

## 柔軟な緩衝工と船舶の接岸力

若 桑 訥\*

Estimation of the Ship Berthing Force on a Slender Berthing Structure  
By  
Totsu Wakakuwa

The size of ocean-going ships has been growing steadily for these ten years, especially it is remarkable in the case of oil tankers.

In a few years ago, a ship of 20,000 tons dead weight was called "Super tanker", but now there are ships of over 150,000 tons dead weight in service.

Since existing berthing structures were not designed for such big vessels, the reconsiderations of the design data of berthing structures have been quite important for safety-berthings.

In the usual case of ship berthing on dolphin, the discriminant of the auxiliary equation for the equation of motion  $\ddot{S} - \alpha \{f(t) - \dot{S}\} + kS = 0$  (c.f. 2.1) is  $\alpha^2 - 4k < 0$ .

If a large ship hits the existing berthing structure, which is slender in comparison with the ship, the discriminant may be positive.

This paper reports the results of some theoretical considerations, model experiments and an "in-situ" experiment in such cases.

The velocity and change of velocity of water particles in the vicinity of ship depend on their position and the initial condition, therefore it is shown that the influence of the water-pressure on the hull varies with the load-deflexion characteristic of berthing structure and the berthing velocity.

## 1. 概 説

最近における船舶の大型化の傾向は急速であって、数年前の10万t級スーパータンカーの建造に続いて、15万t、さらに20万t級タンカーも建造されるに至っている。

筆者が、船舶の接岸力について、室内および実船による実験で遭遇し、研究して来たものは、運動方程式の特性方程式の判別式が負の値の場合で、緩衝工の働きも確実であり、船舶の接岸力も、は握することができるものであった。

しかし、昨今のような急激な大型化に対応して、接岸時の諸現象をは握することができ、安全を保証できるように、係船施設を改築することが可能な場合はさておき、大型化に対応しえない事情のときも多いことは、容易に推察される。このような場合には、余裕水

深や潮位を最大限に利用し、きつ水いっぱいにして、5万t、10万t級用ドルフィンに、超巨大船に係船荷役するのやむを得ない場合も生ずることであろうし、また接岸力の大きさは、主として接岸速度によるものであるから、これを制御して、現状施設で接岸荷役できないであろうか、という場合も起こるのである。

すなわち、 $\alpha^2 - 4k < 0$  の場合から、ゼロに等しくなり、ついには  $\alpha^2 - 4k > 0$  の状態のときも起りうることとなる。

このような場合には、初期条件や環境等の接岸条件によって、伴流の状態は異なるので、その影響も違っていることは推察されるが、どのようにしたら安全に接岸係船できるか、その限度を見出す目的をもって室内実験および実船測定を行なった。その結果を報告する。

第2章において、運動方程式に減衰項  $f(t)$  を導入

\* 元関連施設部 (現秋田大学教授)

し、余弦の形で近似させうることを示し、各種の場合について検討した。

第3章、第4章および第5章は第2章の考察を実証するため行なった室内実験の設備と結果を述べ、理論値と対比検討したものである。

第6章には、川崎沖におけるドルフィンに、排水トン数12万 t の油槽船が接岸したときの接岸現象の実測値と解析の結果を示してある。

第7章は、以上の研究の結論で、係船施設の設計において安全を期するためには、不確実な減衰にたよらず、船とともに動く水の流れは減衰しないとして設計するのが当をえていることが述べてある。

第8章は、接岸力の計算図表である。

2. 運動方程式について

$\alpha^2 - 4k > 0$  のような場合は、現象時間  $t_0$  は長いので、伴流の速度が減衰はじめることは、既に報告<sup>1)</sup>した通りである。

2.1 運動方程式の誘導

船長  $l$ 、きつ水  $h$ 、バース水深  $H$ 、船の質量  $m$ 、接岸速度  $v_0$ 、緩衝工の撓み（水平方向） $s$ 、緩衝工のバネ常数  $K$ 、偏心係数  $\beta = (1 + mr^2/I_z)$ 、船の重心と接点との船長添いの水平距離  $r$ 、船の重心を通る鉛直軸についての船の慣性モーメント  $I_z$ 、流体の質量  $\rho_w$  とし、 $S = s/v_0$ 、 $\alpha = \rho_w g h^2 l / m \sqrt{gH}$ 、 $k = \beta K / m$  で現わせば、運動方程式は、

$$\dot{S} - \alpha \{ f(t) - S \} + kS = 0$$

となる。ここで  $f(t)$  は  $t$  の任意の関数を示す。

$\alpha^2 - 4k < 0$  の場合は、 $f(t) = 1$  であったが、 $\alpha^2 - 4k \leq 0$  のような場合には、現象時間は長く、接岸はゆるやかな運動となるので、船の移動にもなつて流動していた水の流速が減衰はじめる。その状態を接岸の瞬間においては船も水もともに等しい速度で運動していることから、 $\dot{S} = 1$ 、そして減衰するのであるから、 $v_0 f(t) = v_0 \cos nt$  とおき、その範囲を  $\cos nt = 1 \sim 0$  までとする。

$$\therefore \dot{S} - \alpha(\cos nt - S) + kS = 0 \dots\dots\dots(1)$$

$t = 0, S = 0, \dot{S} = 1$  の初期条件でとき、 $\varphi = -\alpha t / 2$ 、 $\Psi_+ = \sqrt{\alpha^2 - 4k} / 2$ 、 $\Psi_- = \sqrt{4k - \alpha^2} / 2$ 、 $R = (n^2 - k)^2 + \alpha^2 n^2$ 、 $\theta_1 = \tan^{-1}(k - n^2 / \alpha n)$ 、 $\theta_2 = \tan^{-1}[\alpha \sqrt{4k - \alpha^2} / \{\alpha^2 - 2(k - n^2)\}]$  とすれば、 $\alpha^2 - 4k \leq 0$  なるに従って、それぞれ次の解をえる。

$$S = \frac{\alpha}{\sqrt{R}} \sin(nt + \theta_1) - \frac{(k - n^2)}{\Psi_- \sqrt{R}} e^{\varphi} \sin(\Psi_- t + \theta_2) \dots\dots\dots(2)$$

$$S = \frac{n^2 - k}{(n^2 + k)^2} \{ 2\sqrt{k} + (n^2 + k)t \} e^{-\sqrt{k}t} + \frac{2\sqrt{kR}}{(n^2 + k)^2} \sin(nt + \theta_1) \dots\dots\dots(3)$$

$$S = \frac{\alpha}{\sqrt{R}} \sin(nt + \theta_1) + \frac{n^2 - k}{R} e^{\varphi} \left[ \frac{2(n^2 - k) + \alpha^2}{2\Psi_+} \sinh \Psi_+ t + \alpha \cosh \Psi_+ t \right] \dots\dots\dots(4)$$

したがって  $\dot{S}$  はそれぞれ、

$$\dot{S} = \frac{\alpha n}{\sqrt{R}} \cos(nt + \theta_1) + \frac{(n^2 - k)\sqrt{k}}{\sqrt{R} \cdot \Psi_-} e^{\varphi} \cos(\Psi_- t + \theta_3)$$

ここに  $\theta_3 = \tan^{-1} \left( \frac{n^2 + k}{n^2 - k} \frac{\alpha}{2\Psi_-} \right) \dots\dots\dots(2')$

$$\dot{S} = \frac{2n\sqrt{k}}{n^2 + k} \sin(nt + \theta_4) + \frac{n^2 - k}{n^2 + k} \left( \frac{n^2 - k}{n^2 + k} - \sqrt{k}t \right) e^{-\sqrt{k}t}$$

ここに  $\theta_4 = \tan^{-1} \left( \frac{2n\sqrt{k}}{n^2 - k} \right) \dots\dots\dots(3')$

$$\dot{S} = \frac{\alpha n}{\sqrt{R}} \cos(nt + \theta_1) + \frac{n^2 - k}{R} e^{\varphi} \left\{ (n^2 - k) \cosh \Psi_+ t - \frac{\alpha(n^2 + k)}{2\Psi_+} \sinh \Psi_+ t \right\} \dots\dots\dots(4')$$

また  $\dot{S}$  はそれぞれ、

$$\dot{S} = -\frac{\alpha n^2}{\sqrt{R}} \sin(nt + \theta_1) + \frac{k(n^2 - k)}{\sqrt{R} \cdot \Psi_-} e^{\varphi} \sin(\Psi_- t - \theta_5)$$

ここに  $\theta_5 = \tan^{-1} \left\{ \frac{\alpha n^2 \sqrt{4k - \alpha^2}}{\alpha^2 n^2 + 2k(k - n^2)} \right\} \dots\dots\dots(2'')$

$$\dot{S} = \frac{2n^2\sqrt{k}}{n^2 + k} \cos(nt + \theta_4) - \frac{n^2 - k}{n^2 + k} \sqrt{k} \cdot e^{-\sqrt{k}t} \left( \frac{2n^2}{n^2 + k} - \sqrt{k}t \right)$$

ここに  $\theta_4 = \tan^{-1}\left(\frac{2n\sqrt{k}}{n^2-k}\right)$  .....(3')

$$\dot{S} = -\frac{\alpha n^2}{\sqrt{R}} \sin(nt + \theta_1) + \frac{(n^2-k)e^\psi}{R} \left[ \frac{\alpha^2 n^2 + 2k(k-n^2)}{\sqrt{\alpha^2 - 4k}} \sinh \Psi_+ t - \alpha n^2 \cosh \Psi_+ t \right] \dots\dots\dots(4'')$$

現象時間  $t_0$ , 最大撓み  $S_0$  を求めるには, 次のようにして数値計算で求めるのが実際的である。 $t_i$  における  $\dot{S}_i, \ddot{S}_i$  を条件に応じ, (2'), (3'), (4) および (2''), (3''), (4'') によって求め,

$\dot{S}_i / \ddot{S}_i = \Delta t_i$  として,  $t_i + \Delta t_i = t_{i+1}$

この  $t_{i+1}$  を用いて,

$\dot{S}_{i+1} / \ddot{S}_{i+1} = \Delta t_{i+1}, \quad t_{i+1} + \Delta t_{i+1} = t_{i+2}$

この  $t_{i+2}$  を用いて,  $\dot{S}_{i+2}$  を求める, このようにして  $t_{i+n}$  を用いたとき  $\dot{S}_{i+n} = 0$  であるときの  $t_{i+n} = t_0, S_{i+n} = S_0$  が求める値である。

**2.2 運動方程式の検討**

(2), (3), (4) 式によって表わされる接岸の状態について考察するに, (2) 式の場合は, もっとも普通にある状態であって, 構造物も信頼することができ用も確実である。すなわち判別式  $\alpha^2 - 4k < 0$  の場合,  $n=0$  とおくことができる。接岸距離が十分にあって, 船が定速の状態となって接岸するときは, 特に理論値と合致する。

この時 (2) 式は,

$$S = \frac{\alpha}{k} - \frac{1}{\Psi_-} e^\psi \sin(\Psi_- t + \theta_{20}) \dots\dots\dots(5)$$

ここに  $\theta_{20} = \tan^{-1}\left(\frac{2\alpha\Psi_-}{\alpha^2 - 2k}\right)$

となる。

次に,  $n=0, \alpha^2 - 4k=0$  のとき (3) 式は

$$S = \frac{2}{\sqrt{k}} - \frac{e^{-\sqrt{k}t}}{\sqrt{k}} (2 + \sqrt{k}t) \dots\dots\dots(6)$$

また  $n=0, \alpha^2 - 4k > 0$  の場合 (4) 式は,

$$S = \frac{\alpha}{k} - \frac{e^\psi}{k} \left[ \frac{\alpha^2 - 2k}{2\Psi_+} \sinh \Psi_+ t + \alpha \cosh \Psi_+ t \right] \dots\dots\dots(7)$$

また,  $\dot{S}, \ddot{S}$  はそれぞれの場合次のようになる。

$\alpha^2 - 4k < 0$  の場合

$$\dot{S} = \frac{\sqrt{k}}{\Psi_-} e^\psi \cos(\Psi_- t - \theta'_{20}) \dots\dots\dots(5')$$

ここに  $\theta'_{20} = \tan^{-1}\left(\frac{\alpha}{\sqrt{4k - \alpha^2}}\right)$

$$\dot{S} = -\frac{k}{\Psi_-} e^\psi \sin \Psi_- t \dots\dots\dots(5'')$$

$\alpha^2 - 4k = 0$  の場合

$$\dot{S} = e^{-\sqrt{k}t} (1 + \sqrt{k}t) \dots\dots\dots(6')$$

$$\dot{S} = -kt e^{-\sqrt{k}t} \dots\dots\dots(6'')$$

$\alpha^2 - 4k > 0$  の場合

$$\dot{S} = e^\psi \left( \frac{\alpha}{2\Psi_+} \sinh \Psi_+ t + \cosh \Psi_+ t \right) \dots\dots\dots(7')$$

$$\dot{S} = -\frac{k}{\Psi_+} e^\psi \sinh \Psi_+ t \dots\dots\dots(7'')$$

ここで (6), (7) 式の状況のときは, 現象時間  $t_0$  が大きいので, 水流の減衰がおこる。

運動方程式の第2項の括弧内  $f(t) - \dot{S}$  が

$f(t) - \dot{S} \cong 0$

になるに従って, 加速方向に, あるいは減速の方向に, 水圧は働く。

$f(t) = \cos nt$  とおいた場合, すなわち水流の速度が  $v_0 \cos nt$  の形で減衰するものとすれば,  $n$  の値によって, 各種の場合が生ずる。既述のとうり  $nt$  はゼロから  $\pi/2$  の間の値とする。

$n$  が大きくなるにしたがって, 水圧の働きは小さくなることは, 明らかである。その過程において, 水圧が働かないと等しい場合, すなわち, 便宜的付加質量がゼロの場合も, また水圧が抵抗になる場合も出てくるはずである。

この便宜的付加質量がゼロの状態を考えると (1) 式によって,

$\cos nt - \dot{S} = 0$

$\ddot{S} + kS = 0$

をうるから,  $t=0, \dot{S}=1, S=0$  の条件で, この二つの式を満足する解は,

$$n = \sqrt{k} \\ S = \sin \sqrt{k}t / \sqrt{k} \dots\dots\dots(8)$$

となる。

したがって,  $n = \sqrt{k}$  を境にして,  $n < \sqrt{k}$  のときは水圧は船を押し進める方向に働き,  $n = \sqrt{k}$  のときは水圧は働かないと等しい状態である。 $n > \sqrt{k}$  のときは,  $\cos nt - \cos \sqrt{k}t < 0$  であるから,  $\cos nt - \dot{S} < 0$  のときで, (1) 式

$\dot{S} + \alpha(\dot{S} - \cos nt) + kS = 0$

の第2項において、 $\cos nt$  は  $\dot{S}$  より小でなければならぬから、第2項は抵抗として働くこととなる。それゆえ解

$$S = -\frac{\alpha}{R} \left\{ \alpha n \sin nt - (n^2 - k) \cos nt \right\} + \frac{(n^2 - k) e^{\psi}}{R} \left[ \frac{2(n^2 - k) + \alpha^2 e^{\psi+t} - e^{-\psi+t}}{2\psi_+} + \alpha \frac{e^{\psi+t} + e^{-\psi+t}}{2} \right]$$

において、この場合  $n \neq 0$  のときであるから、 $\alpha^2 - 4k \geq 0$  の場合のみを考慮すればよい。

まず、 $\alpha^2 - 4k > 0$  のときは

$$S = -\frac{\alpha}{\sqrt{R}} \sin(nt - \theta_1') + \frac{(n^2 - k) e^{\psi}}{R} \left[ \frac{2(n^2 - k) + \alpha^2}{2\psi_+} \sinh \psi_+ t + \alpha \cosh \psi_+ t \right] \dots\dots\dots (9)$$

$$\text{ここに } \theta_1' = \tan^{-1} \left( \frac{n^2 - k}{\alpha n} \right)$$

伴流は全体において、船の進行方向と逆に流れないから、 $nt \leq \pi/2$  である。 $\pi/2$  より大きいときは  $\pi/2$  とする。このような状態は静水中で、船が伴流の減衰がおこるようなゆるい速度で進みながら接岸する場合に相当する。

つぎに、 $\alpha^2 - 4k = 0$  のときは、 $S$  は、

$$S = \frac{n^2 - k}{(n^2 + k)^2} \left\{ 2\sqrt{k} + (n^2 + k)t \right\} e^{-\sqrt{k}t} + \frac{2\sqrt{k}K}{(n^2 + k)^2} \sin(nt - \theta'_{10}) \dots\dots\dots (10)$$

$$\text{ここに } \theta'_{10} = \tan^{-1} \left( \frac{n^2 - k}{2n\sqrt{k}} \right)$$

この場合も、 $nt \leq \pi/2$  である。

**2.3 その他の場合**

$\alpha^2 - 4k > 0$  の状態のときに、船が接岸施設の僅か前方で一度静止してから、おもむろに接岸するような状態においては、伴流は発達せず、船は静水を押しながらか接岸運動をする状態と考えられる。

この時の運動方程式は、微速であるから抵抗は速度に比例するものとして、

$$\dot{S} + C_v \dot{S} + kS = 0$$

$$\text{ここに } C_v = \eta \frac{hl}{m} \quad [\text{sec}^{-1}]$$

$\eta =$  抵抗係数 [gr.sec/cm<sup>3</sup>]

をうる。 $t=0, S=0, \dot{S}=1$  の条件で解けば、 $C_v^2 - 4k \geq 0$  にしたがって、それぞれ

$$\left. \begin{aligned} S &= -\frac{1}{\zeta_-} e^a \sin \zeta_- t \\ \dot{S} &= e^a \left( \cos \zeta_- t - \frac{C_v}{2\zeta_-} \sin \zeta_- t \right) \\ t_0 &= \zeta_-^{-1} \tan^{-1} (2\zeta_- / C_v) \\ S_0 &= e^a / \sqrt{k} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

$$\left. \begin{aligned} S &= te^a \\ \dot{S} &= e^a (1 + a) \\ t_0 &= 2 / C_v \\ S_0 &= 0.7356 / C_v \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (12)$$

$$\left. \begin{aligned} S &= \zeta_+^{-1} e^a \sinh \zeta_+ t \\ \dot{S} &= e^a \{ \cosh \zeta_+ t - 0.5 C_v \zeta_+^{-1} \sinh \zeta_+ t \} \\ t_0 &= \zeta_+^{-1} \tanh^{-1} (2\zeta_+ / C_v) \\ S_0 &= \zeta_+^{-1} e^{a_0} \sinh (\zeta_+ t_0) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (13)$$

$$\text{ここに } \zeta_- = \sqrt{4k - C_v^2} / 2$$

$$\zeta_+ = \sqrt{C_v^2 - 4k} / 2$$

$$a = -C_v t / 2$$

$$a_0 = -C_v t_0 / 2$$

この (13) 式のような状態は、接岸の場合、水の抵抗が大ききことを意味するものであるから、流水を阻止する壁面があるような特殊な状態において現われるであろう。

ドルフィン等は多く透過構造物であるから、 $C_v^2 - 4k \leq 0$  の状態の方が多く現われるものと考えられる。

**2.4 結 び**

この2章において、伴流の減衰を考慮した項  $v_0 f(t)$  を入れた基本運動方程式において、伴流の減衰状態にかんがみ、 $v_0 f(t) = v_0 \cos nt$  とおいた各種の場合について考察を加えた。

その結果、 $n = \sqrt{k}$ 、すなわち水圧が働かないと等しい状態を境にして、一方は船を加速する方向に、他方は減速する方向に水圧が働くことが理解される。これを要するに、 $n$  を考慮しなければならない状態は、船の大きさに比して、バネ常数が小さく、 $\alpha^2 - 4k > 0$  のときで、このようなときは水の流動状態および周囲の条件による水の流速の減衰の状況によって、水圧の

働き方がいろいろに変わるということである。

それゆえ、構造物の設計に当っては、その安全性を  $n$  に期待するのは、不確実であるから、 $n=0$  の状態において計画を立てることが安全を期することとなる。

### 3. 室内実験 I

2章の考察による判別式  $\alpha^2 - 4k < 0$  の場合は、既に報告<sup>1)・2)・3)</sup>してあるので、 $\alpha^2 - 4k > 0$  の状態において、室内実験を行なった。つぎに、その装置について概述する。

#### 3.1 実験装置

実験に用いた水槽は、内法で  $10\text{m} \times 6\text{m} \times 0.8\text{m}$  のコンクリート造で既に報告<sup>1)</sup>したものである。受衝バネ装置に、ベークライト板で組立て、スプリングバランスを用いて、バネとした。そのバネ常数は数度の検定の結果、 $255\text{ gr/cm}$  である。(写真 1)

接岸速度計は、アルミ小型 L  $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ 、長さ  $1\text{ m}$  の下端に短い突起をつけ、上端の軸の回りの変位をバネに伝え、そのバネの歪をストレングージによって時間と併記して電磁オシログラフにとり、受衝バネに船が接する  $5\text{ cm}$  前からの接岸速度を計りうるようにした。

検定は、一連の実験の前に行なった。検定値は、速度計の先端の変位は、オシログラフの読みの  $1.1$  倍、受衝バネの撓みはオシログラフの読みの  $1.08$  倍であった。

水圧計は、模型船について、図 1 に示したように、船の中央部、中心から  $70\text{ cm}$  の箇所に、水面下  $3\text{ cm}$  に受圧面 (径  $3\text{ cm}$ ) の中心がくるように取り付けた。

受圧面の向きは、 $G_3$ 、 $G_4$  は船側面に平行に、 $G_3$ 、

$G_1$  は直角に取り付けた。その目的は、 $G_3$ 、 $G_4$  で船側の水圧を測り、 $G_3$ 、 $G_1$  で船の傾きによる水圧の増加を知り、補正して、動水圧を知ることにある。

水圧計の検定値は、

$G_3$ の電磁オシログラフの読み	$\times 0.16$
$G_3$ の "	$\times 0.10$
$G_1$ の "	$\times 0.44$
$G_4$ の "	$\times 0.077$
$G_4'$ の "	$\times 0.082$

であった。記録は三菱電磁オシログラフによる。その他牽引装置、弛緩装置等は既報<sup>1)</sup>と同様な装置であるから再述しない。(写真 1, 2, 3 参照)

#### 3.2 実験の記録

模型船について

船の重量 $W$	: $149,445$ [gr]
船の質量 $m$	: $152.4949$ [gr.sec <sup>2</sup> /cm]
きつ水 $h$	: $18.45$ [cm]
船長 $l$	: $200$ [cm]
船幅 $b$	: $40.5$ [cm]
水深 $H$	: $24.8$ [cm]
バネ常数 $K$	: $255$ [gr/cm]

しかし、計算式に用いる  $H$  は余裕水深を考慮して<sup>1)</sup>

$$H = 18.45 + \frac{24.8 - 18.5}{2} = 21.625 \text{ [cm]}$$

とする。

$$\therefore \alpha = \frac{\rho_0 g h^2 l}{m \sqrt{gH}} = \frac{18.45^2 \times 200}{152.4949 \sqrt{980 \times 21.625}}$$

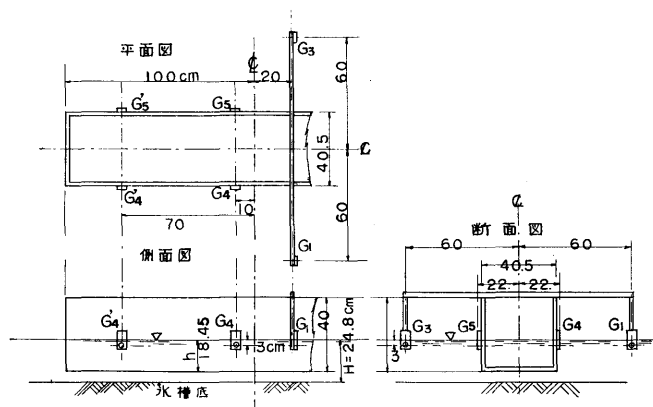


図 1 水圧計取付図

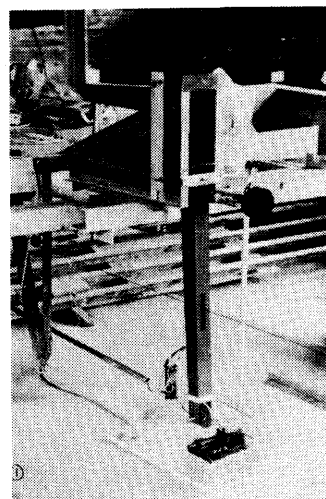


写真 1

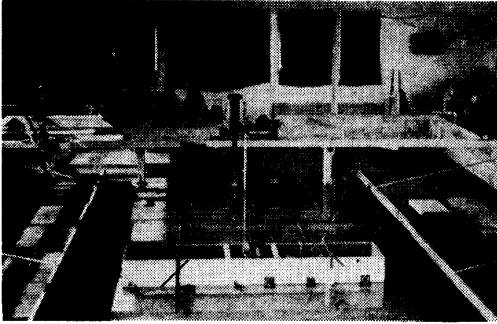


写真 2

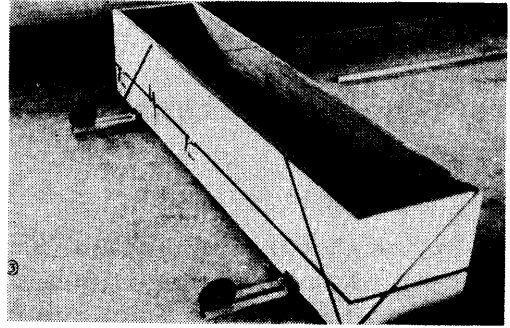


写真 3

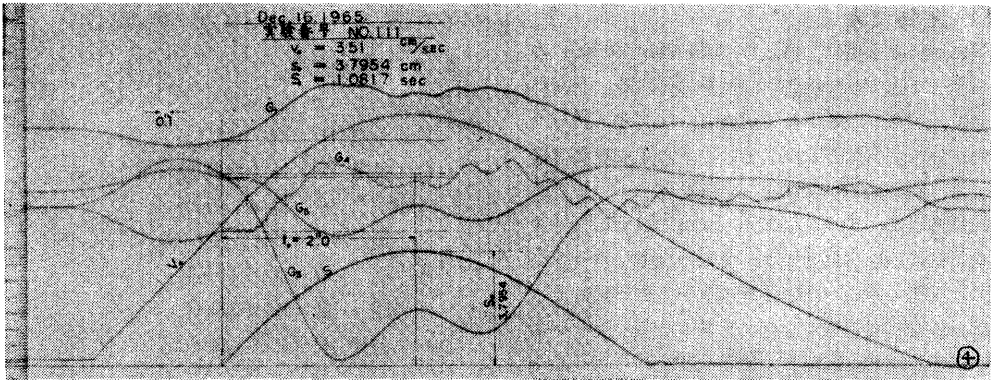


写真 4

$$= 3.0667 \text{ [sec}^{-1}\text{]}$$

$$k = \frac{K}{m} = \frac{255}{152.4949} = 1.6792 \text{ [sec}^{-2}\text{]}$$

である。

1965年12月16日に行なった実験結果を表1から表5および図2, 3に示す。同じく11月10日に行なった実験による撓みの変化と経過時間の状態を表6, 図4, オシロ記録の例を写真4から7に示す。

これらの表において、 $v_0$  [cm/sec] は接岸速度、 $t$  [sec] は船がバネに接してからの経過時間、 $p$  は水圧 [gr/cm<sup>2</sup>],  $P = p/v_0$  [gr.sec/cm<sup>2</sup>] を表わす。

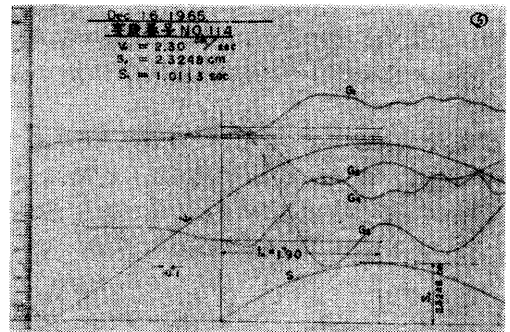


写真 5

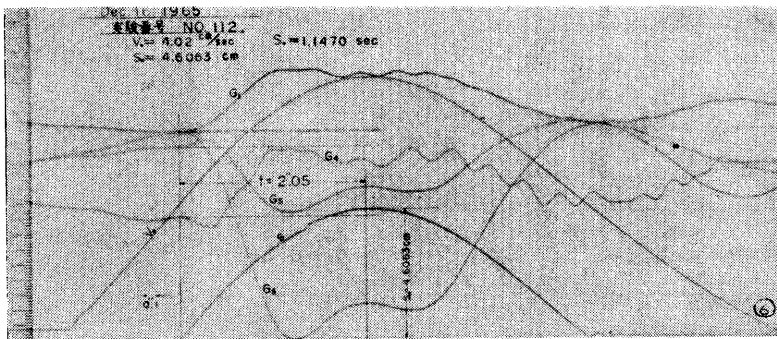


写真 6

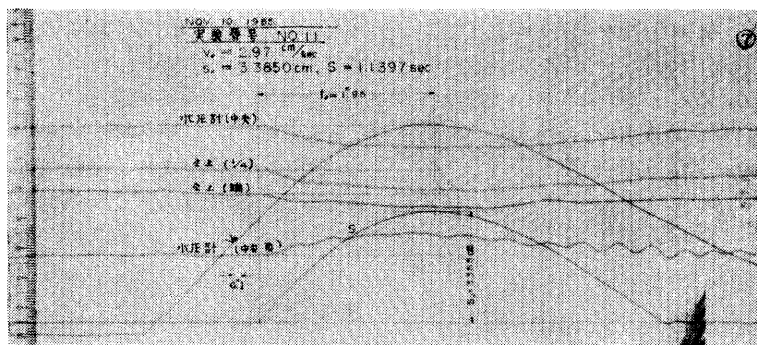


写真 7

表 7 により、 $n \approx 0.65$  であり、また表 2, 3, 4, 5 によって、水圧の分布状態は、図 5 のようになり、平均総水圧は中央水圧の 1.5 倍である。

3.3 実験値と理論値について

この室内実験の実験値からえられた、 $n = 0.65$  [ $\text{sec}^{-1}$ ],  $\alpha = 1.5 \times 3.0667 = 4.6$  [ $\text{sec}^{-1}$ ] の値を第 2 章

の理論式に入れて比較してみよう。

この実験の状態は、第 2 章において考察した場合のどの場合に当るであろうか。

まず判別式  $\alpha^2 - 4k = 46^2 - 4 \times 1.6722 = 14.471$  [ $\text{sec}^{-2}$ ]  $> 0$  であるから、(9) 式を用いなければならない。次の水圧の項の式

$$P = \frac{\rho_0 g h}{\sqrt{gH}} (\cos nt - S) \dots\dots\dots (14)$$

によって、水圧の働く方向を考えるに、(8) 式から、

$$\sqrt{k} = 1.2931 \text{ [sec}^{-1}\text{]}$$

$$t_0 = \pi/2 \sqrt{k} = 1.215 \text{ [sec]}$$

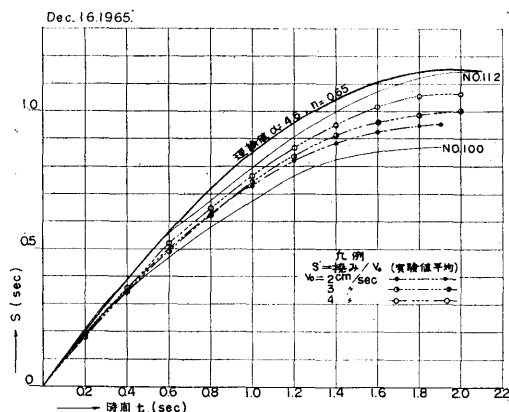


図 2 撓み～時間の関係

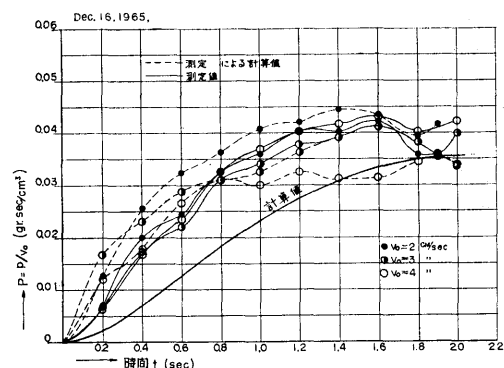


図 3 中央平均水圧変化と時間の関係 ( $n = 0.65 \text{sec}^{-1}$ ;  $\alpha = 4.6 \text{sec}^{-1}$ )

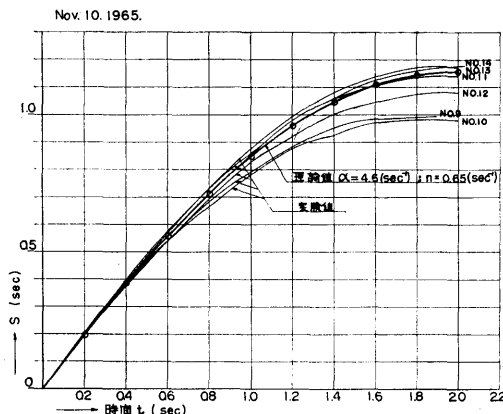


図 4 S 撓み～時間の関係

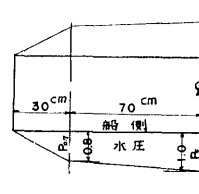


図 5 水圧分布

をうるが、実験値の  $t_0$  は 1.85~2.00 [sec] で、この  $t_0$  より大きいから、水圧は船を加速する方向に働いていることが知られる。そこで減衰の項  $n$  を実験値から求めて見る。(14) 式に既知の数値を入れ、

$$P = 0.1267(\cos nt - \dot{S}) \quad [\text{gr. sec/cm}^3]$$

$$\therefore n = \frac{1}{t} \cos^{-1} \left( \frac{P}{0.1267} + \dot{S} \right) \quad [\text{sec}^{-1}]$$

$\dot{S} = 0$  において、

$$n = \frac{1}{t_0} \cos^{-1}(7.8902 \cdot P) \quad [\text{sec}^{-1}]$$

となるから、この  $P$  に測定された水圧の平均値を入れて求めた  $n_0$ 、船側中央正負の水圧の平均値を入れて求めた  $n_c$  を表 7 に示す。

この表によって  $n$  の値は 0.6~0.7 の間にあって、平均 0.65 である。差は平均値に対して約 ±10% の範囲にある。その状態は、図 6 でわかるように、速度の大きい程  $n$  は小で、速度が小さくなると  $n$  は大きくなっている。これは速度の大きい程、船のまわりの水の運動も発達して、減衰にくくなっていることによると思される。

表 1 S 撓み ( $s/v_0$ ) と時間の関係

DEC. 16. 1965.

実験番号	速度	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	1.9~2.0
100	2.11	.1846	.3434	.4664	.5792	.6765	.7688	.8201	.8508	.8662	.8713
101	2.11	.1849	.3441	.4879	.6112	.7139	.7807	.8578	.8937	.9142	.9194
103	1.98	.1966	.3659	.4969	.6225	.7372	.8409	.9010	.9392	.9774	.9829
114	2.30	.1975	.3716	.5315	.6632	.7620	.8514	.9313	.9784	1.0113	1.0113
115	2.10	.1853	.3500	.4941	.6434	.7515	.8492	.9110	.9522	.9779	.9882
計		.9489	1.7750	2.4768	3.1195	3.6411	4.0910	4.4212	4.6143	4.7470	4.7731
平均		.1898	.3560	.4954	.6239	.7282	.8182	.8842	.9228	.9494	.9546
104	3.38	.1824	.3521	.5089	.6401	.7618	.8578	.9314	.9922	1.0210	1.0242
105	3.33	.1816	.3568	.5190	.6488	.7785	.8823	.9635	1.0154	1.0478	1.0576
106	3.23	.1710	.3352	.5028	.6201	.7375	.8213	.9017	.9453	.9720	.9754
107	2.91	.1785	.3348	.4798	.6026	.7142	.8146	.8741	.9225	.9337	.9394
108	2.85	.1708	.3112	.4555	.5769	.6794	.7591	.8311	.8577	.8691	.8729
111	3.51	.1911	.3698	.4931	.6471	.7828	.8906	.9707	1.0262	1.0632	1.0817
計		1.0754	2.0599	2.9591	3.7356	4.4452	5.0257	5.4725	5.7593	5.9068	5.1148
平均		.1793	.3433	.4932	.6226	.7424	.8376	.9121	.9599	.9845	1.0383
109	4.00	.1757	.3406	.4893	.6164	.7272	.8137	.8894	.9434	.9678	.9705
112	4.02	.2073	.3850	.5546	.6758	.7943	.9020	.9962	1.0770	1.1201	1.1448
113	4.32	.1781	.3512	.5143	.6422	.7827	.8906	.9658	1.0285	1.0737	1.0762
計		.5611	1.0768	1.5581	1.9344	2.3042	2.6063	2.8514	3.0489	3.1693	3.1915
平均		.1871	.3590	.5194	.6448	.7681	.8688	.9505	1.0163	1.0538	1.0638

単位：速度 [cm/sec] 時間 [sec] S [sec]

表 2 水圧と経過時間の関係 (中央正)

Dec. 16. 1965.

実験番号	速度	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	1.9	2.0
100	2.11	0.00614	0.01650	0.02261	0.02726	0.03030	0.03454	0.03326	0.03417	0.03277		0.03286
101	2.11	0.938	2022	2432	2649	3502	3724	4060	3506	3618		3808
103	1.98	0.755	1850	2647	2983	3743	4370	4402	4188	4066		4029
114	2.30	0564	1937	2623	3189	4457	4966	4969	4711	4446		4583
115	2.10	0476	1941	2896	3547	4476	4977	4983	4950	4872		4874
計		3347	9400	11285	115094	119023	121491	121740	120722	120279		120580
平均		0669	1880	2572	3019	3841	4298	4348	4154	4056		4116
104	3.38	0316	1429	2139	2729	3352	3779	3805	3963	3881		003928
105	3.33	0710	1689	2397	2894	3589	3885	3954	4028	4245		4247
106	3.23	0627	1619	2000	2745	3705	3812	4030	4214	4240		4171
107	2.91	0579	1602	2233	2510	3142	3751	3798	3984	4075		4235
108	2.85	0557	1518	2286	2736	3329	3603	3753	3763	4088		3901
111	3.51	0735	2019	2703	3413	4184	4504	4520	4446	4549		4664
計		3524	9876	13758	17027	21301	23334	23860	24398	25078		17011
平均		0587	1646	2293	2838	3550	3889	3977	4066	4180		4253
109	4.00	0444	1480	2180	3035	3730	4056	4133	4093	4159		4377
112	4.02	0757	1333	2853	3272	4137	4685	4773	4796	4963		4982
113	4.32	0481	1691	2450	3319	4241	4402	4438	4686	4645		4552
計		1682	4504	7483	9626	12108	13143	13344	13575	13787		13911
平均		0561	1501	2494	3209	4039	4381	4448	4525	4589		4637

単位：速度 [cm/sec] 時間 [sec] , P [gr. sec/cm<sup>2</sup>]



この平均値  $n=0.65 [\text{sec}^{-1}]$  と  $\alpha=4.6 [\text{sec}^{-1}]$  を用いた水圧の計算値 (表9参照) と実測値は、最終値においては、ほぼ等しいが、その過程において50%程度の差がある (図3参照)。これは微小水圧を拡大して、測定しているの、船の微小傾斜による誤差や、実際の停止時間  $t_0$  は理論値の  $t_0$  より、わずかに(0.05秒程度) 早いので、その影響によるものと推察される。そこでオシログラフの撓み~時間曲線から、 $v[\text{cm}$

/sec] をもとめ、水圧の項に代入して、 $n=0.65[\text{sec}^{-1}]$  として計算した結果が、表8である。この値と実測値を併記図示したのが、前掲の図3である。この図において両者はほとんど重っている。したがって、この実験においては、 $n=0.65 [\text{sec}^{-1}]$  でよいことがわかる。 $t_0$  は約2秒で一定である。

撓みの理論値は表9の通りである。

1965年12月16日の実験における観測値は、表1のご

表3 水圧と経過時間の関係 (中央負)

Dec. 16, 1965

実験番号	速度 cm/sec	時間 0.2 SEC	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	1.9	2.0
100	2.11	0.00782	0.02057	0.02103	0.03050	0.02956	0.03357	0.03464	0.03812	0.02730	0.02570	
101	2.11	0721	1925	2087	3006	3000	3175	3315	3615	2502	2767	
103	1.98	0785	2561	2959	4254	4350	4785	4460	5492	3878	3895	
114	2.30	0509	1764	1983	3362	2967	3290	3525	3844	2872	2672	
115	2.10	0744	2294	2475	3742	3437	4076	3867	4594	3360	2955	
計		3541	10601	11607	17414	16719	18683	18621	21355	15342	14864	
平均		0708	2120	2321	3483	3344	3737	3724	4271	3068	2973	
104	3.38	0848	1848	2218	3536	3539	3988	4080	4477	3627		0.03958
105	3.33	0884	2058	2118	3237	3198	3648	3926	4391	3554		3876
106	3.24	0722	1671	2056	3319	3172	3569	3788	4436	3739		3861
107	2.91	0854	1711	2143	3364	3373	3770	3883	4414	3394	3263	
108	2.85	0536	1686	1984	3350	3439	3789	3784	4042	2995	2921	
111	3.51	0700	1832	2163	3097	2886	3466	3649	3773	3056		3308
計		4544	10806	12892	19903	19607	22228	23110	25533	20365	6184	15001
平均		0757	1801	2114	3317	3266	3705	3852	4383	3394	3092	3750
109	4.00	0701	1873	2541	3635	3645	4142	4275	4423	3698		4263
112	4.02	0850	2074	2336	3216	3168	3389	3872	4123	3584		3881
113	4.32	0532	1705	1714	3073	3170	3492	3600	3692	3073		3310
計		2083	5652	6591	9924	9983	11023	11747	12238	10365		11454
平均		0694	1884	2197	3308	3328	3674	3916	4079	3455		3818

単位: {gr.sec/cm<sup>3</sup>}

表4  $(\bar{P}_c + \bar{P}_c)/2$  と経過時間の関係

Dec. 16, 1965

実験番号	速度 cm/sec	時間 0.2 (sec)	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	1.9	2.0
100	2.11	0.00698	0.01854	0.02182	0.02888	0.02998	0.03406	0.03395	0.03614	0.03003	0.02930	
101	2.11	0879	1973	2259	2827	3251	3450	3688	3501	3060	3288	
103	1.98	0770	2206	2803	3618	4046	4577	4426	4840	3972	3962	
114	2.30	0537	1851	2303	3276	3712	4127	4247	4277	3659	3628	
115	2.10	0610	2117	2686	3645	3956	4526	4425	4772	4116	3914	
計		3494	10001	12233	16254	17963	20086	20181	21054	17810	17722	
平均		0699	2000	2446	3250	3593	4017	4036	4211	3562	3544	
104	3.38	0582	1638	2178	3132	3445	3883	3942	4220	3754		0.03943
105	3.33	0797	1873	2257	3065	3393	3765	3940	4029	3899		4061
106	3.24	0674	1645	2028	3032	3438	3690	3909	4325	3989		4016
107	2.91	0717	1657	2188	2937	3257	3760	3840	4199	3734	3749	
108	2.85	0546	1602	2135	3043	3384	3696	3768	3902	3541	3411	
111	3.51	0717	1925	2433	3255	3535	3985	4084	4109	3802		3985
計		4033	10340	13219	18464	20452	22779	23463	24784	22719	7160	16005
平均		0672	1723	2203	3077	3408	3796	3914	4131	3786	3580	4001
109	4.00	0572	1676	2360	3335	3687	4099	4204	4258	3928		4320
112	4.02	0803	1703	2594	3244	3652	4037	4322	4459	4273		4431
113	4.32	0506	1698	2082	3196	3705	3947	4019	4189	3859		3931
計		1881	5077	7036	9775	11044	12098	12545	12906	12060		12682
平均		0627	1692	2345	3258	3681	4032	4181	4302	4020		4227

単位: {gr.sec/cm<sup>3</sup>}

表 5 水圧と経過時間の関係 (中央から 70cm の箇所, 負)

Dec. 16, 1965.

実験番号	速度 時間 2.11 (cm/sec)	0.2(sec)	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	1.9	2.0
100	2.11	0.00857	002021	0.01968	0.02437	0.02860	0.02975	0.03131	0.03210	0.02554	0.02632	
101	2.11	0506	1683	2097	1973	2825	2901	2511	2475	1504	2945	
103	1.98	0249	1488	1646	2840	4239	4571	4530	5071	3793	3999	
114	2.30	0643	1783	1918	2194	2613	2359	2431	2292	1726	2155	
115	2.10	0704	2263	2724	2714	3252	3054	2703	3252	2475	2670	
計		2956	9238	10353	12158	15789	15860	15306	16300	12052	14401	
平均		0592	1848	2071	2432	3158	3172	3081	3260	2410	2880	
104	3.38	0534	1625	3028	3701	4386	4811	4933	4618	3917		0.04982
105	3.33	0074	1915	2155	2323	2886	3031	3548	3647	3032		3966
106	3.24	0661	1574	2128	2376	2930	2928	3232	3385	2905		3565
107	2.91	0677	1691	2223	2584	3143	3310	3140	3083	2267	2578	
108	2.85	0432	1437	1634	2002	2486	2427	2341	2400	1654	2028	
111	3.51	0489	1398	2047	1994	2317	2620	2715	2647	2252		3026
計		2867	9640	13215	14980	18148	19127	19909	19780	16027	4606	15539
平均		0478	1607	2203	2497	3025	3188	3336	3297	2671	2303	3885
109	4.00	0635	1720	2452	2568	3054	3217	3301	3199	2811		3774
112	4.02	0776	1797	2259	2375	2677	2328	2838	2860	2698		3311
113	4.32	0532	1652	1798	2039	2509	2621	2774	2738	2246		3045
計		1943	5169	6509	6982	8240	8166	8913	8797	7755		10130
平均		0648	1723	2170	2327	2747	2722	2971	2932	2585		3377

単位: [gr.sec/cm<sup>3</sup>]

表 6 S 撓みと時間の関係

Nov. 10, 1965.

実験番号 時間	S (撓み/速度時間) (sec)					
	NO. 9	NO.10	NO.11	NO.12	NO.13	NO.14
0	0	0	0	0	0	0
0.2	0.2023	0.1992	0.1997	0.2001	0.2000	0.1998
0.4	0.3893	0.3785	0.3994	0.3762	0.3952	0.3972
0.6	0.5408	0.5379	0.5776	0.5389	0.5709	0.5537
0.8	0.6843	0.6654	0.7342	0.6937	0.7294	0.7078
1.0	0.7910	0.7809	0.8571	0.8270	0.8783	0.8594
1.2	0.8830	0.8765	0.9800	0.9204	0.9880	0.9774
1.4	0.9529	0.9244	1.0568	1.0005	1.0807	1.0617
1.6	0.9823	0.9682	1.1090	1.0431	1.1369	1.1243
1.8	0.9897	0.9801	1.1367	1.0752	1.1710	1.1580
1.88	0.9933					
1.95		0.9801	1.1397	1.0805	1.1734	
2.00		0.9762	1.1397	1.0778	1.1710	1.1772
2.01						1.1772

表 7 測定値による n の値

実験番号	$v_0$ (cm/sec)	$t_0$	$n_0$	$n_c$
100	2.11	1.84	0.7294	0.7269
101	2.11	1.90	0.6960	0.6885
103	1.98	1.90	0.6586	0.6594
114	2.30	1.90	0.6859	0.6737
115	2.10	1.90	0.6795	0.6615
平均			0.6899	0.6820
104	3.38	1.95	0.6434	0.6434
105	3.33	2.00	0.6243	0.6222
106	3.24	2.00	0.6335	0.6241
107	2.91	1.90	0.6935	0.6687
108	2.85	1.90	0.7128	0.6834
111	3.51	2.00	0.6453	0.6254
平均			0.6588	0.6445
109	4.00	2.00	0.6228	0.6115
112	4.02	2.05	0.6132	0.5920
113	4.32	2.00	0.6459	0.6278
平均			0.6273	0.6104
全平均			0.6587	0.6456

表 8  $P=0.12674(\cos nt - S)$  [gr.sec/cm<sup>3</sup>] による計算値  
(ただし  $t, S$  は実験値  $n=0.65$ )

t (sec)	cos nt	$v_0 \approx 2 \frac{cm}{sec}$			$v_0 \approx 3 \frac{cm}{sec}$			$v_0 \approx 4 \frac{cm}{sec}$		
		S	cos nt - S	P	S	cos nt - S	P	S	cos nt - S	P
0	1.0000	1.0000	0	0	1.0000	0	0	1.0000	0	0
0.2	0.9916	0.8900	0.1016	0.01289	0.8585	0.1331	0.01687	0.8975	0.0941	0.01193
0.4	0.9664	0.7640	0.2024	0.02565	0.7845	0.1819	0.02305	0.8305	0.1359	0.01772
0.6	0.9250	0.6695	0.2555	0.03238	0.6975	0.2275	0.02883	0.7145	0.2105	0.02665
0.8	0.8669	0.5818	0.2851	0.03613	0.6225	0.2444	0.03098	0.6215	0.2454	0.03110
1.0	0.7962	0.4742	0.3220	0.04081	0.5375	0.2587	0.03279	0.5595	0.2367	0.03000
1.2	0.7110	0.3785	0.3325	0.04214	0.4240	0.2870	0.03637	0.4555	0.2555	0.03238
1.4	0.6136	0.2615	0.3521	0.04463	0.3055	0.3081	0.03905	0.3685	0.2451	0.03106
1.6	0.5083	0.1630	0.3433	0.04351	0.1810	0.3253	0.04123	0.2580	0.2483	0.03147
1.8	0.3902	0.0793	0.3109	0.03940	0.0750	0.3152	0.03995	0.1185	0.2717	0.03444
1.9	0.3294	0	0.3294	0.04175	0.0270	0.3024	0.03833	0.0500	0.2794	0.03541
2.0	0.2675				0	0.2675	0.03390	0	0.2675	0.03390