

水力採炭用ノズルに関する実験

Experiments on the Nozzle of Monitor for Hydraulic Jet Mining

内 山 恭 一* 坂 本 正 克*
Kyôichi Uchiyama Masakatsu Sakamoto

内 容 梗 概

水力採炭は水の噴流の持つ力で石炭を採掘する方法であるが、数年前ソ連などから紹介された新技術である。日立製作所においても水力採炭用高圧水噴射装置（ハイドロカッタ）の試作を行なっているが、本文においてはノズルと噴流に関して行った実験結果の概要を報告する。

1. 緒 言

ソ連で開発されてきた水力採炭技術は、わが国においても石炭産業合理化のための革新的方法としてここ2、3年来急速に実験が進められすでに著しい成果を収めつつある。

日立製作所亀有工場においては以前から石炭の水力輸送装置の開発につとめてきたが、水力採炭の分野でも石炭技術研究所明豊試験所におけるわが国最初の水力採炭の試験以来、基礎的研究を含めた総合的開発研究を進めている。

第1図に日立ハイドロカッタ HYD-4 形の外観を示す。ハイドロカッタは噴射筒、整流装置、ノズルおよび旋回装置から構成され、必要に応じて遠方操作装置を取り付けることができる。

水力採炭においては一般に圧力 $20 \sim 130 \text{ kg/cm}^2$ 、流量 $1.5 \sim 3 \text{ m}^3/\text{min}$ 程度の圧力水をノズルより噴射する。ノズル口径は $15 \sim 30 \text{ mm}$ 程度である。噴流は炭壁面に衝撃的な力を加え、同時にき裂から圧力水が炭層内部に侵入し石炭を破碎する。破碎された石炭は水によって洗い流され、トラフにより所定の位置まで輸送されたのち、水力輸送装置あるいは炭車などによって坑外に搬出される。

筆者らは水力採炭に関する研究の一環として、採炭用高圧水噴射装置（ハイドロカッタ）のノズルから噴射する噴流の全圧分布を実験的に調べ、良好なノズル形状および整流管などのノズル付属装置について検討を加えたので、ここに報告する。

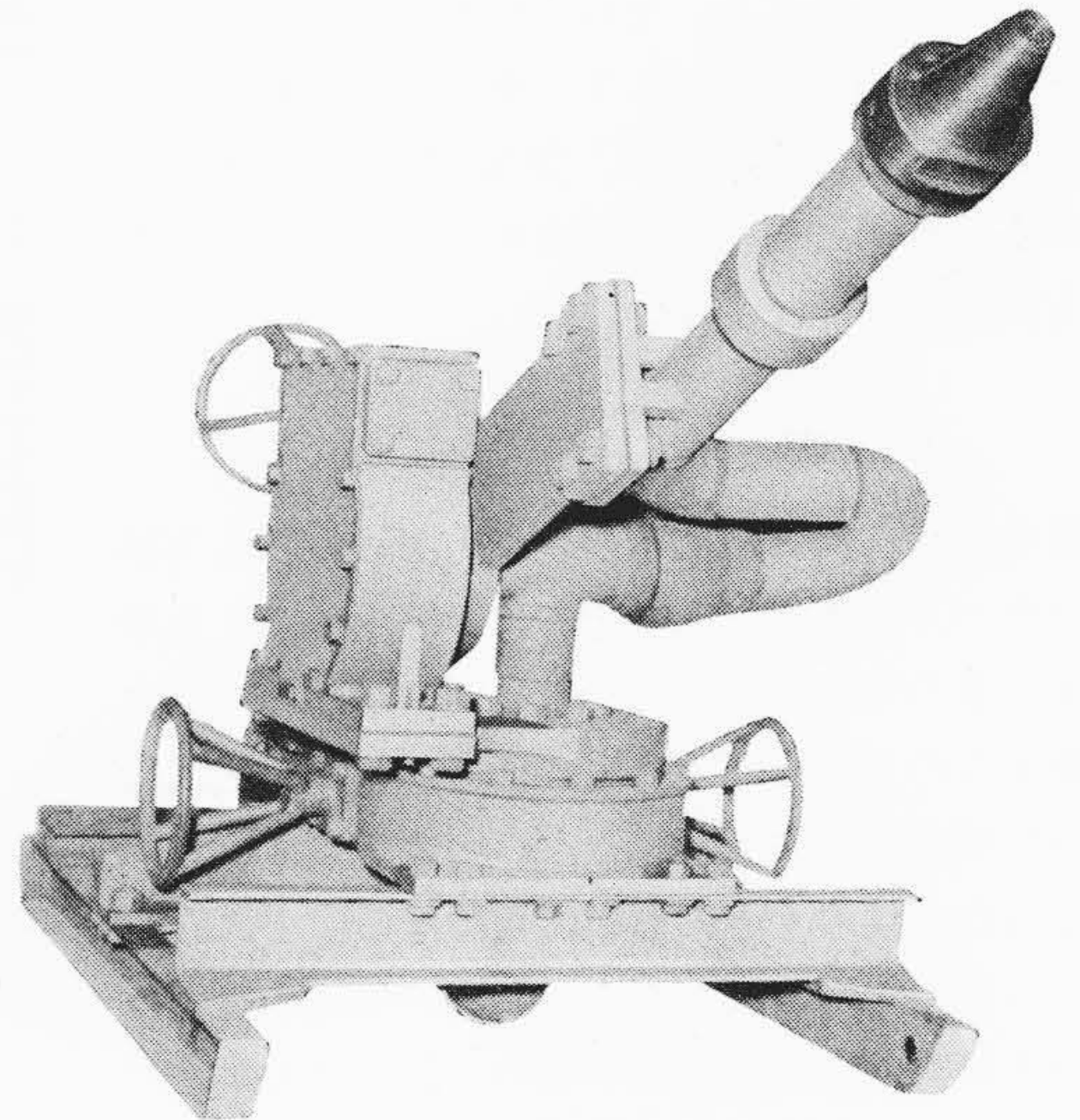
2. 噴 流 の 構 造

ハイドロカッタの設計あるいは噴流の使用にあたっては、噴流の特性を知る必要がある。噴流の基礎的特性に関する実験はあまりなく、比較的まとまったものとして資源技術試験所における研究報告⁽¹⁾があるが、本実験においてはさらに詳しく噴流の基礎的特性を調べることにした。

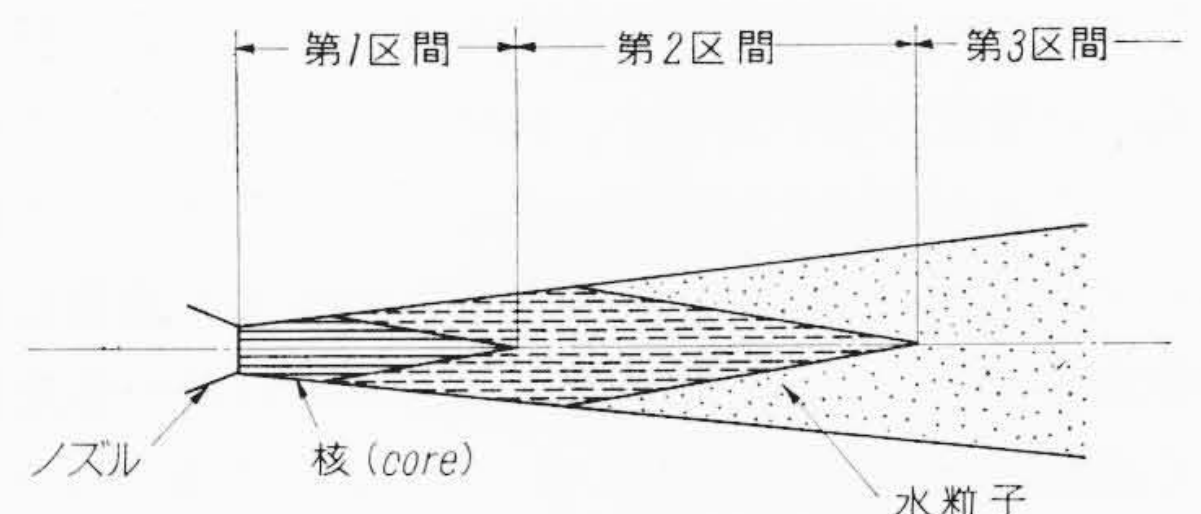
空気中に水を噴射する場合の噴流内部の構造については、内外の文献などに述べられているところであるが、本文の理解を容易にするため、ここで簡単に説明を加えることにする。

一般に噴流の構造は、噴流軸方向に沿って3段階の変化を行なうものと考えられている⁽¹⁾⁽²⁾。噴流の大部分の範囲は水と空気の混合体であるが、ノズル出口付近においては噴流中に空気の混合していない部分が存在する。この空気の混合していない水だけの部分を核 (core) と呼んでいる。核は第2図に示すように噴流軸を中心としてほぼ円すい体をなしており、そのまわりを水と空気の混合体が囲んでいる。ノズル出口から核の消滅する範囲までを第1区間と呼ぶ。

空気が噴流軸に到達し核が消滅するとともに、噴流の中心部において水と空気の混合が著しく進行する領域がある。これを第2区間と呼ぶ。この区間においては噴流中心部では空気は水中に気泡となって存在している。次に水と空気の混合が進み、噴流の全断面にわた



第1図 ハイドロカッタ



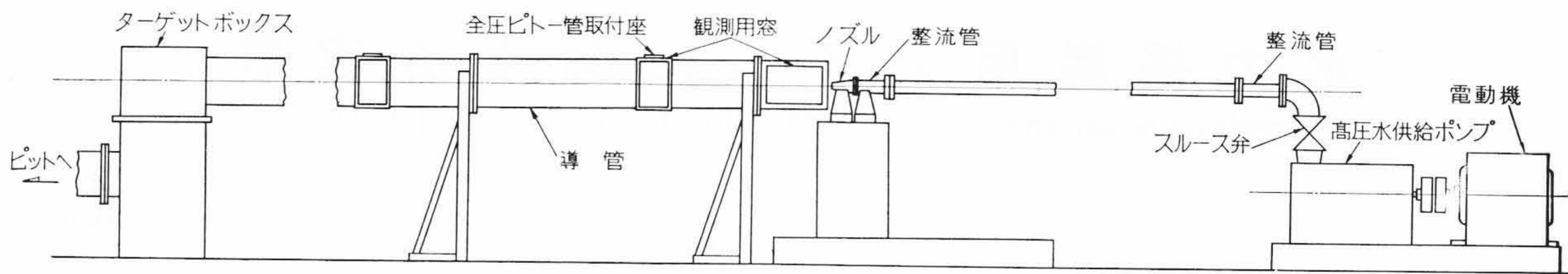
第2図 噴 流 の 構 造

って水が粒子状となって空気中を飛散している状態になる。この範囲を第3区間と呼ぶ。第2区間から第3区間への遷移点を実験的に明らかにすることは困難であるが、噴流内の水がノズルから十分に離れた位置において粒子状になることは、経験によって明らかである。水力採炭における使用範囲は第1区間、第2区間および第3区間が含まれるが、第1区間はノズルに接近し過ぎているため使用されることはあまりない。第3区間では水は粒子状となるが、中心部ではかなり動圧を持っており、十分に使用できる状態にある。

噴流による炭層の破碎機構については現在なお不明な点が多く、炭層自体の条件も変化が多いので、ある炭層を採掘する場合どのような噴流が最適であるかを断定することは一般に困難である。本実験においては文献⁽¹⁾を参考にして、噴流の有する全圧の最大値がその噴流の破碎力を示す重要な要因と考え、それに基づき噴流性能の比較を試みた。

上記の考え方は、噴流によって炭層内部まで穴をあけて石炭を切り取るような破碎機構に適するもので、噴流の拡散およびエネルギー損失は一応無視されている。しかしき裂が多くかつ柔らかい炭層の場合には、噴流の最大全圧が破碎力を左右する最大の要因とは必ずしも考えられず、噴流の拡散および全エネルギー損失を考慮に入

* 日立製作所亀有工場



第 3 図 実 験 装 置

れて噴流性能を比較しなければならない。このように噴流の破碎力を最大全圧のみによって代表せしめる考え方は、動力経済の観点からは必ずしも正しくあてはまらない場合も考えられるので、実際の適用に当たっては十分この点を考慮すべきである。なお、噴流の持っている全エネルギー量を求める方法として、全圧分布の積分により計算する方法が考えられるが、空気-水の混合体の示す全圧から水の有する真の流速を求めることは困難であり、この方法の信頼性は少ない。

3. 実 験 装 置

実験装置の概略を第 3 図に示す。水力実験室内に実験装置を設けたが、噴流を室内でそのまま噴射すると危険であり、また水の飛散防止および水の回収にかなりのスペースを要するので、直径 300 mm のパイプ（以後導管と呼ぶ）内に噴射するようにした。この結果、実際のハイドロカタとは異なった条件のもとにおいて実験することになったが、噴流をパイプでおおった影響はきん少であり、噴流の良否は大気中に噴射した場合と相対的には変わらないものと思われる。

導管には図に示すように全圧管取付座を設けた。全圧管は上下にトラバースが可能である。全圧管取付座付近には、導管内部が観察できるようにアクリル樹脂の窓を側面および上部に取り付けた。導管の出口端には噴流の勢いを弱め、同時に水の逆流を防ぐためにターゲットボックスを設けた。高圧水供給ポンプとノズルの間にはスルースバルブを設け、これによりノズル入口圧力を調整した。曲管直後には整流管を設け、その整流管とノズル入口前の整流管との間を直管にて連結した。実験に使用したノズルは 7 種類であり、その出口径はすべて 22φ である（第 11 図参照）。

噴流の全圧は翼形状の断面を有する全圧管からあらかじめ較正済の抵抗線式圧力計に導いて測定した。噴流中の静圧は大気圧にほぼ等しいので全圧のみを測定した。

4. 実験結果と考察

4.1 記 号 の 定 義

以後本文に用いる記号を次のように定義する。

H_L : ノズルからの距離 L における噴流軸に垂直な噴流断面上の任意の点の全圧 (mAq)

$H_{L \max}$: H_L の最大値 (ほぼ噴流中心における全圧) (mAq)

H_0 : ノズル入口圧力(ノズル入口前の静圧) (mAq)

L : ノズル出口からノズル中心軸上に測った距離 (mm)

l : 曲管と整流管の間の距離 (mm)

l_c : 核部分の長さ (mm)

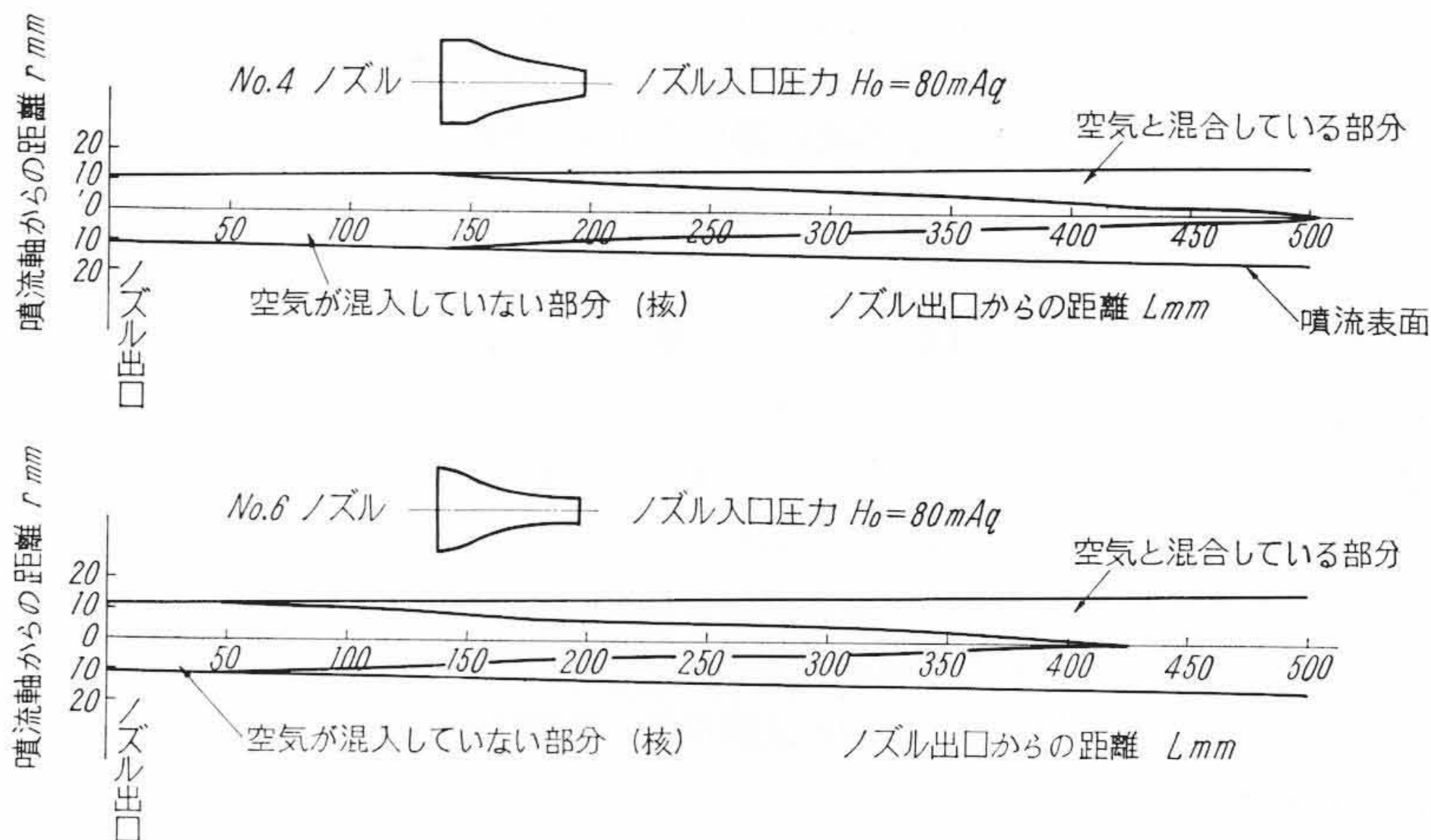
r : 噴流中心軸に垂直な噴流断面上の点の中心軸からの距離 (mm)

r_0 : ノズル出口半径 ($d_0 = 2r_0$) (mm)

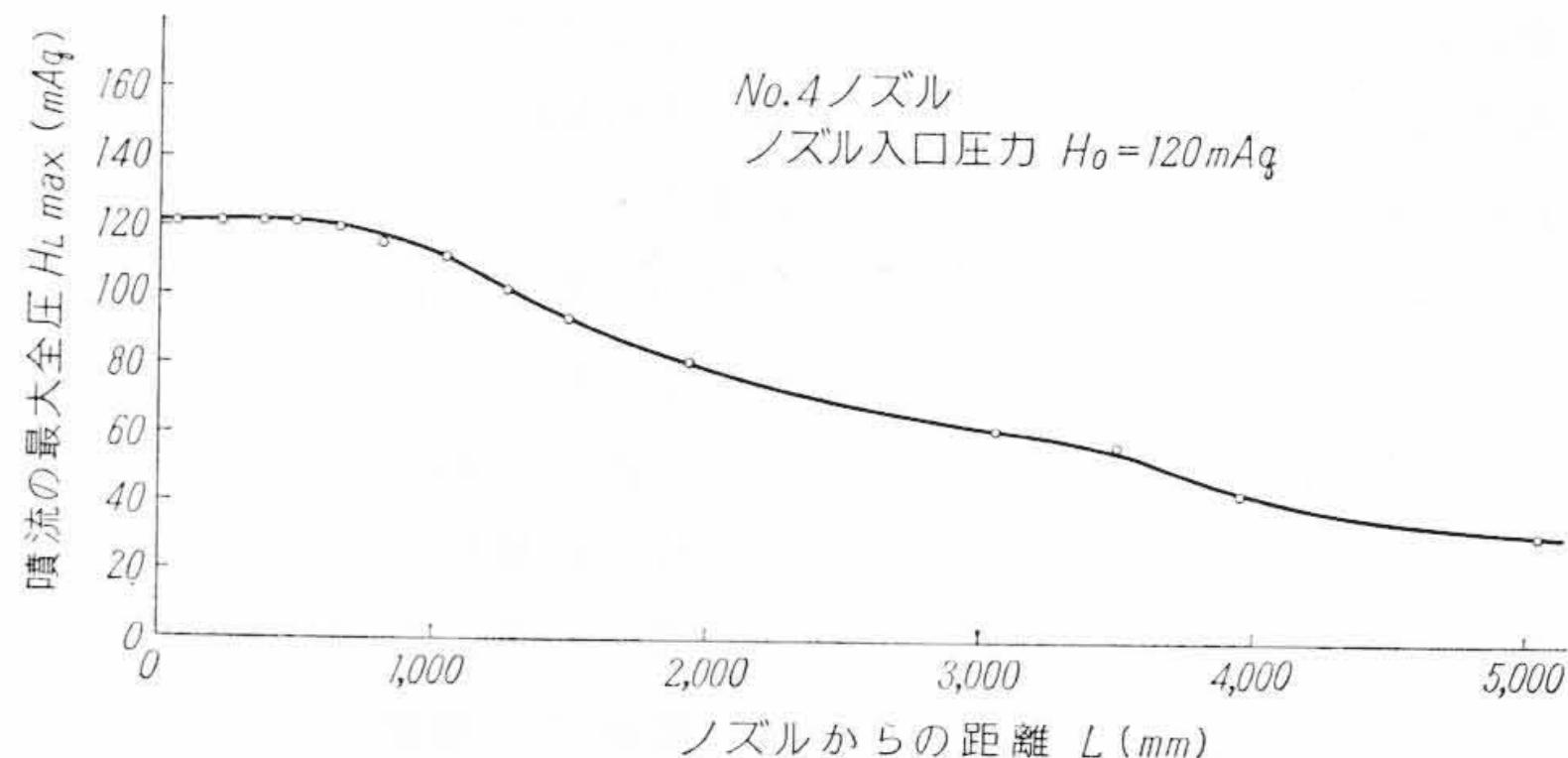
σ : 噴流の拡散を示す係数((1)式により定められる)

4.2 噴流の基礎的特性

第 4 図はノズル No. 4 および No. 6 によってノズル入口圧力 $H_0 =$



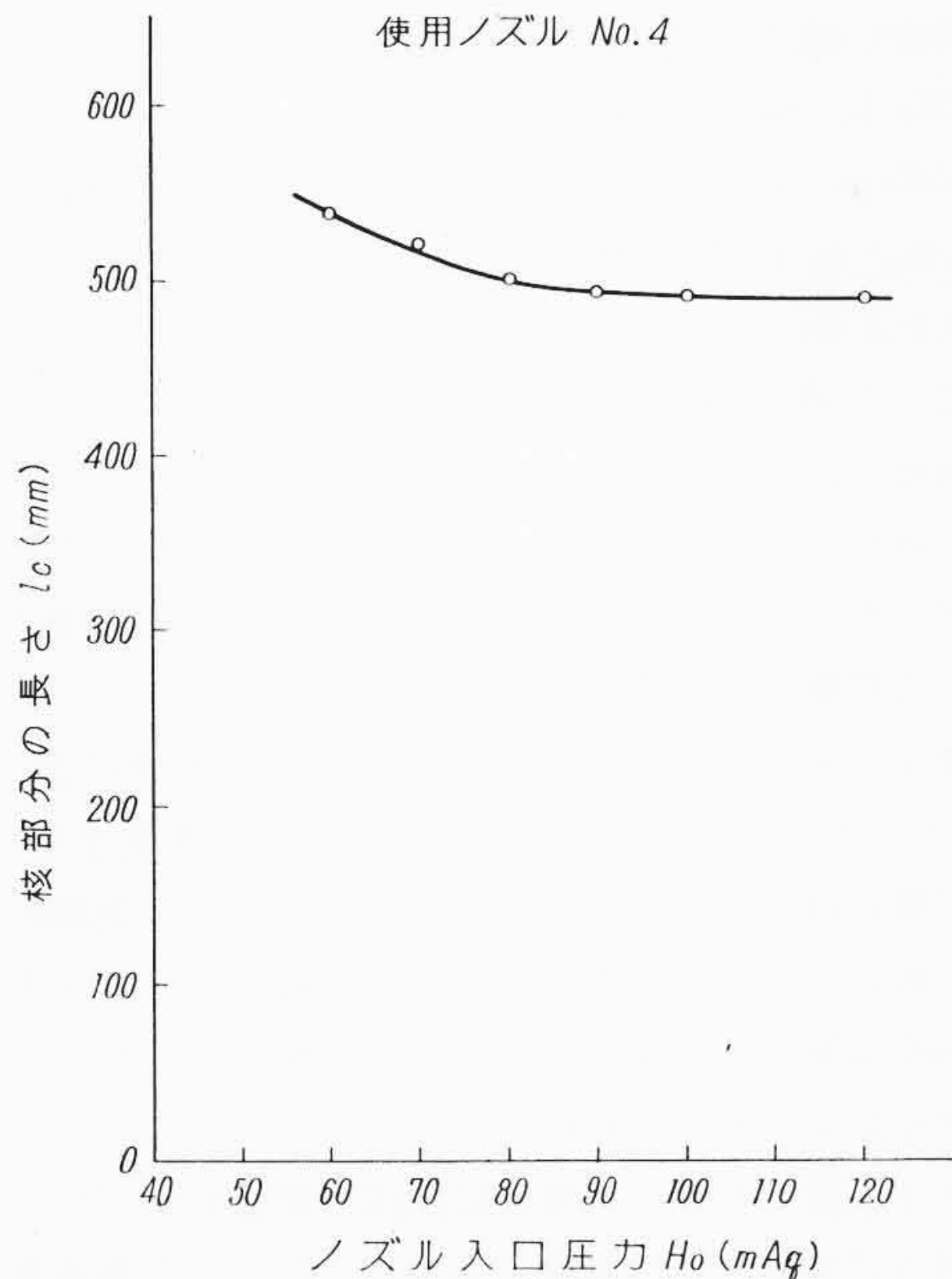
第 4 図 噴流内の核の長さの比較



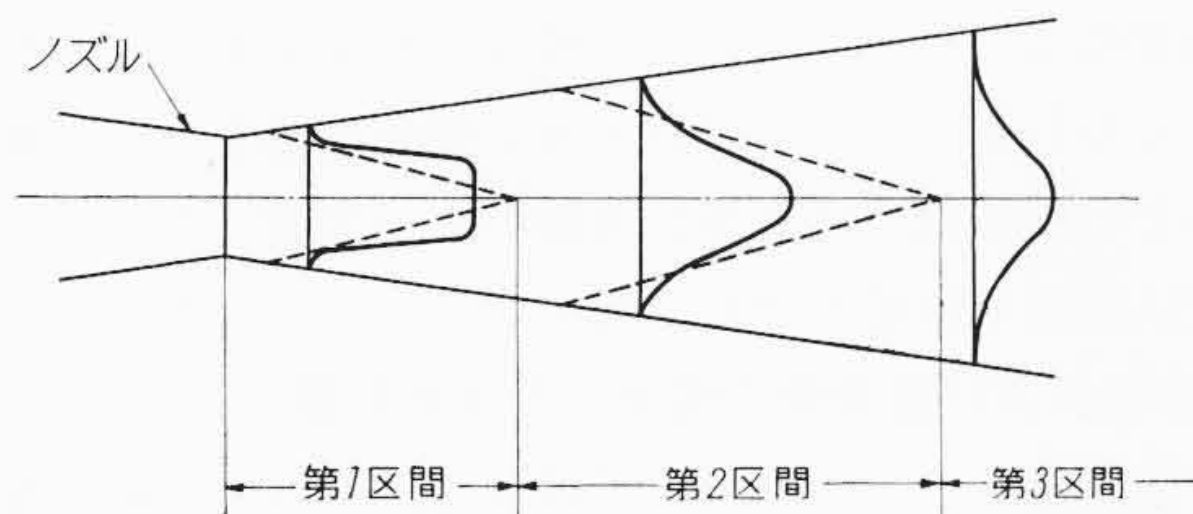
第 5 図 ノズルからの距離と噴流の最大全圧との関係

80 mAq で噴射された噴流の核を、実験によって確認した結果である。混合域と核との境界は、全圧管をトラバースして全圧管の圧力取出口から透明なビニールチューブを通して大気中に流出する流水中の気泡の有無によって判定した。両噴流中の核部分の長さ l_c を比較すると、ノズル No. 4 においては $l_c = 510$ mm、ノズル No. 6 においては $l_c = 420$ mm であり、ノズルによって差があることが知られる(ノズル径を d_0 とすると $l_c = 19d_0 \sim 23d_0$)。この差は空気との混合がノズル No. 6 においては No. 4 の場合よりもノズルに近い位置で始まっているために生じている。したがって核の長さ l_c の小なる噴流においては、全圧の低下が l_c の大きな場合よりもノズルにより近い位置で始まり、このような噴流の性能は悪いものと考えられる。このように考えると、実験結果からノズル No. 4 のほうが No. 6 よりもすぐれているわけであるが、この結果は後述するノズル性能の比較実験結果と一致する。

前述したように噴流の構造は軸方向に沿って 3 段階に変化するので、噴流の最大全圧 $H_{L \max}$ は軸方向に沿ってそれに対応する変化をなすものと考えられる。第 5 図はノズル No. 4 について、噴流の最大全圧 $H_{L \max}$ がノズルからの距離 L に対してどのように変化するかを実験によって求めた結果の一部(ノズル入口圧力 $H_0 = 120$ mAq の場合)を示したものである。ノズル出口から約 500 mm までの範囲では $H_{L \max}$ が一定で、ノズル入口圧力 H_0 よりもわずかに大きい。これは、ノズル入口圧力 H_0 が静圧であるため、噴流の最大



第6図 核部分の長さとの関係



第7図 ノズルからの距離による全圧分布の変化

全圧 $H_{L \max}$ が管内の速度水頭に相当する分だけ大きくなるためである。 $H_{L \max}$ が一定になる範囲が第1区間に相当し、第4図より求めた核の長さ l_c とほぼ等しくなっている。第1区間を過ぎると $H_{L \max}$ は減少しはじめる。この範囲が第2区間である。 $H_{L \max}$ は $L=3\text{m}$ 付近まで減少し、いったん飽和する傾向を示すがさらに減少をはじめる。この付近が第2区間と第3区間の境界と推定される。他のノズル入口圧力 H_0 についても同様の傾向を示した。

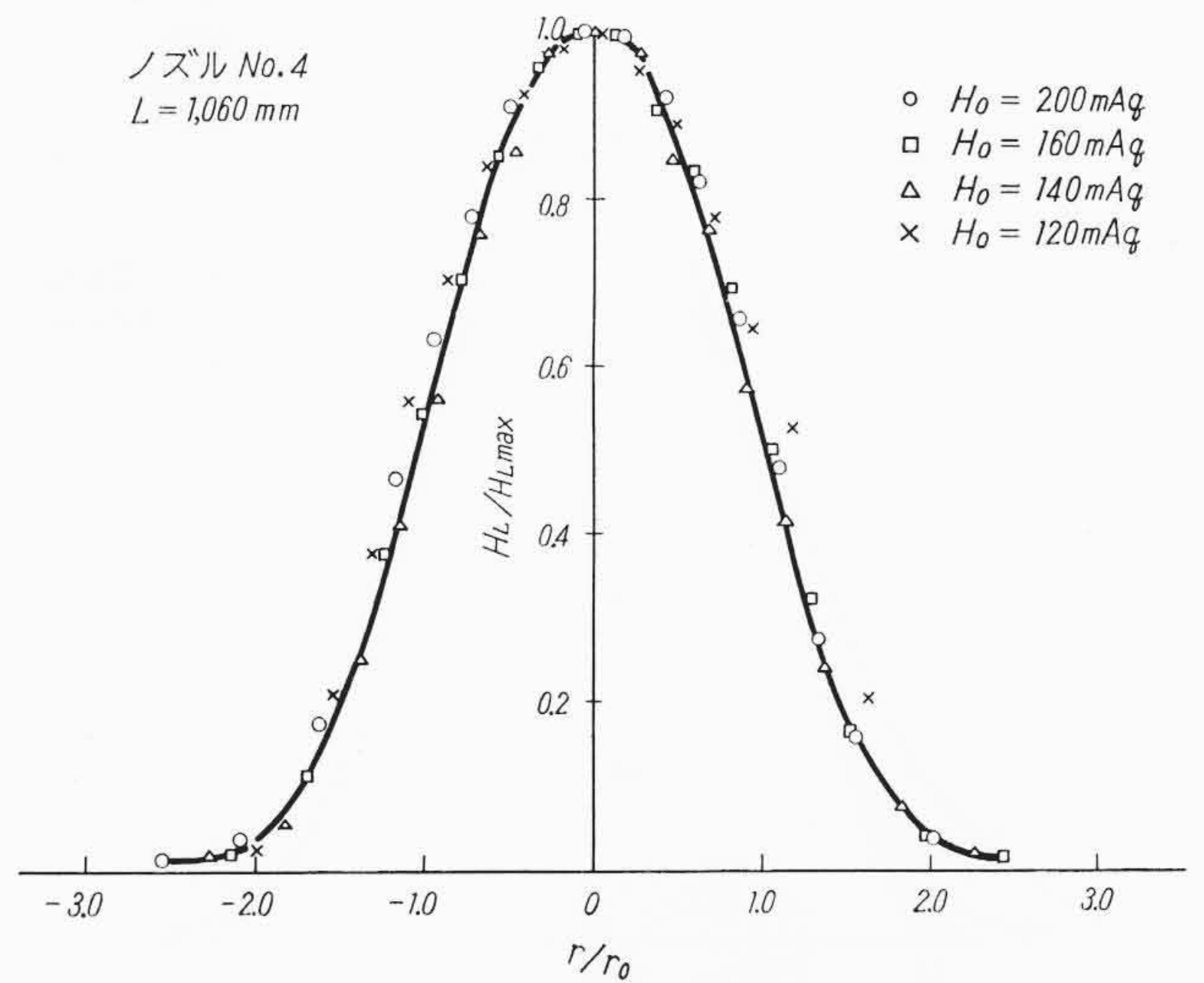
以上の点から明らかなように、 $H_{L \max} \sim L$ 曲線において第1区間が長く、第2区間における $H_{L \max}$ の減衰率の小さな噴流が、水力採炭用として有効な噴流であると思われる。

第6図はノズル No. 4 を用いてノズル入口圧力 H_0 が $60 \sim 120\text{mAq}$ の範囲で変わるとき、核の長さ l_c (第1区間の長さ) の変化を実験によって求めた結果である。 l_c は H_0 が小なるとき大きく、 H_0 が増加するとともにかえって減少し一定値に近づく傾向を示している。このことはノズル入口圧力 H_0 を増加させても噴流の到達距離の増加はあまり期待できないことを示すものであり、第2区間における $H_{L \max}$ の減衰率も H_0 が大なるとともに増加する傾向にあるところから、むしろノズル口径を大きくすることによって、第1区間を増加させる方が有利であると思われる。

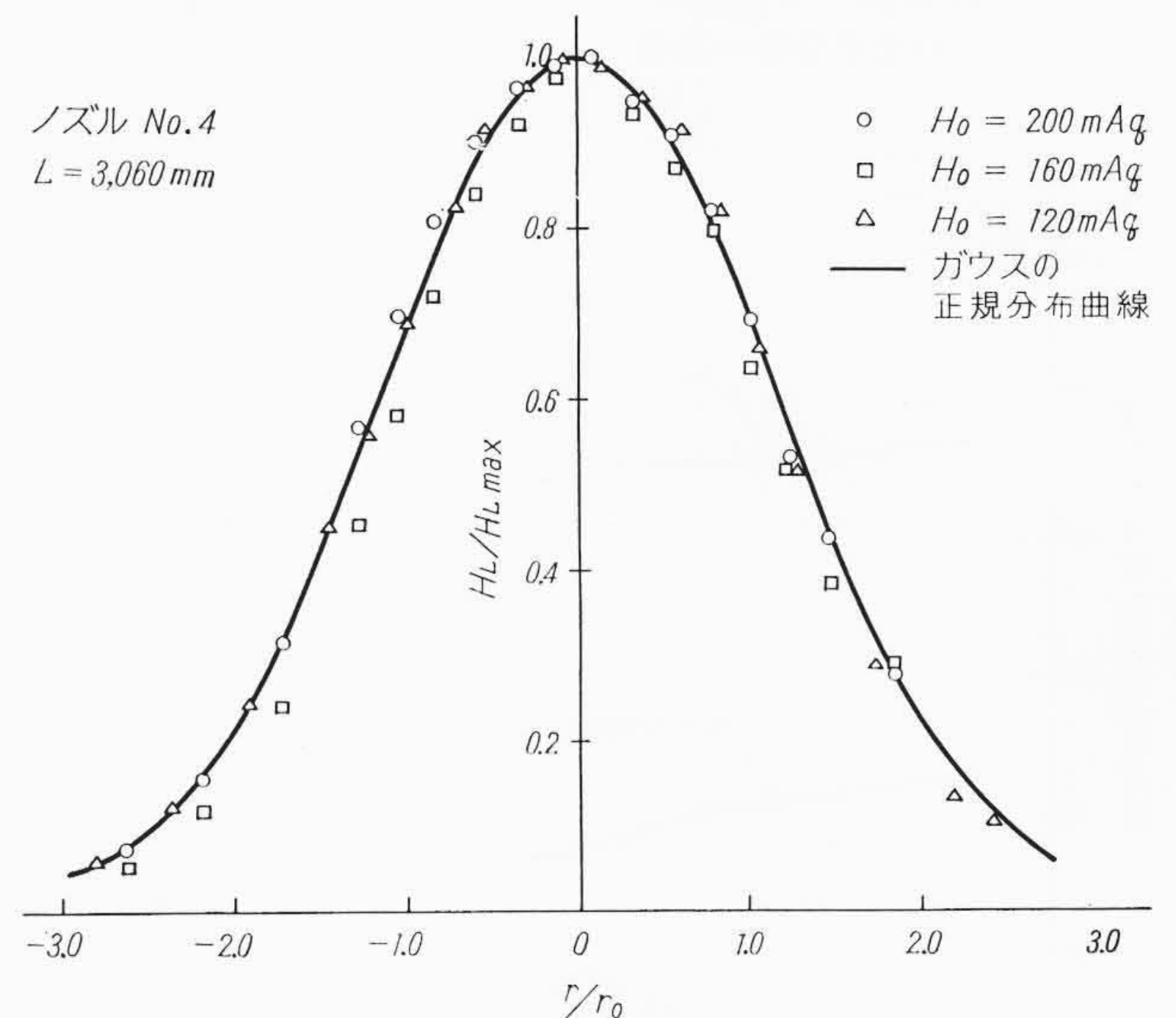
さらに、ノズル入口圧力 H_0 を変えた場合に、噴流の最大全圧 $H_{L \max}$ がどのように変化するかをノズルからの距離 L をパラメータとして調べたが、実験の範囲 ($H_0=50 \sim 200\text{mAq}$) においては $H_{L \max}$ と H_0 との間には直線的な関係にあることがわかった。

4.3 噴流の全圧分布の測定

第7図はノズルからの距離による全圧分布の変化を示している。前に述べたように全圧の測定値は、核以外の領域においては水と空気の混合体の動圧を示すものである。なお実験に際しては、導管内の静圧がほぼ大気圧に等しいことを確認した。



第8図 全圧分布無次元表示



第9図 全圧分布無次元表示

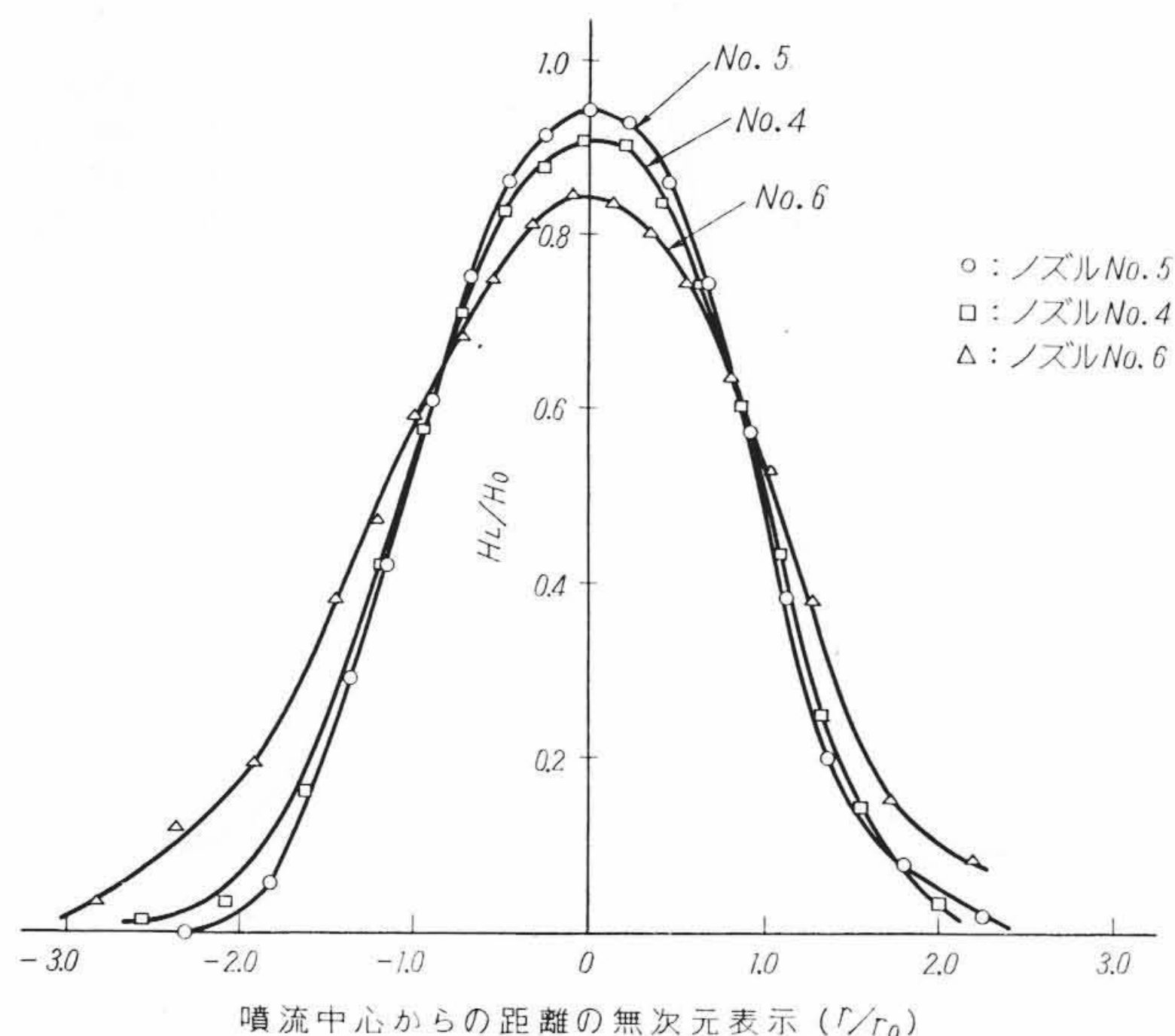
第1区間内における全圧分布は中心軸付近ではほぼ一様であり、核の内部では全圧が一様に分布している。すなわち流速が一様であることを示している。第2区間内において噴流の周辺部では水と空気の混合が進んでいるが中心部では空気の混合量が少なく、全圧分布は山高な曲線をなしている。第3区間においては水と空気が十分に混合し、全圧分布の平均化が進んでおり、最大全圧 $H_{L \max}$ が著しく低下している。

第8図はノズル入口圧力 H_0 を変えた場合のノズル No. 4 の $L=1,060\text{mm}$ における全圧分布の無次元表示を示す。噴流中心軸からの距離 r はノズル出口半径 r_0 で無次元化して示し、縦軸には H_L を最大全圧 $H_{L \max}$ にて無次元化して示した。第9図は $L=3,060\text{mm}$ における全圧分布の無次元表示である。点はほぼ一本の曲線上にまわっている。

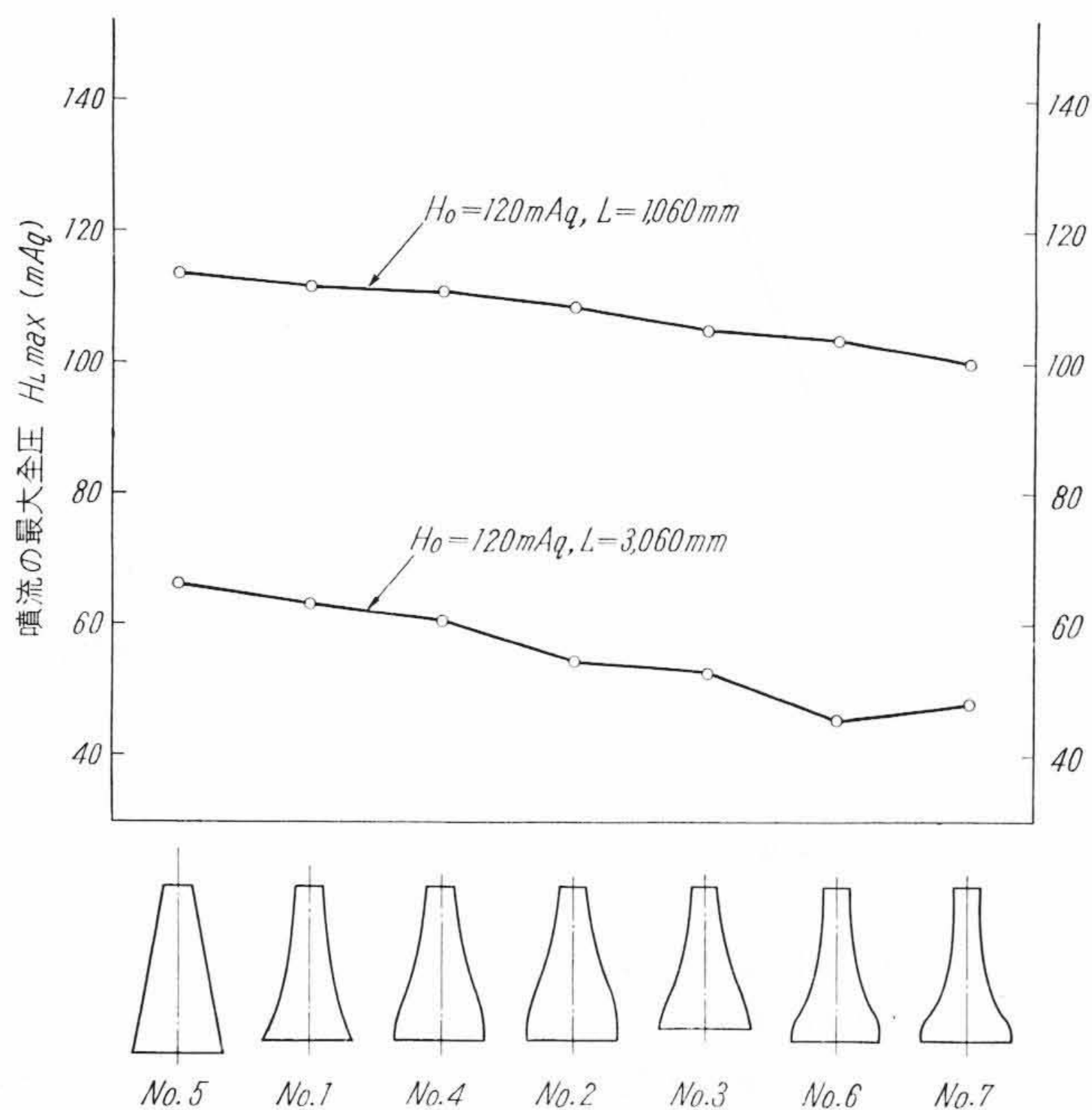
文献⁽³⁾によれば、噴流の流速分布はガウスの正規分布曲線によって表わされるが、本実験の場合についても噴流の全圧分布を正規分布によって表わすことを試みた。全圧分布の無次元表示を次式によって表わす。

$$\frac{H_L}{H_{L \max}} = e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{r}{\sigma r_0} \right)^2} \dots\dots\dots (1)$$

ここで σ は正規分布曲線の標準偏差に相当する係数である。実験によって得られた測定点の傾向になるべく近づくように σ の値を選



第 10 図 3 種類のノズルから噴射される噴流の全圧分布の比較



第 11 図 ノズル性能の比較

んで(1)式を計算した結果が第 9 図 ($L=3,060$ mm の場合) の実線である。このときの σ の値は 1.15 である。同じ条件でノズル No. 5 の場合は $\sigma=0.93$ 、ノズル No. 6 の場合は $\sigma=1.32$ が得られた。拡散の大きい順にノズルを並べると No. 6, No. 4, No. 5 となり、後述するノズルの性能比較結果と比べると、性能のよいノズルほど σ が小なることが知られる。ただし (1) 式を $L=1,060$ mm における全圧分布に適用することを試みたが、実験結果と一致しなかった。(1) 式は水と空気が十分に混合した状態において適合するものと思われる。第 10 図は 3 種類のノズルからの噴流の全圧分布を同一条件で比較した結果である。ただし全圧 H_L はノズル入口圧力 H_0 にて無次元化した。この結果からも最大全圧 $H_{L\max}$ の大なる噴流は拡散が小なることが知られる。

4.4 ノズルの性能比較実験

各ノズルと性能はノズルから一定距離における噴流の最大全圧により比較した。第 11 図は各ノズルについてノズル入口圧力 $H_0=120$ mAq の場合において、ノズルからの距離 L をパラメータとして噴流の最大全圧 $H_{L\max}$ を比較した結果である。 $L=1,060$ mm にお

いて性能の良い順に、すなわち最大全圧の大きい順にノズル番号を並べると No. 5, No. 1, No. 4, No. 2, No. 3, No. 6, No. 7 となる。 $L=3,060$ mm においては No. 5, No. 1, No. 4, No. 2, No. 3, No. 7, No. 6 となり、 $L=1,060$ mm の場合と比較して No. 6 と No. 7 の順位が入れかわっている以外は、その順位は一致している。また実験を行なった H_0 の範囲では H_0 が変わってもノズルの順位が変わることはなく、 H_0 の低圧力におけるノズル性能の相対的な関係は高圧力においても保たれることが実験結果より推定される。

次にノズル形状とノズル性能との関係を検討する。第 11 図からわかるように性能の良い No. 5, No. 1, No. 4 ノズルにおいては、先端形状がほぼ円すい状をなしているのに対し、性能の悪い No. 7, No. 6, No. 3 ノズルにおいては先端形状がほぼ円筒状をなしている。円筒部分が長いほど性能が悪いようである。これは先端が円すい状のノズルにおいては流れが加速されるのに対し、ノズル先端が円筒形状の場合には流れが加速されず圧力こう配が 0 となり、境界層の厚さが大きくなるためと思われる。

次にノズル表面のあらさが噴流に及ぼす影響を調べた。旋盤加工後サンドペーパーで仕上げた場合と油と石で仕上げた場合の両者の噴流の $H_{L\max}$ を比較した結果、ほとんど一致した。この程度の仕上差は噴流の性能にほとんど影響しないようである。むしろ実際に使用する場合には、ノズル面の傷が噴流の性能を低下する原因となることが考えられる。ノズル出口エッジ部分に傷をつけた場合に噴流の性能がどの程度低下するかを実験によって調べた。この結果によると噴流は拡散し性能が著しく低下することがわかった。

4.5 曲管および整流管の噴流に及ぼす影響

噴流の性能はノズル形状だけではなく、ノズルの前の配管構造によって大きな影響⁽⁴⁾をうける。特に管内の軸まわり回転流れの影響は大きく、回転流れがあると噴流は著しく拡散する。

流れに回転を与える原因となるのは主として曲管における流れの方向転換であるから、ハイドロカッタにおいてはノズルと曲管を連絡する噴射筒内に整流板を設け、曲管において発生する回転流れを除去している。

本実験においては噴流に対する曲線の影響を調べるために、ノズル直前に整流管を設けた状態で、整流管と曲管部の間に入っている直管の長さを変えて噴流の状態を調べた。実験結果によれば、曲管が整流管に近接している場合には整流管を使用しているにもかかわらず、噴流の性能は著しく低下することがわかった。これは曲管において発生するかたよった流速分布や流れの非定常性が噴流に影響を与えるためと推定される。整流管と曲管の距離を増加すると曲管の噴流に対する影響は少なくなり、ある程度以上大きくすると噴流の性能低下はほとんどなくなる傾向を示した。

次に整流管断面形状が噴流に及ぼす影響を調べた。第 1 表はこの

第 1 表 整流管が噴流の最大全圧に及ぼす影響

整 流 管 名	整 流 管 断 面	整流管と曲管の間の距離	
		0 mm	825 mm
十文字形整流管		54.2 mAq	74.5 mAq
一文字形整流管		38.5 mAq	65.5 mAq
星 形 整 流 管		39.0 mAq	61.0 mAq
整 流 管 な し		19.2 mAq	—

ノズル入口圧力 $H_0=80$ mAq
ノズルからの距離 $L=1,060$ mm

実験結果を示す。ノズル入口圧力 $H_0=80 \text{ mAq}$ の場合について、ノズルからの距離 $L=1,060 \text{ mm}$ における噴流の最大全圧 $H_{L \text{ max}}$ を3種類の整流管について、整流管と曲管の間の距離をパラメータとして測定した。実験に使用した整流管は整流板が一枚である一文字形整流管、整流板が2枚である十文字形整流管および十文字形整流管の中心部の整流板を除いた星形整流管の3種類である。本実験では十文字形整流管が最も良い結果を示した。星形整流管の場合、実験に使用した整流管の長さでは十分に流れの回転を除去することはできないようである。十文字形整流管はかたよった流速分布がノズル入口まで維持されるなど不利な点を有しており、一概にその良否を断定することは危険であるが、寸法が制約されるハイドロカッタにおいては、短い距離で回転流れを除去することが可能である十文字形整流管が適していると思われる。

5. 結 言

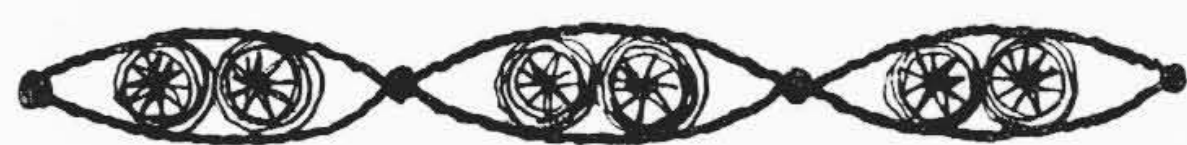
水力採炭用噴射装置（ハイドロカッタ）のノズルと噴流について

行なった実験結果の概要を述べた。はじめに噴流の基礎的特性について実験を行ない、さらにノズルとその付属部分である整流管および曲管が噴流に及ぼす影響を調べ、ハイドロカッタの使用上および設計上必要な資料を得ることができた。

終わりに臨み、本実験の遂行に当たってご指導いただいた小堀博士ならびに寺田博士に感謝の意を表する。あわせて実験を担当された樽氏に感謝する。

参 考 文 献

- (1) 鈴木, 山門, 横田, 佐々木, 黒岩: 採炭と保安, 6, 1(1960-12)
- (2) Pai: Fluid Dynamics of Jets., 110 (1954, D. Van Nostrand)
- (3) 外尾訳, イグナトフ, ムーチニク編: 水力採炭と水力輸送, 上巻, 131 (1961, 東京大学出版会)
- (4) 黒岩: ウーゴリ, 第27号, 1 (1962)



登録新案 第 556885 号

新 案 の 紹 介



小 林 正 毅・平 野 三 百 里

モ ー ル ド 型 高 電 圧 変 流 器

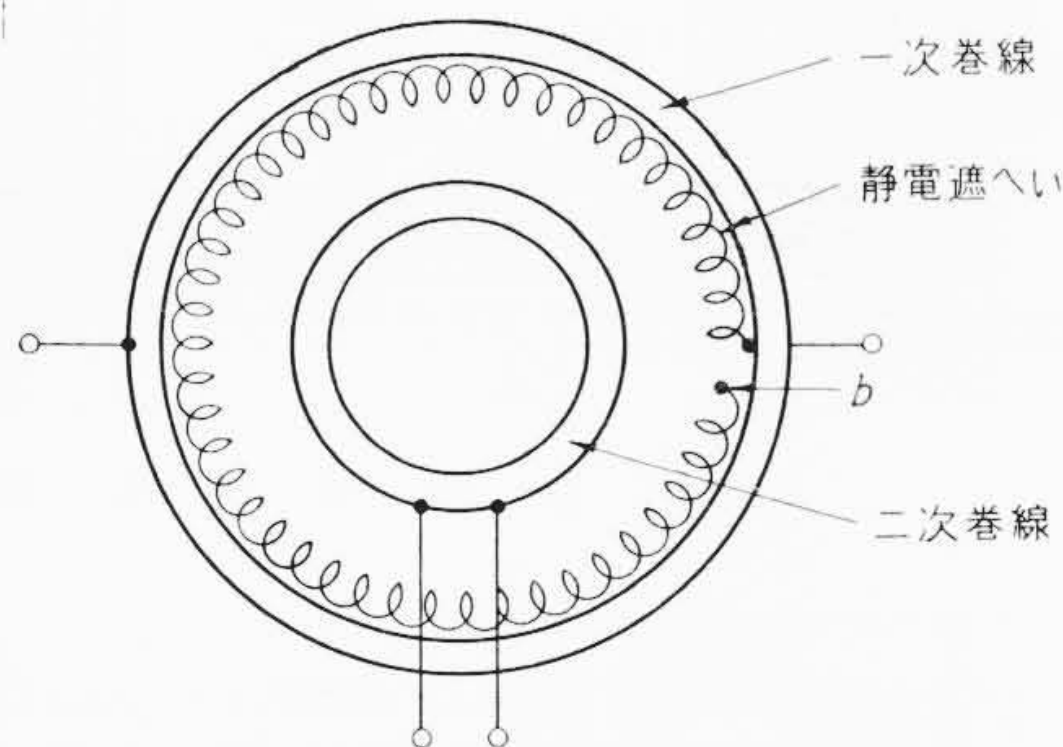
普通高電圧変流器は平銅, コーペル銅板, 角銅線などの導体で一次巻線を形成しており, 導体表面は平滑のままで使用する場合が多く, この場合は注形合成樹脂と導体面とが接着しにくくまた一次巻線の導体面にスチールショット, サンドブラストなどの粗面加工を施しても接着の完全は期しがたい。この接着の不完全は一次巻線導体と注形合成樹脂との間に空けきを生じ, コロナ放電の原因となる。なおこの空けきに電気ひずみがかからないよう一次巻線導体と樹脂との間に導電性詰物を置くか, または静電しゃへいを設ける方法は, 周知のように種々行なわれているが, 従来の方法はいずれも顕著に有効とは言えなかった。

この考案は上に述べたような欠点を改良するために行なわれたも

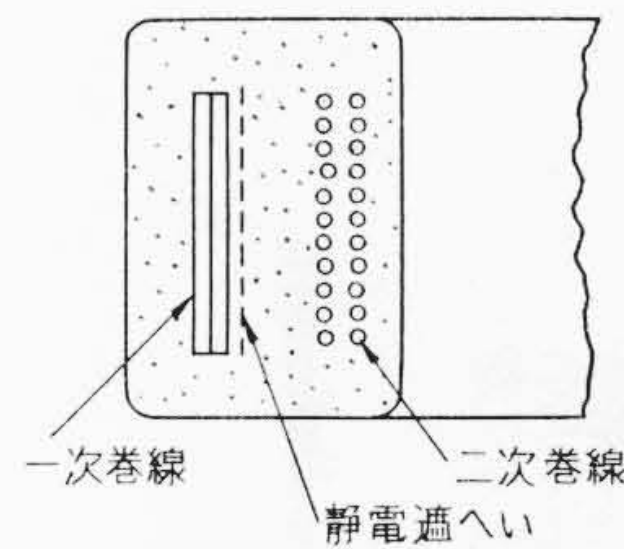
のである。すなわち図面に示すように静電しゃへいとしてビニールホルマール, ポリエステルなどの合成樹脂絶縁被膜を有する絶縁電線を無誘導的に巻いて带状に構成し, これを一次巻線の二次巻線に対向した内側面に沿ってあて, 一次巻線を二次巻線に対して完全にしゃへいする巻線配置となし, これを注形合成樹脂により一体に成形被覆してなるものである。

この考案は以上述べたように構成したものであるために, 開放端 b に異常高電圧を発生し絶縁を破壊する危険を除去することができ, かつ静電しゃへいの効果を発揮するなどの効果がある。

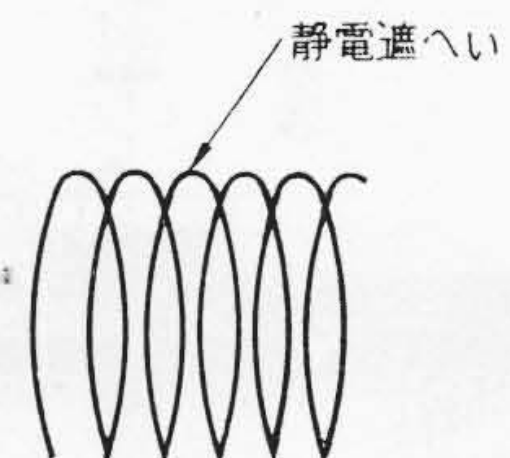
(諸角)



第 1 図



第 2 図



第 3 図