

報 文

静水中に落下する水流の実験*

正員 岩崎 敏 夫**

准員 千秋 信 一***

AN EXPERIMENTAL STUDY ON WATER FALL

(JSCE Aug. 1953)

Toshio Iwasaki, C.E. Member, Sin-ichi Senshū, C.E. Assoc. Member

Synopsis Falling water into a basin generates turbulences in still water and undergoes the deceleration along the line of penetration. Concerning submerged jets in the same fluid, this phenomenon is already made clear in some extent by analytical and experimental researches. While in the case of free fall there joins an indistinct effect of entrained air on the turbulence. Thus this study was performed in comparison of free falls with submerged jets. Directions of penetration in still water were determined as vertical and 60° inclined, and deceleration ratios along the direction of penetration were measured. As the conclusions, we made out that free fall generates no distinct zones as observed in submerged jets.

Rate of deceleration is much larger in free fall than in submerged jets, especially their difference is remarkable in the case of vertical penetration. Reynolds' number seems to have some effects for the free fall.

要旨 静水中に落下流入する水脈はその乱れの範囲を拡大しつつ減速して次第に拡散してゆく。このような噴流の問題に関してはすでに二、三の理論的並びに実験的研究が行われているが、本実験においては、気泡を混入しない垂直落下水（理想噴流）の拡散の機構につき詳細な実験に基づいて検討を加え、さらに気泡を混入するような自由落下水について実験を行い、理想噴流との対比を行った。静水中に貫入する落下水脈の方向は鉛直、及び水平と60°の2種とした。実験の結果、自由落下水においては連行される気泡が乱れ拡散にいちじるしい影響を及ぼし、理想噴流におけるごとき明確な領域が現われず、流速減少の割合は理想噴流に比してはるかに大きく、ことに鉛直落下水の方が傾斜せる場合よりもいちじるしいことがわかった。なお、自由落下水の減速には Reynolds 数が関係することが認められた***。

1. 緒言

静止せる流体中へ同質の流体が流入する場合を3次元的に取り扱うとき、小さな円孔から噴出した流体は周囲の静止せる流体と混わり、噴流の太さは次第に大

きくなりながら拡散してゆく。このような噴流の速度分布、減速の割合などについては Tollmien¹⁾ が Prandtl の仮定²⁾ に基づいて理論解を求めている。筆者はまづこのような理想噴流につき実験を行い、Tollmien の理論並びに他の諸実験との比較検討をなし、ついで自由落下水についての実験を行って理想噴流と対比した。よつて実施した実験は次の各項である。

I 気泡を混入しない垂直落下水の実験

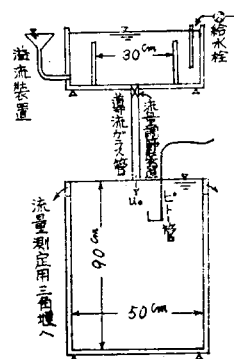
I' I の場合における底板の影響に関する実験

II 気泡を混入せる垂直落下水の実験

III 気泡を混入しない斜め落下水の実験

IV 気泡を混入せる斜め落下水の実験

図一 実験装置略図
Scheme of Tanks for the Experiment.



実験装置は図一に示すとおりであつて、拡散領域内における流速の貫入方向の分速度（時間的平均値）を内径 1mm の Pitot 管で詳細に測定した。

I 気泡を混入しない垂直落下水の実験

上槽から溢水槽中に落下する水を硝子管で導き噴流中に気泡を含まないようにした。流出口における中心

* 土木学会第8回（昭 27.5.25）年次講演会にて発表

** 東北大学助教授，工学部土木工学教室

*** 電力中央研究所

**** この報告中 Tollmien の理論との比較の部分は岩崎，その他は千秋が担当した。

速度 u_0 と管の内径 d_0 との組合わせ 12 とおり (表一 1) に対して流速測定を行った。Kuethe²⁾ によれば乱

$$C \text{ 領域: } \frac{x}{d_0} = 8.2 \sim 36.5 \quad \frac{u_c}{u_0} = \frac{6.3}{(x/d_0)} \dots\dots (1c)$$

表一 実験 I

実験記号	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
u_0 cm/s	297	292	273	238	212	175	135	91	65	269	164	102
d_0 cm	1.14	1.14	1.14	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.92	1.92	1.92
c	0.0141	0.0129	0.0161	0.0164	0.0179	0.0160	0.0180	0.0180	0.0180	0.0166	—	—

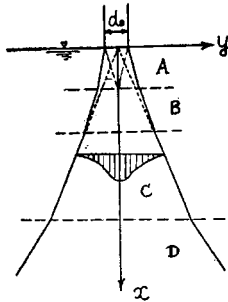
$$D \text{ 領域: } \frac{x}{d_0} = 36.5 \sim$$

$$\frac{u_c}{u_0} = \frac{230}{(x/d_0)^2} \dots\dots (1d)$$

Kuethe の理論的計算³⁾ によれば

れの混合領域の定性的な図は図-2 のようになり、乱れは流出口の縁に発生し、領域 A においては potential flow の core を含みこの core の中で流速は一定で流出速度に等しい。領域 B においては全体が乱れの混合領域となり、中心軸に沿う流速 u_c は流出口からの距離 x とともに減少する。領域 C においていわば流れが確立し⁴⁾、Tollmien の理論に従って u_c は x に反比例して減少し流速分布曲線も十分に相似性をもつ。佐藤、細井両氏⁵⁾

図-2 理想噴流の 4 領域
Four Zones of Submerged Jet



一定で流出速度に等しい。領域 B においては全体が乱れの混合領域となり、中心軸に沿う流速 u_c は流出口からの距離 x とともに減少する。領域 C においていわば流れが確立し⁴⁾、Tollmien の理論に従って u_c は x に反比例して減少し流速分布曲線も十分に相似性をもつ。佐藤、細井両氏⁵⁾

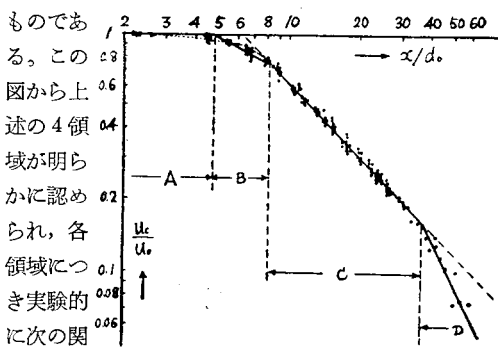
A 領域の限界は 4.76 である。佐藤、細井両氏の実験⁵⁾ によれば B 領域は $x/d_0 = 4.55 \sim 12$, C 領域は $x/d_0 = 12 \sim 36$ となつている。また Rouse の空気噴流の実験⁴⁾ によれば C 領域における実験係数は筆者の求めた 6.3 の代りに 6.2 を得ている。さて実験結果によれば Tollmien の理論を満足する範囲はわずかに C 領域に過ぎない。これは Tollmien の行った方法が点噴流の理論であつたが、実際には有限の大きさをもつた管口からの噴流であつて、流出口近傍では管口の大きさが無視できないためである。実験的に 4 つの領域に分割してそれぞれの領域に対して上記の関係式を与えることは実用上の便宜的な手段ではあつても、分割点にあらわれる不連続性を無視することはできない。そこでいま有限の管口の噴流を点噴流の集合体と仮定して解析を行えば、

$$x > x_0 = \frac{d_0}{2 \times 3.4 \times \sqrt{c^2}} \dots\dots (2)$$

(c は混合距離係数)

は水平噴流に関する実験の結果から、領域 C についてさらに u_c の減少が一段といちじるしくなるような領域 D を提唱している。

筆者の実験結果は図-3 に示されている。この図は表一 1 に示す 12 とおりの初期条件の下に測定せる実験値を無次元化して 図-3 実験 I 中心軸上の流速減少の状況 Distribution of Center-Line Velocity for Submerged Jet 表わしたものである。



に次の関係が求まる。

$$A \text{ 領域: } \frac{x}{d_0} = 0 \sim 4.8 \quad u_c = u_0 \dots\dots (1a)$$

$$B \text{ 領域: } \frac{x}{d_0} = 4.8 \sim 8.2 \quad \frac{u_c}{u_0} = \sqrt{\frac{2.2}{x/d_0}} \dots\dots (1b)$$

の範囲に対して次のごとき結果が得られる。

$$\frac{u_c}{u_0} = 8 c_0 \left(\frac{x}{d_0} \right)^{-1/2} \int_0^{1/2(x/d_0)} f(\eta) \cdot \eta \times \left\{ 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{x}{d_0} \right) \eta \right\}^2 d\eta \dots\dots (3)$$

この式は流出口における速度分布形を実験結果から

$$u_r = u_0 \left(1 - \frac{1}{2} \frac{r}{d_0} \right)^2$$

と定めて求めたものであり、式中の $f(\eta)$ は Tollmien の理論解による速度分布函数¹⁾ である。(3) 式において x/d_0 が十分大きいときは

$$\frac{u_c}{u_0} \approx \frac{9/16 c_0}{x/d_0} \dots\dots (3')$$

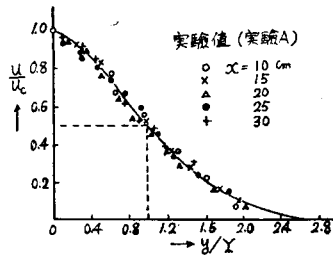
となり、これが (1c) 式と一致するものとして c_0 を求めれば、 $c_0 = (16/9) \times 6.3 = 11.2$ となる。 $x < x_0$ に対しては (3) 式はさらに複雑な別の関係となるが、この範囲は Kuethe の研究²⁾ にあるごとく中心軸上に乱れの及ばないいわゆる A 領域に相当するものとして、 $u_c/u_0 = 1$ とするのが実験結果からも妥当である。(3) 式を数値積分した結果を図示すれば図-3 中の点線のようになり、B 領域における実験値とよく一致した結果を示す。このことから B 領域は A 領域のごとく C

領域と本質的に異なるものではなく、C 領域と同一の点噴流の理論に従うが流出口に近いためにこれと異なつた様相を呈するものと考えられる。

次に C 領域における水平方向の流速分布の実験結果から、相異なる断面間において流れの状態に幾何学的並びに力学的に十分な相似性が成立つことが確かめられた。その

1 例として図一4に実験 A についての測定結果を示す。横座標の Y は $u/u_c = 0.5$ に相当する y の値である。図中に画いた実線は

図一4 実験 I 流速水平分布
Horizontal Distribution of u for Submerged Jet



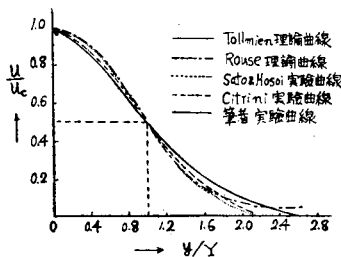
Tollmien の理論に基づく速度分布曲線であつて、実験値は理論曲線とよく一致する。混合距離 $l = cx$ とおいたときの混合距離係数 c の値は実験的に算出されるが、この値は各実験ごとに異なり一定値とはならない。その状況を表一1に示す。参考として従来行われたこの種実験より得られた c の値を表一2に示して比較しよう。

表一2 混合距離係数 c の比較

実験者	流体種別	流出速度 u_0 cm/s	流出口径 d_0 cm	速度分布測定領域 x/d_0 の値	c の値
Tollmien (1926)	空気	143.0	13.7	7.3 (B領域)	0.0158
Zimm (1921)	空気	31.6	—	—	0.0226
Kuethe (1935)	空気	2650.0	10.0	C 領域	0.0138
佐藤・細井(1951)	水	214.62	0.33	B 領域	0.0153
				C 領域	0.0197
				D 領域	0.0271
筆者 (1951)	水	300~65	1~2	C 領域	0.0129~0.0180

さらに噴流のいわゆる C 領域における速度分布形に関して従来発表された理論曲線及び実験曲線を比較すれば図一5のごとくであり、筆者の実験は Toll-

図一5 流速水平分布曲線の比較
Comparison of Velocity Distribution Curves



mien の理論曲線に一致し佐藤、細井両氏の実験は、Rouse の確率曲線⁴⁾に近く、Citrini⁹⁾の実験はその中間にある。最後に流出口からの距離

にともなうエネルギー量の減少の割合は、噴流に垂直な断面に対するエネルギー量を E 、流出口におけるそれを E_0 とするとき、本実験の結果から、C 領域に対して、

$$\frac{E}{E_0} = 1.292.5c^{4/3}/(x/d_0) \dots\dots\dots(4)$$

となり、かりに $c = 0.0160$ とすれば

$$\frac{E}{E_0} = 5.12/(x/d_0) \dots\dots\dots(4')$$

が得られる。

I' 垂直落下水に及ぼす底板の影響の実験

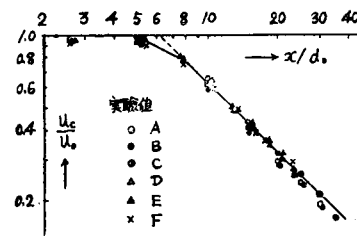
これは以上の実験がいわば無限に深いと仮定される湛水中への落下水を取扱つたものであるのに対し、湛水池の深さが浅く落下水が湛水池底面へ当つてこれに動水圧を加えるような場合、底面附近での流況が理想噴流といかに異なるかを調べることを目的とした。このため下槽の底面を上下に移動し得るようにし、この可動受圧板に内径 1 mm の注射針をうめ込み、その流出口からの距離をいろいろに変えて、流出口の直径 d_0 、流出速度 u_0 の種々の値(表一3)に対して受圧板に垂直に働く動水圧を測定した。前段の理想噴流と比較す

表一3 実験 I'

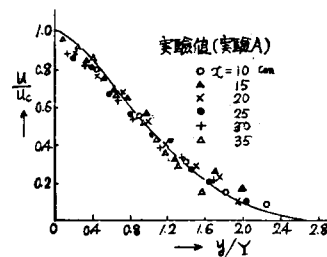
実験記号	A	B	C	D	E	F
u_0 cm/s	284	230	190	270	284	129
d_0 cm	1.00	1.00	1.00	1.925	1.925	1.925
c	0.0248	0.0251	0.0226	0.0234	0.0258	0.0250

るために動水圧はすべて流速に換算し、前と全く同様

図一6 実験 I' 中心軸流速減少の状況
Center-Line Velocity on a Horizontal Board



図一7 実験 I' 流速水平分布
Distribution of u on a Horizontal Board



に整理した結果は図一6及び図一7である。図一6から底板の存在しないその位置のいかんは中心軸上最大流速に何ら影響を及ぼさないものと言ふことができる。また図一7によつて、速度分布はこの場合にも十分な相似性

をもち、中心軸附近を除きほとんど底板の影響を受けずに Tollmien の理論曲線に一致することが確かめられた。実験常数 (混合距離係数) c の値は表-3 に示すごとくほぼ一定値をとり、その平均は $c=0.0244$ となる。この値は理想噴流の実験において C 領域について得られた c の値 (平均 $c=0.0160$) と比較するとかなり大きな値である。

静水中に入流する水流によつて底板が受ける全動水圧は実験の結果から、

$$P = \frac{w_0}{g} \cdot 0.473(u_0 d_0)^2 \quad (\text{C.G.S. 単位}) \dots (5)$$

となる。一方流速 u_0 、直径 d_0 で空気中に自由に射出する水脈が平面板に衝突してこれに及ぼす全動水圧は、

$$P_0 = \frac{w_0}{g} \cdot 0.785(u_0 d_0)^2 \quad (\text{C.G.S. 単位}) \dots (6)$$

となる。従つて

$$\frac{P}{P_0} = 0.60 \dots (7)$$

である。

II 気泡を混入せる垂直落下水の実験

この場合には、導流ガラス管を下槽水面上 h の距離で切つてこれ以下を自由落下とし、気泡を連行せしめた。流量 Q 及び h を種々に変えて貫入水脈の直径 d と貫入流速 u_0 との組合せ 16 とおり (表-4) に対し

とき領域区分はあらわれなかつた。そこで u_c/u_0 と x/d との関係は片対数グラフに画くと図-8 のごとくになつて、すべての測定値はほぼ 2 群に分かれ、各群はほとんど直線をなすことが認められる。いま Reynolds 数を $Re = u_m d / \nu$ (ν は動粘性係数) であらわすと、これら 2 群の境界は $Re = 25000 \sim 30000$ の範囲で定められるように思われる。このように減速の状況が 2 群に分たれる理由は明確でないが、 u_0, d の大なるほど気泡連行量が多く、従つて流速減衰の程度もいちじるしい傾向となるのは当然である。これら 2 群に対して実験的に次の各式が得られる。

$$Re < 25000 \quad u_c/u_0 = 1.235 \exp(-0.109 x/d) \dots (8a)$$

$$Re > 30000 \quad u_c/u_0 = 1.235 \exp(-0.137 x/d) \dots (8b)$$

(8a) 式に対する Re の下限及び (8b) 式に対する Re の上限の値は明らかでなく、実際上の目的にはさらに Reynolds 数の大なる場合について観測を行う必要がある。

III 気泡を混入しない斜め落下水の実験

導流ガラス管を水平と 60° の角度に傾斜せる場合の実験であつて、坐標は図-9 に示す。速度の貫入方向 (x 軸方向) の成分を測定した結果、斜めの場合にも速度分布曲線は x 軸に対して対称であることが確かめられた。 u_c/u_0 と x/d_0 との関係を図-3 と同様に整理す

表-4 実験 II

実験記号	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
流量 (測定値) Q cm ³ /s	569	458	392	304	578	444	414	138	172	150	98	64	172	134	102	81
自由落下距離 (測定値) h cm	26.68	26.94	27.13	27.40	11.67	11.97	12.06	13.10	27.73	27.95	28.16	28.41	11.13	11.32	11.52	11.67
貫入水脈直径 (計算値) d cm	1.55	1.45	1.37	1.23	1.72	1.62	1.59	1.03	0.83	0.76	0.69	0.57	0.92	0.87	0.81	0.75
最大貫入流速 (測定値) u_0 cm/s	315.0	284.1	270.5	256.8	271.2	230.0	212.6	168.8	331.0	290.7	269.1	251.7	286.0	239.0	208.0	184.0
平均貫入流速 (計算値) u_m cm/s	300.9	278.6	267.1	254.2	249.7	216.3	209.5	167.1	317.6	285.2	265.1	249.2	261.4	224.5	197.3	182.2

て中心軸上の最大流速 u_c を測定した。図-3 と比較するためにこれと同様に実験値を整理した結果は理想噴流と全く異なつた傾向を示し、図-3 に見られるご

れば図-10 のごとくになり、A, B 両領域は垂直落下水の場合と異なるが、C 領域の区間が短くなつて次式の関係を得る。

図-8 気泡混入落下水 (実験 II, III) 中心軸流速減少の状況
Deceleration of Center-Line Velocity for Free Fall

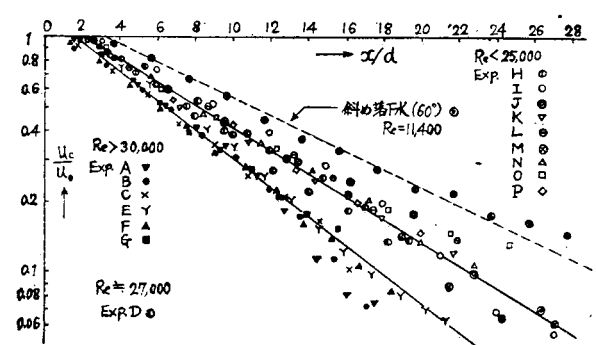
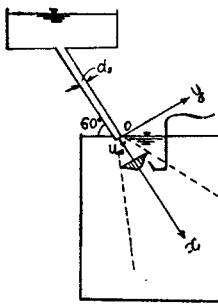


図-9 斜め落下水の
実験略図
Submerged Jet with
60° Inclination

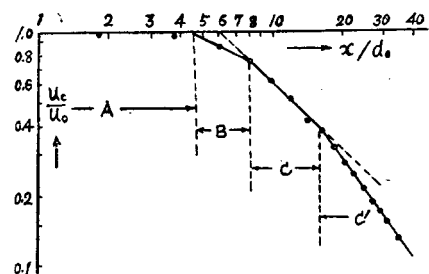


C 領域：
 $x/d_0 = 8.2 \sim 16$
 $u_c/u_0 = 6.3 / (x/d_0)$
..... (9a)

C' 領域： $x/d_0 > 16$
 $u_c/u_0 = 13.4 / (x/d_0)^{1.4}$ (9b)

C' 領域の上限は不明であるが、恐らくある x/d_0 の値において D 領域に移行するものと思われる。C 及び C' 領

図-10 実験 III (斜め落水水) 中心軸上
流速減少の状況
Distribution of Center-Line Velocity for
Submerged Jet with 60° Inclination



域における y 方向の流速分布はほぼ Tollmien の理論曲線に近い形で相似性を保ち、混合距離係数 c の値はこの実験において $c=0.0171$ を得、垂直落水水について求められた c の値 ($0.016\sim 0.018$) によく相応している。

IV 気泡を混入せる斜め落水水の実験

傾斜 60° の導流ガラス管の管口を下槽静水面からわずかに 1 cm 離し、自由落水水の貫入方向が水平と 60° に保たれるようにして気泡を連行せしめた。最大貫入流速は $u_0=264\text{ cm/s}$ であった。前段と同様 x 軸を含む鉛直面内において y 方向の速度分布を測定せる結果 x 方向の最大流速 u_c はいかなる深さにおいても正しく x 軸上に生ずることが確かめられた。この u_c が貫入部よりの距離 x にもなつて減少する状況は図-8 に記入してあるが、この場合実験的に次の関係が得られる。

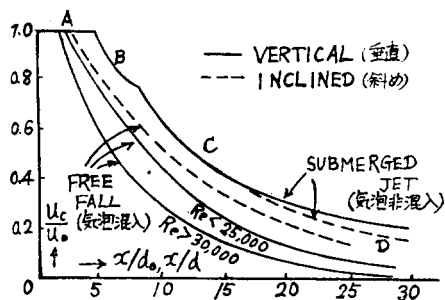
$$u_c/u_0 = 1.235 \exp(-0.036 x/d),$$

$$Re = 11400 \dots\dots\dots (9)$$

これはきわめて貧弱な実験値から求めた結果ではあるが、気泡混入の垂直落水水について求めた実験式と全く同一であり、ただ流速減衰の割合を与える指数の累の値が垂直の場合に比していちじるしく小さい。これは、垂直落水水においては貫入水脈とともに連行される気泡と、一旦深くまで押し込まれた後鉛直上方に上昇する気泡との両者の作用で乱れを生ずるのに対し、斜め落水水では後者の影響を受けないという観測結果からも確かめられる。

以上の実験結果のまとめとして、図-11 に垂直落下

水並びに斜め落水水 (水平と 60°) の、それぞれ気泡を混入せざる場合と混入した場合における、中心最大流速の距離 x にもなう減衰の状況を実験曲線による
図-11 各実験における中心軸流速減少状況の比較
Comparison of Deceleration for Each Cases



つて比較図示した。

本研究は東大河海実験室において東京大学本間仁教授の終始御懇切な御指導の下に行つたものであつて、ここに厚く御礼を申し上げ、あわせて実験に協力された安守漢氏、水野昭氏、甲斐連一氏、松本嘉司氏に深く謝意を表する。

参考文献

- 1) W. Tollmien: Berechnung turbulenter Ausbreitungsvorgänge. Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik, Band 6, 1926, s. 466
- 2) L. Prandtl: Über die ausgebildete Turbulenz. Verhandl. II, Intern. Congr. Tech. Mech. Zürich, 1926.
- 3) A.M. Kuethé: Investigations of the Turbulent Mixing Regions Formed by Jets. Journal of Applied Mechanics, vol.2, 1935. p.p.87~95.
- 4) M.L. Albertson, Y.B. Dai, R.A. Jensen & H. Rouse: Diffusion of Submerged Jets. Proceedings A.S.C.E., vol. 74, No.10,1948, p.p. 1571~1596.
- 5) 佐藤清一・細井正延: 噴流に関する研究 (1)・建設省土木研究所報告, 第 81 号の 4, 昭.26. 3.
- 6) D. Citrini: Diffusione di una vena fluida effluente in un campo di fluido in quiete. L'Energia Elettrica, April, 1946.

(昭. 28. 4. 10)