

インレットの形状特性に関する基礎的研究

FUNDAMENTAL STUDY ON INLET GEOMORPHOLOGY - AN APPROACH FOR A GLOBAL A-P RELATIONSHIP -

西 隆一郎¹・Nicholas C. Kraus²・川森 晃³

Ryuichiro NISHI, Nicholas C. KRAUS and Akira KAWAMORI

¹正会員 博(工) 鹿児島大学助教授 水産学部水産科 (〒890-0056 鹿児島市下荒田4丁目50-20)

²Member of ASCE, PhD Coastal and Hydraulic Laboratory, ERDC, U.S. Army (Vicksburg, Mississippi, U.S.A.)

³正会員 博(工) (株) アルファ水工コンサルタンツ (〒063-0829 札幌市西区発寒9条14丁目516番336)

A number of inlets exist mainly in the eastern coast of Hokkaido, Japan, however relatively small number of inlets, for instance Imakirekuchi Inlet of Lake Hamana, can be seen in the rest of Japan coast. Here, tidal prism data (P) and cross sectional area (A) of inlet in Japan, China, U.S.A., New Zealand, Vietnam, and India are collected from the available literatures to study local character of inlets and global character of inlets. A modified inlet A - P relationship in Japan is derived first, then inlet A - P relationships in each countries are considered separately. Finally, global A - P relationship, for which tidal prism ranges from 10^5 to 10^9 and cross sectional area ranges 10^1 to 10^4 in metric units, is derived with reasonably good correlation. So far, this global A - P equation could be applied to an inlet in other countries as the first order approximation, but also necessary to improve the equation by incorporating more field data.

Key Words : Inlet, tidal prism, cross sectional area, local A - P relationship, global A - P relationship, inlet review

1. まえがき

潮汐と沿岸漂砂の作用により、写真-1に示すような海跡湖地形が生じる場合がある。わが国では、北海道に少なくとも69個の海跡湖があり(大木, 2000)¹⁾、その他、全国的にも存在している(例えば、写真-1参照)。このような、海跡湖の一部が波の作用や内水氾濫の影響で切れた場合には、写真-2に示すように感潮狭口を持つインレットが形成される。外洋と内湾を結ぶ安定なインレットの形状は、海水循環、漂砂、航路維持および周辺魚場の環境に影響を及ぼすために、インレットの断面形状を何らかの手法で定式化する必要がある。

我が国では、主に北海道のインレットを対象にタイダルプリズム(P)と感潮狭口断面積(A)の関係が得られ、そして、我が国以外でも、米国、ニュージーランド、中国、ヨーロッパなどでこの種の研究が行なわれている。

しかしながら、地形や海象条件が異なる国々で得られた個別の経験的な A - P 関係の関連性や相違点が必ずしも明確ではない。当然、世界中のインレットは多様性に富むものであり、一つの A - P 式で詳細を説明できるものではないが、ある種の平均値(汎用 A - P 式)からのずれを見ることが、より個々の特性が統計的に明確になるはずである。加えて、発展途上国などにおいては現地調査自体が困難なことも多いために、インレットの工学的設計を行なう場合に必要な現地データの蓄積されていない場合があり、何らかの指標となる標準的な A - P 式の開発が望まれる。

本研究では、文献調査により得られた既知のデータをできるだけ網羅した形で当面の使用に耐えうる汎用 A - P 式を誘導する。つまり、first orderの近似式として使用できる汎用 A - P 式を提案するが、個々のインレット特性の詳細が必要な場合には、基本的に個別のインレットにおいて現地調査を行い、併せて、インレットの流体力学的

現象や安定性に関する検討（例えば，Escoffier（1977）²⁾を参照）も実施することを前提としている。



写真－1 鹿児島県上飯島の海跡湖



写真－2 浜名湖今切口とflood tidal shoal

2. インレットデータの収集

可能な範囲で汎用性のある A - P 式を誘導するために、文献調査を行った。対象とした論文は、後述の参考文献にも示されるように海岸工学論文集、土木学会論文集、Proceedings of International Conference on Coastal Engineering, Journal of Coastal Research, Shore and Beach, 各大学の学位論文、各研究機関のレポート、および、教科書などである。

インレットに関連した文献調査では、主に、タイダルプリズム P と感潮狭口断面積 A に関する記載のある文献を探し、各文献に基づいて、 A および P のデータベースを作成した。できるだけ多くのインレットデータを包括するように試みたが、現況では、表－1に示すような諸国とインレットデータ数になっており、最終的に解析に用いた全インレット数は、250個となっている。なお、南米、ロシア、ヨーロッパ、アフリカなどのインレットデータは、現状では本データベースに包含されていないが、データが得られ次第、逐次取り込む予定である

表－1 調査に用いたインレットデータの数

国名	インレットデータ数
日本	14
中国	32
米国	161
ニュージーランド	29
ベトナム	5
インド	9
合計	250

3. 各国のインレット A - P データ

日本、中国、アメリカ、ニュージーランド、ベトナム、インドのインレットデータについて、断面積 A は m^2 単位で、タイダルプリズム P は m^3 単位で、以下に考察する。

3.1 日本のインレット A - P 関係

これまでに提案されているわが国の A - P 式を概観すると、以下のようになる。

3.1.1 近藤の研究

主に北海道のインレットを対象に、近藤は多くの研究を行っており、その成果は、近藤による一連の研究^{3), 4), 5), 7)}に示されている。その中で、近藤は A - P 式として、次式を導いている。

$$\frac{P}{A} = K \sqrt{a_s g} \cdot T \quad (1)$$

また、感潮狭口の安定断面積 A_e に関しては、式（2）を導いている。

$$\frac{P}{A_e} = 0.22 \sqrt{a_s g} \cdot T \quad (2)$$

ここで、 a_s は外界潮汐の振幅、 T は潮汐の周期、 g は重力加速度、 K は係数である。

3.1.2 川森の研究

川森（1993）⁸⁾は、オホーツク海に面するインレットの研究を行い、式（3）に示す A - P 関係式を導いた。

$$P = 20000A \quad (3)$$

なお、 A - P 関係に関する類似のものとして、Shigemura（1980）⁹⁾は、わが国の231個の湾について検討を行い、太平洋岸の湾、日本海側の湾、九州西岸の湾、瀬戸内海の湾について、それぞれ以下に示す A - P 関係式を誘導している。ただし、ここに示す各関係式の単位は、タイダルプリズムに関しては km^3 、そして、感潮湾口断面積は km^2 であることに注意する必要がある。

太平洋岸の湾:

$$A = 0.902P^{0.612} \quad (4)$$

日本海側の湾;

$$A = 4.358P^{0.692} \quad (5)$$

九州西岸の湾;

$$A = 0.235P^{0.454} \quad (6)$$

瀬戸内海の湾;

$$A = 0.337P^{0.675} \quad (7)$$

3.1.3 わが国のインレットデータの再検討

わが国のインレットに関しては、調査項目としてタイダルプリズムと感潮狭口の断面積以外に、潮汐の振幅、潮汐の周期、沿岸漂砂量、底質粒径などもデータベースに取り込んだ。ただし、底質粒径に関しては、多くのインレットでデータが記載されていなかった。

わが国のインレットに関する文献としては、初期のものと言える近藤 (1972)³⁾ の論文には、 A - P 関係式として、湾や河川も取り込んでおり、やや分散が大きな A - P データセットになっている。そこで、わが国のインレットの A - P 式を再検討するために、湾と河川のデータを省き、そして、能取湖インレット(Kondo, 1990)⁷⁾、浜名湖今切口インレット(松田, 1983)¹⁰⁾、渡辺ら (2002)¹¹⁾のデータをまとめた。その結果を、図-1に示す。図-1に示されるわが国のインレット A - P 関係は、M.P. O'Brien (1966)¹²⁾によりもともと提唱されたように、対数グラフ上でタイダルプリズムと感潮狭口の断面積の間に線形関係が成り立つことを良く示している。

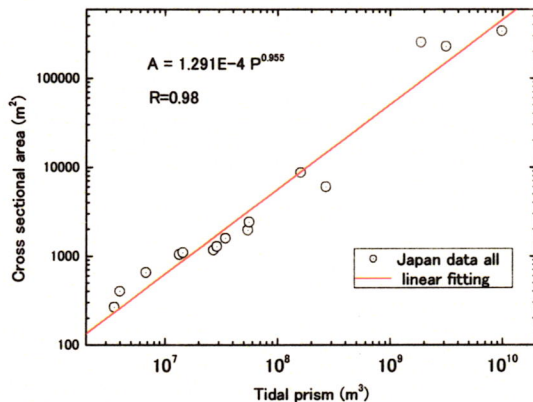


図-1 日本のインレット A - P 関係

図中のインレット A - P 式は、式 (8) で示される。

$$A = 1.291 \times 10^{-4} P^{0.955} \quad (8)$$

ここで、相関係数は $R=0.98$ である。なお、川森の式 (3) は、 $A=0.5 \times 10^{-4} P^{1.0}$ と変形できるが、ここで用いたデータベースの範囲では式 (8) の方が A に対し大きめの値を算出することになる。また、式 (8) のタイダルプリズムのべき乗係数は、オーダー的にJarrett (1976)¹³⁾により米国西海岸のインレットに対して得られた式 (9) と類似したものとなっている。なお、Jarrett の提案した式はもともとフィート単位のものが示されているが、ここでは、m単位に変換してある。

$$A = 1.576 \times 10^{-4} P^{0.95} \quad (9)$$

3.2 中国のインレット A - P データ

中国のインレットデータに関しては、Zhang (1987)¹⁴⁾ および、Meng (2001)¹⁵⁾ を参照した。その結果を、図-2に示す。図中、実線で示される線形補間式は、次式のようになる。

$$A = 1.748 \times 10^{-4} P^{0.980} \quad (10)$$

タイダルプリズムのべき乗係数は、オーダー的にJarrett(1976)¹³⁾により米国西海岸のインレットに対して得られたものに比べると3%ほど大きい値になっている。

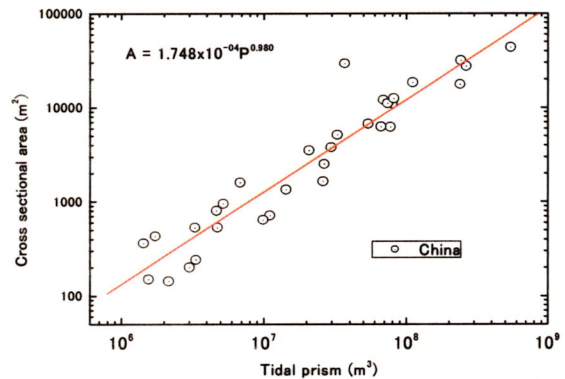


図-2 中国のインレット A - P 関係

3.3 米国のインレット A - P データ

米国のインレットデータに関しては、米国陸軍水路実験所内のメモランダム¹⁶⁾を参考に、インレットデータ数161個の電子データベースを作成した。本データセットはJarrett (1976)¹³⁾の用いたインレットデータも総て包含しており、米国のインレット A - P データベースとしては、最も包括的なものと考えられる。

図-3に、これらのデータを総てプロットしてある。データ個数が多いために多少のばらつきはあるが、線形的な関係が比較的良好に維持されていることが分かる。図中、実線で示される線形補間式は次式のようになる。

$$A = 1.53 \times 10^{-4} P^{0.954} \quad (11)$$

また、相関係数は $R=0.96$ である

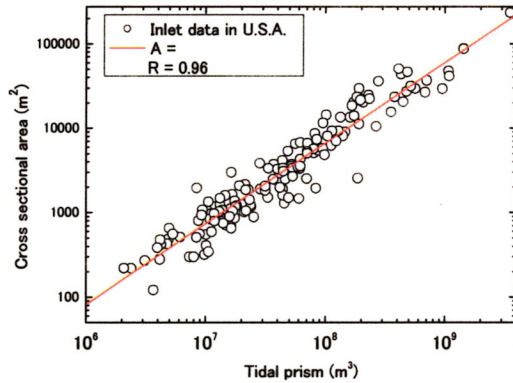


図-3 米国のインレット A - P 関係

3.4 ニュージーランドのインレット A - P データ

ニュージーランドのインレットデータは、ニュージーランド北島のインレットに関するHicks and Hume (1996)¹⁷⁾と、ニュージーランド全域を対象としたHume and Herdendorf (1993)¹⁸⁾を参考に、データベースを作成した。なお、後者の論文には、インレット以外に、湾や河川などの A - P データも示されており、それらのデータを取り込んで別途作図を行なったが、線形関係からの分散が非常に大きく、本考察の範囲外とした。

図-4に示されるニュージーランドの A - P 関係は、タイダルプリズムが大きい領域で分散の度合いが目立つが、全体としては図中の実線で示される A - P 関係式にまわっており、相関係数は $R=0.935$ であった。

$$A = 1.051 \times 10^{-5} P^{1.137} \quad (12)$$

ただし、図中にはニュージーランドの北島にある16個のインレットデータが含まれており、そのデータだけを用いた場合には、相関係数 $R=0.99$ とより線形の関係が強い次式が誘導された。

$$A = 1.68 \times 10^{-4} P^{0.950} \quad (13)$$

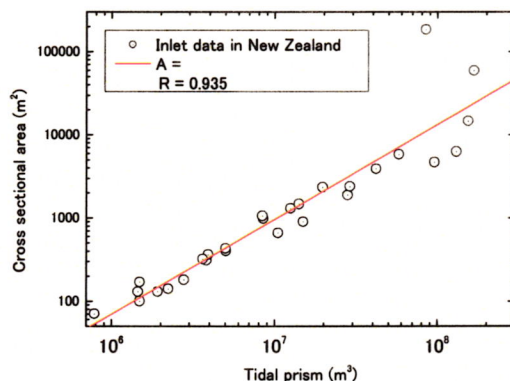


図-4 ニュージーランドのインレット A - P 関係

3.5 ベトナムのインレット A - P データ

ベトナムのインレットに関しては、ベトナム戦争時のものと思われるInman (1966)¹⁹⁾を参照した。データ数が5個であり、サンプル数としては必ずしも十分ではないが、図-5中、実線で示されるような関係式が得られ、相関係数は、他の国のデータに比べると小さく $R=0.828$ であった。

$$A = 3.04 \times 10^{-13} P^{2.056} \quad (14)$$

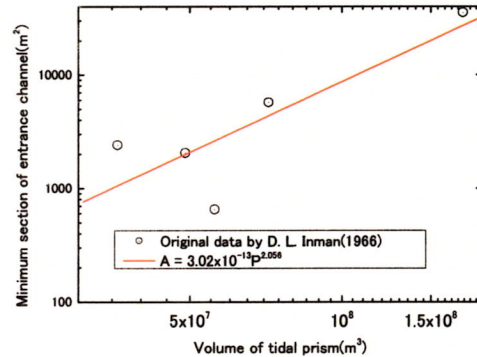


図-5 ベトナムのインレット A - P 関係

3.6 インドのインレット A - P データ

インドに関しては、2006年3月にNational Institute of Technology Karnatakaにて文献調査を試みたが、必要とするデータは収集できず、結局、Bruun (1978)²⁰⁾に示される9個のインレットデータとなっている。また、図-6中の実線で示される線形関係は、式(15)に示すとおりであり、相関係数は $R=0.970$ である。

$$A = 2.42 \times 10^{-4} P^{0.913} \quad (15)$$

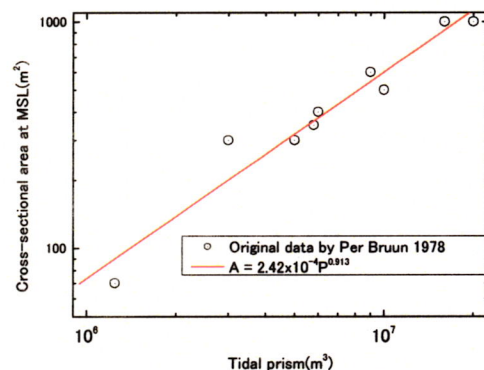


図-6 インドのインレット A - P 関係

4. 汎用 A - P 式の検討

本研究では、日本、中国、米国、ニュージーランド、ベトナム、そして、インドのインレット A - P 関係について、それぞれ考察した。各国のデータ毎に

係数（傾き）は異なるが、対数紙上で基本的に線形関係を示していた。このような特徴を概観するために、各国のインレットデータを、記号を別にして図-7に示す。図中、米国で得られたインレットデータに重なる形で、各国のデータが並んでいることが分かる。また、中国のインレットデータは、同じタイダルプリズムに対して、感潮狭口の断面積がやや大きい傾向があることも分かる。

これら各国のインレット A - P 関係に関しては、タイダルプリズムのべき乗の係数が、インド、米国、日本、中国、ニュージーランド、ベトナムの順に大きいことが、前述の各式で分かる。また、インド、米国、日本、中国に関しては、べき乗の係数が 0.913（インド）から 0.980（中国）の範囲にあるだけでなく、ニュージーランドのインレットデータの過半数を占める北島のインレットデータに関しても、係数が 0.950 となっている。よって、データ数が少ないベトナムに関しては検討の余地を残すものの、前述した総てのデータを一つにまとめて、現況での汎用的な A - P 関係式の誘導が可能であるとも考えられる。

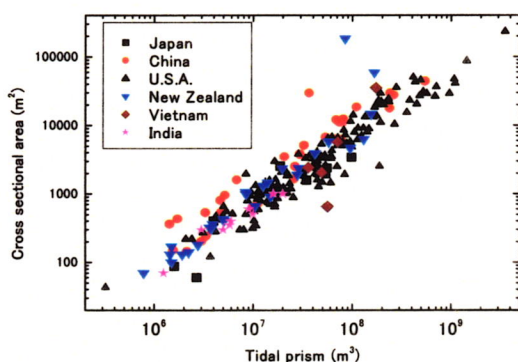


図-7 各国のインレットデータの関係

図-8に全インレットデータおよび当面の汎用 A - P 関係を実線で示す。

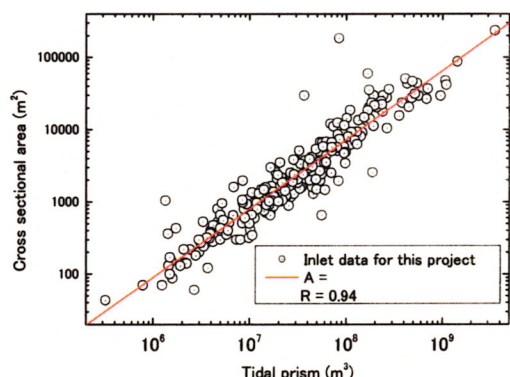


図-8 本研究における汎用インレット A - P 関係

図中に実線で示される線形関係式は式 (16) で表せ、

その相関係数は $R=0.94$ である；

$$A = 1.75 \times 10^4 P^{0.952} \quad (16)$$

あるいは、

$$P = 9116 A^{1.054} \quad (17)$$

なお、タイダルプリズムとしては、 10^5 から 10^9 m^3 の範囲で、感潮狭口断面積としては、 10^1 から 10^4 m^2 の範囲のデータセットになっており、本論文で取り上げられていない国々のインレットに対しても、ある程度、適用可能な範囲をカバーしているものと思われる。

5. 結論

本研究の主要な結論は、以下のとおりである。

(1) 米国やニュージーランドのデータは比較的タイダルプリズムが小さいものが、一方、中国のデータは比較的タイダルプリズムが大きい傾向がある。また、我が国のデータはその両者を結ぶ形で存在している。そして、異なる地域のデータが全体的に類似の線形的な関係にまとまっている。

(2) 本研究で得られた各国のインレット A - P 式は、以下に示すとおりである。

日本；

$$A = 1.291 \times 10^4 P^{0.955}$$

中国；

$$A = 1.748 \times 10^4 P^{0.980}$$

米国；

$$A = 1.53 \times 10^4 P^{0.954}$$

ニュージーランド北島および全域；

$$A = 1.68 \times 10^4 P^{0.950}$$

$$A = 1.051 \times 10^5 P^{1.137}$$

ベトナム；

$$A = 3.041 \times 10^{13.0} P^{2.056}$$

インド；

$$A = 2.420 \times 10^4 P^{0.913}$$

(3) 本インレット A - P データベースに基づけば、

$$A = 1.750 \times 10^4 P^{0.952}$$

あるいは、

$$P = 9116 A^{1.054}$$

という汎用 A - P 式が提案される。

なお、表-1に示したインレットデータを収集するために行った文献調査から、米国のインレットに関する文献が最も豊富で、結果として、このような検討に利用で

きるインレットデータが最も多いことが分かった。加えて、わが国に関するデータ解析では、北海道の海跡湖と静岡県浜名湖などのインレットデータしか利用しておらず、その他の地域のインレットデータを収集する必要性を感じた。さらに、本研究ではインレットの湖口構造物の影響を考慮しておらず、今後の課題として残されていることも記しておく。

謝辞：本研究を行なうに当たり、室蘭工業大学名誉教授近藤博士、独立行政法人港湾空港技術研究所の栗山室長からのデータ提供及びアドバイスを頂いた。また、米国陸軍Coastal and Hydraulic Laboratoryの職員諸氏、および、(株)アルファ水工コンサルタンツの社員諸氏からの適切なコメントを頂いた。紙面を借りて謝意を表させていただきます。

参考文献

- 1) 大木隆志: 北海道 湖沼と湿原 水辺の散歩道, 215p, 北海道新聞社発行, 2000.
- 2) Escoffier, F. F.; Hydraulics and stability of tidal inlets, GITI report, U.S. Army Coastal Engineering Research Center, 72p, 1977.
- 3) 近藤叔郎.; 感潮狭口水路の流速, 内水域潮位および最大流速水深の一解法, 土木学会論文報告集 第206号, pp. 49 - 57, 1972.
- 4) Kondo, H.: Depth of maximum velocity and minimum flow area of tidal entrances, Coastal Engineering in Japan, Vol. 18, pp.167-183, 1975.
- 5) Kondo, H.: Design Procedure of artificial channels for tidal entrances, Coastal Engineering in Japan, Vol. 21, pp. 191-199, 1978.
- 6) 近藤叔郎.; 感潮狭水路の水理, 土木学会水理委員会水工学シリーズB-7, 1979.
- 7) Kondo, H.: Flow Area-Prediction of tidal inlet after sea level rise, Proc. of 22nd International Conference on Coastal Engineering, ASCE, pp.3063-3073, 1990.
- 8) 川森 晃: 北海道オホーツク海沿岸感潮湖沼の湖口海浜過程の研究, 室蘭工業大学博士論文, p.98, 1993.
- 9) Shigemura, T: Tidal prism-throat area relationships of the bays of Japan, Shore an Beach, July, pp.30-35, 1980.
- 10) 松田義弘: 浜名湖の海洋環境 -湖口地形変化による湖内潮汐の経年変化-, 沿岸海洋研究ノート 第20巻, 第2号, pp.178-188, 1983.
- 11) 渡辺一也・田中 仁・槻山敏昭; 名取川における河口処理と地形変化, 海岸工学論文集 第49巻, pp. 1361-1365, 2002..
- 12) O'Brien, M.P.: Equilibrium flow areas of tidal inlets on sandy coasts, Proc. of Coastal Engineering, pp. 676-686, 1966.
- 13) Jarrett, J. T.; Tidal prism - inlet area relationships, GITI report 3, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, 55p, 1976.
- 14) Zhang Qiaomin: Analysis of P-A corollation of tidal inlets along the coasts of SOUTH CHINA, Coastal & Port Engineering in Developing Countries, Vol.1, Edited by Nanjing Hydraulic Research Institute, pp.412-422, 1987.
- 15) Meng Zhaowu: Studies on Morphological Variation of Tidal Inlets on Sandy Coasts, a thesis submitted to the Graduate School of Muroran Institute of Technology for the degree of Doctor of Philosophy, pp.80, 2001.
- 16) Department of the Army; Memorandum for record, Subject: Analysis of the hydraulic characteristics of tidal inlets, 1975.
- 17) Hicks, D. M. and T.M. Hume: Morphology and size of ebb tidal deltas at natural inlets on open-sea and pocket-bay coasts, North Land, New Zealand. Journal of Coastal Research, vol. 12, pp.47-63, 1996.
- 18) Hume T.M. and C.E. Herdendorf: On the use of empirical stability relationships for characterizing tidal inlets, Journal of Coastal Research, Vol. 9, pp.413-422, 1993.
- 19) Inman, D. L. and R. W. Harris; Investigation of sedimentation, silting & dredging requirements, for the United States Navy, Contract NBy-79844, 1966.
- 20) Bruun, P.; Tidal inlets and littoral drift, Universitetsforlaget, Oslo, Norway, p.193, 1966.