

河口部に設置された円柱による河口周辺での乱れエネルギーに関する検討

INVESTIGATION OF TURBULENT KINETIC ENERGY DUE TO CIRCULAR CYLINDER AROUND RIVER MOUTH

中山恵介¹・岡田知也¹・古川恵太¹

Keisuke NAKAYAMA, Tomonari OKADA and Keita FURUKAWA

¹正会員 工博 国土技術政策総合研究所 沿岸海洋研究部 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

This paper describes influence of circular cylinder on kinetic energy of internal waves in a two-layer system. Three methods were used to investigate the effect of circular cylinder in a stratified flow field. First, horizontal profile of dissipation behind circular cylinders was obtained by measuring micro structure of turbulence. Second, numerical computation was carried out to clarify how much kinetic energy of internal waves is lost by a circular cylinder. Third, laboratory experiment was conducted to verify the results obtained by the numerical computation. The results between laboratory experiment and numerical computation were found to agree well.

Key Words: stratification, turbulent kinetic energy, cylinder, LES model, laboratory experiment, estuary

1. はじめに

河口部における塩水の浸入は、その周辺領域における生態系に大きな影響を与えている。生態系に大きな影響を与える要因の一つである貧酸素水塊に関して、塩水フロント周辺における貧酸素水塊の発生が、その典型的な例として挙げられる¹⁾。洪水時を除いて塩水が遡上し存在し続ける場においては、エスチュアリー循環が卓越しているため、塩水フロント周辺における水塊が河口部から移流拡散されてくる過程で底層により酸素が消費され、貧酸素水塊が発生するというものである。このようなフロント周辺における貧酸素水塊の発生は、一般的に日本の大河川において発生し易い現象であると言える。そのため、生態系に大きな影響を与える貧酸素水塊がどのように分布しているかを把握することは、非常に重要なテーマであると考えられる。

これまでの研究で、河口部における塩水楔の浸入に関しては、界面抵抗係数の推定を中心として、非常に多くの研究が存在する。例えば、土木学会水理委員会密度流研究小委員会による報告²⁾は、1975年までの研究成果を網羅するものとして挙げられる。その後の研究としては、2層流における界面付近の流れ場を、摂動展開を用いて解析的に解くことにより界面抵抗係数を推定した研究³⁾、log-linear則を界面付近の流れ場に適用することで界面

抵抗係数を推定した研究⁴⁾、log-linear則を用いた推定方法における界面フラックスの推定方法を修正することにより、界面抵抗係数のより高い再現を可能にした研究⁵⁾などが挙げられる。

本研究では、東京湾に注ぎ込む多摩川を対象としている。荒川における塩水楔の浸入形態の研究⁶⁾からも推定されるように、多摩川における塩水の浸入は潮汐による影響を大きく受けていると考えられ、その影響により弱混合から強混合へと、小潮から大潮にかけて変化するものと予想される。そのため、羽田空港拡張にともなう円柱群が多摩川河口に設置されたたすると、小潮、大潮に関係なく、特に上げ潮時にその円柱群が塩水の遡上に対して影響を与えることが予想される。

円柱群が生み出す塩水遡上に与える影響として考えられるのは、表面波の変化、成層構造の変化による乱れの生成と伝播である。そのため、成層場における乱れの発生と塩水遡上に与える影響に関しては、上述の界面抵抗係数や連行係数を中心とした研究をそのまま適用することができない。そこで本研究では、潮汐の影響を大きく受けて塩水の遡上形態が変化する河口において円柱群が存在する場合、どの程度の乱れのエネルギーを塩水フロント周辺に与えるかを中心に、現地観測、数値実験、室内実験をもとに検討を行った。まず円柱群の乱れに対する影響を評価するために室内実験、数値実験を行い内部波が円柱周辺を通過する場合の乱れの生成に関して検討

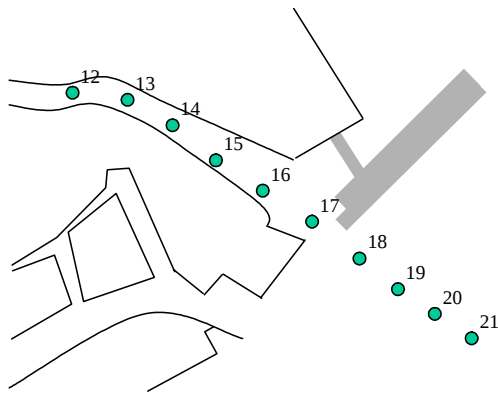


図-1 多摩川周辺の縦断測量地点．

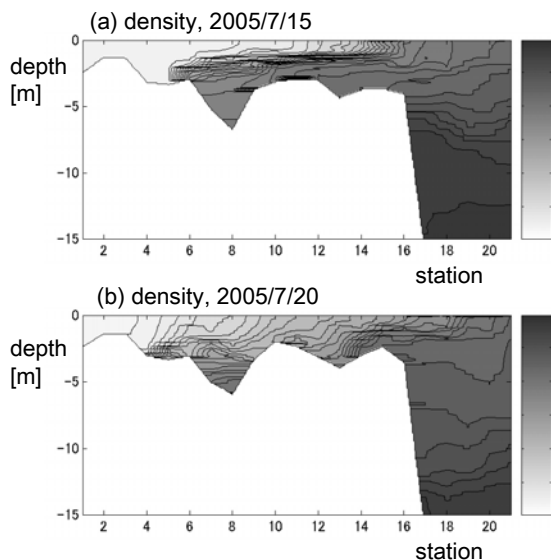


図-2 密度の縦断観測結果．(a) 2005年7月15日(小潮期)
．(b) 2005年7月20日(大潮期)．8:00-15:00での観測．

を行った．その結果を用いて成層場に実際に存在する円柱群周辺の乱れの計測を行い，実験結果を利用して河口における成層場への円柱群の乱れの影響伝播を検討した．

2．多摩川における塩水の浸入形態

図-1に，多摩川河口周辺の図を示す．現在の計画では，多摩川河口に栈橋形式の羽田空港拡張工事が予定されている．本研究は，その栈橋を支えるピアがどの程度塩水の遡上形態に影響を与えるか，評価するためのものである．その評価のためには，潮汐振幅の変化にともなう，多摩川における塩水の遡上形態の変動を把握する必要がある．そこで2005年7月15日，2005年7月20日の小潮，大潮期において，st.1からst.21までの密度の縦断観測を行った．ステーションの間隔は，およそ1km間隔であった．

大潮期と小潮期において，はっきりとした塩水遡上形

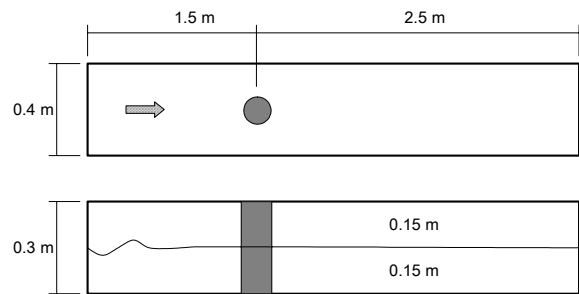


図-3 数値計算に用いられた計算領域と円柱．

態の違いを確認することができた(図-2)．小潮期における遡上形態は，弱混合形態であると言ってよいと考えられるものであった．一方，大潮期には，st.14付近を見ると，緩混合と強混合の間の状態であったと考えられる．しかし，塩水の影響はst.4付近まで存在しており，小潮期における弱混合形態の遡上距離とそれほど大きな差がなかった．おそらく小潮期において，st.8における急激な落ち込みに貯留された塩水が，大潮期においても影響を与えているのではないかと考えられる．

3．数値実験による検討

多摩川河口に置かれる円柱群により失われるエネルギーの評価を行うために，3次元LESモデルによる検討を行った．円柱群は図-1のst.17周辺に設置されることから，表層5mにおける成層場は2成層で再現できるものとして，図-3のような実験装置を作成した．長さ4 m×幅0.4 m×水深0.3 mで，界面は水表面から0.15 mに存在するものとした．数値実験では，上下層の密度差20 kg/m³，円柱の直径0.1 m，内部波の周期10sを与え，内部波波長に対する円柱の直径の比が0.0565となるように計算条件を与えた．実際の杭の直径は1.5 m程度であり，表層5 mにおける界面をはさんだ上下層の密度差を5 kg/m³程度であることから，内部波の波長は約30 mであることに対応する．卓越する内部波の存在に関しては，今後定点観測により解明してゆく必要がある．

数値実験に用いたモデルの特徴は，非静水圧，水平1方程式LES，鉛直2方程式LES，CIP法の使用，ポアソン方程式の解法に残差切除法の使用，表面波の計算にALE法の使用である⁷⁾⁻⁹⁾．本研究における計算では，左端境界において全層平均フラックスがゼロとなる条件を与えたことから，水面変動は無視できるものであった．そこで水面計算を行わず，上端で固定壁スリップの条件を与えて計算を行った．計算グリッド数は200×20×30であり，グリッド間隔は0.02 m×0.02 m×0.005 m~0.015 mを用いた．界面周辺では小さなグリッドを与えた．計算時間間隔は0.025 sであり，4000ステップ，100 sの計算を行った．右端は，室内実験との整合性を持たせるために固定壁とした．側壁，底面はノンスリップとした．円柱

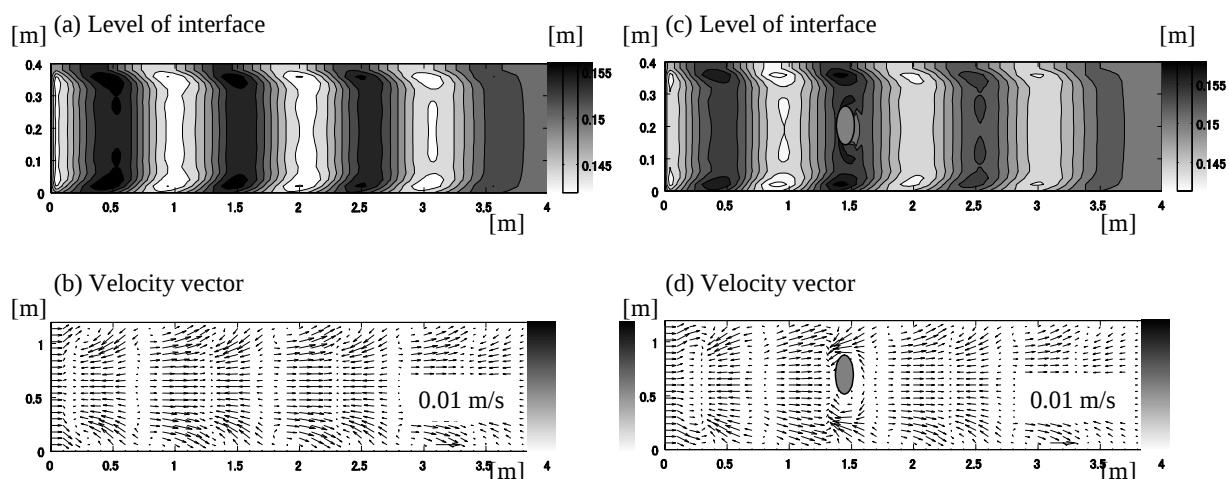


図-4 計算開始37sにおける数値計算結果．(a) 円柱がない場合の界面位置の水平分布図．(b) 円柱がない場合の底面から0.175 mにおける流速ベクトル．(c) 円柱がある場合の界面位置の水平分布図．(d) 円柱がある場合の底面から0.175 mにおける流速ベクトル．

は左端から1.5 mの位置に設置した．

計算開始後、右端に達した内部波が反射してきたため、その影響を除いた40 s程度までの計算結果を使用することとした．円柱の影響を考慮するために、円柱が存在しない場においても同様な計算を行った．図-4に、計算開始後37 sにおける上下層の密度の平均値における密度の底面からの高さの分布と、底面から0.175 mにおける流速ベクトルを示す．壁面の影響を受け、円柱が存在しない場においても3次元的な流速ベクトルの分布、界面位置分布が現れていた．底面や壁面の摩擦によるエネルギーの散逸効果により、円柱が存在しない場合にも、僅かに内部波の振幅の減衰が見て取れる．円柱が存在することで、明らかに内部波の振幅が減衰していることが、円柱の前後の内部波の波高を比較することにより分かった．

円柱の存在により、全運動エネルギーがどの程度失われているかを検討するために、内部波の進行方向に垂直な断面における運動エネルギーの平均値を1周期積分した(図-5)．円柱が存在しない場合、図-4においても確認された、側壁と底面による運動エネルギーの減衰が、図-5においても確認された．円柱が存在する場合、円柱により反射した内部波の影響による運動エネルギーの空間変動が、円柱前面において発生していることが確認された．一方、円柱後方において明らかな運動エネルギーの減衰が現れていた．円柱後方1.75 mにおける円柱が存在する場合、しない場合におけるそれぞれの1周期積分された運動エネルギーは、 $7.04 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 、 $4.25 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ であった．およそ39.7%のエネルギーが、内部波進行方向の投影面積1/4の円柱により失われたことになる．つまり、内部波が1本の円柱に衝突することにより反射または失われるエネルギーは、 $0.397/0.25=1.59$ であることが分かる．円柱により行われる反射が反射率1.0で

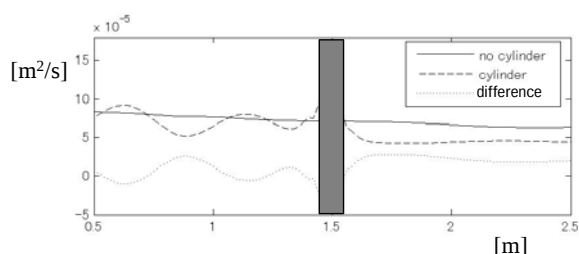


図-5 1周期平均された内部波進行方向に対して垂直な断面における運動エネルギーの縦断分布．

あると考えると、円柱投影面積の0.59倍の運動エネルギーが円柱の存在により失われることが分かった．

4．室内実験による検証

数値実験結果の検証のため室内実験が行われた．室内実験に用いた実験装置を図-6に示す．全長6m、幅0.4m、上層下層の水深それぞれ0.15mとした．全長が数値実験と異なるが、右端からの内部波の反射の影響がない期間における数値実験、室内実験結果の比較を行うことにより、その影響を無視した．造波には順圧成分、傾圧成分それぞれを考慮して与えることができるように工夫されたものを用いた(図-6)．本研究で対象としているような傾圧成分が卓越する実験では、実験装置左端に設置された2つの造波装置が、時間的に180度の位相を持つ正弦波により上下することで内部波を再現することができる．

まずは、円柱を置かずに実験を行い、計算結果との比較、検証を行った(図-7)．水路中央の円柱が設置される場所より0.5m後方の底面から0.15mに超音波流速計(Vectorino, ALEC Co.)と伝導度計を設置し、鉛直流速と密度の時系列を測定した．同じグラフ内に密度を表示

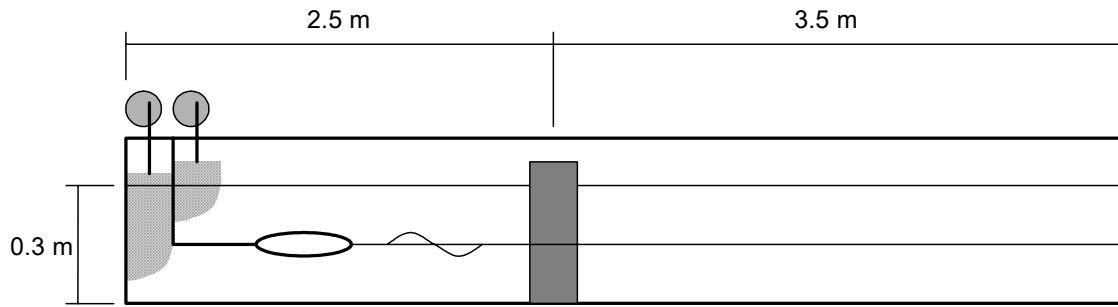


図-6 実験装置．

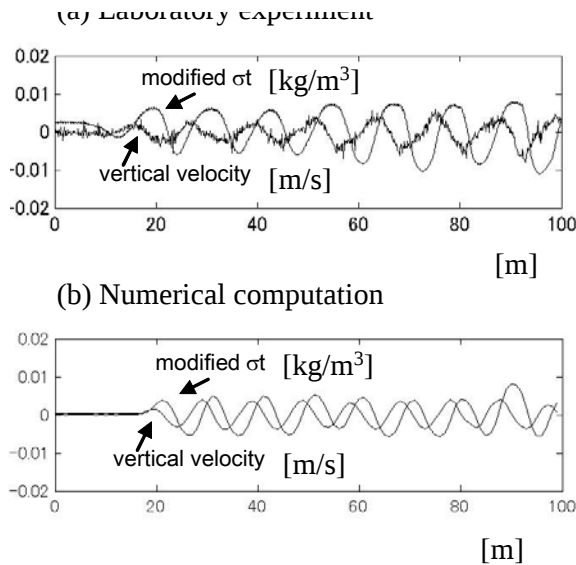


図-7 円柱後方0.5mにおける鉛直流速と修正された σ_t ．

するために、密度は修正された σ_t を用いて表記されている．修正は、計測期間における平均値との差をとり、その値を0.001倍することにより与えた．グラフ上で50秒以降になると水槽の右端において反射した内部波の影響が現れ始めていた．そのため、50秒以内における比較を行ったところ、室内実験結果が数値実験結果と比較して、大きな値を示していた．これは3次元計算において考慮された円柱の再現がImmersed Boundary Methodを用いて行われたために生じたと考えられる．今後、より小さなメッシュでの計算を行うか、新たな境界条件を組み込むことができる計算手法を開発することが望まれる．

続いて円柱を設置し、円柱の設置による影響について検討した．水路中央の円柱後方1.25mにおいて伝導度計を1cm間隔で設置することにより密度の鉛直プロファイルを測定し、その結果から密度界面の時系列を得た(図-8)．円柱ありと円柱なしの実験において、内部波の造波開始と密度の測定開始時刻が異なっていたため、直接の比較を行うことができないが、円柱を設置することにより、内部波の振幅が明らかに小さくなっていることが、実線四角(円柱なし)と破線四角(円柱あり)の比較から分かる．数値実験において示された円柱の存在による内部波の運動エネルギーの減衰により、実験において円柱後

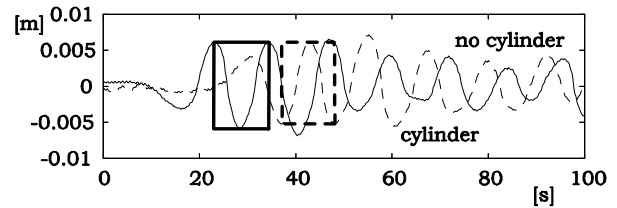


図-8 円柱後方1.25mにおける内部波の波高の時系列の比較．

方の内部波の振幅が減少したものと考えられる．同様の結果が、数値実験からも得られたことも記しておく．

5．乱流計測と円柱による影響の検討

多摩川河口に円柱群が存在する場合の影響を推定するために、東京灯標の円柱を用いた乱れの計測を行った(図-9)．計測は、微細乱流構造測定器Turbomap9(ALEC CO.)を用い、東京灯標から北に離れる方向に150mの距離まで行った．実際の流向は北から時計回りに20度ずれていたが、観測距離が150 mと短く、ほぼ東京灯標の影響による乱れの影響を評価する上で問題ないものであった．

図-9に、界面周辺の高さ3mの間における散逸率の分布を示す．円柱群直下における散逸率が非常に大きく、その後急激に減衰していることが分かる．東京灯標の影響の全くない地点における計測結果から、周辺において常に存在している乱れによる散逸率は、約 $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}^3$ であることも分かった．LESモデルに基づき、散逸率が式(1)で示されるとすると、乱れの運動エネルギーは式(2)で示されることになる．

$$\varepsilon = C_\varepsilon \frac{E_T^{3/2}}{l_m} \quad (1)$$

$$E_T = 1.12 \times 10^{-4} + 2.80 \times 10^{-4} \exp\left(-\frac{x_l}{217}\right) \quad (2)$$

ここで、 ε ：散逸率、 C_ε ：LES定数(=0.845)、 l_m ：代表距離(=1 m、界面厚さに相当)、 E_T ：乱れの運動エネルギー、 x_l ：東京灯標からの流下距離である．なお、本研究では直接乱れのエネルギーを測定することが困難で

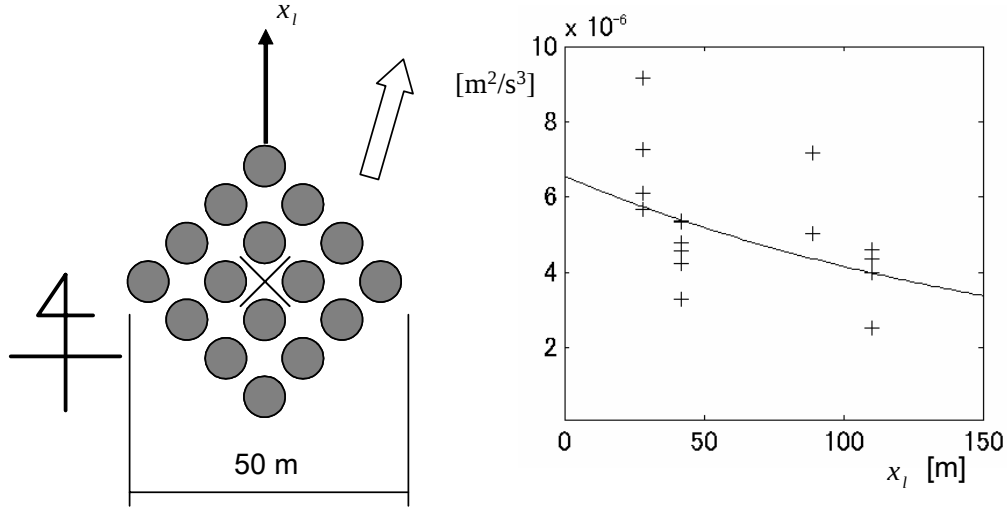


図-9 東京灯標と散逸率の測定場所および測定結果．×は横軸のゼロに対応する．

あったことから，微細乱流構造測定器により得られる散逸率を中心とした解析を行った．

式(2)は，東京灯標から1000 m流行方向に離れた地点では，乱れの運動エネルギーがほぼ自然に存在する値に漸近することを示している．ここで，全運動エネルギー(E_A)を，乱れの運動エネルギー(E_T)とそれ以外の微小擾乱以上のスケールの運動エネルギー(E)に分離して考える． E_A は湾スケールで規定されているとすると，本研究では E_A は一定値であると考えられる．東京灯標直後において平均流速が極めて小さく， E_T が卓越するものとする，東京灯標直後では $E_A = E_T$ が成り立つ．最終的に， E は式(3)で示されるものとなる．

$$E = 2.80 \times 10^{-4} - 2.80 \times 10^{-4} \exp\left(-\frac{x_l}{217}\right) \quad (3)$$

ここで，水平交換を考慮した運動エネルギーに関するモデル化を提案する．まず，東京灯標により失われる運動エネルギーの影響範囲は，数値実験の結果を基に式(4)で示されるものとする．

$$L = 0.59l_c \quad (4)$$

ここで， l_c ：東京灯標の円柱群の投影面積を水深で除したものである．

定常状態を仮定し，運動エネルギーの水平交換率(K/L)を導入することで，東京灯標直後からの運動エネルギーに関する式(5)および解である式(6)と式(7)が得られる．

$$u_c \frac{dE}{dx_l} = \frac{K}{L} (E_A - 1.12 \times 10^{-4} - E) \quad (5)$$

$$E = 2.80 \times 10^{-4} - 2.80 \times 10^{-4} \exp\left(-\frac{K}{u_c L} x_l\right) \quad (6)$$

$$K = \frac{u_c L}{217} \quad (7)$$

ここで， u_c ：移流流速である．

続いて，多摩川における円柱群の影響を評価するためのモデルを構築する．およそその影響を評価するということから，単純化した水深一定 h ，幅一定 B_B の断面を考える．河口部に幅 B_C の円柱群が存在すると，円柱群の影響域は $\beta=0.59B_C$ となる．式(7)で得られた水平の交換に関する係数を用いて，円柱群影響域1とその他の領域2について，以下のモデル化がなされる．

$$u_B \frac{dE_1}{dx_B} = \frac{K}{\beta} (E_2 - E_1) \quad (8)$$

$$u_B \frac{dE_2}{dx_B} = \frac{K}{\beta} (E_1 - E_2) \quad (9)$$

ここで， u_B ：モデル化された多摩川における移流流速である．

若干の計算により川幅 L_B をとって，式(10)と式(11)で示される運動エネルギーに関する推定式を得ることができる．

$$E_1 = 2.80 \times 10^{-4} \frac{L_B - \beta}{L_B} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{L_B K}{u_B (L_B - \beta) \beta} x_B\right) \right\} \quad (10)$$

$$E_2 = 2.80 \times 10^{-4} \left\{ \frac{L_B - \beta}{L_B} + \frac{\beta}{L_B} \exp\left(-\frac{L_B K}{u_B (L_B - \beta) \beta} x_B\right) \right\} \quad (11)$$

式(10)，式(11)におけるexpの値は，千数100m流下するだけでその影響はほぼゼロとなる．そこで，塩水遡上のフロント周辺ではexpの値を無視することができるので，最終的な運動エネルギーは式(12)となる．

$$E_1 = E_2 = 2.80 \times 10^{-4} \frac{L_B - \beta}{L_B} \quad (12)$$

非常に効率よく、失われた運動エネルギーが乱れの運動エネルギーに変換されるとすると、塩水フロント周辺で増加する乱れの運動エネルギーは、式(13)で示される。

$$E_{BTC} = 2.80 \times 10^{-4} \frac{\beta}{L_B} \quad (13)$$

通常、塩水フロント周辺において発生している乱れの運動エネルギーは、荒川での研究成果をもとに式(14)で与えることができる⁶⁾。式(13)を用いて、塩水フロントでの乱れの運動エネルギーの増加率は、式(15)で示されるものとなる。

$$E_{BT} = \left(\frac{0.0035h|\bar{u}|}{C_m l_v} \right)^2 \quad (14)$$

$$R_E = \left\{ \left(\frac{0.0035h|\bar{u}|}{C_m l_v} \right)^2 + 8.20 \times 10^{-4} \frac{\beta}{L_B} \right\} \left/ \left(\frac{0.0035h|\bar{u}|}{C_m l_v} \right)^2 \right. \quad (15)$$

ここで、 E_{BT} ：塩水フロント周辺での乱れの運動エネルギー、 h ：水深、 $\bar{u}$ ：潮汐による流速、 l_v ：鉛直代表スケール、 R_E ：乱れエネルギーの塩水フロント周辺での増加率である。

それぞれ、水深5 m、潮汐による流速0.2 m/sから0.3 m/s、鉛直代表スケール1 mとし、河口の閉鎖率 B_C/L_B を横軸に乱れの運動エネルギーの増加率を計算すると、図-10が得られる。しかし、幾つか今後の検討で明らかにしてゆかなくてはならない点がある。まず、失われた運動エネルギーが全て乱れの運動エネルギーに変換されて保持されるとしている点である。2番目として、東京灯表における乱れを測定し、それを多摩川へ適用しており、成層界面厚さに対応する代表スケールの決定方法についても検討の余地がある。

5. おわりに

- (1) 2005年7月15日と20日における多摩川の鉛直断面縦断密度分布から、大潮期には強混合、小潮期には弱混合から緩混合の形態を有することが分かった。
- (2) 羽田拡張の際に用いられるピアが存在する場と同様な場を数値実験により再現し、1本の円柱が与える内部波への影響を評価した。その結果、内部波の進行方向における円柱1本の投影面積の約0.59倍の領域で、内部波による運動エネルギーを減少させることが分かった。
- (3) 室内実験の結果を用いて、数値計算結果の検証を行い良好な再現性に関する結果を得た。実験において

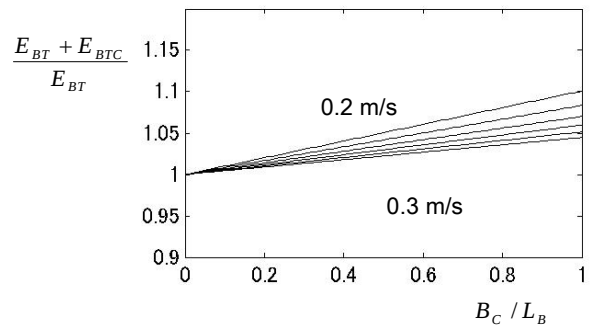


図-10 フロント周辺での乱れの運動エネルギーの増加率。

も、円柱の存在による運動エネルギーの減衰を確認できた。

- (4) 微細乱流構造計測装置により、大潮期における東京灯標周辺での散逸率の分布を計測した。その結果、東京灯標により生じている散逸の流下方向のモデル化を行い、流下方向1000m程度で東京灯標の影響はほぼ消滅することが分かった。
- (5) 失われた運動エネルギーは、全て乱れの運動エネルギーに変換されて失われないと仮定することにより、多摩川を遡上してゆく塩水フロント周辺での乱れの運動エネルギーのモデルを構築した。

参考文献

- 1) Ishikawa T., T. Suzuki, and X. Qian, Hydraulic study of the onset of hypoxia in the Tone River estuary, Journal of Environmental Engineering - ASCE, 130(5), pp.551-561, 2004.
- 2) 水理委員会密度流研究小委員会, 成層密度流の界面現象(1), 土木学会論文報告集, No.242, pp.73-90, 1975.
- 3) 玉井信行, 浅枝隆, 淡塩2層流況界面における抵抗係数について, 土木学会論文報告集, No.271, pp.67-81, 1978.
- 4) 日野幹雄, 密度流の流速分布および界面抵抗について, 水理講演会論文集, 第23巻, pp.347-352, 1979.
- 5) Nakayama K., K. Nakajima, K. Hasegawa and M. Fujita, A numerical study on a cold air flow causing the formation of snow clouds over Sapporo city, Journal of Hydrosience and Hydraulic Engineering - JSCE, Vol.16, No.2, pp.35-48, 1998.
- 6) 岡田知也, 中山恵介, 荒川河口域における潮差変動に伴う Chlorophyll a 分布および河川流入負荷量の変動, 土木学会論文集, No.754, pp.33-50, 2004.
- 7) 中山恵介, 佐藤圭洋, LESモデルによる水平面上張り出しブルームの解析, 土木学会論文集, No.628, pp.97-114, 1999.
- 8) 中山恵介, Jorg Imberger, 斜面に連続的に作用する内部界面の理論解の適用性の検討, 土木学会論文集, No.789, pp.59-72, 2005.
- 9) Nakayama K., T. Okada and M. Nomura, Mechanism responsible for fortnightly modulations in estuary circulation in Tokyo Bay, Estuarine Coast and Shelf Science, Vol.64, pp.459-466, 2005.

(2005.9.30受付)