

洪水氾濫の数値計算および家屋被害について

—8610号台風による吉田川の場合—

Numerical Simulation of Flood and Damage to Houses

—A Case of the Yoshida River due to Typhoon No.8610—

東北大学大学院 佐 藤 智 Satoshi SATO

東北大学大学院 今 村 文 彦 Fumihiko IMAMURA

東北大学工学部 首 藤 伸 夫 Nobuo SHUTO

The flood caused by Typhoon No.8610 is numerically simulated with the shallow water theory. Methods are proposed to determine, based upon physical consideration, the distribution of bottom friction so as to reflect the pattern of houses, roads, footpaths in paddy field and rice plants.

Numerical results are compared with damages to houses which were investigated by the authors. A hydrodynamic force introduced by Aida is shown to be a useful measure to indicate the degree of damage, except for the very vicinity of breaches where the shallow water theory may not be a good approximation.

Keywords : flood, numerical simulation, resistance, damage to houses

1. はじめに

現在では、計算機の発達により氾濫水について数値的に解く手法が開発されており、現実に氾濫の再現計算もなされている¹⁾。しかし、先端部の挙動や氾濫水の2次元的な水理特性はまだまだ十分に解明されているとは言えず、堤防決壊過程における破堤部からの越流状況・破堤部の形状とそれに対応する越流量の算定法に関しても同様である。更に、堤内地における種々の構造物または植生に対する抵抗力の算定の問題も残されている。こうした氾濫水の水理的な特性を解明することに加えて、氾濫水解析は長時間で広範囲の計算を行う必要があることから、簡便な数値解析手法の開発もまた大きな課題である。

本論文では、以上の様々な問題点のうち、氾濫状況に影響の大きい抵抗力について、堤内地の構造物（家屋、道路、畦）や植生を忠実にかつ簡便にモデル化し、堤内地の抵抗力を算定する手法を示す。さらに、1986年8月の吉田川の氾濫計算を実施し、現地調査結果と比較することにより本論文の提案する氾濫計算モデルの再現性を調べる。最後に、洪水氾濫による被害予測として数値計算の利用を考えるため、堤内地の家屋被害調査と数値計算による水理量との対応関係を検討する。特に、家屋被害に関しては、従来その被害状況のみであったが、ここでは盛り土の有無、経過年数、改築状況などの項目についても調査している。

2. 二次元氾濫水計算の基礎的検討

2.1 支配方程式

破堤初期の比較的流速の大きい流れでは移流項が無視できないと考えられるため、氾濫数値計算モデルの支配方程式として、以下に示す浅水長波の式を用いる。

$$\begin{aligned}\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\tau_x}{\rho} &= 0 \\ \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\tau_y}{\rho} &= 0\end{aligned}\quad (1)$$

ここで、 η は水位、 D は湛水深、 ρ は密度、 M, N および τ_x, τ_y はそれぞれ x, y 方向の線流量と抵抗力である。摩擦による抵抗力は抵抗係数またはManningの粗度係数を用いて表される。上式はStaggered leap-frog法により差分化し計算に用いられる²⁾。

2. 2 堤内地抵抗力の算定法の提案

氾濫水の解析において、抵抗力の算定には一般に等流近似の抵抗則が用いられる。この場合、Manning則が広く用いられるが、その係数の決定は非常に重要であり、係数の違いにより流況にかなりの差を生じさせるようである。図-1は著者ら³⁾の数値実験結果であり、堤内地におけるManningの粗度係数 n と水理量との関係を示したものである。この図から流況に及ぼす粗度係数の効果は極めて大きく、粗度係数が大きいと流速を押さえ、水位を上昇させる効果を持つことが分かる。しかし、この抵抗係数または粗度係数に関しては資料は非常に少ない。その中で、粗度係数についてはChow⁴⁾によって氾濫原(農地)の n の値として、Mature row cropsで平均0.035, Mature field cropsで平均0.040としているものが存在する程度である。また、本論文で行っている種類の2次元の氾濫水計算においては、暗黙のうちに n の値を与えたり、実際に氾濫被害の発生した地域において数値実験を試行し、その結果、流況と合致する値であるゆえ適当であろうと判断したりして、 n の値を決定しているのが現状である。しかし、この方法では、既往の氾濫地域のみにしか適用できず、汎用性が小さいと言わざるを得ない。

そこで、本論文では次のように堤内地の抵抗力を算定することを考える。まず、抵抗力を生ずるものとして、①家屋、②道路、畦、③植生(稻等)を考え、①については流れに直におかれた孤立物体の抵抗力の算定法を、②については孤立棧の抵抗の算定法を、③については植生(小麦)上方の空気の流れの実測値から求めるという方法を用いる。氾濫水の計算においては計算時間の短縮も重要であると考えられるので、それぞれの抵抗力の特徴を整理して以下のようにして単純化を行った。

①家屋 堤内地の家屋は、その密度、面積、形とも様々であるが、まず、単位面積当りの家屋数 k を求める。また、個々の家屋の面積に等しい正方形と考え、その一辺長を求め、その平均値 l_k を求めておく。更に正方形の抵抗係数 C_{Dk} ⁵⁾は投影面積を一辺と水深の積とすれば、流向に対してほぼ一定でありその値を2.12とした。よって、家屋による抵抗力を τ_k とし、空間格子間隔を $\Delta x, \Delta y$ とすれば、

$$\begin{aligned} \frac{\tau_{kx}}{\rho} &= \frac{1}{2} C_{Dk} \frac{k l_k}{\Delta x \Delta y D} N \sqrt{M^2 + N^2} \\ \frac{\tau_{ky}}{\rho} &= \frac{1}{2} C_{Dk} \frac{k l_k}{\Delta x \Delta y D} N \sqrt{M^2 + N^2} \end{aligned} \quad (2)$$

と表すことが出来る。

②道路、畦 堤内地が農地の場合、道路、畦等の直線構造物が整然と存在しているケースが日本全国に数多くみられる。吉田川の氾濫域でのこれらの構造物の高さは、道路が約0.84m、畦が0.24m程であるが、その間隔は非常に大きく(30m~100m)孤立棧と考えることが出来る。しかし、1次元の場合と異なり、棧に直な方向に流速が与えられるとは限らないので、この点を考慮して修正を行わなくてはならない。

Hoerner⁶⁾は、一般に物体の抵抗力は流速 U の2乗に比例す

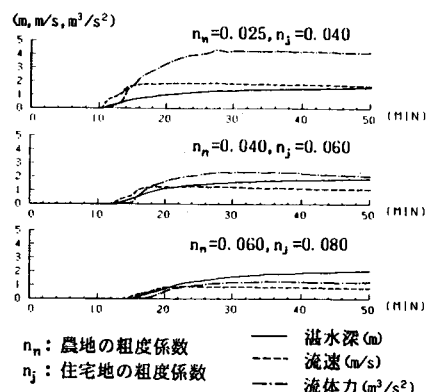


図-1 堤内地の水理量におよぼす粗度係数の効果

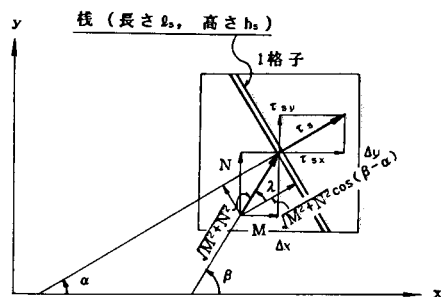


図-2 棧形状構造物の抵抗力の算定

るので、流れに斜めに置かれた棧（線状の物体）の抗力は棧に直な方向の流速の2乗に比例すると類推し、実験を行い、それを確かめている。つまり、図-2の様に λ をとり、 A を棧の長さ $\times$ 高さとの積とすると、流れ方向の抗力 F_D とそれに直交する揚力 F_L は、それぞれ

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D A (U \cos \lambda)^2 \cos \lambda, \quad F_L = \frac{1}{2} \rho C_D A (U \cos \lambda)^2 \sin \lambda \quad (3)$$

と表せる。上記の方法を氾濫水の2次元計算に用いることを考える。図-2に従い、棧の法線と x 軸のなす角を α ($0 < \alpha < \pi$)、流速と x 軸のなす角を β ($0 < \alpha < 2\pi$)とすると、 $\lambda = \beta - \alpha$ であり、棧に直な方向の流速成分は $\sqrt{M^2 + N^2} \cos(\beta - \alpha) / D$ である。棧の高さを h_s 、1格子当りの棧の長さを l_s 、そして境界層中の長方形柱の抗力係数 C_{Ds} を $C_{Ds} = 0.80$ と仮定すれば、 x 方向の抵抗力は

$$\frac{\tau_{sx}}{\rho} = \frac{1}{2} C_{Ds} \frac{l_s h_s}{\Delta x \Delta y} \frac{M^2 + N^2}{D^2} |\cos(\beta - \alpha)| \cos(\beta - \alpha) \cos \alpha \frac{\Delta x \Delta y - k l_k^2}{\Delta x \Delta y}$$

となる。尚、抗力は家屋以外の部分で作用するので、その補正を行っている。ここで、 $\cos \beta = M / \sqrt{M^2 + N^2}$ 、 $\sin \beta = N / \sqrt{M^2 + N^2}$ であることを考慮すると、

$$\frac{\tau_{sx}}{\rho} = \frac{1}{2} C_{Ds} \frac{l_s h_s}{\Delta x \Delta y} \frac{1}{D^2} |M \cos \alpha + N \sin \alpha| (M \cos \alpha + N \sin \alpha) \cos \alpha \frac{\Delta x \Delta y - k l_k^2}{\Delta x \Delta y} \quad (4)$$

と変形され、 y 方向に関しても同様に、

$$\frac{\tau_{sy}}{\rho} = \frac{1}{2} C_{Ds} \frac{l_s h_s}{\Delta x \Delta y} \frac{1}{D^2} |M \cos \alpha + N \sin \alpha| (M \cos \alpha + N \sin \alpha) \sin \alpha \frac{\Delta x \Delta y - k l_k^2}{\Delta x \Delta y} \quad (5)$$

と表せる。

③植生（稲等） 植生のある場での流れに関する資料は少なく、しかも、実際の植物のある場での流れの観測はほとんど行われていない。しかし、その一方で、農学的立場から植物（小麦、とうもろこし）上での空気の流れに関する観測のデータは以前より存在している。ここでは、Tanらの実験結果⁸⁾を基にし、植物上の洪水流の抵抗を見積ることとした。図-3はTanの実験の小麦上の空気の流れの抗力係数 C_{Dv} を示している。観測された速度の幅は狭いものの、流速が大きいく所では0.011でほぼ一定値を示す傾向にあることが分かる。尚、観測された流速はReynolds相似から考え、水に換算すると最大値で0.54m/sと若干小さい値であるが、本論文ではこの抗力係数は流速に依らず一定値であると仮定した。この抗力係数を用いると抵抗力は次のように表現される。

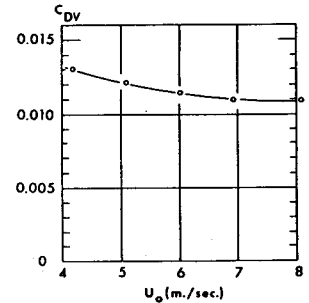


図-3 Tanらによる実験結果
(小麦上の空気の流れの抵抗係数)

$$\frac{\tau_{vx}}{\rho} = \frac{1}{2} C_{Dv} \frac{1}{D^2} M \sqrt{M^2 + N^2} \frac{\Delta x \Delta y - k l_k^2}{\Delta x \Delta y}, \quad \frac{\tau_{vy}}{\rho} = \frac{1}{2} C_{Dv} \frac{1}{D^2} N \sqrt{M^2 + N^2} \frac{\Delta x \Delta y - k l_k^2}{\Delta x \Delta y} \quad (6)$$

以上の方法を吉田川流域に適用し、それに相当するManinngの n に換算すると、 n は D, M, N の関数となるため一定値とはならないものの、 D を2m、 $\alpha = \beta$ を仮定するとすれば概算として、家屋の存在する住宅地で $n \approx 0.07$ 、農地では $n \approx 0.03$ となり、一般に氾濫水計算に用いられる n の値にほぼ等しいものである。

3. 洪水氾濫の再現計算

3.1 吉田川流域における8.5豪雨による氾濫状況

吉田川流域での降雨は8月4日、5日にわたり、吉田川流域では300mmを越す総雨量を観測した。そのため吉田川中流部の落合地点では5日午前に警戒水位を越え、さらに5日午前9時には計画高水位を突破するという大

出水となった。落合地点での最高水位は5日14時に記録され、7.89mである。落合地点で計画高水位を越えたその約2時間後、吉田川は落合地点の下流の左岸4ヶ所で、相次いで越水破堤を起こした。そのうち粕川堤防は11:10、下志田堤防が11:15分の破堤である。さらに両堤防からの氾濫水は川前、上志田、下志田地区のすべてを浸水させるまでに広がった。図-4に示したのは6日の浸水域であり、縦線部は本論文が対象とした計算領域を示すものである。

3. 2 数値計算結果との比較

住民の証言により、ほとんどの地区で5日の午後に最大湛水深を記録したことが分かっている。そこで、破堤後6時間に渡って再現計算を試みた。領域を50m格子に等分割し、時間間隔を3秒とし、また、流入境界条件は様々な問題が残るものの本間の越流式を用いた。図-5は11時30分の流況を表している。氾濫水を目撃した人の話によれば、粕川地点からの氾濫水は、下志田地点からのそれに比べ勢いが強く、上流側に向かって流れたと言うことであり、その傾向と定性的に一致する結果が得られていることが分かる。

次に、観測された床上浸水深と計算の湛水深とを比較してみた。図-6がそれであり、図中の実線中心に分布していることが分かる。この実線の切辺は約60cmであり、地盤から床までの代表的な高さと一致する。よって、最大湛水深に関する限り、再現性は高い。

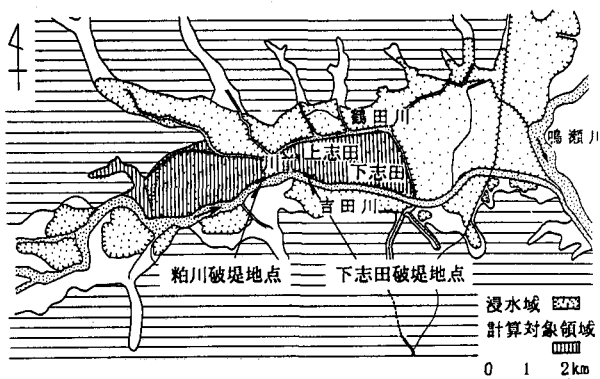


図-4 6日の湛水状況

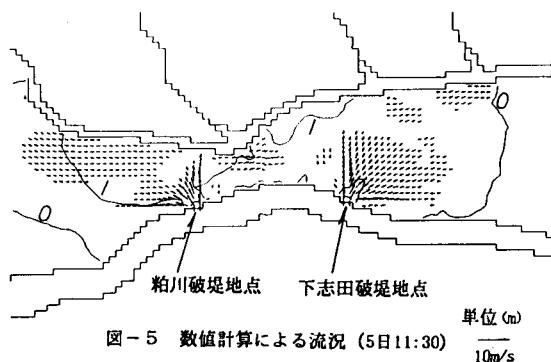


図-5 数値計算による流況 (5日11:30)

4. 数値計算による水理量と家屋被害との関係

4. 1 聞き込み調査の結果

家屋及び家屋被害に関する調査項目は、宅地盛り土、経過年数、床上浸水深、改築の有無、そして被害程度の5項目である。この地域は地盤が周囲に比べかなり低い、家屋は旧河道付近に存在する自然堤防上に立地しており、調査した61戸の内その過半数で盛り土を実施していた。中には1mを超える例も見られた。氾濫後2年目の調査ではこの時点迄に改築をした家屋が多くみられた。これは過去の氾濫による被害だけでなく、家の老朽化のために実施した家屋も多い。今回の氾濫水により、調査した全家屋が床上浸水となっており、地盤がより低い下志田地区で特に湛水深が大きい。ここでは、それら浸水のみによる被害は除き、直接家屋に受けた被害について、A、B、Cの3つに分類した。Aは板目、畳、壁以外の被害が認められないもの、Bは家屋に若干の被害があるものの、住居可能な状態であるもの、Cは住居不可能なほどの大きな被害を受けているものである。これを地区別でみると、両破堤地点の中間の川前地区での被害が最も大きく、Aが50%、Bが32%、Cが18%であり、それより下流

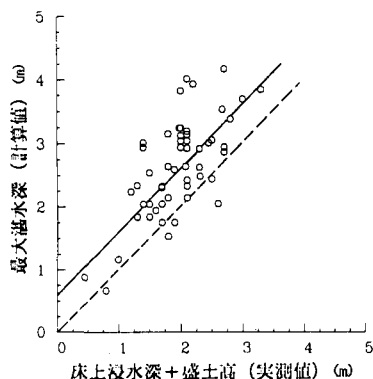


図-6 水深における実測値と計算値の比較

側の上志田地区ではAが67%, Bが23%, Cが10%となっている。

4. 2 家屋被害と水理量との対応

比較的軽微な氾濫では、その被害は板目、畳、壁、家具等に集中し、床上浸水が生じたか否かが重要である。すなわち湛水深が非常に重要な要素となる。しかし、今回対象としたような大規模の氾濫では家屋自体の構造に影響を与えるような被害を生じたので、その被害原因は湛水深と言うよりはむしろ他の水理量と密接な関係があるろう。しかし、この水理量に関しては再現計算に依るしかなく、家屋被害との関連性についても氾濫水計算はその意義があるものとする。本論文では、氾濫水計算により、調査した家屋の存在地点での最大流体力に注目し、その値と家屋被害との関係について述べる。尚、流体力とは家屋に作用する力を表わす量⁹⁾であり、流速の2乗と湛水深との積と定義する。

図-7に示したのは、観測された床上浸水深、最大流体力計算値、及び被害度の関係を示している。家屋被害は最大浸水深よりも最大流体力と特に関係が深く、最大流体力のみで考えてみると、 $1.5\text{m}^3/\text{s}^2$ を越えると家屋に何らかの被害が発生し、更に $2.5\text{m}^3/\text{s}^2$ を越えると住居不可能となる家屋が出現することが言える。尚、床上浸水深が家屋の天井までの平均高2.4mを越えると浮力による作用が顕著になると考えられる。しかし、この氾濫では観測された床上浸水深は最大でも2.4mであり、その兆候はみられなかった。

図-8、図-9は、計算により得られた最大湛水深及び最大流体力の平面的分布である。家屋被害は最大湛水深との関連性は小さいが、最大流体力との間には明瞭な関係が認められる。また、両破堤地点近傍では流体力が大きいのは当然のこととして、その他に更に1箇所大きい地点がみられる。粕川破堤地点より上流向きに浸入した氾濫水が、下流側に向きを変え、収束しながら流下する流路に当たっている地点である。氾濫後住居不可能となった家屋も、その多くがこの地点に集中している。尚、破堤地点のごく近傍の家屋について流体力を適切に表現することはできなかったという問題が発生した。具体的に言えば、下志田破堤地点近傍にその傾向が見られている。被害状況がAとCの家屋が隣接して存在しているものの、数値計算による流体力は両者とも大であった。これは差分格子化が不適切であることや、支配方程式が破堤地点近傍での流況を適切に表現できていないためであろうと推測される。

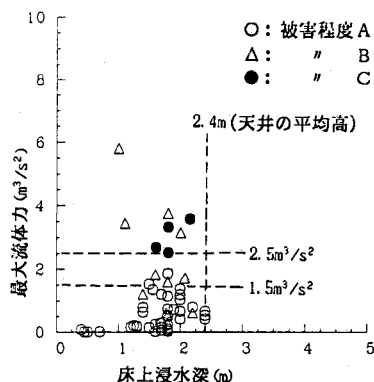


図-7 床上浸水深、最大流体力及び被害度

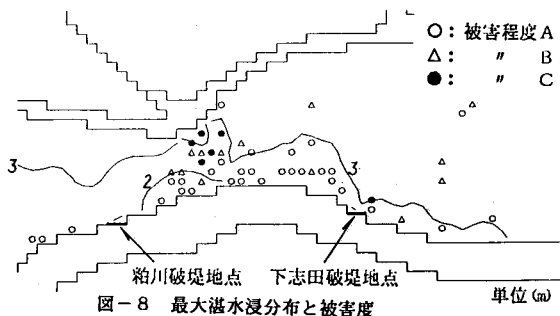


図-8 最大湛水深分布と被害度

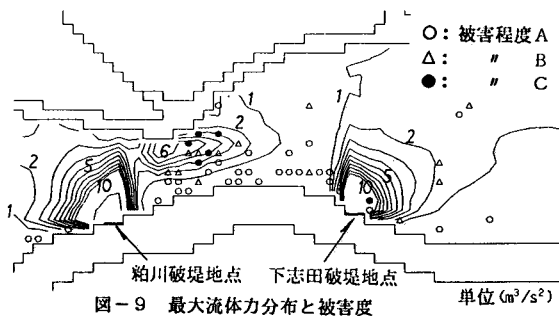


図-9 最大流体力分布と被害度

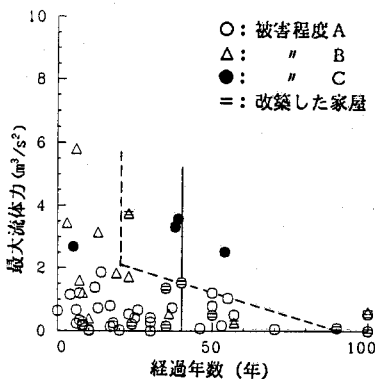


図-10 経過年数との関係

前図により家屋被害と流体力とは密接な関係にあることが示されたわけであるが、家屋はその経過年数により被害に差が生ずるとも考えられる。図-10は経過年数と最大流体力との関係を示している。この図で特徴的なのは経過年数が40年以上の家屋ではそのほとんどで最大流体力が $1.5\text{m}^3/\text{s}^2$ 以下であり、また、被害もほとんど受けていないことである。経過年数が40年を越す家屋は1947、48年の大水害を経験しており、当ても被害が軽微であったと推測される家屋であり、今回の氾濫によってもその被害が軽微であったと言える。それらの家屋が氾濫水による流体力の小さい場所に立地している一方、比較的新しい、水害経験のない家屋は比較的流体力の大きい地点に立地し、被害を受けていることになる。また、水理学的立場からは少し離れるが、同図には家屋の改築についても記入してある。改築は被害程度Cの家屋はすべて実施している。この図から家屋の改築か否かは図中の破線により区別できそうである。

5. おわりに

本論文において氾濫水の2次元数値計算における抵抗力の算定方法を示し、その方法を用いて実際に数値計算を実施した。さらに、その結果と家屋被害との関係について述べた。破堤地点のごく近傍の流況を適切に表現できなかったという問題はまだ残るものの、氾濫水の巨視的な流況は再現された。以下、本論文の結論を述べる。

1) 氾濫水の2次元数値計算の抵抗力の算定において、定常等流の抵抗係数が使用できるという仮定の基に堤内地の様々な物体の抵抗力を考え、それを算定する方法を示した。また、その方法を用い実際に氾濫数値計算を行い、ほぼ実際の流況を捉えることができた。

2) 数値計算によって得られた流体力と家屋被害とは密接な関係にあり、最大流体力が $1.5\text{m}^3/\text{s}^2$ 以上となると被害が出はじめ、 $2.5\text{m}^3/\text{s}^2$ を越えると住居不可能となる家屋が出現することが明らかとなった。また、水害を経験していない比較的新しい家屋で被害を被ったものが多く、古い家屋は水理学上有利な地点に立地していることが示された。

〔謝辞〕この研究の一部は、文部省科学研究費自然災害特別研究（代表者、東京大学高橋裕教授）により行われたものである。

〔参考文献〕

- 1) 例えば、岩佐義朗・井上和也・水鳥雅文：氾濫水の水理の数値解析法，京大防災研年報，第23号B-2，pp. 305-317, 1980.
- 2) 後藤智明・小川由信：Leap-frog法を用いた津波の数値計算法，東北大学工学部土木工学科，1982.
- 3) 佐藤智・今村文彦・首藤伸夫：土木学会第43回年次学術講演会，pp. 562-563, 1988.
- 4) Ven Te Chow: Open-Channel Hydraulics, McGraw-Hill, 113p., 1959.
- 5) 梅東一郎：水理学Ⅱ，森北出版，57p., 1974.
- 6) Hoerner: Fluid-Dynamic Drag, Published by the Author, 3-11p., 1965.
- 7) 有江幹男，木谷勝，田村尚敬，金山幸雄：乱流境界層の中にある長方形柱周辺の流れに関する研究（第1報，乱流境界層の特性と抗力係数との関係），日本機械学会論文集，41巻342号，pp. 839-846, 1975.
- 8) Tan H. S.・Ling S. C.: Production Research Report, U. S. Department of Agriculture. Washington D. C. 1956 No. 72, pp. 13-25, 1963.
- 9) 相田勇：津波危険度に関する研究その2，損害保険料率算定会，pp. 61-84, 1987.