

# GPS フロートに基づく河川流のラグランジュ的観測

## LAGRANGIAN MONITORING OF RIVER FLOW WITH GPS FLOATS

江端萌奈美<sup>1</sup>・二瓶泰雄<sup>2</sup>

Monami EBATA and Yasuo NIHEI

<sup>1</sup>学生員 学(工) 東京理科大学大学院 理工学研究科土木工学専攻修士課程  
(〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

<sup>2</sup>正会員 博(工) 東京理科大学助教授 理工学部土木工学科 (同上)

We attempted to conduct a Lagrangian monitoring of river flow by using a number of floats with GPS sensor which can track its position with the accuracy less than 5m. The field measurements with the GPS floats were carried out in the middle reach of the Edo River in low-flow conditions. The observed results show that the GPS floats may track the Lagrangian behavior of river water and easily obtain the horizontal patterns of river flow. The dispersion of river flow evaluated from the GPS floats indicates that the dispersion coefficients for materials in surface layer are found to be positive and negative. The same phenomenon of the dispersion is also confirmed through the 3D river-flow simulation.

**Key Words:** GPS float, Lagrangian monitoring, river flow, dispersion, 3D numerical simulation

### 1. はじめに

河道管理・整備の基礎資料として、河道の水理特性を把握することは極めて重要であり、そのためには観測モニタリングの技術レベルを向上させることは不可欠である。この水理モニタリングでは、河川流速・流量に加えて、河川流中における物質の分散特性を明らかにすることが求められている。これまで行われている河川流モニタリングは、大きく分けると、固定点において計測を行うオイラー的観測と流れに追従するトレーサーを用いるラグランジュ的観測に分類できる。オイラー的観測では、ブライス流速計や電磁流速計、電波流速計、超音波ドップラー流速分布計等により、ある断面内における流速データが計測されている<sup>1)~5)</sup>。一方、ラグランジュ的観測としては、浮子や画像解析により流速計測が行われている<sup>6)~8)</sup>。

ところで、海岸や沿岸海域における流れのラグランジュ的観測法として、抵抗体を吊り下げたフロートを放流し、そのフロートの軌跡を追跡する、という観測が行われている<sup>9)</sup>。そのフロートの位置情報を取得するために、小型GPSを採用する方法が用いられている<sup>10), 11)</sup>。瀬岡ら<sup>10)</sup>は、GPS搭載型フロートをサンゴ礁海域においてサンゴの産卵時期に放流し、サンゴ幼生の広域挙動を直接追跡している。西ら<sup>11)</sup>は海岸における水難事故予防のための離岸流調査に対してGPSフロートを使用している。

このように、GPSフロートによる流れのモニタリングは、簡便かつ低予算で、流体粒子や水中浮遊物質の軌跡を直接追跡することが可能な手法であるものの、河川流モニタリングへの適用例は著者らの知る限りでは皆無である。

そこで本研究では、多数のGPSフロートを用いて、河川流のラグランジュ的観測を行う。このフロートに搭載するGPSは、市販されている安価な携帯タイプのものである。本論文では、多数のGPSフロートを、平水時における江戸川中流部にて放流し、河川水のラグランジュ的挙動や平面的な流速分布について示す。また、多数のGPSの位置データから河川流の分散特性を算出することが可能となるので、別途実施された三次元河川流シミュレーションデータに基づく中立粒子の追跡計算と合わせて、分散特性について詳細に検討する。

### 2. GPSフロートを用いた現地調査の概要

#### (1) GPSフロートについて

使用したGPSは、コンパクト携帯型GPS(Geko201, GARMIN社製)である。このGPSの外形は高さ9.9cm、幅4.8cm、厚さ2.4cmであり、質量は96gである。GPSの電源として単四電池2本を用い、その寿命は約12時間である。位置情報の記録可能なデータ数は10,000個であり、データ取得間隔は最小1sである。このGPSにおける位置計測精度は、取扱説明書によると、5~15mとな

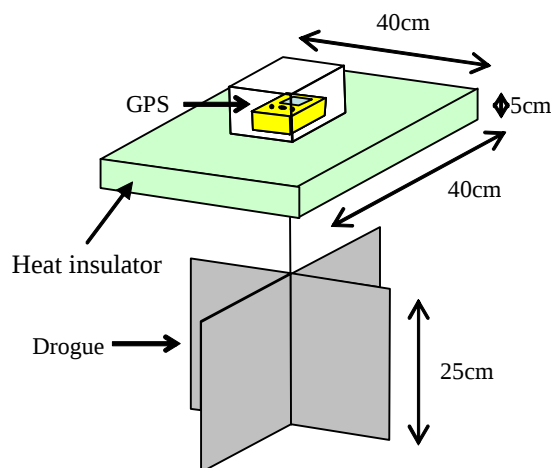


図 - 1 GPS フロートの概略

っているが、これに関して検討した結果を後述する。

本観測で用いる GPS フロートは、図 - 1 に示しているように、水表面に浮かぶ断熱材、その断熱材の上に携帯型 GPS を格納しているプラスチックケース、河川流に追従するための抵抗体（ドログ）より構成されている。2 枚の塩ビ板（厚さ 2mm）からなる抵抗体と断熱材をロープでつなぎ、ロープの長さを調節することで、抵抗体の設置水深を変化させる。本論文では、観測日において江戸川の水位が低かったことを考慮して、抵抗体と断熱材の間隔を 20cm とし、ここでは主として河川における表層流を対象としたラグランジュ的観測となっている。本論文では、このような GPS フロートを 11 台作製し、現地河川にて放流した。

なお、図 - 1 のようなフロート形状にする場合、水表面上にあるプラスチックケースが空気抵抗となり、GPS フロートの挙動が風応力の影響を受けることが懸念される。そこで、実際に河川流中において、プラスチックケースがある場合と無い場合の GPS フロートの挙動の変化を調べた。その結果、後述する観測で生じていた風速 2m/s 程度の場合には、プラスチックケースの有無による GPS フロート挙動の違いは全く見られず、今回の観測の範囲では、本論文で用いる GPS フロートは風応力の影響を受けていないものと見なされる。

## （２）現地調査の概要

現地観測は、図 - 2 に示すように、埼玉県と千葉県の間を流れる江戸川中流部の 35km ~ 40km 地点を対象として行われた。この付近では、堤間幅は約 400m、低水路幅は約 100m であり、右岸側に高水敷が広がり低水路は左岸寄りに位置している。GPS フロートを用いた観測方法としては、まず、対象サイト内において、スタート地点とゴール地点となる横断面を選定し、スタート地点の横断面全体にわたるように GPS フロートを投入する。

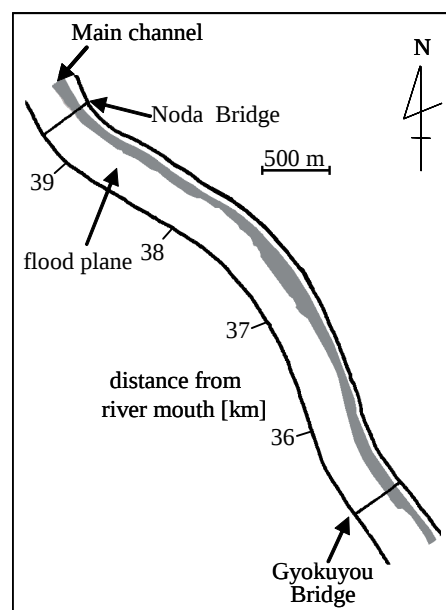


図 - 2 現地観測サイト（黒色と白色部分はそれぞれ低水路、高水敷を示す）

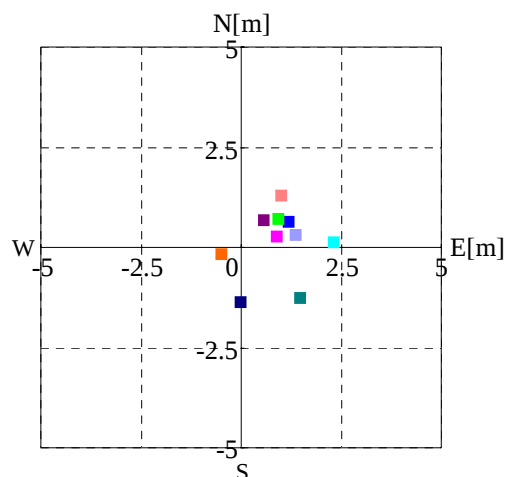


図 - 3 GPS センサーにおける平均位置 (D-GPS による位置データをレファレンスデータとして、このレファレンスデータとの差を表示している)

その後、ゴール地点となる横断面を GPS フロートが通過した後に、GPS フロートを回収する。なお、GPS フロートが流下中に河岸に繁茂する植生や係留船などに引っかかり止ってしまった場合には、順次回収していく。

調査日は 2004 年 8 月 12 日と 18 日である。8 月 12 日には、スタート・ゴール地点となる横断面をそれぞれ 39.5km、35.0km と設定し、放流開始時刻は 15:48 である。8 月 18 日には、スタート地点となる横断面として 36.0km、38.0km、39.5km の三ヶ所を選定し、ゴール地点は、各々スタート地点より 1km 下流側の横断面とした。GPS フロートの放流開始時刻は、3 つのスタート地点（36.0km、38.0km、39.5km）に関して、それぞれ 12:57、17:30、16:15 である。これらの観測日における野田観測

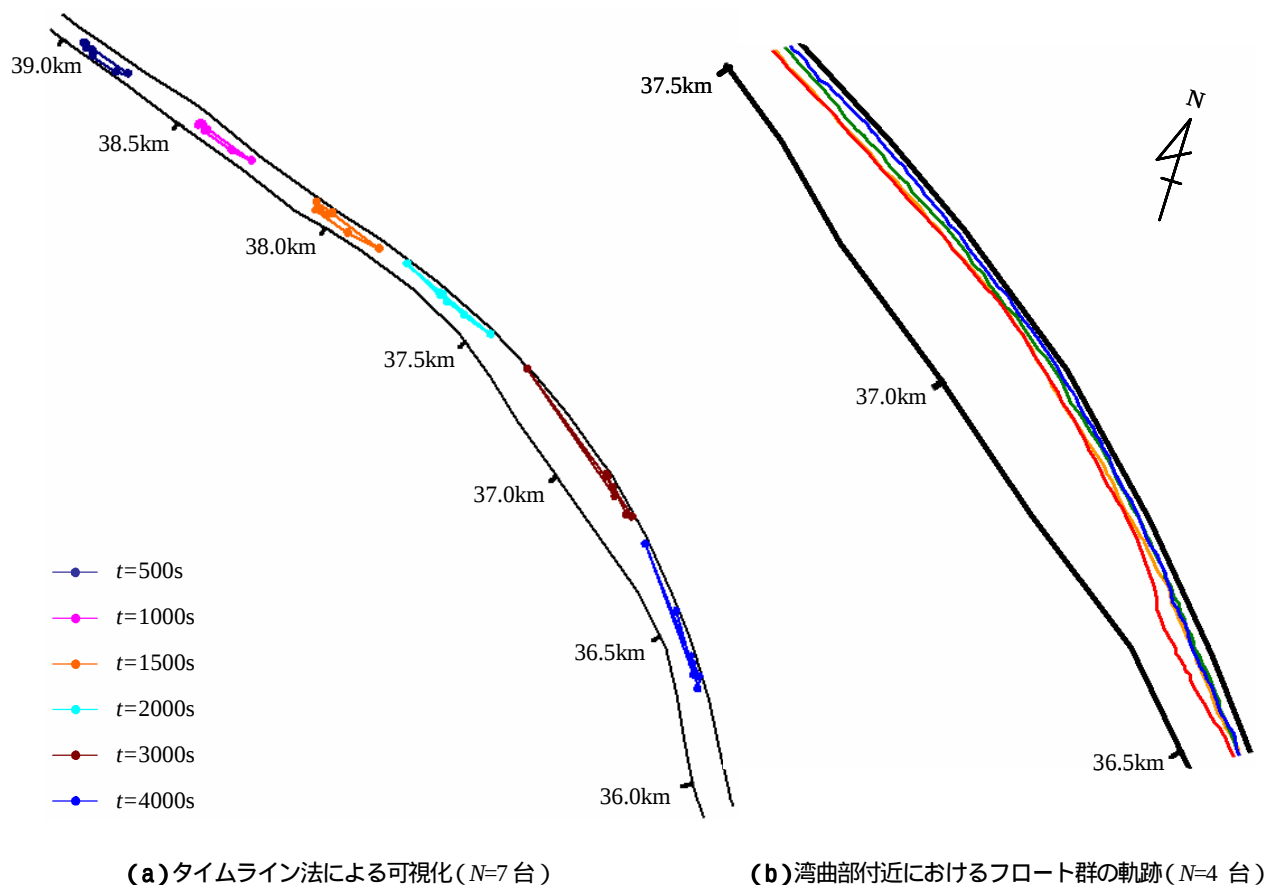


図 - 4 8月12日のGPSフロートのラグランジュ的挙動（東西方向を南北方向の1.2倍とする）

所（河口より39km地点）での水位は年平均水位よりも低く、GPSフロート群は低水路のみを流下していた。なお、GPSデータの取得間隔は20秒としている。

### （3）GPSの位置計測精度の検証

本調査で用いるGPSフロートの位置計測精度について検討する。まず、障害物の影響のない同一地点（東京理科大学野田校舎屋上）に10台のGPSを長時間静置させて、そのときの位置の平均値と標準偏差を算出した。GPSと同じ地点において、D-GPS（GBX-PRO, csi wireless社製、計測精度1m）を用いて位置計測を行い、そのデータをレファレンスデータとして、各GPSのデータからD-GPSによるデータの差を図-3に示す。図中では、GPSセンサーの位置データの平均値を■でプロットしている。これより、各GPSにおける計測誤差の平均値は1.2~2.7m、その標準偏差は0.9~2.3mとなっている。次に、GPSを一定速度（0.5m/s）で移動させて、上と同様に位置計測精度を検証した。その結果、この場合の計測誤差の平均値は3.2~5.5m、標準偏差は2.2~5.3mとなり、GPSを静置させた場合よりも若干精度が低下している。しかしながら、静置・移動させたときのGPSの計測誤差は、取扱説明書に記載されている値と同程度か若干精度が良いことが分かる。このように5m程度の計測誤差は、江戸川

のように川幅が数百m規模の大河川においては大きな問題とはならず、GPSフロートは大河川におけるラグランジュ的観測に対して十分適用し得るものと考えられる。

また、GPSデータは全般的に北東方向に平均位置がずれている。GPSによる位置誤差の要因の一つとして大気中の水蒸気分布が挙げられるが<sup>12)</sup>、今回のようにGPSの位置が近接する場合には、水蒸気分布による誤差がほぼ同一となる。そのため、GPSの平均位置のずれる方向が多くのセンサーで似た傾向となるものと考えられる。

## 3. 観測結果

### （1）GPSフロートの軌跡

現地観測により得られたGPSフロートの挙動を調べるために、8月12日の結果を例として、7台のGPSフロートのラグランジュ的挙動を図-4(a)に示す。ここでは、同時刻のGPSフロートの位置を線で結んで表示しており、これは、一種のタイムライン法<sup>13)</sup>と同じ流れの可視化方法と見なせる。図中の実線は低水路側岸部を、丸印は各時間におけるGPSフロートの位置を表している。なお、放流した11台のGPSフロートのうち、ゴール地点付近まで到達した7台のみの結果を図中に掲載している。この図より、GPSフロート群の通過位置に着目

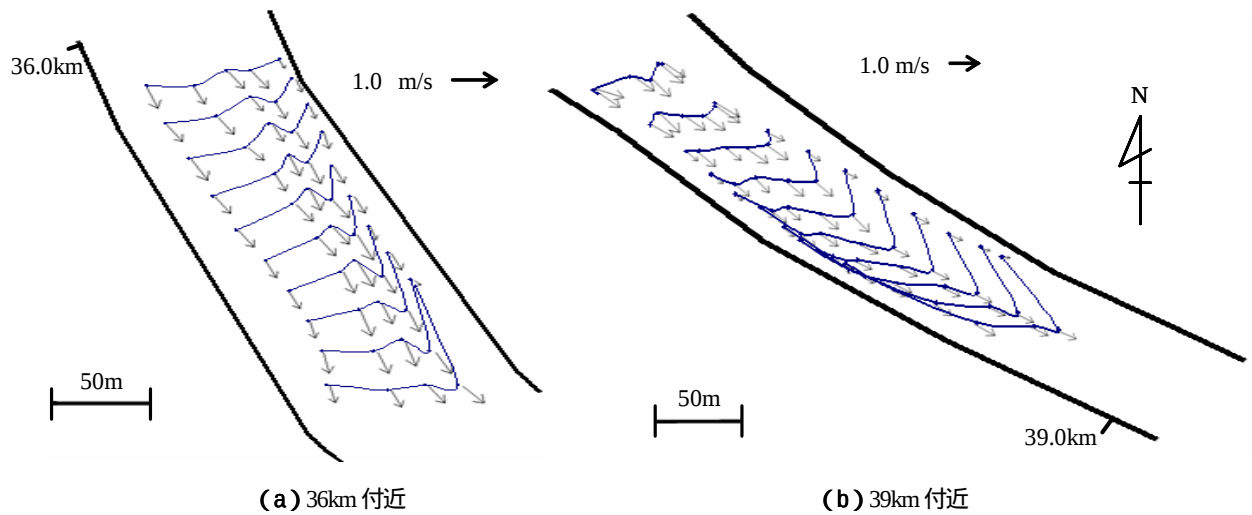


図 - 5 同時放流された GPS フロートによる平面流速ベクトル (8月 18 日)

すると、スタート断面 (39.5km) から 38.0km までは GPS フロート群は低水路のほぼ中央を流下しているが、それより下流の 38.0km から 36.0km の湾曲部では、低水路の左岸側に近いところを流下している。また、フロート群の縦断方向の広がり方に注目すると、スタートから  $t=2000s$  後 (およそ 37.7km 付近) までフロート群が徐々に広がり、その後の  $t=3000s$  では、その広がりが急激に大きくなる。さらに、その後には、フロート群の広がりは減少しているようにも見受けられる ( $t=4000s$ )。このようなフロート群の分散の様子について、3.(3)において詳述する。

また、フロート群の横断位置や分散の様子が大きく変化している湾曲部 (36.5 ~ 37.5km) における GPS フロートの軌跡を図 - 4 (b) に示す。ここでは、4 台のフロートの軌跡が表示されている。これを見ると、フロート群は 37.0km 付近で左岸側に集中し、ほぼ同じルートを移動している。これは、この 37km 付近の湾曲部においては、表層では外岸側 (左岸側)、底層では内岸側 (右岸側) へ向かう二次流が生じていたため、表層を浮遊する GPS フロートが左岸側に流されたものと考えられる。このように、GPS フロートは、河川横断面内の二次流構造に起因する河川水の詳細なラグランジュ的挙動も追跡することが可能なモニタリング手法であることが示された。

## (2) 流れの平面構造

GPS フロートにより得られた流れの平面構造の一例として、8月 18 日における 36km 付近と 39km 付近における表層流速ベクトルの平面分布を図 - 5 に示す。ここでも、タイムライン法を用いて、同時刻のフロート位置を線で結んで可視化している。図中においては、36km 付近では 5 台、39km 付近では 6 台の GPS フロートを対象として、その位置データを 40s 間隔で記載しており、ま

た、流速ベクトルの算出には 20s 間隔の位置データを用いている。まず、36km 付近に関しては、横断面内での最大流速位置を見ると、放流直後ではやや左岸よりであったのが、その後中央よりに移動していること、また、時間とともにフロート群が全体的に右岸側へ集まっていることが分かる。一方、39km 付近に関しては、横断面内の流速ピークの位置はほぼ中央に存在しているが、その中央部の流向は両岸向きに揺動している。このように、GPS フロートにより得られた流速ベクトルや一種のタイムライン法としての可視化手法は、平面的な流れの様子を見るのに適していることが分かる。

## (3) 表層浮遊物の分散特性

複数の GPS フロートデータから、河川流場における分散特性を検討することが可能となる。本論文では、フロートが表層を漂うので、得られる結果は表層浮遊物の分散特性を表す。この表層浮遊物とは、河川水と完全混合せずに表層を浮遊する油などが想定される。この分散を算出する際に、まず、対象となる  $N$  台のフロート群の位置  $x_i, y_i$  ( $x$ : 東西方向位置,  $y$ : 南北方向位置,  $i=1 \sim N$ ) に対する平均値、すなわち重心位置  $\bar{x}, \bar{y}$  を求める。そのフロート群の重心位置 ( $\bar{x}, \bar{y}$ ) に対する各フロートの距離の 2 次モーメント (= 分散)  $\sigma_G^2$  を次式により算出する。

$$\sigma_G^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left\{ (x_i - \bar{x})^2 + (y_i - \bar{y})^2 \right\} \quad (1)$$

上記の手順により算出された分散  $\sigma_G^2$  の時間変化を図 - 6 に示す。ここでは、図 - 4 (a) と同じ 8月 12 日におけるフロート 7 台に対する結果である。また、図中の横軸  $t$  はフロートを放流してから時間である。これを見ると、分散  $\sigma_G^2$  は時間的に一定とならず、ダイナミックに増減している。具体的には、放流開始直後から 1800s (期間) までは分散  $\sigma_G^2$  はほぼ単調的に増加し、 $t=1800s$

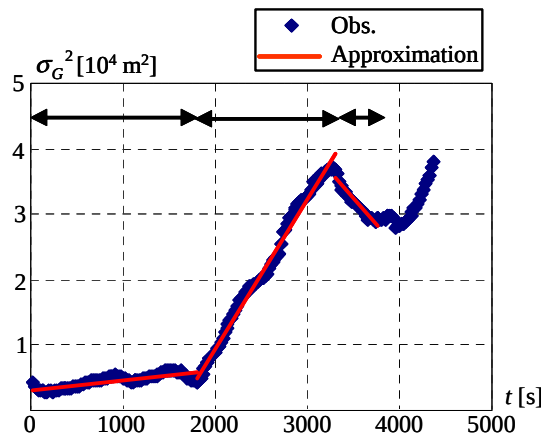


図 - 6 現地観測における分散  $\sigma_G^2$  の時間変化  
(8月12日,  $N=7$  台)

表 - 1 分散係数  $K$  に関する観測値と計算値

| Obs.   |            | Cal.   |            |
|--------|------------|--------|------------|
| period | $K[m^2/s]$ | period | $K[m^2/s]$ |
| ①      | 1.53       | ①'     | 1.74       |
| ②      | 22.95      | ②'     | 21.33      |
| ③      | -15.97     | ③'     | -30.21     |

を過ぎると(期間)分散  $\sigma_G^2$  が期間よりも大きく増加している。さらに,  $t=3300s$  付近において分散は極大値となり, その後の期間では減少して  $t=4000s$  あたりで極小値となり, その後再び増加に転じる。このように, 分散は単調増加するのみではなく, 減少もしている。この期間, , における観測値に対して近似直線を当てはめると, 表 - 1 に示すように各々の傾き  $K$  は, 1.53, 23.0,  $-16.0m^2/s$  となっている。この傾き  $K$  は分散の時間変化率であり, 分散係数に相当している( $K = d\sigma_G^2/dt$ )。このように, この流れ場はほぼ定常流場と見なせるにも関わらず, 分散係数は時間的に変化しており, また「負の分散係数」が現れていることが分かる。

自然河川における分散係数に関する既存の研究によると<sup>14)</sup>, 様々な観測結果に基づく分散係数  $K$  は, 川幅  $W$  と摩擦速度  $U_*$  を用いて, 以下のように与えられる。

$$2 < \frac{K}{WU_*} < 50 \quad (2)$$

本論文で対象とした観測サイトと期間においては, おおよそ  $W=100m$ ,  $U_*=0.05m/s$  となるので, 式(2)より, 分散係数  $K$  の範囲は次のようになる。

$$10m^2/s < K < 250m^2/s \quad (3)$$

この結果と表 - 1 の観測結果を比べると, 期間における分散係数  $K$  は, フロート放流直後のデータを含んでおり initial zone の影響を受けているため, 式(3)よりも小さい値となっている。一方, 期間における  $K$  は, 式(3)と同程度の分散係数となっている。さらに, 期間にお

ける負の分散係数の絶対値も, 式(3)の範囲に含まれており, 正の分散現象と同程度の大きさの「負の分散現象」が期間で生じていたことが分かる。

本観測では, GPS フロートは常に表層を漂っているで, ここで得られた分散特性は, 既存の調査結果と異なり, 表層浮遊物に対する分散係数となる。この「負の分散現象」が生じたときの GPS フロート群の位置を調べてみると  $t=3300s$  では 37.4km 付近,  $t=4000s$  では 37.0km 付近を流下しており, 図 - 2 より, この区間は河道湾曲部に相当している。この湾曲部では, 二次流の形成に伴い外岸側に収束域が形成されるため, 表層浮遊物の負の分散現象が生じたものと推察される。また, 図 - 2 より, 37.5km 付近と 36.5km 付近では低水路幅が急激に増減していることから, この川幅変化により流体要素が伸縮して, 分散係数が大きく変化したものと思われる。なお, この分散特性に関しては, 分散を求めるときに使用した GPS フロートの台数を変えると, 分散係数の結果は変化してしまう。そのため, 河川流場における表層浮遊物の分散特性についてより詳細に検討する必要がある。そこで次章では, 三次元流動シミュレーションを実施する。

#### 4. 三次元河川流シミュレーションに基づく表層浮遊物の分散特性の検討

##### (1) 計算方法・条件

数値シミュレーションにより表層浮遊物の分散特性を検討するため, 著者らが最近構築している三次元河川流モデル<sup>15)</sup>を用いて流動シミュレーションを行う。このモデルでは, 水平座標系として直交曲線座標系, 鉛直座標系として  $\sigma$  座標系をそれぞれ採用しており, 河道の縦断形状・横断形状をほぼ忠実に再現し得る座標系を選択している。また, 乱流モデルとしては, 最もシンプルな 0 方程式モデルを用いている。なお, 本流動モデルを用いて江戸川のほぼ全区間を対象とした三次元洪水流シミュレーションを行った結果, 水位や流量の時間変化, 主流方向流速の横断・鉛直分布に関して, 計算結果と観測結果は概ね良好に一致することが確認されている<sup>15)</sup>。

計算領域は, 観測領域と同じ江戸川中流部である河口から 35.0km ~ 39.5km の 4.5km とする。GPS フロート調査の河川流況の再現計算を行うために, 観測が行われた 2004 年 8 月 12 日における野田観測所の水位を上流端条件として与える。また, 流れが定常状態となった後に, 計算領域上流端より中立粒子を放流し, その中立粒子の追跡計算を実施する。ここでは, 中立粒子の初期高さを水面に接する表層第一層とし, 鉛直運動は考慮せずに, 表層における水平方向流速のみにより中立粒子は移流することとする。また, この粒子追跡では乱流拡散を考慮せず, 計算結果から表層浮遊物の分散特性を検討する。

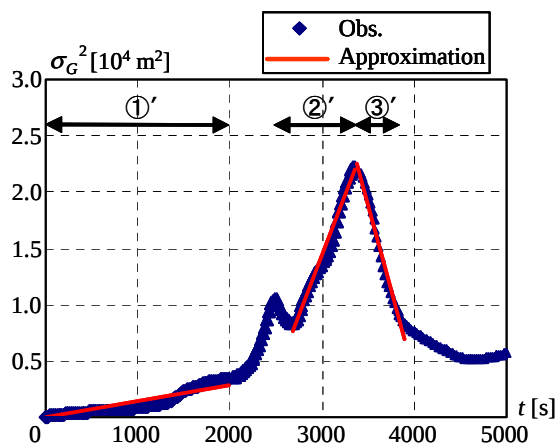


図 - 7 分散の時間変化に関する計算結果

## (2) 計算結果

図 - 7 は粒子追跡計算の結果から算出された分散  $\sigma_G^2$  の時間変化を示す。図中の横軸は、粒子放流開始からの経過時間である。これを見ると、分散は、 $t = 3300s$  付近で極大値となり、それを挟んで大きく増加・減少している。図中の期間 ①' と ②' では、分散は増加するものの、その増加率は期間 ②' の方が顕著である。また、分散が極大値となった後の期間 ③' では、分散は減少しており、計算結果においても観測値と同様な「負の分散現象」が生じている。この分散が減少する期間 ③' では、大部分の中立粒子は湾曲部（37km 付近）を通過しており、計算結果における分散  $\sigma_G^2$  の減少も、湾曲部に形成された二次流や流体要素の伸縮に起因しているものと考えられる。観測値と同様に、図 - 7 中の期間 ①'、②'、③' における観測値に対して近似直線を適用したところ、その直線の傾きは、表 - 1 に示すように、期間 ①'、②'、③' では各々  $1.74$ 、 $21.3$ 、 $-30.2m^2/s$  となっている。このように、分散係数  $K$  が時間的に大きく変化することや負の分散係数が現れることなど、観測結果と類似していることが分かる。以上より、三次元数値シミュレーション結果からも、横断面内の二次流や急激な川幅変化に伴って表層浮遊物の分散が大きく増減することが明らかとなり、観測結果と類似する分散特性が生じることが示された。

## 5. おわりに

本研究では、河川流に関するラグランジュ的観測の一つとして、多数の GPS フロートを用いた河川流調査を江戸川中流部において行い、以下の結論が得られた。

- 1) 多数の GPS フロートを用いることにより、河川水のラグランジュ的挙動や平面的な流速パターンが捉えられ、GPS フロートを用いた河川流モニタリングが十分有用であることが示された。
- 2) 水表面付近を流れる GPS フロート群の位置データから表層浮遊物の分散及び分散係数を算出したところ、

ほぼ定常状態の河川流場において、表層浮遊物の分散係数が大きく変化することや「負の分散現象」が生じていることが示された。類似した傾向は、三次元河川流シミュレーションにおける中立粒子追跡計算の結果からも確認された。これらの結果から、断面内の二次流構造等に起因して、表層浮遊物の負の分散現象が生じていることが示唆された。

謝辞：本論文において数値シミュレーションを実施する際には、アジア航測・加藤祐一氏（元東京理科大学大学院理工学研究科土木工学専攻修士課程在学）には多大なる御助力を頂いた。ここに記して謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 土木学会：水理公式集 [平成 11 年度版]、丸善、pp.75-86、1999。
- 2) 山口高志：洪水流速および流量観測 - その 1 -、水文・水資源学会誌、Vol.15、No.6、pp.625-635、2002。
- 3) 木下良作：無人ラジコンボートによる洪水流観測、ACV の研究、Vol.28、No.1、1998。
- 4) 佐藤慶太、二瓶泰雄、木水啓、飯田裕介：洪水流観測への高解像度超音波ドップラー流速分布計の適用 - 江戸川を例にして -、水工学論文集、Vol.48、pp.763-768、2004。
- 5) 岡田将治、森彰彦、海野修司、昆敏之、山田正：鶴見川感潮域における H-ADCP を用いた流量観測、河川技術論文集、Vol.11、pp.243-248、2005。
- 6) (社)中部建設協会：絵で見る水文観測、水谷印刷、pp.175-199、2001。
- 7) 宇民正、上野鉄男：写真画像処理による洪水流解析、土木学会論文集、No.503 / -29、pp.1-17、1994。
- 8) 藤田一郎、河村三郎：ビデオ画像解析による河川表面流計測の試み、水工学論文集、Vol.38、pp.733-738、1994。
- 9) 栗山善昭：沿岸域における潮流・海浜流観測、環境圏の新しい海岸工学（榎木亨 監修）、フジテクノシステム、pp.496-500、1999。
- 10) 瀬岡和夫、波利井佐紀、三井順、田村仁、花田岳、Enrico Paringit、二瓶泰雄、藤井智史、佐藤健治、松岡建志、鹿熊信一郎、池間健晴、岩尾研二、高橋孝昭：小型漂流ブイ観測および幼生定着実験によるリーフ間広域サンゴ幼生供給過程の解明、海岸工学論文集、Vol.49、No.1、pp.366-370、2002。
- 11) 西隆一郎、萩尾和央、山口博、岩根信也、杉尾毅：水難事故予防のための離岸流調査に関する基礎的研究、海岸工学論文集、Vol.50、No.1、pp.156-160、2003。
- 12) 坂井丈泰：GPS 技術入門、東京電機大学出版局、pp.1-212、2003。
- 13) 浅沼強編：流れの可視化ハンドブック、朝倉書店、pp.214-218、1977。
- 14) Chanson, H.: Environmental hydraulics of open channel flows, ELSEVIER, pp.99-116、2004。
- 15) 二瓶泰雄、加藤祐一、佐藤慶太：広域河川流計算のための三次元河川流モデルの開発と洪水流計算への応用、土木学会論文集、No.803 / -73、pp.115-131、2005。

(2005.9.30 受付)