

# 参 考 資 料

第十九卷第六號 昭和八年六月

## 風に依る波の發生に就て

(By the late Sir Thomas Stanton, F.R.S., and Dorothy Marshall and R. Houghton.)  
 Proceedings of the Royal Society, Series A. Vol. 137, p. 283-293.

風が吹いてゐる時その下の水面の形をケルビンは數學的に次の如く考へた。即ち水及空氣が無渦流状態に動く完全流體であるとするば風速  $U'$ , 波長  $\lambda$ , 波速  $c$  との間に次の如き關係がある。

$$c^2 = \frac{g\lambda}{2\pi} \frac{\rho - \rho'}{\rho + \rho'} + \frac{2\pi T}{(\rho + \rho')\lambda} - \frac{\rho \rho'}{(\rho + \rho')^2} U'^2 \dots\dots\dots (1)$$

但し  $\rho, \rho'$  は水及空氣の密度,  $T$  は水と空氣との間の表面張力とする。

然し實際には上記の假定は行はれないし, 風速なるものが水と接近してゐる所と少し離れた所と非常に異なるもので, 以上の式は實驗的にも確められない。

水面の形はその上の空氣の壓力分布が判れば數式に表はし得るが, 事實空氣の渦流のため壓力をはつきり知る事が出来ない。従つて風による波の形を完全に論ずる事も不可能であるが, この論文では次の主題の下に實驗をしたからその結果を記する事とする。

- (1) 風が吹いてゐる場合水面の形の検査
- (2) 木で波の形を連れて造り, その上に風を吹かして波型のノルマル・プレッシャーの分布の測定

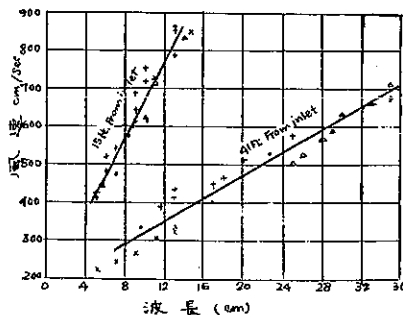
### (1) に関する實驗

實驗は長さ 50 呎, 12 吋角の斷面を有する水平な tunnel で行つた。tunnel の中には 5 吋の深さに水を充し, 兩端及側は傾斜を持たせた。入口と出口は空氣が水面に平行に出入出来る装置をつくり, 途中入口から 15 呎及 41 呎の所に壁にガラス窓をとり付け, 内部の様子を觀測出来る様にした。

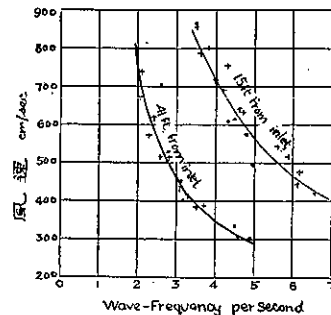
空氣の流れは水面上 3.5 吋の所に取付けたピトー・チューブで測り, 波長, 振動數は次の如き色々な方法で測つた。

先づ tunnel の上に透明なスクリーンを置き, 底から光を透すと波の模様はスクリーンの上に寫る。之を寫眞に撮り後で波長を測る。波長が長くて寫眞に入りきれない時には水面に棒でつないだ二つのコルクを浮し, 棒の長さを加減してコルクが波に會つても pitching しないで上下する様にし, この時の棒の長さを波長とする。波

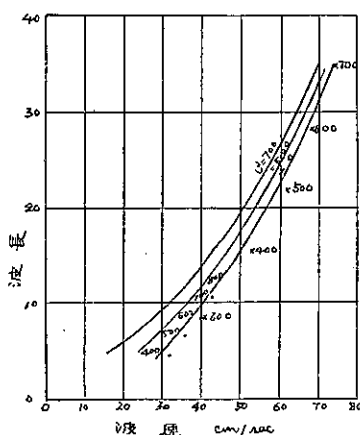
第一圖 風速と波長との關係



第二圖 波の振動數と風速との關係



第三圖



圖中の数字は水面9呎の風速なり

- Kelvin's theory による計算値
- 入口より15呎の所の観測値の平均
- x 入口より41呎 " " "

の振動数は stroboscope で測り、波長と波速とを同時に測るには前記スクリーンを活動寫眞で寫した。

この様な方法で観測した結果は第一表、第二表及第一圖、第二圖にまとめた。又この結果より得た波長と波速との關係を第三圖にまとめ、Kelvin theory による計算値と比較してみた。

波高と波長との比を知るために實驗をして見たが、この比は大體 0.12~0.2 の間にあつた。又波長が 15~35cm の間にある時のを調べた結果、波長が長い程この比も大きくなる事を知つた。

(2) に 關 する 實 驗

先づ水を全部除き、その代り波型をなした木のモデルを入れ、その平均深さを(1)の場合と同じくした。波型は27の單弦波よりなり風下に行く程波高を高くして行つた。波高と波長との比は全部 0.20 とし、最初の波長を 5.1 cm、一番風下のを 21.6 cm とした。

第一表 入口より15呎の所の觀測

風速 cm/sec	波長 cm	波の振動數 per sec	波の速度 cm/sec	觀測方法
445	5.65	—	—	} plate camera
600	8.6	—	—	
730	10.9	—	—	
850	14.6	—	—	
410	5.0	6.9	—	} stroboscope
423	5.0	6.6	—	
445	5.3	6.1	—	
483	6.0	6.2	—	
520	6.0	5.9	—	
543	7.0	5.6	—	
603	8.0	4.8	—	
638	9.0	4.7	—	
645	9.0	4.6	—	
692	9.0	4.2	—	
720	10.0	4.0	—	
755	10.0	4.3	—	
790	13.0	3.6	—	
802	12.0	3.8	—	
855	13.0	3.5	—	
625	10.0	—	—	} floats
715	11.0	—	—	
835	14.0	—	—	
476	7.0	—	32	} cinematograph camera
575	8.3	—	40	
610	9.0	—	39	
615	10.2	—	46	
865	13.0	—	45	

第二表 入口より41呎の所の觀測

風速 cm/sec	波長 cm	波の振動數 per sec	波の速度 cm/sec	觀測方法
226	5.2	—	—	} plate camera
243	7.0	—	—	
265	9.0	—	—	
306	11.0	—	—	
324	13.0	—	—	
333	13.0	—	—	
305	9.0	4.6	—	} stroboscope
382	14.0	3.5	—	
387	11.5	3.7	—	
415	13.0	3.3	—	
436	13.0	3.1	—	
447	17.0	3.1	—	
466	18.0	3.0	—	
514	23.0	2.8	—	
515	20.0	2.6	—	
575	25.0	2.3	—	
623	—	2.4	—	
675	35.0	2.1	—	
740	—	2.1	—	
767	—	2.0	—	
505	25.0	—	—	} floats
525	28.0	—	—	
570	28.0	—	—	
590	29.0	—	—	
635	30.0	—	—	
665	33.0	—	—	
715	35.0	—	—	
300	7.9	—	39	} cinematograph camera
332	9.6	—	43	
400	16.9	—	54	
452	19.9	—	61	
528	23.6	—	63	

ノルマル・プレッシャーは10番目及27番目の波型の2箇所を測り、その結果を dimension の關係上  $p/\rho U^2$  なる term で表はし、第三表及第四圖に掲げる。但し  $p$  は波型の表面の壓力と空氣の靜壓力との差を表はし、 $\frac{1}{2} \rho U^2$  はモデル上の空間の中央に於ける空氣の流れの速度頭とする。

第三表 模型波表面上の  $p/\rho U^2$  の値

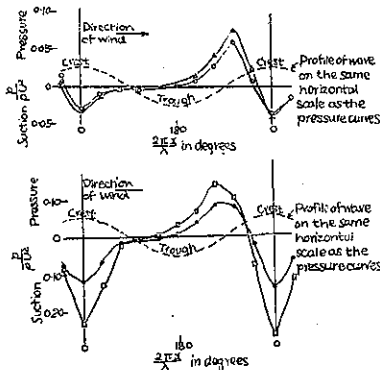
波長  $\xi = a \cos 2\pi x/\lambda$

$a$ in cm	10th wave		27th wave	
	1.11		2.22	
	10.8		21.6	
$\lambda$ in cm				
$\rho U^2$ in dynes/cm <sup>2</sup>	138	273	135	408
$U$ in cm/sec	325	470	330	580
$2\pi x/\lambda$ in degrees				
324	+0.014	+0.006	-0.076	-0.078
0 crest	-0.030	-0.032	-0.119	-0.230
36	-0.010	-0.013	-0.065	-0.125
72	-0.005	-0.004	-0.018	-0.032
108	-0.005	—	-0.012	-0.005
144	-0.004	-0.001	-0.006	+0.005
180 trough	0.000	—	+0.004	+0.029
216	+0.007	+0.016	+0.035	+0.067
252	+0.027	+0.042	+0.082	+0.137
288	+0.060	+0.076	+0.077	+0.101
324	+0.007	+0.024	-0.025	-0.078
0 crest	-0.036	-0.040	-0.141	-0.267
36	-0.014	-0.012	-0.065	-0.113

tunnel 内に於ける pressure gradient による補正を含む

第四圖 模型波の表面に於ける垂直壓力の分布

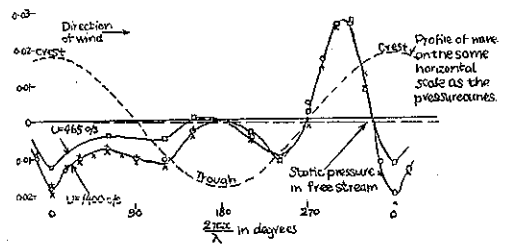
波形を表はす式  $\xi = a \cos 2\pi x/\lambda$



A. (上) 十番目の波  $\alpha=1.11$ cm  $\lambda=10.8$ cm  
 B. (下) 二十七番目の波  $\alpha=2.22$ cm  $\lambda=21.6$ cm  
 ○ 風速  $U=325$  cm/sec      ● 風速  $U=330$  cm/sec  
 △ 風速  $U=470$  cm/sec      □ 風速  $U=580$  cm/sec

第五圖 模型波表面に於ける垂直壓力の分布

波形を表はす式は  $\xi = a \cos 2\pi x/\lambda$   
 $\alpha=1.5$  cm,  $\lambda=7.6$  cm



○ 入口より  $40\lambda$  の所に於ける値  
 + " "  $80\lambda$  " "  
 x " "  $80\lambda$  " " with model reversed  
 □ " "  $80\lambda$  " "  
 }  $U=1400$  cm/sec  
 }  $U=465$  cm/sec

次に空氣の流れに對し波の高さが餘り小さくない場合の影響を除くため、二つのモデル波を 8 呎平方の風洞に入れて實驗してみた。之等の波型は皆一樣な高さの單弦波とし、高さと波長との比は 0.4、波長は夫々 7.6 cm 及 2.6 cm とした。先づ 7.6 cm 波長のモデルを風洞一杯に置き、入口に空氣の縮流等のない様にし、波型の平均高さを 1 吋とし、一度端から波長の 40 倍及 80 倍の所で壓力を測つた所、兩者殆んど一致したので次の實測は全部 1 箇所のみにとめた。

次に 2.6 cm 波長の實驗は、端から波長の 123 倍の所で壓力を測つた。又波高と波長との比の小變化の影響を知る爲に、途中波型を六つ除き、その代りに波長は等しいが比が 0.44 なる波型を挿入してみた。之等の結果を第四表、第五表及第五圖に掲げる。

第四表 波型紙表面上の  $p/\rho U^2$  の値

	波形は $\zeta = a \cos 2\pi x/\lambda$	$a = 1.5_2 \text{ cm}$	$\lambda = 7.6_2 \text{ cm}$	
$\rho U^2$ in dynes/cm <sup>2</sup>	2425	2500	2350	266
$U$ in cm/sec	1410	1425	1390	465
distance from inlet	40 $\lambda$	80 $\lambda$	80 $\lambda$	80 $\lambda$
$2\pi x/\lambda$ in degrees				
270	+0.004	+0.006	—	+0.007
285	+0.010 <sub>s</sub>	+0.013	—	+0.015
300	+0.022	+0.024 <sub>s</sub>	—	—
315	+0.025	+0.027	—	+0.028 <sub>s</sub>
330	+0.012 <sub>s</sub>	+0.013	+0.013	—
345	-0.010	-0.008 <sub>s</sub>	-0.009 <sub>s</sub>	—
360 crest	-0.018	-0.017	-0.019 <sub>s</sub>	-0.012
15	-0.013	-0.013	-0.012 <sub>s</sub>	-0.006
30	-0.010	-0.009	-0.011	—
(45)	—	—	-0.009	—
60	-0.007	-0.006 <sub>s</sub>	-0.008	-0.003 <sub>s</sub>
(75)	—	—	-0.009	—
90	-0.010	-0.009 <sub>s</sub>	-0.011	—
120	-0.010 <sub>s</sub>	-0.011 <sub>s</sub>	-0.012 <sub>s</sub>	-0.004 <sub>s</sub>
150	-0.002 <sub>s</sub>	-0.002	-0.004	+0.001
180 trough	0.000	0.000	0.000	0.000
210	-0.004 <sub>s</sub>	-0.005	-0.005	-0.003
240	-0.010	-0.009 <sub>s</sub>	-0.011 <sub>s</sub>	-0.011
270	+0.004 <sub>s</sub>	+0.002	-0.001 <sub>s</sub>	+0.002 <sub>s</sub>
285	+0.016 <sub>s</sub>	+0.014	—	—
300	+0.026	+0.026	+0.025	—
315	+0.026	+0.026	—	+0.027
330	+0.008	+0.009	+0.012 <sub>s</sub>	—
345	-0.011 <sub>s</sub>	-0.011 <sub>s</sub>	-0.015	—
360 crest	-0.020	-0.020	-0.023	-0.012
15	-0.013 <sub>s</sub>	-0.013 <sub>s</sub>	-0.015	—
30	-0.010 <sub>s</sub>	-0.011	-0.013 <sub>s</sub>	—
(45)	—	—	-0.011 <sub>s</sub>	—

(60)	—	—	-0.011	—
(75)	—	—	-0.012 <sub>s</sub>	—
(90)	—	—	-0.013	—

pressure gradient (=0.001  $\rho U^2$  per wave-length) による補正を含まず

總て波の發生は之と同週期の壓力の分布に依るのであるから、前掲壓力分布の測定値を harmonic components に入れて調和解析で解いて見るのも面白い。第三表及第四表に於て  $U$  の平均値が約 1400 cm/sec になるものを調和解析した結果を第六表に擧げる。之をみると、二番目の調和函數の係數が大きいから、之等の函數の和で與へられる波の形は單弦曲線とは大分違つてくる。

摘 要

或る決つた壓力分布がある時の流體表面の形を計算で求める事は出来るが、逆に風が吹いた時波の上の壓力分布を計算する事は困難である。この實驗では風が吹いた場

第五表 波型紙の表面に於ける  $p/\rho U^2$  の値

波形 $\zeta = a \cos 2\pi x/\lambda$		$\lambda = 2.6 \text{ cm}$
入口よりの距離 = 122 $\lambda$		
$a \text{ cm}$	0.51	0.56
$\rho U^2 \text{ in dynes/cm}^2$	2370	2400
$U \text{ in cm/sec}$	1390	1400
$2\pi x/\lambda \text{ in degrees}$		
270	+0.010	+0.007
315	+0.024	+0.028 <sub>s</sub>
360 crest	-0.002	-0.002 <sub>s</sub>
45	+0.005	+0.002
90	+0.002	+0.001
135	+0.003	+0.004
180 trough	+0.008 <sub>s</sub>	+0.004
225	+0.008 <sub>s</sub>	+0.001 <sub>s</sub>
270	+0.009 <sub>s</sub>	+0.004
315	+0.027	+0.024
360 crest	-0.008 <sub>s</sub>	-0.002 <sub>s</sub>
45	+0.003	+0.001 <sub>s</sub>
90	0.000	0.000

pressure gradient ( $<0.000, \rho U^2$ ) による補正を含まず

合の水面の形とモデルの波形の上に風を吹かして壓力分布とを調べた。この實驗中で波長が 35 cm に及んだのもあつた。波長と波速との關係は第三圖にある通り空氣の運動を無視して水が完全流體として無渦流状態に運動すると考へて數學的に解いたのと殆んど一致してゐる。壓力分布を調和解析した結果は二番目の調和函數の係數の大きいのが目立つ。

第六表 壓力分布の調和解析

波形式  $\zeta = a \cos \theta, \theta = 2\pi x/\lambda$

A. Models in 12-inch tunnel:—

mean depth of air stream, 18 cm

1. $\lambda = 10.8 \text{ cm}$	$a = 1.1 \text{ cm}$	$U = 325 \text{ cm/sec}$		
$p/\rho U^2 = +0.005$	-0.006 cos $\theta$	-0.020 cos $2\theta$	-0.010 cos $3\theta$	....
	-0.023 sin $\theta$	-0.005 sin $2\theta$	+0.005 sin $3\theta$	..
2. $\lambda = 10.8 \text{ cm}$	$a = 1.1 \text{ cm}$	$U = 470 \text{ cm/sec}$		
$p/\rho U^2 = +0.011$	-0.007 cos $\theta$	-0.024 cos $2\theta$	-0.012 cos $3\theta$	
	-0.003 cos $4\theta$	....		
	-0.030 sin $\theta$	-0.007 sin $2\theta$	+0.007 sin $3\theta$	
	+0.005 sin $4\theta$	....		
3. $\lambda = 21.6 \text{ cm}$	$a = 2.2 \text{ cm}$	$U = 330 \text{ cm/sec}$		
$p/\rho U^2 = -0.007$	-0.053 cos $\theta$	-0.051 cos $2\theta$	-0.013 cos $3\theta$	
	-0.043 sin $\theta$	+0.001 sin $2\theta$	+0.008 sin $3\theta$	
4. $\lambda = 21.6 \text{ cm}$	$a = 2.2 \text{ cm}$	$U = 580 \text{ cm/sec}$		

$$\begin{array}{ccccccc}
 p/\rho U^2 = -0.012 & -0.102 \cos \theta & -0.085 \cos 2\theta & -0.030 \cos 3\theta & \dots & & \\
 & -0.062 \sin \theta & +0.006 \sin 2\theta & +0.011 \sin 3\theta & \dots & & 
 \end{array}$$

B. Model in 3-foot tunnel:—

mean depth of air stream, 89 cm

$$\begin{array}{ccccccc}
 5. \lambda = 7.6 \text{ cm} & a = 1.5_2 \text{ cm} & U = 1400 \text{ cm/sec} & & & & \\
 p/\rho U^2 = -0.003 & +0.001 \cos \theta & -0.002_5 \cos 2\theta & -0.009 \cos 3\theta & & & \\
 & -0.003 \cos 4\theta & \dots & & & & \\
 & -0.008 \sin \theta & -0.008 \sin 2\theta & \dots & & & 
 \end{array}$$

譯者註

(1) 調和解析とは或る函数が調和函数の和で表はされる事が解つてゐる場合、且つその函数の周期が知られてゐる時、一週期内に 24 個、12 個或は 6 個の定間隔の函数値を實驗で求め、機械的の計算により逆に係數及 phase を求める方法である。

(2) この實驗に關係のある論文を昭和 7 年 5 月 27 日發行の氣象集誌(大日本氣象學會)第十卷第五號に荒川秀俊氏が載せてゐる。この論文は波に對する空氣の影響を水及空氣の粘性を考へに入れて説いたもので、結論として波の傳播速度及ダンピングは水の單一層があると見做して解いたときと殆んど變りないと述べてゐる。

(伊藤剛抄譯)

## 地下水の流動に関する基本定理及土砂の透水性

(Das Grundgesetz der Bewegung des Bodenwassers. Bodendurchlässigkeit.  
von J. Kozeny, Wasserkraft und Wasserwirtschaft, Jahrg. 28, Heft 4, 16. Febr. 1933.)

砂の如き隔散性物質系内に於ける水の流動に關して Darcy の定理  $v = k J$  が成立することは一般に認められる所であり、又計算にも便利な形を提供するものであるが、係數  $k$  の値に關しては種々の公式が存在する。次に示すものはその最も新しきものである。

土砂より成る塊狀體を考へ、その斷面積を  $F$ 、長さを  $l$ 、その中に含まれる空隙の全體積を  $p F l$ 、更にその中で流水にて占められた部分の體積を  $p_1 F l$  とする。單位體積の流水に及ぼす流れの抵抗  $W$  は

$$\begin{array}{l}
 W = l g J \\
 \text{但し } J = \frac{\text{(壓力水頭+吸上げの高さ)の差}}{l} \dots\dots\dots(1)
 \end{array}$$

空隙流速を  $v_p$ 、平均流速を  $v$ 、粒體の總表面積を  $o$ 、 $o_1 = o/(p_1 F l)$  と置けば、

$$p_1 F v_p = F v \quad \therefore \quad v_p = v/p_1$$

單位體積の水に作用する力を次の如く考へる。

$$W = c \eta v_p o_1^2$$

但し  $\eta$ : 水の粘性係數,  $c$ : 常數

隔散度 (Dispersitätsgrad)  $A = o/[(1-p) F l]$  を用ふれば、

$$W = c \eta v \frac{(1-p)^2}{p_1^3} A^2 \dots\dots\dots(2)$$

\* 眞の流速ではない。