

(A-1) ペンストック呑口における渦の発生について
—流出渦実験における相似性—

宮崎大学工学部 吉高 益男

はじめに、九州電力川原発電所（宮崎県：小丸川水系）においては以前よりペンストックの振動水槽に渦が発生するなどの問題があつた。調査によりペンストックの振動原因は水車にあると判断してもよいと思われたが、水槽に渦が発生するのもこのましくないのでペンストック取替時を利用して水槽の改良も行うことになった。このため宮崎大学工学部水理実験室に1/25の模型を設置して渦の発生を防ぐ構造を実験的に検討した。実験設備は図-1のように作られた。

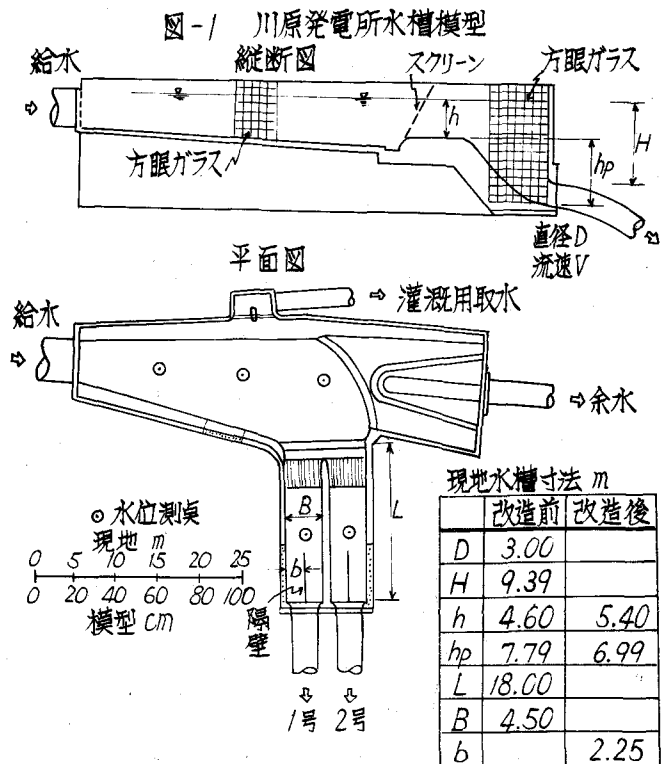
この実験にあつて渦の発生が模型実験により検討しうるかどうかが確信はなかつたが、現場の観察を行い模型実験の結果を検討してみると1/25模型である程度改造後の状況も推定しうのではないかと思つた。そして現在改造工事が完成し若干の観察を行つたが、渦の防止工法及び渦の相似性について模型実験の結果をある程度満足していることがわかつたのでここに報告する。

I 渦の発生について

§1 概要

ペンストック呑口の水深が小さいと渦が発生し、その結果ペンストックに空気が吸込まれ流量の減少と水車運転の不円滑をおこす。この水深 H をペンストック径 D の間に $H/D > 1.5 \sim 2.0$ なる関係があれば渦の発生による有害な空気の巻き込みはおこらないといわれているが、川原発電所では $H/D = 3.1$ で水深は大体充分とみられるのにかなり大きな渦が発生して空気の巻き込みや落差の損失などの点で心配であつた。

H/D の限界は各水槽まちまちで、一つの水槽においても静止した水の状態から水を流しはじめてもなかなか渦は発生しないが、はげしく動いている場合は深い水深でも渦は発生するように、その範囲はかなり変動がある。



ペンストック呑口における渦の発生について

よつて渦の発生は呑口水深に関係するばかりでなく、水槽全体の水の動きに支配され、水の動きによつては充分な呑口水深がとられていても渦は発生し空気錐に近い渦系は呑口までのびることがあると考える。即ち水の動きは呑口部における水槽、導水路の形状、ベンストックの径と取付状態、使用流量などにより一定の循環を生じ、単にHとDとの関係だけ考えるだけでなく水槽全体として水の動きを確めて渦の発生を防ぐようにしなければならぬと考える。(吉越盛次：水圧管呑口の水深について：電力技術研究所報昭23、5号)

§2 呑口上流部敷の必要水深

川原発電所の模型実験は上述の意味により検討されたが、今回は呑口上流部敷(スクリーン敷)の水深の影響についてのみ述べておく。

この構造においては渦の発生状況に対し次の関係があると考えられる。

$$f_9 \left(\frac{V}{\sqrt{gD}}, \frac{Bh}{D^2}, \frac{L}{B}, \frac{h_p}{D}, \frac{b}{B}, f_0 \right) = 0$$

水槽の形状の影響は Bh/D^2 , L/B , h_p/D , b/B

(その他上流の水槽形状の影響もあり)で、呑口の形状は f_0 。(入口の損失水頭係数)、使用流量は $F_r = V/\sqrt{gD}$ (呑口のFroude)で示される。

Bh/D^2 と F_r との関係渦の状況で図示すると図-2のようになる。

渦の判定についてはなかなか客観性のある方法がなく渦の発生するときと空気を連行しはじめるときとにわけ方法(栗津清蔵：単一ポンプ槽の設計について：第16回土木学会)や渦の形できめる方法(荻原能男：水平流出渦の研究：第17回土木学会)などがあるが、我々の場合渦が連続して発生していないので一応A：回転のみ、B：かなりはつきりした渦・心に強制渦、C：渦糸が呑口まで発達する。D：表面にあわだちがおこり空気の混入があるものという限界を考え5分間の測定中に比較的どの範囲の状態がおこるかを判定した。

図-2より渦の発生が活潑な状態、渦糸即ち空気錐に近いものが発生する状態及び空気連行の状態の限界水深 h_b , h_c , h_d を求めてみると次式のようになる。(2号管について)

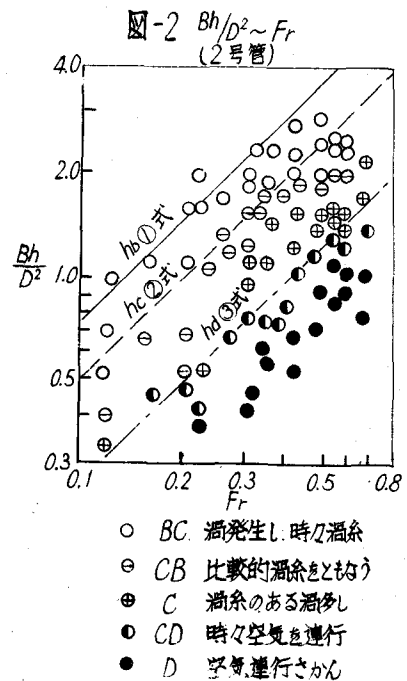
$$Bh_b/D^2 = 7.5 F_r \dots\dots ①$$

$$Bh_c/D^2 = 5.0 F_r \dots\dots ②$$

$$Bh_d/D^2 = 2.55 F_r \dots\dots ③$$

ただし F_r が大きいと測点はこれらの式からはずされて F_r の影響が小さくなるようにみうけられる。これが模型縮尺の影響かどうかははつきりしない。

これらの式より川原発電所の水槽について計算してみると $h_b = 6.46 \text{ m}$, $h_c = 4.26 \text{ m}$, h_d



$=2.19\text{ m}$ となり、現在の常時水深 4.60 m に対し渦の発生はかなり活潑な状態にある($7500\text{ KW}-16.5\text{ m}^3/\text{s}$)。又 4.60 m の水深では $11.7\text{ m}^3/\text{s}-5000\text{ KW}$ 程度で渦の発生は活潑となる。

(表-1 参照)

§ 3 渦防止対策

上述のスクリーン敷の水深を検討したほか、水槽全体にわたって水位、流向、流速分布等を測定した結果、水槽の形状に疑問があつた。しかし水槽全体の改造は経済性がないので、呑口部に隔壁を入れて水の循環を直接的におさえる方法を考えた。それと共にスクリーン敷も極力下げることになつた。

そのため循環の形状、寸法、個数の検討実験を行つた。この場合隔壁により呑口水槽巾 B は小さく分割され模型で b (図-1) は 9 cm (1枚)、 6 cm (2枚) となり、後述するように渦の再現は困難であつたが、ある程度相似性は残っており比較検討の結果経済的なものとして長さ 7.00 m 、高さ 2.40 m (水面下 2.00 m) のもの1枚を挿入し、あわせてスクリーン敷を 0.8 m 下げることになつた。

II 渦の相似性について

§ 1 概要

渦の模型実験では Froude 数 Reynolds 数 Weber 数まで考えねばならぬが、ここでは、Froude 数をあわせて水を流し、現場の観察も行い渦の相似性はどのようなものであるかを検討してみた。

ここで相似性というのはあくまで観察上の問題であり、模型において粘性及び表面張力の影響がどの程度あるかは取扱えなかつた。渦の実験はかなりの無理があるので、改造案の実験より現場を推定することはかなり大胆であつたが、将来は $\Gamma=2\pi v r$ (原点より半径 r における周速度 v) によつてあらわされる自由渦の循環を実験的に確めることにより粘性及び表面張力の影響を知り渦の相似率を確立して実験を行うべきであろう。

§ 2 渦の大きさと継続時間

模型における渦の大きさは渦の凹部がはつきり認められる円の直径をもつてした。この測定はかなり主観的になつたが、渦の大きさと継続時間との関係を調べてみるとある程度の相関関係があるように見うけられた。よつて渦の大きさと平均継続時間でプロットしてみると図-3のようになる。

1 cm 以下のものは盛に発生はするが強制渦だけが目だち周囲の自由渦の動きはあらわれない。即ち水面の凹部が瞬間的にあらわれるだけである。

図-3より発生した渦は大きい程大きなエネルギーをもっており消滅するまでの時間は長い。しかしある大きさ以上になると継続時間は変らなくなる。又隔壁のある場合はやや継続時間が短くなるし、渦の最大値も小さくなってくる。これらのことは水槽壁の影響も考えられ模型の縮尺にも関係することであろう。

図-3には現場観察の結果もプロットしてみた。渦の状況は図-4のように混合渦であるが、中央の強制渦の直径 d を写真により測定し $2d$ を現場における渦の大きさとしてみた。 $2d$ の水面の下がり渦の中心の深さを s とすると理論上 0.1255 になり(図-4)模型で凹部が認められるところと大体一致すると考えた。

図-3をみると現場観察は大体模型実験の延長上にある。それで継続時間を推定することにより現場の渦の大きさを知ることができるのではないかと思う。勿論この場合渦の大きさは固定されたものでなく測定中も変化していて、大きさと I 。

§2の渦の測定との間に確な相関を見出すのは困難であつた。しか

し大きな渦程強いわけで、模型で渦糸をともない空気も連行するようになる O 型は 2 cm 以上の渦が多かつたのに対し、現場では $70\text{ cm} \sim 80\text{ cm}$ 以上の渦がそのような状態に近く浮遊物が巻き込まれ音を発していた。

渦の大きさは実際は図-4の s を測定して判定するのがよりよいと考えたが、短時間に測定できなかつた。渦の横断形状を測定された昼神発電所模型実験（吉越盛次：水稲の水圧管呑口に発生する渦：電力技術研究所報昭24、8号、9号）によるとFroude数による通水で渦の横断形状の相似性はあつたとされている。我々の測定方法による大きさからいえば模型の2.5倍よりやゝ大きなものが現場にはできている。これも模型に粘性及び表面張力の影響が大きいことから当然であらう。

§3 発生回数と継続時間

模型は $1/25$ であるから通水時間はFroude数により $1/5$ として発生回数と継続時間を測定したのが表-1であり、改造後の測定の一部も示されている。

Froude数により通水時間をあわせてみると流量の小さい場合や副渦以外は発生回数は殆ど同じで、平均継続時間は模型が大体 $1/5$ とみてよいであらう。尚No I、Ⅲで現場の主渦の継続時間が短いのは逆方向に回転する副渦によるものであらう。Froude相似率により周速度も $1/5$ 、大きさも $1/25$ と仮定すると渦の各点での角速度は模型が5倍となる。平均継続時間を $1/5$ とみれば1回の渦の回転数は等しくなる。実際には回転数は等しくなかつたが、周速度が粘性と表面張力のため

図-3 渦の大きさと継続時間

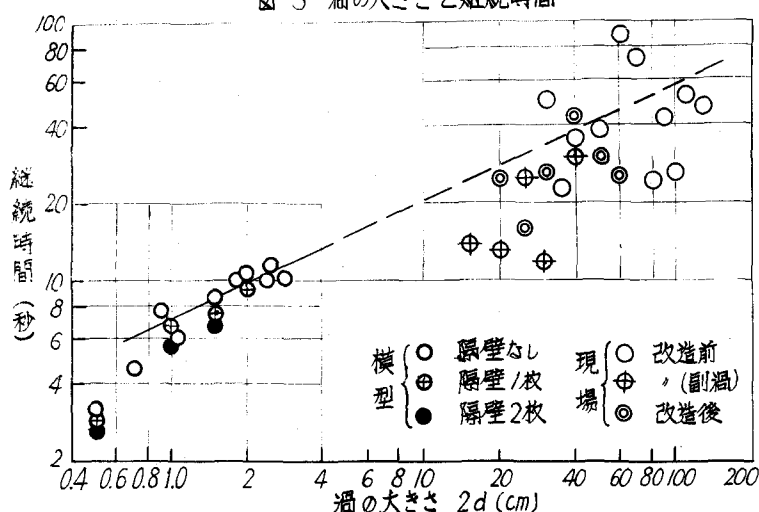
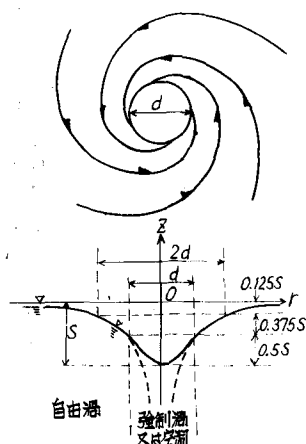


図-4 渦の状況



よりおそくなつており平均継続時間はやはり大体1/5とみてよいと思つた。

§ 4 発生状況

現場及び模型の概況は図-5、図-6 のように渦の発生場所は大体同じである。ただ2号管の隅部にできる副渦は比較的小さく模型ではできない。図-3の現地の副渦よりみて模型では大きさは1 cm 以下、継続時間は3秒以下になると推定され渦になる程ではないからであらう。

表- 1 現場及び模型の渦の観察結果

No.	出力 KW (流量m ³ /s)		模型流量 ℓ/s		発生回数		総計継続時間 sec		平均継続時間 sec		備 考
	1 号	2 号	1号	2号	1号	2号	1号	2号	1号	2号	
I	7500 (16.5)	2000 (6.01)			22	13	1113	240	50.6	18.5	現場 (副渦)
						3		39		13.0	
					5.28	1.92	15	0	126	0	8.4
II	3000 (7.87)	7500 (16.5)			22	20	899	1440	40.9	72.0	現場 (副渦)
						21		805		38.4	
					2.52	5.28	8	30	77	339	9.6
III	5200 (12.19)	5200 (12.19)			14	23	1466	396	105.0	17.3	現場 (副渦)
						6		69		11.5	
					3.90	3.90	16	20	120	273	7.5
改造	6400 (14.2)	6400 (14.2)			4	9	83	308	20.8	34.2	現場
					4.55	4.55	0	17	0	107	0

(註) 観察時間は現場が30分間、模型が6分間

澄概用水に6.5 m^3/s (2.08 l/s) 分水

図-5 現場の水面流況
1号、2号共6400 KW

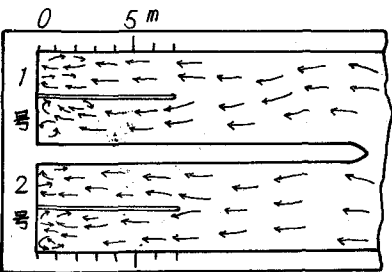
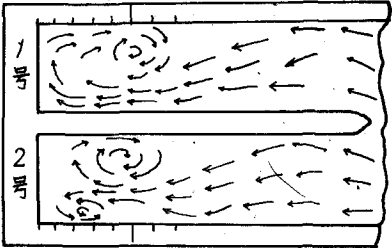
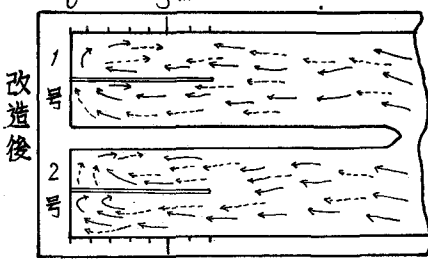
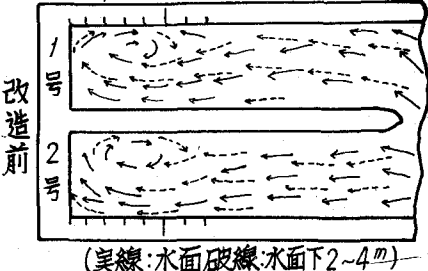


図-6 模型の流況
1号、2号共4.55 l/s (6400 KW)



§ 5 隔壁のある場合の実験

I § 3 の理由で隔壁を挿入した実験を行つたが、渦の大きさと継続時間は図-3 に示される。又隔壁の寸法は考えず発生した渦の全平均継続時間を計算すると隔壁のない場合、1枚、2枚の場合夫々10.0、7.1、4.3秒となる。これは長い継続時間をもつ大きな渦が発生しなくなつたためでもあるが、同じ大きさの渦でも隔壁のある場合は継続時間が短くなつてくる傾向にあることから、模型水槽の影響も幾分か考えられる。即ち渦の発生する場所が狭くなると渦の再現が段々困難になることを示す。又改造後の状況で表-1の1号水槽に示されるようB型の渦が現場で時々発生していたが、模型では発生せず、2号水槽では発生回数が現場がやゝ少なくなつていた。しかし大きさ等では大体推定していた通りであつた。

§ 6 渦の相似性

以上の考察により次のような項目は大体言えると考えた。

- ① 渦の模型実験も Froude 数により通水して大体よい。
- ② 渦の大きさと継続時間との間に 模型から実物まで相関がありそうだ。
- ③ 渦の寸法の相似性は大体あるが、模型はやゝ小さく再現される。
- ④ ある大きさ以下の渦は模型では再現されない。
- ⑤ Froude 数による通水時間で発生回数、継続時間は推定しうる。
- ⑥ よつて継続時間より大きさを推定し、悪影響のある渦の発生は想像できる。
- ⑦ 主要な渦の発生場所は大体同じである。

川原発電所水槽実験では1/25の模型を使用して大体現地と同じ状況がえられた。そして渦発生防止のための実験でも以上の推定方法により改造後の状況を判断し、現場観察を行つた結果大体推定していたような状況であつた。

しかし模型にあらわれる渦はエネルギーが小さく粘性や表面張力又は他の外力（例えば流向測定のための紙フロートにも影響される）の影響が大きい。これらの影響が明確でない現状では模型は極力大きくすべきである。我々の場合も隔壁のある状況もない状況と同じくするよう即ち図-3よりみて同じ大きさの渦は継続時間が同じであるように、又改造前でも副渦が発生する程度に大きな模型にすべきであつた。模型の渦が1cm以下では意味がないとすれば現地の考えられる最小の渦がそれに対応するだけの模型縮尺をとるべきで、我々の場合も1/20~1/15以上にすべきであつたと考える。渦の模型実験では模型縮尺の小さいことは致命的であると思う。又流出渦の実験結果は適用範囲がかなり限定されることになる。

あとがき 渦の問題を考えると空気の流れ込みだけでなく低落差発電所などのように落差の損失も無視できないこともあろう。これらの問題まで実験で確める場合、渦の相似率の確立が益々必要となつてくるだろう。この報告で渦の模型実験での相似性を簡単に考察してみたが、わずかの現場観察しかないまま推論したので将来は理論的な検討が行えたらと思つている。

この問題を御提示され資料をお貸し下さつた九州電力宮崎支店前野——土木課長、大橋光太郎係長及び課員の方々にあつく感謝する次第である。