

空気吸込渦の模型縮尺効果に関する実験的研究

Experimental Study on the Scale Effect of Model with the
Air-Entraining Vortex

田中真一 * ・田川 充 **

by Shin-ichi Tanaka and Mitsuru Tagawa

The model scale effect in the vortex experiments cannot be avoided due to the influence of the viscosity.

In this study we evaluated quantitatively the scale effects in the model experiment of the intake vortex using five kinds of scale model, and therefore we propose a new experimental method.

As a result, when we experiment with the intake vortex in Froude model, the method correcting water viscosity by water temperature control is effective for adequate evaluation of the scale effect.

Keywords: intake vortex, scale effect, Froude model, viscosity model experiment

1. 緒言

水力や火力・原子力発電所の取水口において、水域の広さやかぶり水深が不足する場合には、取水に伴って渦が発生する場合があるが、これが空気の吸い込みにまで至ると機器の振動やウォーターハンマー等、運転への影響が懸念される。このため、渦発生等の水理的安定度を左右する取水口形状やかぶり水深を決定することは工学的に重要な課題である。

このような取水口に発生する渦については、現象に不安定性、不規則性等の複雑な要素があるため、相似則等理論的な説明が困難な問題とされているのが現状である。

ここで、取水口渦と空気吸い込みの特性を実験的に解明するにあたり、現地に比べ模型が小さいことにより発生する「縮尺効果」（水の物性、特に粘性力および表面張力に起因する縮尺模型への影響）は、避けることができない。そのため、渦の発生や空気の吸い込み状況が現地と異なることが予想され、実験結果からは、現地の推定・評価が困難となる。

そこで本研究は、「取水口渦」について、縮尺の異なる5種類の模型を用いて相対的に同一条件の下で実験を行い、縮尺効果を定量的に評価し、実験手法および評価方法の確立を図ることを目的にしている。

* 正会員 北陸電力㈱ 土木部
(〒930 富山県富山市牛島町15-1)

** 正会員 北陸電力㈱ 地域総合研究所
(〒930 富山県富山市久方町2-54)

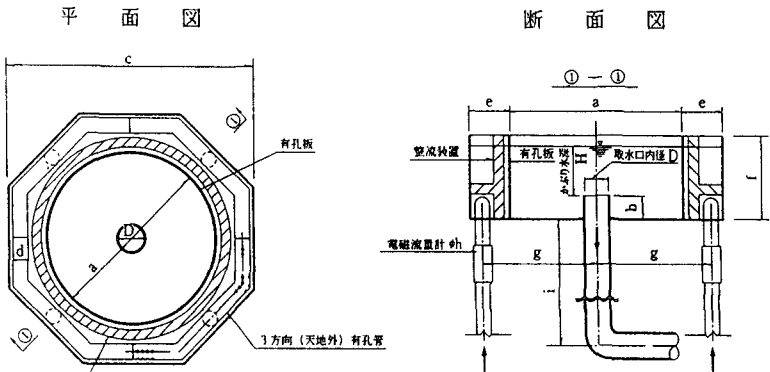
2. 実験装置と実験内容

2. 1 実験装置

本研究に使用した実験装置を図－1および表－1に示す。取水方式は、鉛直方式とし、渦の性状の究明を行いやすくするために円形貯水池を想定し、地形等のない基礎的な設備形状とした。

取水口は、水槽の中心に設置し、水は取水口に向かって全周から流入させ、偏流（旋回流）を与えない条件とした。

また、取水口は水槽底面より、管内径分突出した構造とした。



図－1 実験装置

2. 2 実験内容

各模型について、流量およびかぶり水深を変化させ、現象の視認が容易で且つ設計に直接結びつくと考えられる「空気吸込限界水深」を測定する。また、粘性に直接影響を与える水温の影響についても測定する。これらより、縮尺効果の検討を行い、任意の縮尺で行った取水口渦の実験結果から、原型（現地）での取水口渦の発生状況を正しく評価できる相似則の補正方法を究明する。

2. 3 実験方法

流量は、各模型で5ケース程度行い、各々の流量でかぶり水深と水温を変化させ、空気の吸い込み状態を測定した。測定ケース一覧を表－2に示す。

ここで、空気の吸い込みが一度でも目視で確認できた場合、空気吸い込み有りと判定し、無しと有りと判定境界を空気吸込限界水深とした。

3. 実験結果

各模型について、測定した結果を縦軸にかぶり水深比（＝かぶり水深／取水管内径）、横軸に水温を取り境界線を引いた。図－2は、原型模型の450ℓ/sの場合の空気吸込限界を示したものであり、それを流量ごとに示したものが図－3である。この図より、かぶり水深比は、水温が上昇するにつれて大きくなっており、水温との強い相関が見受けられる。他の縮尺模型も同様の結果である。

次に、かぶり水深比をパラメーターに空気吸込限界時における流量、管内Fr数、管内Re数、管内流速

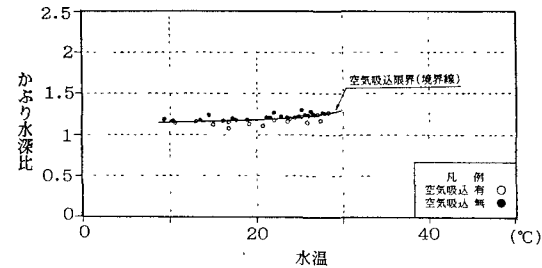
表－1 模型寸法一覧表

単位 mm

記号	原型模型	縮 尺 模 型				
		縮 尺				
		1/1	1/2	1/4	1/8	1/16
a	3,500	3,500	1,650	875	438	
b	480	240	120	60	30	
c	5,124	5,124	2,438	1,281	642	
d	300	300	100	75	40	
e	812	812	394	203	102	
f	1,700	1,700	425	425	213	
g	2,132	2,132	1,070	578	289	
h	300 or 250	300 or 250	150	80	25	
i	2,388	2,388	1,800	1,500	1,300	
D	480	240	120	60	30	

表－2 測定ケース一覧表

模型サイズ	測定流量 (ℓ/s)	水温 (℃)	測定時間
原型模型	450, 384, 288, 192, 160	10 ～ 30	最大 20 分
1/2 模型	181, 128, 96, 72	10 ～ 30	最大 15 分
1/4 模型	36, 32, 24, 18, 12	10 ～ 45	最大 10 分
1/8 模型	8, 6, 5, 67, 4.5, 3, 2, 12	10 ～ 45	最大 7.5 分
1/16 模型	2, 1.5, 1.12, 1, 0.75	15 ～ 40	最大 5 分



図－2 空気吸込限界境界線(原型模型450ℓ/s)

(以下Fr数, Re数, 流速という。)を各々水温毎(5℃間隔)に求め, 整理した結果を以下に示す。

ここで, Fr則, Re則, 流速一致の各々の相似則が成り立つ場合, 各模型の線が, 一つの線上に重なる。

3. 1 かぶり水深比と流量の関係

空気吸込限界時における, かぶり水深比と流量の関係を図-4に示す。

その結果, 流量が大きくなると, かぶり水深比が大きくなる傾向にある。また, 同一流量において, かぶり水深比がばらついているのは, 実験水温が異なっているためである。この図からも, かぶり水深比は水温によって大きく変化することが分かる。

3. 2 かぶり水深比とFr数の関係 (Fr数一致)

空気吸込限界時における, かぶり水深比とFr数の関係を図-5に示す。

その結果, 同一かぶり水深比において模型が小さくなるほど, Fr数が大きくなる傾向にある。

また, 同一Fr数において模型が小さくなるほど, かぶり水深比が小さくなり, 空気が吸い込みにくくなる。よって, 空気吸い込みの限界評価に対して, Fr則では過小評価となる。

3. 3 かぶり水深比とRe数の関係 (Re数一致)

空気吸込限界時における, かぶり水深比とRe数の関係を図-6に示す。

その結果, 同一かぶり水深比において模型が小さくなるほど, Re数が小さくなる傾向にある。

また, 同一Re数において模型が小さくなるほど, かぶり水深比が大きくなり, 空気が吸い込みやすくなる。よって, 空気吸い込みの限界評価に対して, Re数では過大評価となる。

3. 4 かぶり水深比と流速の関係 (流速一致)

空気吸込限界時における, かぶり水深比と流速の関係を図-7に示す。

その結果, 図-5および図-6よりは, データのばらつきは小さくなり, 比較的相似性はあるものの, 評価方法としては十分とは言えない。

3. 5 かぶり水深比と水温の関係

空気吸込限界時における, かぶり水深比と水温の関係については, 図-3に示すように境界線は各流量ともほぼ同一勾配であり, 流量変化量にも規則性が伺える。

そこで, 各模型におけるかぶり水深比と空気吸込

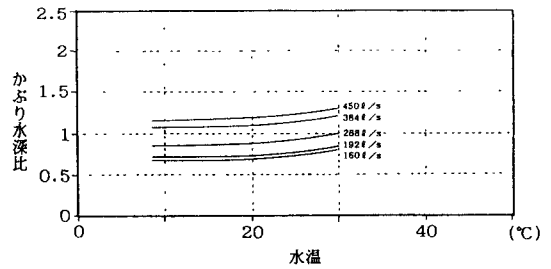


図-3 空気吸込限界境界線(原型模型)

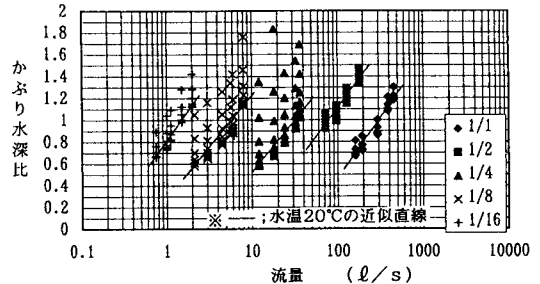


図-4 かぶり水深比と流量の関係

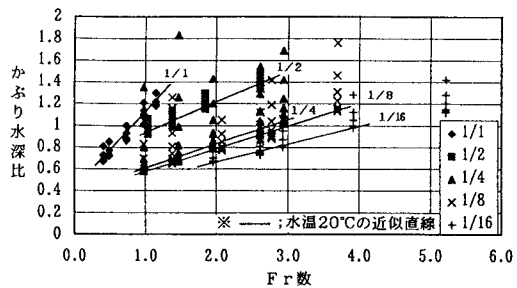


図-5 かぶり水深比とFr数の関係

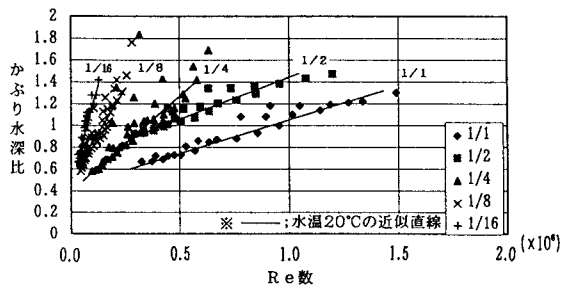


図-6 かぶり水深比とRe数の関係

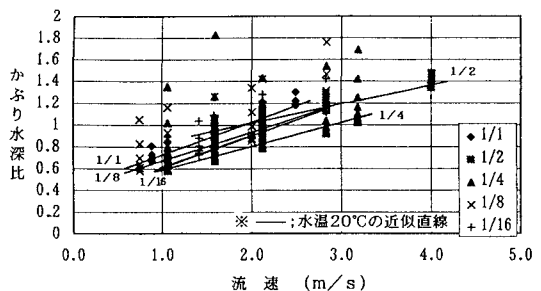


図-7 かぶり水深比と流速の関係

限界時の流量および水温の関係を、4乗の多項式に近似した。(表-3参照)したがって、この近似式により、任意の流量、水温におけるかぶり水深比が推定され、空気吸込限界水深が推算できる。これらを流速一致条件で比較整理すると図-8となる。その結果、比較的大きな1/2 模型は、原型模型と良好に一致しているが、他の小さな縮尺模型は、流速を原型模型よりも大きく歪ませなければ同一現象を再現できないことが分かる。また、これらをFr数一致条件で比較整理すると、図-9となる。その結果、原型模型と縮尺模型では同一水温において、かぶり水深比が大きくかけ離れており、Fr則では縮尺効果が顕著に現れていることが分かる。

表-3 かぶり水深比-水温の近似式一覧表

基本式 $Y=aT^4+bT^3+cT^2+dT+e$ T: 水温 (°C), Y: かぶり水深比 (H/D), Q: 流量 (m³/s)					
模型サイズ	a	b	c	d	e
原型模型	1.94×10^{-7}	1.68×10^{-5}	9.70×10^{-3}	5.56×10^{-4}	$1.798Q + 0.3716$
1/2 模型	2.73×10^{-7}	1.19×10^{-5}	3.31×10^{-3}	-1.91×10^{-4}	$4.018Q + 0.6186$
1/4 模型	3.30×10^{-7}	-1.31×10^{-5}	2.89×10^{-3}	-1.67×10^{-4}	$18.837Q + 0.3217$
1/8 模型	4.35×10^{-7}	-2.32×10^{-5}	4.80×10^{-4}	-2.52×10^{-4}	$90.399Q + 0.372$
1/16 模型	3.29×10^{-7}	-1.42×10^{-5}	2.48×10^{-4}	-0.90×10^{-4}	$368.97Q + 0.3677$
					相関係数
					0.98
					0.98
					0.98
					0.96

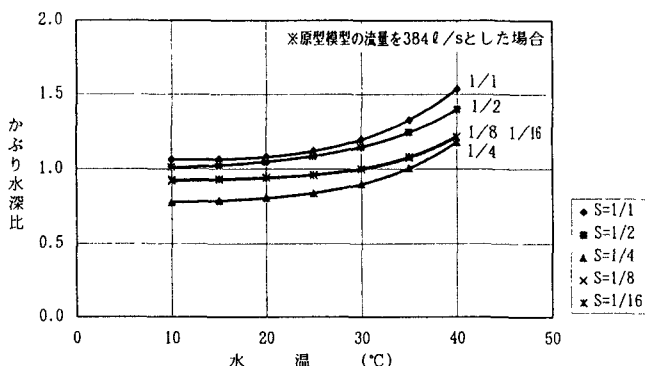


図-8 かぶり水深比と水温の関係(流速一致条件)

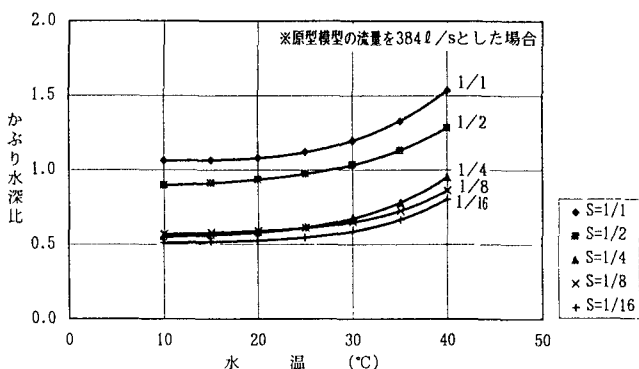


図-9 かぶり水深比と水温の関係(Fr数一致条件)

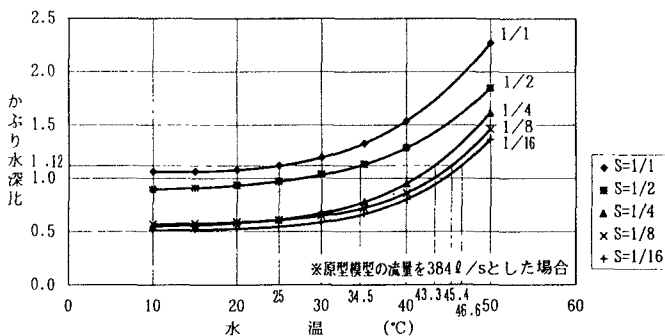


図-10 かぶり水深比と水温の関係(Fr数一致条件)

$$Re_p = \frac{V_m \cdot D_m \cdot L^{1.5}}{\nu_m \cdot L^n} = Re_m \cdot \frac{L^{1.5}}{L^n} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 Re_p ; 大模型の空気吸込限界 Re 数、 Re_m ; 小模型の空気吸込限界 Re 数、
 V_m ; 小模型の管内流速、 D_m ; 小模型の管径、 ν_m ; 小模型の動粘性係数
 L^n ; 小模型の動粘性係数の修正係数、 L ; 縮尺比〔 L_p (原型縮尺)/ L_m (模型縮尺)〕

また、(1)式から指数 n は、動粘性係数と縮尺比によって(2)式のように導かれる。

$$n = \log(\nu_p / \nu_m) / \log(L) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 ν_p ; 大模型の動粘性係数

ここで、(2)式はフローパターンを歪ませない条件の下で、模型実験に使用する水温を何度にするかを決定するためにのみ使用する式である。

したがって、ある条件(原型模型流量384 ℓ /S、かぶり水深比1.12、水温25℃)の場合に図-10より(2)式を用いて指数 n を求め、比較する小模型の規模と指数 n との相関を縮尺比別に整理すると図-11となる。

A 点は、原型模型と縮尺比が2である1/2模型を比較したものであり、B 点は、1/2模型と縮尺比が4である1/8模型を比較したものである。同じ縮尺比において、比較する模型同士の大きさが小さくなるほど指数 n は、小さくなっており、一義的に指数 n を決定できないことを意味している。

また、図-11より、縮尺比と模型の規模との関連性において、指数 n が求まり、比較する小模型の動粘性係数の修正係数(L^n)が算出される。

以上のことを任意の条件にて、夏季(水温25℃)、冬季(水温10℃)に分けて整理し、原型模型と各縮尺模型との修正係数 L^n の関係を示したものが図-12および図-13となる。

次に小模型の動粘性係数を求めるため、(2)式は(3)式のように表される。

$$\nu_m = \frac{\nu_p}{L^n} \quad \dots\dots\dots (3)$$

(3)式により、小模型の動粘性係数が計算されて、模型実験に必要な水温が推定される。この水温が非現実的な高温であれば、模型が小さすぎることを意味しており、模型を大きくして再度計算し、チェックすればよいと思われる。以上をフロー図にすると図-14となる。

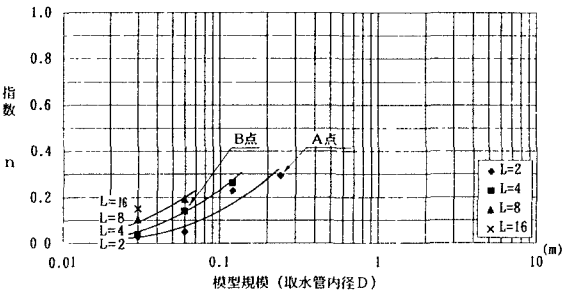


図-11 指数 n と模型規模の関係

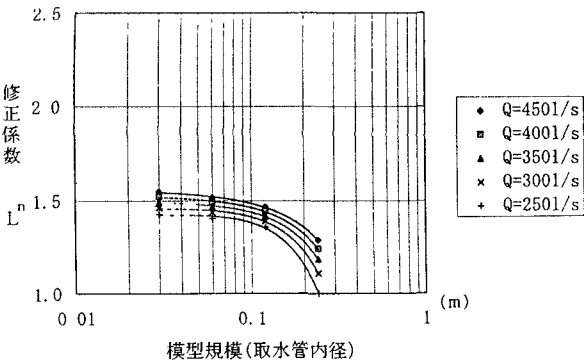


図-12 修正係数と模型規模の関係(夏季25℃)

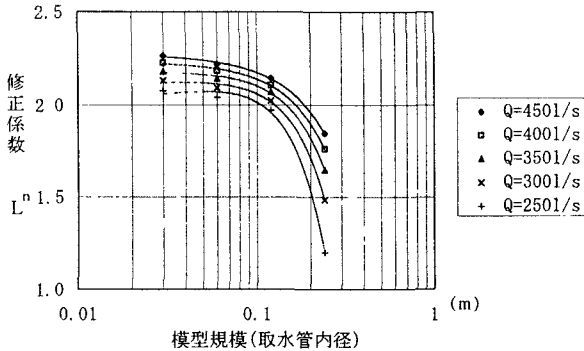


図-13 修正係数と模型規模の関係(冬季10℃)

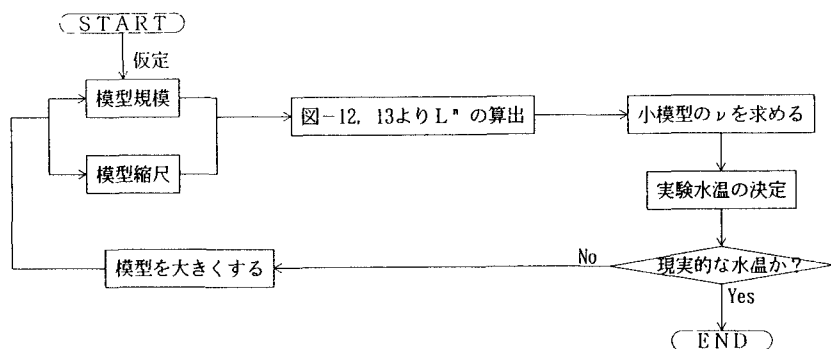


図-14 模型サイズ決定フロー

4. 2 原型（現地）における空気吸い込み状況の推定・評価方法の追究

任意の縮尺で行った取水口渦の実験結果から、原型（現地）における空気吸い込み状況が評価できる方法の追究を行う。

Fr則による各縮尺模型での実験結果（図-10参照）から、水温が変化しても30℃程度までなら、原型と各縮尺模型とのかぶり水深比の較差は、ほぼ一定であった。

そこで、縮尺模型のかぶり水深比にある補正係数を乗ずると、原型のそれが算出されると仮定した場合、その補正係数は表-4となる。

よって、各縮尺模型において、Fr則での取水口渦の実験結果にこれらの補正係数を乗ずれば、原型（現地）での空気吸い込み状況の推定・評価が可能であると思われる。

表-4 各縮尺と補正係数の関係

原型流量 Q/S	補 正 係 数			
	1/2 模型	1/4 模型	1/8 模型	1/16模型
450	1.2	1.9	1.9	2.2
400	1.2	1.9	1.9	2.1
350	1.1	1.8	1.8	2.0
300	1.1	1.8	1.7	1.9
250	1.0	1.7	1.6	1.8

5. 結語

鉛直取水方式においては、流速一致条件で模型実験を行えば、比較的原型と一致することが確認された。

しかしながら、この条件では、流水のフローパターンが歪んでしまい、適正な評価には至らないと判断される。よって、Fr則の下で流速を歪ませることなく、原型と等価なフローパターンと空気の吸い込み現象を同時に再現する実験手法として、水温コントロールで粘性力や表面張力等諸々の影響を一括補正する方法を提案し、その有効性が確認された。

また、任意の縮尺で行った取水口渦の実験結果から、補正係数を用いて、原型（現地）での空気吸い込み状況を評価する方法の有効性が確認された。

参考文献

- 1) 奥村幹夫, 宮沢直季, 荻原能男 : 空気吸込渦の発生形態と液体の粘性に関する実験的研究, 土木学会第46回年次学術講演会Ⅱ-318, 1991
- 2) 江口 譲 : 自由液面でのガス巻き込み現象におけるスケール効果, 電力中央研究所報告, U91005, 1991
- 3) 国立天文台 : 1995, 理科年表, 机上版