



エスチュアリーの流れと輸送

先生（以下「T」）：大阪湾の水環境を考えるにあたって、物質の輸送や拡散に関する流れ構造を理解することが重要なのでそれから始めよう。

学生（以下「S」）：物理ですか、数式が出てくるのでしょうか。得意ではないのですが……。

T：まあ、そんなことは言わずに。“エスチュアリー（estuary）”は「河川水と海水とが混合している水域」と定義されています。つまり、塩分差や温度差により起こされる密度流が力学的に支配する水域のことです。日本語訳の河口とは異なります。この定義に基づくなら、大阪湾も、東京湾も“エスチュアリー”で、議論の対象とする水域は普遍的になります。

潮汐と潮流、残差流系

また沿岸海域では、周期数秒、波長数mの風波から季節変動あるいは太平洋の海流等の影響を受けた経年変動まで、種々の周期を持った流動が互いに独立な階層構造を持って存在しています。その中で最もエネルギーの大きな流動は月と太陽の起潮力による海面の昇降運動、そしてその海面勾配によって引き起こされる海水の水平方向の往復運動を示す潮流です。周期によって半日周潮や日周潮に分類でき、潮流の卓越した沿岸海域では、

物質の輸送には潮流が支配的な流れであると思われるがちですが、実はそうではありません。往復運動をしている場合にも、漂流物は一周期後にも、数日経っても元の位置には戻ってこないで、一周期の間に別の位置に運ばれています。

この輸送に関与する流れを“(潮汐)残差流”と呼びます。流れの変動成分を一潮汐周期で積分した場合の残りの定常流成分として定義されます。従来、潮流の時系列を調和分解したときの平均流成分に相当することから、恒流と呼ばれていましたが、恒流が潮汐時間によって異なるのはおかしいことであるので、今では潮流成分を除去したという意味で、残差流と呼ばれています。したがって、潮流周期以上の時間にわたって物質が輸送される場合には、残差流が物質の輸送を分担し、潮流周期を含むより短い変動は乱流拡散として輸送に関わることになります。

S：つまり、潮流が往復流の場合には、一潮汐周期で平均すれば、物質は元の位置に戻ってくる。しかし、残差流はその流速は小さいが、一方向に物質を輸送するので、長時間の物質輸送に関する寄与率を考えれば、残差流は潮流よりも大きくなるということですね。

T：例えば、明石海峡で海洋レーダを用いた海表面観測では、残差流の値が大潮時の最大流速値を上回ることもありました。ちょっと不思議ですネ。

S：残差流系を形成する要因は他にありますか。

T：はい、残差流は生成要因から大きく三つに分類できます。複雑な地形形状によって生じる潮汐残差流系、水温差・塩分差に由来する密度流系、そして風応力による吹送流系です。

T：図1の上半分は大阪湾における残差流系を数多くの現地観測や数値実験（例えば、藤原ら（1989）、中辻・藤原（1995））のデータに基づい

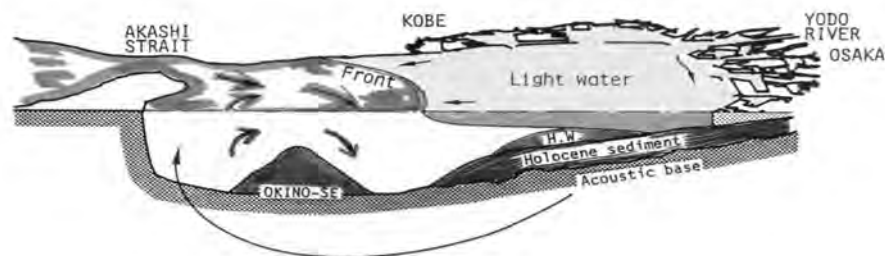


図1 大阪湾の残差流系の模式図

て描いたものです。大阪湾は20m等水深線に沿って東西に分断されています。東部海域には年間を通して河川水の流入があり、成層化し、その上層に密度流系の残差流である西宮沖環流があります。西部海域では流速が速く、海水は鉛直方向に混合しており、潮汐残差流系の沖ノ瀬環流が観られ、両海域の境界には潮汐フロントが発達しています。

成層化水域での残差流循環の生成機構

図1で得られた研究成果を科学的に説明するために示したのが、図2の大阪湾湾奥部水域の各層位別の残差流と平均圧力偏差の水平分布です。詳細は中辻(1994;1997)をご覧ください。ベクトルは流速変動を一潮汐積分して得られる残差流で、空間的分解能は水平距離1km、鉛直14層位(層厚2m×10層位、4m、6m、15m、15m)です。図は海表面下1m、3m、9m水深の計算結果を示しており、これを用いて残差流系の特性を分かりやすく説明してみます。

- ①明石海峡の東南部にある沖ノ瀬を中心とした時計廻りの循環渦が形成されているのが明瞭にわかります。全水深で一様であることから、この残差環流は潮汐残差流です。複雑な地形とNS方程式の非線型が原因で生じます。
- ②湾奥海域においては、水厚1mでは河川水は淀川河口から放射状に扇子を拡げたように流れる。水厚3mでは、西宮沖7.5km辺りに中心をもつ循環、そして、水深9mの成層境界面より深い下層では、須磨、神戸の沖合いから湾奥に向かい時計廻りに円弧を描きながら大阪、堺の沖を南下して、泉南沖へと流出する流れを形成しています。このように大阪湾には各層位で全

く異なった流動があります。

- ③とくに興味深い残差流系は、水表面下3m～5mの水深のみで見られる、淀川河口を南東に横切る流れです。この時計廻りの循環は、藤原ら(1994)が実測に基づいて指摘しており、伊勢湾や東京湾の湾奥においても観察されています。
 - ④つぎに、渦の起動力をともなっている圧力場の分布を調べることにより、西宮沖環流を形成する渦の力学を考えます。図2に示した平均圧力偏差は圧力の計算値から標準圧力を差し引いた圧力偏差 ΔP を一潮汐平均することにより得られたものです。図では各層の圧力偏差を $1 \times 10^2 \text{ N/m}^2$ 毎に等値線を示しています。一般に圧力場は密度分布と水位上昇量から決まる量です。水深3mの西宮沖7.5kmに高圧部が現れており、それは放射状に水平発散の流れを生じさせます。残差流ベクトルは全層位で平均圧力偏差の等値線とほぼ平行になって流れていて、これは流れが地衡流の形態であることを示唆しています。すなわち、上層水の水平発散が地球自転の効果により渦度を生じる、言い換えれば、時計廻りに回転を始める、いわゆる高気圧性渦に基づく流れであることを実証したことになります。
 - ⑤フロントに直交する観測線A-A'の鉛直断面での残差流の流速を示したのが図3です。成層した内部境界面が水表面から約8m水深にあり湾奥(=20~30km)の下層流体が上向きに連行されているのがよくわかります。
- 図3の右図は南北方向の残差流成分の分布を示しており、成層した上層の $x=20\sim30\text{km}$ の海域で南流、また、 $x=10\sim20\text{km}$ で北流になって

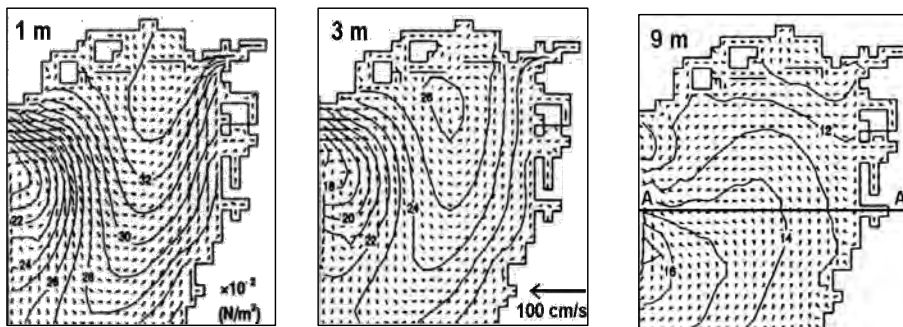


図2 バロクリニック流れの残差流ベクトルの水平分布と平均圧力偏差との関係

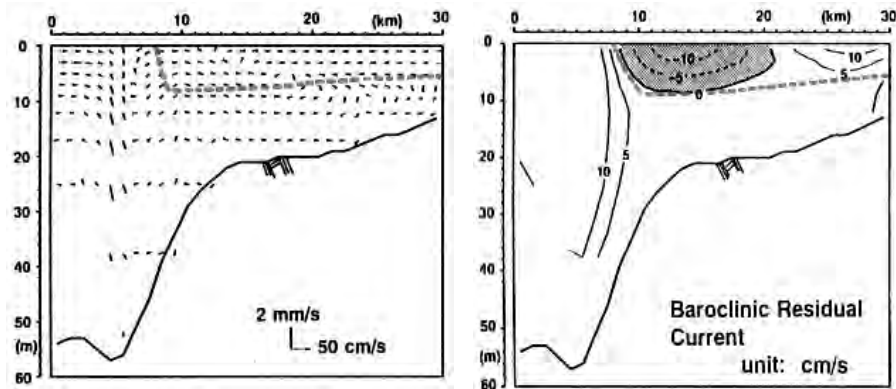


図3 A-A'断面における断面内残差流のベクトル(右図は南北, 左図は東西方向)

います。これは図2の西宮沖環流の存在を示しています。

数値モデルを用いた実験例

水理実験で染料を流して流動を可視化するように、数値実験でも粒子を流したときの3次元的な振る舞いをアニメーションで示すことができます。淀川から一万個の粒子群を放流して得られた流動を計算した結果(図4)から、淀川から放流された河川水の振る舞いを次のように説明することができます。

淀川からの河川水は西宮沖環流に運ばれて、まず南に向かい、8日間東部海域の上層を時計廻りに運ばれます。この間、鉛直方向の拡散はほとんどなく、粒子群は沈降しながら水表面を這うように薄く拡がります。その後、須磨沖で西部海域に入り、明石海峡からの強い潮流と出会い、鉛直方向に強く混合して、粒子群は大きく拡散します。10日後には淡路島の海岸沿いに南下する粒子群と、東部海域の成層化した境界面の下層を湾奥に向かう粒子群とに分離するのです。後者は放流粒子の約30%に相当し、湾奥部で連行されて上層へと戻っていく。いわゆるエスチュアリー特有の鉛直循環が大阪湾でも生じていることが数値実験から分かりました。この一巡には約20日の時間を必要とします。

まとめ

S: 専門的な知識をもっていない人など、誰にでも分かるように式も用いず、絵で説明していただいたのですが、やはり難しいですね。でも、大阪湾のなかを水が流れている様子が見えたようで

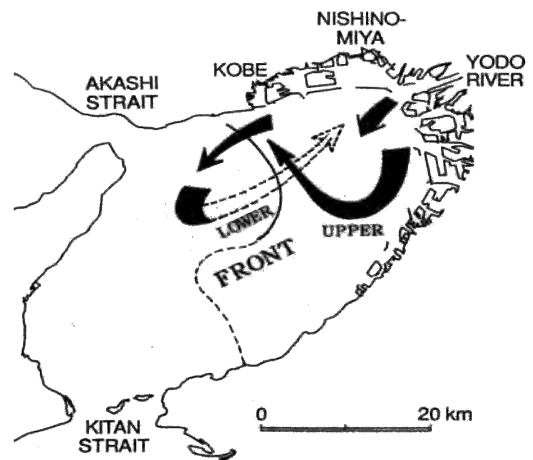


図4 エスチュアリー鉛直循環と淀川河川水の振る舞い

もしよかったです。

T: 少しでも興味を持っていただいたことを糧にして、これからも頑張りましょうか。

参考資料

- 1) 中辻啓二, 藤原建紀; 大阪湾におけるエスチュアリー循環機構, 海岸工学論文集, 42, 396-400, 1995.
- 2) 中辻啓二; 海洋: 閉鎖性海域(環境数値流体力学講座2), 数値流体力学, 4, 306-332, 1997.
- 3) 中辻啓二; 大阪湾における残差流系と物質輸送, 土木学会水工学シリーズ, 94-A-9, 1-28, 1994.
- 4) 藤原建紀, 肥後竹彦, 高杉由夫; 大阪湾の恒流と潮流・渦, 海岸工学論文集, 36, 209-213, 1989.
- 5) 藤原建紀, 澤田好史, 中辻啓二, 倉本茂樹; 大阪湾東部上層水の交換時間と流動特性-内湾奥部にみられる高気圧性渦-, 沿岸海洋研究ノート, 31, (2), 227-238, 1994.

中辻啓二(大阪大学大学院工学研究科)