

北海道におけるアサリ増殖施設の 波および流れによる洗掘特性

CHARACTERISTICS OF SCOUR CAUSED BY WAVES AND CURRENTS
AT THE PROPAGATION GROUNDS FOR JAPANESE LITTLENECK CLAM
Ruditapes philippinarum IN HOKKAIDO

中山威尉¹・瀬戸雅文²・山田俊郎³

Takeyasu NAKAYAMA, Masabumi SETO and Toshirou YAMADA

¹正会員 水修 北海道立中央水産試験場 水産工学室 (〒046-0855 北海道余市郡余市町浜中町 238)

²正会員 水博 北海道立中央水産試験場 水産工学室 (〒046-0855 北海道余市郡余市町浜中町 238)

³(株)西村組 研究開発室 (〒099-6404 北海道紋別郡湧別町栄町 133 番地 1)

We examined the characteristics of scour at the propagation grounds developed using sand-tube for Japanese Littleneck Clam *Ruditapes philippinarum* under oscillatory or steady flow by hydraulic model test. The changes of maximum scour depth around concave sections and scour width in the grounds were expressed by KC-number under oscillatory flow and by Froude number under steady flow. To control disappearance of fishing grounds because of local score, KC-number and Froude number need to be under 11.7 and 0.73.

Key Words : score, propagation ground, *Ruditapes philippinarum*, KC-number, Froude number

1. はじめに

全国のアサリ漁業生産は、千葉、愛知などの太平洋区や熊本、福岡などの東シナ海区を中心に 1980 年代まで増加傾向を示していた。しかし、1990 年代以降、これらの地区における生産量は急激に減少し続けている。

一方、北海道におけるアサリ漁業は、1986 年からアサリ増殖場造成事業が開始されて以来、増加傾向を示し、道東地方を中心に年間 1500t 余りが生産されている。また、北海道東部の干潟域に点在するアサリの生息場周辺には、ホッカイベイが生息するアマモ場が群生する場合が多い。このため、北海道におけるアサリ増殖施設は、造成対象区域をサンドチューブなどの土留堤で囲み、アサリが生息可能でアマモやヒトデなどの競合種の侵入を抑制できる地盤高まで砂を入れ整地後、アサリを移殖放流する手順で造成される。図-1 および表-1 に示すように、現在までに 12 地区で総計 91ha のアサリ増殖施設が造成されており、今後計画している地区も多い。

しかしながら、写真-1 に示すように既設のアサリ増殖施設の一部において土留堤背後が洗掘され、

施設内から砂が流出し有効漁場面積の減少を余儀なくされる施設も認められる。更に将来、現状より深い水深帯の漁場開発を検討するためには、波や流れが施設周辺の地形変化にどのような影響を与えるのか明らかにする必要がある。

本研究では、主に北海道でアサリ増殖施設造成に用いられているサンドチューブ周辺における波および流れによる洗掘特性を移動床模型実験的に明らかにするとともに、洗掘による影響を低減するための方法について検討した。

海浜変形に関する移動床模型実験を行う場合、これまで波の諸量についてはフルードの相似則に従うものとし、底質粒径は既往の実験結果を参考に決定した上で、さらに現地と模型で海浜断面の特性が一致するように実験を繰り返すことによって相似性を保たせてきた。しかし、縮尺効果が存在するため移動床模型実験に関わる相似則は確立されるに至っていない^{1),2)}。

本研究における移動床模型実験では、波および流れの特性についてはフルードの相似則に従って決定した。また、模型の底質粒径については相似性にもとづいた検討はせず、水理模型実験の容易性より決

定した。そのため、現地と模型との間で、波および流れと漂砂現象の相似性については厳密な議論はできない。

2. 実験方法

(1) 現地と模型アサリ増殖施設の相似性

実験に用いたアサリ増殖施設模型は、外形 100mm および 70mm のアクリルパイプと塩ビパイプを矩形状に連結することによって試作した。実海域で漁場造成に使用されているサンドチューブ径を約 700mm (500~900mm) とすれば縮尺は約 1/7 および 1/10 となる。

現地のアサリ増殖施設で使用されている砂の中央粒径の平均値は約 0.5mm (0.25~0.75mm) である。本実験で用いた底質の中央粒径は、水理模型実験の容易性より、波による洗掘実験では 0.15mm (7 号硅砂)、流れによる洗掘実験では 0.30mm (6 号硅砂) とした。

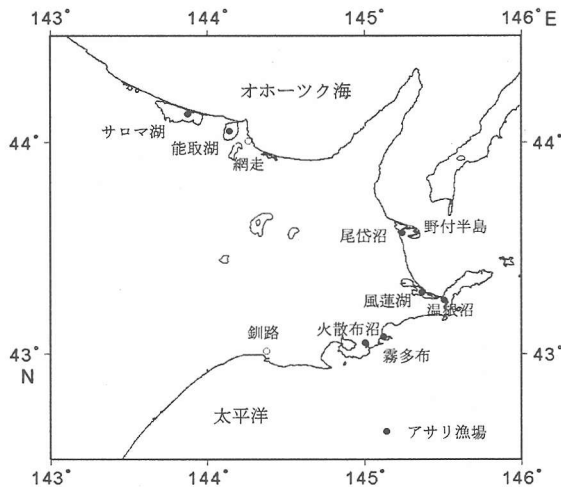


図-1 北海道東地方におけるアサリ漁場の分布

表-1 北海道東地方におけるアサリ増殖施設の分布

造成地区	造成年	面積 (ha)	土留堤
野付湾	1986-1987	12.0	異形ブロック
温根沼	1987-1988	8.0	サンドチューブ
火散沼	1987	7.0	サンドチューブ
風蓮湖北部	1990-1991	6.5	鋼矢板
風蓮湖南部	1992	3.0	サンドチューブ
火散布東部	1993-1994	7.0	サンドチューブ
走古丹 (風蓮湖)	1994-1996	6.0	サンドチューブ
東梅 (風蓮湖)	1994-1995	5.2	サンドチューブ
サロマ湖	1994-1996	22.0	サンドチューブ
風蓮湖畔	1998-1999	4.2	サンドチューブ
野付半島	1998-1999	5.2	サンドチューブ
霧多布	1999-2000	4.9	サンドチューブ

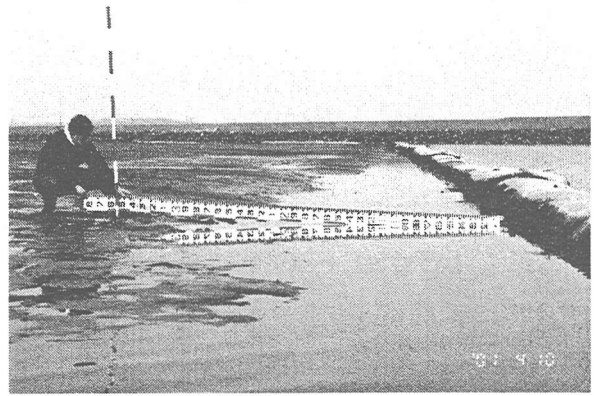


写真-1 霧多布アサリ増殖施設における局所洗掘例

また、本研究では振動流場において構造物周辺に生じる渦の発達を表す K.C. 数 (抗力と慣性力の比)、底質の動きやすさを表すシールズ数 S (底質を動かそうとする力ととどまらせようとする力の比) および重力と慣性力の比であるフルード数 Fr の 3 種類の無次元数を用いて洗掘特性を検討する。これらの無次元数はそれぞれ次式で表される。

$$K.C. = \frac{u_{max} T}{D} \quad (1)$$

$$S = \frac{u_*^2}{(\rho - 1) M d g} \quad (2)$$

$$Fr = \frac{u}{\sqrt{gh}} \quad (3)$$

ここで、 u_{max} : 微小振幅波理論から計算される底面境界層外縁における水粒子軌道速度の振幅、 T : 周期、 D : チューブ径、 u_* : 底面摩擦速度、 ρ : 砂の比重 (2.65)、 Md : 底質の中央粒径、 g : 重力加速度、 u : チューブ直上における平均流速、 h : 水深である。摩擦速度の計算には、波の場合は Jonsson の摩擦係数³⁾、流れの場合はコールブルック-ホワイトの摩擦係数⁴⁾を用いた。

(2) 現地における海況

北海道東地方に造成されたアサリ増殖施設で行われた流況観測データを参考にすれば、波の場合は有義波周期 6.0 秒および有義波高 1.2m 以下、流れの場合は 50.0cm/s 以下の流速がほとんどであった。本研究では、波の場合は周期 8.0 秒、流れの場合は水位変化によらず 100.0cm/s を最大値とした。

図-2 は、水深 2.0m および海底勾配 1/50 以下の地盤に外径 0.7m のサンドチューブを設置し、中央粒径 0.5mm の砂を用いて漁場造成した場合の現地における K.C. 数、波のシールズ数の取得範囲と、流速を 5 段階に変化させた場合のフルード数および流れのシールズ数の取得範囲を示したものである。流れの

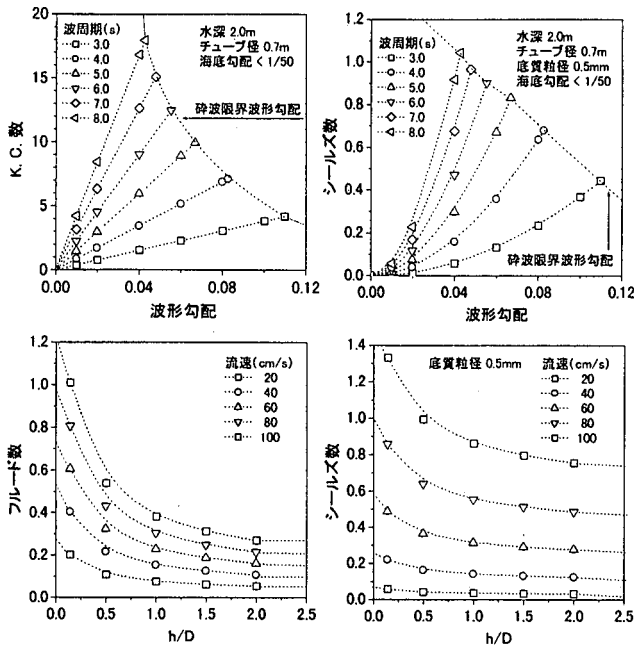


図-2 現地における無次元数領域
(上段：波，下段：流れ)

無次元数領域は、横軸に水深 h をチューブ径 D で基準化した値を示した。

本実験ではこれらの無次元数の取得範囲をほぼ満たすように波および流れによる洗掘実験における物理量を決定した。

(3) 波による洗掘実験

本実験では、まず波に伴う洗掘特性を調べるためにアサリ増殖施設模型 (110×110cm, チューブ外径 100mm および 70mm) を用い、チューブ周辺における洗掘量を計測した。

移動床模型実験には、北海道立中央水産試験場水産工学実験施設内の波浪水槽 (水路長 27.5m, 水路幅 1.5m, 水路高さ 1.7m) を使用した。波浪水槽内は、図-3 に示すように先端部が 20cm のステップで水底を底上げし、ステップの中央部に幅 2m にわたってサンドプールを設置した。サンドプール内には 7 号珪砂 (中央粒径 0.15mm) を砂層深まで敷き詰めた上で、アサリ増殖施設模型を設置し、模型内部にも 7 号珪砂で模型高さまで盛砂した。

実験では、水深を 50cm に固定した上で、周期 1.8～2.2 秒、波形勾配 0.018～0.061 の範囲内で規則波を作用させた。また、本実験の K.C. 数は約 3～10、シールズ数は約 0.05～0.40 の範囲である。実験条件については表-2 に示す。

本実験では、施設隅角部周辺に形成される局所洗掘の最大洗掘深と二次元的な局所洗掘の幅に注目して計測を行った。また、容量式波高計を用いて波高の計測を行い、微小振幅波理論を用いて底面境界層外縁における水粒子軌道速度の振幅を推算した。

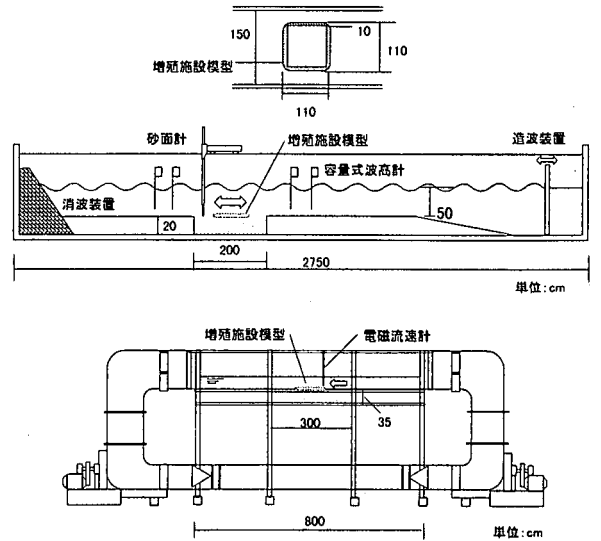


図-3 波、流れによる洗掘実験概要図
(上段：波浪水槽，下段：流動水槽)

表-2 波による洗掘実験条件

T (s)	波形勾配	D (mm)	K.C. 数	シールズ数
1.8	0.029-0.061	70,100	3.1-7.1	0.06-0.30
2.0	0.022-0.055	70,100	3.2-8.3	0.05-0.35
2.2	0.018-0.052	70,100	3.4-9.9	0.05-0.41

表-3 流れによる洗掘実験条件

h (cm)	D (mm)	u (cm/s)	フルード数	シールズ数
10	100	16,34,45,60	0.21-0.66	0.11-0.90
15	100	18,38,52,64	0.15-0.53	0.07-0.81
20	100	21,40,53,65	0.11-0.43	0.06-0.67

(4) 流れによる洗掘実験

波の場合と同様にアサリ増殖施設模型 (110×110cm, チューブ外径 100mm) を用い、洗掘量を計測した。実験には、北海道立中央水産試験場水産工学実験施設内の流動水槽 (水路長 8.0m, 水路幅 1.5m, 水路高さ 1.0m) を用いた。図-3 に示すように中央部に幅 3m にわたってサンドプールを設置した。プール内には 6 号珪砂 (中央粒径 0.3mm) を敷き詰めた上でアサリ増殖施設模型を設置し、模型内部にも 6 号珪砂で盛砂した。

実験では、アサリ増殖施設模型上の水深を 10, 15, 20cm とした上で、それぞれの水深に対して流速を 15～65cm/s 程度に変化させ流れを作用させた。本実験においてフルード数は約 0.11～0.66、シールズ数は約 0.06～0.9 の範囲である。実験条件については表-3 に示す。また、流れの上流側チューブ直上約 5cm のところに電磁流速計 (KENEK 社製) を設置し、アサリ増殖施設模型上の底面流速を計測した。

3. 実験結果

(1) 波による洗掘

図-4は、チューブ径10cmで波周期2.0秒、入射波高24cmの波を施設に作用させた場合に発生する施設隅角部周辺の最大洗掘深の経時変化（作用波の数による変化）と400波程度振動流を作用させた場合の洗掘状況を示したものである。洗掘状況は波の入射側のみについて示した。図中の曲線は、洗掘領域の後端およびその後方に形成される砂漣の波峰を模式的に示したものであり等高線とは異なる。

これより、最大洗掘深は約400波程度以上の振動流を作用させるとほぼ一定値に漸近することがわかる。また、洗掘状況の模式図に示すようにアサリ増殖施設模型の局所洗掘は、波の入射面に面する土留堤隅角部付近で発生し、巻き上げられた砂の一部は再び、すり鉢状の隅角部洗掘領域内に戻るものほとんどが堤外へ直接輸送されるか、洗掘部背後の施設内に一旦堆積しながら次第に外縁部へと輸送される。さらに、土留堤背後に沿って二次元的な局所洗掘が発生する。本研究では、この洗掘領域の幅を二次元洗掘幅と定義した。これら一連の洗掘過程が周期的に繰り返されながら次第に隅角部周辺の局所洗掘による最大洗掘深および二次元洗掘幅が拡大していく。

図-5は、400波を目安に、波周期を1.8~2.2秒まで変化させた上で、各周期に対して波高を5段階程度変化させた場合のチューブ径(D)で基準化された最大洗掘深(V)および二次元洗掘幅(W)をK.C.数で整理して示したものである。これより最大洗掘深および二次元洗掘幅はK.C.数で整理すれば、波周期およびチューブ径によらずそれぞれ(4)、(5)式で統一的に近似できる。

$$\frac{V}{D} = 0.001 + 0.018 \exp(0.342 K.C.) \quad (4)$$

$$\frac{W}{D} = -0.035 + 0.016 K.C.^{1.985} \quad (5)$$

最大洗掘深がチューブ径以上になると、チューブ底面が施設外部と貫通し、海水が流入することにより、洗掘部周辺の盛砂が大規模かつ急速に施設外へ流出し、漁場面積の著しい減少や、チューブの埋没など施設の安定性に重大な影響を及ぼすようになる。

(4)式によれば $V/D < 1$ となる条件は、 $K.C. < 11.7$ となる。また、施設が安定する範囲内で予想される二次元洗掘幅の最大値は(5)式に $K.C. = 11.7$ を代入すると W/D は2.08となる。つまり、チューブ背後の二次元洗掘幅は最大でチューブ径の約2.08倍に達すると推定される。

図-6は、最大洗掘深(V)および二次元洗掘幅(W)をチューブ径(D)で基準化した上でシールズ数を用いて整理して示したものである。これより、最大洗

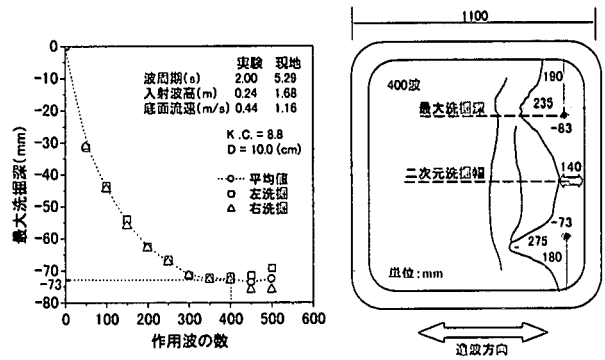


図-4 最大洗掘深の作用波の数による変化と最終洗掘状況模式図

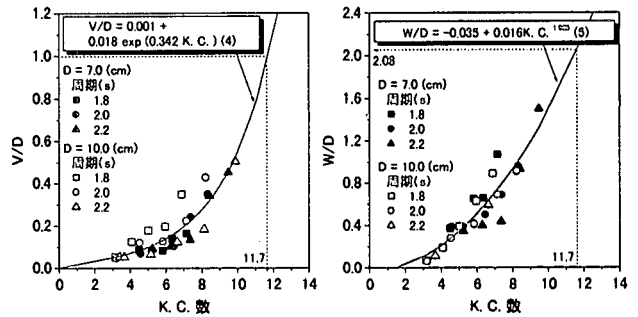


図-5 最大洗掘深および二次元洗掘幅のK.C.数による変化

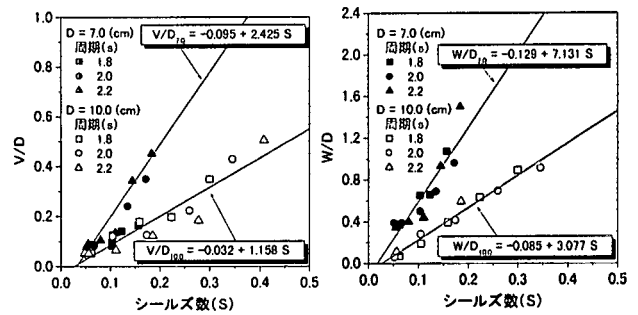


図-6 最大洗掘深および二次元洗掘幅のシールズ数による変化

掘深、二次元洗掘幅ともにシールズ数の一次関数で近似されるが、同じシールズ数に対してチューブ径が小さい方が最大洗掘深、二次元洗掘幅は大きくなり統一的に評価することは困難である。

ここで、洗掘領域と砂漣との相互干渉についてふれておく。波によって形成される砂漣の波長はほぼシールズ数の関数として表すことができ⁵⁾、本実験および現地想定されるシールズ数領域から推算される砂漣波長はそれぞれ約6.0~10.0cm、25.0~50.0cmとなる。波による砂漣の波形勾配は通常0.15程度³⁾であることや洗掘形状から判断すると、砂漣の発達による地盤の微地形変動が施設隅角部周辺の局所洗掘に与える影響は小さいものと考えられる。

すなわち、図-5および図-6より土留堤背後の波

による局所洗掘は、土留堤背後に形成される渦が主な原因で K. C. 数によって評価できると考えられる。

(2) 流れによる洗掘

図-7は、チューブ外径10cm、水深20cmとした上でチューブ直上流速60cm/sの流れを施設に作用させた場合のチューブ背後における最大洗掘深の経時変化(流動時間による変化)と20分間流れを作用させた場合の洗掘状況を示したものである。図中の点線で囲まれた部分は、最大洗掘領域を模式的に表しており、その後方の実線部分まで二次元洗掘領域が広がっている。

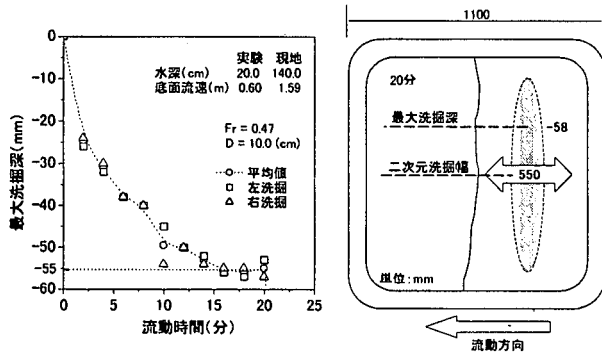


図-7 最大洗掘深の流動時間による変化と最終洗掘状況模式図

これより、最大洗掘深は約20分程度流れを作用させるとほぼ一定値に漸近することがわかる。流れを作用させた場合の洗掘状況は、波による洗掘状況とは大きく異なり、隅角部周辺の局所洗掘はほとんど見られず、チューブ背後に幅広い二次元洗掘が生じる。洗掘領域内の砂は、下流方向の施設内または施設外へと輸送され堆積する。また、底面流速が大きくなると、模式図に示すように洗掘領域後方には砂漣は形成されず、砂漣による影響は小さいと考えられる。

図-8は、20分を目安に、水深を10~20cmまで変化させた上で、各水深に対して主流の流速を4段階変化させた場合のチューブ径(D)で基準化された最大洗掘深(V)および二次元洗掘幅(W)をフルード数で整理して示したものである。これによると、流れによる最大洗掘深および二次元洗掘幅はフルード数の一次関数として表され(6)、(7)式で近似できる。

$$\frac{V}{D} = -0.258 + 1.725 Fr \quad (6)$$

$$\frac{W}{D} = -2.866 + 18.678 Fr \quad (7)$$

また、(6)式から $V/D < 1.0$ となる条件は $Fr < 0.73$ となり、このとき二次元洗掘幅は(7)式より、チューブ径の約10倍まで達すると推定される。

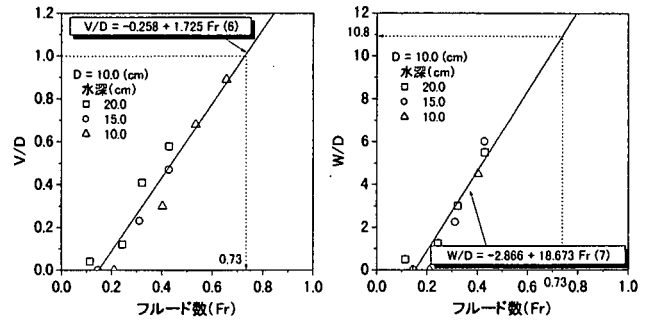


図-8 最大洗掘深および二次元洗掘幅のフルード数による変化

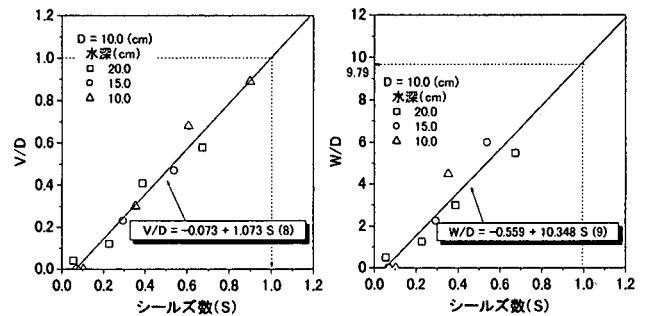


図-9 最大洗掘深および二次元洗掘幅のシールズ数による変化

図-9は、最大洗掘深(V)および二次元洗掘幅(W)をチューブ径(D)で基準化した上でシールズ数を用いて整理して示したものである。これによると最大洗掘深、二次元洗掘幅はともにシールズ数0.05程度以上で砂移動が開始されるとともにシールズ数の関数として(8)、(9)式で近似できる。

$$\frac{V}{D} = -0.073 + 1.073 S \quad (8)$$

$$\frac{W}{D} = -0.559 + 10.348 S \quad (9)$$

また、(8)式から $V/D < 1.0$ となる条件は $S < 1.0$ となり、このとき二次元洗掘幅は(9)式より、チューブ径の約10倍まで達すると推定される。

4. 実験結果から推定される漁場の消失

(1) 漁場消失面積

実験結果から、波、流れによる洗掘量(最大洗掘深、二次元洗掘幅)は、K. C. 数、フルード数およびシールズ数を用いて表すことができた。そこで、これらの無次元数と洗掘量の関係をもとに、アサリ増殖施設内の漁場消失面積や現地における局所洗掘量について検討してみる。ここでの漁場消失面積は、矩形形状の増殖施設を構成するサンドチューブに対して直角に4面から波および流れが作用した場合に生

じる局所洗掘領域、つまり実験結果から推定できる最大洗掘領域を仮定している。

現地で想定される K.C. 数、フルード数をもとに波および流れによる二次元洗掘幅 (W) を (5), (7) 式を用いて計算し、漁場消失面積 DA を二次元洗掘面積および施設隅角部周辺の局所洗掘面積の和として以下の式を用いて推算した。

$$DA = 4.0 \times W \times r + 2.0 \times W^2 \quad (10)$$

ここで、r は矩形状の漁場における一辺の長さである。(10) 式の第 1 項は図-4 で示した二次元洗掘面積 (W × r) × 4、第 2 項は施設隅角部周辺の局所洗掘面積を W との関係から三角形で近似して表したものである (0.25 × W²) × 8。また、流れによる洗掘の場合、施設隅角部周辺の局所洗掘はほとんど見られなかったため、(10) 式の第 2 項は省略した。

図-10 は、現地のサンドチューブ径が 0.7m の場合における K.C. 数およびフルード数による漁場消失面積の変化を、漁場面積をパラメータとして表したものである。ここでは漁場消失率 (漁場消失面積 / 漁場面積) × 100 を縦軸に示した。

これより、漁場消失率は波、流れの場合ともに漁場面積が小さいほど増大することがわかる。また、波による漁場消失率は、波の周期あるいは波高が大きいかチューブ径が小さいほど増大する。一方、流れによる漁場消失率は、水深が小さいか流速が大きくなると増大するのがわかる。

現地観測から推定される最大 K.C. 数は約 12.0、最大フルード数は約 0.5 となるから、例えば漁場面積が 0.25ha の場合について見ると、波による漁場消失率は約 12%、流れによる漁場消失率は約 38% になると推定される。

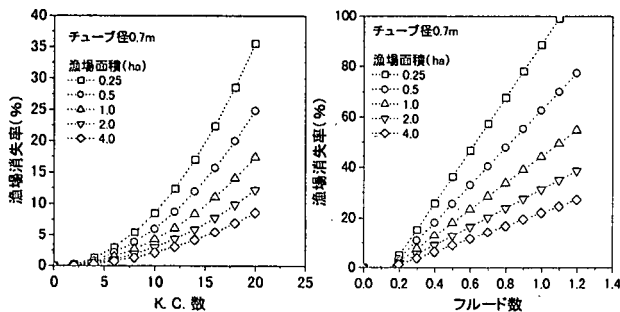


図-10 漁場消失率の K.C. 数およびフルード数による変化

(2) 現地において想定される局所洗掘量

本実験で得られた結果より、現地における波、流れ条件およびアサリ増殖施設造成に用いられるサン

ドチューブ径がわかれば、サンドチューブ背後に生じる最大洗掘深、二次元洗掘幅を推定することができる。

現地における最大 K.C. 数を約 12.0 とすると、波による最大洗掘深はチューブ径の約 1.1 倍、二次元洗掘幅はチューブ径の約 2.2 倍に達すると推定される。また、最大フルード数を約 0.5 とすると、最大洗掘深はチューブ径の約 0.6 倍、二次元洗掘幅はチューブ径の約 6.5 倍に達すると推定される。これらのことからアサリ増殖施設を造成する場合には、波による最大洗掘深および流れによる二次元洗掘幅を十分考慮する必要がある。

5. おわりに

北海道において主に用いられているサンドチューブ施工によるアサリ増殖施設のモデルを用いた移動床モデル実験を実施し、施設内における洗掘特性について以下のような結果が得られた。

施設隅角部のごく近傍で、洗掘深がチューブ径に達するような顕著な局所洗掘が見られる場合には、波浪による洗掘が主な原因と考えられ、洗掘に伴う施設の被災を抑止するためには、K.C. 数が 11.7 以下となるように施設の設置海域やサンドチューブ径を選定する必要が認められた。また、サンドチューブの背後に沿った洗掘勾配の緩やかな幅広い二次元洗掘が見られる場合には、主に流れによる洗掘が原因と考えられ、本研究ではフルード数およびシールズ数を用いて評価したが、今後、底質粒径やチューブ径の異なる実験等を実施して、二次元洗掘の発生機構や適正評価手法について検討する必要がある。更に、本研究成果の実海域施設への適用性の検証調査や、生物面に配慮した施設条件についても検討して、サンドチューブ工法に基づくアサリ増殖施設的设计精度の向上に寄与したい。

参考文献

- 1) 土屋義人, 伊藤政博: 海浜変形の相似則に関する実験的研究, 第 28 回海岸工学講演会論文集, pp. 315-319, 1981.
- 2) 河田恵昭, 西根秀平, 内海泰幸, 井上雅夫: 海浜断面の領域区分と相似則, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp. 326-330, 1992.
- 3) 土木学会: 漂砂環境の創造に向けて, 土木学会, pp. 20-27, 1998.
- 4) 林泰造: 基礎水理学, 鹿島出版会, pp. 149-157, 1996.
- 5) 本間仁, 堀川清司: 海岸環境工学, 東京大学出版会, pp. 152-159, 1985.