

W.Froude 以前の水槽試験

—F.H.Chapman の場合—

正会員 平山次清*

Tank test before W.Froude
-in case of F.H.Chapman-
by Tsugukiyo Hirayama Member,

Key Words :Experiment, Tank Test, F.H.Chapman, W.Froude

1. 緒言

船舶の水槽試験は縮尺模型の試験から実物の抵抗・流体力を推定する手法として発展し、現在はCFDなどの検証としても重要性を失っていない。相似則をベースとした近代的水槽試験の創始者としてはW.フルード(1810年～1879年、1871年トーキイ水槽を建設し、ビルジキールの実験なども実施)が知られているが、それ以前にも水槽試験を試みた技術者・研究者は存在した。

本稿ではノルウェーの造船界で活躍したF.H.チャップマン(両親は英国人)の実施した水槽試験を振り返りその技術的意義を検証する。なお大きな図を末尾に移動したため図の並びが順になっていないことに注意されたい。

2. 近代造船学の祖父 F. H. Chapman (1721-1808)

F. H. チャップマンを「祖父」と書いたのは、故吉岡勲先生の名著「ウィリアム・フルード伝—近代工学の曙—造船学の父」¹⁾があるからで、W.フルードより前という

ことで、以下に紹介する内容から「祖父」とした。F. H. チャップマンは参考文献²⁾では「the first known naval architect to use scientific principles in his ship designs (船のデザインに科学的原理を使用した最初の著名な造船技術者)」と紹介されている。

【筆者注1：文献2では、「チャップマンの父トーマス・チャップマンはヨークシャーの小作農の息子であったが、英国海軍士官となり、1716年にはスウェー

デン王立海軍に参加し、1720年には造船所のキャプテンになった。また母親のスザンナ。コルソンはロンドンの船大



Fig.1 Portrait of F.H. Chapman [1721-1808] (57 years old) Ship like figure can be seen on the paper in his hand. ref.2)

* 横浜国立大学 (名誉教授)

原稿受付 平成30年3月23日

春季講演会において講演 平成30年5月21, 22日

©日本船舶海洋工学会

工の娘であった」と書かれている。】

2.1 チャップマンの生きた時代

1721年にスウェーデンの王立造船所(ゲーテボルグ)のキャプテン(英国人)の息子として生まれたチャップマン(Fig. 1)は帆船時代の造船家であるが復原性能や最小抵抗船型を迫及するなど、自身が掲げた課題は現代でも通じるものがあり、単なる技術者というよりはW.フルードに先行した「工学者(注1)」と言える。

日本では江戸時代中期の人にあたる。同時代の平賀源内(1738-1780)も種々の技術開発をしたことで有名であるが、工学者とは言えないと思われる。何故なら、オランダからの情報である程度ヨーロッパの状況も知っていたと思われるが、物理学的・力学的背景に基づいたという記述・資料は知られておらず、寧ろ科学的であったと思われるからである。

もっとも我が国ではその工学的格差を明治維新後「和魂洋才」の掛け声とともにあつと言う間に縮めたわけであるが。

先に述べたように、チャップマンの父はスウェーデンの王立造船所のCaptainで、チャップマンも幼少の頃から造船に馴染み、船の図面なども書いており、また向上心を有していたため当時としてはある程度流体力学的な素養(注2)を持った技術者として大成したものと思われる。

【注2：ニュートンの「プリンキピア(自然哲学の数学的原理)」は1687年の発行であり、ベルヌーイの定理(流体速度と圧力の関係)も1738年(当時チャップマン17歳)には出版されていた。従ってイギリス(1750年にロンドンへ。かの有名なトマス・シンプソンのクラスに参加。後の排水量計算にもシンプソンの法則を応用している)・フランス(1755年着)・オランダで学んだ経験のあるチャップマンも力学・流体力学の素養はあったと考えられるが、彼のテキストにはそれらしい記述はない。】

3. 試験水槽と水槽試験

チャップマンは、スウェーデンの海軍関係や造船所の管理者を退いたあとに、海上試運転の方法などのコンサルタントや著述のほか船体抵抗に関する自分の理論を実証するための水槽試験を実施している。

以下は主としてチャップマンのテキスト³⁾に記載のある水槽試験の概要である。

3.1 試験水槽

試験水槽がどのような素材で建設されたかの記述は無

いが、原理説明図がある。

水槽は長さは 30m で、Fig. 2 (末尾に掲載) に示すように水槽に固定された長い A、B、2 本のポールと短い C、D、2 本のポールがあり、それぞれ銅製の滑車がありロープが通っている。左右の錘の差が模型船の曳航力となる

ロープの中間に模型船 (約 70cm) をつなぎ、22m 間隔の L と K につけた赤いマーカーの通過時間計測により速度を算出する。模型船の喫水調整のためのバラストは 5.4~12 kg と記載されている。

なお、ジョン・ハリソンの航海用精密時計、所謂クロノメーターは 1759 年に発明されていたから、時計精度の需要の点から、水槽試験に使用した時計も可成りの精度があったものと推定される。

【注 3：この方式は所謂「重力式」と呼ばれるものであり、曳航速度を変えるには錘を取り換える事が必要であるが、シンプルなので比較的精度の良い結果が得られ、しかも教育的にも効果的なので現在でも使用されることがある。

滑車を多重にしているのは、錘の少降下距離で模型船を大距離動かすためである。また Fig. 2 の方法ではトリム・沈下がある程度拘束されるので、現在の重力式は、トリム・沈下を自由にした小型曳航台車を錘で曳航する形となっている。また、現在の曳航試験の主流は曳航台車をモーターで自走させ、検力計を介して模型船を引っ張り、速度と曳航力、即ち速度と抵抗の関係を得るタイプで、勿論トリム・沈下はフリーとさせる。】

3.2 水槽試験結果と更なる試験

チャップマンの記述³⁾では「Fig. 3 (末尾) の試験結果の表は、抵抗が最小となる模型船の最大断面積の前後位置は速度で変化することを示している」としている。(なお Fig. 3 から速度と曳航力 (抵抗) のグラフを筆者の方で作成し付録として Fig. 7 として掲載した)

なおチャップマンは帆船の速度を「復原性を保持しつつ上げることを考え「水線係数を大とし、船体断面は痩せ形」とすることを考えた。

更にチャップマンは 1784 年に国からの補助で研究を続け、「長さ 19.4m、幅 4.5m、深さ 1.2m (水深 0.9m)」の木製水槽を Skarva に保有し、1.8m から 2.4m の更に大型の模型の曳航試験を実施した。

試験した模型船は 66 種くらいで、舵つきのものも使用した。それぞれの船型について、前後を入れ替えて 4 回繰り返し平均値により精度を上げた。曳航速度は概略 1.5m/sec。

3.3 抵抗成分の考察

この時期には、現在理解されているような、全抵抗からの摩擦抵抗成分の分離などは知られていなかったが、チャップマンは全抵抗からの摩擦抵抗と造波抵抗の分離というアイデアは持っていたようである。

しかし当時はまだ対応速度則 (相似則) は知られていなかったもので、実用的な結果を得るには至らなかった。

【注 4：船の相似則の概念にたどりつくには W. Froude まで待たなくてはならなかったが、抵抗成分の分離を考えたという点では「近代造船学の祖父」に値すると思われる】

チャップマンはまた「船首抵抗と船尾抵抗」の決定を試みた。彼は船首と船尾には 2 種類の力、即ち「物理的な力 (あるいは粘着 (cohesion) 力)」と「力学的な力 (あるいは圧縮力)」の 2 つの力が働くと考えた。

彼は、船尾力は流体をつなぎ合わせる力であるとし、船

体を連続する三角形と長斜方形 (偏菱形) に分割し、流体の入射角と面積を考慮して抵抗を計算した。合計した抵抗は船の進行方向と垂直な面の抵抗に置き換え、抵抗面と呼んだ。

この結果彼は、実験結果も考慮し、船尾の側面が平均線 (船体中央線のことか?) に対して 13 度 17 分の時に抵抗が最小となるという結論を得て、船の建造における緩和法を提案した。「緩和法とは船尾対角線 (ダイアゴナル線) を舵柱に対して直線とすることである」と記載されている (Fig. 4 参照)。

チャップマンはこの緩和法を 1795 年の論文で議論し、2 隻の実船 (1797 年、1803 年建造) に適用したが、結果的にはあまり効果は無かったようで、別途「放物線法」を提唱した。文献 2 では帆船特有の試験航海操作 (縮帆やマストの傾斜の調整など) とダイアゴナル線との関係の解説があるがここでは触れない。

なお、チャップマンの名を冠したフリーゲート艦が 1803 年

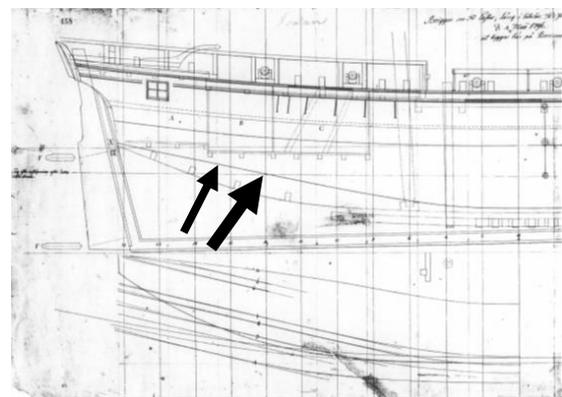


Fig. 4 Line of 13deg and 17min (arrow)

(83 歳の時) に完成している。チャップマンはそのほか舵角の最大値の検討、ロープ作作用の撚り機の発明 (文献 2 では模型の写真あり) も行っている。

【注 5：緩和法の意味は、船尾対角線を直線とすることによって、船体傾斜時の水抵抗が少ない上に板曲げが不要となり建造が楽になると言う意味かと思われる。13 度 17 分は、Fig. 4 に記された側面図に現れる対角線 (矢印) の水平線に対する角度のようである】

3.4 抵抗の力学的考察

文献 3) の論文編では、抵抗について以下のような力学的考察も行っている。勿論現在の理解からすると不十分であるが、現在流行りの MPS 法と関連して、「水粒子」の動きを考えるとという点では、意外に新しい感じもする。

チャップマンは Fig. 5 を使って流れの方向と流体力の関係を以下のように説明している。

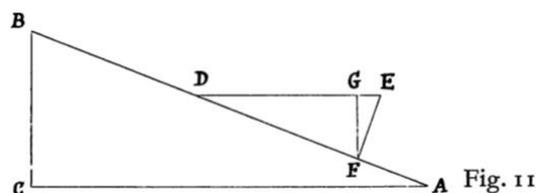


Fig. 5 Relation of the flow direction and force direction ³⁾

即ち、「船が停止している時は船の前後端に働く水圧は同じであるが、力を働かせて前進させると前端部水圧は力と反対方向に上昇し、後端部では減少する。平板が水中を平板に垂直方向に動くと抵抗は最大になり、斜めに動く場合は減少する。

このことから、同じ長さの物体でも形状や出っ張りの状態により抵抗は異なる。物体同志の衝突の場合に働く力の表現は難しくはないが、物体に向かって動いている流体が物体に及ぼす効果の表現はそう簡単ではない。

簡単のために流体は無限小の「球形粒子」から成り、連続的に物体を叩くものとすする」ということで、現在のMPS法（粒子法）を彷彿とさせる考え方で流体抵抗を求めている。ニュートンの作用・反作用の法則の適用であるが、流体の運動量変化により力を生じるという考え方にはなっていない。

更に「図5のABCは直角三角形でありAC方向に物体が速度EDで動く場合、AB辺に衝突する粒子の垂直方向速度はEF、辺に平行な速度はFDとなる。またEDがBCに対する抵抗であれば、EFとFDに分解されるが、粒子が滑るならFD方向には力が働かず、EFの更にGE成分が抵抗になり、GF成分は前後方向力には関係なくなる。ここでBCに単位時間に流入する粒子数はBCに比例するので、抵抗に寄与する粒子数はED（流速）*BC、即ち $[(BC)^2/(AB)^2]*BC$ と表現できる」としている。

【注6：ここで流速は1としている。ベクトルという表現は使っていないが、速度と力をベクトル分解した場合の考察をしている。但しEDが物体上流での流入速度ベクトルであれば、摩擦を考慮しない場合の物体表面速度は、自由流線の場合はEDとなるから表面に垂直方向の速度成分はゼロとなる。また運動量変化を考えた場合は抵抗は速度の2乗に比例する形となる。

更に、今日的解釈では、物体が一定速度で走っている場合は相対的に定常流であり、非圧縮で粘性が無い完全流体で、かつ自由表面効果が無い場合は運動量の前後変化は無く、従って抵抗はゼロ（ダランベールのパラドックス）になってしまう。従って、抵抗推定には粘性・摩擦・自由表面影響の検討が欠かせない。

チャップマンは摩擦力や自由表面影響も無視して更に最小抵抗の形状を求めているが³⁾、式の記号の定義が不明確なので、更に調べ別の機会に紹介する。

しかし、不十分であるとしても最小抵抗形状という課題を見出し、論理的に求めようとした努力は称賛に値し、近代造船学の「祖父」と呼ぶにふさわしい。

なおチャップマンのテキストでは Fig. 6 に示す「波紋図」が示されている。観察に基づくものと思われるが、最

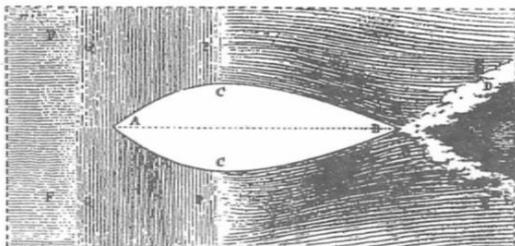


Fig.6 Observation of surface elevation around a ship

大幅位置で水面盛り上がり最大であること、船尾波が高

速艇風であること、船首波が深水状態での八の字型になっておらず、寧ろ波峰線が船長方向に直角で一直線であることから、浅水状態で高速曳航（あるいは模型を止めて高速流を流した状態）した状態（深さ基準のフルード数が1の場合）のように思われる】

4. 結言

近代造船学の父「ウィリアムフルード」の約100年以前に最小抵抗を考察し、水槽試験を実施した人F. H. Chapmanがいた。

彼は幼少のころから造船技術に携わり力学的観点からの最小抵抗船型についての検討も解析学的に行っている。勿論現代的知見からは正しく無い面もあるが、その努力が間接的にもフルードの相似則に繋がったと思われる。

科学工学技術が段階的積み重ねのもとに発達してきたことを改めて示す事象である。

水槽試験に限っても、チャップマンと同時代にも積み重ねの端緒を作ったケースがあるようなので、次の機会に更に紹介したい。

参考文献

1) 吉岡 勲：ウィリアム・フルード伝一：近代工学の曙—造船学の父、船舶技術協会、1985

2) Daniel G Harris：F. H. Chapman—HE FIRST NAVAL ARCHITECT AND HIS WORK, The Naval Institute Press、1989

【注：チャップマンの生い立ちから生涯にわたっての建造船も含めた活動を紹介している。第10章「新たな水平線の時代1792-1808」で文献3に記載の曳航試験図を収録解説している。但し筆者が今回紹介した原著の表などについては収録していない】

3) Fredrik Henrik af Chapman：ARCHITECTURA NAVALIS MERCATORIA—The Classic of Eighteenth Century Naval Architecture, DOVER PUBLICATIONS, INC. Mineola, NewYork, 2006

【注：2006年発行のDover版であるが、ARCHITECTURA NAVALIS MERCATORIA（1768年（チャップマン47歳）ストックホルムにて出版）収録の62枚の商船・軍艦の線図、及び論文（原題はTractat om Skepps-Byggeriet「A treatise on Shipbuilding」(1775年（チャップマン54歳））を収めたもの】

4) 平山次清：世界の水槽試験事始め（2）、海事技術史研究会誌、第18号、2017

【注：今回の講演会論文集原稿は、世界の水槽試験事始め（2）の内容に若干追加修正を加えたものである】

なお吉岡勲氏が、排水量と重心計算法の歴史を検証した論文「排水量計算法の進歩（大分工業大学紀要第8巻第1号1980年1月）」ではチャップマンの計算法も紹介しており参考文献には「8)Fredrik Henrik af Chapman: Tractat om Skepps-Byggeriet 1775 Amsterdam. Vial du Clairboisによる仏訳 Traite de la Construction des Vaisseaux は1781年に、James Inmanの仏訳からの英訳 A Treatise on Ship-Building は1820年に出た。両訳者は原著以後に得られた新知識による訳注をつけたので、一冊の書物に順次進歩の跡を残していて、英訳本は特に有益で興味深い」という注釈を記載している。

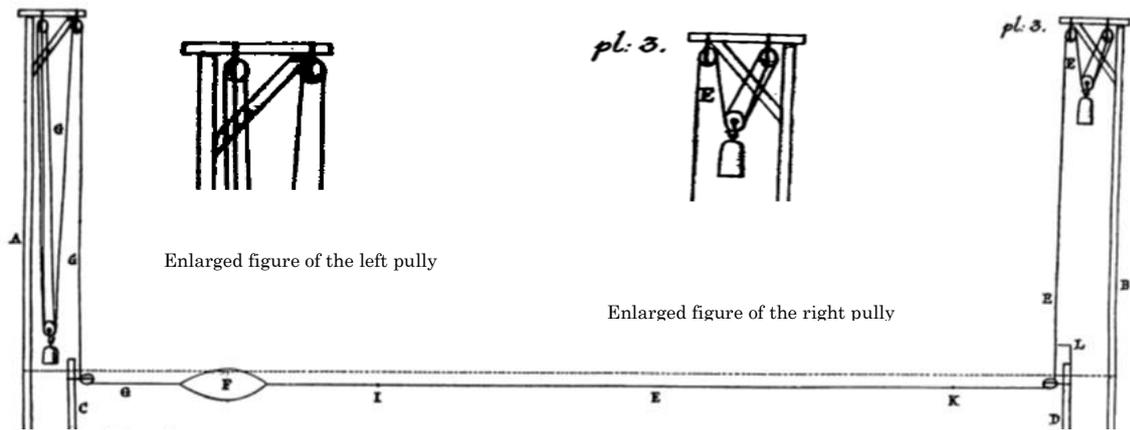


Fig.2 Experimental set up of the towing tank by F.H.Chapman ^{2,3)}

Weight of the bodies		N ^o . 1 27 pounds	N ^o . 2 27 pounds	N ^o . 3 27 pounds	N ^o . 4 22 pounds	N ^o . 5 19 3/4 pounds	N ^o . 6 16 3/4 pounds	N ^o . 7 12 pounds						
Form of the bodies														
Moving weights	Retarding weights	Time the bodies have been describing the space of 74 feet, in seconds												
		Seconds A	Seconds B	Seconds C	Seconds D	Seconds E	Seconds F	Seconds G	Seconds H	Seconds I	Seconds O	Seconds P	Seconds R	Seconds P
3/4 the weight of the body	1/2 the weight of the body	25 1/2	26 1/4	24 3/4	27 3/4	26 1/2	25 3/4	25 1/2	27 1/4	24 1/4	30	29 3/4	45	29 1/2
The weight of the body	1/2 the weight of the body	14	14	14 1/2	14 1/2	16 1/2	13 3/4	13 3/4	15	16	24 1/2	24 1/4	38	24
1 1/2 weight of the body	1/2 the weight of the body	11	10 1/2	11 1/2	10 1/2	13 1/2	11	11	10 1/4	11 1/2	12 1/2	17 1/2	30 3/4	19 1/4
37 pounds in all	12 lb. and 1/3 in all	12 1/2	lost		11	14	10 3/4	11	10	11 1/4	12	16	—	—

The bodies N^o. 1. has its greatest breadth at the middle, and its two extremities formed by parabolic lines.
 N^o. 2. has its greatest breadth at 2/7 of its length from the point B; the two extremities are also parabolic.
 N^o. 3. has its greatest breadth 1/7 of the length from the point D; the two extremities still parabolic.
 N^o. 4. has its greatest breadth at the middle; the extremity F parabolic, the other G conic.
 N^o. 5. has its greatest breadth 2/7 of the length from the point H; the extremity H parabolic, the other I conic.
 N^o. 6. has its greatest breadth 2/7 of the length from O; the two extremities conic.
 N^o. 7. wholly conic, having the greatest breadth equal to that of the other bodies, and its length twice and an half the breadth.

Fig.3 Result of the model towing test by Chapman ³⁾

付 録

チャップマンの実験結果のグラフは参考文献^{2), 3)}には掲載されていないので筆者の方でグラフを作成してみた (Fig. 7)。1 ポンド=0.453kg として曳航力を換算し、曳航速度—曳航力 (抵抗) の点をプロットしたものである。

近似曲線はエクセル内臓の機能で2~3次曲線 (一部手書きスプライン) 近似したものであるが、低速度での値を抑えていないので、低速度が大きめの曲線になっている。しかし高速度での違いは比較的合理的な結果であるように思われる。

なお Fig 2 の実験装置では、曳航模型が没水しているように見え、喫水などの記述も無いことから、回転体を水面すれすれに曳航したのではないと思われる。

回転体であることはFig. 3のNo.7の三角形が、図の下の説明で conic (円錐) と記載されていることからそのように推定される。

また模型船長は「約70cm」との記載があり、船長はほぼ同じことから、速度をフルード数に換算しなくても、そのままプロットしても形状の違いによる曳航力は比較可能と判断した。

相似則の問題はこの時点で認識されていなかったようであるが、船長を同じにしたのはチャップマンの工学的センスによるものと思われる。

Fig. 7の上の一覧は、グラフの記号と対応しやすいようにFig. 3の一部を引用したものである。例えばFig. 3でBC模型の欄にBとCについてそれぞれ値(74feet(約22m)を走航する秒数)が記載されているのは、BはBを船首として曳航したもの、Cは逆にCを船首として曳航した場合を表しているようである。

この図から目立つことは、RP、即ち円錐を底面を船首として曳航した場合が極端に抵抗が大となっている点で、これはほぼ円盤を曳航した場合に相当し渦抵抗が大なることから納得できる。逆に円錐の頂点を船首として曳航したPRも船尾からの渦は出るが全抵抗は可成り減少してい

る。
ちなみに、現在知られている円盤の抵抗係数($Cd=R/(0.5\rho SV^2)\approx 1.0$, $Rn\approx 1.0\times 10^4$)からチャップマンの場合の抵抗を求めると $3.13V^2$ (Kgf)程度となり、Fig. 7のRP曲線とオーダ的には一致する。

このグラフからはHIが可成り低めの抵抗となっているが、没水回転体の抵抗という観点からは現在でも有益な結果ではなかろうか。

また、チャップマンは最大幅の位置に着目し「抵抗が小さくなる最大幅の位置は速度によって異なる」と述べているが、没水回転体でなく水上船舶の場合は模型の喫水あるいは没水状態により、摩擦抵抗・造波抵抗・造渦抵抗も異なるので、模型状態(表面仕上げ状態も含む)も不明な状況では、水上船舶についてはこれ以上の詳細な考察は難しいように思われる。

しかしながら、前述したように、日本では平賀源内が活躍していた時期に、解析的・実験的検討がなされていたことに改めて驚くとともに、そういった工学的格差は情報流入により、工学が論理的であるが故に、またたくまに縮まるものであることも改めて痛感させられるように思う。

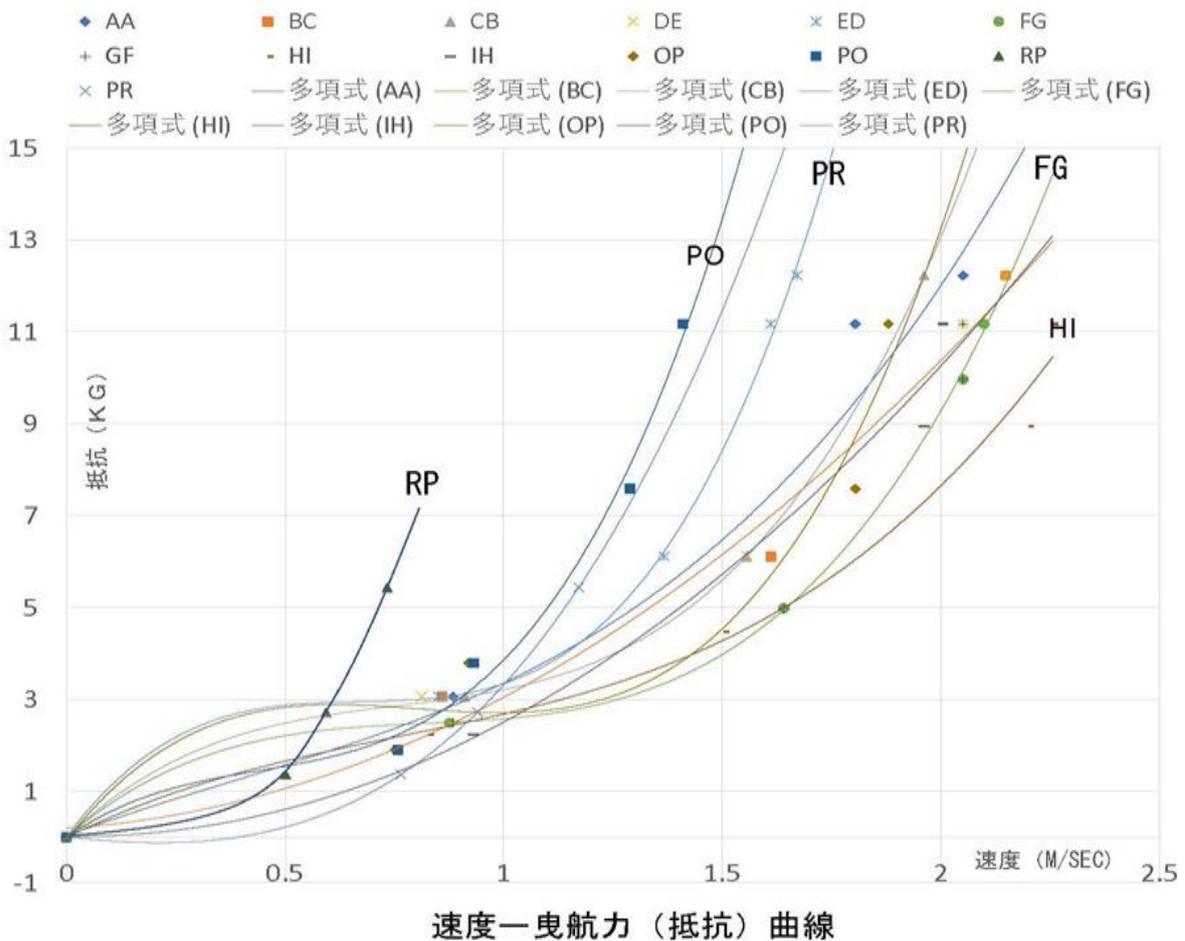


Fig.7 Relation between towing speed and towing force (resistance) obtained from the table of Fig.3