

# 港湾設置が周辺水域環境に及ぼす影響の 実例と水理的考察

## HYDRAULIC STUDY ON INFLUENCES OF HARBOUR CONSTRUCTION UPON SURROUNDING RIVER WATER ENVIRONMENT

大西 外明

Sotoaki ONISHI

フェロー会員 工博 東京理科大学教授 理工学部土木工学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

Effects of building a harbor on the surrounding river environment are studied by choosing the Toyama harbor, which had been constructed by digging the Hojoyuzu lagoon with surface area of 1.8 squares Kilometers. The Uchikawa River of 2km length to the Japan Sea has connected the lagoon. Current feature in the river as well as water qualities before and after the harbor construction are compared. Hydraulic analysis indicate that before the harbor construction the water level at the lagoon changes 3hr behind the sea, and, ratio of tidal difference at the lagoon to the sea is approximately 70 % These generate two ways current in the river, which functions keep the river water environment at satisfactory level. The harbor construction takes away the water level difference between both ends of river, and the river become stagnant. Consequently BOD of 25 mg/l as well as DO of 15 mg/l is observed at the Uchikawa River.

*Key Words: river, lagoon, tidal change, stratification, water quality, BOD, DO, harbor*

### 1. はじめに

諸々の人間活動は、一般に海・河川・湖・貯水池等の周辺において特に活発であり、これらによる水環境の影響に社会的関心が集まっている。今日ではプロジェクト計画時に為される環境影響アセスメントの歴史は浅く、過去に為されたプロジェクト中には、周辺環境への配慮が充分でなかった事例があると思われる。また、求められる環境の有り様は社会の変遷につれて変化する側面があり、現存する環境の改善が求められる場合もある。極端な例として、過去に建設した構造物を撤去して自然環境に戻そうとするケースについての報告さえある。ここで検討対象とする水環境について言えば、身の周りの水環境は、人と水との関りの長い歴史的経過の結果として現存するものである。したがって、改修河川や港湾によってもたらされた現存の環境を改善しようとする場合、元来そこにあった水環境を把握しておくことが必要である。しかし、プロジェクト実施以前のの水環境に関するデータが十分でないことが多い。このような場合、現時点で得られる観測結果から過去の水環境を推論することが必要となる。

本論文では、富山新港とそこから流出する内川を例に選び、この地域の水環境の保全・改善に関する実務と将来の研究に資することを目途として、港湾建設

の前後における水環境を生む水理的メカニズムを解明することにより、内川の水環境に及ぼす港湾建設の影響を具体的に示す。

### 2. 研究対象とした水域の概要---富山新港、放生津潟、内川について

富山新港は、約  $1.8\text{km}^2$  の水面積をもつ「放生津潟」を利用した掘込み港湾である。1960年12月に港湾審議会計画部会の審議を経て、1964年4月に建設が開始され、1968年4月に開港した。図-1は富山新港の建設前の放生津潟を、また、図-2には放生津潟周辺の水路群をしめす。これらの水路群の中で、放生津潟の西岸から庄川へ向かって海岸線に平行して延びる内川は、湖水を海へ導く二級河川である。その総延長は約 2,235m、現状の平均幅は約 20m である。内川の庄川右岸口は、流砂や漂砂が堆積し易く、通常は水門によって閉鎖されている。したがって、放生津潟水の富山湾への実質的な出口は、放生津潟西岸から約 1530m 下流で富山湾に向かって開口する新湊漁港である。次に、放生津潟を掘込んで富山新港を建設した後の状態を図-3 に示す。港湾建設後においても、内川は港湾から流出する唯一の河川である。港湾の背後地から流入する河川・水路としては、西部主幹排水路、下条川、新堀川、東部排水路等が

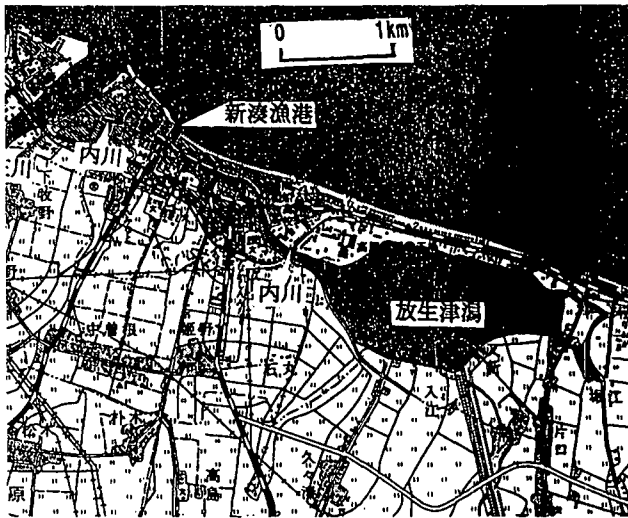


図1 港湾建設前の状態(1948年)

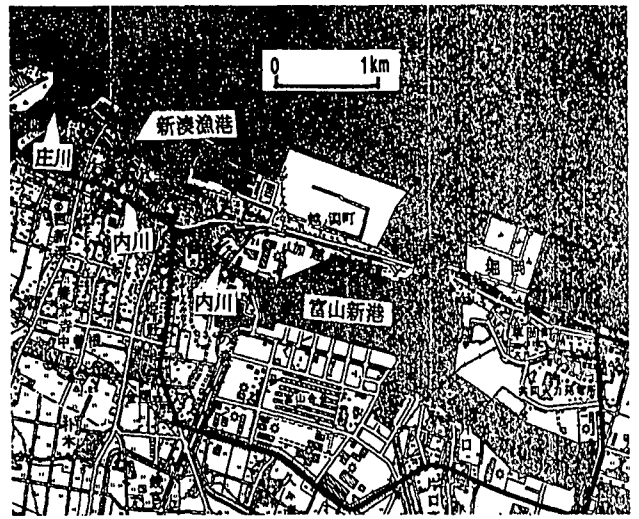


図3 港湾建設後の状態(1997年)

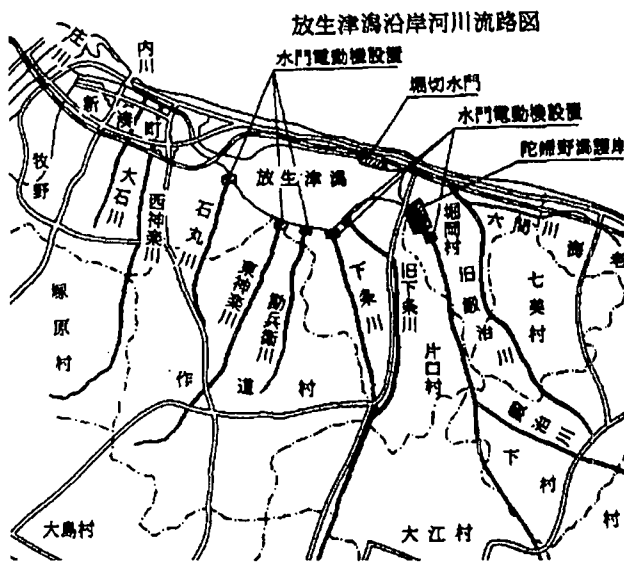


図-2 富山新港建設前の放生津渚周辺の水路群

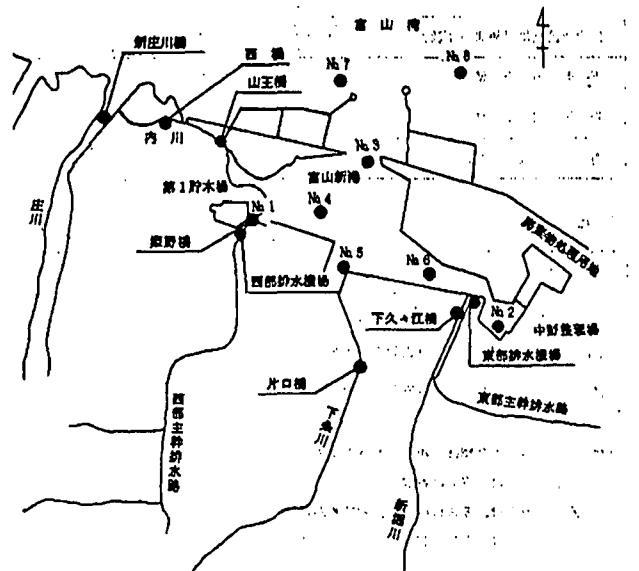


図-4 富山新港へ流入する水路と水質測定点

ある(図-4)。新堀川は図-2に示す鍛冶川の下流部を改修した河川であり、東部主幹排水路と西部主幹排水路は、水田を乾田化する目的で開削された水路である。図-2と図-3から分るように、港湾建設に伴って内川の一端は閉鎖性水域から開放性水域に変化したわけであり、河川の流れ特性は著しく変貌することは、当然のこととして推論される。一方、富山新港へ流入する下条川、新堀川、西部主幹排水路、東部主幹排水路の水質は、港湾掘り込みによって直接的な影響を受けないと考えられる。以下では、内川を中心にして、港湾建設による水質変化と流れ特性の変化について考察する。

### 3. 港湾建設後における周辺河川と水環境

港湾建設前の流れと水質に関する観測データは、現時点で残念ながら見出せなかった。そこで、こ

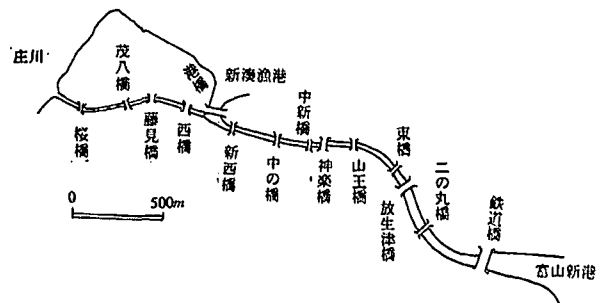


図-5 内川の水質測定点

では、富山県と新湊市より提供を受けた富山新港建設後の水質観測データを用いて検討を行う。港湾周辺水域の水質観測は、図-4に示すように、海域で8地点、河川の7個所で定期的になされている。また、内川では図-5に示す各橋梁付近で適時に観測されている。ここでは、港湾建設の影

Time series of BOD in Uchikawa (1972to1980)

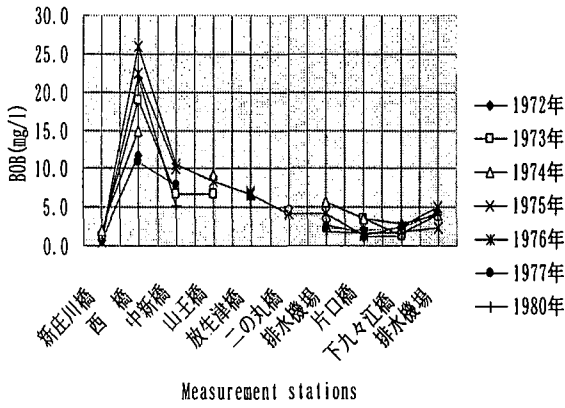


図-6 内川と富山新港周辺河川のBODの経年変化

Time series of PH in Uchikawa (1972to1980)

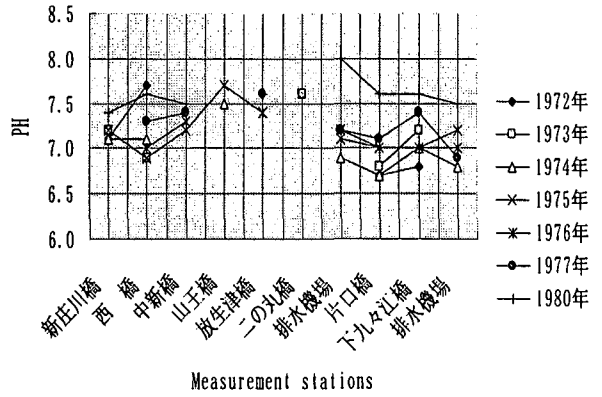


図-8 内川と富山新港周辺河川のSSの経年変化

Time series of DO in Uchikawa (1972to1980)

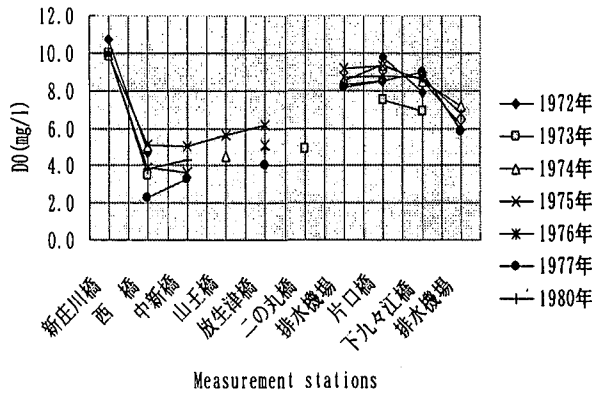


図-7 内川と富山新港周辺河川のDOの経年変化

Time series of SS in Uchikawa (1972to1980)

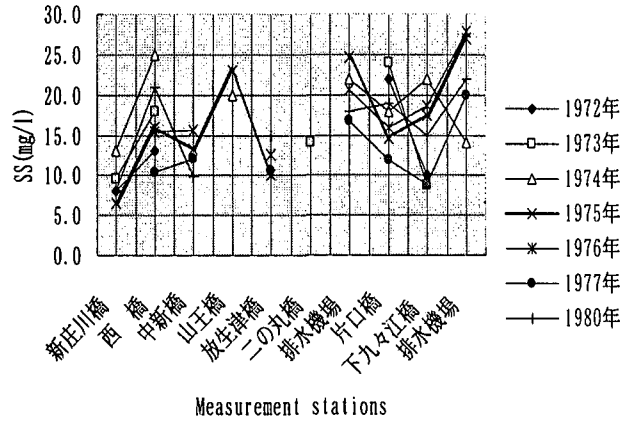


図-9 内川と富山新港周辺河川のPHの経年変化

響を見るために、富山新港開港年に近い1972年～1980年の水質観測データ<sup>1)</sup>に注目して検討した。図-6～図-9は、BOD、DO、SS、PHの年平均値の経時変化を示す。ただし、測定値は75%水質値(n個の観測値を小さいものから順にならべ、0.75n番目の値)である。また、図の横軸に記した測点中で西橋、中新橋、放生津端、山王橋、一の丸橋は内川の水質観測点である。また、新庄川橋は内川に近い庄川内の測点、排水機場、片口橋、下九々江橋は富山新港への流入水路内の測点である(図-4と図-5)。

各観測点は水質汚濁防止法第3条の「河川(湖沼を除く)に対する生活環境の保全に関する環境基準」の類型A、B、Cの何れかに属しており、そこで規定されているPH、BOD、SS、DOの基準値はそれぞれ表-1のとおりである。図-6～図-9から、PHとSSに関しては、すべての測定点において環境基準に適合していることがわかる。しかし、BODとDOについては、内川の西橋ではBOD(75%水質値)が11～26、DOは2.3から5.0の間を推移し、環境基準を満たしていない。このように富山新港建設後の内川の水質は、新湊漁港の西側において特に汚染が著しい。なお、庄川と富山新港への流入水路のBODとDOは環境基準に適合している。新湊漁港から西側の内川水域の水質が劣化した原因としては、「流域から加わる負荷の増加

表-1 各測定点における水質環境基準値

| 測定点   | 類型 | BOD (mg/l) | DO (mg/l) | SS (mg/l) | PH        |
|-------|----|------------|-----------|-----------|-----------|
| 新庄川橋  | A  | <2         | >7.5      | <25       | 6.5<:<8.5 |
| 西橋    | C  | <5         | >5        | <50       | 6.5<:<8.5 |
| 山王橋   | C  | <5         | >5        | <50       | 6.5<:<8.5 |
| 片口橋   | B  | <3         | >5        | <25       | 6.5<:<8.5 |
| 下九々江橋 | B  | <3         | >5        | <25       | 6.5<:<8.5 |

と港湾建設に伴う「内川自身の自浄能の低下」が挙げられる。前者の原因として考えられるのは、内川流域における市街化の進展、西橋付近の食品加工工場からの排水、内川へ流入する水量の少なさ、内川の庄川口が堆積土砂によって閉塞することによる漁港から西側の澱み水域化などである。後者の「内川自身の自浄能の低下」に係わる主な原因は、新港建設に伴う上下流端間の潮位差の消失であると考えられる。このことについては、以下に解析的に考察する。

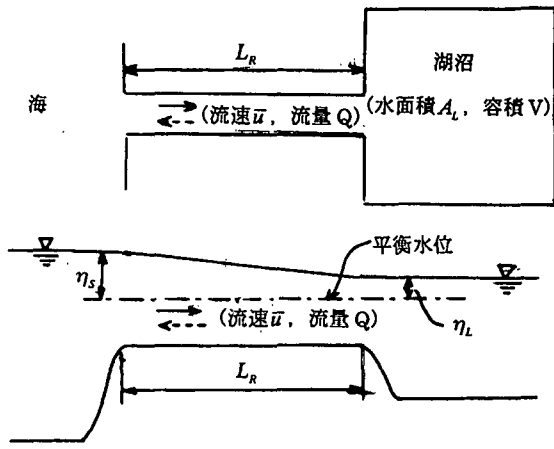


図-10 解析モデル

#### 4. 富山新港建設前における内川の水環境自浄能

##### (1) 海・水路・湖沼間の流動についての解析

富山新港が建設される前における内川の流れ特性を知るために、長さ  $L_R$  の水路により海と湖沼を連結した図-10 にしめすモデルを考え、潮汐による海面の周期的変動を次式によって表す。

$$\eta_S = a_S \sin \sigma t \quad (1)$$

ここに、 $\eta_S$  は平衡水面から測った海面の高さ、 $t$  は時間、 $a_S$  は海の潮汐変動の振幅、 $\sigma$  は角振動数である。潮汐の周期を  $T$  とすると、

$$\sigma = 2\pi/T \quad (2)$$

海の潮汐変動が水路を通過して湖沼まで到達すると、湖沼面も周期的に変動する。平衡水面から測った湖沼面の高さを  $\eta_L$  とし、次式で表す。

$$\eta_L = a_L \sin(\sigma t - \varepsilon) \quad (3)$$

ここに、 $a_L$  は湖沼面の変動振幅、 $\varepsilon$  は海面変動と湖沼面変動の位相差（時間遅れ）である。

水路内の平均流速を  $\bar{u}(x,t)$  とすると、 $\eta_S$  と  $\eta_L$  の差は次式で表される。ただし、エネルギー損失の原因として、摩擦抵抗、水路の出入口での損失だけを考慮に入れた場合である。

$$\eta_S - \eta_L = \frac{L_R}{g} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + (f_{en} + f_{ex} + f \frac{L_L}{R_R}) \frac{\bar{u}|\bar{u}|}{2g} \quad (4)$$

ここに、 $g$  は重力加速度、 $f_{en}$  と  $f_{ex}$  は水路の入口と出口の損失係数、 $f$  は摩擦損失係数である。また、 $R_R$  は水路内における流れの動水半径である。マンニングの粗度係数を  $n$  とすると

$$f = 2gn^2/R_R^{1/3} \quad (5)$$

であるから、式 (4) は次式となる。

$$\eta_S - \eta_L = \frac{L_R}{g} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + (f_{en} + f_{ex} + \frac{2gn^2}{R_R^{4/3}} L_L) \frac{\bar{u}|\bar{u}|}{2g} \quad (6)$$

式 (6) の右辺 1 項が 2 項に比べて小さい場合には、近似的に次式となる。

$$F \frac{\bar{u}|\bar{u}|}{2g} + \eta_L = \eta_S \quad (7)$$

ここに、 $F$  は次式で与えられる。

$$F = f_{en} + f_{ex} + \frac{2gn^2}{R_L^{4/3}} L_L \quad (8)$$

湖沼へ周辺から流入する水量がない場合には、水路内の流量を  $Q$ 、平衡水面から上の湖沼の体積を  $V$  とすると、連続の関係は次式で表される。

$$Q = \frac{dV}{dt} \quad (9)$$

水路の流水断面積を  $A_R$  とすると  $Q = \bar{u}A_R$ 、また、湖沼水面積を  $A_L$  とすると  $V = \eta_L A_L$  であるから、式 (9) から次式が得られる。

$$\bar{u} = \frac{A_L}{A_R} \frac{d\eta_L}{dt} \quad (10)$$

式 (7) に式 (10) を代入すると、

$$\frac{F}{2L_R} \frac{A_L}{A_R} \frac{d\eta_L}{dt} \left| \frac{d\eta_L}{dt} \right| + \frac{gA_R}{L_R A_L} \eta_L = \frac{gA_R}{L_R A_L} \eta_S \quad (11)$$

ここで、式 (11) を無次元化するために、次のように変数変換をする。

$$\tilde{\eta}_L = \frac{\eta_L}{a_S}, \quad \tilde{t} = \left( \frac{gA_R}{L_R A_L} \right)^{1/2} t \quad (12)$$

さらに、式 (11) の右辺に式 (1) を代入すると、

$$\beta \frac{d\tilde{\eta}_L}{d\tilde{t}} \left| \frac{d\tilde{\eta}_L}{d\tilde{t}} \right| + \tilde{\eta}_L = \sin \alpha \tilde{t} \quad (13)$$

となる。ここに、 $\alpha$  と  $\beta$  は無次元化した潮汐振動数と減衰係数であり、それぞれ、次式で定義される。

$$\alpha = \left( \frac{L_R A_L}{g A_R} \right)^{1/2} \sigma : \beta = \frac{F}{2L_R} \frac{A_L}{A_R} a_S \quad (14)$$

また、連続の式 (10) は次式となる。

$$\tilde{u} = \frac{1}{\alpha} \frac{d\tilde{\eta}_L}{d\tilde{t}} \quad (15)$$

ただし、 $\tilde{u}$  は次式によって定義される無次元化した流速である。

$$\tilde{u} = \frac{\bar{u}}{a_S} \frac{A_R}{A_L} \quad (16)$$

次に、海面と湖沼面の変動  $\eta_S$  と  $\eta_L$  を無次元化すると、

$$\tilde{\eta}_S = \eta_S/a_S = \sin \alpha \tilde{t} \quad (17)$$

$$\tilde{\eta}_L = \eta_L/a_S = \tilde{a}_L \sin(\alpha \tilde{t} - \varepsilon) \quad (18)$$

ここに、 $\tilde{a}_L = a_L/a_S$  である。

式 (17) と (18) より、海面と湖面が最高 (HW) あるいは最低 (LW) となる条件は、それぞれ次のように表される。

$$\frac{d\tilde{\eta}_S}{d\tilde{t}} = \alpha \cos \alpha \tilde{t} = 0 \quad (19)$$

$$\frac{d\tilde{\eta}_L}{d\tilde{t}} = \alpha \tilde{a}_L \cos(\alpha \tilde{t} - \varepsilon) = 0 \quad (20)$$

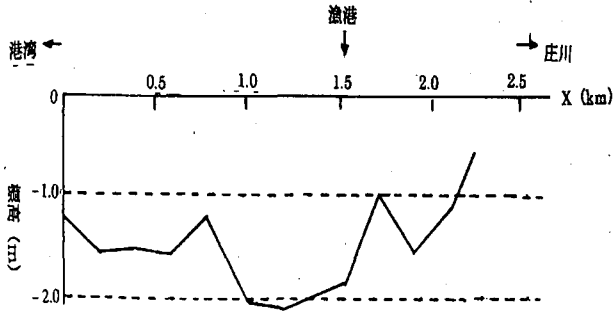


図-11 内川の河床縦断 (1994年10月測量)

式 (15) と (20) から、湖面が最高 (最低) 水位となる時には、 $\tilde{u} = \bar{u} = 0$  となる。すなわち、水路は静止状態となる。水路の流速については式 (15) と (18) から、次の関係が導かれる。

$$\tilde{u} = \frac{1}{\alpha} \frac{d}{dt} [\tilde{a}_L \sin(\alpha \tilde{t} - \varepsilon)] = \tilde{a}_L \cos(\alpha \tilde{t} - \varepsilon) \quad (21)$$

ここに、 $\tilde{a}_L = a_L/a_S$  である。また、無次元流速  $\tilde{u}$  の最大値を  $\tilde{u}_{\max}$  とすると、

$$\tilde{u} = \tilde{u}_{\max} \cos(\alpha \tilde{t} - \varepsilon) \quad (22)$$

式 (21) と (22) より、次式がえられる。

$$\tilde{u}_{\max} = \tilde{a}_L \quad (23)$$

式 (13) の解については、 $0zsoy^2$  の  $\varepsilon$  と  $\tilde{a}_L = a_L/a_S$  に関する次の近似解がある。

$$\varepsilon = \tan^{-1} \left[ \frac{\mu \tilde{a}_L}{2(1-\alpha^2)} \right] \quad (24)$$

$$\tilde{a}_L = \left\{ \frac{[(1-\alpha^2)^4 + \mu^2]^{1/2} - (1-\alpha^2)^2}{\mu^2/2} \right\}^{1/2} \quad (25)$$

ただし、 $\mu$  は次式で定義される。

$$\mu = 16\beta\alpha^2/3\pi \quad (26)$$

## 2) 港湾建設前における放生津潟と内川の流れ

内川を幅 20m の長方形断面をもつ延長 1.5km (新湊漁港と放生津潟口の間) の開水路とする。水深を  $h_R$  とすると、流水断面積  $A_R$  と動水半径  $R_R$  は  $A_R = bh_R$ 、 $R_R = bh_R/(b+2h_R)$  である。よって、式 (8) は、

$$F = f_{en} + f_{ex} + \frac{2gn^2}{\{bh_R/(b+2h_R)\}^{4/3}} L_R \quad (27)$$

となる。入口損失係数を  $f_{en} = 0.25$ 、出口損失係数を  $f_{ex} = 1.0$ 、粗度係数を  $n = 0.023$ 、 $g = 9.8 \text{ m/sec}^2$ 、 $L_R = 1.5 \text{ km}$ 、 $b = 20 \text{ m}$  とすると、

$$F = 1.25 + \frac{15.553}{\{20h_R/(20+2h_R)\}^{4/3}} \quad (28)$$

となる。

富山湾の潮汐表を参照して、潮差  $a_S = 0.17 \text{ m}$ 、周期  $T = 24$  時間とすると、 $\sigma = 7.27 \times 10^{-5} \text{ sec}^{-1}$  となる。

また、放生津潟の水面積は  $A_L = 1.8 \text{ km}^2$  であるから、式 (14) で定義される  $\alpha$  と  $\beta$  の値は次のようになる。

$$\alpha = \left( \frac{L_R A_L}{g A_R} \right)^{1/2} \sigma = \frac{0.270}{\sqrt{h_R}} \quad (29)$$

$$\beta = \frac{F}{2L_R} \frac{A_L}{A_R} a_S = 5.10 \frac{F}{h_R} \quad (30)$$

富山新港建設前における内川の水深  $h_R$  の実測値が無いので、同港建設後の資料から推定する。図-11 は 1994 年 10 月の時点における内川の河床縦断形状である。横軸の  $x$  は富山新港に近い鉄道橋を始点として漁港方向に測った距離である。この図によれば、河床高は港湾と漁港の間では約  $-1.5 \text{ m}$ 、漁港付近では約  $-2 \text{ m}$  である。港湾建設後の内川河床は、船の航行のために適時に浚渫されていること、港湾建設以前の頃の漁船はより小型であったこと等を考慮して、ここでは  $h_R = 1.5 \text{ m}$  と仮定する。そのとき、式 (29) と (30) より  $\alpha = 0.22$ 、 $\beta = 41.34$  となる。また、式 (26) より  $\mu$  は次の値をとる。

$$\mu = 16\beta\alpha^2/3\pi = 3.40 \quad (31)$$

以上で求めた  $\alpha, \beta, \mu$  の値を式 (24) と (25) に代入すると、

$$\tilde{a}_L = a_L/a_S = 0.67 \quad (32)$$

$$\varepsilon = \tan^{-1} 1.20 = 50.20(\text{deg.}) = 3.3 \text{ hr} \quad (33)$$

となる。すなわち、放生津潟の潮差は富山湾潮差の 7 割に減少する。また、富山湾の満潮 (干潮) 時から約 3 時間遅れて放生津潟が満潮 (干潮) となる。富山新港が設置される以前の放生津潟の潮汐変動については、小野<sup>3)</sup>による報告がある。小野は、1948 年 1 月 26 日放生津潟と伏木検潮所の潮汐観測値を比較し、伏木検潮所で干潮となってから約 3 時間後に放生津潟が干潮となり、潮差はほぼ 0.7 倍に減じると報告している。この実測結果は、上記の解析結果と良い一致を示している。

なお、海の潮汐によって内川に生じる無次元平均流速の最大値  $\tilde{u}_{\max}$  は式 (23) と (32) から 0.67 である。したがって、式 (16) より、平均流速の最大値  $\bar{u}_{\max}$  は  $0.5 \text{ m/sec}$  となる。

## 3) 港湾建設前における内川の自浄能

潮汐の振幅と位相が、富山湾と放生津潟の間で上記のように異なると、両水域を連絡する内川の流れは約半日周期で反転する。このことは、内川へ放出された排水や堆積物が、潮汐という自然力によって富山湾または放生津潟へ排出されることをしめす。その際、排水・堆積物が内川の外へ輸送される正味量は、河床形状や流速、海水と湖水の密度、潮汐の大きさ等を含む気象・海象的要素によって変化すると考えられる。いま、影響要素の内潮汐に注目すると、記録によれば<sup>4)</sup>放生津潟水位は 7 月～9 月に最も高く 50cm を越え、2 月、3 月の潟水位は約 12cm に減少する。潮汐変動の平衡水位を 0m と仮定すると、

潟水位が WL12cm となる低潮期には海面は WL ±0.17m の間を昇降し、高潮期 (WL50cm) には WL ± 0.7m の間を昇降することとなる。

したがって、図-11 のように河床高 < EL. -1m の場合、内川の下層部は常に海水によって占められ、満ち潮時に海から放生津潟へ向う流れは海水流となる。また、引き潮時には湖水が塩水層の上を海に向う二層流が形成される。このような状態下では、河床堆積物は海から潟へ向かって輸送される傾向が強くなる。以上では、放生津潟への流入水量の影響を無視したが、富山新港建設後の現在、港湾周辺の水路と河川から流入する全淡水量は  $1.4 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{day}$  である<sup>5)</sup>。この流量が放生津潟を経由して内川へ流入するとすれば、内川に流速  $0.5 \text{ m}/\text{sec}$  の海向きの流れが附加される。この流れは、潟から海へ向かう流れを補強し、海から潟に向かう流れを減じて、内川の負荷を海域へ放出する割合を増加させる。富山新港建設以前は、内川を経由して富山湾へ排出された潟流域からの流入水は、新港建設後には、その大部分が港口から直接に海へ排出されることとなる。この流路変更が内川の水質自浄能に及ぼす定量的効果については、今後のさらに検討する必要がある。

## 6. あとがき

1980 年より内川には、 $2.0 \text{ m}^3/\text{sec}$  の浄化用水が庄川から導水されている。水質改善を目的としてこの導水によって流水断面積が約  $20 \text{ m}^2$  の内川には平均流速  $0.1 \text{ m}/\text{sec}$  の流れが附加されたことになる。この導水の効果は、潮汐や周辺からの淡水流入による浄化効果に比べて小さいものの、この水域の水質は環境基準に到達している。

最後に本論をまとめるに当たり、富山県環境保全課と新湊市より資料提供と貴重なアドバイスを受けたことを付記して謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 新湊市：環境保全の概要（平成 12 年度版）。
- 2) Ozsoy, E.: Flow and mass transport in the vicinity of tidal inlets, Tech. l report No. TR-037, Coastal and Oceanographic Lab., University of Florida (1977).
- 3) 小野弘平：富山湾の海潮流（富山湾海岸侵食調査報告書、富山県海岸対策協議会（1952）、107 頁）。
- 4) 富山県農地部耕作課：県営土地改良事業着工三十周年事業誌（1953 年）。
- 5) 富山県環境保全課とのコミュニケーションによる。