

Appendix C 電波流速計

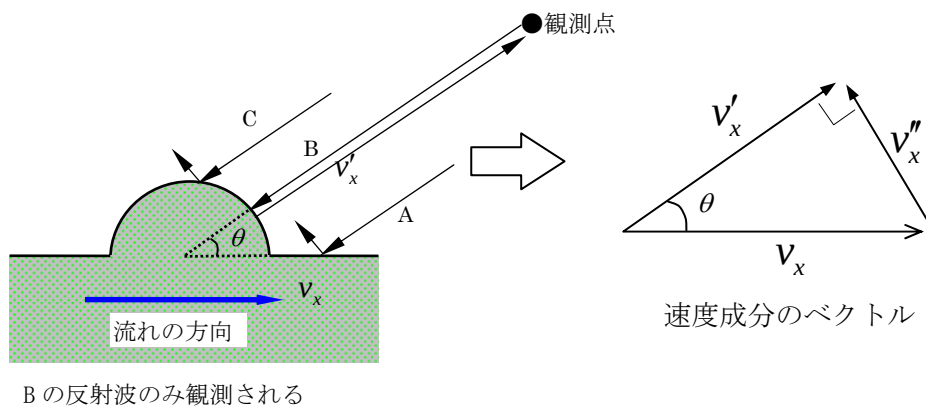
C-1. 電波流速計の計測原理

電波流速計はドップラー効果を利用した計測法である。この計測法は移動物体に発信体の振動数が反射した時に、移動物体の速度に応じて反射振動数が変化する原理（ドップラー効果の原理）を利用した計測法であり、現在様々な分野で利用されている。具体的には、スポーツの分野におけるスピードガンや道路交通取り締り用の車両速度計測器等が、この原理を用いたものである。

(1) ドップラー効果

ドップラー効果とは、1842年にドップラーにより発見された移動する波源の振動数変化である。波源と観測者が相対運動をしているとき、波源から送られて来た波の振動数は、両者が近づきつつあるときは、波源の振動数より大きく観測され、両者が遠ざかりつつあるときは、小さく観測される現象を言う。

(2) 流速の観測



観測点から照射された電波が移動する水面の位相にぶつかり、反射した電波の周波数がドップラー効果により変化したのを捉え、水面位相の移動速度を求める。位相の移動速度が水粒子の移動速度と等しいという仮定の下に流速が算定される。

波の照射方向と水面位相の移動方向が角度 θ の関係にある場合、水面位相の速度 v_x と計測される見かけの速度 v'_x の間には上図の右側に示すようにベクトルが分離されるので下式の関係が成立する。

$$v'_x = v_x \cos \theta$$

$$v''_x = v_x \sin \theta$$

$$\therefore v_x = v'_x / \cos \theta$$

流れの速度を知るためには計測した速度に対して角度補正を行う必要がある。
ドップラー効果を利用する計測法ではこの角度補正が必要となる。

(3) 測定

ドップラー効果の利用して、移動物体からの反射波の周波数と照射波の周波数の違いにより移動物体の速度を算出する。

電波の周波数 f ，波長 λ ，伝播速度 v の間には次の関係がある。

$$v = \lambda f \dots\dots\dots (2.1.1.1)$$

固定した観測点から波長 λ ，
周波数 f の電波を、速度 v_x で移動している物体に照射してその
反射波を観測する場合を考える。

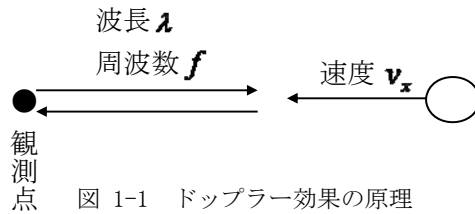


図 1-1 ドップラー効果の原理

この場合、観測点と移動物体の

距離は単位時間に $2 v_x$ 縮まるため、反射波の周波数は $2 v_x / \lambda$ だけ増える。観測される反射波の周波数 f_r は次式となる。

$$f_r = f + \frac{2 v_x}{\lambda} \dots\dots\dots (2.1.1.2)$$

(2.1.1.1) 式を用いて、書きかえると次式となる。

$$f_r = \left(1 + \frac{2 v_x}{v}\right) f \dots\dots\dots (2.1.1.3)$$

送信波と反射波を混合検波してその差の周波数 f_d を取り出すと

$$f_d = f_r - f = \frac{2 v_x}{v} f \dots\dots\dots (2.1.1.4)$$

となり物体の速度に比例したドップラー周波数が得られる。

電波流速計での使用周波数は $f = 10.525 \text{ GHz}$ ，電波の伝播速度 $v = 2.99793 \times 10^8 \text{ m/s}$ を (2.1.1.4) 式に代入すると次のようになる。

$$f_d = \frac{2 f}{v} v_x = \frac{2 \times 10.525 \times 10^9}{2.99793 \times 10^8} v_x = 70.215 \times v_x \dots\dots\dots (2.1.1.5)$$

つまり、速度 1 m/s あたり約 70 Hz の周波数の差異（ドップラーシフト）が得られる。

C-2. 電波流速計のハードウェア

前述のように電波流速計の測定原理はマイクロ波のドップラー効果であり、速度取り締まりレーダやスピードガンと同じである。しかし河川によるドップラー信号はさまざまな周波数成分を含んだ複雑なものである。こうした複雑なドップラー信号から流速値を得るためにデジタル信号処理技術を用いている。

電波流速計の主な機能を図 2.1.2 のブロック図に示す。また、各部の説明を以下に述べる。

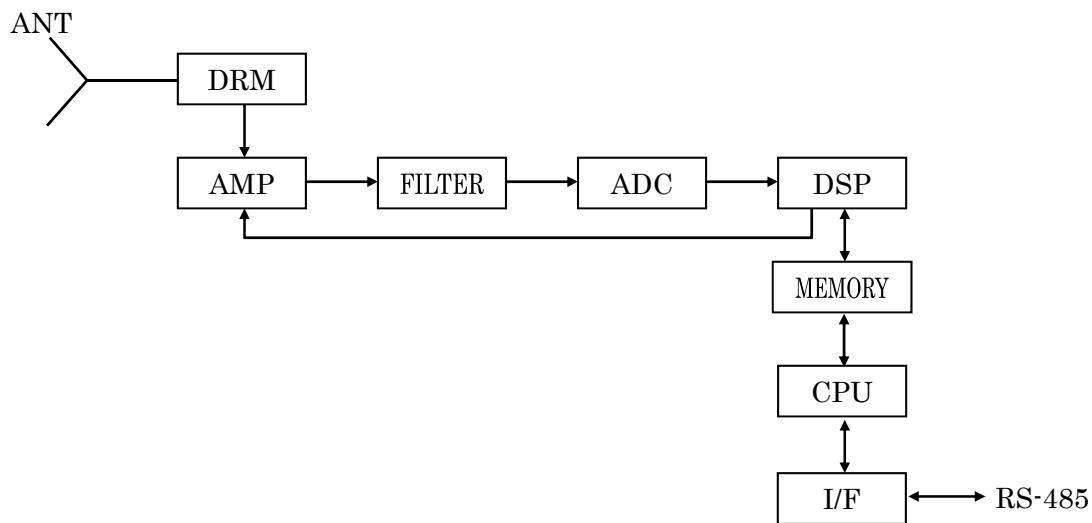


図 2-1 電波流速計の機能ブロック

- ① ANT : アンテナ。直径 30cm のパラボラアンテナ
- ② DRM : ドップラーレーダモジュール。マイクロ波の発振、送信波と受信波の混合検波を行う。
- ③ AMP : 交流信号増幅器。DSP からの設定により利得の調整が可能。
- ④ FILTER : フィルタ回路。計測対象の信号のみを通過させる。0.5m/s から 20m/s の測定範囲に対して、周波数 14Hz から 1400Hz の通過範囲を持つ。また、A/D のためのアンチエイリアスフィルタの機能も兼ねる。
- ⑤ ADC : ドップラー信号を取り込むための A/D 変換器。
- ⑥ CPU : 装置全体の制御、変換器との通信を行う。
- ⑦ MEMORY : S-RAM。CPU、DSP の双方からアクセスが可能。
- ⑧ DSP : ADC の制御、FFT 演算、ドップラースペクトルの積算、ピークサーチ処理を行う。
- ⑨ I/F : 外部機器との通信を行う。

C-3. 電波流速計の計測フロー

以下に計測の流れを示す。

- ①計測条件を取得して、マイクロ波の発射を開始する。
- ②ドップラー信号の A/D サンプルングを開始。データは AMP 利得に応じて正規化して、リングバッファにメモリする。この A/D サンプルングは他の処理を実行中の間もタイマ割り込みにより実行される。
- ③2 秒間待機。(FFT 処理に必要なサンプルングデータ数確保のため。)
- ④0.5 秒間ごとに次の処理を実行する。
 - ・ A/D サンプルングデータの実効値を計算して AMP の利得を調整する。
 - ・ 最新のサンプルングデータから約 1.5 秒前までのデータを DSP により FFT 演算をする。ドップラー信号スペクトルデータを積算する。
- ⑤5 秒ごと (設定された計測時間が 5 秒未満の場合は計測時間ごと) に次の処理を行う。
 - ・ 積算したスペクトルデータから流速によるピーク位置を探し出し、流速値を計算する。
 - ・ 積算スペクトルデータをクリアする。
- ⑥設定された計測時間ごとに、⑤で得られた流速データの平均を計算する。さらに移動平均処理を行い、流速データを出力する。
- ⑦変換器で流速値に角度補正をして表面流速を計算し出力する。

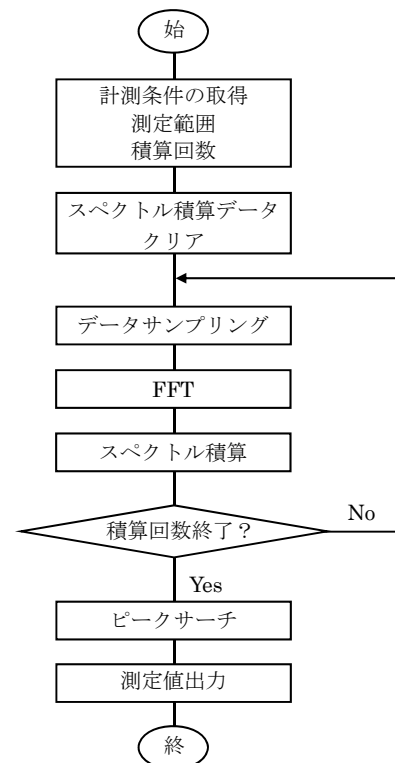


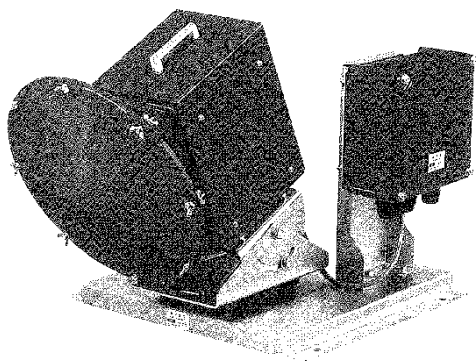
図 2.1.3 計測動作フロー

C-4. 電波式流速計の仕様

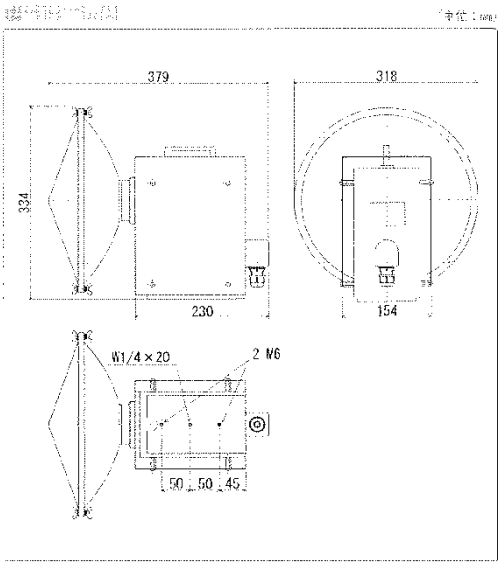
電波流速計には設置式と可搬式がある。いずれも商品として販売されている。それぞれについて国内の某メーカーの代表的な機種について、その概要・仕様を述べる。

設置型電波式流速計の仕様

使 用 電 波	10.525GHz±15MHz
使 用 電 力	65mW±50%
ア ン テ ナ	約 30cm パラボラアンテナ、レドーム付
ビ ー ム	半値角 10°
計 測 範 囲	0.5m/s～20m/s（水面の状態による）
精 度	±2%、±0.05m/s
分 解 能	0.01m/s
計 測 時 間	1 秒, 2 秒, 5 秒, 10 秒, 20 秒, 30 秒, 1 分, 2 分から選択
移 動 平 均	なし, 10 秒, 20 秒, 30 秒, 1 分, 2 分, 5 分, 10 分から選択
計 測 角 度	俯角 20° ～45°（40° を推奨） 偏角 0° ～20°（0° を推奨）
計 測 距 離	1m～20m（対水面間） ただし流速が 2m/s 以上の時は 1m～40m
使 用 環 境	気温 -20° ～50°
構 造	坊雨・坊滴
電 源	DC48V、最大 0.12A
アンテナ部寸法	318 (W)×379 (D)×334 (H) mm
免 許	無線局の免許が必要



設置型電波流速計の写真



設置型電波流速計の寸法

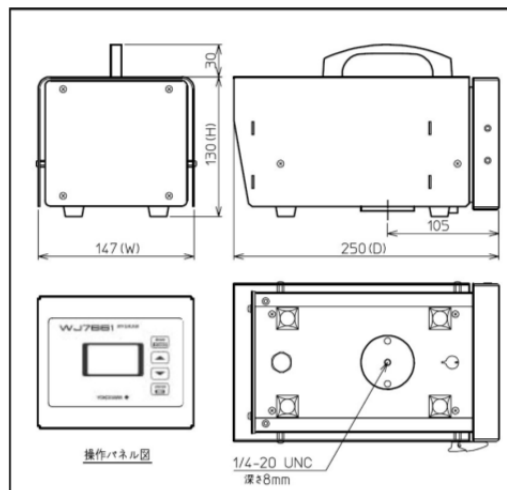
(写真・外形寸法図ともにメーカーからの提供)

可搬式電波式流速計の仕様

使用電波	NON 24.15GHz 7mW（特定小電力機器）
計測範囲	0.5m/s～20m/s（水面の状態による）
精度	±2%、±0.05m/s
分解能	0.01m/s
計測時間	1秒、2秒、5秒、10秒、20秒、30秒、1分から選択
移動平均	なし、10秒、20秒、30秒、1分、2分、5分、10分から選択
計測角度	俯角 20°～45°（40°を推奨） 偏角 0°～20°（0°を推奨）
計測距離	1m～20m（対水面間）
使用環境	気温 -20°～50°
構造	IP55
電源	①単三アルカリ電池×6本 ②外部電源入力：DC10.8～16.5V
インターフェイス	USB2.0
質量	約2.0kg（電池含まず）



可搬式電波流速計の写真



可搬式電波流速計の寸法

- ・可搬式電波流速計の写真は、国立研究開発法人土木研究所の業務において撮影したものである。
- ・可搬式電波流速計の寸法はメーカーより提供されたものである。

C-5. 電波式流速計の検定

河川砂防技術基準調査編（国土交通省水管理・国土保全局）「第 2 章第 4 節 4.4.4 流速計の検定」によれば、「なお、ADCP や電波流速計等のドップラー効果を原理とする流速計については、超音波や電波の送受信性能の確認を持って、上記の精度検証に代えてもよい」とある。

（3）において述べた通り、電波式流速計は照射する電波と受信する電波流速計との周波数差により表示される流速値（基準値）が定まっている。そこで特定の周波数を発する音叉を受信部で鳴らし、それを受けて表示される流速値と基準値を比較し、精度検証を行う。（「4.4 電波流速計についての保守点検」参照）

ただし、電波流速計の年に一度の点検では、送受信性能のみならず、送受信器の向きやシステムの不具合がないか等の点検も合わせて行うべきであるため、メーカーによる点検を受けることが原則必要である。

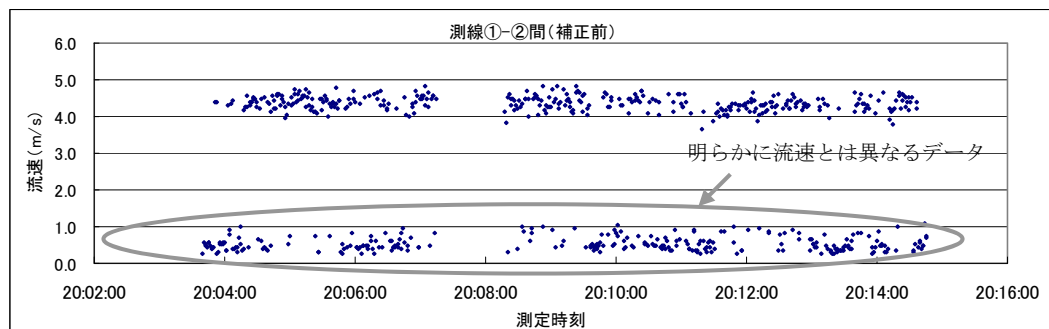
C-6. 電波式流速計観測に関する今後の取り組み

電波式流速計は設置型にしろ可搬式にしろ、まだ完成された技術と言い切れる段階にはない。今後も現場でのユーザーとメーカー等が常に情報交換等をしながら、その精度を向上させていくことが重要である。

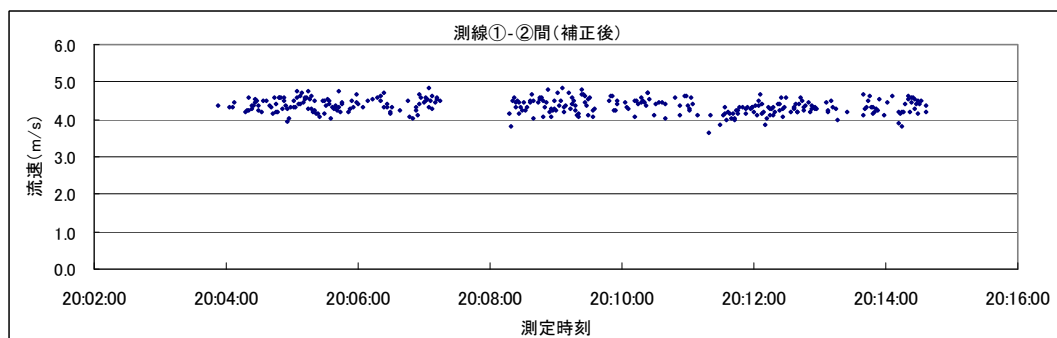
以下、主に可搬式電波式流速計のユーザーから聞き取った今後の課題について簡単にまとめる。

1) 電波式流速計観測に関する今後の課題

降雨時に使用した場合に、明らかに流速とは異なる極端に遅い値を検出する場合がある。



①可搬式電波式流速計により得られる流速データの時系列（補正前）



②可搬式電波式流速計により得られる流速データの時系列（補正後）

上図は、台風による降雨時に可搬式電波式流速計により観測された流速データの時系列図である。①が補正前の図である。4.0m/s～5.0m/sの間と、0.0m/s～1.0m/sの間にデータが集中している。現場において平行して実施された ADCP による横断観測等から、この時の流速は約 5m 前後であり、0.0m/s～1.0m/s の間のデータは明らかに流速とは異なるデータであった。

現場において可搬式電波式流速計を実際に用いている立場から観察して、電波照射面につく雨滴等が影響を与えているように思われた。

今後、可搬式電波流速計を使用していく上で考えられる課題は以下の通りである。

《対策案 1：瞬時値で計測する》

- 可搬式電波式流速計の観測データの記録方式には、大きく分けて、移動平均値を記録する場合と瞬時値を計測する場合の 2 種類がある。降雨の影響と考えられる異常値はランダムに発生するため、移動平均値を記録してしまうと、正常値と異常値を平均化した値が記録されてしまうため、全体的に観測精度が低下する。

- よって、1 秒間隔（最短記録時間）の瞬時値で記録しておくことで、異常値を計測した場合でも後処理で異常値を除外することが可能となる。

《対策案2：フードを設置する》

- ・ 今回発生した異常値は、基本的に降雨によるものと考えられる。特に、可搬式電波流速計の電波照射面に雨滴が付着すると、照射面を流れ落ちる雨滴に電波が反射して、計測値に悪影響を及ぼすことが考えられる。本業務で使用した可搬式電波流速計の製造メーカーの研究成果でも、電波照射面に水を垂らした場合に極端に小さな流速値が計測された事例が確認されている。
- ・ よって、降雨発生時に携帯型電波流速計で観測する場合には、電波照射面への雨滴の付着を軽減させるようなフード等を作成し、それを電波流速計に取付けて観測する等の配慮が必要がある。