

瀬の水理特性に関する現地観測

Study on hydraulic characteristics of a riffle by field observation

池田駿介* 戸田祐嗣**

By Syunsuke IKEDA and Yuji TODA

From the view points of ecology and landscape, it is very important for hydraulic engineers to understand hydraulic characteristics of riffles. We performed a field observation at a riffle of the Aki-river in Akiruno city in Tokyo on 25th August 1995. In the observation, flow velocity, fluctuations of velocity and water surface, temperature of water and dissolved oxygen were measured. It is found that an interaction between flow and channel-bed gravels is dominant in determining the texture of free surface in riffles.

KEY WORDS : riffles, classification of water surface texture, interaction between flow and channel-bed gravels, dissolved oxygen

1. はじめに

わが国の河川は国土の地形的特徴から急勾配であり、河川の中上流域においては比較的流速の大きな「瀬」や流速の小さい「淵」と呼ばれる流れが形成され、それらの存在は生態系の保全などの環境的な側面だけでなく、河川景観の面からも重要である。その中で瀬においては水表面で空気混入が起こる事などにより、良質の苔などの植生が生育しやすく、それらを補食する魚類などの良い生活の場となることや、美しい水表面の波立ちなどの良質の景観を作り出し、我々に心安らぐ空間を与えてくれる。近年重要となってきた、河川環境・河川景観を考慮した河道設計を行うためにも、その流れ場を解明する必要性が高まっている。

このような瀬に関する研究としては、山田ら¹⁾によるエネルギー原理に基づく抵抗則の研究や土屋²⁾による音スペクトル特性などがある。また環境・生態系に関する現地調査も数多く行われている。しかし、このような瀬の力学的な構造は自由表面の形状が大きく変化すること、常流・射流の混在する流れ場であること、底質の石の不均一さ、などから非常に複雑であるため、それらの各要素とその相互作用が実現象にどのような影響を与えているか等に関してはまだ不明な点が多い。よって本研究では、瀬の力学的構造を明らかにする第1歩として、実河川の瀬で起こる現象の特徴を調べるために流速、水面振動、水質の現地観測を行い、その結果を報告する。

* 正会員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科

(〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)

** 学生員 東京工業大学大学院 理工学研究科 土木工学専攻

(同上)

2. 観測地および観測項目

2-1 観測地概要

観測は平成7年8月25日に東京都奥多摩を流れる秋川に架かる東秋川橋（あきるの市）の40mほど下流の地点で行った（図-1）。観測地は秋川と多摩川との合流地点より約1.2km上流に位置しており、約60m上流には高月堰という用水堰がある。観測地点には約50mほどの距離にわたって水面変動の激しい瀬が連なっている。図-2中のA～B間は瀬の始まりの領域で、場所によって変化する多様な水表面の変動が見られる。B～C間では、全体にわたって勾配、流速が大きく水表面からは激しい空気の混入が起きている。C～Dは瀬の終わりで、淵へとつながっている緩やかな流れであった。瀬の始まった地点から16m下流の川幅22mの地点を観測地点（図-2）とした。横断方向に観測線を設定し、左岸から2mの点から1m間隔で右岸から3mの点までの計18点で測定を行った（図-3）。以下の文中では、左岸から観測点順にst1、st2、...、st.18と記す。また、観測の座標系は図中に示す。観測地の河床勾配は平均1/187の急勾配となっている（図-2）。

2-2 観測概要

観測は前述した観測線に沿って行い、各観測点で水面変動、流速を計測した。水面変動は容量式波高計（KENEK社製）、流速測定はI型及びL型の電磁流速計（KENEK社製、プローブ検出部長さ2.5cm、径0.7cm）を用いて u、v、w の3成分を計測した。流速の測定は底質の不均一さから底面を基準とすることが困難であったために、水表面を基準とし平均的な水表面位置から10cm下で計測した。データ採取は各点につき水面変動、流速ともにサンプリング周波数20Hzで100秒間行い、フィルター処理により5Hzのデータに変換した。

また、瀬の始まる地点（図-2中のA）、観測地点、瀬の終わりの地点（図-2中のD）の3地点でエコ・プローブ（TERAL KYOKUTO社製）により水温、溶存酸素量を計測した。

2-3 瀬の分類

一口に瀬といっても、その流況は様々である。しかしそれらの名称は慣習的に使われているもので厳密な分類は存在せず、視覚的な要素で分類されている³⁾。しかし、そういった呼び名は流れの様子を巧みに表現しており、本論文中でも流れの視覚的な様子を表すためにその呼び名を利用する。本論文中で利用する呼び名について以下に簡単な説明を述べる。

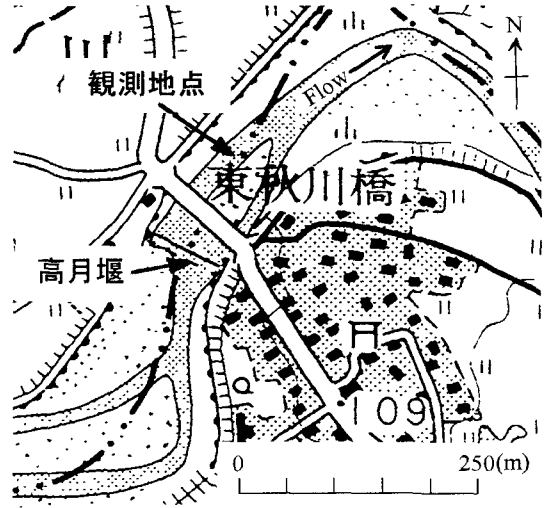


図-1 観測地地図

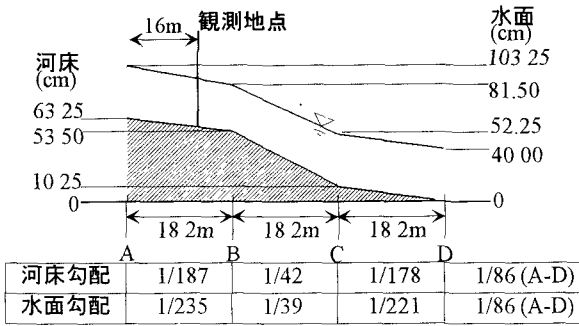


図-2 瀬の縦断面図

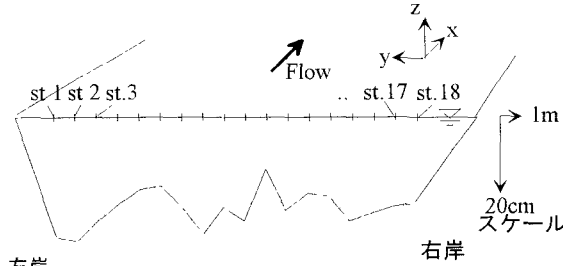


図-3 観測地の横断面図と座標系

・チャラ瀬：水深が浅く（20～40cm程度）、水表面は波立っているが気泡の混入は起こっていない（写真－1）。

・ザラ瀬：チャラ瀬と同じ様な流況であるが、水表面の波立ちは激しく、気泡の混入が起こっている（写真－2）。

・瀬わき：瀬の両側に位置し、水表面の波立ちは小さく穏やかな流れ。

本観測で測定を行った横断面では st.1 - st.4は瀬わき、st.5 - st.12、st.17 - st.18ではチャラ瀬、st.13 - st.16はザラ瀬と分類できた。

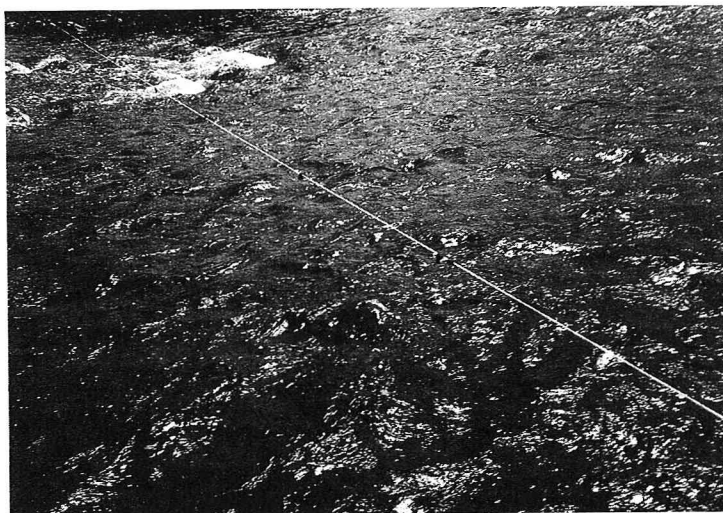
3. 観測結果

3-1 時間平均量に関する横断面内の観測結果

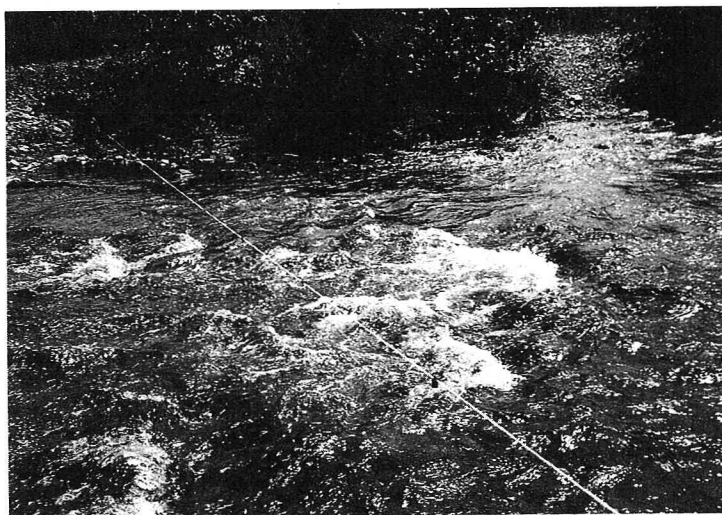
横断面で得られた時間平均量の分布に関して述べる。

平均流速分布（図－4）は瀬わきにくらべ、チャラ瀬、ザラ瀬では大きくなっているがチャラ瀬とザラ瀬の間には大きな差はない。

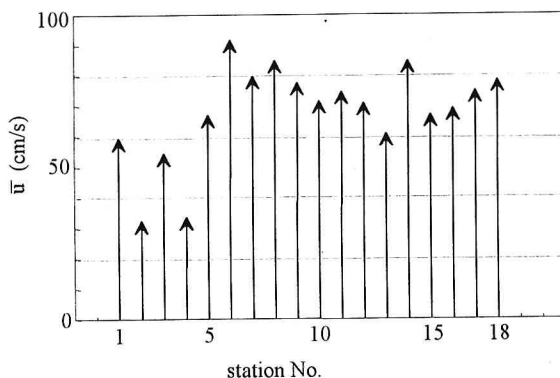
図－5に水面変動のr.m.s.値を示す。水面変動は流速と同様に瀬わき、チャラ瀬、ザラ瀬の順に大きくなっている。瀬の水面の変動は空間的な変動と時間的な変動に分けられる。波状跳水などにより起こる空間的な変動^{4), 5)}は、波のような水表面のテクスチャを作る。これらの波はほぼ定在波であるが、時間的に若干振動している。本観測は定点での計測であるので、それより得られた水面変動はこの時間振動によるものである。ザラ瀬では完全跳水に伴って空気混入が激しく起こっており、他の地点にくらべて大きな変動がある。



写真－1 本観測地で見られたチャラ瀬 (st.5～st.12)



写真－2 本観測地で見られたザラ瀬 (st.13～st.16)



図－4 主流速分布（水面下10cm）

フルード数（図-6）に関しても瀬わきに比べて水面変動の激しいチャラ瀬、ザラ瀬で大きな値をとる。一般に開水路での波状跳水や完全跳水による空間的な水表面の変動はフルード数によって区別される。したがって空間的な水面変動とフルード数との関連は高いと思われる。しかし、一様で平坦な開水路と異なり底質の石の径が大きくかつ不均一であるため、フルード数も局所的な変化が大きい。したがって、フルード数だけでなく底質の径やその配置が空間的な水面変動に影響を与えると考えられる。

水中カメラで撮影して求めた底質の石の径を図-7に示す。石の径としては流れ方向の長さを用いた。各観測点でばらつきがあるものの、大きな石は比較的流速の大きい観測点付近に存在している。これらの石は水深方向にも十数cmの長さを持ち、水深の3～4割程の長さを占める。また水理現象としても石の果たす役割は大きく、石の上方で射流となり後方で跳水が起こる。したがって現象の詳細を理解するためには石の存在は開水路の粗度として扱うのではなく、底面形状として取り扱うべきである。

無次元化された乱れエネルギー（図-8）はザラ瀬の地点とst 3付近以外はほぼ一様である。st 3では観測点の上流1m付近の地点に水深とほぼ同じスケールの岩があり、その岩から周期的なカルマン渦列の放出がみられ、それに伴った流速変動の影響によって、他の観測点より大きな流速変動が生じている。またザラ瀬では完全跳水に伴って空気混入が起こり、水表面が非常に乱れており、乱れが大きくなっていると考えられる。

3-2 変動量に関する横断面内の観測結果

前述したとおり、瀬で起こる水表面のテクスチャは空間的な変動と時間的な変動を持つ。時間的な変動の原因を調べるために時系列データのスペクトル解析を行った。

図-9にst 4（瀬わき）、st 8（チャラ瀬）、st 14（ザラ瀬）における水面変動と流速変動（u成分）のスペクトル解析の結果を示す。水面変動、流速変動ともにパワースペクトル密度の大きさは瀬わき、チャラ瀬、ザラ瀬の順に大きくなっている。流速変動スペクトルの分布形状は各流況に応じて変化し、瀬

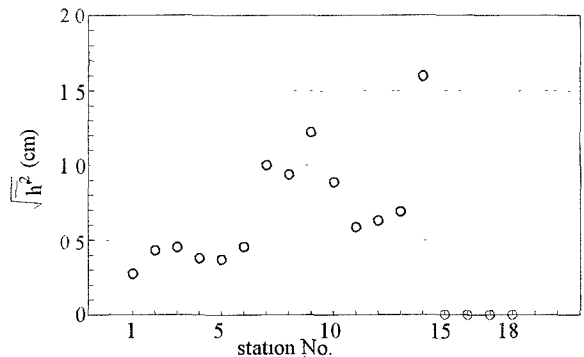


図-5 水面変動

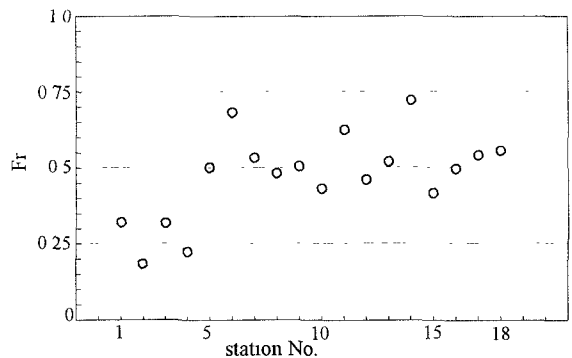


図-6 局所フルード数

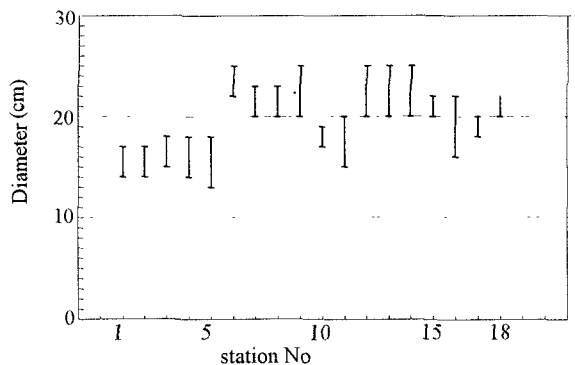


図-7 底質の石の径

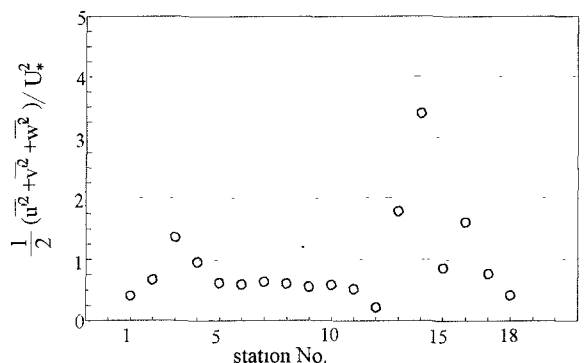
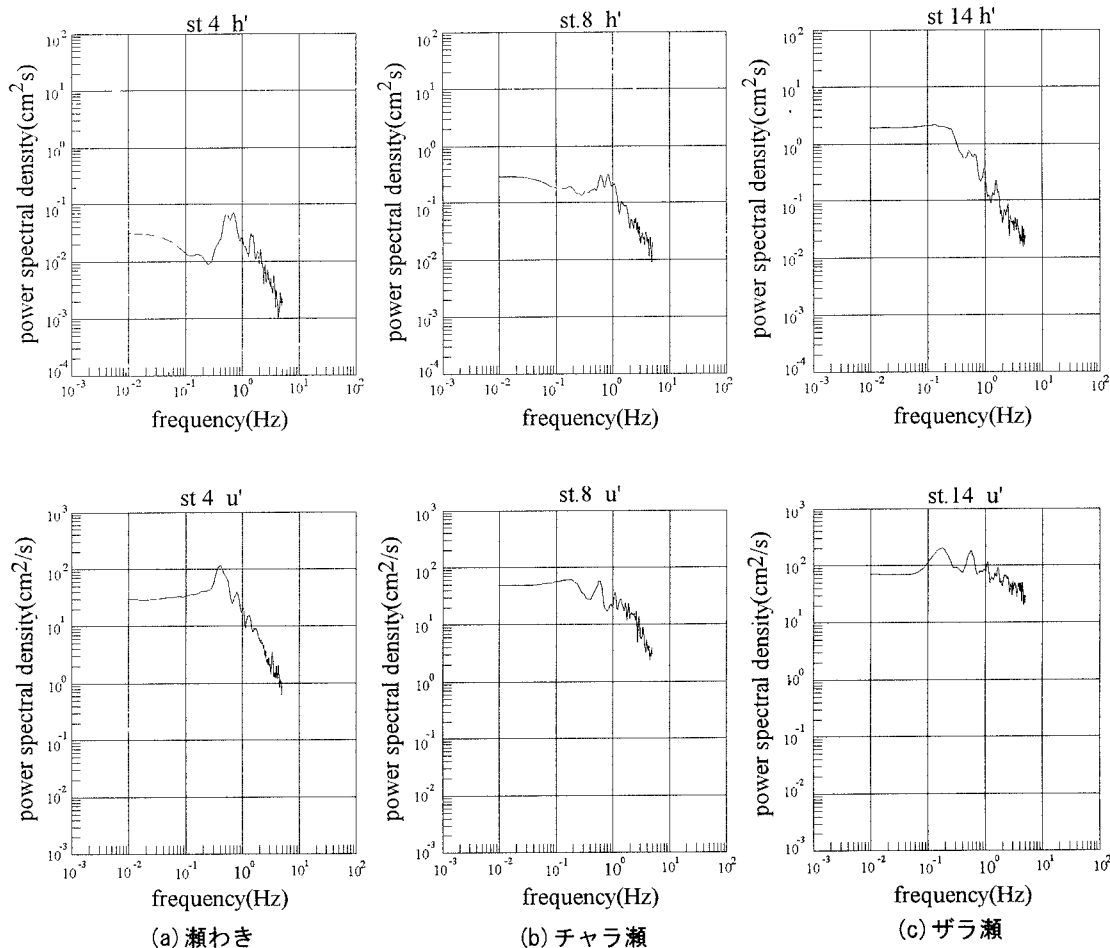


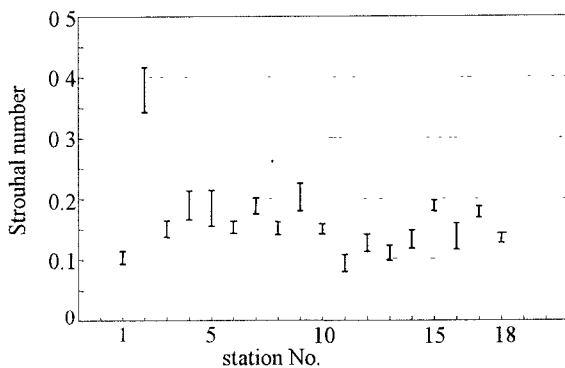
図-8 無次元乱れエネルギー



図－9 水面変動と流速変動のスペクトル図

わき、チャラ瀬、ザラ瀬と水面の時間変動が激しくなるに従って高周波側でも大きなスペクトル密度を持つ分布形状となっている。特に、ザラ瀬では流速変動の高周波側での減衰率が小さい。この事は水面変動、あるいは完全跳水に伴う空気混入が高周波の乱れを生成、または維持していると考えられる。各観測点ともに水面変動と流速変動のスペクトルのピークの周波数がほぼ一致する。

次に、図－10に各観測点での流速変動のスペクトルのピークから求めたストローハル数の分布を示す。代表長さとしては底質の石の径（流れ方向）、代表速度としては各観測点での時間平均流速（ $\bar{u}$ ）を用いた。ストローハル数（ $St = fD/\bar{u}$ ）はst.2では高い値を示しているが、



図－10 ストローハル数

他の観測点では0.1～0.2付近の値を示している。本観測では底質がランダムに配置されていることなどから流速の局所的な変化が大きいため、ストローハル数を求める際に用いる代表流速の決定が難しい。また、一般にストローハル数は2次元的な物体（円柱、角柱など）から放出される非対称渦列に関して求められるが、本観測では底質の石といった3次元的な物体から放出される渦より求めたストローハル数の値となっている。ここで注目すべき点は、底質の径により整理したストローハル数がほぼ一定の値を示すことである。2次元的な物体でのストローハル数は高レイノルズ数（ $10^3 \sim 10^4$ 以上）で物体形状により異なった一定の値を示す。つまり、高レイノルズ数でのストローハル数は物体の形状による渦の放出の特徴を表していると考えられる。本観測での底質の石の細かな形状は不規則ではあるが、全体的な形そのものが大きく異なるものは少ない。またレイノルズ数も 10^5 のオーダー以上である。したがってストローハル数が一定の値を示していることは、流速変動が底質の石の形状からの渦の放出の影響を大きく受けていると考えられる。水面変動も流速変動とほぼ同じ周波数にピークを持つことより、瀬の水表面の時間的な変動も底質からの渦の影響を受けていると考えられる。

3-3 水質観測の結果

表-1 にエコ・プローブより得た水質観測データを示す。容存酸素量が瀬に入る以前からかなり高い値を示しているのは観測地上流部にある高月堰を流下（落下）する際に空気が混入する事によるものと思われる。溶存酸素量は瀬を流下するにしたがって増加している。これは、ザラ瀬で起こる完全跳水に伴う空気混入によって水中に酸素が再曝気する事が一因を担っていると思われる。

表-1 水温、溶存酸素量の変化
(表中の地点A及び地点Dは図-2中に示す)

	水温 (℃)	溶存酸素量 (%)
地点A (瀬頭)	23.68	94.6
観測地点	23.75	96.5
地点D (瀬尻)	23.82	99.8

4. 結論

今回の観測で得られたデータから以下の事が言える。

(1) 瀬わきとチャラ瀬では水面振動の振幅は大きく異なるが、乱れエネルギーはほぼ等しく、ザラ瀬では乱れエネルギーは非常に大きくなる。すなわち、完全跳水に伴って空気混入が発生している地点では乱れエネルギーが大きい。

(2) 水面の時間的な振動は、底質からの組織的乱れ（渦）の影響を受けている。

(3) 空気混入の起こる瀬では再曝気により溶存酸素量を増加させる。

今回の観測で得られた結果が勾配や底質によりどのように変化するか、あるいは瀬で起こる物理現象の詳細、例えば今回の観測で得られなかった空間的な変動など、を明らかにするために観測データをもとにして室内実験などを行い、より定量的で精密な測定を行う予定である。さらに、水表面のテクスチャについても調べる予定である。

謝辞：本研究の推進にあたっては、東京都建設局河川部計画課の土屋十圀氏の援助を受けた。また、本研究は一般研究B（07455195, 池田駿介）の補助を受けている。記して謝意を表します。

《参考文献》

1) 山田正, 池内正幸, 村上良宏：溪流を模擬した開水路流れの水面形遷移と抵抗則に関する研究, 水工学論文集, 第30巻, pp. 73-78, 1986.

2) 土屋十圀：都市河川の総合親水性に関する研究, 東京工業大学博士論文, 1993.

3) 古川トシボ：アユ友釣り, 西東社.

4) 京藤敏達：河川早瀬の不安定波に関する理論的研究, 水工学論文集, 第38巻, pp. 449-456, 1994.

5) 細田尚, 多田彰秀：鉛直加速度を考慮した基礎式系による開水路流れ定在波の水面形解析, 水工学論文集, 第38巻, pp. 457-462, 1994.