

洪水流の空間的連続観測カプセルの開発

藤田裕一郎・村本 嘉雄・中村 行雄・平川 隆義

DEVELOPMENT OF A CAPSULE FOR SPATIALLY CONTINUOUS OBSERVATIONS OF FLOOD FLOWS

By Yuichiro FUJITA, Yoshio MURAMOTO,
Yukio NAKAMURA and Takayoshi HIRAKAWA

Synopsis

An observation capsule, which measures water depths, velocities, turbidity and temperature, being transported by river currents and radio-controlled for withdrawal, has been developed in order to make clear for spatially continuous characteristics of flood flows. The significance and importance of field observations of river flooding are discussed for the comprehensive river improvement and disaster prevention. A brief review of previous flood observations implies specific and excellent features of the system with the observation capsule. Design and outlines of the capsule are mentioned on its structure, radio control systems and equipment for measurement and data collection. The capsule is made from two fishing leisure boats, and the control system is intelligent by the use of handy micro computers. The observation capsule has been tested several times in the Yasu, the Uji and the Maruyama rivers. Difficulties and some aspects to be improved are pointed out from such field examinations.

1. は し が き

治水, 利水, 生態, 環境, などの全体的な調和を求め、総合的な意味で、河川を現況よりも優れたものにするために、多くの努力が払われている。その努力が意図通りの成果をもたらすようにするためには、河道の現況がどのようにして形成され、変化していくかの把握が基礎になる。このため、実際に生起している流砂や河床変動などの現象を明確にすることを目的として、洪水流に関する水理学的な理論的解析や実験的考察が行なわれ、洪水時の水理現象について多くのことが解明されてきた。

しかし、河川のように、規模が大きくて複雑な現象に対しては、その一部を単純化して進める理論的研究や実験的考察が、実際に説明しているか否かの検証は現段階でも困難な場合が多い。また、これらの成果に基づいて可能となってきた水理学的・河川工学的な高度のシミュレーションが現象を的確に表しているかの判断も難しいといえ、これらの検証や改良・修正には、やはり観測や調査の成果が最大の情報を与えるものである。ここに、現象をその場で多面的に明らかにしていこうとする観測や調査の必要性があり、逆に、観測は複雑さやスケールの大きさのために、非常な困難に遭遇する場合が多い。

とくに、河床や河岸が大きく変動するのは洪水時であり、実際の生活にも災害という面で大きく関わってくるので、観測は洪水の期間に実施されねばならない場合が普通である。したがって、観測実施上の最大の問題点としては、観測時の悪天候、広い観測対象範囲、ときには非常な高速となる流れの影響、場所

によっては大量の流木などの流下物の存在が挙げられよう。流れの存在は、機器を固定した観測の遂行を困難にし、流下物はそれを事実上不可能にしてしまうくらい観測にとって厳しい制限を与える。

そこで、現象の詳細は不明でも、過去の経験から対策の立案は十分出来るので、無理に観測を出水時に行う必要はないとの認識も無くはないであろう。けれども、中小河川ばかりではなく、かなり大きな河川でも施工されたばかりの護岸が傾いたり、橋脚に損傷が認められることもあり、また、ある部分に施工された構造物が思わぬ個所に望ましくない影響をもたらすこともある。このように、洪水流、とくにその内部構造に関しては未知な現象が多く、洪水観測を全く無視して河川工事を進めることが出来るほど、現在の河川技術が完成したものであるとは思われない。そのような被災を軽減するためには、洪水流の詳細な内部構造を出水時に積極的に現地で観測し、河川改修工事の設計、施工にとって有益な情報を得るように努力していくべきであって、施工の前後に互って、河床変動などの観測・調査を継続していくことの意義は決して低くない。

また、いかなる河川工事も河道の状態に様々な影響を与えるので、それに先立つ環境影響評価のみならず、事後の河道変化に関する調査も注意深くなされなければならない。その基礎は、やはり通常の河川の観測調査であり、現存構造物周辺の洪水流況の観測である。

以上のように、洪水流の実態の解明は、急激あるいは緩慢に地形を改変していく自然の作用力を明確にして、合理的な長期的・短期的治水計画や環境計画を立案して、沖積地に展開・集積されている人間の生命と財産を守る上で重要なことである。その基礎として、建設省のような現業機関では、平水時、洪水時を通じて、水位・流量の観測を継続しており、これらの通常の測定に加えて、洪水時における河床変動と河床形態の変化や土砂や物質の流送機構に直結する観測も、具体的な問題に合わせて行っている。

しかし、それらのほとんどは定点での観測であるために、水理学の最近の発展や河川改修工事の向上のための要請に十分対応していない面もあると思われる。すなわち、洪水時における河床や河道の変動は、ある空間的広がりを持つ場の局所的变化に応じて生じるものであるもので、その機構の解明や結果としての災害の防止・軽減にとっては、洪水流の実態を時間的にも空間的にも連続的に把握することが重要である。それ故、これまでの定点を主体とした洪水観測がこうした問題に満足な情報を与える場合は少なかったものと思われる。一方、空間的連続観測はその困難さのために観測例も限られてきた。

次章では、はじめに、従来の洪水流観測の全般的特徴と空間的連続観測の例を示し、ついで、容易かつ簡便に実施できる観測システムとして、現在開発している観測カプセルの特徴を述べる。第3章では、試作した観測カプセルについて、概要、遠隔操作システム、計測器の特性および測定データの記録・処理の方法を紹介し、第4章では、平水時ではあるが河川において洪水観測カプセルの適用を試みた状況を述べ、その結果から観測上の問題点と今後の改良点について考察する。

2. 洪水観測とカプセルによる空間的連続観測

2.1 従来の洪水観測の特徴

従来の洪水流の観測は、建設省などの通常業務として行われている水位・流量観測をはじめとして、一河川について何点かの観測点を定めて行われている場合がほとんどであり、ときにはある流域を対象として集中的に密度の高い観測が行われることもある。それらの測定項目としては、水位、流量、濁度（浮遊砂）、水温、電導度がよくとられているが、研究のための観測ステーションでは掃流砂の時間的連続観測も行われている。すなわち、流砂量や河床変動の出水時実時間観測のうち、掃流砂の測定は大がかりな観測体制を準備する必要があって、多大の労力と時間を要するにも拘らず、測定精度の満足できる場合は稀であるために、観測は浮遊砂に限定されるようになってきた。しかし、諸外国では、適当な規模の河川を拠点として相当な設備を充実させ、定点の観測を継続させている例がいくつかみられる。これらの観測点

では、種々の工夫による河床高¹⁾や河床波²⁾の測定とともに、Helley-Smith 型などのサンプラーや河床に埋め込んだトラップによる掃流砂測定³⁻⁷⁾あるいは流速・せん断力測定^{8, 9)}が行われている。わが国でも、防災研究所穂高砂防観測所にそのような例¹⁰⁾を見ることができる。

このような定点観測に対して、洪水流の空間的連続観測としては、第一に、木下¹¹⁾によって始められ、現在では現業機関でも行われている航空写真のカメロン効果を利用した表面流況の解析が挙げられる。航空写真の映像は、良好な撮影条件では微細な部分まで記録でき、判読も非常に細かい段階まで可能である。しかし、航空写真によって得られるデータは基本的に洪水流表面の二次元流況であり、しかも時間的に変動する場のある瞬間の姿である。したがって、洪水流の内部構造は、間接的な推定であってやはり直接的な計測が試みられねばならない。

北海道開発局¹²⁾によって大規模で総合的な観測体制の敷かれていた石狩川では、昭和 56 年 8 月の大出水時に、その一環として下流部において長区間の音響計測器による河床波観測¹²⁻¹⁵⁾が行われた。実河川の出水時における観測は極めて少なく、結果として 2 年間の準備期間を持ったこの観測は貴重なものであって、河床波変化の観測結果について多面的な検討が加えられてきている。

また、天塩川や石狩川では融雪出水時における河床形状の変化が木下¹⁶⁾によって明らかにされている。彼は、洪水時の河床形態の変化を橋上から超音波魚群探知機を取り付けた浮体をロープで吊し、それを約 100 m 流下させて測定している。浮体は竹竿を直交させ、四隅を鉄線で結んだものである。木下¹⁷⁾は、さらに、表面浮子を流下させ、濁度測定竿に錘りをつけて自然降下させ、水深計も取り付けて濁度の鉛直分布、表面流向、流速分布についても観測対象を拡げている。上記の超音波を用いた魚群探知機に替えて、電磁波を用いたレーダー型測定器¹⁸⁾による河床形状測定など、新しい計測の試みも進められている。

しかしながら、表面流況を対象とした航空写真では、洪水時の荒天でのフライトが困難でしばしば危険を伴い、出水時間、気象条件によっては撮影が不可能であり、浮遊物等水面の状態によっては、撮影した写真から満足な情報が得られない場合も多い。また、洪水流の内部に立ち入った空間的連続観測も、有人船観測は緩流大河川に限り、流下浮体によるものも緩流河川の橋梁下流の比較的短い区間に限定される。その上、前者は非常に大がかりで、その準備と実施に多大の時間と労力が必要とされ、かつ、かなりの危険性を伴うものである。例えば、石狩川の場合¹²⁾では約 2 年の準備期間と延べ 500 人の観測員の動員があったといわれている。

以上のように、従来の空間的連続観測はいくつかの適用上の困難点や問題点を残しているといえよう。

2.2 カプセルによる空間的連続観測の特徴

前節で述べたことから、本研究では、この空間的連続観測に関し、1 km を越える比較的長い見通しの良い区間を対象として、水深 10 m、流速 4～5 m/sec までのかなり大きな出水についても、洪水流内部の構造を安全かつ簡便容易に観測できるシステムとして、水流とともに流下しながらその内部構造を連続的に測定していく装置、すなわち、ラジオコントロール方式の観測カプセルの開発を考えた。すなわち、従来の観測で必ず伴っていた洪水流観測時の危険性を減ずるためにカプセルを無人化し、大きな妨げとなる流木等の障害物にはカプセルを洪水とともに流下させる方法で対処する。このため、従来の洪水観測では全く着目されていないラジオコントロール方式の観測カプセルを試作開発し、その河道横断面内での位置を遠隔制御しながら洪水流とともに流下させて、これまでの定点観測では把握できなかった洪水流の内部構造の空間的変化を観測するシステムを確立する。

したがって、このカプセルによる洪水流の空間的連続観測のシステムの大きな特長は、有人船観測に比較して危険性が非常に低く、適用しうる河川の条件の範囲が広いこと、かつ、航空写真よりも天候の影響を受け難く、洪水流の内部を比較的簡便に直接計測できる点であり、一方、短所は面的な測定が困難な点であるといえることができる。

3. 洪水流の空間的連続観測カプセルの試作

3.1 洪水観測カプセルの構造

(1) 洪水観測カプセルと設計・開発の条件

観測システムの確立のためには、時間的、空間的に連続測定可能な計測機器の準備、及び適用を容易にするカプセルの軽量化、簡素化が必要である。流木などを考慮して自然流下しながら測定するようにしたのは、位置制御用駆動装置の軽量化を念頭に置いた結果でもある。観測区間の通過後、ラジオコントロール（ラジコン）あるいは内蔵させたマイクロコンピュータ（マイコン）のプログラムによってこの装置を作動させ、観測カプセルをいずれかの河岸に寄せて回収し、再び上流に移して観測を続行できるように設計しなければならない。また、荒天の多い洪水時は危険も皆無ではなく、計測にとって望ましくない条件の方が普通であって、観測労力が増大して能率の上がない場合も考慮しておく必要がある。現在、河床形状と水深、流速及びその分布、濁度、水温の同時測定を計画しているが、現有の計測機器の大半は使用が困難であるので洪水流の条件に順応したものを開発し、その特性を十分把握しておかねばならない。

以上から、洪水流の空間的連続観測を可能にする観測カプセルの開発条件をまとめるとつぎのようであろう。すなわち、観測カプセルは、内部に多数の測定機器を搭載するので、丈夫かつ安定であり、観測データの確認や洪水時の繰り返し使用のために回収できること、測定項目の変更・追加に応じるために搭載機器に関して柔軟であること、また、簡便性からできるだけ軽量・小型であること、洪水による損傷や最悪の場合の流失を考慮してそれほど高価ではないことなどを満足することが設計上の条件と考えられる。

カプセルに柔軟性を持たせるためには内部にある程度の余裕が必要であり、これは、軽量小型が望ましいという点と反する面がある。また、廉価という条件や開発の時間的制約からカプセルに使う部品はなるべく既製品やその改造によることになるので、それによる制約も受けざるを得ない。

(2) 洪水観測カプセルの構造

カプセルとして新たに船体を設計し、FRPなどで製作すればかなり小型の物が可能であるが、搭載機器の形状は限定され、専用の容器を用意しなければならないので、経済性からも有利ではないと判断した。そこで、**Photo. 1**に示した既成最小のレジャー用FRP釣り船（ヤマハ製）2艘の内部ボックスを切除し、上縁を平面に切り揃えてフランジを付け、これらをボルトと蝶ナットでとめ、**Photo. 2**のような上下対称な外観の重ね合わせ構造とした。このカプセル内部は、それぞれの上部に規格ハッチが取り付けられた3つの部分に仕切られており、**Fig. 1**のようにバッテリーや測定機器のアンプ、通信制御機器などが納められる。カプセルはコード・ケーブルなどの収納場所を用意してもかなり余裕があり、新たな計測に対する柔軟性を確保している。また、底面は内部が耐水合板で補強され、安全性も向上している。

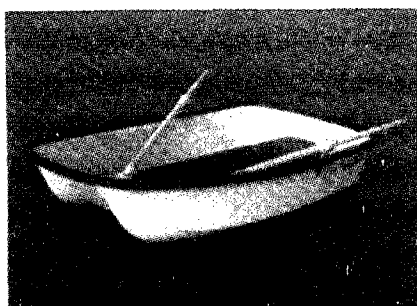


Photo. 1. An FRP fishing boat used for manufacturing the capsule (FRP: Fiber Reinforced Plastics).

カプセルの組立ては、**Fig. 1**のように、バランスを考えて予め各機器を載せ、上部をかぶせてボルト締めし、ついで、本体後部にステンレス製金具で固定した板に、測定機器の検出部を接続するアルミロッドと後述のマリンモーター2台を取り付け、内部の機器とマリンモーターの配線をしてハッチを閉めると完了する。外観は**Photo. 2**のようになり、ハッチにはすきまができたが、降雨による水の浸入はなく、沈没時の防水性もカプセルの安定性が極めて高かったので、試用時では無視した。

カプセルの位置制御に必要な推進装置には、スクリュウタイプのものとジェットタイプのものが考えられ、遠隔制御動力には一般にガソリンエンジンやバッテリー駆動モーターが

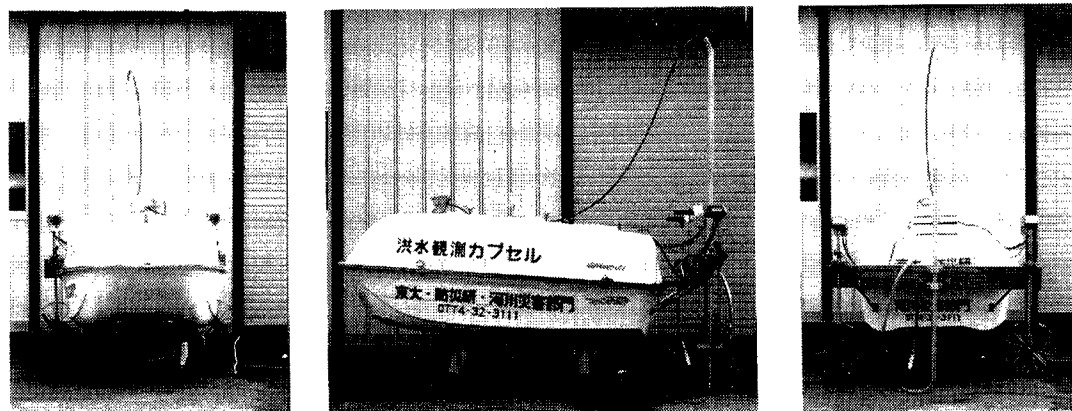


Photo. 2. The observation capsule for flood flows.

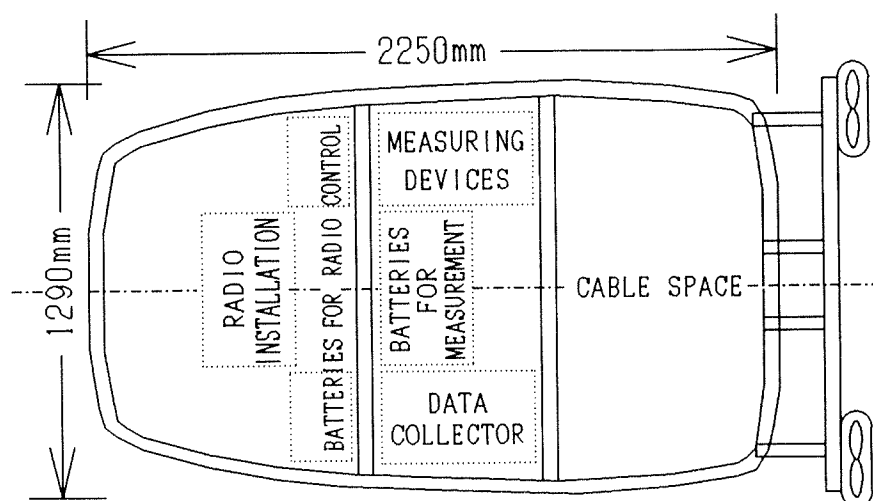


Fig. 1. A schematic plan of the inside of the observation capsule for flood flows.

用いられている。エンジンの方が同一出力では軽量で、ジェットタイプのものにはこの方式しかないが、ラジオコントロールあるいは内蔵プログラムによる作動には、始動方法と電氣的雑音の面で難点があるので、バッテリー駆動方式を採用した。すなわち、レジャー用小型釣り船の位置制御に用いられているマリンモーター（ヤマハ製）2台を、Fig. 1のように、カプセル後部に離して取り付け、双方の同方向同時回転でカプセルの前進後退を行い、一方のみあるいは双方逆に回転させてカプセルの方向転換をさせるようにした。

3.2 洪水観測カプセルのシステムと遠隔操作

洪水観測カプセルの遠隔操作による制御計測システムとしては、Fig. 2及びFig. 3に示したように、システムⅠ及びⅡの2つのものが考えられる。システムⅠでは、測定データは観測カプセル内に集積され、無線通信は主としてカプセルの位置制御と機器のモニタリングについてのみ行われる。したがって、無線通信の比重は軽くなり、デジタル通信も適しているが、カプセルが回収されない限り観測結果は入手できない。一方、システムⅡでは、測定データは流下時に多重無線設備のテレメータ装置を通して常時入手できるが、位置制御もアナログ的に行わざるを得ない。リモートコントローラーにラジコン模型用コントローラーの出力を上げて用いると簡単かつ安価であるが、混信や電波法令上の問題があり、このようなアナログ的制御方法にも上述のテレメータ装置が必要となる。しかし、この装置は、一般に少数のチャン

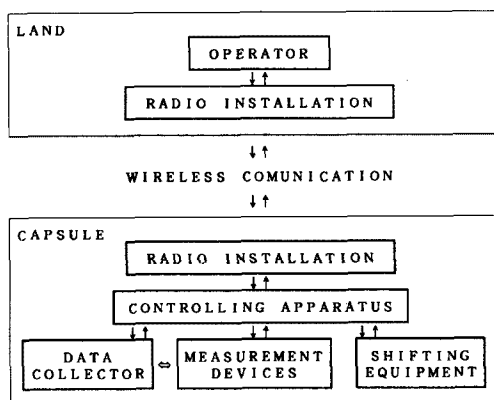


Fig. 2. A concept of the remote control system I for the observation capsule.

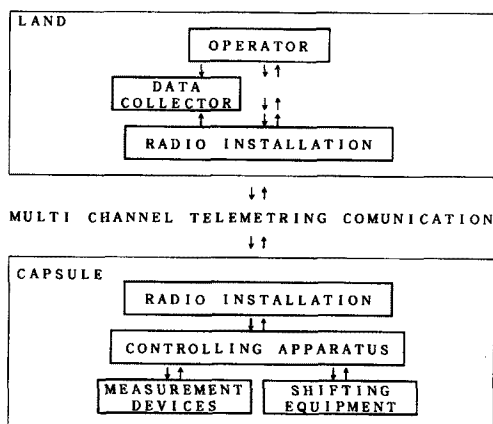


Fig. 3. A concept of the remote control system II for the observation capsule.

ネルでも大きくかつ高価であり、使用方法も固定的となる傾向が強い。

観測カプセルの遠隔操作は、空間的連続観測を円滑に実施し、良好な測定値を得るためには最も重要な要素であり、さらに、カプセルの移動以外に計測機器の制御も行えると好都合である。このためには、両者の通信システムを併用することが理想的であるが、これはさらに高価で複雑なシステムが必要となり経済性と簡便さが失われてくる。ここでは、システムの柔軟性及び経済性と簡便さから I のシステムをとることにした。

駆動用の 2 台のマリンモーターの正逆回転は、元来グリップハンドルのマニュアル操作によって制御されるようになっている。その内部をテレメーターで直接制御することはかなり困難であり、マニュアル操作も残しておきたいので、グリップにギヤを取り付け、それを小型 DC モーターで回転させるようにした。小型 DC モーターの単純な正逆回転制御はマイコンから簡単に行える IC があるので、この点でもシステム I の方が適している。

以上の点から、観測カプセルの操作にマイコンを導入してインテリジェント化すれば、複雑な制御も可能であって、カプセル移動以外に計測機器の制御も行える。そこで、Fig. 4 に示したように、8 bit CPU ではあるが周辺装置が整い小型・軽量かつ堅牢であるハンドヘルドマイコン HC-45 (エプソン製) を採用し、通信方法もそれに応じた手段をとることにした。すなわち、現在観測カプセルは開発途上の段階であり、市販されている機器の大半がアマチュア無線用のものであることを考慮してアマチュア無線のポケット通信を試み、同図のブロックダイアグラムに従って、カプセルの位置制御を行うようにした。

この装置は、HC-45 の RS 232 C 回線をポケットコントローラー PK 88 J (WARD 株製) と結び、ポケットコントローラーのラジオコネクタを 1200 Hz 帯 FM トランシーバー IC-1200 (I COM 株製) のマイクコネクタにつないで構成したものであって、トランシーバー間が無線通信で結ばれて、2 台の HC-45 間のポケット通信が可能になっている。

一方、マリンモーターの具体的な回転制御は、正逆とも起動から高回転になるまでは、グリップの位置に応じて電流が FET 回路で制御され、その後バッテリーとモーターとが直結するように、グリップに組み込まれたカムがスイッチングする仕様となっている。そこで、まず、このグリップ位置によるスイッチの状態を検出するために、内部のマイクロスイッチ 2 個をトランスファータイプのものに取り替えた。この結果、2 台のマリンモーターのグリップ位置は 4 ビットで把握できるようになった。つぎに、小型 DC モーターの正逆回転は、マイコンからオプションの 82 C 55 A を用いた I/O ユニット (八戸ファームウ

エア製)を介して、専用IC(東芝製TA 7257P)¹⁹⁾に信号を送って制御することにした。

これより、パケット通信をコネクタ状態にした後に制御用アプリケーションプログラムを実行すると、Fig. 4のブロックダイアグラムのように、陸上から制御コードがカプセルにパケット通信で転送され、受信側マイコンがそれを解読して、マリンモーターのグリップ位置を検出しながら、小型DCモーターで取り付けられたギヤを回転させることができ、カプセルを所定の方向に操作することが可能となっている。

カプセル制御に用いた当初のプログラムでは、前・後進のようなある命令が送信されると、受信したHC-45は、マリンモーターのスイッチ状態を確認し、対応した状態であるなら、その状態を送信側HC-45を送り返して次の命令を待ち、そうでなければ指定された状態になるように、小型DCモーターを回転させる信号を制御用ICに送出して再びスイッチ状態を確認し、この作業を繰り返してカプセルが対応した挙動をとるようにマリンモーターを制御するようになっていた。

しかし、この方法ではカプセル側が指定の状態になるまではグリップ位置の検出結果を送信してくるだけであって、その間に新しい命令をカプセル側のHC-45には送りこめない。このため、カプセルの遠隔操作の時間遅れが大きくなり、洪水時の高流速を想定すると好ましくない。そこで、第2のプログラムとして、カプセル側HC-45ではスイッチの状態に拘らず、常に陸上側からの新しい命令の有無を確かめるようにし、有ればそれに応じた制御命令を、無ければ元の制御命令をDCモーターに送るようにしたものを作成した。

3.3 洪水観測カプセルの位置検出

洪水観測カプセルの位置検出には、Fig. 5のブロックダイアグラムに模式化したように、旭精密(株)製の光波測距儀PTS-II 05を用いている。効率良く測定を行うために、PTS-II 05とHC-45をRS 232C回線を介して結び、連続的に測距、測角データを取り込んでHC-45上のRAMファイルに時刻ともに書き込む自動集録プログラムを作成した。この方法では記帳ミスが避けられ、結果を直接計算・整理してプログラムで図化することができる。

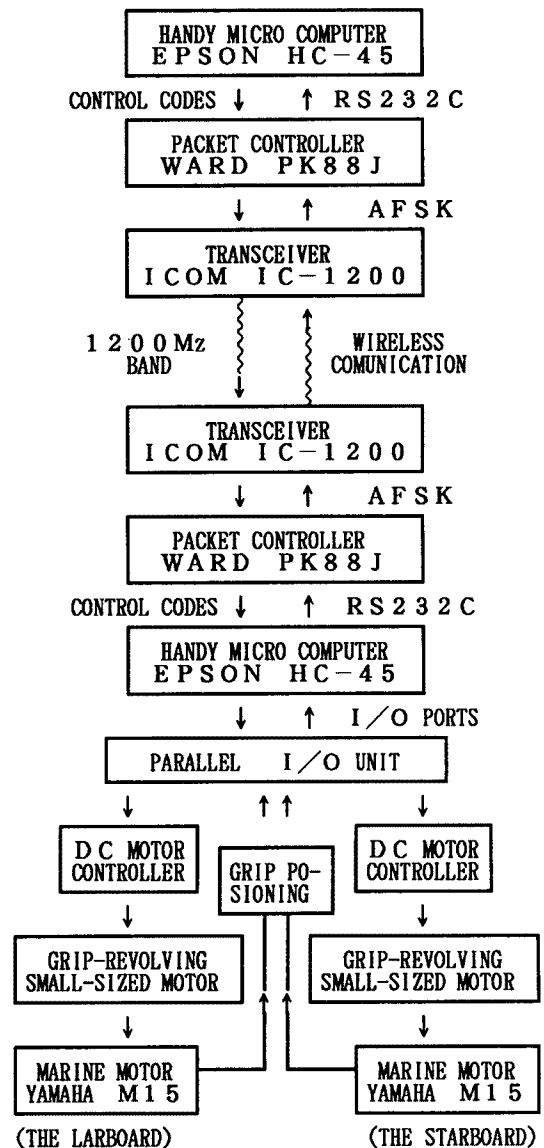


Fig. 4. A block diagram of positioning operation of the observation capsule.

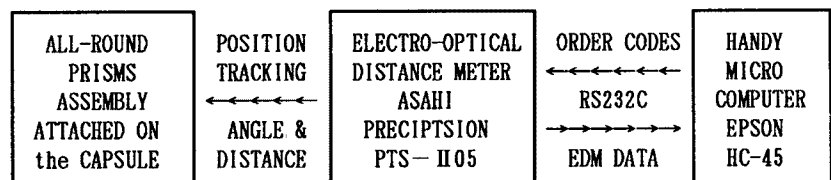


Fig. 5. A block diagram of positioning of the capsule location.

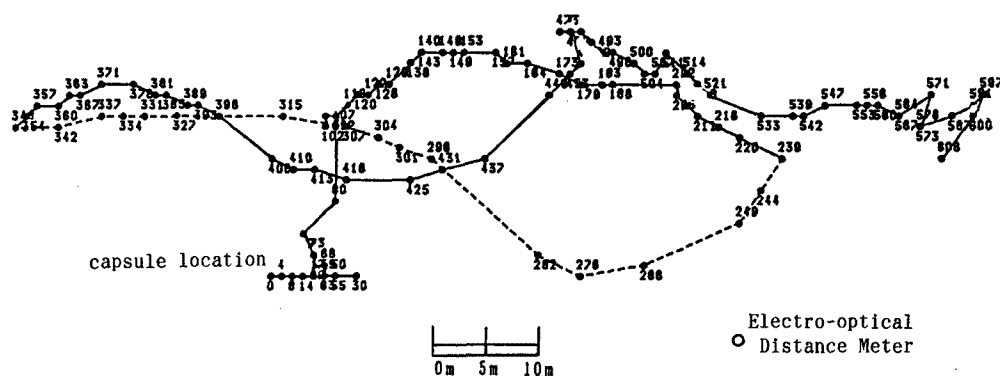


Fig. 6. A locus of the observation capsule tracked by an EDM system in the Uji river (EDM: Electro-optical Distance Meter). Numbers are seconds after release.

カプセルには、光波測距儀用プリズム3個を 120° ずつ方向をずらして組み合わせたものを2段にして、 60° の視野をもつようにして6個取り付け、カプセルがどの方向を向いていても光を反射するようにした。これを目視しながらトラッキングモードで追跡して斜距離、水平角、鉛直角を測定していった。

実際に宇治川でカプセルを追跡した結果がFig. 6である。河岸からの出発点を0秒として各測点の測距時刻が記入されているが、図中の点線が自然流下時の軌跡を表している。この図から判るように、測定の時間間隔が最短でも3秒もあることや、光波測距儀からカプセル上のプリズムの追跡を手作業で行うことが問題点として指摘される。後者の問題点は、測距方向を流れに平行にすることで改善される。また、正確な流速測定にはカプセル位置の1/100秒単位の測距時刻が必要と思われ、HC-45の1秒きざみの内蔵時計では明らかに精度不足であるので、ストップウォッチ内蔵のビデオカメラ等による別途のモニタリングを考える必要がある。

3.4 測定項目と計測機器の特性

(a) 河床高と水深の測定

普通使われている音響測深では、カプセルの流下が速いので困難と判断し、豊田工機(株)製の拡散型半導体圧力センサー内蔵の投げ込み式水位計TD4000-24(測定範囲: $0 \sim 10 \text{ mH}_2\text{O}$, 出力 $4 \sim 20 \text{ mA}$, 淡水用)をカプセルから吊して河床を這わせて測定することを考えた。投げ込み式水位計の検出部は太くなっているのが、河床にひっかからないようにケーブルを外径約25mmのビニールホースに入れ、それをホットボンドで固定して検出部との接続を滑らかにし、ケーブルの保護も兼ねさせた。ケーブル中の空気ホースで導入された大気圧と静水圧との差が電気信号に変換され、 $4 \sim 20 \text{ mA}$ の電流で出力されるようになっているので、これを約 250Ω の抵抗に通して電圧として検出するようにした。ケーブルに測量テープを貼り付け、天ヶ瀬ダムで各水深に対する電圧値を読み取って検定した。結果はFig. 7の

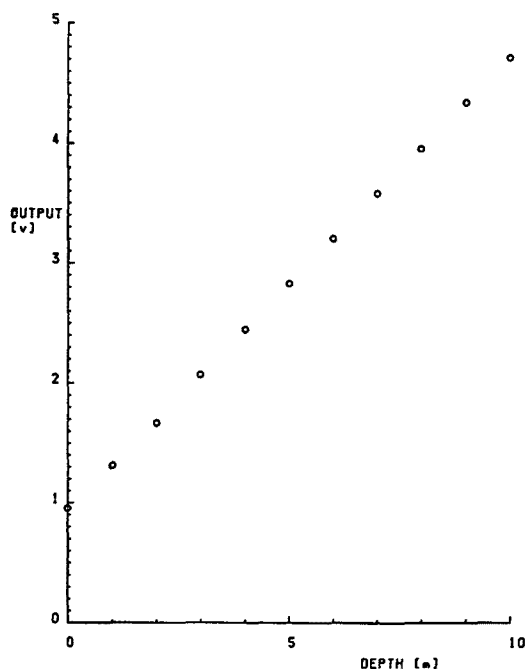


Fig. 7. An input-output relationship of a water depth meter of a thrown-in type.

ようであって精度は非常に高いといえる。

(b) 流速測定と温度計測

洪水時に流れている流木等の障害物に対処できる点を考慮すると、実験室で使用されているような流速計は不適当であるので、Photo. 3 に示した検出部が 0.5 mm のステンレスで被覆されている熱型水流検出器（ミヤケ電子（株）製）を堅牢で廉価なセンサーとして試用した。1 台のアンプに対して検出部は 3 チャンネル用意されており、直径 5 mm、長さ 10 mm の円柱状のステンレス被覆の内部には一定の温度に保たれる抵抗体が封入されている。水流による放熱のための温度変化がないようにブリッジを介して供給される電流値の変化が電圧で出力されるようになっている。

水温 6.2°C の実験用水路で検定を重ねた結果は Fig. 8 のようである。結果は、低水温を反映して、大きな切片をもった頭打ち傾向を示す右上がりの曲線となっているが、ばらつきが非常に激しい、原因として、検定部に付着する気泡の影響と、水温に極めて敏感であるのでとくに低水温の場合わずかな変動で大量の熱が奪われることが推測される。高流速を対象にすれば気泡は付かず温度補正も可能であるかもしれないが、洪水流とともに流下するカプセルでは大きな流速差は望めないで今回の観測には不適当な面は否めない。

したがって、労力を要するが各水温について検定をしていき、試用を重ねて検討する必要がある。また、平均流速には、ブライス型のような無方向性のプロベラ流速計を洪水時の障害物にも対処できるように試作していくことや、精密測定には、高価ではあるが電磁流速計などを利用することが考えられる。

一方、温度計測には上述の 3 チャンネル水流検出器に埋め込まれていたサーミスタ温度計を取り出して用いることにした。すなわち Photo. 3 の流速計検出部先端のアルミ板で保護された部分の突起がアルミホイールで覆われたサーミスタで、グリス状の放熱用シリコンパウンドが封入されている。

(c) 濁度計測

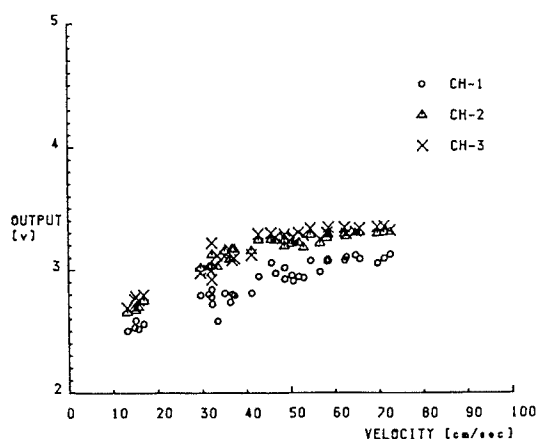


Fig. 8. Input-output relationships of water current detectors of a thermal type.

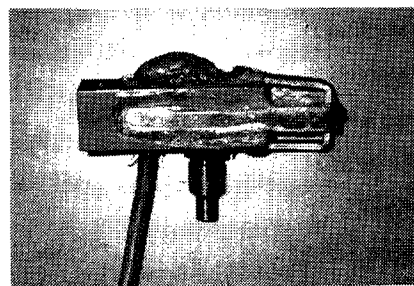


Photo. 3. A probe of a water current detector of a thermal type with a thermistor.

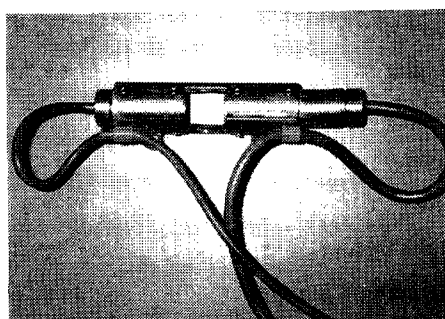


Photo. 4. A probe of a turbidity meter of an optical type.

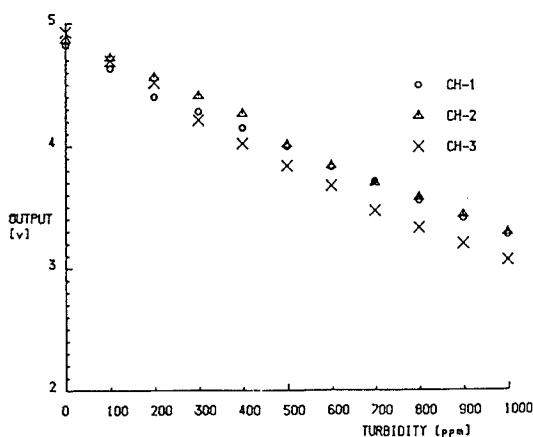


Fig. 9. Input-output relationships of turbidity meters of an optical type.

濁度計は、メトロ電機研究所の協力を得て防災研究所海岸災害部門が試作した光学式のもので、検出部は3チャンネル用意されている。発光部と受光部を平行に正対させた **Photo. 4** のような形状であって、その間の距離を同一にするために20 mmのアルミ板を間にはさんで締めつけた。珪砂8号（平均粒径 $d_m = 0.1$ mm, 比重 $G_s = 2.74$, 平均沈降速度 $W_s = 1.05$ cm/s）を使用して水槽で検定を行ったが、現有の野外用光学式濁度計（㈱東邦電探 FN-5 型）との対応も良く、**Fig. 9** のようになり高精度の結果を示し、発光部、受光部に砂がたまったり、ガラスに曇りのない場合、同様の砂にはこの検定結果が有効であろう。

(d) 方位計測

測距儀用プリズムに対する計測器検出部の位置を把握しておくために、船首の向いている方位を電子コンパス MMS-25（㈱marol 製）で測定できるようにしている。この電子コンパスは、N 方向を 0° とした磁力線の方向の $\sin$ および $\cos$ が4 V を軸として電圧出力されるようになっている。 $\phi 128 \times 173$ mm 高の完全防水型容器に封入され、油浸ダンパつき水平保持機能を備えているので、ハッチ上部に取り付けることにした。この測定結果は、今後カプセルの進行方向制御を試みたときに用いることもできる。

3.5 測定データの処理と記録

カプセル内の収録装置としては、通信機器などの周辺機器とのインターフェイシングを考慮して、12ビット8チャンネルのADコンバータ（八戸ファームウェア製）を取り付けた HC-45 を2台使用した。防水性を高めるためにアルミボックスの中にこれらの機器を収納して、その上に16チャンネル分のBNC端子を取り付けたアルミ板の中蓋を設けている。これに、**Fig. 10** のように、各計測器の出力ケーブルを接続して、測定データのAD変換と収録を行なう。

A/D変換ボードから HC-45 のポートアドレス &H 80, &H 81 に入った変換データの数値 A , B をともに整数型の値とし、電圧変換の計算を行わないで、 $A \times 256 + B$ の2バイトの整数値として、HC-45 に内蔵されている128 KBのRAMディスクに格納すれば1チャンネル当たり約7000以上のデータを記憶させておくことが可能である。また、計算処理が簡単なので内蔵のBASICでも約3個 $\times$ 8チャンネル/秒の速度でデータを取り込むことが可能であった。洪水観測カプセルの流下速度を考慮にいれても、3個/秒の割合による測定は十分空間的に連続なものとみなせよう。

測定時間の記録は、ハンドヘルドコンピュータ HC-45 の内蔵時計が1秒きざみなので、最初と最後の測定時刻と測定回数によって計算する必要がある。なお、当然のことながら、光波測距儀用1台と測定記録用2台の計3台のHC-45の内蔵時計は予め観測に先だって合わせておくことが必要である。

4. 観測カプセルの試用と問題点

4.1 河川における観測カプセルの試用

開発の途上にある観測カプセルを琵琶湖、野洲川、宇治川及び円山川において計7回試用している。その概要について以下に述べる。

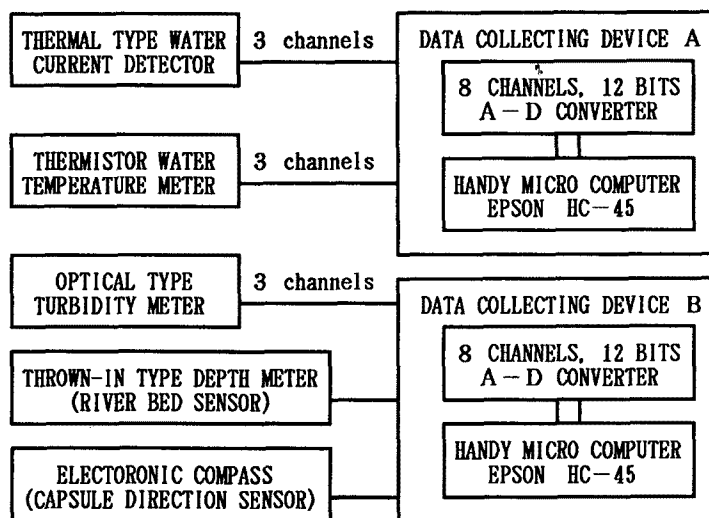


Fig. 10. A block diagram of data collection by micro-computers.

(1) 琵琶湖・野洲川での試用

1回目は1988年11月に滋賀県琵琶湖東部の彦根港付近のカプセルの製作を依頼した工作所の前で本体の安定性とマリンモーターの駆動力のテストを行った。当日は荒天で防波堤内にも拘らずかなりの波浪があった。人間が試乗して操作した結果 (Photo. 5) では、安定性は非常に高いが、マリンモーター1台による進行速度はやや低かった。

2回目は1989年3月に滋賀県東部の野洲川河口付近に、観測カプセルと補助ボートを2tトラックで運搬し、作業人員2人で行った。このときは、流速が殆どなく危険はないと判断できたので、カプセルの可搬性と2台のマリンモーターによる操作性を、有人操作で検討した。当日は一時降雨があったが、条件が良ければ2人でもカプセルの搬入操作は可能であり、マリンモーター2台の正逆回転の組合せで、位置や方向を容易に制御できることが判明した。

3回目は、2回目と同様、1989年11月に野洲川の河口付近で (Photo. 6)、運搬には2tトラックを利用し、観測人員4人で行った。雨ときどき晴れの天候の下で、測定・制御機器の組み込みやケーブル類の結線などカプセルの組立作業とマリンモーターによる観測カプセルの作動状況を調べた。計画では、上に遠隔操作を試験する予定であったが、観測機器の組立が初めてであったこと、現地到着まで時間がかかったことおよび降雨のために、ケーブル類の結線などカプセルの組立作業に多大の時間を費やし、日没で観測場所での作業時間が限られ、試験できなかった。これより、作業時間の確保と観測の準備作業を手際よく行えるように機器を整備しておくことの重要性を強く認識することになった。

そこで、防災研究所の近くに低流速で見通しが良く、観測カプセルの組立や他の作業が容易な河道区間を探すこととし、結局試用候補地として、宇治川の山科川合流点上流の比較的流速が低く、直線的な区間を選んだ。

(2) 宇治川での試用

宇治川での1回目の試用は、1989年12月初旬の晴天を選んで作業人員2人で行った。観測カプセルと補助ボートを軽4輪トラックで運搬し、マリンモーターの遠隔制御を試みた。周辺に比較して低いとはいえ、流速が1 m/sec以上もある箇所もあり、作業人員も少なかったので、カプセル先端に浮きひもを取り付け安全性を確保した。約1 m/secの流速に対してカプセルはモーターのフル回転でようやく前進する程度であったが、新たな命令で割り込めない最初のプログラムで遠隔操作を行った。結果は、応答は少し遅かったが、カプセルの制御はパケット通信でも可能であることが確認された。また、遠隔操作だけでなく2人でも十分であること、及びカプセルの応答性を高めるためには、新たな命令が優先するようなプログラムを作成しなければならないことが判った。

2回目の試用は、1989年12月下旬に観測員3人で行い、運搬には前回同様軽4輪トラックを利用した。天候は晴れであった。遠隔操作プログラムには前回と同じものを使い、光波測距儀を利用してカプセルの



Photo. 5. A snapshot of the observation capsule tested in Lake Biwa.



Photo. 6. A snapshot of the observation capsule tested in the Yasu river.



Photo. 7. A snapshot of the observation capsule tested in the Uji river.

追跡を試みた。その結果はすでに示した Fig. 5 である。途中でパケット通信が HC-45 のニッカド電池の充電不足のため応答不能になり、カプセルが暴走して河岸にマリンモーターが作動したまま到達した。しかし、光波測距儀は良好に作動し、カプセルへのプリズムの取り付け方法が適切であったことや光波測距儀から HC-45 への連続的なデータの転送が可能であることを確認できた。

宇治川での3回日の試用は (Photo. 7), 1990年2月初旬に観測作業人員3人で行い、運搬には2tトラックを利用した。このときは、新たな命令の優先する第2の遠隔操作プログラムを使用するとともに、光波測距儀でカプセルの追跡し、各計測機器による測定も行っており、データを HC-45 の RAM に記録していくことを予定していた。しかし、当日は洪水時と類似の荒天候であって、カプセルの組立や計測機器の結線に多大の時間がかかり、操作開始までに労力を大きく費やした。また、第2プログラムは、パケット通信を数回繰り返すと PK 88 J と HC-45 の RS 232 C 回線に障害が生じるようであり、一方、カプセル内の HC-45 の測定データ収集プログラムは実行直後に中断してしまっていた。

おそらく、寒冷な雨天の現場において観測準備を行ったため、細かい手作業や頭脳労働が極めて困難となって2, 3の操作ミスがあったと思われる。

(3) 円山川での試用

野洲川河口付近では、平水水深が1m以下と小さく、流速もほとんど無いので、カプセルを流下させることができず、一方、宇治川では、流速が高く見通しの良い河道区間も短いので、カプセルや計測機器の試用には必ずしも適当では無かった。そこで、平水流速が0.4~0.5 m/sec の一級河川円山川 (兵庫県) に着目し、幌付き2tトラックで観測システム一式を搬送して、上下流にそれぞれ約1kmを見通せる14km地点を中心に、1990年3月上旬の3日間カプセルによる観測の試験を行った。

1日目は、カプセルの組立と機器の配線及び制御プログラムの簡単なチェックを行った。組み立てられた観測カプセルは観測区間の約4km下流にある支川戸牧川の建設省豊岡工事事務所の船溜りまで同事務所のモーターボートで曳航され、そこに停泊して翌日の観測に備えた。

2日目は、朝からの雨であったが、河床計、濁度計、水流検出器及び水温計を測器取り付け用のカプセル後部の板から吊り下げて自然流下させ、実際に近い形で検討を試みた。

すなわち、機器の簡単な点検を済ませた観測カプセルは、モーターボートで円山大橋直下流の14.4kmまで曳航され、そこから自然流下を始めた (Photo. 8)。同時に、14km地点右岸堤防上に設置した光波測距儀から観測カプセル上のプリズムの追跡を開始した。途中、計測用アルミロッドでプリズムが見えなくなればカプセルを回転させ、岸に寄り過ぎれば中央に戻るように、陸上から信号を送って制御した。Fig. 11 は、その13.0~14.4km区間を流下する観測カプセルの追跡結果であって、記録された位置データから約1kmの区間を約30分で通過したことが判る。このように、カプセルの位置制御と追跡は良好であった。一方、データ収録は、装置自体問題なく作動したが、洪水時と同様の悪天候で測定機器の配線が不正確となり、操作ミスも重なって満足な測定データの収録はできなかった。

また、第3日目は、作業時間が午前中のみであり、戸牧川の樋門も円山川の水位上昇で閉鎖されたので、戸牧川でデータ収録と位置制御の試験を繰り返すに留まった。

以上のように、開発したシステムでは、1km以上に亘って観測カプセルの追跡が可能で、その位置や姿勢の制御も行えることが判り、本格的な観測に向けての足がかりを得ることができた。しかし、制御・計測プログラムには未だに不安定な面が存在しているので、今後さらにその改善を図る必要がある。



Photo. 8. Snapshots of the observation capsule flowing down along the Maruyama river (Flow is left to right).

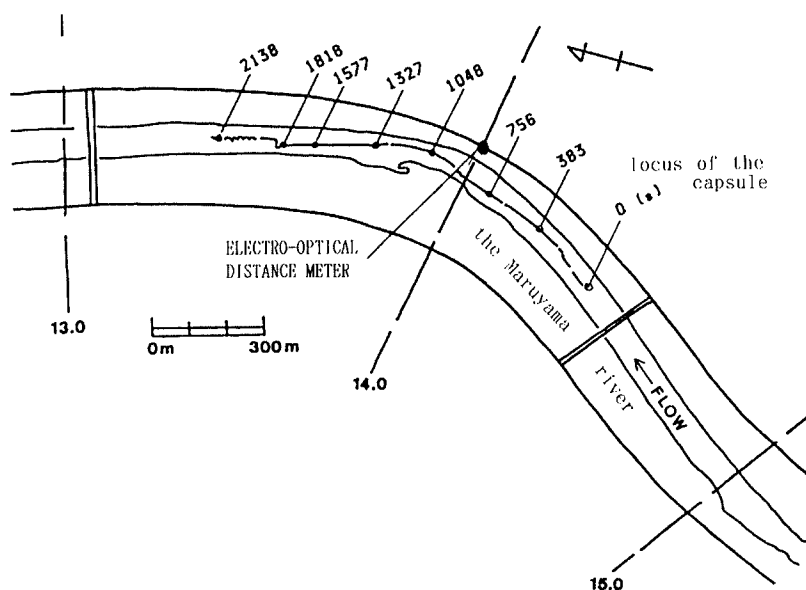


Fig. 11. A flowing down locus of the observation capsule tracked by an EDM system in the Maruyama river.

4.2 観測カプセルの問題点と改良点

前節の試用の結果判明した問題点と改善すべき点について、いくつかは既に述べているが、以下に箇条書きにしてまとめる。これらは今後順次解決していく予定である。

(1) 観測カプセルの適用上の問題点

1) 現地での組立作業: 細かい手作業のため観測作業人数を増加させても能率が上がるとは思えない。したがって、多くの計測器の設置・配線作業の簡素化やそれを容易にするためのカプセル構造の変更が考えられる。とくに、現在 330 mm×270 mm の規格ハッチは大型のものに交換して、結線作業が終了し、プログラムの実行が開始された機器を容易に収納できるようにする必要がある。もしくは、予め組立や結線作業を終え、ハッチからは電源の ON-OFF 程度の操作を行えば良い状態のカプセルをクレーンやウインチを用いて水面に降ろすようにすれば、洪水時の荒天にも対処できる。

2) 部品の確保: 一つの部品が消耗、破損、粉失するだけで観測不能となり、それまでの準備に投入した労力が報われない結果となる。したがって、消耗品や重要な部品は現地でも必要数以上を確保しておかねばならない。

3) 観測システムの保護: 試用段階であるため暴走などが起こりやすく、カプセルの FRP 部分が破損しやすいので、そこを保護して長期間使えるようにしておかねばならない。保護には船体にウレタンフォームを着着することなどが考えられるが、いくつか試みる必要があろう。また、光波測距儀や他の機器の防水性を増すことも重要である。

4) 遠隔操作のソフトウェア: RS 232 C 回線で接続された HC-45 と PK 88 J とは現在の BASIC 管理下では通信障害が起こり易い。パケット通信に障害が生じると制御不可能となり、洪水時には流失等の重大事故につながりかねない。したがって、パケット通信に適合したプログラムや障害時の緊急回収プログラムを開発していくことが必要である。

(2) 観測カプセルの今後の改良点

1) 観測カプセル本体の大きさ: 浮体としての安定と強度、推進装置の取り付けなどを考慮した設計は難しく、高価ではないとの条件に合致しない可能性はあるが、現カプセルよりも小さい FRP 製カプセルを製作すれば、観測人員や労力の低下につながり、適用の容易さや簡便性が増すと考えられる。

2) 塔載機器の軽量化と運搬装置の開発: 水深 10 m に及ぶ洪水流の内部構造を対象としているので、測器、ケーブル類の収納や検出部ロッドの取り付けの安定性からみても極度の小型化は困難である。したがって、塔載機器の軽量化やシステムに適した運搬装置(クレーン等)の使用を考慮すべきであろう。

3) 測距データ入手間隔と移動速度の直接測定: 光波測距儀による位置検出は、高精度のデータを得られるが、データ入手間隔が長いので、この点の改善と移動速度の直接測定に努力するとともに、ビデオカメラを位置検出器の補助装置としてばかりではなく、空間的な情報入手に活用していく必要がある。観測カプセル内部の収納スペースには余裕があるので、こうした機器や装置の塔載も可能である。

4) 自動方向制御と自動回収プログラム: 現在、観測カプセルは主に洪水流で自然流下し、パケット通信による遠隔制御は補助的なものである。この方法の適用性の高いことは判っているが、今後のより高度な計測のためには一定の方向に直線的に移動するような制御方法を確立することが望ましい。このためには、目視によるラジオコントロールだけではなく、電子コンパスとの組み合わせによる進行方位制御方式のプログラムや自動回収プログラムを組み込んだ制御機器をカプセル本体に採用すること望ましい。

5) 検出部の取り付けと設定高の制御: 現在までカプセルに取り付けた検出部取り付けロッドは 40 mm のアルミパイプ 1 本であるが、水深に応じてマイコンで自動伸縮可能なロッドの開発に着手している。この装置によると各計測器の検出部の高さを自由に制御することができ、回収時には最短状態にできるので機器の保護にもつながる。

6) 測定と記録の遠隔操作: 測定・記録の開始および終了も遠隔操作できるようにプログラムを充実していけば、送信側でも開始・終了時点が明確にモニターできるので測定自体もより確実なと思われ、観測システムの適用性は高くなると考えられる。

5. 結 論

本研究では、洪水流の空間的連続観測カプセルという独創的な観測システムの開発を試みた。試作及び試用の過程で、数々の困難な問題に遭遇し、現在解決できていない点も数多くある。しかし、今後観測カプセルを実用化していくための方針は見出しえたと考えている。観測カプセルの開発の過程を順にたどり、明確にできた事柄を以下にまとめる。

1) 洪水時においても危険を伴わず、総合的な測定が可能な空間的連続観測システムの確立という目的から、遠隔操作される無人化した観測カプセルの開発を考えた。観測カプセルは、現地に容易に適用されるために簡素化と軽量化が必要であり、さらに、洪水による損傷や最悪の場合の流失を考慮すると、測器を含めて高価でないことが望ましい。

2) 上記の条件を満たすべく、本観測カプセルは、既存最小のレジャー用釣り船2艘を改造して上下対称に重ね合わせ、内部を3つに仕切って計測器、電源及びケーブル類を収納するような構造にし、推進装置としてバッテリー駆動のマリンモーターを採用した。

3) 試用の結果、全体の重量をより軽量化し、かつカプセル上部のハッチを拡げて計測器の配線作業や本体の組立作業を容易にすることが指摘された。

4) 経済性を考えて新たに試作した計測機器については、河川での実測結果は得られなかったが、検定結果から、流速計以外はそのまま用いることが可能と判断された。

5) 無線によるパケット通信は、観測カプセルの遠隔操作にかなりの適用性を有することが明らかになったが、今後完全な遠隔制御を行うには、さらに、パケット通信に関する知識を増強して、制御プログラムを発展させる必要がある。

6) 光波測距儀を用いた観測カプセルの位置検出は、作成したプリズム装置が良好で規則的にデータが得られた。しかし、データ入手間隔が比較的長いこと及び精確な測距時刻の確定の困難であることなどについて改善を図らなければならない。

7) 柔軟性、簡便性及び経済性から、測定データをカプセル内のAD変換器付きハンドヘルドマイコンに収録する方法を取ったが、整数型記録で空間的連続測定を十分に補なえることが判った。

この観測カプセルは、河床、流速、濁度、水温等の測定装置を装備し、河床形態の変化と水流の状態、浮遊流砂の濃度や汚濁物質の負荷状況といった洪水流の内部構造に関わるデータを直接計測できるように設計されているが、今後も安全かつ簡便な洪水観測システムとして、現業機関でも容易に使用できるように開発を継続していくつもりである。したがって、順次改良していけば、河川災害や河川環境変化に関わる洪水流資料の蓄積に役立てられる可能性が高い。また、わが国のように常時の観測体制の整っていない開発途上国の治水計画のための洪水データ集積にとっても有効な手段となり得ることが考えられる。

このためにも、現地での試用は適用上の問題点を見出す絶好の機会であるので、長期的に実用化を目指してそれを繰り返し、回収等観測カプセルの安全の確保を図りたい。このようにして、洪水観測システムとして充実を目指し、洪水流内部の空間構造を明らかにして、河川災害の防止・軽減や河川環境の変化予測に役立てていきたいと考えている。

最後に、観測カプセルと計測機器の製作には、地形土壌部門の横山康二技官及び海岸災害部門の藤木繁男技官の協力を仰ぎ、円山川での試用には建設省近畿地方建設局豊岡工事事務所の道前瑞男専門官、山田曙係長をはじめ調査課並びに同豊岡出張所の方々のご協力を得た。ここに記して謝意を表します。本研究は、昭和63～平成元年度の特定研究経費の補助を得て行われたものであって、関係各位に感謝します。

参 考 文 献

- 1) Mlynarczyk, Z. and K. Rotnicki: Flood and vortex scour of the channel bed of the Prosna river, and their depth range, *Earth Surf. Proces. and Landf.*, Vol.14, No.5, 1989, pp.365-373.
- 2) Dinehart, R.L.: Dune migration in a steep, coarse-bedded stream, *Water Resour. Res.* Vol.25, No.5, 1989, pp.911-923.
- 3) Sidle, R.C.: Bed load transport regime of a small forest stream, *Water Resour. Res.* Vol.24, No.2, 1988, pp.207-218.
- 4) Sidle, R.C. and A.J. Campbell: Patterns of suspended sediment transport in a coastal Alaska stream, *Water Resour. Bull.* Vol.21, No.6, 1985, pp.909-917.
- 5) Campbell, A.J. and R.C. Sidle: Bedload transport in a pool-riffle sequence of a coastal Alaska stream, *Water Resour. Bull.* Vol.21, No.4, 1985, pp.579-590.
- 6) Davoren, A. and M.P. Mosley: Observations of bedload movement, bar development and sediment supply in the braided Ohau river, *Earth Surf. Proces. and Landf.*, Vol.11, No.6, 1986, pp.643-652.
- 7) Carling, R.A.: Bedload transport in two gravel-bedded streams, *Earth Surf. Proces. and Landf.*, Vol.14, No.1, 1989, pp.27-39.
- 8) Carson, M.A. and G.A. Griffiths: Gravel transport in the braided Waimakariri river: Mechanisms, measurements and predictions, *J. Hydrology*, Vol.109, No.3/4, 1989, pp.201-220.
- 9) Ashworth, P.J. and R.I. Ferguson: Size-selective entrainment of bed load in gravel bed streams, *Water Resour. Res.* Vol.25, No.4, 1989, pp.627-634.
- 10) 沢田豊明: 山地流域の土砂流出に関する研究, 京都大学学位論文, 1985, 149 p.
- 11) 木下良作: 洪水と流路形態の現地観測, 水工学シリーズ, 78-A-7, 土木学会水理委員会, 1978, pp.A-7-1-A-7-16.
- 12) 星清・竹本成行・瀬川明久: 石狩川下流部における昭和56年8月洪水観測体制について, 第30回水理講演会論文集, 1986, pp.421-426.
- 13) 板倉忠興・山口甲・清水康行・岸力・黒木幹男: 昭和56年8月洪水における石狩川下流部の河床波観測について, 第30回水理講演会論文集, 1986, pp.481-486.
- 14) 清水康行・板倉忠興・岸力・黒木幹男: 昭和56年8月洪水観測における石狩川下流部の河床変動について, 第30回水理講演会論文集, 1986, pp.487-492.
- 15) 森明巨・岸力: 昭和56年石狩川洪水で観測された弯曲部河床変動の特性, 第30回水理講演会論文集, 1986, pp.493-498.
- 16) 木下良作: 洪水時の河床形態, 第33回水理講演会論文集, 1989, pp.439-444.
- 17) 木下良作: 石狩川下流部における洪水時の鉛直濃度分布と流れの構造について, 水工学論文集, 第34巻, 1990, pp.463-468.
- 18) 宮島義敏・植村靖・福元太: 河床洗掘測定器の開発, 第40回建設省技術研究会報告, 1987, pp.904-909.
- 19) 谷腰欣司: DC モーターの制御回路設計, CQ 出版社, 1985, p.118.