行った現場計測と、更に検討を加えるために行った数値解析の結果について検討した。その結果、切羽面と風管に挟まれた領域では、床面と左右の側壁付近、特に風管が設置されていない側の壁面と床面の隅に現れる濃度の高い領域が、戻りの流れが通り過ぎる領域と一致することが明らかとなった。現場では、このような領域に機械類を設置しないか、あるいは設置する場合でも、流れの妨げにならないように設置する必要がある。また、現場でも経験的に知られているように、風管の上部においても、戻りの流れがきわめて遅いため濃度は高いことが確認できた。

参考文献

第2章

- 1) 中山伸介・内野健一・井上雅弘：掘進切羽における3次元風速測定とCFDの適用－局部通気を行う作業箇所における環境条件の解析(第2報)－, 資源と素材, Vol. 112, No. 9, p. 638-644, (1996)
- 2) Wesely, R. : Airflow at heading faces with forcing auxiliary ventilation, 3rd International mine ventilation congress, England, p. 73-82, (1984)
- 3) 鈴木俊夫・関健一・高木英夫・東猛：局部通気に関する実験的考察(1), 採鉱と保安, Vol. 9, No. 6, p. 280-290, (1963).
- 4) 高木英夫・北原良哉：局部通気に関する研究, 採鉱と保安, Vol.20, No.6, p. 281-292, (1974)

第3章

- 1) Launder, B. E. and Spalding, D. B. : The numerical computation of turbulent flows, Computer methods in applied mechanics and engineering, Vol. 3. p. 269- 289, (1974)
- 2) 香月正司・中山顕：熱流動の数値シミュレーション, p. 53, 森北出版, (1990)
- 3) Rajaratnam, N., 野村安正訳：噴流, p. 290, 森北出版, (1981)
- 4) 中山伸介・内野健一・井上雅弘：CFDによる空気の流れの解析－局部通気を行う作業箇所における環境条件の解析(第1報)－, 資源と素材, Vol. 111, No.4, p. 225-230, (1995)
- 5) Kim, B. Y., Jo, Y. D. and Nakayama, S: 3D flow simulation for optimizing environment of tunneling faces, The 1st Asian Rock Mechanics Symposium, Seoul, p. 49-54, (1997)
- 6) 中山伸介・内野健一・井上雅弘：掘進切羽における3次元風速測定とCFDの適用－局部通気を行う作業箇所における環境条件の解析(第2報)－, 資源と素材, Vol. 112, No. 9, p. 638-644, (1996)
- 7) 鹿田則光・内野健一・井清武弘：ビニール風管の通気特性, 資源と素材, Vol. 105, No. 4, p. 285-290, (1989)

第4章

- 1) 一ノ瀬政友・中山伸介・内野健一・井上雅弘：掘進切羽におけるメタンガス濃度の実測とCFDによるシミュレーション, 資源と素材, Vol. 114, No.11, p. 769-775, (1998)
- 2) 鹿田則光・内野健一・井清武弘：ビニール風管の通気特性, 資源と素材, Vol. 105, No. 4, p. 285-290, (1989)