

実験と計測に基づく密度流拡散装置の効果に関する考察

渡辺雅二¹ 山磨敏夫²

Study on Effects of the Density Current Generator by Experiment and Measurement

Masaji Watanabe¹, Toshio Yamatogi²

(Received December 2, 2003)

The density current generator (Manufacturer: Nakashima Propeller Co., Ltd., Patent owner: Hitachi Metals, Ltd.) is designed to generate vertical circulation over a wide water area harnessing the density current effect. We present some experimental results that we obtained using a float equipped with a GPS unit to study water flows generated by a density current generator unit set in S-Reservoir in Okayama Prefecture. We also present some measured results concerning the water temperature around the unit. We discuss its effects observing the experimental results and the measured results.

Keywords: density current, stratification, water environment

1 結論

生産消費拡大あるいは開発や森林の伐採等を原因とする水質の低下が、河川、湖沼、沿岸水域では一般に顕著なものとなっている。特に、極度の水質悪化を示す夏季のアオコ発生事例の頻発は、貯水池の水質汚濁の深刻化を表し、早急な改善に向けての積極的な施策を要する問題となっていることを示している。湖、貯水池、沿岸水域では、夏季の温度成層は鉛直方向の運動を阻害し、低層における極度の貧酸素、富栄養状態の原因となる。密度流拡散装置 (Density Current Generator (DCG), 設計・製作・設置: ナカシマプロペラ, 特許権者: 日立金属) は、密度流の効果を利用して広範囲に及ぶ鉛直循環を誘発することにより、水質改善を実現する装置として開発された。密度流拡散装置は、水面付近に一つ、下部に一つ、合計二つの取水口を設けている。水面付近の取水口から供給される表層の高温低密度の水と、水底付近に設置された取水口から供給される低層の低温高密度の水を電動駆動インペラで混合させ、水面下4

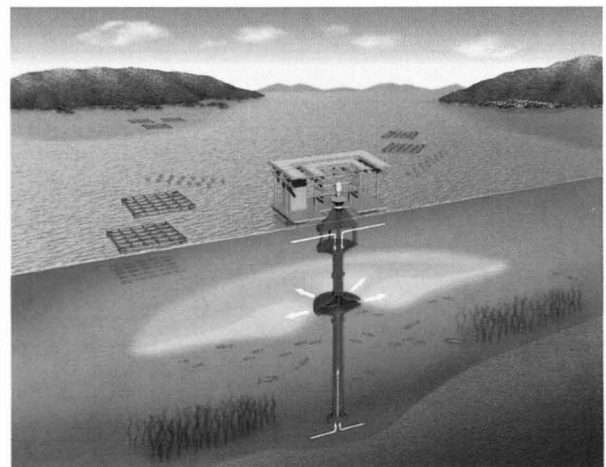


図 1: 密度流拡散装置の概念図。

m に設けられた吐出口から吐出させる。この装置は円筒状の装置であり、水深にあわせて低層取水口を設定できるように伸縮可能となっている。本論文で紹介する装置は水深約 20 m から 40m まで伸縮可能なものである。密度流拡散装置の概念図を図 1 に示す。密度流拡散装置は、特にアオコの発生等水質の悪化が顕著な夏季に

¹岡山大学 環境理工学部 環境数理学科 (〒 700-8530 岡山市津島中三丁目 1 番 1 号)

²ナカシマプロペラ株式会社 技術本部開発グループ (〒 700-8691 岡山市上道北方 688-1)



図 2: S 貯水池の密度流拡散装置と実験中の GPS-float (2003 年 9 月 5 日).

密度流の特質を利用して効果的に機能する。すなわち、中間層に吐出された低層の低温高密度水と表層の高温低密度水の混合水は、密度流効果により広範囲に供給され、その結果広範囲の鉛直混合が励起させる。その吐出量は、一日当たり 300,000 立方メートルに及ぶ。

現在密度流拡散装置は、岡山県の S 貯水池に一台設置されている。湖水交換のメカニズムは流速と水温からある程度解明できる (岩佐 1990)。本論文では、S 貯水池に設置された密度流拡散装置周辺で行なった流況実験と水温に関する計測結果に基づき、その機能について考察する。流況実験は、全地球測位システム (GPS) を装備したフロート (GPS-float) を用いて行った。S 貯水池に設置された密度流拡散装置と実験中の GPS-float の写真を図 2 に示す。この GPS-float を用いた実験の結果を提示し、密度流の運動をある程度把握できたことを示す。特に、水深 4 m 前後の中間層で、密度流拡散装置を中心とする、少なくとも 0.005 m/s から 0.015 m/s の速度をもつ放射状の流れが形成されていたことを示す。また、その流れは、密度流拡散装置を中心として、少なくとも半径 100 m の水域をカバーしたことを示す。密度流拡散装置周辺では、GPS と水質モニターを用いて行った計測も実施した。ここでは、温度に関する計測結果を提示し、密度流拡散装置の効果が及ぶ範囲内では、鉛直方向の水温分布が、水深 1 m から 5 m 前後までほぼ一様になっていることを示す。これらの実験結果と計測結果から密度流拡散装置による密度流の形成状況について考察する。特に、密度流拡散装置の効果として、低層水と表層水の混合水が広範囲に拡散していることを示す。

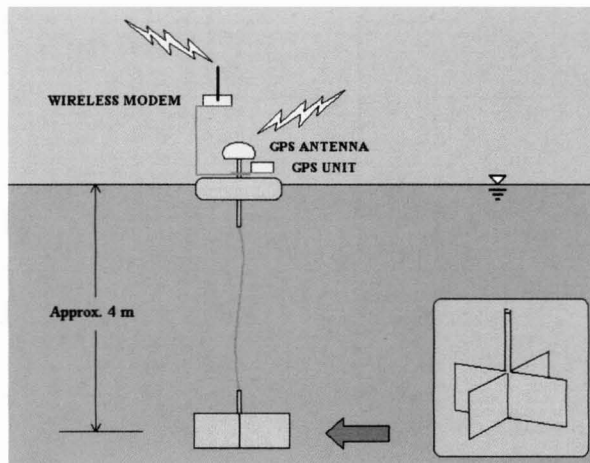


図 3: GPS-float の概念図.

2 GPS-float による流況実験

フロートに GPS ユニートを搭載した GPS-float は、十字に組み合わされた二枚の抵抗板に受ける流体抵抗を駆動力として水面を移動する。流れの影響で水面を移動する間、搭載された GPS ユニートによって得られる測位データは無線モデムによって送信される。これまでも GPS-float を用いた実験は、締切堤防のゲートを開放したときに児島湖に生じる非定常流を対象として行なわれた (Watanabe 1999, 2000, 2002 (1), (2), Watanabe and Kunisada 2001, Watanabe and Numaguchi 2003 (1), (2)). これまでの実験では抵抗板は、フロート本体にアームで固定されていたが、S 貯水池の実験では児島湖よりも深い位置での流れを対象とするため、フロート本体からワイヤーで係留した。特に、抵抗板の位置を密度流拡散装置の吐出口にあわせて水面下約 4 m になるようにワイヤーの長さを設定した。GPS-float の概念図を図 3 に示す。GPS-float から送信されたデータは、受信機をとおしてコンピュータに収録される。データ受信 - 収録システムの概念図を図 4 に示す。

2003 年 8 月 22 日, 8 月 29 日, 9 月 5 日に密度流拡散装置周辺で行なった実験で得られた GPS-float の軌跡を図 5 から図 9 に示す。図 9 は図 8 に示した GPS-float の軌跡部分の拡大図である。また、密度流拡散装置の位置と、更に、実験開始からの経過時間を 5 分間隔で、時点での GPS-float 位置の近くに示した。x 軸の正の方向は東, y 軸の正の方向は北である。図 5 から図 9 は、GPS-float が 0.005 m/s から 0.015 m/s の速度で密度流拡散装置から遠ざかって行ったことを示している。これは、水深 4 m 前後の高温低密度層と低温高密度層の中間層では、密度流拡散装置を中心として、少なくとも 0.005 m/s から 0.015 m/s の速度をもつ放

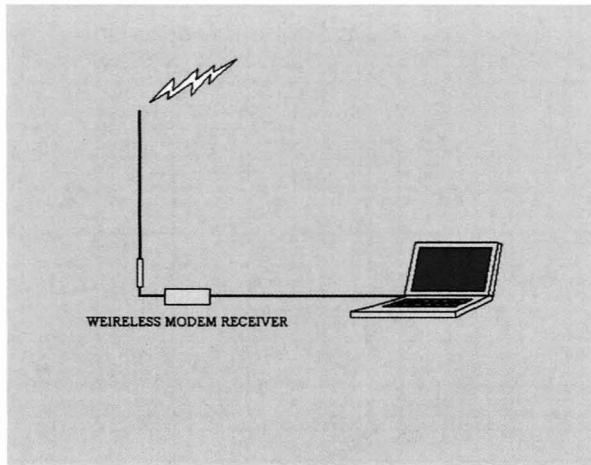


図 4: データ受信 - 収録システムの概念図.

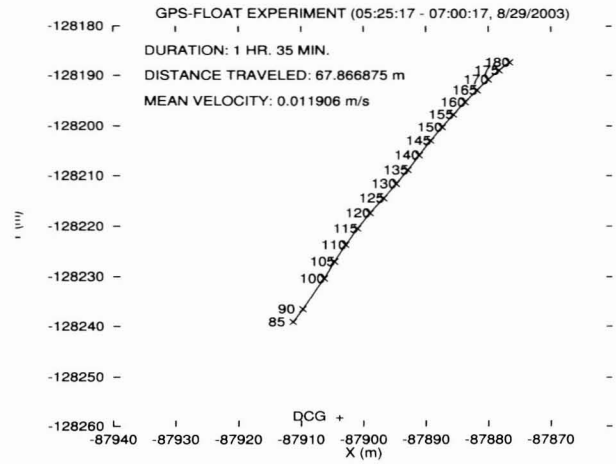


図 7: GPS-float の軌跡Ⅲ.

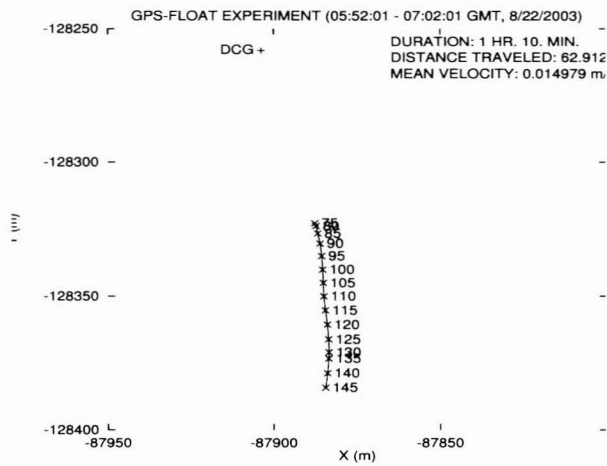


図 5: GPS-float の軌跡 I.

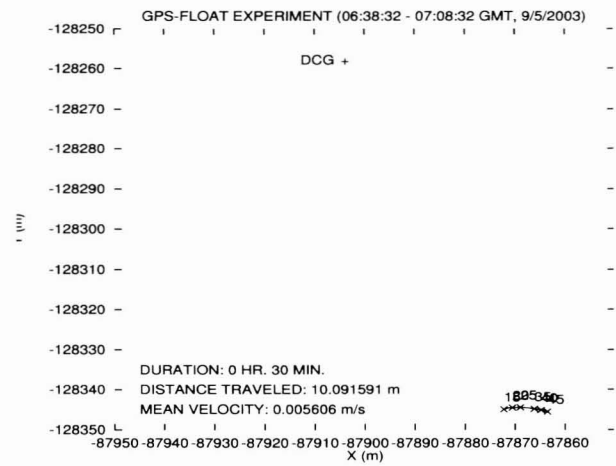


図 8: GPS-float の軌跡Ⅳ.

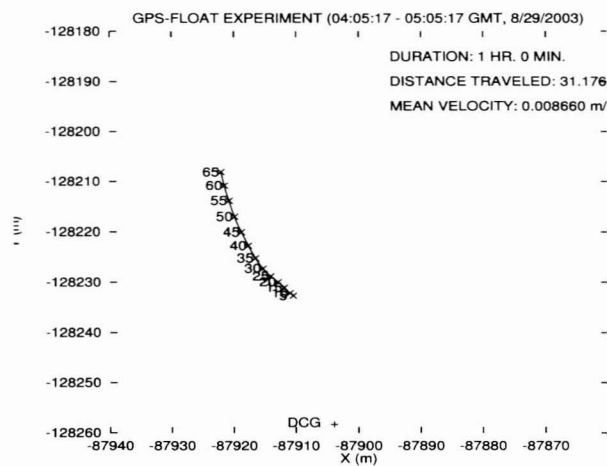


図 6: GPS-float の軌跡Ⅱ.

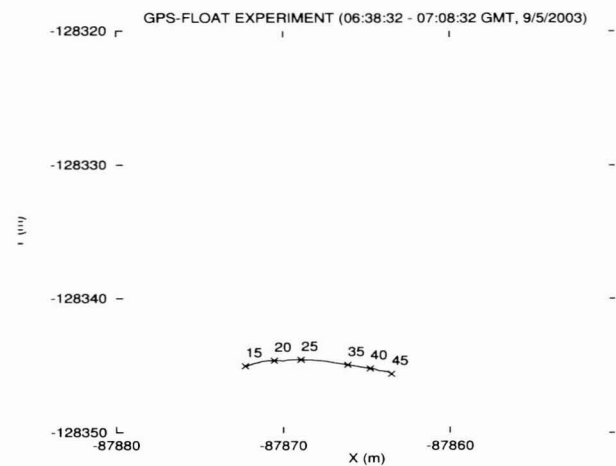


図 9: GPS-float の軌跡Ⅴ.

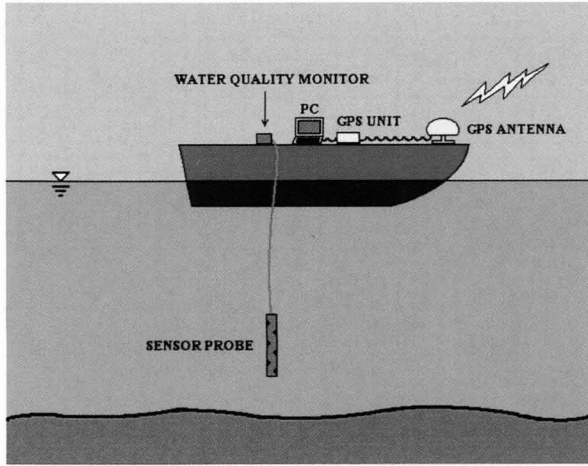


図 10: 水質計測システムのご概念図.

射状の流れが形成されていたことを示している。また、その流れは、計測時間内において密度流拡散装置から少なくとも 100 m 付近までは達していたことを示している。この結果は、密度流拡散装置から吐出された中密度水が、低密度層と高密度層の間を選択したことを示している。これまでは、GPS-float による実験は 0.01 m/s 以上の流れを対象として行なってきたが、S-貯水池の実験では 0.005 m/s から 0.015 m/s の密度流という微妙な中間層における水の運動を GPS-float を用いることによって捉えることができ、この実験が水環境における比較的繊細な流れに対しても有効であることを示すことができた。

3 GPS と水質モニターによる温度計測

GPS と水質モニターを用いた水質計測を、密度流拡散装置周辺で行った。ここで用いた計測システムのご概念図を図 10 に示す。この水質計測システムを用いて計測した水温の鉛直分布状況を示す。この水質計測システムによる計測で得られた水温の鉛直分布に関する 9 箇所での計測結果を示す。密度流拡散装置から南方 50m 程度離れた箇所にスカート長さ約 5m の仕切フェンスが設置されており、表層約 5m 水深で密度流拡散装置の設置している内部と外部が仕切られている。ここでは、仕切フェンスより外部で装置から 300m 以上離れた計測点 1,2,3 で得られた結果と装置の設置されている内部 100m 以内の計測点 4-9 で得られた結果に分けて提示する。密度流拡散装置と 3 箇所の計測点 1, 2, 3 の (平均) 相対位置を図 11, また 6 箇所の計測点 4-9 の相対位置を図 13 に示す。図 11 と図 13 には密度流拡散装置と各計測点との (平均) 距離も示した。図 11 と図 13 に示す計測点で計測された鉛直方向の水温分布を、それぞれ

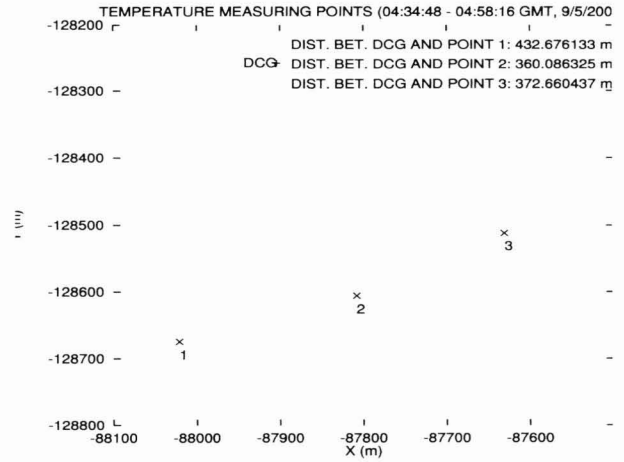


図 11: 密度流拡散装置の位置と計測点 1-3.

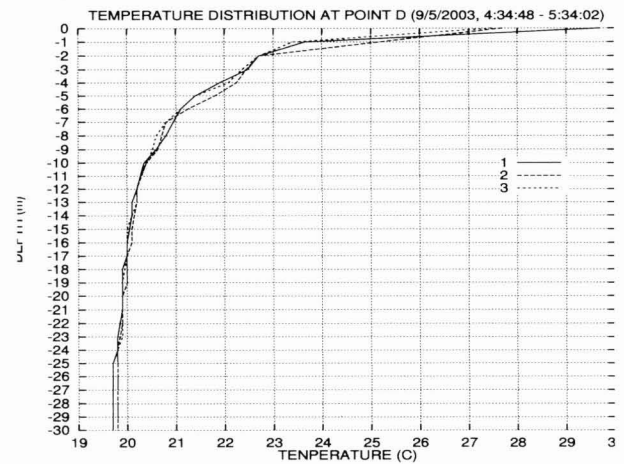


図 12: 計測点 1-3 での鉛直方向温度分布.

図 12 と図 14 に示す。図 12 に示した密度流拡散装置から 300 m 以上離れた計測点での鉛直方向の温度分布と図 14 に示した密度流拡散装置から 100 m 以内の計測点における鉛直方向の温度分布は、水深 8 m から水深 30 m の範囲では本質的な相違はない。しかし、水深 8 m 以下の範囲では、両者の間に相違点が認められ、特に水深 1 m から水深 6 m の範囲で顕著な違いが現れている。図 12 に示した 3 つの温度分布は、どれも水深 1 m から水深 6 m の範囲では、温度が水深にほぼ比例して減少する。一方、図 14 に示す 6 つの温度分布は、水深 1 m から水深 5 m までの温度の減少は、図 12 の三つの場合に比較して小さく、ほぼ 1°C 以内である。

水深 5m までの変化は、仕切フェンスによる影響で装置から吐出された混合水 (密度流) はフェンス内に溜まり、フェンス内・外で表面温度に差が表れたものと考えられる。図 12 と図 14 に示された結果から、密度流拡散装置が設置されている仕切フェンス内部の水域では、吐出

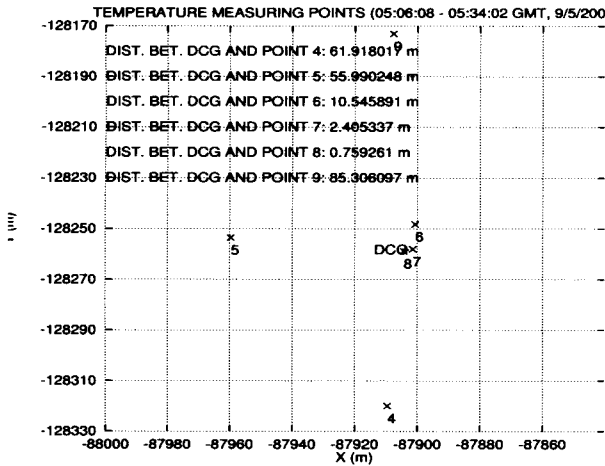


図 13: 密度流拡散装置の位置と計測点 4-9.

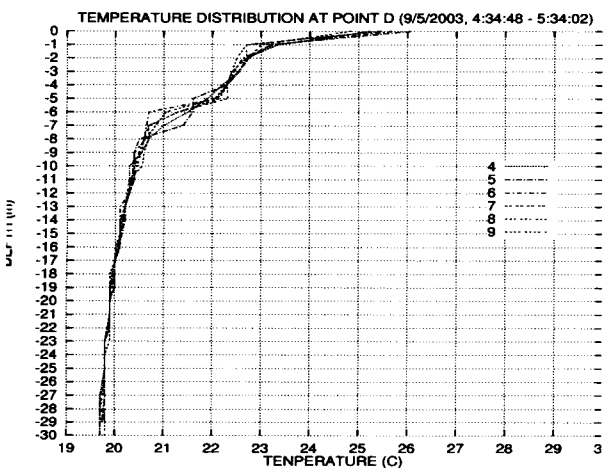


図 14: 計測点 4-9 での鉛直方向温度分布.

口から吐出された低層の低温水と表層の高温水の混合水が、水深 1 m から水深 6 m の範囲で、少なくとも密度流拡散装置から半径 100 m 以内の水域をカバーしていたことがわかる。さらに仕切フェンス内部の装置から 100 m 以上離れた水域の水温データは今回計測していないが、同様の変化が見られるものと推定する。特に、図 7 に示した GPS-float の軌跡は、中密度水の流れが密度流拡散装置から 100 m 以上離れた水域にも十分継続していたことを示している。

4 結論

本論文では、GPS-float による流れの実験方法と GPS と水質モニターを用いた水質計測方法を示し、S-貯水池に設置された密度流拡散装置周辺での実験、計測結果を示した。GPS-float による実験と温度に関する計測結果により、密度流拡散装置が、中密度水は低密度水と高密度水の間層を選択するという性質を利用して効果的に機能することを示すことができた。特に、低層の低温高密度水と表層の高温低密度水が混合された中密度水の流れが、密度流拡散装置から少なくとも半径 100m 以内の水域で、水面下 4 m 前後に形成されていたことが確認できた。また、今回の実験、計測結果からは、次の 2 つの点が明らかになった。

- 1) 密度流拡散装置を稼動することで、水温分布に変化が見られた。特に、装置が設置されている仕切フェンス内部が顕著であり、フェンスのスカート長さに相当する水深について鉛直水温分布がほぼ一様になっていた。
- 2) フェンスの内・外の表層温度は、フェンス内の方が最大で 4℃下がっていた。これはアオコ等の植物プランクトンの発生を抑制する効果が期待される。

流況に関しては流速計を用いる計測も有効な方法である。一方、フロートによる実験は、直接流速を計測することはできないが、S-貯水池の実験で示したように、水塊の移動状況により全体の流況を把握するには適している。特に、GPS-float は、その移動状況を数値データとして記録できるという利点を持っている。また、今回 0.005 m/s~0.015m/s という繊細な流れに対しても GPS-float が有効であることを示すことができ、今後吹送流等他の微妙な流れへの応用が期待できる。

謝辞

本研究の遂行にあたり、実験、計測にご協力いただいた岡山大学大学院自然科学研究科博士前期課程環境システム学専攻と岡山大学環境理工学部の学生諸君に深く感謝の意を表す。

参考文献

- 岩佐義郎/編著 (1990): 湖沼工学, 山海堂.
- Watanabe, M. (1999): A numerical simulation of lake flow and a GPS-float experiment, *The Second International Symposium on Water Environment, Okayama University, Journal of the Faculty of Environmental Science and Technology, Okayama University* (Special Edition), pp. 111-116.
- Watanabe, M. (2000): 渡辺雅二, 湖沼の非定常流解析とその実験について, 工学会講演会概要, 東北学院大学工学部研究報告 第34巻 第2号 (2000), pp. 49-53. On analysis of unsteady flows in lakes and marshes and its experiments, *Lectures supported by Kogakukai, Science and Engineering Reports of Tohokugakuin University*, **34**(2), pp. 49-53. (in Japanese)
- Watanabe, M. and Kunisada, S. (2001): An experimental evaluation of lake flow simulation, *Journal of the Faculty of Environmental Science and Technology, Okayama University* **6**(1), pp. 11-15.
- Watanabe, M. (2002) (1): A numerical analysis and an experimental study of unsteady flow in Kojima Lake, *Journal of the Faculty of Environmental Science and Technology, Okayama University* **7**(1), pp. 39-44.
- Watanabe, M. (2002) (2): Utilization of the global positioning system for analyses of flows in water environments, *The 6TH World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics, PROCEEDINGS Volume V, Computer Science I* (2002), 172-176.
- Watanabe, M. and Numaguchi, S. (2003) (1): An experimental analysis of unsteady flows generated in Kojima Lake, *Journal of the Faculty of Environmental Science and Technology, Okayama University*, **8**(1), pp. 23-26.
- Watanabe, M. and Numaguchi, S. (2003) (2): Introduction of GPS data into computational analysis of flows in the water environment, *GIS & RS in Hydrology, Water Resources and Environment, Volume 1, Chen et al. (eds) (Cyber Proceedings*
- of International Conference of GIS and RS in Hydrology, Water Resources and Environment), 8 pages.