

我国の太平洋岸に存する湾の湾口狭窄部特性について

防衛大学校 土木工学教室 重村利幸

1. まえがき. 経済の高度成長に伴い、我国の臨海部は相次いで開発されて来た。特に、立地条件に恵まれた東京湾、大阪湾、伊勢湾、ならびに瀬戸内等の沿岸部は相次いで埋立てられ、そこに石油、鉄鋼等の装置型産業を中心とした大臨海工業地帯が出現させた。その結果、これら臨海諸都市では大気ならびに湾水が極度に汚染され、市民の健康を侵すのみならず、リクリエーションの場を奪い、かつ沿岸漁業を破局に追い込むこととなった。一方、企業の進出は必然的に人口の流入を招く。このため、農村部においては青年層の恒常的な流出が続き、農業生産力を低下させる等、種々の深刻な社会問題を招来した。また、湾水の利用に限ってみても、長期的な展望を欠いた湾内の開発と無秩序な企業の乱立により、防災上きわめて憂慮すべき状況が生じると共に、港自体、本来の機能を十分に発揮することが難しくなりつつある。

この様なアナーマルな状況を一日も早く是正するためには、産業の分散を誘引し、かつ均衡のとれた地域社会の開発・育成をも図るす拔本的な湾内開発計画が早急に立案、実施されなければならない。その際、環境アセスメントを十分に実施すると共に、単に予測物流量のみにとらわれず、今後増大することが予想される沿岸海洋開発事業のための基地整備等も十分考慮に入れ、長期的展望に立った計画を立案すべきことは言うまでもない。著者は、これら計画の立案に基礎資料を提供する意味で、我国の太平洋岸に存する湾の総点検を試みた。調査にあつては、湾内開発を考える際に工學上、特に問題となる湾口狭窄部の諸特性を重点的に調べた。

この問題は米国では陸軍工兵隊の支援の下に、M. P. O'Brien¹⁾, J. W. Johnson²⁾, P. Bruun et al.³⁾ 等によって研究され、かなりの成果が得られている。(しかしながら、これらの研究は主に砂浜海岸上に存する湾岸の、しかも狭窄部における断面積のみに関する研究である。したがって、これらの成果が直ちに、屈曲に富んだ岩浜海岸に存するこの多い我国の湾に適用できるかどうか大いに疑問である。加之、将来、大型船舶ならびに大型構造物の出入が増々頻繁になることから考えて、湾内の機能的な運用をはかるためには湾口狭窄部の断面積のみに関する研究では不十分と考えられる。そこで著者は、狭窄部における特性項として以下に示す3つの要素

a. 狭窄部断面の断面積 b. 狭窄部断面の断面巾 c. 狭窄部断面の方位角
を研究対象に選んだ。研究の第1段階では、O'Brien や Johnson 等の考え方と同様、これら3要素の生成に支配的な影響を与えていると考えられる外力項との関係を調べ、次いで重畳分析の手法を用いて、影響を及ぼすと考えられる全外力項(10個)の各々を逐次導入することにより、各要素の解明を試みた。本文では紙面の制約上、第1段階の解析結果について述べる。

2. 基礎データの収集. 我国の太平洋岸に沿って、北は花咲湾(北海道)から南は鹿児島湾まで大小合せて95個の湾を選出した。同選出にあつては、できるだけ地域的に均一な様にし、また原則として、湾口部に人工的改変の加えられていない湾を抽出した。抽出した各湾については、以下に示す各項目につき資料を収集・測定した。

a. 湾の形状寸法 b. 湾周および湾底の地質 c. 湾周辺の風 d. 湾周辺の波および潮差

2-a. 湾の形状寸法. 海上保安省水路部発行の海図(昭和48年度小改正済み)から、以下に示す10項目につき測定した。

(大潮満潮面Fにおける湾の形状寸法)

1) 湾面積; $SAST(Km^2)$ 2) 湾の周長; $SHL(Km)$ 3) 湾の主軸長; $PAL(Km)$

(大潮干潮面Fにおける湾の形状寸法)

- 4) 湾面積; SANT (km^2) 5) 狭窄部断面積; TA (km^2) 6) 狭窄部巾; WIDTH (km)
 7) 狭窄部断面の方位角; DIREC (degree) 8) 狭窄部断面の最大水深; MAXD (m)

(その他の特性項)

- 9) 湾口部の外洋に対する開口角度; OPANG (degree) 10) 湾口の数; ENTN

2-b. 湾周および湾底の地質. 湾周および湾底の地質特性は、気象ならびに海象特性等の影響による湾周底の侵食作用に対し、その抗力の度合を評価するために是非とも入手されなければならない重要な情報である。しかしながら、抽出した全ての湾についてほぼ同精度で所要のデータを取得することは極めて難しいことである。そこで精度は多少落すが、湾周の地質については経済企画庁国土調査課発行の表層地質図(昭和42年発行、縮尺: 1:500,000, 全6枚)から調べ、また湾底地質については、海上保安庁水路部発行の日本近海底質分布図(昭和24年発行、縮尺1:2,000,000, 全3枚)ならびに各海図等から調べた。

2-c. 湾周辺の風. 湾口部の形成に与える風の影響を評価する際、かかる出現頻度の風を評価の対象とするについては議論の別れるところであるが、本研究では一応、月最大風を評価の対象とすることにした。風データの収集にあたっては、抽出した湾の近傍に存する34ヶ所の観測所で観測された月最大風を5ヶ年(4)にわたり集計し、これを評価対象風とした。なお、抽出した湾の近傍で観測データが得られない場合には、上記観測所で得られたデータに基づいて内挿法により推定した値を評価対象風の諸元とした。

2-d. 湾周辺の波および潮差. 波データについても風データの場合と同様に、月最大波を評価の対象に選んだ。対象波の諸元は、各港湾建設局、水産庁漁港部、北海道開発局港湾部等が観測された波浪データから月最大波を選び、これらを5ヶ年にわたり集計して定めた。なお、観測期間が5ヶ年に満たない場合、あるいはまた観測データが得られない湾口部においては、近傍の評価対象波の諸元から内挿法により推定した値ならびに前述の評価対象風のデータに基づいて、S-M-B法により推定した波浪諸元を参考として評価対象波の諸元を定めた。また潮差については、各海図に与えられている潮位資料から各湾口部における平均潮差、MTRを算出した。

3. 外力および外力関連項の算出. 湾口部の形成に影響をおよぼすと考えられる外力およびその関連項として以下に示す10個の物理量を考えた。

a. 湾口部外洋における外力およびその関連項.

- 1) 風エネルギー; WDEN ($\text{Kg} \cdot \text{m}^2 / \text{sec}^2$) 2) 同方位角; WDANG (degree)
 3) 波エネルギー; WVEN ($\text{Kg} \cdot \text{m}^2 / \text{sec}^2$) 4) 同方位角; WVANG (degree)
 b. 湾口狭窄部を通過して湾内(外)に侵入(出)する外力およびその関連項.
 5) 侵入風エネルギー; PWDEN ($\text{Kg} \cdot \text{m}^2 / \text{sec}^2$) 6) 同方位角; PWDANG (degree)
 7) 侵入波エネルギー; PWVEN ($\text{Kg} \cdot \text{m}^2 / \text{sec}^2$) 8) 同方位角; PWVANG (degree)
 9) タイダルプリズム; TP (km^3) 10) 潮汐流の平均流速; MVEL (m/sec)

これら10個の物理量は以下の様にして算出した。

3-a. 風エネルギーおよび同方位角の算出. いま、16方位中、任意の方位“ i ”から吹いてくる風の単位容積当りの風エネルギー、WDEN(i)が下式で与えられると仮定する。

$$\text{WDEN}(i) = \frac{1}{2} \rho_a V(i)^2 (f(i)/60) \quad (3-1)$$

ここに、 ρ_a ; 空気密度 (kg/m^3) $V(i)$; i 方向から吹いてくる風の風速 (m/sec)

$f(i)$; 5ヶ年(60ヶ月)間に i 方向から吹く風の出現頻度

そうすると、WDEN(i)の水平(東西)方向の分エネルギーWDENH(i)および垂直(南北)方向の分エネルギー

WDENV(i) は、それぞれ下式で与えられる。

$$WDENH(i) = WDEN(i) \sin(22.5(i-1)) \quad (3-2)$$

$$WDENV(i) = WDEN(i) \cos(22.5(i-1)) \quad (3-3)$$

したがって、WDEN および WDANG はそれぞれ下式から求められる。

$$WDEN = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{15} WDENH(i)\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{15} WDENV(i)\right)^2} \quad (3-4)$$

$$WDANG = \sin^{-1}\left(\sum_{i=1}^{15} WDENH(i) / WDEN\right) \quad (3-5)$$

同様にして、湾内に侵入してくる風のエネルギーおよびその方位角は下式から求まる。

$$PWDEN = \sqrt{\left(\sum_{i=a}^b WDENH(i)\right)^2 + \left(\sum_{i=a}^b WDENV(i)\right)^2} \quad (3-6)$$

$$PWDANG = \sin^{-1}\left(\sum_{i=a}^b WDENH(i) / PWDEN\right) \quad (3-7)$$

ここに、a, b は狭窄部断面の中心から湾口導入部の両岸最突部へ引いた接線の方位角である。以上の諸式から風エネルギー関連項を算出した。

3-b. 波エネルギーおよび同方位角の算出。 風エネルギーの場合と同様にして、“i”方向から侵入してくる波の単位巾、1波長当りのエネルギー、WVEN(i)を考え、それが下式で与えられるものと仮定した。

$$WVEN(i) = \frac{1}{8} \rho_w g H(i)^2 L(i) (f(i)/60) \quad (3-8)$$

ここに、 ρ_w ; 海水密度 (kg/m^3) g ; 重力の加速度 (m/sec^2)

$H(i)$; i方向から侵入してくる波の波高 (m) $L(i)$; 同波長 (m)

以下、式(3-2)から式(3-7)に示したと全々と同様な式の展開により、WVEN, WVANG, PWDEN, PWDANGの式を誘導し、波のエネルギーおよびその関連項を算出した。

次にタイトルプリズムの算出した。TPの算出に用いる諸元を用いるかについては議論の別れるところであるが、抽出した各湾の干出し部面積は比較的狭く、(かも湾岸は切り立ったものが多いところから湾の面積としては、前述のSASTとSANTの平均値、MSAを用いることとした。また潮差については、風や波の場合と異なり潮汐はほぼ恒常的に発生するところから、平均潮差、MTRを用いることにした。即ちTPは下式により算出した。

$$TP = MSA \times MTR \quad (3-9)$$

最後に潮汐流の湾口狭窄部における平均流速の計算であるが、これはTPE TAと平均潮汐周期、Tの1/2で除して下式から求めた。

$$MVEL = 2TP / (TA \times T) \quad (3-10)$$

以上の諸式を用いて、湾口部の形成に影響をおよぼすと考えられる10個の外力関連項を算出した。

4. 狭窄部特性の検討-その1. まえがきで述べたごとく、湾口狭窄部の特性を代表する要素として、TA, WIDTH, DIRECTIONの3つの特性項を選んだ。これらの特性項はいづれも湾口部における船舶等の円滑な航行に対し、支配的な影響をおよぼす極めて重要な要素である。本章では、これら3つの特性項が前章で算出した外力項のうち、何れの外力項に最も支配的な影響を受けているかを見出し、次にこれら卓越外力項と各特性項との間に存在する関係について検討した。次に示す表-1は、湾口狭窄部における各特性項と前章で算出した10個の外力項との相関係数を調べたものである。

Table-1. Correlation coefficients among three parameters of the throat section and ten external variables.

	Total bays (N=95)						Exposed bays (N=66)						Protected bays (N=29)					
	(original values)			(log values)			(original values)			(log values)			(original values)			(log values)		
	TA	WIDTH	DIREC	TA	WIDTH	DIREC	TA	WIDTH	DIREC	TA	WIDTH	DIREC	TA	WIDTH	DIREC	TA	WIDTH	DIREC
TP	.658	.715	-.133	.835	.843	-.026	.643	.718	-.133	.844	.873	.062	.928	.777	.187	.824	.772	.276
MVEL	.281	.407	-.128	.206	.346	-.074	.268	.413	-.124	.286	.443	-.075	.560	.439	-.058	.051	.162	-.182
WDEN	.030	-.004	.123	.009	.045	.098	.095	.077	.002	.030	.112	-.024	.132	.030	.048	.239	.132	.100
WDANG	.178	.160	.104	.172	.191	.021	.170	.154	.043	.148	.219	.085	.244	.175	.480	.357	.147	.471
PWDEN	-.041	.006	-.239	.143	.172	-.264	-.136	-.093	-.127	-.199	-.144	-.130	---	---	---	---	---	---
PWDANG	.159	.182	-.317	.199	.210	-.320	.081	.098	-.149	-.031	.067	-.003	---	---	---	---	---	---
WVEN	-.132	-.071	.011	-.131	-.047	-.079	-.137	-.086	-.082	-.263	-.161	-.085	-.162	-.021	.123	-.090	.010	.113
WVANG	.091	.098	.003	-.058	-.002	.137	.132	.158	.044	.018	.097	.273	.120	.055	-.252	-.160	-.138	-.196
PWVEN	-.010	-.021	-.067	.108	.135	-.311	-.022	-.035	-.055	-.154	-.148	-.139	---	---	---	---	---	---
PWVANG	.130	.163	-.299	.196	.207	-.309	-.036	-.052	.964	-.007	-.032	.849	---	---	---	---	---	---

ただし、抽出した95個の湾の中には、湾口部が外洋に対し遮蔽されている29個の湾が含まれているので、湾口部の外洋に対する露出状況の影響も合せ検討するため、これらの湾についても同様に相関係数を算出した。表-1の結果から以下の諸長が明らかになった。

- TAは湾口部の外洋に対する露出状況にあまり関係せず、TPに支配的な影響を受ける。かつTAの大きさはTPの指数関数で表わされる可能性がある。
- WIDTHは湾口部の外洋に対する露出状況にあまり関係せず、TPに支配的な影響を受ける。かつWIDTHはTPの指数関数で説明される可能性がある。
- DIRECは湾口部の露出状況に大きく左右され、PWVANGに支配的な影響を受ける。(かもDIRECとPWVANGとの間にはリニアな関係が存するものと思われる。

以上の結果に基づいて、湾口狭窄部における各特性項とそれらに対応する各卓越外力項との関係につき解析を進めた。細部を以下に述べる。

4-A. 狭窄部断面積とタイダルプリズムの関係。

図-1は抽出した全湾のTAとそれに対応するTPの各値を両対数紙上にプロットしたものである。両者の間に回帰分析を実施した結果、F式を得た。

$$TA = 3.474 TP^{0.600} \quad (4-1)$$

ただし、上式においてTAおよびTPの単位はそれぞれ、 m^2 および m^3 である。両変数間の相関係数は0.835とかなり高い。(したがって、上式も2変数間に存する一般的な傾向の推定のために使用することは可能であろう。しかしながら、図からも明らかで個々のデータは回帰線から、かなりはなれて分布している。(したがって、より信頼すべき関係式を見出すためには、個々のデータの特性を考慮に入れなければならないパラメータを導入して更に解析を進める必要がある。

4-B. 狭窄部断面幅とタイダルプリズムとの関係。

図-2は抽出した全湾のWIDTHとそれに対応するTPの各値を両対数紙上にプロットしたものである。両者の間に回帰分析を実施した結果、以下に示す関係式を得た。

$$WIDTH = 3.462 TP^{0.405} \quad (4-2)$$

ここにWIDTHおよびTPの単位はそれぞれ m および m^3 である。

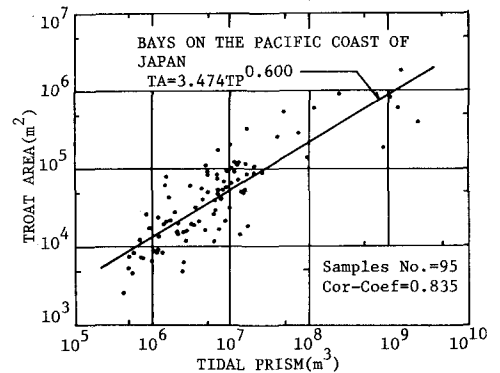


FIG.-1. RELATIONSHIP BETWEEN TA AND TP.

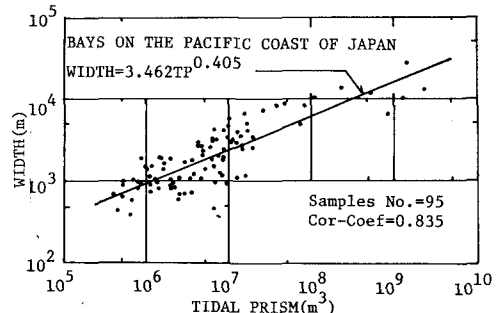


FIG.-2. RELATIONSHIP BETWEEN WIDTH AND TP

ある。2変数間の相関係数は0.843であった。したがって、式(4-2)もWIDTHとTPの間に存する一般的な傾向の推定には十分役立つであろう。(しかしながら、図-2からも明らかだが、個々のデータは回歸線から相当にばらつて分布している。したがって、この場合も、ばらつきの原因を明らかにする何らかのパラメーターを導入することにより更に解析を進めるべきである。

4-C. 断面方位角と侵入波エネルギーの方位角との関係。

図-3はDIRECとPWVANGとの関係を正方眼紙上にプロットしたものである。ただし、ここにプロットしたデータは

狭窄部断面が外洋に対して開いている66個の湾に関するものである。両者の間には0.964と実に高い相関係数が認められる。同じく回歸分析を実施した結果、両変数の間に下式を示す関係式を得た。

$$DIREC = -60.0 + 0.88 PWVANG \quad (4-3)$$

解析結果はまた、以下に述べる如き極めて興味ある結果を示した。

1) DIRECはPWVANGに対して約60度の位相遅れを有する。

2) DIRECの値は、ほぼ180度以下であり、一部300度以上のものもある。しかしながら、180度から300度の間の値を有する湾は、ほとんど見当らない。

これらはいずれも太平洋岸の地域特性によるものと考えられ、極めて興味深い。また式(4-3)は実用上、十分に信頼し得る結果を与えるものと思われる。

以上、湾口狭窄部における3つの特性項につき、各卓越外力項との関係を調べた。その結果、DIRECについては満足すべき結果が得られたが、TAおよびWIDTHに関しては信頼するに足る結果は得られなかった。そこで、これらの両特性項に関しては、種々のパラメーターを導入して更に解析を進めた。細部は次章に述べる。

5. 狭窄部特性の検討-その2.

TAおよびWIDTHの、回歸線からのばらつきには種々の原因が考えられるが、いずれにしても両特性項に比べてTPが支配的な影響を与えている以上、TPの湾内外への出入の難易さに大きな影響を与えられとされる湾の形状要素について検討してみる必要がある。そこで、形状要素に関するパラメーターとして、2-aで測定した諸量から以下に示す12個の無次元量を考えた。

- 1) RSHL: EQSHL/SHL 2) RLSHL: PAL/SHL 3) SLOP1: MDEP/PAL 4) SLOP2: MAXD/PAL 5) RDW1: MDEP/WIDTH
6) RDW2: MAXD/WIDTH 7) RWSHL: WIDTH/SHL 8) RWL: WIDTH/PAL 9) RAR: TA/MSA 10) RDT1: MDEP/MTR
11) RDT2: MAXD/MTR 12) RANG: OPANG/360

ここに、EQSHLはMSAと等しい面積を有する仮想円の円周を示す。

一方、TAおよびWIDTHの各回歸線からのばらつき度を評価するために、以下に示す2つの無次元量

$$TA_{acc}: (\text{式}(4-1) \text{ から推定した } TA \text{ の値} / TA) \times 100 (\%)$$

$$WIDTH_{acc}: (\text{式}(4-2) \text{ から推定した } WIDTH \text{ の値} / WIDTH) \times 100 (\%)$$

を考え、これら TA_{acc} ならびに $WIDTH_{acc}$ と上記12個の形状パラメーターとの相関係数を算出した。結果

Table 2. Correlation coefficients among each of TA_{acc} and $WIDTH_{acc}$ and geometrical parameters of bays.

		RSHL	RLSHL	SLOP1	SLOP2	RDW1	RDW2	RWSHL	RWL	RAR	RDT1	RDT2	RANG
Total bays (N=95)	A	-.408	-.307	-.418	-.368	-.069	.007	-.561	-.408	-.630	-.683	-.571	-.159
	W	-.602	-.219	-.111	-.073	.592	.645	-.845	-.759	-.382	-.167	-.099	-.195
Exposed bays (N=66)	A	-.280	-.151	-.436	-.376	-.126	-.024	-.503	-.399	-.633	-.686	-.534	-.053
	W	-.567	-.128	-.171	-.129	.517	.596	-.842	-.734	-.407	-.171	-.073	-.116
Protected bays (N=29)	A	-.604	-.492	-.536	-.485	-.028	.009	-.643	-.474	-.656	-.656	-.617	.000
	W	-.646	-.249	-.105	-.067	.693	.704	-.849	-.888	-.365	-.096	-.067	.000

を表-2に示す。ただし、表中の各値は全変数のlog値に基づいて計算した相関係数である。また、表中のAおよびWはそれぞれTA_{acc}, WIDTH_{acc}を意味する。表-2の結果から以下の諸実が明らかになった。

- 1) 湾口狭窄部の外洋に対する露出状況は、TA_{acc}およびWIDTH_{acc}にあまり影響しない。
- 2) TA_{acc}に対しては、RDT1およびRARが、かなり影響をおよぼしている。
- 3) WIDTH_{acc}に対しては、RWSHLが顕著な影響をおよぼしている。

以上の結果から、TAに対しては、一応、RDT1を、また、WIDTHに対してはRWSHLを、それぞれTAおよびWIDTHのばらつき度に影響をおよぼす有力なパラメーターと判断し、これら形状パラメーターを導入して、全テーターを表-3に示す通り分類した。

Table 3. Classification of data due to the geometrical parameters.

Classification for TA			Classification for WIDTH		
Class	Range of RDT1	Samples	Class	Range of RWSHL	Samples
A-1	RDT1<15.0	23	W-1	RWSHL<0.08	26
A-2	15.0<RDT1<40.0	47	W-2	0.08<RWSHL<0.2	41
A-3	RDT1>40.0	25	W-3	RWSHL>0.2	28

次いで、分類したこれら各テーターについて、前章と同様、回帰分析を実施した。結果は表-4に示す通りである。表-4から明らかな如く、TAおよびWIDTHとTPとの相関係数はかなり高まっている。特に、WIDTHの場合は相関係数が大巾に増大している。

Table 4. Regressions obtained from each of the classified data.

Regressions for TA			Regressions for WIDTH		
Class	Regressions	Cor-Coeff	Class	Regressions	Cor-Coeff
A-1	TA=9.876TP ^{0.479}	0.741	W-1	WIDTH=1.757TP ^{0.412}	0.942
A-2	TA=23.212TP ^{0.473}	0.896	W-2	WIDTH=0.489TP ^{0.535}	0.955
A-3	TA=15.685TP ^{0.550}	0.860	W-3	WIDTH=1.989TP ^{0.470}	0.966

図-3は、表-3のクラスA-2の場合のTAとTPを両対数上にプロットしたものである。同図から明らかな如く、TAの回帰線からのばらつきはテーターを分類する前の結果に比して、かなり減少している。しかしながら、依然として、個々のTA値は回帰式から、かなりの量ばらけて分布している。したがって、RDT1のみの導入に止まらず、更には他のパラメーターの導入も検討してみる必要があると思われる。

図-4は同じくW-2の場合のWIDTHとTPの関係を示す。同図から明らかな如く、WIDTHのばらつき度は顕著に減少している。このことは形状パラメーターRWSHLによる分類の正当性を示していると考えられ、したがって、表-4に示した回帰式は十分信頼に値するものと思われる。

6. まとめ 湾口狭窄部における3つの特性項、TA, WIDTH, DIRECと各卓越外力項との関係を検討した。その結果、WIDTHはRWSHLなるパラメーターを導入すれば、TPの指数関数で表わされ、またDIRECはPWANGと直線的な関係を有することが判った。しかしながら、TAはRDT1なるパラメーターを導入したにも拘らずTPのみの関数として表わすことは不適当と思われる。従って、より信頼に足る関数式を得るためには、他の外力項ならびに地質条件等の影響も考慮に入れ、更に検討する必要がある。最後に本研究の遂行にあたり終始、懇切なるご指導をいただいたJ. W. Johnson教授に深甚なる謝意を表す。

文献

- 1) O'Brien, M.P., "Equilibrium Flow Areas of Tidal Inlets on Sandy Coasts," ASCE, Feb. 1969, pp.43-52.
- 2) Johnson, J.W., "Characteristics and Behavior of Pacific Coast Tidal Inlets," Jour. Waterways and Harbors Division, ASCE, Aug. 1973, pp.325-339.
- 3) Brunn, P. and Gerritsen, F., "Stability of Coastal Inlets," North Holland Publishing Co., Amsterdam, 1960, p.123
- 4) 気象庁年報, 全国気象表第12号第2部, 昭和42年~昭和46年, 日本気象協会発行

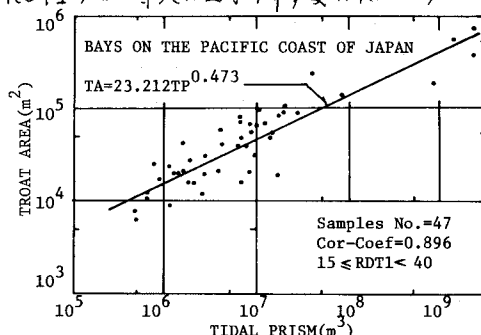


FIG.-4. RELATIONSHIP BETWEEN TA AND TP.

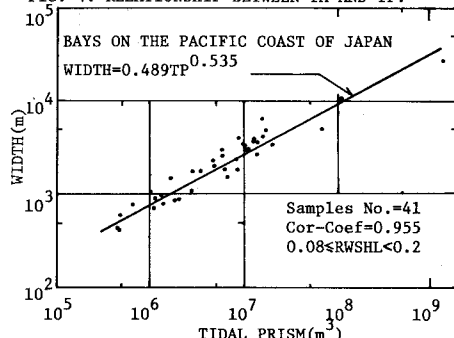


FIG.-5. RELATIONSHIP BETWEEN WIDTH AND TP.