

ハイドロフォンを用いた流砂量計測手法

筑波大学大学院

生命環境科学研究科

持続環境学専攻

博士（環境学）学位論文

長谷川祐治

要 旨

流砂量計測は、河道や河川環境の時間的・空間的な変動を知り、総合土砂管理の観点から各領域間での連携を図るため、実施することが必要である。実際の河川では直接的・継続的に流砂を採取して計測することが困難なことから、間接的に計測する手法が検討され、水源域では、ハイドロフォンによる掃流砂の計測が広く行われている。しかしながら、ハイドロフォンを用いた流砂量解析法についてはいまだ合理的な方法が提案されていない。これは、事前に運動量と振幅値の関係を把握する必要があるが、標準的に粒子の速度を推定するための計測機器が設置されていないこと、運動量と振幅値の対応関係が広い範囲で明らかにされていないこと、流砂の運動によるパイプ衝突の相対速度が異なること、流砂量が多い状態での衝突頻度と減衰の関係が明らかにされていないこと、などが理由として挙げられる。本論文はこれらの課題を踏まえて実験を通じてハイドロフォンによる流砂量解析法を評価するとともに、現地観測に必要な仕様を取りまとめた。

空気中で粒子をパイプに衝突させた実験から運動量と振幅値の関係を整理した。その結果、ハイドロフォンから得られる音響信号のうち、円周方向の固有振動モードの振幅は運動量と良い相関を示し、より広い範囲の運動量に対応できる点から流砂量解析法に適していることを示した。その関係性を用いて、実験水路でハイドロフォンによる流砂量推定手法を評価した。実験は、勾配と流量を一定にして一様砂と一様砂を混合した混合砂を流して、粒径別の粒子数と閾値ごとに記録される回数を比較した。一様砂の結果から、流砂量が多い状態では衝突回数が極端に少なくなり、検出率（回数/粒子数）が低下することを確認した。流砂の力の釣り合いから移動層厚を推定すると、本実験条件下ではほぼ全ての粒子がハイドロフォンに衝突したと推測される。そのため、衝突頻度が大きいと信号が飽和され閾値を下回らなくなるため、回数が記録されずに検出率（回数/粒子数）が低下したと考えられる。実験結果より、粒子数が約 30 s^{-1} 以下では検出率（検出回数/粒子数）がほぼ 1 になることから、粒子衝突後から約 0.033 s 後に次の粒子が衝突すると回数が検出されることがわかる。1 つの粒子を衝突させた時の音響信号の波形より、0.033 s 後の振幅値は最大値の約 1/10 であった。すなわち、最大振幅値の 1/10 以下になれば、波形の重なりによる影響が小さくなる。さらに、粒子の運動によりパイプへの相対速度が異なることを確認した。本検討では一様砂で得られた運動量と振幅のばらつきの割合を統計的に処理して、その結果を混合粒径に適用し、それぞれの閾値での検出回数から流砂量を推定する解析手法を評価した。

以上より、ハイドロフォンの流砂量解析法を提案するとともに、現地での観測に必要な仕様を取りまとめた。ハイドロフォンは、固定方法により運動量と振幅の関係が変化することが想定されるため、パイプ単体だけでなく固定基礎も含めた一体形成で製作し、その運動量と振幅の関係を確認することが必要である。また、計測対象となる流量や粒径から運動量の範囲を把握し、ハイドロフォンの長さの設定方法を示し、粒子速度を推定するための計測機器を標準的に設置する必要性を示した。

目 次

第1章 緒 論	1
第2章 ハイドロフォンを用いた流砂量観測の原理と流砂量解析法	10
2.1 ハイドロフォンを用いた流砂量観測の原理と装置	10
2.2 波形の整形方法（一次処理）	12
2.3 流砂量解析（二次処理）	14
2.3.1 衝突回数に着目した処理法	14
2.3.2 残響時間に着目した解析法	16
2.3.3 振幅の時間積分値に着目した解析法	18
2.4 現地の設置例	20
2.5 結 語	21
第3章 水路実験での流砂量解析手法の評価	23
3.1 実験で使用したハイドロフォンと実験水路と方法	23
3.1.1 ハイドロフォンの仕様	23
3.1.2 現地の地形を模した水路を用いた実験	24
3.1.3 直線矩形断面水路を用いた実験	26
3.2 地形を模した水路での検出回数と流砂量の関係	29
3.3 直線水路による一様砂の実験	32
3.3.1 粒径と検出回数の関係	32
3.3.2 粒子数と検出回数の関係	35
3.3.3 アンプ倍率と検出回数の割合の関係	37
3.3.4 各 Ch の検出回数の差による振幅値の推定	39
3.4 直線水路による混合砂の実験	43
3.4.1 アンプの倍率－検出回数の割合と混合砂の粒径比－重量比の関係	43
3.4.2 各 Ch の検出回数の差による振幅値の推定	45
3.5 結 語	48
第4章 粒子衝突時のハイドロフォン内部の音響特性	49
4.1 実験概要	49
4.2 ハイドロフォン内部の音響特性	52
4.2.1 音響信号のスペクトル解析	52
4.2.2 単一倍率のアンプを用いた時の運動量と固有振動の振幅の関係	54

4.2.3 可変倍率のアンプを用いた時の運動量と固有振動の振幅の関係	56
4.3 結 語	57
第5章 実験水路でのハイドロフォン法の適用	58
5.1 流砂の存在高さと移動速度について	58
5.2 実験概要	63
5.3 空気中と水中における運動量と最大振幅値の比較	66
5.4 一様砂に関する実験	66
5.4.1 検出回数と粒子数の関係	66
5.4.2 最大検出粒子数	69
5.4.3 運動量を求める時の速度	71
5.4.4 粒子の運動による振幅のばらつき	72
5.5 混合砂に関する実験	74
5.5.1 行列 A の計算	74
5.5.2 流砂量解析手法の検討	78
5.6 結 語	82
第6章 結論および展望	83
6.1 結論	83
6.2 ハイドロフォンに必要な仕様	87
参考文献	89
謝辞	93

表 目 次

表-3.1	各アンプのチャンネルと倍率	24
表-3.2	一様砂を使用した実験ケース一覧表	28
表-3.3	混合砂を使用した実験ケース一覧表	28
表-3.4	Method1 で記録した各 Ch の検出回数と各 Ch の検出回数の差 (10 l/s)	40
表-3.5	Method1 で記録した各 Ch の検出回数と各 Ch の検出回数の差 (20 l/s)	40
表-3.6	Method1 から推定した Method2 の各 Ch の回数 (10 l/s)	42
表-3.7	Method1 から推定した Method2 の各 Ch の回数 (20 l/s)	42
表-3.8	Method1 で記録した各 Ch の回数と各 Ch の検出回数の差 (10 l/s)	46
表-3.9	Method1 で記録した各 Ch の回数と各 Ch の検出回数の差 (20 l/s)	46
表-3.10	Method1 から推定した Method2 の各 Ch の検出回数 (10 l/s)	47
表-3.11	Method1 から推定した Method2 の各 Ch の回数 (20 l/s)	47
表-4.1	単一倍率のアンプを用いた実験ケースの一覧表	50
表-4.2	可変倍率のアンプを用いた実験ケースの一覧表	51
表-5.1	一様砂を使用した実験ケース	64
表-5.2	混合砂を使用した実験ケース	65
表-5.3	一様砂使用時の粒子数と検出回数の結果 (ケース 1～8, ハイドロフォン 50cm 使用)	67
表-5.4	一様砂使用時の粒子数と検出回数の結果 (ケース 9～16, ハイドロフォン 50cm 使用)	68
表-5.5	一様砂使用時の粒子数と検出回数の結果 (ケース 17～22, ハイドロフォン 10cm 使用)	68
表-5.6	行列 A (ケース 1～8)	75
表-5.7	行列 A (ケース 9～16)	76
表-5.8	行列 A (ケース 17～22)	77
表-5.9	粒子数と検出回数の結果 (ケース 23-25)	78
表-5.10	粒子数と検出回数の結果 (ケース 26～31)	79
表-5.11	粒径別流砂量と全流砂量 (ケース 23～31)	79

図 目 次

図-1.1	流砂の運動形態	3
図-1.2	天竜川上流河川事務所が用いた装置	5
図-1.3	間接法と併用して用いられている直接法（ピット式）の模式図	6
図-2.1	ハイドロフォンシステムの構成	10
図-2.2	ハイドロフォンと内部で発生する音の固有モード	11
図-2.3	音響信号のスペクトル分布（左：小さな礫，右：大きな礫）	11
図-2.4	運動量と最大振幅値の関係	12
図-2.5	音響信号の生データの模式図	12
図-2.6	バンドパスフィルターで抽出した波形データの模式図	13
図-2.7	正の振幅値を結んだ波形データの模式図	13
図-2.8	音響信号と整形した波形データの模式図	13
図-2.9	検出回数としての記録方法（上図：信号を増幅させる方法， 下図：閾値を複数設定する方法）	14
図-2.10	各閾値の検出回数	15
図-2.11	持続時間の概念図	17
図-2.12	流砂量と検出回数の関係	17
図-2.13	無次元掃流力に対する衝突率	18
図-2.14	整形した波形データの積分値	19
図-2.15	流砂量と音圧平均値の関係	20
図-2.16	衝突回数と検出率の関係	20
図-2.17	現地のハイドロフォンの設置状況	21
図-3.1	本実験で使用したハイドロフォンシステムの構成	23
図-3.2	地形を模した水路の全景	24
図-3.3	地形を模した水路の縦断図	25
図-3.4	地形を模した水路の実験で使用した実験砂の粒度分布	25
図-3.5	供給ハイドログラフ	26
図-3.6	直線矩形断面水路を用いた実験で使用した混合砂の粒度分布	27
図-3.7	実験水路模式図	27
図-3.8	検出回数と流砂量の時間変化の関係（Ch1）	30
図-3.9	検出回数と流砂量の時間変化の関係（Ch2）	30
図-3.10	検出回数と流砂量の時間変化の関係（Ch3）	31
図-3.11	検出回数と流砂量の時間変化の関係（Ch4）	31

図-3.12	検出回数を流砂量の関係	32
図-3.13	Q=10 l/s, AMP1 の粒径と総検出回数 の関係 (ケース S1-1, 1-5, 1-9, 1-13, 1-17)	33
図-3.14	Q=10 l/s, AMP2 の粒径と総検出回数 の関係 (ケース S1-2, 1-6, 1-10, 1-14, 1-18)	33
図-3.15	Q=20 l/s, AMP1 の粒径と総検出回数 の関係 (ケース S1-3, 1-7, 1-11, 1-15, 1-19)	34
図-3.16	Q=20 l/s, AMP2 の粒径と総検出回数 の関係 (ケース S1-4, 1-8, 1-12, 1-16, 1-20)	34
図-3.17	総検出回数と粒子数の関係 (ケース S1-9~1-20, 縦軸の最大値 100,000)	36
図-3.18	総検出回数と粒子数の関係 (ケース S1-9~1-20, 縦軸の最大値 4,000)	36
図-3.19	4 mm のアンプ倍率と総検出回数の割合 の関係 (ケース S1-9~S1-12)	37
図-3.20	8 mm のアンプ倍率と総検出回数の割合 の関係 (ケース S1-13~S1-16)	38
図-3.21	16 mm のアンプ倍率と総検出回数の割合 の関係 (ケース S1-17~S1-20)	38
図-3.22	衝突頻度の違いによる波形の模式図	39
図-3.23	混合砂Ⅰの倍率－総回数の割合と粒径比－重量比 の比較 (ケース S2-1~S2-4)	43
図-3.24	混合砂Ⅱの倍率－総回数の割合と粒径比－重量比 の比較 (ケース S2-5~S2-8)	44
図-3.25	混合砂Ⅲの倍率と総回数の割合と粒径比－重量比 の比較 (ケース S2-9~S2-13)	44
図-4.1	本実験で使用したハイドロフォンシステムの構成	50
図-4.2	実験方法	51
図-4.3	音響信号のスペクトル分布の一例 (上段 : 1.0 g・m/s, 中段 : 8.3 g・m/s, 下段 : 405 g・m/s)	53
図-4.4	各固有振動モードにおける運動量と最大振幅値の関係 (上段 : 軸方向モード, 中段 : 円周方向モード, 下段 : 径方向モード)	55
図-4.5	円周方向モードの運動量と最大振幅値の関係	56
図-5.1	掃流砂の運動に関する模式図	59
図-5.2	河床近傍を運動する掃流砂粒子の模式図	59
図-5.3	水中での円周方向モードの運動量と最大振幅値の関係	66
図-5.4	個別衝突の音響信号の一例 (d_1 : 17.5 mm)	69
図-5.5	個別衝突の音響信号の一例 (d_2 : 12.3 mm)	70
図-5.6	個別衝突の音響信号の一例 (d_3 : 7.1 mm)	70
図-5.7	個別衝突の音響信号の一例 (d_4 : 3.1 mm)	71
図-5.8	粒径と運動量から得られる振幅値の関係	72
図-5.9	粒子の衝突速度の模式図	72
図-5.10	u_s'/u_s と頻度の累積値の関係	73

図-5.11	粒径別流砂量の実測値と解析結果の比較	80
図-5.12	全流砂量の実測値と解析結果の比較	81
図-6.1	ハイドロフォンを固定する装置のイメージ図	87

第1章 緒論

土砂移動は、ダム貯水池における堆砂を含めた河床上昇、低下、汀線の前進・後退といった地形の変化をもたらす。地形の変化は、貯水容量の低減、流下能力の低減、橋梁等の基礎部の不安定化、河口閉塞、越波量の増大、生態環境としての産卵場や利用場の消失など、防災・環境・利用上の問題を引き起こす。このような問題に対して、砂防・ダム・河川・海岸の各領域で個別に対応しそれぞれに効果を発揮している。

一方で、土砂移動現象が不連続的・長期的で、その影響が即座に広い範囲にわたって現れないという特性を持っている。現在の領域ごとの対応では限界があり、領域の関係者間の意志疎通が必ずしも十分図られておらず、各領域の土砂管理対策が別領域の河床変動に影響を及ぼす場合があることから、土砂が移動する場合全体として流砂系を考えた「総合土砂管理」が求められている^{例 えば 1)-6)}。各領域での対応を相互に連携させるには、それぞれの領域での通過土砂量を把握する必要がある。加えて、水源域では下流域に比べて河床変動が大きく、崩壊土砂や支川からの土砂の流入、河床堆積物の側岸侵食による土砂生産などの予測が難しい現象による土砂移動が活発であり、直接的な災害の原因となっている。

水源域における土砂管理は主として土砂災害の軽減を目的とし、種々のタイプの砂防堰堤が整備されている。不透過型砂防堰堤は、満砂するまでは洪水の規模に関係なく土砂を捕捉する。満砂後も堆砂勾配が元河床よりも緩い間は、土砂の下流への流下をゆるしつつも、さらに土砂を捕捉する。しかしながら、その結果、堰堤下流では上流からの土砂供給量が減少し、河床低下や河川環境に影響を及ぼす場合がある。透過型砂防堰堤は平常時に流砂の捕捉をせず大きな河床変動を生じない利点がある。透過型砂防堰堤のうち鋼製スリット堰堤は、主に土石流区間に設置されている。この形式の堰堤は、スリットに礫が閉塞しはじめて土砂を捕捉する。一般に閉塞後は捕捉効果を回復させるため除石が行われる。除石した土砂は、土捨て場を設けて処分する場合がほとんどである。緩勾配区間ではコンクリートタイプの透過型砂防堰堤が設置され、洪水時に堰上げにより土砂を捕捉する。しかしながら、堰上げによる土砂調節は時間的な変動が大きく、時として減水期に直下流の河道で堆積が生じる場合がある。

これらの透過型堰堤の効果をより確実なものとするため、理想的な透過型堰堤の形として、シャッター付砂防堰堤⁷⁾⁻¹⁰⁾が考案された。シャッター付砂防堰堤は幅の広い開口部を有する透過型砂防堰堤の一種で、洪水期にシャッターで開口部の形状をコントロールし、堰堤からの流砂量を制御しようとするものである。

近年、深層崩壊により天然ダムが形成されるケースが多発し、決壊により規模の大きな災害が発生している。シャッター付砂防堰堤は、これらの災害に対しても機能することが期待されてい

る。しかしながら、実際にシャッター付砂防堰堤を運用するにあたって、シャッターを開閉するタイミングの基準がなく、土砂流出時にシャッターを確実に作動させるための技術的な課題が残されており、現状ではシャッター付砂防堰堤はまだ運用されていない。

シャッター開閉の判断基準として、豪雨や台風の発生時の雨量を指標とする方法が挙げられている。しかしながら、水源域では降雨と流砂量は必ずしも 1 対 1 で対応するものではないため¹¹⁾、流砂量観測によってシャッターを開閉する判断基準を設定することが必要である。また、シャッター付砂防堰堤は流砂量を制御するため、その機能を検証するには流砂観測を行い、時系列流砂量を把握する必要がある。

当初、流砂観測は土砂移動が活発な河川でのみ実施されてきたが、河川砂防技術基準（調査編）の改訂作業が進められて、平成 23 年度以降は標準的な調査として、全国的に広がり水源域において流砂水文観測が位置づけられた¹²⁾。近年、水源域までを含めた流量や流砂量観測の必要性が高まってきており、河道や河川環境の時間的・空間的な変動を知り、流域の健全度を土砂動態から把握し、河川のインフラ施設の管理の効率化を図るために実施されている。また、上流域の土砂生産やそれにとまう土砂の流出状況の時間的・空間的な変化を監視することは、総合的な土砂管理のみならず、天然ダム等の大規模土砂災害に対する危機管理、流域監視の観点からも重要である。流砂量観測を実施するには、それぞれの土砂移動現象に沿った計測が必要で、信頼性の高いデータを継続的かつ安定的に取得する必要がある。すなわち、(1)連続的に観測できること、(2)信頼性の高い解析（推定）手法であること、(3)流水によって破壊されないこと、この 3 つの要件を満たすことが重要である。

一般に土砂移動現象は、河床と交換されることなく流下する wash load と河床と交換しながら流下する bed material load に分けられている。一般に wash load とは河床から掃流砂の形式をとることなく直接浮上離脱し、浮遊形式で移動する土砂輸送を表す。bed material load には粒子間応力が支配的な土石流、土砂流のような集合流動と、流れに伴って移動する掃流砂と浮遊砂に分類される。掃流砂とは、絶えず河床と接触を保ちつつ移動する土砂の流送形式を表し、その河床との接触により生じる運動形態が滑動、転動および跳躍に分類される。これらの移動軌跡は乱れの影響はほとんど受けずかなり規則的であるが、河床の凹凸に影響されて複雑な動きとなる。浮遊砂は乱れの影響を顕著に受けると、底面付近から水面まで幅広く分布する。また、その動きはランダムで、漂うような動きをとり、一度移動を開始すると、掃流砂よりも長い距離にわたって流送される。図-1.1 に流砂の運動形態を示す。

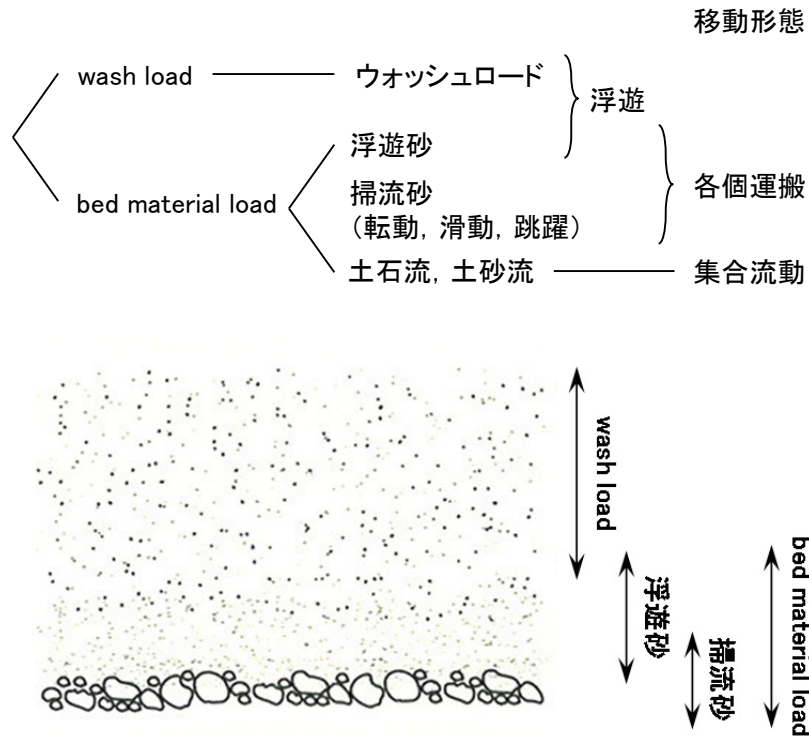


図-1.1 流砂の運動形態

流砂観測には大きく分けて間接法，直接法の 2 つの方法がある．間接法とは，流砂を直接採取せず流砂によって生じる何らかの副次的な現象（音・振動など）を用いて計測する方法である．直接法とは，流砂量を実際に計測する方法である．間接法，直接法のそれぞれについて，観測する際にその場所に設置して終われば取り外して別のサイトに移動させてまた観測することのできる可搬式と，特定の場所に機器を固定して連続的に観測を行う固定式の 2 つに分けられる．ここでは，従来，実施されてきた土砂移動が活発な河川での浮遊砂・掃流砂・土石流の流砂観測の実例を示す．

水源域のような急勾配では流れの力が大きく，特に土石流のような破壊力のある流れでは土砂を直接採取することは危険であり現実的にも困難である．また，土石流の発生は雨量と必ずしも一致せず，間欠的な動きをする現象であることから位置を特定できたとしても発生時刻までを特定することは難しく，土石流の観測には間接法の可搬式より固定式が有効であると考えられる．

wash load と浮遊砂は，直接法として水と土砂を同時に採取して，それぞれの重量または体積を測定してその比率から求める方法と，間接法として光の減衰から濃度を推定する方法がある．計測方法としては，流れの中に直接機器を投入する方法と，流水からホースなどによって浮遊砂を含む泥水を測定装置へ送る方式とがある．

水源域では，流れが局所的に大きく変動するため，固定された取り入れ口から泥水を採取することは難しく，自然の落差や砂防堰堤などの構造物の落差を利用して送水する方法やポンプなど

によって吸い上げる方法が考案され、現在も各種の方法で観測が実施されている^{例えば 13)-16)}。これらは、間接法（例えば、濁度計）による連続観測と直接採取した土砂を併用するのが一般的である。しかしながら、濁度計は光学的手法であることから長期安定性に課題があり、一方、直接採取する方法は、手間がかかる上に、小流域では短時間で到達する洪水ピークを逃さずに採水を行うことが難しいのが現状である。固定式と可搬式では、可搬式では連続計測に向かないため、長時間の連続した移動量を算出する際には固定式が望ましい。

掃流砂量の観測は、1990年代までは土砂を直接採取して、その量を計測する直接法が一般的に行われてきた。例えば、出水前後での砂防ダムの堆砂量の変化を測量する方法、河床にピット流砂観測装置を設置して土砂を捕捉する方法、洪水流の一部を導水路で観測施設に導く方法などがある。現在試みられている掃流砂量の計測法は、流砂を採取し計測する直接法と、副次的な現象（音・振動など）を用いて計測する方法を用いて代表値を計測し、そこから流砂量を推定する間接法がある。

一方で、直接法で土砂を採取するためには施設の建設・維持管理に費用と労力を要すること、計測可能な時間が設備の容量と流砂量に支配され長期間にわたる観測が困難であることなどの問題があり、連続計測には適していない。間接法を上手く利用することで、中でも特定のサイトを連続して観測ができる固定式を採用することで、安定した連続計測が可能になると考えられる。

京都大学防災研究所穂高砂防観測所では、河道の一部に流水と掃流砂を同時に取り入れる流入口を設け、パイプで転倒型掃流砂量計に導き、一定重量で転倒するバケットの転倒回数を電気信号に変えて計測するもので、遠隔連続記録が可能な流砂観測機器が検討されている。また、河道に設置した急勾配のコンクリート水路や砂防堰堤の水通し部のような水深があまり大きくないところに、水深より大きな石礫の移動を TV カメラによる映像によって比較的明瞭に読み取ることによって掃流砂量の推算が行われている^{17),18)}。

河床近傍を流れる流砂（掃流砂）の計測は、直接法を用いて各個運搬の特性に着目して様々な方法、機器を用いて実施されてきた。与田切川中流部の坊主平砂防堰堤では、図-1.2 に示すような装置で流量と流砂量が計測されている。水と流砂は本堤左岸袖部の取水口から採取する。流量は、導水管に設置された管内流量計で計測され、流砂量については流水、流砂が段別に設置された回転式のふるいに導かれてふるい分けされ、単位時間当たりの残留土砂重量と回転式のふるいを通過した濁水の土砂濃度が計測される。そして、以上の計測とともに、採取土砂の粒度分析を行うことによって、水深別の流砂の量と質を時系列的に計測することが可能である。この方法は、出水時でも安全な場所に設置する必要がある、導水管などを土砂の閉塞が起こりにくい構造とすると共に、もし閉塞が生じてメンテナンスにより除去できる構造となっている必要がある。ただし、上記の方法は大規模な施設が必要となり、その設置と観測、そして維持管理に手間と費用が掛かることが課題である。しかしながら、砂防堰堤の水通し天端に穴を開けるため、流水抵抗が最小限におさえられ、そして施設が大規模であることから出水時の採水が可能である。特に、掃流砂を採取する方法として有効であると考えられている¹⁹⁾。

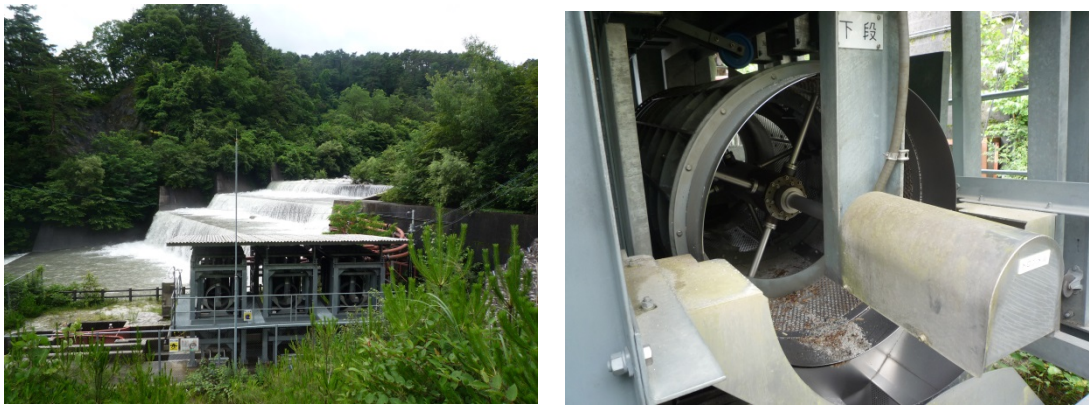


図-1.2 天竜川上流河川事務所が用いた装置

昭和 20～30 年代に建設省土木研究所河川研究室により開発された装置は、橋梁などから装置をクレーンで吊り下げて計測する。流れの力が大きく、流速が大ききところでは、破壊されてしまう可能性が高く、上手く計測できないことが報告されている。また、河床の凹凸と機器との間に隙間ができてしまうため、掃流砂が漏れてしまう欠点がある一方で流砂を直接採取するため粒度分布が計測できるという利点がある²⁰⁾。

その他に、バックホウのバケット先端に採砂器をワイヤで吊し、採砂器流入口の上部に取り付けたロープを上流から引っ張ることで、流入口が流向に対し垂直な方向に位置するように通水路の中央部に静置して、採砂量が捕捉袋の半分程度になるまで採取する方法がある²¹⁾。これは、Arnhem 式の採砂器をベースに Helley と Smith が改良を加えたもので（Helley-Smith 式採砂器（圧力差型））²²⁾、流入口の形状に特徴があり、構造は、アルミニウム管でノズルと尾翼を支える簡単なものでノズルは下流方向に広がる形状をしており流入速度の低下を防いでいる。ノズルの後部には 0.25mm メッシュのポリエステルの袋をゴムバンドで取り付ける。これは平均流速が 3m/s、粒径 2～10mm の河川に用いられるように設計されたもので、河川の状況に応じて寸法を拡大したりパイプもステンレスを用いるなどの改良がなされている。

これらの直接法は、採取した土砂の粒度を解析することが可能であり、流砂量を直接的に把握することができる利点がある。浮遊砂や掃流砂はそれぞれを計測できる機器や、両方の移動形態を計測できる機器もある。

一方で、流砂を連続して直接的に採取するには落差を設ける必要があるため、落差が設けられないところや緩勾配区間では大量に採取することが困難である。連続計測を実施する場合には、採取した土砂を河道に戻さないと流砂の状態が変わってしまうが、水・土砂の採取方法によって（特に土砂を選択的に採取した場合）、場の状態を変えないように河道へ土砂を戻すことは難しく、下流河道へは本来流れるべき土砂が流れないため河床低下を引き起こす原因となり、現実的に実施するのは困難である。また、 τ_* が 0.3 以上の領域では採取することが難しいことが報告されており²⁰⁾、破壊力のある土石流のような流れの計測は困難である。直接法の可搬式では、その機器を

溪流へ運びセットアップを行う時間が必要となるが、土石流のような発生から終了までの時間が数分程度と短いイベントについては、発生溪流へのアクセスも難しいと考えられることから、計測が不可能である。時間的・空間的に間欠的に移動する現象についても、その現象を上手く示すような間隔（時間・空間）で土砂を採取することは、直接法では難しい。直接的に土砂を採取するためには施設の建設・維持管理に多大な費用と労力を要すること、出水中の流砂量の変化を時系列的に追跡することが困難であること、計測可能な時間が設備の容量と流砂量に支配され長期間にわたる観測が困難であることなどの問題を解決する必要がある。

そのため現在は、図-1.3 に示すような間接法のキャリブレーション用として限られた場所で短時間での土砂量の計測が実施されている²³⁾。河道内に枡（ピット）を設けて、内部に入った砂の重量を圧力センサで計測するピット式も直接法の一つであり、この方法単独では他の直接法と同じく連続計測には適しない。しかしながら、間接法と併用する場合は流れに影響せず、計測中は捕捉された土砂を除く必要もないことから、現在でも間接法と併用して実施されることの多い計測法の一つである。

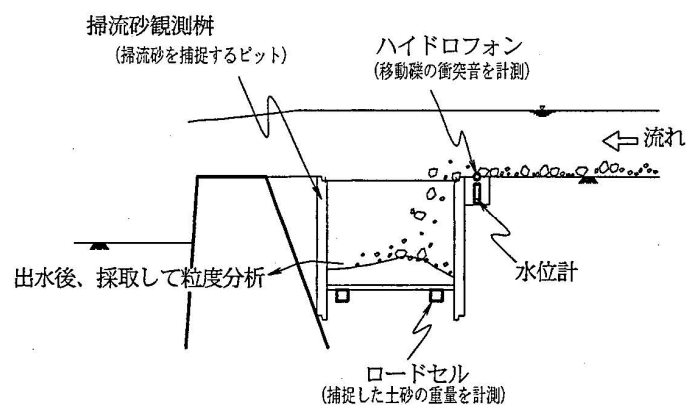


図-1.3 間接法と併用して用いられている直接法(ピット式)の模式図²³⁾

上記の直接法の欠点を補う方法として提案されたのが、土砂移動に伴う副次的な現象を観測し、掃流砂量を求める方法である。間接法の手法としては、土砂移動に伴う振動を計測する地盤振動法²⁴⁾⁻²⁷⁾、超音波発信器とセンサーを用いて、その断面内を通過する砂礫を映像化する超音波映像法²⁸⁾⁻³¹⁾、パイプの中にマイクロフォンを密閉して砂礫の衝突音から流砂量を推定する音響法を利用したハイドロフォン³²⁾⁻⁵¹⁾などが挙げられる。現時点で実用化されている間接法は連続計測を目的としているためほとんどが固定式であり、以下に示すのも全て固定式の間接法である。

また、土石流によって発生し地中を伝わる音を地中に埋めたパイプ内のマイクロフォンによって捕捉し、得られた電気信号を処理することによって土石流の発生検知及び流量推定を行う手法が挙げられる。土石流の発生検知は、出力信号があるレベルをある継続時間を超えたときに警報信号を発生するものである。流量推定は、同じ出力信号のスペクトルを求め、そのピーク値から推

定する方法である。桜島野尻川で実用化試験が行われ、その実用性が確認されている²⁴⁾。

一方で同じ野尻川の流路工において、振動センサーによる土石流の発生を検知及び流量の推定を行っている²⁵⁾。それによると、土石流による地盤の振動は河川から離れるに従って減衰するため、火山活動や地震現象と若干異なるようであることを示した。この応答特性の違いに着目すれば、土石流を識別することが可能である。そこで、卓越するパワースペクトルの振動レベルから流量を推定する式を導いている。

その他には、地盤振動の加速度という、より直接的な物理量を用いた解析を試み、ピーク流量とピーク加速度の関係、ならびにサージの体積と振動、加速度、振幅の積分との関係を導いている²⁶⁾。このような地盤振動による計測を通常の流砂に適用し、流砂量と振動レベルの間に明確な相関のあることを見出しているが、その関係は粒径に強く依存している。そこで、振動強度とともに、スペクトルを解析することによって流砂量とその粒径を推定することを試みているが、実用化には至っていない²⁷⁾。

超音波映像法は、水路床の横断方向に超音波発信器とセンサーを多数並べて、それらを順次スキャンすることで、その断面内を通過する砂礫を映像化し、画像処理によって流砂量を求めることができる。と示されている。その場合、超音波のスキャンが速ければ、1断面のデータからでも流砂量を求めることが可能であるが、2断面さらには多段面と断面数を増やすことによって、流砂の移動速度、濃度分布など、より多くの情報を得られることが期待されている。しかしながら、データ量や膨大な計算を要するため、実用化が難しいとされている。また、現地に適用するには、超音波振動子の流砂による破壊や太陽光による構造的な疲労など耐久面での問題も考えられ、実用化にはかなりの時間を要すると考えられている³¹⁾。

ハイドロフォンは、パイプの中にマイクロフォンを密閉状態に封入して、流れに垂直になるようパイプの1/4程度が河床から突出するように河床面に設置し、粒子が衝突した時の音を記録するものである。流砂がその装置に対してある統計量に従って衝突すると考えられており、衝突するときの音の大きさから、流砂量を間接的に求めようとするものである。

ハイドロフォンによる流砂観測法については、1986年にスイスの森林研究所(the Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape; FSL)¹⁵⁾で初めて実用化され、音響センサーを水文観測所に設置して流砂量の強度と頻度が観測された。測定から、流砂の始まる流量は春と秋は小さく、夏に大きいこと、その理由は出水のない期間の長さに関係すること、ハイドロフォンの記録する回数は掃流砂量と強い相関があることが確認されている。これは、流域面積0.7 km²の小流域に設置されたもので、鉄板の下に取り付けられたマイクで砂礫が衝突した回数を数え、ある程度以上の回数になると記録が開始される。ここでは、流量と1分あたりの回数が表示され、流砂のピークが流量のピークに対応していないことが指摘されている。また、出水ごとの掃流砂量と回数の関係については相関が良いことが示されている。

これと同時期に日本でもハイドロフォンの検討が本格的に行われて³²⁾、1991年に富山県の常願

寺川支川の称名川の雑穀谷で初めて流砂観測が実施された³⁵⁾。その後、1994年に兵庫県六甲山の都賀川の支川ハチース谷で観測を始めて³⁶⁾、洪水時にハイドロフォンに衝突した粒子の回数を記録した。その後は、土砂流出との特性と関連付けるため、六甲でのハイドロフォンの回路の改良が行われるなど、粒子の衝突した回数から流砂量を推定する手法が考案されている³⁷⁾。

常願寺川流域ではスリット型砂防堰堤のスリット部に電磁流速計とハイドロフォンが鉛直方向に設置されており、スリット部の流水の水理学的情報と掃流と浮遊が混在した流砂形態を考慮することで、ハイドロフォンの情報から掃流砂・浮遊砂・ウォッシュロードを含む流砂量の推定が試みられている³⁸⁾。また、六甲山系住吉川流域ではハイドロフォン、ピット流砂計測装置、濁度計、水位計からなる流砂計測システムを六甲住吉型流砂等計測システム(RS-03)と称して運用を開始し、ハイドロフォンで記録される回数と流出土砂量との関係や各溪流の土砂流出傾向が明らかとなってきた⁴¹⁾。更に、手取川水系尾添川や信濃川水系魚野川ではハイドロフォンで記録される回数と流砂の観測結果を用いて統計解析を行い、定量的な流砂観測手法の構築への試みを行っている^{43),44)}。

このようにハイドロフォンを用いた継続的な流砂観測により、観測流域内の土砂移動の傾向等、定性的情報は集まりつつある。一方現状ではハイドロフォンでは土砂流出の大小といった相対量の評価しか行われておらず、絶対量を把握するための実験や解析が必要となる。六甲山系住吉川流域のようにピット流砂観測装置等の直接法を併用した現地観測結果から流砂量を知る試みの他、水路実験レベルでも研究が進められている。

ハイドロフォンによる観測が進められてデータが蓄積されていく一方で、ハイドロフォンを使った流砂量の把握は定性的な結果に留まったものが多い。もちろん、ハイドロフォンが普及する以前の直接法での流砂量観測では、限定的な場所・イベントでの現象しか把握できなかったことと比較すれば、定性的とはいえ、それぞれの溪流でのイベント毎の流砂量の大小や、同じ降雨イベントに対する溪流毎の流砂の移動過程を議論できるようになったことは大きな進歩である。

これまでの定性的な流砂量検討から更に進んで、定量的な流砂量の検討が可能になれば、流砂量観測によって上流域における土砂生産やそれに伴う土砂の流出状況の変化までを把握できると考えられる。流出土砂量を把握することで、総合的土砂管理として下流のダムや貯水池がある場合の堆砂量の推定や、河床上昇が見込まれる場合には除石や河道掘削、河床低下が予見される場合には置き土砂を実施する等の対策を講じることが可能になる。

また、防災・減災の観点からも、定量的な流砂量の推定が可能になれば、上流で発生した土砂災害(崩壊・土石流・天然ダム)を推定して下流への流出規模や到達時刻を予測することで、適切な警戒避難の実施や、近年進められているシャッター付砂防堰堤のシャッター開閉などのシグナルとして活用することも考えられる。

現在、各地で運用されているハイドロフォンは、パイプ内で発生する音響信号の解析が十分でない点、音響信号の減衰と衝突頻度の関係が明らかになっていない点、衝突する流砂の移動速度

や衝突の位置（衝突角度）の頻度が確認されていない点，が解消されておらず，現状ではハイドロフォンのみで流砂量を推定する手法が確立されていない．また，流砂量解析に必要な流砂の運動量を推定するための流速計や水位計などの計測機器が標準的に設置されておらず，水理量が不明なままハイドロフォンのみで計測が進められている点も課題として挙げられる．

本論文では，ハイドロフォンの原理や観測方法を整理するとともに，これまでのハイドロフォンに関する既往研究のレビューを行い，現地で運用されているハイドロフォンについて，実験水路で流砂量解析手法を評価し，その課題を解消するための実験を行い，新たな流砂量解析手法を提案する．また，それらの結果からハイドロフォンの必要な設計仕様を取りまとめた．各章の概要は以下に記述するとおりである．

第 2 章では，ハイドロフォンの原理と計測手法について整理する．また，ハイドロフォン流砂観測法に関する既往研究についてレビューし，現状での課題を挙げるとともに，実験でのハイドロフォンによる流砂量解析の検証の必要性を示す．

第 3 章では，地形を模した水路および直線水路を用いてハイドロフォンによる流砂量解析を評価する．回数の記録方法や，粒子の運動量と振幅値の関係，音響信号の減衰と衝突頻度（検出率低下）の関係，流砂の運動を考慮した解析の必要性など，現状でのハイドロフォンシステムの課題を明らかにする．

第 4 章では，空気中でハイドロフォンのパイプに粒子を衝突させて，その運動量と振幅値の関係を広い範囲にわたって確認し，パイプ内の音響特性を明らかにする．

第 5 章では，前章の結果を利用して，実験水路でハイドロフォンの流砂量解析を評価する．流砂量を推定するために，検出率を低下させないよう摩擦速度と粒径に対して適切なハイドロフォンの長さを設定し，流砂の運動による運動量と振幅のばらつきに対しては粒径別に移動速度の頻度を統計的に処理し，新たな流砂量解析手法を提案する．

第 6 章では，本研究で得られた成果を述べるとともに，ハイドロフォン流砂観測に必要な仕様を取りまとめる．

第2章 ハイドロフォンを用いた流砂量観測の原理と流砂量解析法

本章ではハイドロフォンの原理と装置，流砂量観測法に関する研究レビューを行い，課題を整理し，本研究に必要な検討項目をそれぞれ挙げる．

2.1 ハイドロフォンを用いた流砂量観測の原理と装置

ハイドロフォンを用いた流砂量計測では流砂がハイドロフォンに衝突する際に生じる音響信号を得るセンサー部，音響信号の波形を整形する一次処理，そしてデジタル信号に変換後，流砂量を推定するための二次処理から構成される．ハイドロフォンシステムの構成を図-2.1 に示す．センサー部は両端固定のステンレス製のパイプを利用し，パイプ内の片側にマイクロフォンを封じ込めたものである．主にマイクロフォンはコンデンサ型が用いられる．パイプ内で発生する音の伝播モードは図-2.2 のようになる．

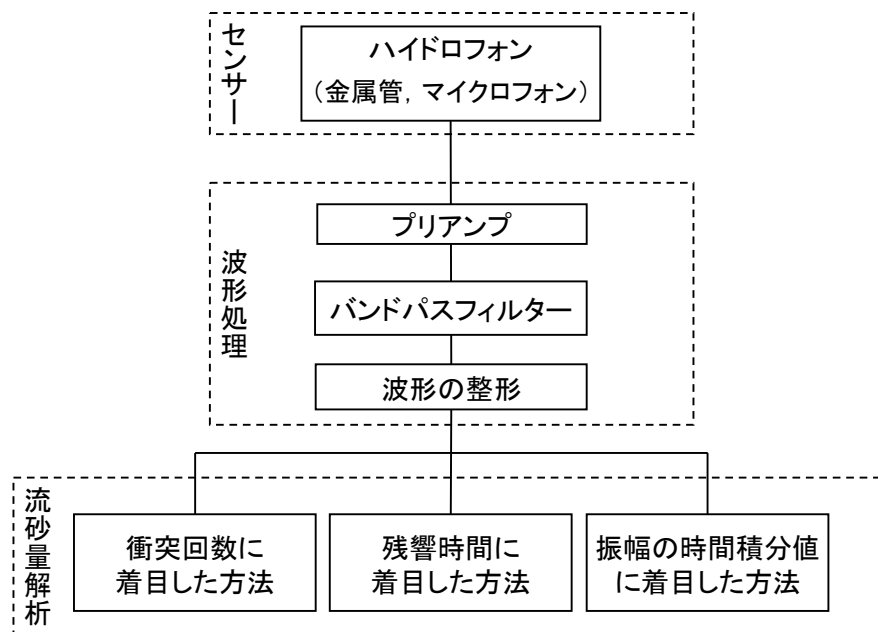


図-2.1 ハイドロフォンシステムの構成

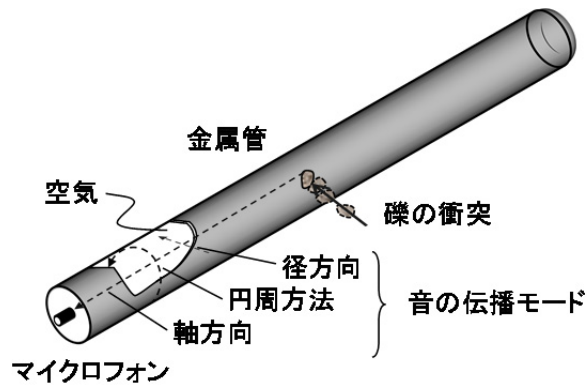


図-2.2 ハイドロフォンと内部で発生する音の固有モード

スペクトル解析の結果から，図-2.3 に示すスペクトル分布を観測できる．これらの中で卓越したスペクトルは，式(2.1)～(2.3)で定義される基本周波数をもつ径方向モード，円周方向モード，軸方向モードへの共振信号である．

$$\text{径方向モード} \quad f_z = \frac{c}{2L} \quad (2.1)$$

$$\text{円周方向モード} \quad f_{10} = \frac{0.298c}{a} \quad (2.2)$$

$$\text{軸方向モード} \quad f_{01} = \frac{0.61c}{a} \quad (2.3)$$

ここに， f ：周波数， c ：音速， L ：パイプの軸の長さ， a ：パイプの半径である．このうち，円周モードが流砂の衝突に対して最も応答がよいと言われている³⁵⁾．

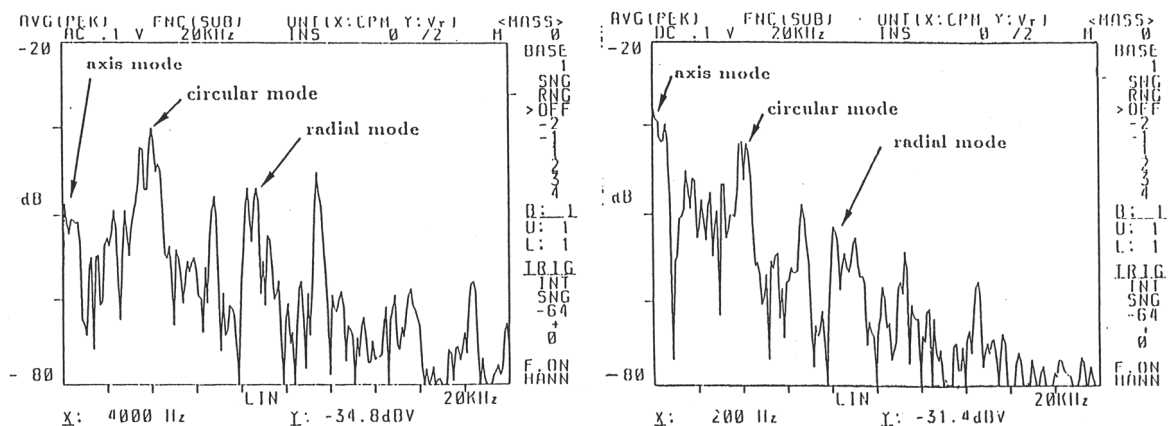


図-2.3 音響信号のスペクトル分布(左：小さな礫，右：大きな礫)³⁵⁾

3 方向のうち衝突時の円周方向の固有振動の最大振幅は運動量と高い正の相関をもち、線形の関係にあることが示されている。図-2.4 に示すように実験で確認されている範囲は $0.2 \sim 2.1 \text{ g}\cdot\text{m/s}$ （例えば $u_* = 20 \text{ cm/s}$ では約 2.6 倍の粒径幅に相当）と狭く、現場における粒度分布の幅が 1 オーダー以上あることを考えると、この実験範囲は十分に広いとはいえない。また、その範囲内では軸方向の固有振動の振幅と運動量の相関が良くないことが示されており、径方向の信号特性として、信号が小さいことが挙げられているが、振幅と運動量の関係については検討されていない。

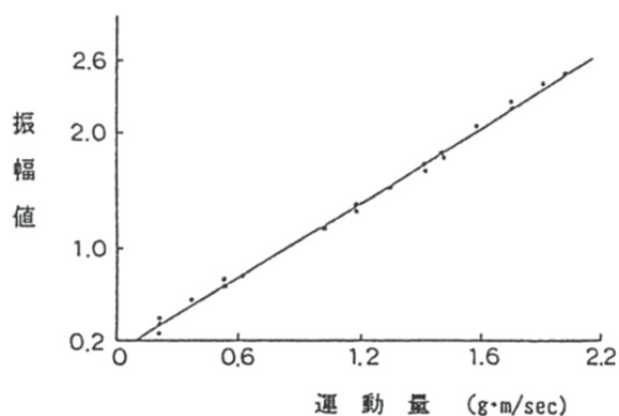


図-2.4 運動量と最大振幅値の関係³⁵⁾

2.2 波形の整形方法（一次処理）

図-2.5 に粒子が衝突した時の音響信号の生データを示す。この図は波が見易いように一部分を拡大した図である。この波形データからバンドパスフィルターを用いて、円周方向の周波数帯の波形データを抽出する（図-2.6）。さらに、その波形データの正の振幅値を結ぶと図-2.7 のようになり、1 つの粒子が衝突した波形データが単純増加・減少になるまで繰り返す。一般的には 4 回程度繰り返され、最終的には図-2.8 のような波形データを作成する。

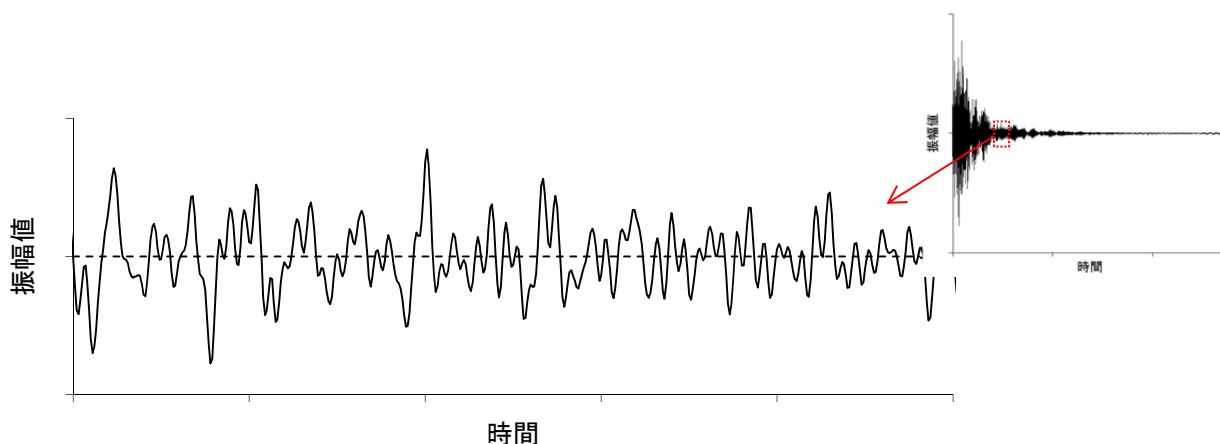


図-2.5 音響信号の生データの模式図

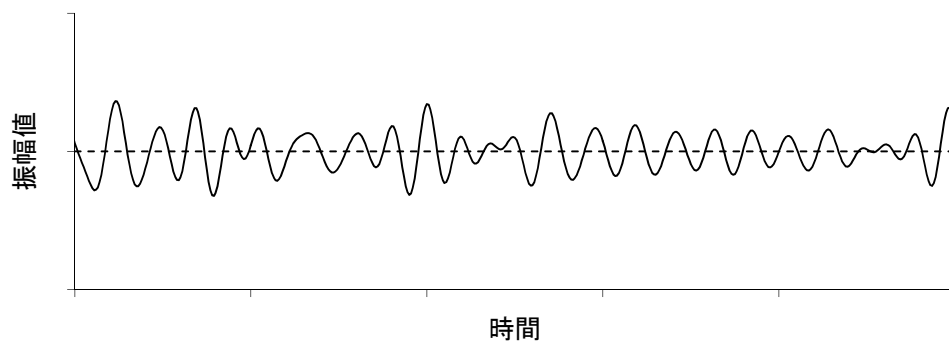


図-2.6 バンドパスフィルターで抽出した波形データの模式図

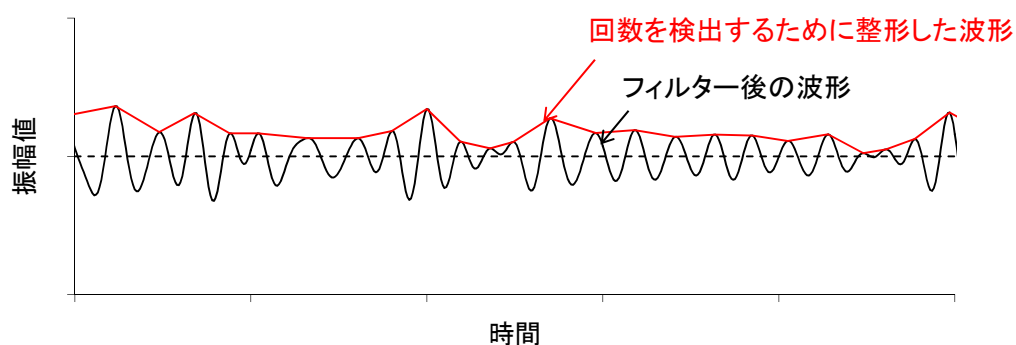


図-2.7 正の振幅値を結んだ波形データの模式図

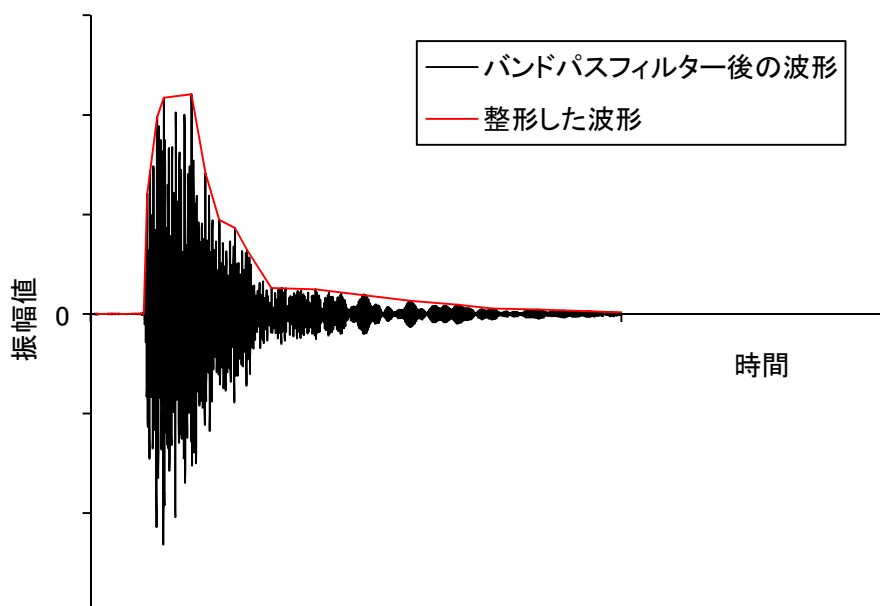


図-2.8 音響信号と整形した波形データの模式図

2.3 流砂量解析（二次処理）

2.3.1 衝突回数に着目した処理法

連続量に対してある閾値を設けて離散化することで回数を記録し、ハイドロフォンに衝突した粒子数を推定する。整形した波形がその閾値を超えた時を1回として記録する。信号を処理するアナログ回路は2通りあって、**図-2.9** 上図のように数段階に信号を増幅させて、各信号が1つの閾値を超えた回数を記録する方法^{36)-44),46)}と、**図-2.9** 下図のように信号を増幅させないで閾値を複数段階に設定して、1つの信号がそれぞれの閾値を超えた回数を記録する方法^{35),39),51)}である。両者は、信号の処理方法が異なるだけで、同じように検出回数が記録される。

出力方法も2通りある。**図-2.9** 下図に示すように、1つは整形した波形データがそれぞれに設定した閾値を超えた時を記録する方法^{36)-44),46)} (Method 1)、もう1つは最大閾値のみで検出回数を記録する方法^{35),39),51)} (Method 2) である。前者は検出回数が最も多く記録される閾値で評価し、後者は、閾値ごとに検出された検出回数で評価する。

図-2.10 に**図-2.9** の信号と閾値の関係から記録される検出回数を示す。閾値1を超える回数はMethod 1では7回、Method 2では2回である。閾値2を超える回数は、Method 1では5回、Method 2では3回である。閾値3を超える回数は、Method 1,2ともに2回である。Method 2では検出回数の合計が7回となる。また、Method 1は閾値が小さい値（閾値1）ではすべての信号で記録されるため最大の回数となり、小さい粒子や速度の遅い粒子が衝突した時は信号が大きい閾値を上回らずに、検出回数が少なくなる場合がある。現在、現地で運用されているハイドロフォンシステムは、ほとんどがMethod 1を使用している。本論文では、第3章でその方法を評価した。

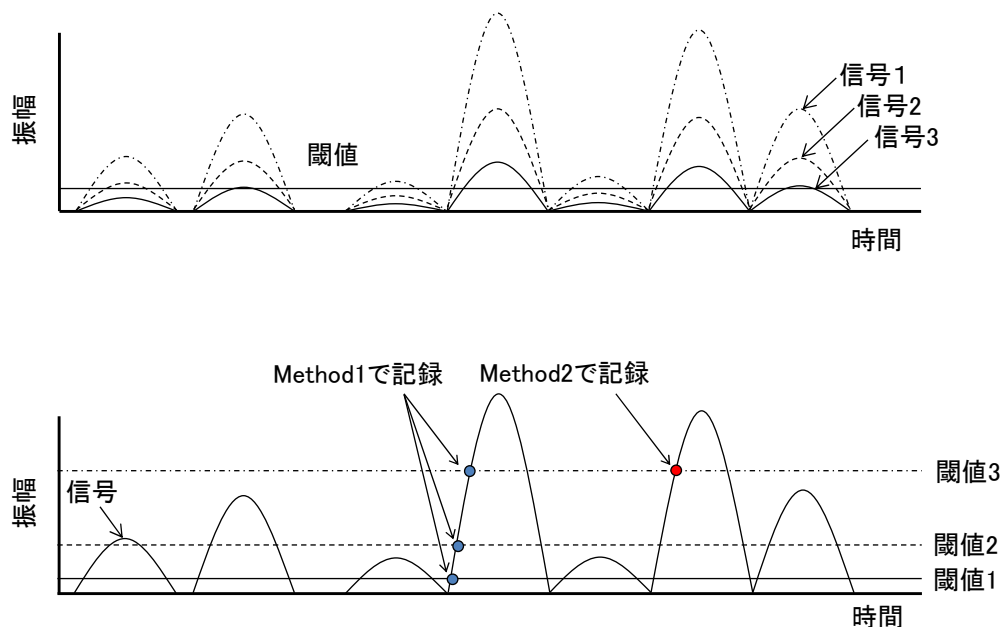


図-2.9 検出回数としての記録方法(上図:信号を増幅させる方法, 下図:閾値を複数設定する方法)

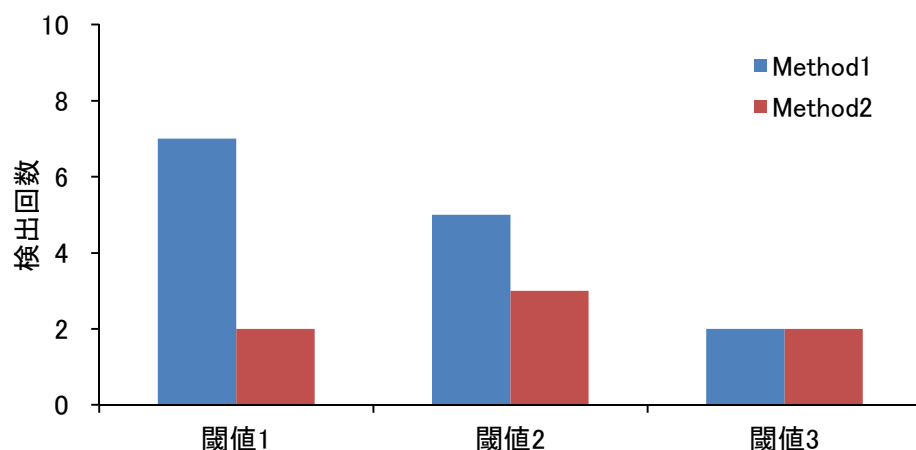


図-2.10 各閾値の検出回数

栗原ら³⁵⁾は、予め振幅値と粒子がもつ運動量の関係を見出して、振幅を大きさごとに区分し、その区分ごとに発生した振幅値の検出回数から流砂量が推定できることを示している。検出回数は **Method2** で記録して、振幅値と粒径別の検出回数の間に次式が成り立つことを提案している。

$$\begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ \vdots \\ L_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11}(\tau_*) A_{12}(\tau_*) \cdots A_{1n}(\tau_*) \\ A_{21}(\tau_*) A_{22}(\tau_*) \cdots A_{2n}(\tau_*) \\ \vdots \quad \quad \quad \ddots \quad \vdots \\ A_{n1}(\tau_*) A_{n2}(\tau_*) \cdots A_{nn}(\tau_*) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ \vdots \\ D_n \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

ここに、 \bar{L} :カウント数（本論文では検出回数と呼ぶ）のベクトル、 A :各粒径に対する運動量の確率分布行列、 \bar{D} :粒径別の流砂量のベクトルである。 $A_{ij}(\tau_*)$ は粒子ランク D_j の粒子が掃流力 τ_* の流れの中に置かれた時、信号の振幅レベル i の単位時間当たりのカウント数の平均値である。このように流砂量を求めるには、 A が逆行列を持つこと、すなわち粒子がパイプに衝突する速度、さらには振幅と運動量の関係についても把握しておくことが必要であることが示されているが、具体的な検証は行われていない。

検出回数を記録する方法は、音響信号を数段階に増幅もしくは閾値を数段階に設定すると、倍率の違いはおおよそその粒径の違いを表していると考えられ、低倍率が反応するのは大粒径の粒子が衝突した時、高倍率では小粒径から大粒径を検知していると考えられる³⁷⁾。出水のピーク時等、流砂量が多い状態では高倍率で記録される検出回数は頭打ち、もしくは減少することが確認されている⁴⁰⁾。しかし、検出限界については具体的な検討が行われていない。また、小跳躍で運動する流砂はハイドロフォン自体に衝突しない場合も考えられるため、流砂量を推定する場合、検出率と衝突率の2つを考慮しなければならないことが指摘されている^{46),47)}。

2.3.2 残響時間に着目した解析法^{46),48)}

流砂量が多い状態では、一度閾値を越えた後、閾値を再び下回るまでにしばらく時間がかかる場合がある。すなわち集合的に礫が衝突した際には個別に礫を衝突させたときに比べて、1つの検出回数に対して閾値を上回る時間が長くなる、ということである。この閾値を超える時間（以下、持続時間と呼ぶ（図-2.11））を考慮した検出回数を式(2.5)のように表す。

$$P(R_k) = \frac{\sum_{i=1}^{n(R_k)} W_i(R_k)}{W_s(R_k)} \dots\dots\dots (2.5)$$

ここに、 $P(R_k)$ ：持続時間を考慮した閾値 R_k に対する検出回数、 $W_i(R_k)$ ：計測時間内における閾値 R_k に対する持続時間、 $W_s(R_k)$ ：個別の粒子が衝突した時の閾値 R_k に対する持続時間の代表値である。図-2.12 に示す通り、持続時間を考慮すると流砂量が多くなっても、流砂量と検出回数の線形関係が維持されていることが分かる。更に、図-2.13 に示すような無次元掃流力 τ_* と衝突率 C_p の関係が示されており、掃流砂量 Q_s は式(2.6)のように示される。

$$Q_s = \alpha_1 \cdot P(R_k) \cdot \frac{\pi \cdot d_i^3}{6} / C_p \dots\dots\dots (2.6)$$

ここに、 α_1 はアンプの倍率による比例定数、 d_i は閾値 R_k に対応した粒径である。ここでは持続時間を用いて流砂量の変化に伴う（流砂量が多い時を含む）検出率の変化を表し、更にハイドロフォンへの衝突率が考慮されたものとなっている。アンプ倍率の違いを利用したものではないが、個別粒子が衝突した時の閾値 R_k に対する持続時間の代表値 $W_s(R_k)$ は、粒径毎に異なり、粒径別に流砂量を推定することができる。

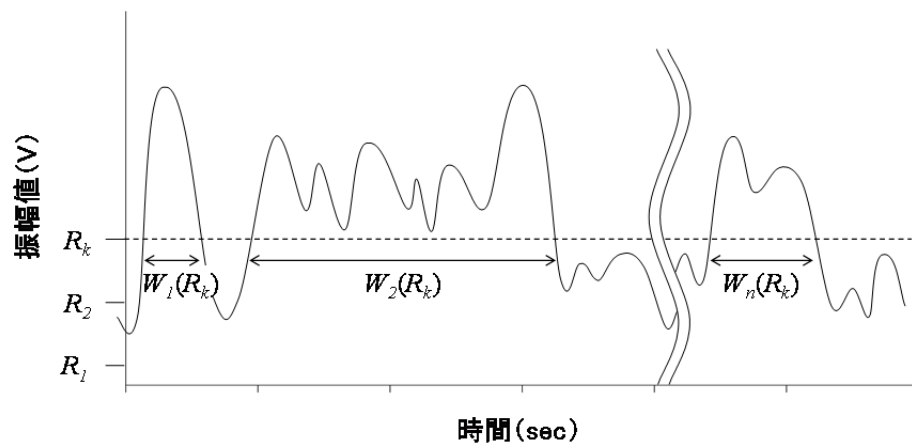


図-2.11 持続時間の概念図 ⁴⁶⁾

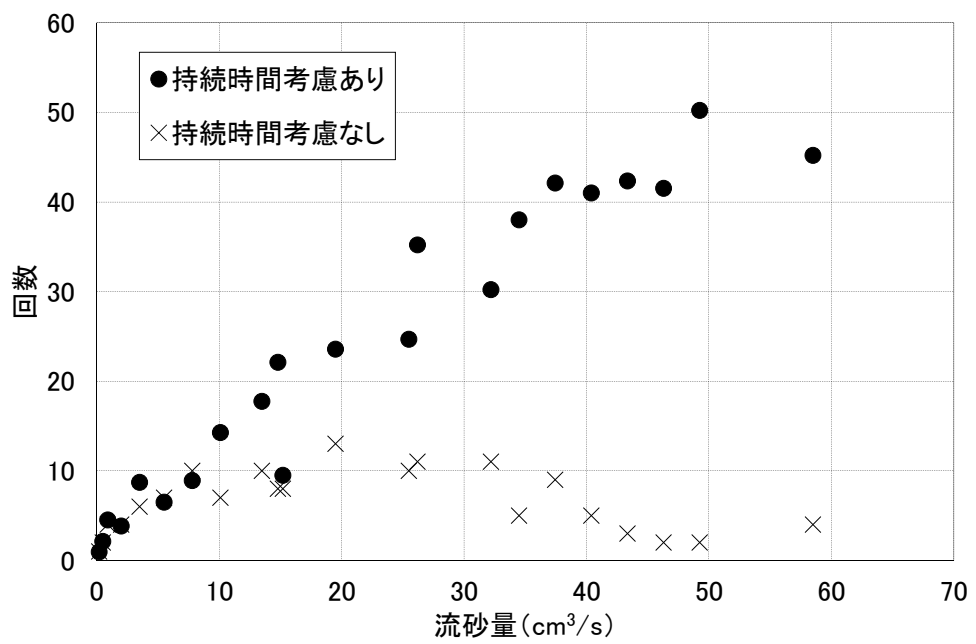


図-2.12 流砂量と検出回数 ⁴⁶⁾

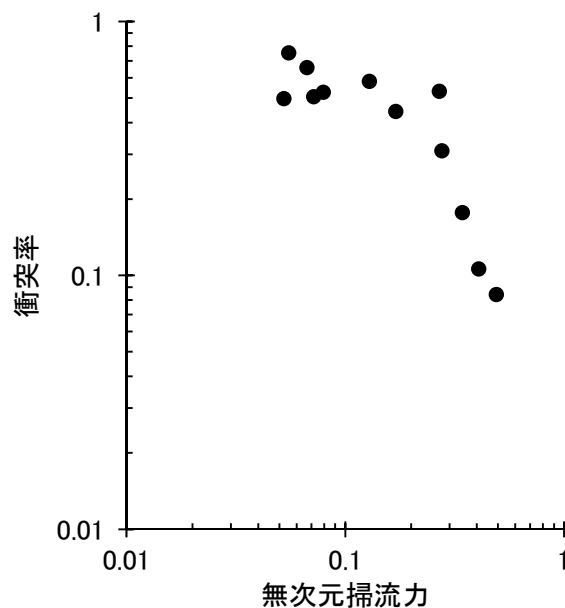


図-2.13 無次元掃流力に対する衝突率⁴⁸⁾

2.3.3 振幅の時間積分値に着目した解析法^{47),50)}

前項の検出回数として記録する方法と同じように、図-2.7にある整形した波形データから、正の値のみを積分値で記録する（図-2.14）。

音圧値を粒径や流量などの水理条件に応じた流砂量を表す代表値として、音圧の絶対値と音響信号の波形データを用いて粒径別流砂量を求めるものである。ハイドロフォンに個別に衝突する際には音圧の平均値は流砂量と比例関係にある式(2.7)と考えられるが、集合的に衝突する場合には個々の衝突波形が重なり合って干渉し合うと、個別衝突の時に比べて実測される音圧値が小さくなる（図-2.15）。

$$S_p = \alpha_2 \cdot Q_s \dots\dots\dots (2.7)$$

ここに、 S_p ：音圧平均値、 Q_s ：掃流砂量、 α_2 ：比例係数である。式(2.7)による期待値に対する実際の音圧平均値の割合を R として算出して衝突回数 N_b との関係が図-2.16 で示され、音圧平均値と掃流砂量の関係式は式(2.8)に示されるとおりである。

$$S_p = \alpha_2 \cdot Q_s \cdot R \dots\dots\dots (2.8)$$

更に、式(2.8)の Q_s は衝突回数 N_b と平均粒径 d を内包しており、 R は N_b の関数であるために式(2.8)には N_b 、 d という 2 つの未知数が残る。掃流砂が集散的にハイドロフォンに衝突した時の波形データは、個別衝突波形の重ね合わせによって作成可能であるため、元データとそれを k 倍にした波形を用い、2 つの音圧平均値 S_{p1} 、 S_{pk} を算出する。

$$S_{p1} = \alpha_2 \cdot Q_{s1} \cdot R_1 \dots\dots\dots (2.9)$$

$$S_{pk} = \alpha_2 \cdot k \cdot Q_{sk} \cdot R_{k1} \dots\dots\dots (2.10)$$

$$\frac{R_k}{R_{k1}} = \frac{S_{pk}}{k \cdot S_{p1}} = \frac{f(k \cdot N_b)}{f(N_b)} \dots\dots\dots (2.11)$$

式(2.9)は元データ、式(2.10)は元データを k 倍にした時の音圧平均値を求める式である。 $f(N_b)$ は図-2.16 より算出可能であり、計測値を基に R_k/R_1 を算出すると式(2.11)から検出回数 N_b が求められることになる。ハイドロフォンへの衝突率はまだ考慮されていないが、これはハイドロフォンへ衝突した粒子が寄与する音圧値を用いており、別途衝突率を掛け合わせれば粒径別流砂量が求まると考えられる。

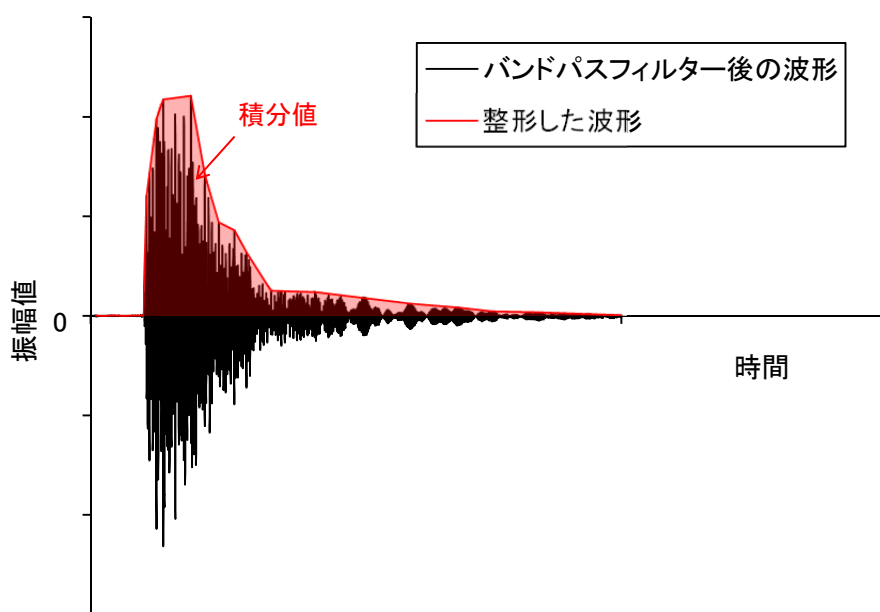


図-2.14 整形した波形データの積分値

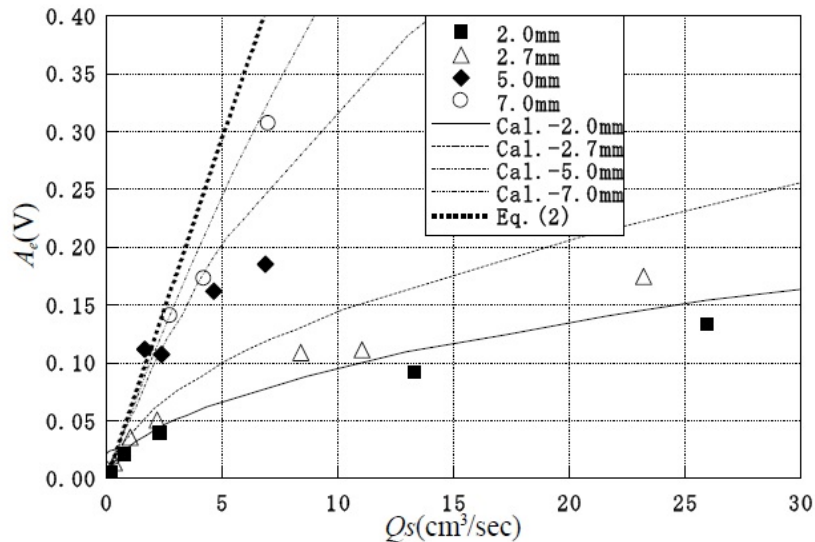


図-2.15 流砂量と音圧平均値の関係 ⁴⁷⁾

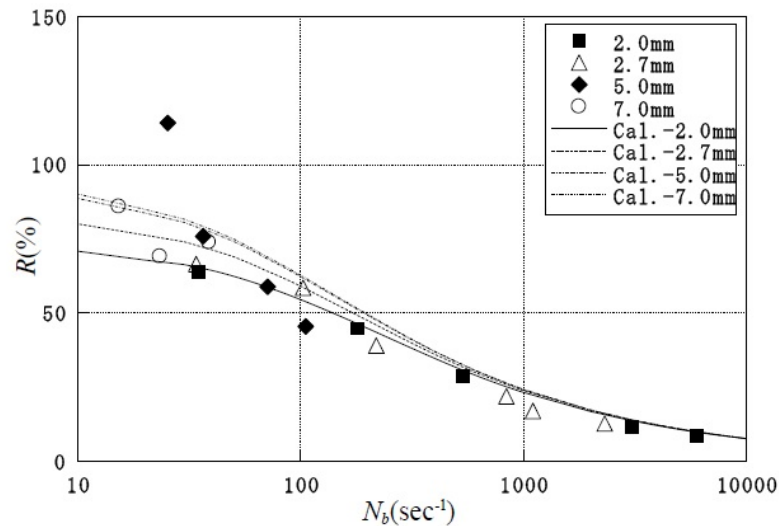


図-2.16 衝突回数と検出率の関係 ⁴⁷⁾

2.4 現地の設置例

全国的にハイドロフォンによる流砂量観測が始まっている．図-2.17 に京都大学防災研究所流域災害研究センター穂高砂防観測所のヒル谷にある砂防堰堤に設置してあるハイドロフォンを示す．一般にハイドロフォンは流砂の堆積や河床形状の影響を受けないように固定河床，特に構造物の水通し断面に設置される．また，現地観測機器であることから，音響信号の生データを全て記録するのではなく，信号の増幅，減衰，特定の周波数のみを通過させるバンドパスフィルターと波形整形はアナログ上で処理が行われ，アナログ信号をデジタル信号に変換（A/D 変換）し，流砂量解析に必要なデータのみを保存する．穂高観測所では，回数と積分値が記録されているが，全国的には回数が記録されているところがほとんどである．



図-2.17 現地のハイドロフォンの設置状況

2.5 結語

ハイドロフォンの原理と装置，検出回数の記録方法や流砂量解析手法について整理を行った．流砂量解析は大きく分けると，衝突回数に着目する方法（検出回数），残響時間に着目した方法（持続時間），振幅の時間積分値に着目した方法（積分値），の3通りである．連続衝突や残響が長引く大礫の衝突に対しては，検出率（検出回数/流砂量，持続時間/流砂量，積分値/流砂量）が低下することが確認されている．その中でも，積分値を記録する方法（持続時間も同じ考え方のためここに含む）は，流砂量が多くなると検出回数を記録する方法よりも検出率の落ち込みが顕著になり，その条件では精度の良い流砂量解析を行うことが難しいとされている．この課題に対して，鈴木ら^{46),49)}は粒子の衝突個数から検出率の落ち込みを考慮した解析方法を提案しているが，衝突頻度が大きい時のパイプの振動の影響が考慮されていないこと，波形を合成させる方法の検証が十分に行われていないこと，流砂量を推定するために必要な独立変数を求めるための関係式についての検討が不十分であること，などの課題が残されている．そのため，本論文では検出回数を記録する方法を採用することとした．

検出回数を記録する方法は2通りあり，1つは整形した波形がそれぞれの閾値を超えた時の回数を全て記録する方法（Method 1），もう1つは最大閾値のみで検出回数を記録する方法（Method 2）である．現地で実際に運用されているハイドロフォンの流砂量解析には，ほとんどがMethod 1が用いられている．この方法から流砂量を推定するには，検出回数と粒径別の衝突粒子の個数の関係を推定する必要がある．そのためには，運動量と振幅値の関係をを用いることと，実際に衝突した粒子の運動量を推定する必要がある．運動量は粒子の移動速度から求められ，粒子の移動速度は流れの条件から推定することができる．しかしながら，現状では流砂の運動量を推定するための計測機器が標準的に設置されていない．さらに，流砂の運動でパイプへの相対速度がばらつくことが考えられているが，このばらつきについての考察が十分に行われていない．現状では，検出回数と直接法で採取した流砂量とキャリブレーションから流砂量解析が実施されている．しかしながら，これは限られた条件下（特に，流砂量が少ない条件）でのキャリブレーションの結

果であり，大出水時でも両者が同じ関係になるのは示されていない．

そのため，この方法についての流砂量解析の評価が必要であるが，現地では洪水時での流砂量観測が困難なことから，実験での検討が適していると言える．そこで，第 3 章では実験水路で流砂量解析の評価を行い，第 4 章では音響特性に関する検討を実施し，第 5 章では相対速度のばらつきについて検討する．

第 3 章 水路実験での流砂量解析手法の評価

本章では，前半は現地の地形を模した水路で洪水時における流砂量と検出回数の比較から現状のハイドロフォンの適用性について記述し，後半は検出回数と流砂量の関係を水理条件ごとに整理するため，水路実験により流砂量解析手法の評価を行った．実験は，現地の状況においての検出回数と実測した流砂量を比較するため，実際の河川の地形を模した水路を用いて，実際の洪水を想定した通水条件で実施した．その後，直線矩形断面水路を用いて流量や流砂量，粒径による検出回数と流砂量の関係を確認し，それらに対する問題を確認して課題点を整理した．

3.1 実験で使用したハイドロフォンと実験水路と方法

3.1.1 ハイドロフォンの仕様

使用したハイドロフォン流砂量観測のシステム構成を図-3.1 に示す．基本的には水山ら³⁶⁾が現地観測で使用しているシステムと同じ構成である．使用したハイドロフォンの外径は 27.2 mm，内径は 25.2 mm，長さは 1.0 m である．表-3.1 に倍率を示すように，アンプは倍率が異なる 2 種類のものを使用した．ハイドロフォンから得られる信号は 4 段階の倍率（Ch1～Ch4）に増幅され円周方向の固有振動数に対応する 8 kHz のバンドパスフィルターを通した後包絡線検波され，その振幅が Ch に関係なく閾値を超えるものを検出し，5 秒間の回数を計数し記録する．検出回数の記録方法は，前章に示した Method 1 である．実験は，(1)現地の地形を模した水路を使用したケース，(2)直線水路で一様砂を使用したケース，(3)直線水路で混合砂を使用したケース，の 3 通りである．

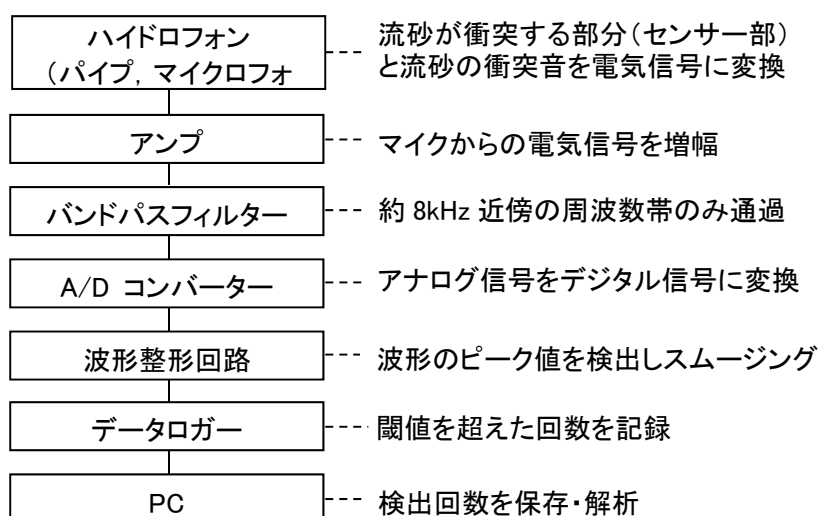


図-3.1 本実験で使用したハイドロフォンシステムの構成

表-3.1 各アンプのチャンネルと倍率

アンプ	Ch1	Ch2	Ch3	Ch4
AMP1	3.0倍	7.1倍	16.6倍	38.9倍
AMP2	5.0 倍	11.8 倍	27.6 倍	64.9 倍

3.1.2 現地の地形を模した水路を用いた実験

現地の地形を模した水路の全景を図-3.2 に、縦断測線に沿った縦断図を図-3.3 に示す。水路内には不透過型の砂防堰堤が 4 基、帯工が 1 基、設置してある。縦断勾配は上流から下流にかけて緩くなり、上流は 1/17、下流は 1/38 である。勾配から見ると流砂は掃流形態で流下する。水路下流端に上記のハイドロフォンを設置した。ハイドロフォンアンプは AMP1 である。下流端ではハイドロフォンによる検出回数と流出土砂を直接採取した流砂量を計測した。河道部分は図-3.3 に示す平均粒径 1.8 mm, 90%粒径約 4.0 mm の混合砂（現地換算値 107 mm, 90 %粒径約 240 mm）で形成され、流れによる侵食を受けない部分や露岩している区間はモルタルで作成し固定床とした。なお、模型上流端からの供給砂も同じ粒度分布である。水は水路上流端から図-3.4 のハイドログラフに従って給水した。ピーク流量は 3.65 l/s である。給砂は水と同様に、模型上流端から流量に応じた平衡流砂量を供給した。ハイドログラフ通水後の総給砂量は、空隙込みで 0.58 m³ である。

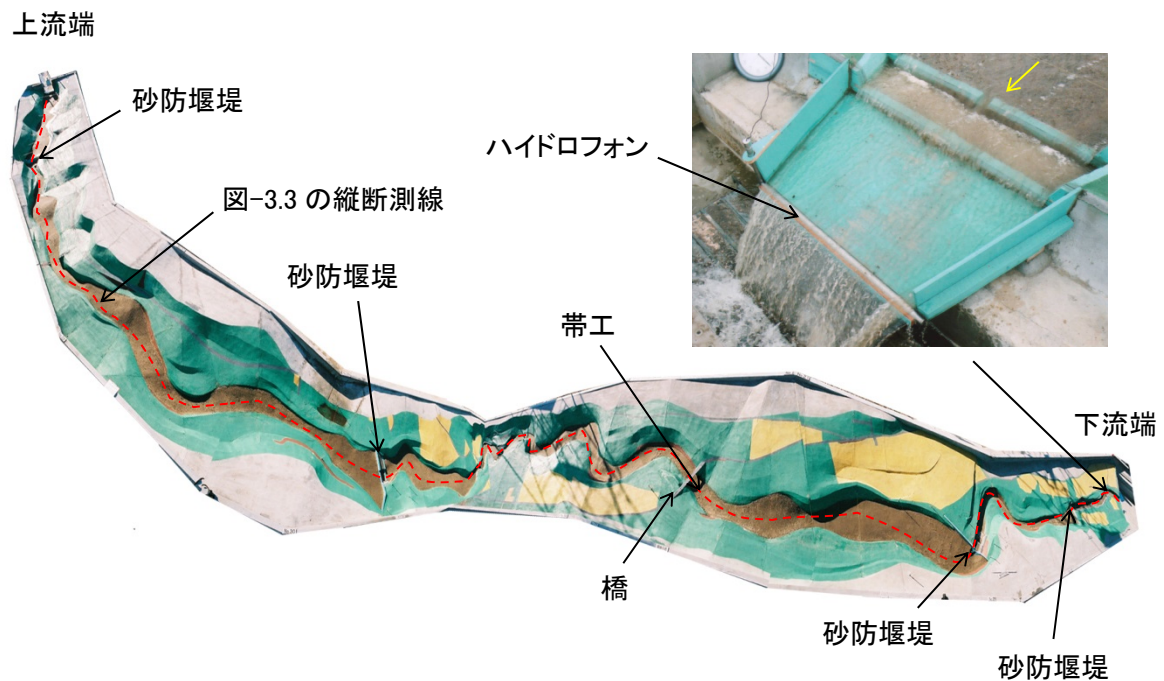


図-3.2 地形を模した水路の全景

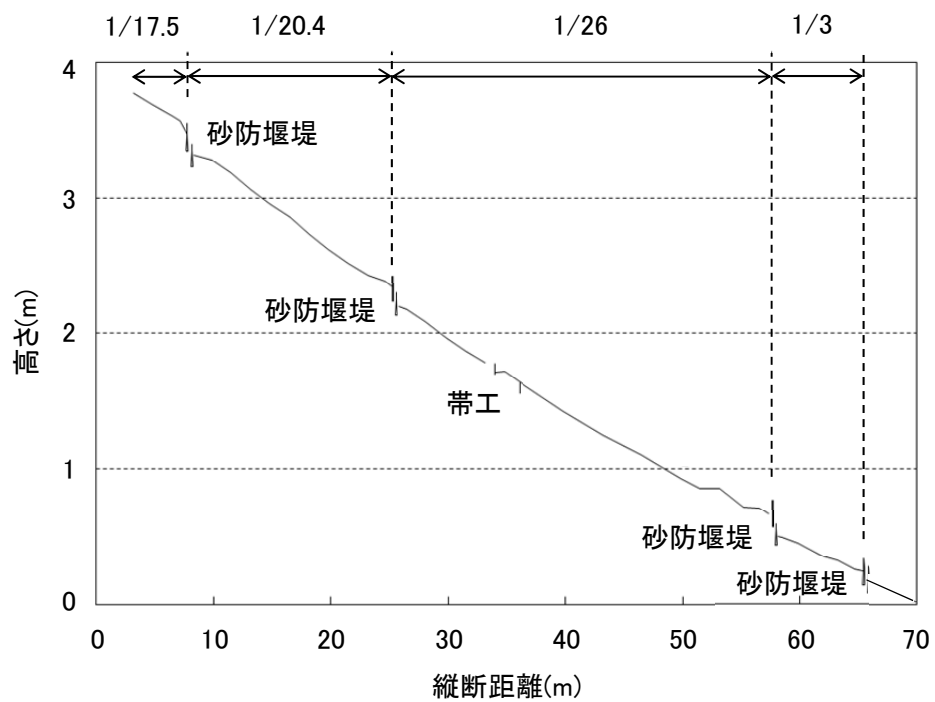


図-3.3 地形を模した水路の縦断図

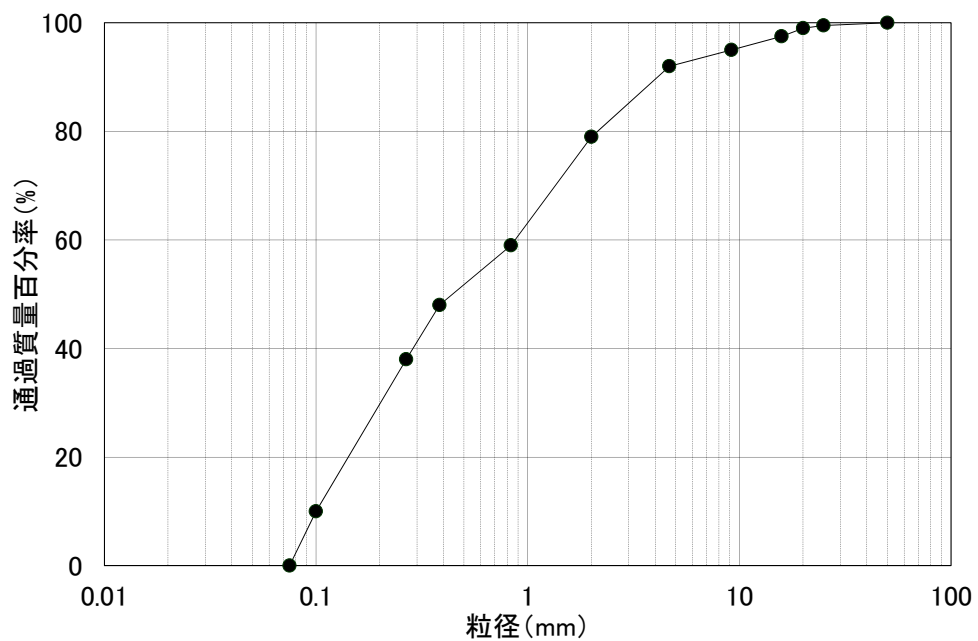


図-3.4 地形を模した水路の実験で使用了実験砂の粒度分布

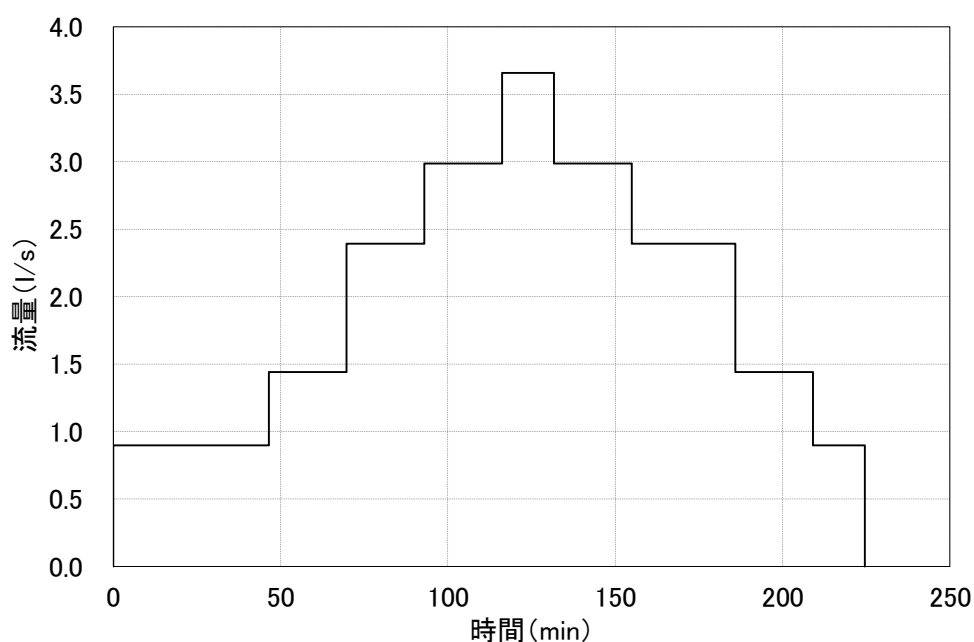


図-3.5 供給ハイドログラフ

3.1.3 直線矩形断面水路を用いた実験

使用した水路は、長さ 10 m、幅 1 m、高さ 30 cm、水路勾配 1/50 の直線矩形断面水路である。流量は電磁流量計により 10 l/s（平均土砂濃度 0.075 %）、20 l/s（平均土砂濃度 0.0375 %）を定流で 330 秒間与えた。土砂は下流端から上流 5m の水路中央部から一定の間隔で給砂し、流量に関係なく空隙込みで 4.13 l を与えた。ハイドロフォンは水路下流端に幅 0.6m に狭めた斜路（水路と同じ勾配）の下流端に設置した。実験は、1.0 mm、2.0 mm、4.0 mm、8.0 mm、16.0 mm の 5 種類の一様砂と、5 種類の一様砂を混合させた混合砂の検出回数と流砂量の関係を確認する実験を実施した。混合砂の粒度分布を図-3.6 に示す。本実験では最大 6.2 g・m/s（これまでの研究で確認された運動量は最大 2.1 g・m/s）の条件まで実施した。図-3.7 に水路概略図を示す。

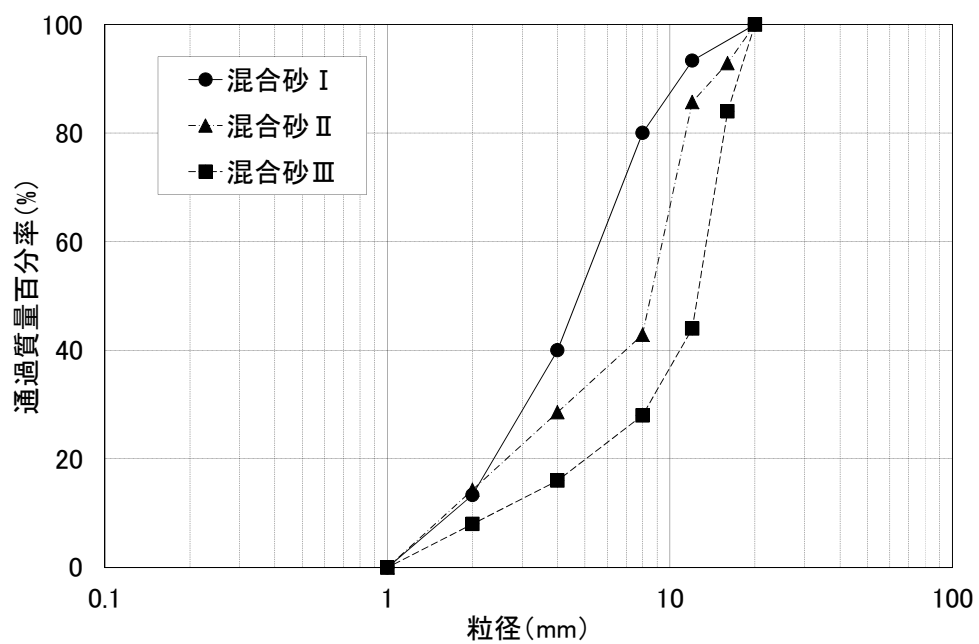


図-3.6 直線矩形断面水路を用いた実験で使した混合砂の粒度分布

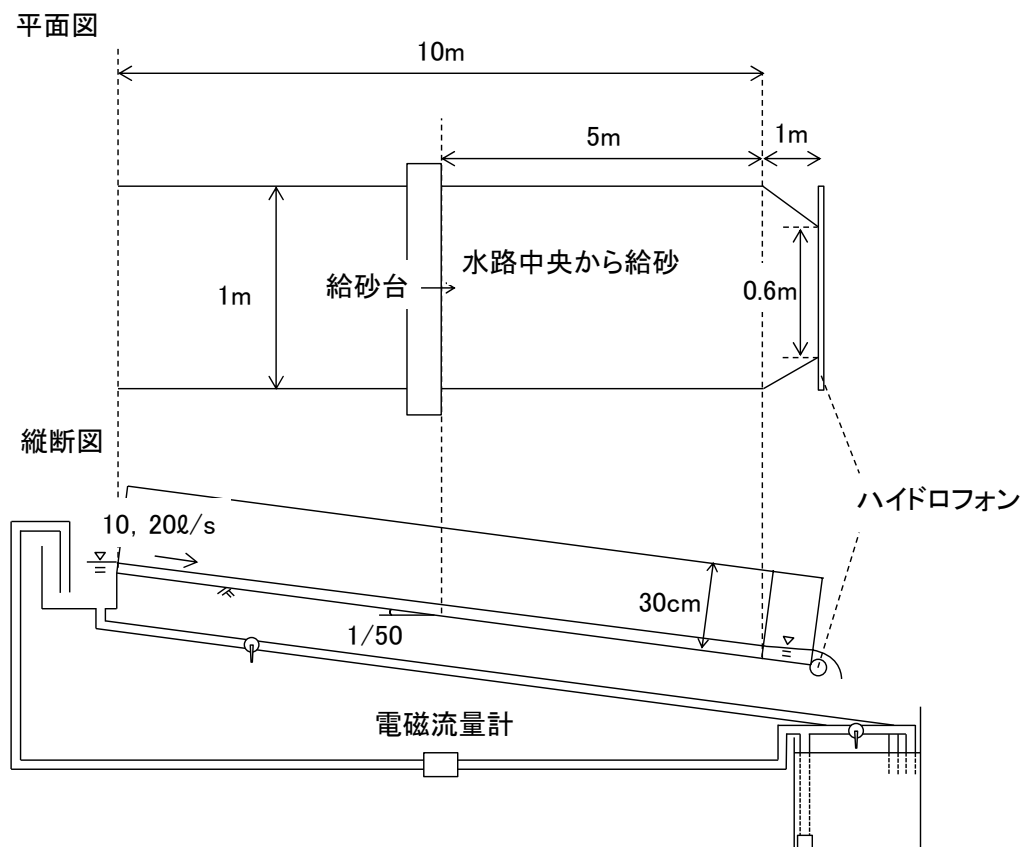


図-3.7 実験水路模式図

一様砂を使用した実験ケースの一覧を表-3.2 に、混合砂を使用した実験ケース一覧を表-3.3 に示す。

表-3.2 一様砂を使用した実験ケース一覧表

ケース	粒径 mm	流量 l/s	運動量 g・m/s	アンプ
S1-1	1.0	10.0	0.001	AMP1
S1-2				AMP2
S1-3		20.0	0.002	AMP1
S1-4				AMP2
S1-5	2.0	10.0	0.009	AMP1
S1-6				AMP2
S1-7		20.0	0.012	AMP1
S1-8				AMP2
S1-9	4.0	10.0	0.07	AMP1
S1-10				AMP2
S1-11		20.0	0.10	AMP1
S1-12				AMP2
S1-13	8.0	10.0	0.59	AMP1
S1-14				AMP2
S1-15		20.0	0.78	AMP1
S1-16				AMP2
S1-17	16.0	10.0	4.70	AMP1
S1-18				AMP2
S1-19		20.0	6.21	AMP1
S1-20				AMP2

表-3.3 混合砂を使用した実験ケース一覧表

ケース	粒径mm	流量l/s	アンプ
S2-1	5.5	10.0	AMP1
S2-2			AMP2
S2-3		20.0	AMP1
S2-4			AMP2
S2-5	7.9	10.0	AMP1
S2-6			AMP2
S2-7		20.0	AMP1
S2-8			AMP2
S2-9	11.0	10.0	AMP1
S2-10			AMP2
S2-11		20.0	AMP1
S2-12			AMP2

3.2 地形を模した水路での検出回数と流砂量の関係

通水時の、模型下流端の流砂量（空隙無し）と各 Ch での検出回数の時間変化を図-3.8～3.11 に示す。検出回数と流砂量の計測時間は 30 秒である。また、流砂量の計測は 5 分間隔である。図中の黒丸は模型下流端からの流出土砂量（空隙無し）、折れ線は検出回数である。また、5 分間隔で計測した流砂量と同時刻での検出回数との比較を図-3.12 に示す。図中のプロットは実験結果で、実線や破線は各 Ch の近似線である。

図-3.8～3.11 を見ると、流量と流砂量の増減は、流量が比較的小さいときは対応するが、流量が大きくなると必ずしも対応しない。流砂量が最大となるのは流量が最大となった後である。これは、ハイドロフォンの約 3.5 m 上流に砂防堰堤を設置しているため、流量ピーク時に土砂が堰堤で捕捉されて減水期に土砂が下流に流出したためである。ハイドロフォンによる最大検出回数は、Ch1 では 4 s^{-1} 、Ch2 では 7 s^{-1} 、Ch3 では 8 s^{-1} 、Ch4 では 6 s^{-1} であり、Ch ごとの検出回数が異なる。閾値が最大の Ch1 では、流量が 0.9 l/s、1.44 l/s と比較的小さいときは、回数が検出されない、あるいは検出されても非常に小さな値である。これは、検出回数から流砂量に換算する場合に誤差が大きくなりやすい。流量が大きくなると回数が検出される。直接採取した流砂量と比較すると、全体的に時間的変化の傾向が合う。Ch2 では、Ch1 より回数が多く検出されるが、流量が最小のときは、回数が検出されない、あるいは検出されても非常に小さい。流量が大きくなると回数が検出される。直接採取した流砂量と比較すると、時間的変化の傾向はほぼ一致し、流砂量が小さい時は相関が良く、大きいと相関が悪くなる。Ch3 では、流量が最小のときは、検出回数が Ch1、2 より多く検出されるが、ばらつく傾向にある。流量が大きい時は、検出回数にほとんど変化がない。流砂量が最大の時に回数が検出されなくなる。直接採取した流砂量と比較すると、時間的変化の傾向が合わない。閾値が最小の Ch4 では、流量が小さい時は Ch3 と同程度の回数が検出され、ばらつきが小さい。流量が大きくなると、最大検出回数はそれほど変化しないが、ばらつきが大きくなる。流砂量が大きいとき（約 $1,000\text{ cm}^3/30\text{ s}$ ）や急激に流砂量が増えるとき（約 130 s, 150 s, 200 s）、Ch3 よりも顕著に回数が検出されなくなる。直接採取した流砂量と比較すると、時間的変化の傾向が合わない。この結果、Ch1 と Ch2 は流砂量の時間的変化の傾向を表し、Ch3 と Ch4 は流砂量が小さい時は小さい Ch より回数が検出されるが、流砂量が大きい時は検出回数が極端に少なくなったりして傾向が合わない。検出回数から流砂量を推定するには、条件に合った Ch の設定が必要である。

図-3.12 の結果から、全ての Ch で検出回数が増えると流砂量も比例して多くなる。倍率の違いで見ると、倍率の小さい Ch1 の方が流砂量に対して検出回数が少なく、倍率の大きい Ch の方が多い。しかし、倍率の大きい Ch3 や Ch4 では両者の関係のばらつきが大きく、今回の実験では最も相関が良いのは Ch2 であった。

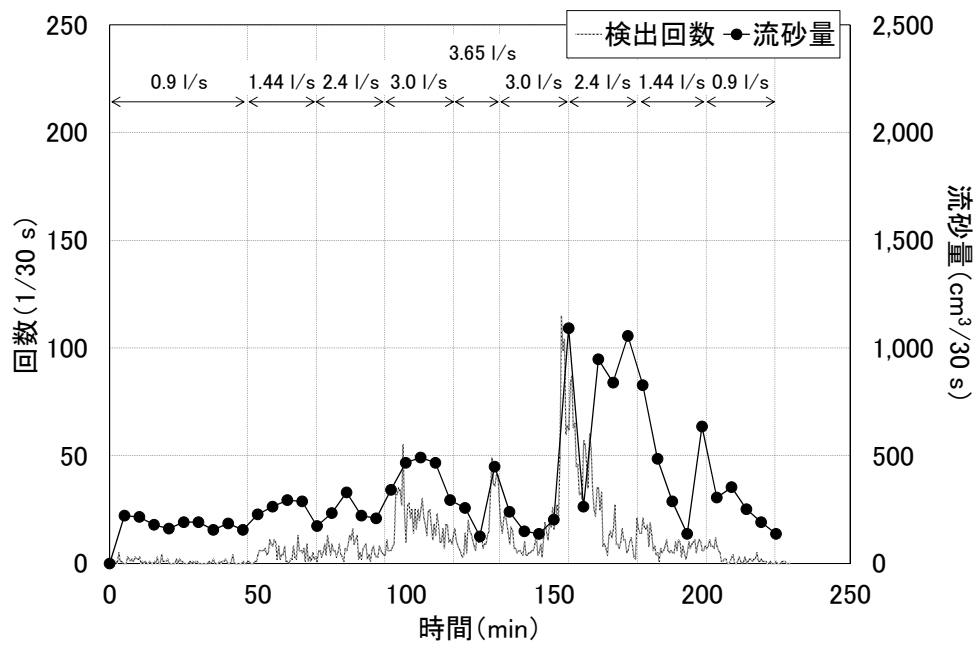


図-3.8 検出回数と流砂量の時間変化の関係(Ch1)

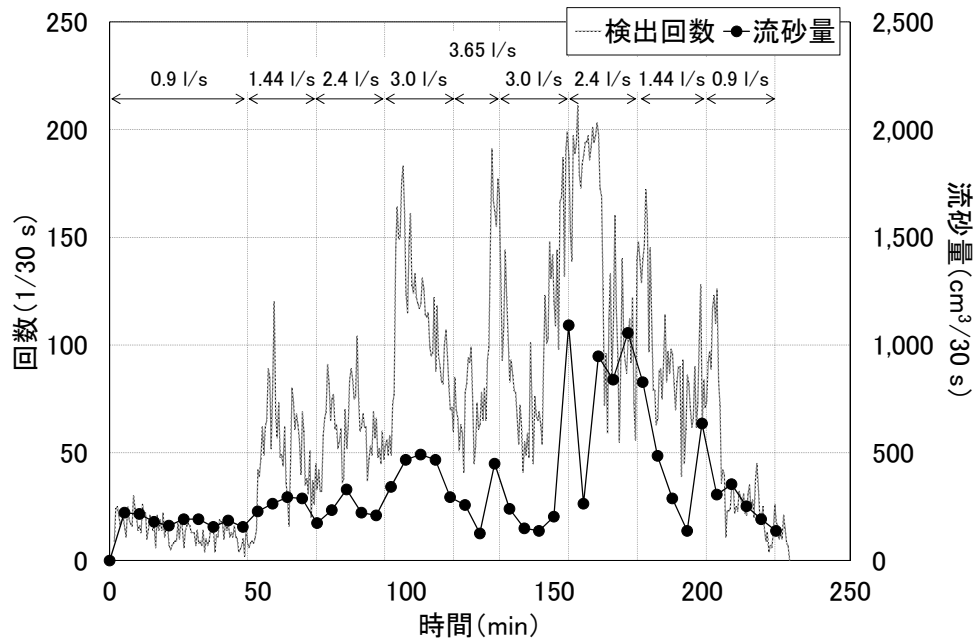


図-3.9 検出回数と流砂量の時間変化の関係(Ch2)

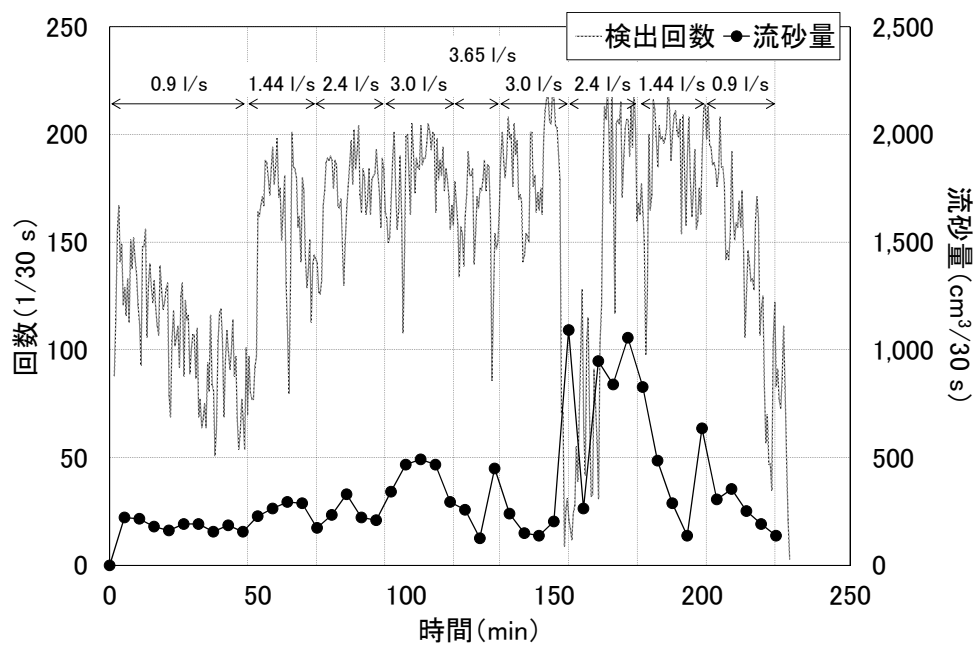


図-3.10 検出回数と流砂量の時間変化の関係(Ch3)

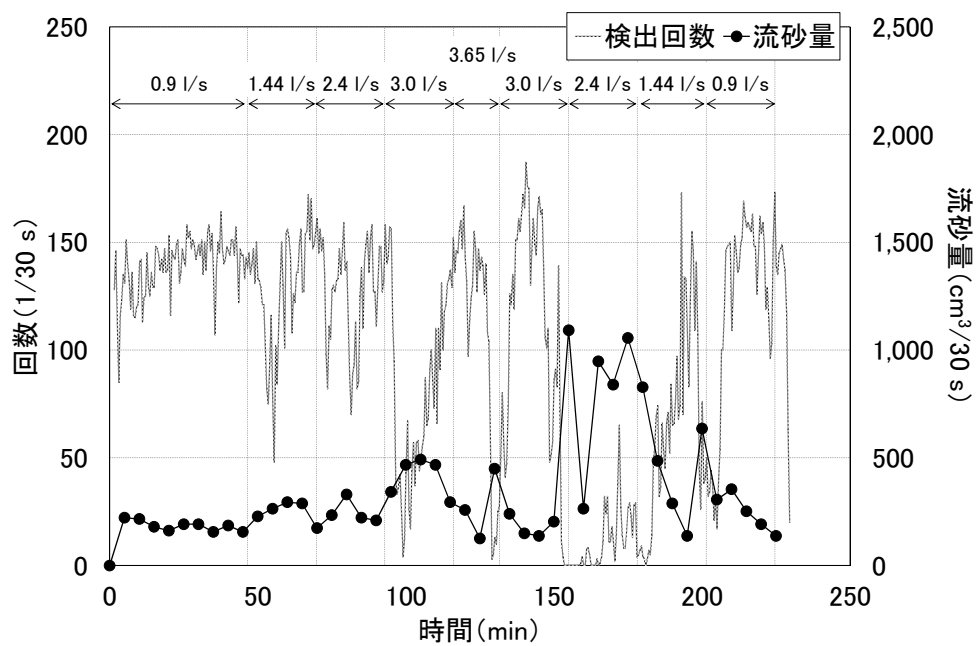


図-3.11 検出回数と流砂量の時間変化の関係(Ch4)

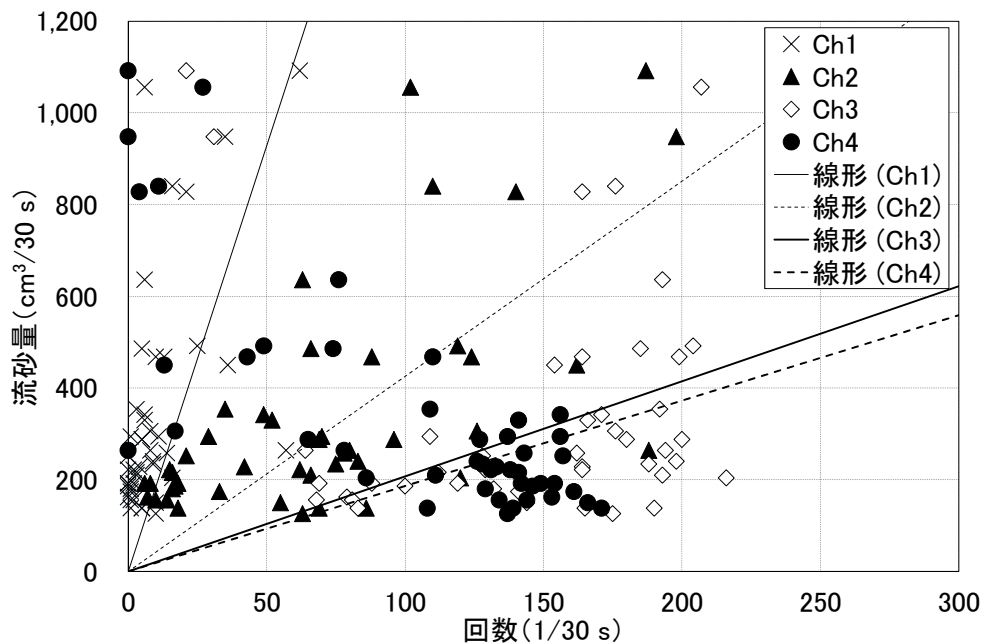


図-3.12 検出回数と流砂量の関係

3.3 直線水路による一様砂の実験

3.3.1 粒径と検出回数の関係

検出回数の合計と粒径の関係をアンプの倍率に着目して整理した．図-3.13～3.16 に粒径と総回数の関係を示す．これらの図から，粒径 1 mm は検出回数が得られず，2 mm は最も倍率の高い Ch.4 のみで検出回数が得られる．これは，1 mm が衝突した時の信号は倍率に関係なく検知電圧（閾値）より小さいためであり，2 mm が衝突した時の信号は最大に増幅させた時だけ閾値を超えたためである．閾値を小さく設定すると小粒径でも検出回数が検出されるようになるが，その時は流水により発生する音も検出してしまう場合があるため，それを区別することが難しく，ハイドロフォンで小粒径を検出するのは難しい．また，小粒径の移動形態は大粒径と比べて浮遊形態になりやすいため，ハイドロフォンに衝突しない可能性が高くなり，その理由からも大粒径と比べて検出が難しい．4 mm は各 Ch で検出回数の合計のばらつきが大きく，8 mm や 16 mm はそのばらつきが小さくなる．特に，16 mm は各 Ch でのばらつきがほとんどない．

各粒径で回数の合計が最も多く検出された Ch は，流量に関係なく AMP1 では 4 mm は Ch2, 8 mm は Ch1, 16 mm は Ch1（他の Ch もほぼ同じ検出回数），AMP2 では 4 mm, 8 mm, 16 mm とともに Ch1 である．これは，Ch が小さいと閾値が大きく設定され，小粒径では検出回数が検出され難くなるためである．16 mm はこれまでに確認されている運動量の範囲を超える条件で実施したが，その関係性と同様に運動量に対して振幅が大きくなると考えられる．また，それぞれのアンプ変化から分かるように，異なる流量（土砂濃度）でも Ch（アンプの倍率）が同じであれば，粒径と検出回数の合計の関係はほぼ同じ傾向である．これは，粒径と速度に対する振幅の応答が異なることによる．

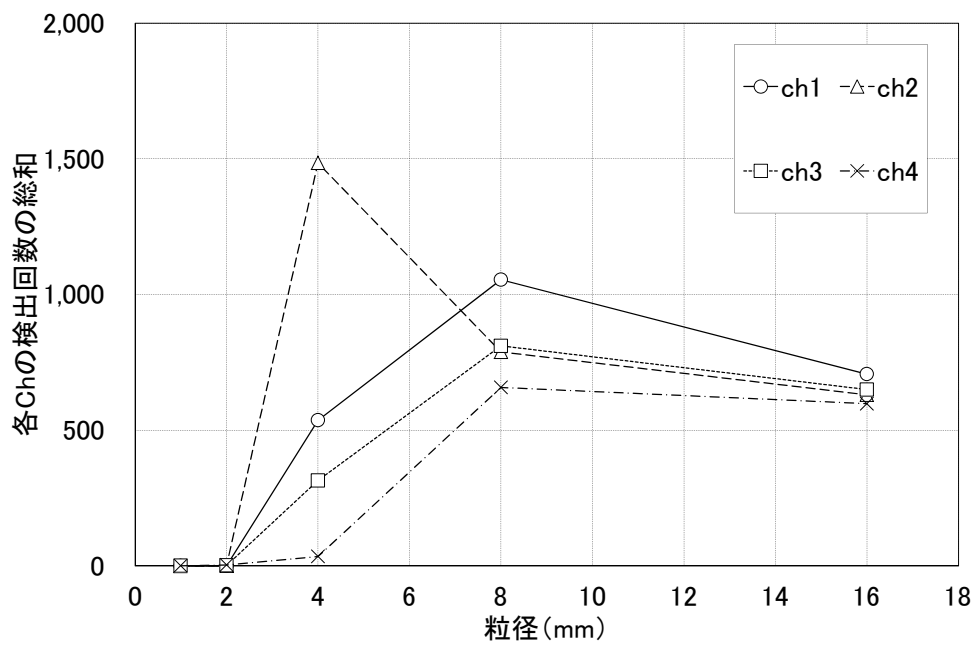


図-3.13 Q=10 l/s, AMP1 の粒径と総検出回数の関係(ケース S1-1, 1-5, 1-9, 1-13, 1-17)

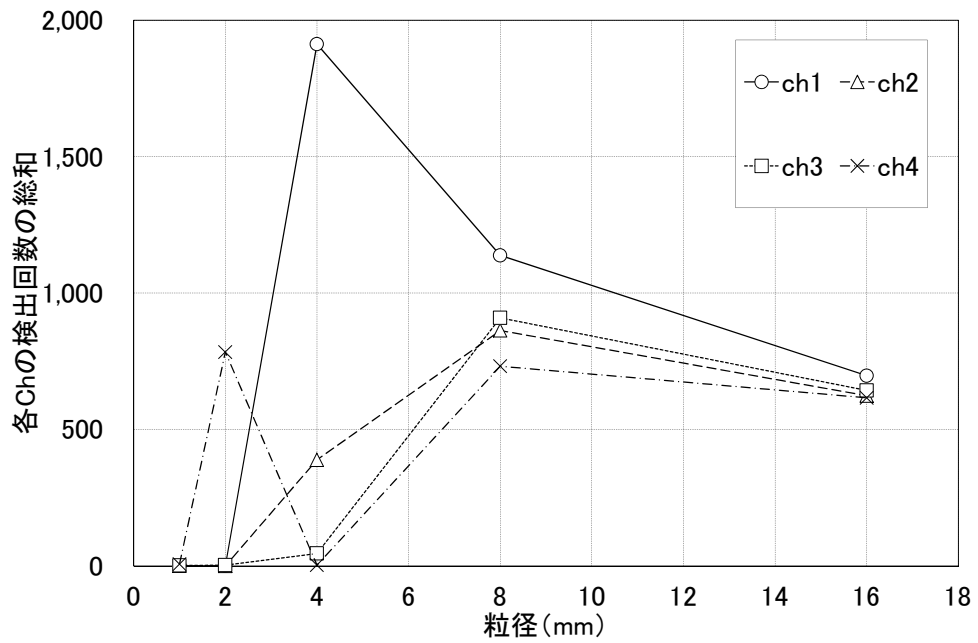


図-3.14 Q=10 l/s, AMP2 の粒径と総検出回数の関係(ケース S1-2, 1-6, 1-10, 1-14, 1-18)

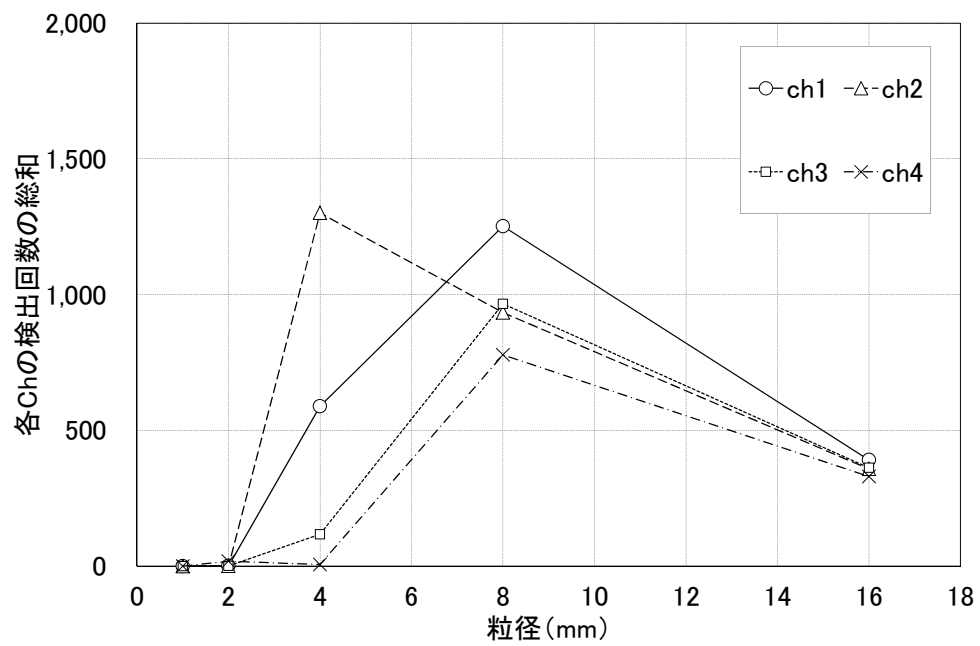


図-3.15 Q=20 l/s, AMP1 の粒径と総検出回数の関係(ケース S1-3, 1-7, 1-11, 1-15, 1-19)

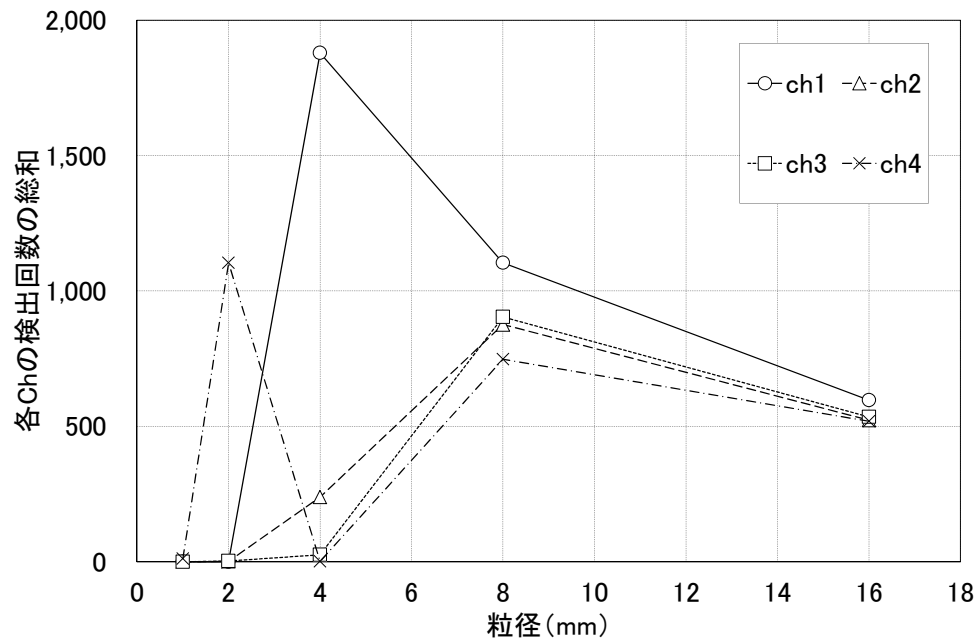


図-3.16 Q=20 l/s, AMP2 の粒径と総検出回数の関係(ケース S1-4, 1-8, 1-12, 1-16, 1-20)

3.3.2 粒子数と検出回数の関係

図-3.12 に示されるように検出回数は流砂量と相関があり、流砂量は粒子数と比例関係にあるため、検出回数と衝突粒子の個数の関係について確認した。なお、実験で給砂した粒子数は、各粒径の砂を任意量採取して数えた粒子数を基に、重量割合から算出した結果である。また、1 mm と 2 mm はほとんど回数が検出されなかったため、4 mm 以上の結果のみを評価することとした。

図-3.17 に検出回数と粒子数の関係を、図-3.18 に粒子数が少ない時の結果を見易くするため縦軸の最大値を変えて図示した。図中の実線は検出回数と粒子数が同数の場合を示している。4 mm は全ての Ch で粒子数と比べて検出回数が少なく、両者が比例関係にならないことが分かる。この原因として、一般に流砂がある厚さを持って流れ、上層を移動する粒子がパイプに衝突していない点が挙げられる。しかし、本実験の土砂濃度は、10 l/s および 20 l/s のケースそれぞれで 0.0375 %、0.075 %と低濃度であり、実験中の観察から流砂のほとんどがパイプに衝突していることから上記の原因は考え難い。そこで、粒子数が多いため粒子がパイプに衝突したときの音が重なり、包絡線検波による波形の振幅が閾値よりも低下しないことから正確な回数が得られなかったことが理由として考えられる。すなわち、検出回数には計測限界があることを示唆している。本条件下では、4 mm の粒子数 75,162 個に対して検出回数は最大で 1,912 個であった。

8 mm と 16 mm も 4 mm と同様に粒子数と比べて検出回数が少ない。これは、4 mm と同様にハイドロフォンに衝突しても検出されない粒子が存在するためである。しかし、その割合は粒子径が大きくなると少ない。また、粒子数が少ない条件で見ると、検出回数は粒子数と正の相関関係にある。この結果より、本条件下では給砂量が一定で実験しているため粒径が大きいと粒子数が少なくなり、衝突した粒子がハイドロフォンで検出される割合（検出率）が高くなる。

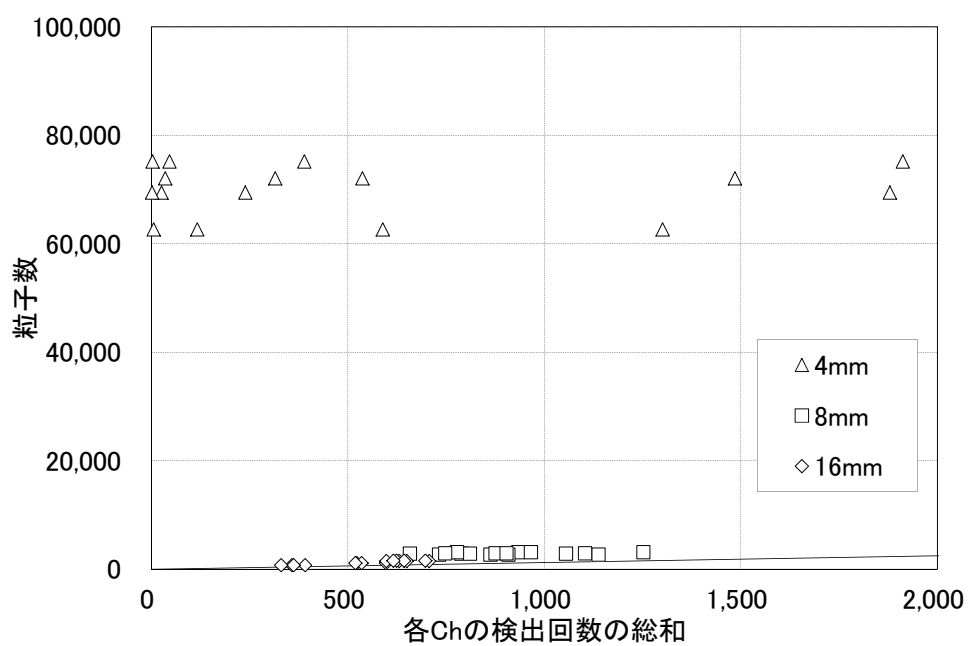


図-3.17 総検出回数と粒子数の関係(ケース S1-9～1-20, 縦軸の最大値 100,000)

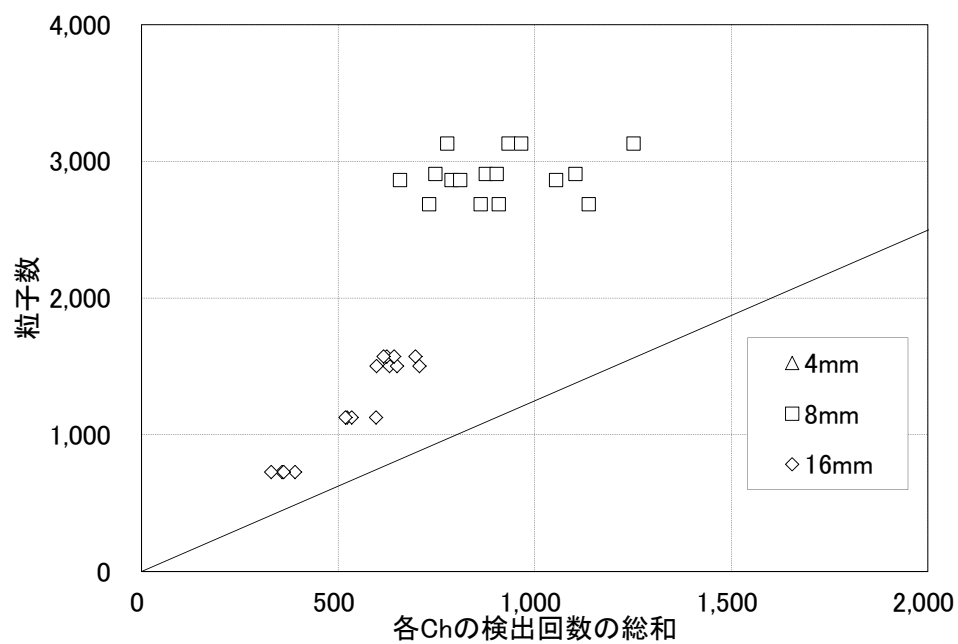


図-3.18 総検出回数と粒子数の関係(ケース S1-9～1-20, 縦軸の最大値 4,000)

3.3.3 アンプ倍率と検出回数の割合の関係

図-3.19～3.21 にハイドロフォンアンプの倍率と検出回数の割合の関係を粒径別に示す。1 mm と 2 mm はほとんど回数が検出されなかったため、4 mm 以上の結果のみを評価することとした。図中に示した検出回数の割合は、Ch1 から Ch4 それぞれの検出回数の合計に対する各 Ch.の検出回数の割合である。そのため、全ての Ch で同じ回数が検出されると、それぞれの割合は 0.25 になる。

これらの図から、4 mm はアンプの倍率が 5.0～7.1 の範囲で最も検出回数の割合が大きく、本実験で使用したハイドロフォンシステムは、4 mm に対してこの倍率の範囲での応答性が高いことになる。8 mm と 16 mm は、各倍率とも総回数の割合が 0.2～0.3 であり、この粒径については倍率の違いによる差はほとんど見られなかった。

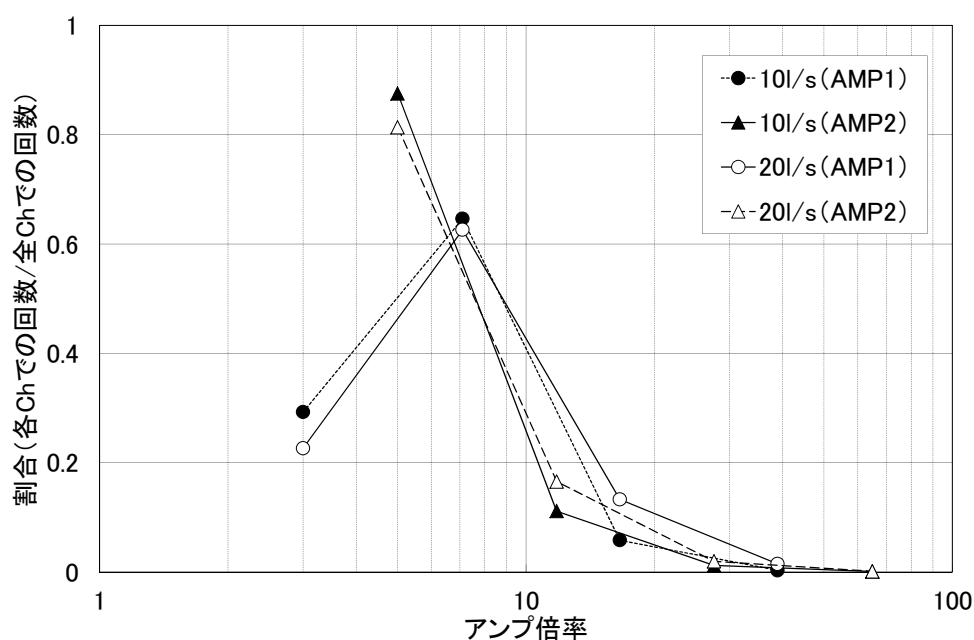


図-3.19 4mm のアンプ倍率と総検出回数の割合の関係(ケース S1-9～S1-12)

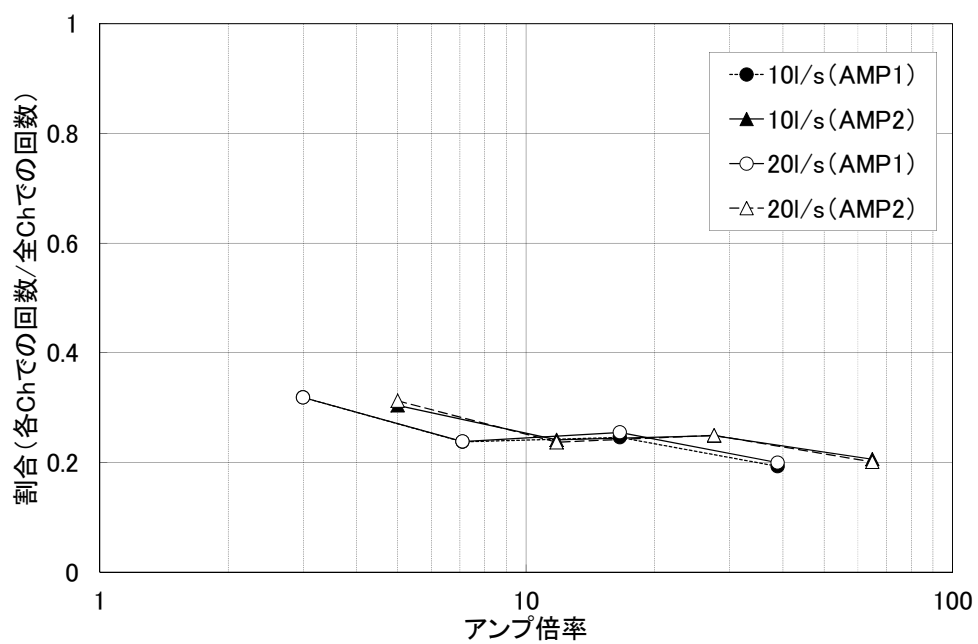


図-3.20 8mm のアンプ倍率と総検出回数の割合の関係(ケース S1-13~S1-16)

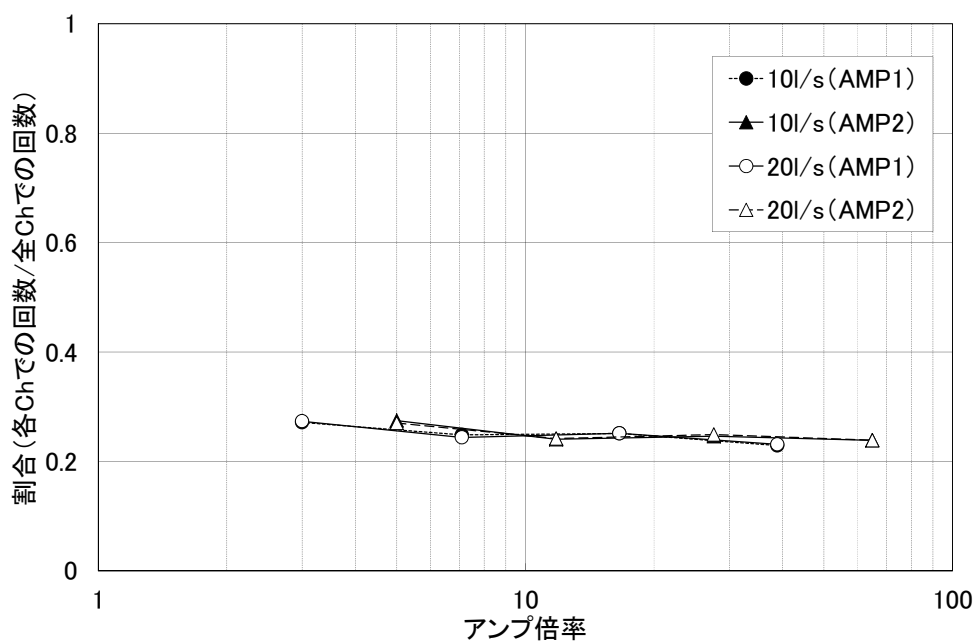


図-3.21 16mm のアンプ倍率と総検出回数の割合の関係(ケース S1-17~S1-20)

3.3.4 各 Ch の検出回数の差による振幅値の推定

図-3.22 に衝突頻度の違いによる波形の模式図を示す。この図のように、最も大きい Ch（最小閾値）での検出回数は、波形が重ならない程度の衝突頻度であれば必ず記録されるため、最も多くなる。しかし、衝突頻度が大きくなると波形が閾値を下回る前に次の粒子が衝突して、波形が下回らない閾値では回数が記録されず、最も大きい Ch（最小閾値）での検出回数が最大とならない。また、このような衝突頻度の時に粒子数と検出回数が一致しない。そこで、大きい Ch から小さい Ch で記録された回数の差をとると、ゼロに近ければ波形が 1 つ下の閾値を下回ってその間では波形が重なっていない状態、プラスの値が大きければ振幅値が 1 つ上の閾値より小さい状態、マイナスの値が大きければ 1 つ下の閾値を下回らずに信号が飽和状態となり回数が検出されない状態にあると推測することができる。ただし、各 Ch での検出回数は同時刻で記録されたものと仮定しているため、例えば、図中の複数衝突と個別衝突の波形のように全 Ch で 1 回と記録されると、それは 1 つの粒子が衝突したものとして考える。表-3.4, 3.5 に結果の一覧を示す。なお、粒径 1 mm と 2 mm は回数がほとんど記録されていないため評価の対象外とした。

粒径 4 mm の結果を見ると、AMP1 を用いたケース（S1-9, S1-10）からは振幅値が Ch1（最大閾値）から Ch2 程度であることが推測され、AMP2 を用いたケース（S1-11, S1-12）からは振幅値が Ch1 以上であり、その時間が長いことが推測される。それぞれのケースのアンプ倍率が S1-9 と S1-11 は Ch1 が 3 倍、Ch2 が 7.1 倍、S1-10 と S1-12 は Ch1 が 5 倍であることから、同様の傾向を示している。また、S1-9 と S1-11 は Ch1 の回数は、各 Ch での最大回数に対してもかなりの数が記録されているため、信号が Ch1 を超えて図-3.22 の衝突頻度大のように全ての Ch で信号が下回らず回数が記録されない場合もある。この結果より、4 mm は、振幅が Ch1 を下回らない時、Ch1～2 で信号が推移して、Ch2 を下回らない場合が存在し、回数が記録されずに粒子数より少なくなつたと考えられる。粒径 8 mm は、信号が Ch1（最大閾値）を超えて、それを下回らない場合もあるが、4 mm と比べてその時間は短いと考えられる。粒径 16 mm も 8 mm と同様であるが、その時間はさらに短く、各 Ch でほぼ同数の検出回数が記録されるが、これは検出回数が記録されやすいケースといえる。

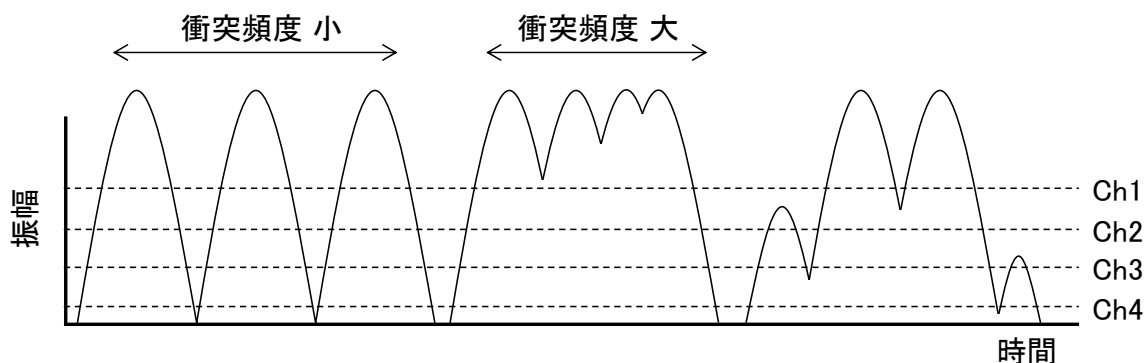


図-3.22 衝突頻度の違いによる波形の模式図

表-3.4 Method1 で記録した各 Ch の検出回数と各 Ch の検出回数の差(10 l/s)

ケース	粒 径 (mm)	粒子数	検出回数						
			Ch1	Ch2	Ch3	Ch4	Ch2-Ch1	Ch3-Ch2	Ch4-Ch3
S1-9	4	62,635	589	1301	117	6	712	-1184	-111
S1-10	4	69,420	1879	239	26	2	-1640	-213	-24
S1-13	8	2,685	1252	934	966	778	-318	32	-188
S1-14	8	2,907	1104	876	904	748	-228	28	-156
S1-17	16	727	391	358	362	330	-33	4	-32
S1-18	16	1,126	597	523	535	519	-74	12	-16

表-3.5 Method1 で記録した各 Ch の検出回数と各 Ch の検出回数の差(20 l/s)

ケース	粒径 (mm)	粒子数	検出回数						
			Ch1	Ch2	Ch3	Ch4	Ch2-Ch1	Ch3-Ch2	Ch4-Ch3
S1-11	4	72,030	537	1485	315	35	948	-1170	-280
S1-12	4	75,162	1912	389	46	3	-1523	-343	-43
S1-15	8	2,863	1055	789	811	658	-266	22	-153
S1-16	8	3,129	1138	863	909	732	-275	46	-177
S1-19	16	1,502	707	631	650	598	-109	-33	-52
S1-20	16	1,572	697	624	643	616	-81	-8	-27

Method1 で記録した結果から Method2 の結果を導くためには、式(3.1)～式(3.4)に示すように倍率の小さい Ch からの回数の差を取る。

$$(Ch1)_{m2} = (Ch1)_{m1} \dots\dots\dots (3.1)$$

$$(Ch2)_{m2} = (Ch2)_{m1} - (Ch1)_{m2} \dots\dots\dots (3.2)$$

$$(Ch3)_{m2} = (Ch3)_{m1} - (Ch2)_{m2} - (Ch1)_{m2} \dots\dots\dots (3.3)$$

$$(Ch4)_{m2} = (Ch4)_{m1} - (Ch3)_{m2} - (Ch2)_{m2} - (Ch1)_{m2} \dots\dots\dots (3.4)$$

() は各 Ch の回数を表し、負の場合は回数をゼロとする。添え字 m1 は Method1, m2 は Method2 である。Method1 の回数から求めた Method2 の回数を表-3.6, 3.7 に示す。運動量と振幅が 1 対 1 の関係であることから、同じ u_* の条件下ではある粒径での運動量は全て一定になり、Method2 では 1 つの Ch でのみ回数が記録される。しかし、表-3.6, 3.7 に示す結果から、Method2 の粒径 4 mm の 2 ケースでは (S1-9, S1-11), Ch1 と Ch2 で回数が記録されている。これは、栗原ら³⁵⁾が指摘しているように粒子の運動により速度のばらつきが生じて運動量が一定にならないためである。また、粒径 4 mm でも別のアンプを用いた結果や粒径 8 mm 以上の結果は Ch1 でのみ回数が記録されているが、振幅値はばらついている場合もあると推測される。Method1 で記録された結果からは、運動量のばらつきが生じていることは確認できないが、Method2 では確認できる。Method1 は各 Ch の回数の差を取ることで、信号が飽和状態かどうかを確認することはできるが、飽和状態では流砂量を推定することはできない。流砂量解析には流砂の運動による相対速度のばらつきの割合を求める必要があるため、Method2 の結果が必要である。Method1 から Method2 を求める方法は、各 Ch での検出回数が同時刻で記録されると仮定する必要があるが、各 Ch の検出回数が記録される時刻がずれる場合は、正確に求めることができない。例えば、図-3.22 の右端の波形を見ると、Method1 では Ch1, Ch2, Ch4 で回数が 2 回記録され、Ch3 では 3 回記録される。Method1 から Method2 の検出回数を求めると、Ch1 は 2 回、Ch2 は 0 回、Ch3 は 1 回、Ch4 は 0 回である。しかし、実際には Method2 での検出回数は、Ch1 で 2 回、Ch2 で 1 回、Ch3 で 1 回、Ch4 で 0 回である。Method1 では回数が確実に検出されない場合があるため、検出回数を用いた流砂量解析には Method2 の方法を用いることが必要である。

表-3.6 Method1 から推定した Method2 の各 Ch の検出回数(10 l/s)

ケース	粒径 mm	粒子数	検出回数			
			Ch1	Ch2	Ch3	Ch4
S1-9	4	62,635	589	712	0	0
S1-10	4	69,420	1879	0	0	0
S1-13	8	2,685	1252	0	0	0
S1-14	8	2,907	1104	0	0	0
S1-17	16	727	391	0	0	0
S1-18	16	1,126	597	0	0	0

表-3.7 Method1 から推定した Method2 の各 Ch の検出回数(20 l/s)

ケース	粒径 mm	粒子数	検出回数			
			Ch1	Ch2	Ch3	Ch4
S1-11	4	72,030	537	948	0	0
S1-12	4	75,162	1912	0	0	0
S1-15	8	2,863	1055	0	0	0
S1-16	8	3,129	1138	0	0	0
S1-19	16	1,502	707	0	0	0
S1-20	16	1,572	697	0	0	0

3.4 直線水路による混合砂の実験

3.4.1 アンプの倍率－検出回数の割合と混合砂の粒径比－重量比の関係

図-3.23～3.25に最大倍率(AMP2のCh4)に対する各Chの倍率の割合と総回数の割合の関係に、混合砂の粒度分布を表す重量比と粒径比の関係を重ねてプロットした結果を示す。混合砂別に結果を見ると、混合砂Ⅰ(図-3.23)は総回数の割合とアンプの倍率の関係と重量比と粒径比の関係のグラフ形状が類似している。混合砂Ⅱ(図-3.24)と混合砂Ⅲ(図-3.25)は、総回数の割合のピークが、混合砂Ⅰと比べて明確に現れておらず、全体的に総回数の割合がどのChに対してもほぼ0.2以上となっている。そのため、混合砂ⅡとⅢは、倍率と総回数の割合の関係と粒度分布を表す重量比と粒径比の関係が一致しているとはいえない結果となった。

混合砂ⅡとⅢで総回数の割合のピークが明確に示されず、粒度分布との対応が出来ない結果となった理由としては、本実験で使用したハイドロフォンシステムの回数収集特性のひとつが考えられる。先の一様砂の実験より本システムでは総回数の粒径に対する変化が現れる粒径範囲は8.0 mm 以下であったことから、平均粒径7.9 mm と11.0 mm の混合砂ⅡとⅢは、どの倍率であっても得られる回数に変化が出にくい粒度分布の砂であったものと考えられる。

今回は混合砂Ⅰの粒度分布が本システムの回数収集特性に合致したため、粒度分布特性と倍率との関係が良好に示された。しかし、その適用範囲は狭いため、今後のハイドロフォンを使用した回数からの粒度分布の推定には、より大きな粒径に対して、あるいは、より小さな粒径に対して倍率ごとに回数の変化が現れるように、システムの回数収集特性やパイプの仕様を変更する必要がある。

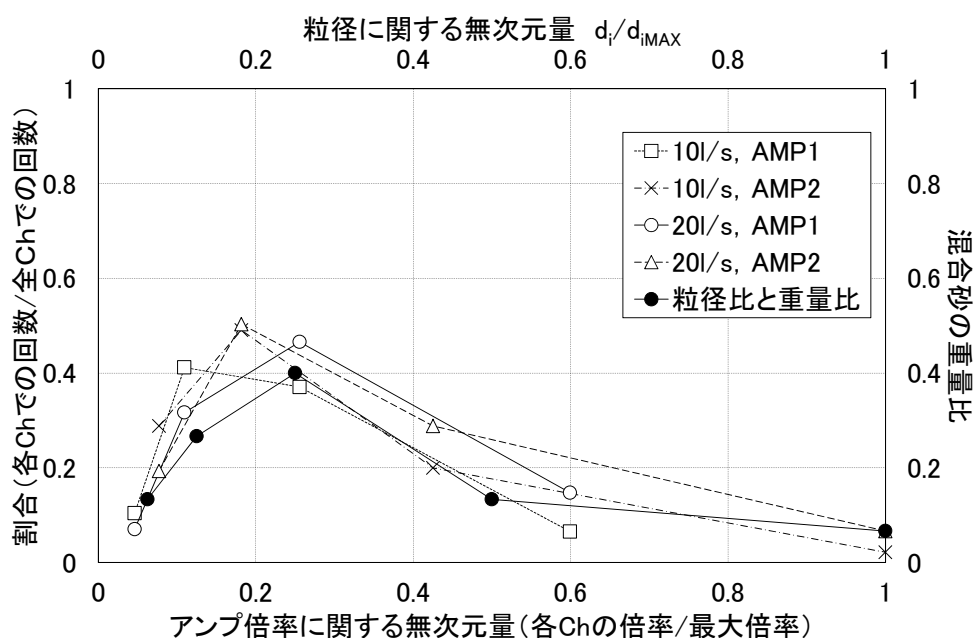


図-3.23 混合砂Ⅰの倍率－検出回数の割合と粒径比－重量比の比較(ケース S2-1～S2-4)

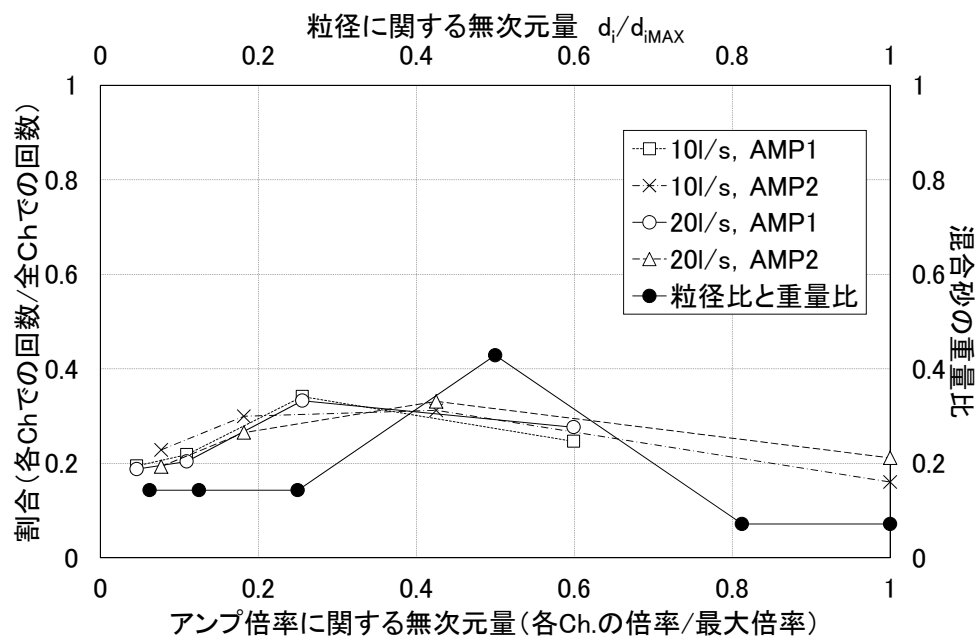


図-3.24 混合砂Ⅱの倍率－検出回数の割合と粒径比－重量比の比較(ケース S2-5～S2-8)

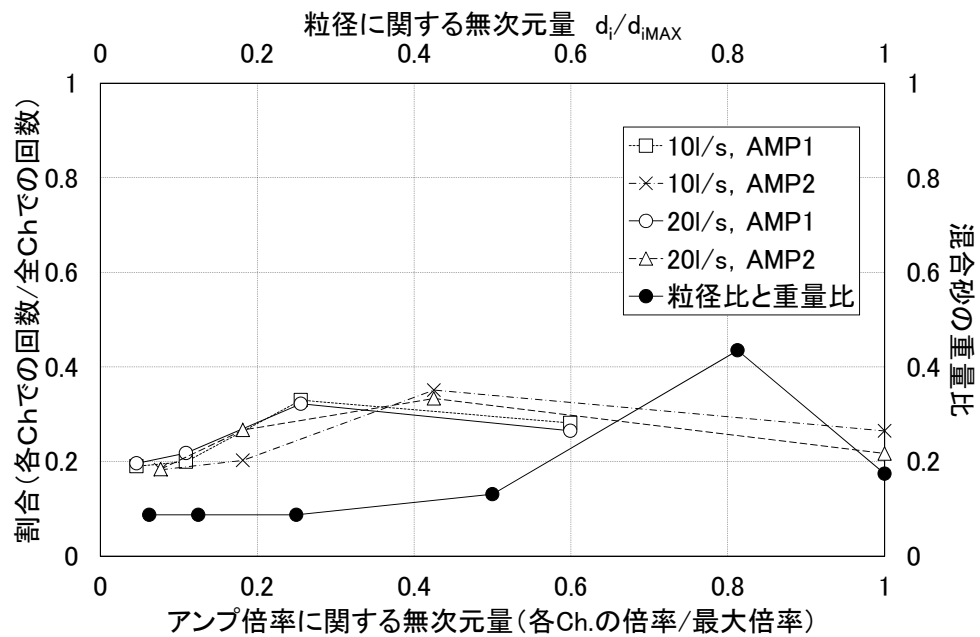


図-3.25 混合砂Ⅲの倍率－検出回数の割合と粒径比－重量比の比較(ケース S2-9～S2-13)

3.4.2 各 Ch の回数の差による振幅値の推定

一様砂と同様に混合砂の結果についても各 Ch で記録された回数の差を取って信号の振幅値を推定した。表-3.8, 3.9 に結果の一覧を示す。表中の粒子数は、平均粒径から推定した値である。

全てのケースで、粒子数に対して各 Ch で記録される回数は少なく、粒子径が小さいほどその傾向はより顕著に見られる。これは、Ch1 の回数は各 Ch での最大回数に対してかなりの数を記録しているため、信号が Ch1 (最大閾値) を超えて、全ての Ch で信号が下回らず回数が記録されない状態が続いていると推測されることからわかる。また、一様砂の場合は各 Ch での差がゼロに近ければ信号が 1 つ下の閾値を下回って波形が重ならない状態、プラスの値が大きければ振幅値が 1 つ上の閾値より小さい状態、マイナスの値が大きければ 1 つ下の閾値を下回らずに信号が飽和状態と推測することができる。しかし、混合砂になると粒径によって振幅値が異なるため一様砂と同様のことが示せない。

一様砂と同様に Method1 で記録した結果から Method2 の結果を求めた。その結果、S2-3 以外のケースでは全て Ch1, Ch2 で記録される。平均粒径が小さいケース (S2-1, 2-3, 2-4) は、Ch1 より Ch2 以下の回数が多い。これは、Ch1 より Ch2 の方が閾値が小さく、小粒径は運動量が小さく振幅値も小さくなるため倍率が小さい Ch2, 3 での検出回数が多い。平均粒径が大きいと、倍率の大きい Ch1 で記録される回数が増える。

一様砂の結果から、流砂の運動により速度がばらつき、運動量ひいては振幅値にばらつきが生じる。しかし、振幅値は粒径の 3 乗に比例するため、混合砂の場合は、速度のばらつきより粒径の変化の方が大きく表れると考えられるが、その割合については不明である。

表-3.8 Method1 で記録した各 Ch の検出回数と各 Ch の検出回数の差(10 l/s)

ケース	平均 粒径 (mm)	粒子数	検出回数						
			Ch1	Ch2	Ch3	Ch4	Ch2-Ch1	Ch3-Ch2	Ch4-Ch3
S2-1	5.5	28,411	422	1668	1501	265	1246	-167	-1236
S2-2	5.5	28,411	1029	1752	713	77	723	-1039	-636
S2-5	7.9	9,587	764	858	1341	968	94	483	-373
S2-6	7.9	9,587	894	1173	1222	628	279	49	-594
S2-9	11.0	3,551	695	730	1206	1029	35	476	-177
S2-10	11.0	3,551	677	751	1302	982	74	551	-320

表-3.9 Method1 で記録した各 Ch の検出回数と各 Ch の検出回数の差(20 l/s)

ケース	平均 粒径 (mm)	粒子数	検出回数						
			Ch1	Ch2	Ch3	Ch4	Ch2-Ch1	Ch3-Ch2	Ch4-Ch3
S2-3	5.5	28,411	299	1344	1976	625	1045	632	-1351
S2-4	5.5	28,411	745	1940	1111	256	1195	-829	-855
S2-7	7.9	9,587	679	737	1203	1000	58	466	-203
S2-8	7.9	9,587	722	991	1238	791	269	247	-447
S2-11	11.0	3,551	645	717	1060	872	72	343	-188
S2-12	11.0	3,551	697	1011	1263	822	314	252	-441

表-3.10 Method1 から推定した Method2 の各 Ch の検出回数 (10 l/s)

ケース	平均粒径 (mm)	粒子数	検出回数			
			Ch1	Ch2	Ch3	Ch4
S2-1	5.5	28,411	422	1246	0	0
S2-2	5.5	28,411	1029	723	0	0
S2-5	7.9	9,587	764	94	0	0
S2-6	7.9	9,587	894	279	0	0
S2-9	11.0	3,551	695	35	0	0
S2-10	11.0	3,551	677	74	0	0

表-3.11 Method1 から推定した Method2 の各 Ch の検出回数 (20 l/s)

ケース	平均粒径 (mm)	粒子数	検出回数			
			Ch1	Ch2	Ch3	Ch4
S2-3	5.5	28,411	299	1045	333	0
S2-4	5.5	28,411	745	1195	0	0
S2-7	7.9	9,587	679	58	0	0
S2-8	7.9	9,587	722	269	0	0
S2-11	11.0	3,551	645	72	0	0
S2-12	11.0	3,551	697	314	0	0

3.5 結語

本章では、ハイドロフォンで記録される粒子の衝突回数と流砂量の関係を水理条件ごとに整理するため、実験により流砂量解析手法の評価を行った。本章での検出回数は Method1 で記録した。

地形を模した水路実験より、ハイドロフォンによる最大記録回数は Ch ごとに異なることを確認した。Ch1 と Ch2 は流砂量の時間的変化の傾向を表し、Ch3 と Ch4 は流砂量が小さい時は Ch1 や Ch2 より回数が記録されるが、流砂量が多い時は回数が極端に少なく流砂量の時間的変化の傾向が合わない。検出回数から流砂量を推定するには、条件に合った倍率の設定が必要であることを確認した。現地のように広い粒度分布に対応するためには、これまで確認された範囲より大きな運動量で両者の関係を確認する必要がある、第4章で実施する。

次いで、直線水路の実験より、粒径ごとに記録される Ch を確認し、流砂量と回数の関係を整理した。一様砂の実験結果から、本実験条件下では 1 mm と 2 mm はほとんど回数が記録されなかった。4 mm は各 Ch で総回数のばらつきが大きく、8 mm や 16 mm ではばらつきが小さくなる。特に、16 mm は各 Ch での総回数のばらつきがほとんどなく、流砂量から推定した粒子数と回数がほぼ一致した。アンプの倍率と粒径の対応は、4 mm は 5.0～7.1 倍での応答性が高く、8 mm と 16 mm は倍率の違いによる差はほとんど確認できなかった。各 Ch での検出回数が同時刻に記録されたものと仮定した場合、各 Ch の検出回数の差を求めると、信号が飽和状態をある程度確認することができる。さらに、Method1 で記録した結果から Method2 の結果を求めると、同じ u_* の条件下でも 1 つの Ch で記録されずに、複数の Ch で記録されることが確認された。これは、流砂の運動によりパイプへの衝突の相対速度がばらつくからである。しかしながら、これらの解析には同時刻で記録することを仮定する必要がある、時刻がずれて記録されているものが含まれると、実際の結果とは大きく異なる。ばらつきの確認ができること、飽和状態では Method1, 2 に関係なく流砂量を推定することが難しいため、流砂量解析には Method2 で検出回数を記録する必要がある。第5章では Method2 を用いた解析法を検討した。

混合砂の結果より、本実験条件下では混合砂Ⅰは各 Ch での回数の割合が粒度分布の重量比を表したが、混合砂Ⅱと混合砂Ⅲでは割合が重量比と一致しなかった。これは、一様砂のとき 4 mm でアンプ倍率による変化を表し、平均粒径 5.5 mm の混合砂Ⅰでは変化を表したが、平均粒径 7.9 mm と 11.0 mm の混合砂Ⅱと混合砂Ⅲはどの倍率でも回数に変化が出にくい粒度分布の砂であったためである。混合砂でも一様砂と同様に各 Ch で記録された回数の差を求めたが、混合砂は粒径によって振幅値が異なるため一様砂と同様のことが示されなかった。また、Method1 で記録した結果から Method2 の結果を求めると、平均粒径が小さいと運動量が小さくなり振幅値も小さくなるため倍率が高い Ch2, 3 で検出回数が多くなる。平均粒径が大きいと、倍率の小さい Ch1 で検出回数が多くなる。しかしながら、一様砂の実験と同様に流砂の運動による速度のばらつきが生じ同じ u_* 、同じ粒径が衝突しても振幅値にばらつきが生じる。流砂量解析にはこのばらつきの割合の検討が必要であり、第5章で実施する。

第4章 粒子衝突時のハイドロフォン内部の音響特性

ハイドロフォンで記録する回数から流砂量を推定するためには、粒子の衝突により生じる音響信号の波形を把握しなければならない。これまでの研究では、信号のうち円周方向モードの周波数帯の最大振幅値は粒子のもつ運動量と相関関係にあることが確認されている。ハイドロフォン内のコンデンサーマイクは1つの粒子の衝突により生じた音波が重なりあった波形を計測する。従って、1つの粒子の衝突により生じる音響信号の波形を把握できれば、ハイドロフォンによる流砂量の推定の精度は向上すると考えられる。そこで、本章では1つの粒子の衝突により生じる減衰振動を調べる。なお、これまでの研究でその関係性は最大 $2.1 \text{ g}\cdot\text{m/s}$ までしか確認されておらず、現地観測用の計測機器として実用的に用いるためには、それより大きな運動量について振幅値と運動量の関係性を確認する必要があるため、現地での適用に必要と考えられる広い範囲について両者の関係を調べた。

4.1 実験概要

図-4.1に今回使用したハイドロフォンのシステム構成を示す。パイプは外径 48.6 mm、内径 44.6 mm、長さ 50 cm のステンレス製である。マイクロフォンは周波数特性 50 Hz～15 kHz のコンデンサーマイクを使用している。軸方向モードの周波数は 0.2 kHz、円周方向モードの周波数は 4.6 kHz、径方向モードの周波数帯は 9.4 kHz である。なお、粒子衝突でパイプの外側を伝わる振動による音を極力拾わないように、マイクロフォンの蓋に塩ビ管を用い、蓋とマイクロフォンはシリコンで接着し、蓋とパイプの接着部分にはラバーを間に挟んだ。ラバーの厚みは予備実験により振動が抑えられたことが確認された 2 mm とした。

マイクロフォンからの出力信号は、アンプにより 1 倍、4 倍、16 倍、64 倍、256 倍、1024 倍に増幅され、A/D コンバーターに送られる。A/D コンバーターは $\pm 5 \text{ V}$ まで計測されるものと、 $\pm 10 \text{ V}$ まで計測されるものがあり、1 秒間に 100,000 個の割合で 14 bits の分解能でアナログ値をデジタル値に変換し、データロガーに記録する。運動量の違いにより卓越する周波数帯を確認するため一部のケースは FFT アナライザーで解析を行った。FFT の結果から卓越周波数帯を確認した後にバンドパスフィルターによりその周波数帯の波形を抽出し（今回は、軸方向モードの周波数は 0.2 kHz、円周方向モードの周波数 4.6 kHz、径方向モードの周波数帯は 9.4 kHz の 3 通り）、FFT 後の波形を整形して最大振幅値を記録した。

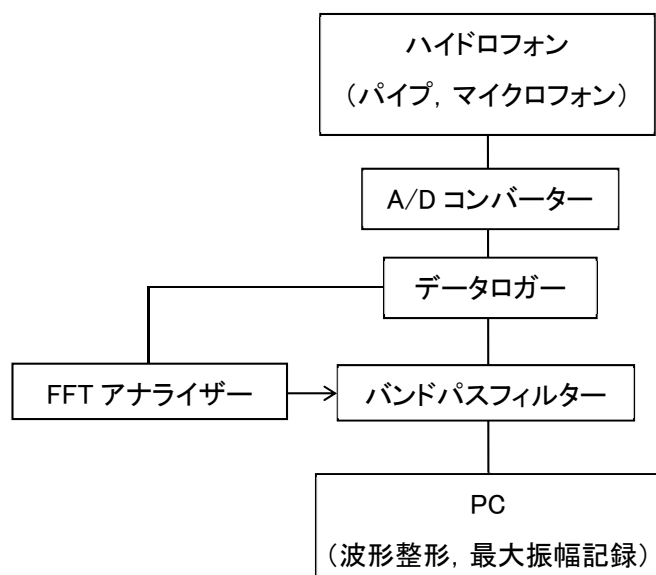


図-4.1 本実験で使用したハイドロフォンシステムの構成

実験は、粒子の中心とパイプの中心の衝突が確認できるように空気中で実施し、粒子の運動量は質量の異なる粒子を、高さを変えながら回転をさせずに自由落下させて変化させた。粒子の衝突速度は 600 f.p.s.のハイスピードカメラで記録した。音響信号は解析に十分な分解能を得るため 100 kHz で記録し、バンドパスフィルターを用いて卓越する周波数帯の波形データを抽出し、最大振幅値を抽出した。パイプへの粒子の衝突位置は、マイクロフォンから 10, 20, 30, 40 cm に変化させて、卓越する周波数の振幅の違いについても確認した。各アンプを用いた実験ケースの一覧を表-4.1, 4.2 に、実験方法を図-4.2 に示す。

表-4.1 単一倍率のアンプを用いた実験ケースの一覧表

質量(g)	運動量(g・m/s)	マイクからの衝突位置(cm)
0.51	0.5～1.0	10, 20, 30, 40
1.56	1.4～2.3	
4.08	1.1～9.9	
10.2	9.2～16.4	
32.7	12.9～91.5	
102.5	78.6～157.2	
678.6	116.4～704.6	

表-4.2 可変倍率のアンプを用いた実験ケースの一覧表

質量(g)	運動量(g・m/s)	マイクからの衝突位置(cm)
0.05	0.02～0.10	10
0.15	0.06～0.42	
0.51	0.28～1.12	
2.55	1.23～4.51	
4.08	3.13～14.0	
6.19	8.67～17.3	
10.2	15.0～51.7	
32.7	28.9～121.0	
102.5	45.4～536.9	
678.6	268.7～3004.3	
4087.6	1763.8～7238.6	

- ・設置台と側壁を下図のようにゴムで繋ぎ、設置台を中央部に寄せて(ゴムを引っ張る)、粒子が落下しないようにする
- ・解除レバーを押して、フックが外れて設置台の中央部が開き粒子が落下する

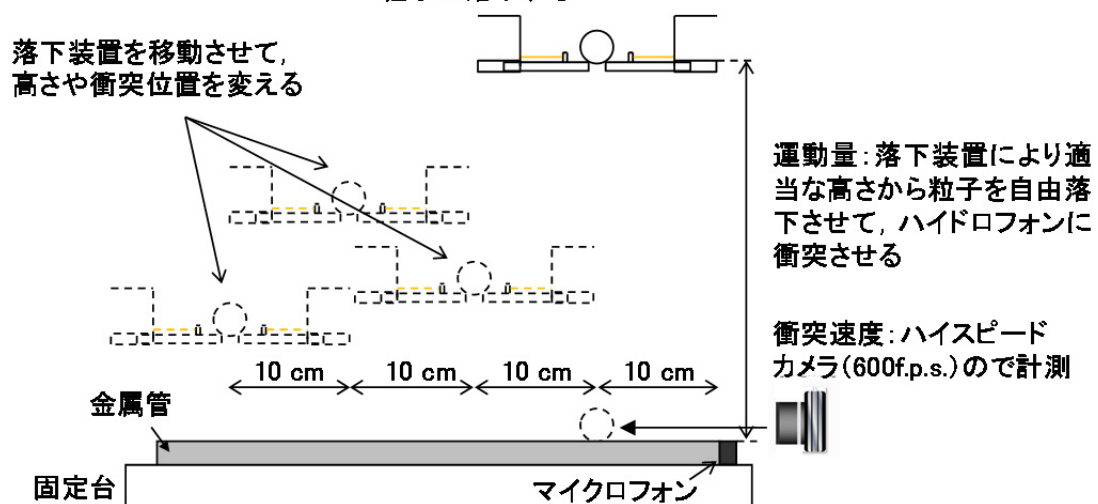


図-4.2 実験方法

4.2 ハイドロフォン内部の音響特性

ハイドロフォンへの粒子衝突時における音響信号に対するスペクトル分布，粒子衝突時の運動量と固有振動の振幅の関係，可変倍率のアンプを用いた時の運動量と固有振動の振幅の関係について整理した．

4.2.1 音響信号のスペクトル解析

単一倍率のアンプを用いた時の粒子の衝突時における音響信号に対するスペクトル解析結果から図-4.3 に示すようなスペクトル分布が得られる．これらの中で卓越したスペクトルは，第2章で述べたように次式で定義される基本周波数を持つ， f_z 軸方向モード， f_{l0} 円周方向モード， f_{0l} 径方向モードの共振信号である．

$$\text{径方向モード} \quad f_z = \frac{c}{2L} \dots\dots\dots (4.1)$$

$$\text{円周方向モード} \quad f_{l0} = \frac{0.298c}{a} \dots\dots\dots (4.2)$$

$$\text{軸方向モード} \quad f_{0l} = \frac{0.61c}{a} \dots\dots\dots (4.3)$$

ここに， c は音速， L はパイプの長さ， a はパイプの半径である．

今回使用したハイドロフォンの条件より， f_z 軸方向モードは 0.2 kHz， f_{l0} 円周方向モードは 4.6 kHz， f_{0l} 径方向モードは 9.4 kHz である．また，結果から小さい粒子 (0.51 g) に対しては，軸方向モードの振幅が小さく，大きい粒子 (678.6 g) に対しては，各モードの振幅がほぼ同じ程度となることからわかる．粒子の運動量が 1.0 g・m/s，8.3 g・m/s のように比較的小さい場合は，円周方向モードや径方向モードと比べて軸方向モードの振幅が小さく，運動量が 405 g・m/s のように大きい場合は，各モードの振幅がほぼ同程度となることからわかる．

このことから，軸方向モードは小さい粒子もしくは衝突速度の遅い粒子に対しては反応し難く，大きい粒子や衝突速度の速い粒子に対しては反応することがわかる．また，周波数特性が低域になるためノイズの影響を受けやすい．一方，円周方向モードや径方向モードは小さい粒子や衝突速度の遅い粒子に対しても反応している．幅広い粒度分布を計測するには，円周方向や径方向のモードが適していると言える．

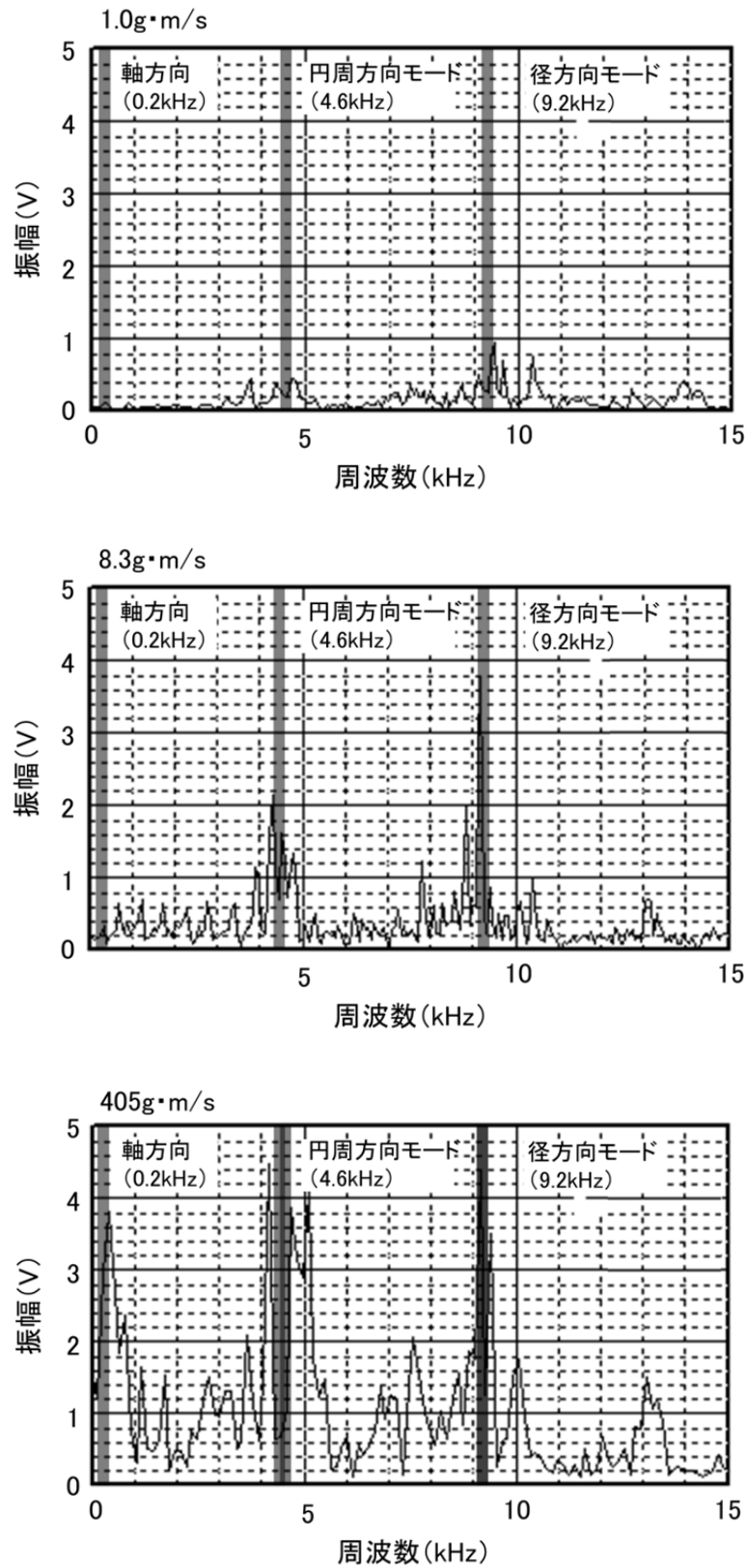


図-4.3 音響信号のスペクトル分布の一例(上段:1.0g·m/s, 中段:8.3g·m/s, 下段:405g·m/s)

4.2.2 単一倍率のアンプを用いた時の運動量と固有振動の振幅の関係

図-4.4 はマイクロフォンから得られた音響信号の波形データを式(4.1)～(4.3)に示した卓越周波数帯のみをバンドパスフィルターを用いて抽出し、その最大振幅と粒子の運動量の関係を粒子の質量ごとに整理し、両対数で示したものである。

結果から、軸方向モードについては、運動量が小さい条件ではほとんど反応していないことがわかる。また、運動量が同程度であっても振幅が離散している。これは、粒子の衝突位置がマイクロフォンから離れると振幅が小さくなるため、谷口ら³⁴⁾の結果でも同様の傾向が示されている。一方、円周方向モードや径方向モードについては、粒子の衝突位置に関係なく運動量に対してほぼ一定の振幅が得られ、運動量と振幅に良い相関が見られた。ただし、運動量が $20 \text{ g}\cdot\text{m/s}$ を超える条件になると、振幅がほぼ横ばいになり飽和する。円周方向モードに着目すると衝突音を感知できるレンジが最も広く、例えば振幅値 $0.1\sim 5 \text{ V}$ の範囲においては約 6.0 倍の粒径比を区分することができる。これは、一定の倍率で信号を増幅させた結果として考えると、倍率の違いを利用することで現地溪流のような幅の広い粒度分布についても対応できると考えられる。

実験の範囲内では、3 方向の固有振動のうち円周方向の固有振動の振幅は運動量のおよそ 0.7 乗に比例し、径方向の固有振動ではおよそ 2 乗に比例する。なお、運動量を数倍オーダーの狭い範囲で見ると、円周方向の固有振動の振幅は、既往の研究^{34),35)}と同様に運動量の 1 乗に比例しているとして取り扱うことができる。単一の倍率のアンプを用いる場合、より幅広い運動量に対応できる点から円周方向の固有振動モードを利用するのがよいと考えられる。

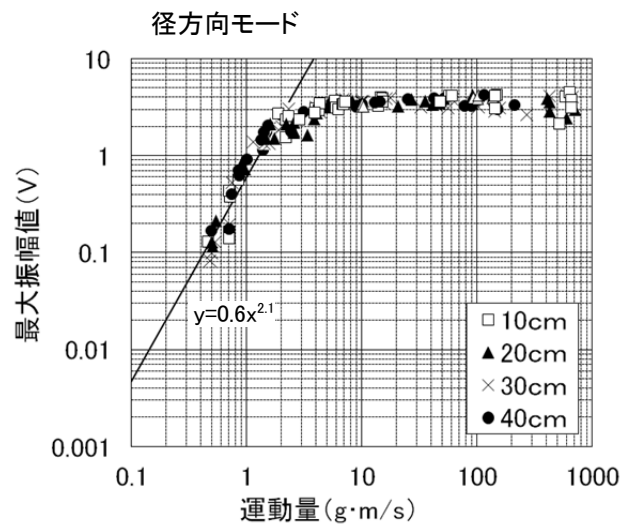
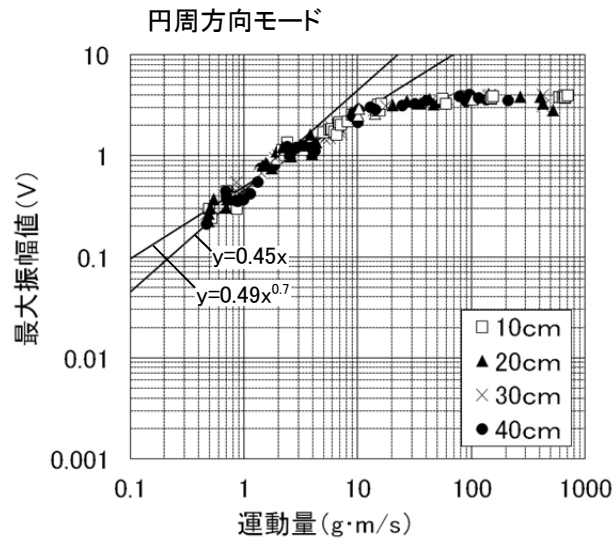
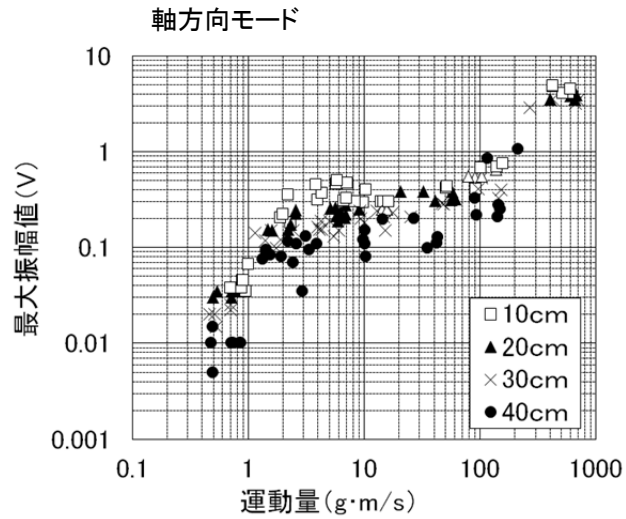


図-4.4 各固有振動モードにおける運動量と最大振幅値の関係(上段:軸方向モード, 中段:円周方向モード, 下段:径方向モード)

4.2.3 可変倍率のアンプを用いた時の運動量と固有振動の振幅の関係

運動量が約 $20 \text{ g}\cdot\text{m/s}$ より大きくなる条件で振幅値との関係を確認するため、最大 10 V まで記録できるデータロガーを使用し、さらに倍率を $1\sim 1024$ 倍の 4 倍刻みで 6 段階に変えられるようにした。実験はアンプの倍率ごとに実施し、粒子の衝突位置はマイクロフォンから 10 cm とした。なお、使用したデータロガーの分解能は 14 bit であるため、 0.001 V 以下は計測できない。

図-4.5 は可変倍率のアンプを用いた時の運動量と振幅の関係を示したものである。本実験で使用したハイドロフォンアンプは、プリアンプとパワーアンプの 2 段階で音響信号を増幅し、倍率はパワーアンプの段階で変えられるように設定してあるため、アンプの倍率を上げると信号は単純に増幅する仕組みである。そのため、アンプの倍率の違いは比例定数が変化するだけで、単一の倍率のアンプを用いた時と同じように、全て振幅は運動量の 0.7 乗に比例する。アンプの倍率が 1 倍、 4 倍、 16 倍、 64 倍の場合、振幅がデータロガーの上限値以下でも先の実験と同じように運動量が約 $20 \text{ g}\cdot\text{m/s}$ 以上で飽和する。これは、粒子の運動量がある領域以上でパイプに衝突すると、その振動で管内へ入射する音が比例して大きくなること、または、コンデンサーマイクのオーバーレンジによるものと考えられる。なお、運動量が約 $20 \text{ g}\cdot\text{m/s}$ 以上の条件では、パイプが塑性変形を生じる可能性があるため、ハイドロフォンで計測可能な粒径の範囲は限られる。これらの飽和現象はパイプの振動（管内の空気の振動）が大きく影響し、パイプの固定方法や肉厚を変えて、振動を抑制できれば、より大きな運動量に対しても振幅と相関が得られるようになると思われる。アンプの倍率を 256 倍、 1024 倍にすると、実験条件とした運動量に対して振幅がレンジオーバーとなるため、計測範囲が狭くなる。一方でアンプの倍率が 1 倍では、運動量が小さい条件の計測ができずに、計測範囲が狭くなる。これは、アナログ回路で信号を増幅して、データロガーの分解能以下となるものは計測できないためである。

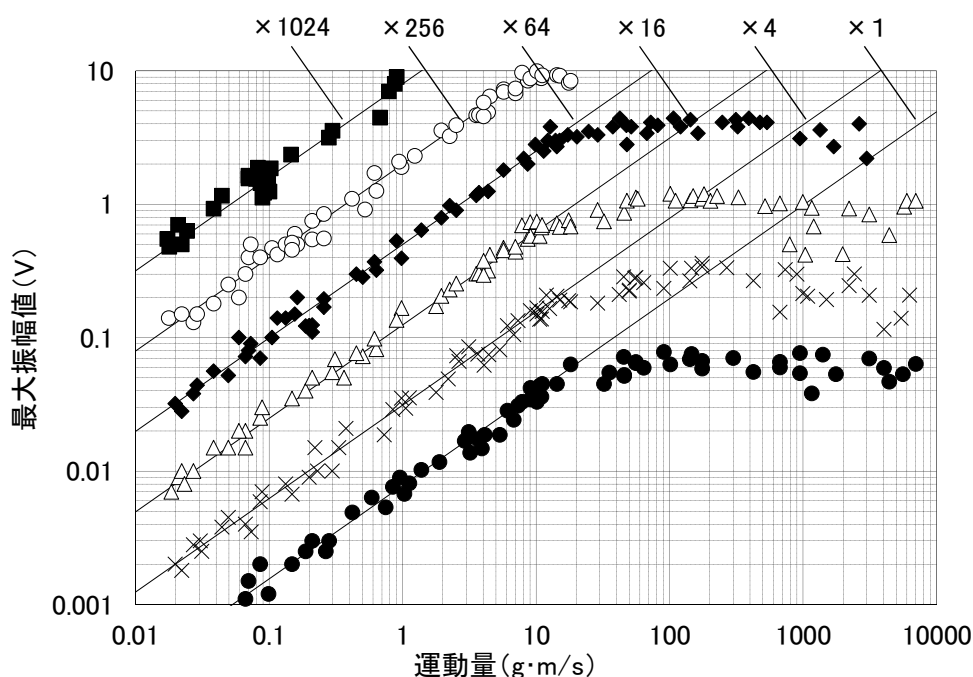


図-4.5 円周方向モードの運動量と最大振幅値の関係

今回の実験では、アンプの倍率を 4 倍、16 倍、64 倍に設定すると単一の倍率でも広範囲にわたって振幅と運動量の関係を確認することができた。しかし、水中での設置やハイドロフォンの固定方法が異なると、確認した運動量と振幅の関係が変わらなくても比例定数が異なることが想定され、どの倍率を選択するのが適切か明らかでないため、倍率は数段階に変えられるように設定する方が良いと考えられる。

さらに、1 つのハイドロフォンでは計測範囲は限られるため、パイプの固定方法や肉厚の異なるものを複数用意するとより広い範囲での計測に対応することができる。ただし、ハイドロフォンを複数設定する場合は、川幅が広く砂礫堆が形成すると横断方向に流砂量分布が現れる場合があるため⁵²⁾、可能な限り隣接させて設置する方が良い。

4.3 結語

本章では、空気中でパイプに粒子を衝突させて、ハイドロフォンから得られる衝突音の波形と粒子の運動量との関係を広い範囲で調べた。ハイドロフォンから得られる音響信号の主なモードは、軸方向モード (0.4 kHz 周辺)、円周方向モード (4.6 kHz 周辺)、径方向モード (9.4 kHz 周辺) であったことを確認した。また、運動量が小さい場合、軸方向モードの波形の振幅の最大値が他のモードと比べて小さかった。運動量大きい場合は各モードの波形の振幅の最大値がほぼ同程度となることを確認した。軸方向モードの波形の場合、粒子の衝突位置がマイクロフォンから離れると振幅の最大値が小さくなることが示された。さらに、円周方向モードや径方向モードの振幅の最大値は、粒子の衝突位置に影響しないこと、運動量大きい領域では飽和することを明らかにした。今回実施した実験の範囲では、3 方向の固有振動のうち円周方向モードの振幅の最大値が運動量のおよそ 0.7 乗に比例し、径方向モードの振幅の最大値はおよそ 2.1 乗に比例した。単一の倍率のアンプを用いる場合、より広い運動量に対応できる点から円周方向の固有振動モードを利用する方が望ましいと言える。また、本実験で使ったハイドロフォンシステムで計測できる運動量の上限値は $20 \text{ g} \cdot \text{m/s}$ であった。また、最大振幅値はダイナミックレンジ以下でも飽和する場合があるため、1 つのハイドロフォンでは限られた範囲の運動量しか計測できない。しかしながら、特性の異なるハイドロフォンを複数用いると、広い粒度分布幅に対応することができる。

第 5 章 実験水路でのハイドロフォン法の適用

本章では、水路実験で一様砂を個別、集団でハイドロフォンに衝突させる実験を実施し、衝突音の波形の違いを明きからにするとともに、衝突音の波形の振幅に影響する流砂の運動量を確認し、運動量と振幅の関係のばらつきを確認する。また、そのばらつきの割合を統計的に処理してそれを混合粒径に適用し、栗原ら³⁵⁾が提案した流砂量解析手法を評価する。

5.1 流砂の存在高さと移動速度について

流砂の存在高さや移動速度について整理を行う。掃流砂に関する既往の研究では、主に掃流砂量の評価に大きく重点を置いていた。掃流砂の運動としては、河床近傍の転動（ローリング）や滑動（スライディング）、小跳躍（サルテーション）しながら移動する粒子という運動学的な特徴あるいはそのような運動をする個別の粒子というものがある。このような運動学的理解は、個々の粒子の運動に着目して流砂を分類する時に、たとえば、浮遊砂との厳密な区分を難しくしている。

掃流砂の運動学的理解の特徴はアインシュタインの流砂運動に関する確率モデルに端的に現れている。アインシュタインによると、掃流砂はその運動が間欠的であることが特徴づけられている。すなわち、図-5.1 に示すように、粒子は運動と停止を繰り返しており、河床での比較的長い休止を挟んで間欠的に運動を続ける。

粒子が河床で休止している時間は **rest period**, 運動の開始は **pick up**, 1 回の移動距離は **step length** と呼ばれている。粒子の **pick up** は、乱流による流れにより河床の粒子が運動を始めることで説明され、統計的に取り扱われる。**step length** も個々の移動でその距離が異なるため統計的に取り扱われる。実際は、共に適当な確率密度関数で近似されている。**pick up rate** の平均値は流れの強さの無次元表示である無次元掃流力の関数であり、平均 **step length** は掃流力に依存しないことが知られている。平衡状態の掃流砂は、期待値としての流砂量関数として得られ、**pick up rate** が流れの強さの関数で表されることから、無次元化された流砂量（無次元流砂量）が無次元掃流力の関数として表われている。

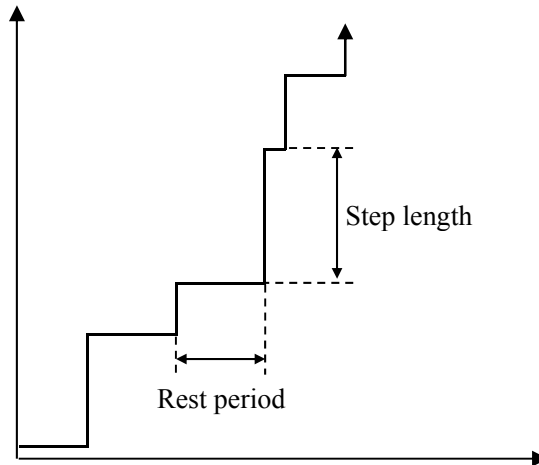


図-5.1 掃流砂の運動に関する模式図

このような掃流砂の運動学的な理解の上に立って、流砂量を力学的なフレームワークの中で捉えようとする研究が平行して行われてきた。掃流砂は間欠的に運動しているので、図-5.2 に示すように河床上を河床からおよそ粒子 1 個分の厚さの中で運動し、流砂がこの層内で移動すると考えると、流砂量が式(5.1) で表される。

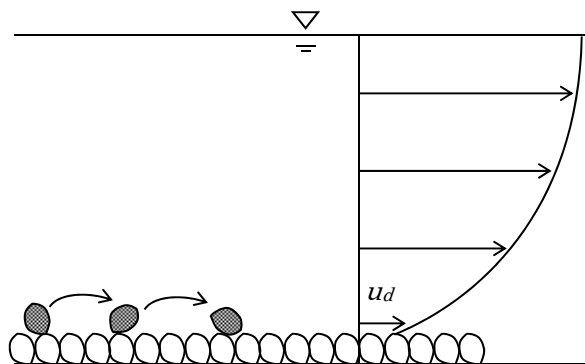


図-5.2 河床近傍を運動する掃流砂粒子の模式図

$$q_s = ch_s u_s \dots\dots\dots (5.1)$$

ここに q_s は単位幅流砂量、 h_s は流砂移動層の厚さ、 u_s は粒子の平均的な移動速度、 c は移動層内の移動している粒子の濃度である。

掃流砂は、絶えず河床と接触を保ちつつ移動する土砂の流送形式を表し、その運動形態は滑動、転動および小跳躍に分類される。定常・等流状態での流砂の運動を考えると、流砂の運動を平均的に見たとき、粒子は加速度を生じないことから粒子に働く流体力と粒子の運動に対する抵抗力は釣り合っている必要がある。粒子に作用する平均的な流体力は流れの河床面せん断力で評価さ

れ粒子の抵抗力は粒子と河床との間の固体摩擦で評価される．すると，河床面での力の釣り合いが次式で表される．

$$\{(\sigma/\rho-1)c+1\}\rho gh\sin\theta=\rho c(\sigma/\rho-1)gh\cos\theta\tan\phi_s\cdots\cdots\cdots(5.2)$$

ここに， ϕ_s は粒子間摩擦角度で一般的に 35～38 度としている．掃流砂領域における c を次式のように置くと⁵³⁾，

$$c=\frac{h_s}{h}\left(\frac{c_*}{2}\right)\cdots\cdots\cdots(5.3)$$

h_s は次式で表される．

$$\frac{h_s}{h}=\frac{\tan\theta}{\frac{c_*}{2}(\sigma/\rho-1)(\tan\phi_s-\tan\theta)}\cdots\cdots\cdots(5.4)$$

この時，流砂移動層厚 h_s とパイプの突出高さ D と粒径 d を比較して，パイプ周辺の局所的な流れは無視すると， $h_s<D+d$ であれば，ほぼ全ての粒子が衝突して， $h_s>D+d$ では衝突率が低くなる．さらに掃流砂領域では，粒子に作用する流体力の濃度はほぼゼロと扱うことができ，粒子と河床との間の固体摩擦は水深ではなく流砂移動層厚で評価すると次式を得る．

$$\rho gh_s\sin\theta=\rho c(\sigma/\rho-1)gh_s\cos\theta\tan\phi_s\cdots\cdots\cdots(5.5)$$

ここで芦田ら⁵⁴⁾の仮定を用いて $h_s\div d$ と置くと，式(5.5)から濃度 c が次式で表される．

$$c=\frac{1}{\cos\theta\tan\phi_s}\tau_*\cdots\cdots\cdots(5.6)$$

ここに， τ_* は無次元掃流力で，次式で定義される．

$$\tau_* = \frac{gh \sin \theta}{(\sigma/\rho - 1)gd} \dots\dots\dots (5.7)$$

式(5.6)中の $\cos \theta$ は、掃流砂を対象とする領域では勾配が小さく、およそ $\cos \theta \cong 1$ が成り立つので、濃度は無次元掃流力に比例する。

以上の運動学的・力学的な理論から流砂量を与える式(5.1)の右辺の c と h_s は定まるが、 u_s は定まらない。 u_s については流れの流速分布で与えられる。粗面開水路上の乱流の流速分布は次式の対数則に従う。

$$\frac{u}{u_*} = A_r + \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{k_s} \right) \dots\dots\dots (5.8)$$

$$u_* = \sqrt{gh \sin \theta} \dots\dots\dots (5.9)$$

A_r は定数、 κ はカルマン定数（およそ 0.4）、 k_s は相当粗度でほぼ粒径に等しい。河床から粒径程度はなれた地点における流速 u_d は式(5.7)において $z = d = k_s$ とおくことにより、次式で表され摩擦速度に比例することがわかる。

$$\frac{u_d}{u_*} = A_r \dots\dots\dots (5.10)$$

粒子の速度 u_s がほぼ u_d に等しいとすると、式(5.10)より式(5.8)は

$$q_s = cu_s h_s \propto \tau_* u_* d \dots\dots\dots (5.11)$$

と表され、無次元流砂量として $q_{s*} = q_s / u_* d$ を選ぶと

$$q_{s*} \propto \tau_* \dots\dots\dots (5.12)$$

と無次元掃流力に比例する。式(5.12)は式(5.11)の対応関係と q_{s*} の定義から

$$q_{s*} = \frac{q_s}{u_* d} \cong \frac{q_s}{u_s h_s} = c \propto \tau_* \dots\dots\dots (5.13)$$

なる関係にあることがわかる。

粒子速度 u_s を評価するのに、河床面での粒子の力の釣り合い条件式(5.5)を粒子レベルで適用することも行われている。図-5.2 の運動している粒子 1 個に対する力の釣り合い式は、河床面せん断力を粒子 1 個に及ぼす流れの抗力に置き換えることにより、この抗力が粒子の河床との摩擦が釣り合っているとして、

$$\frac{1}{2} C_D \rho A_2 d^2 (u_d - u_s)^2 = (\sigma - \rho) A_3 d^3 g \tan \phi_s \dots\dots\dots (5.14)$$

が成り立つ。ここに、 C_D は抗力係数で一定の値をとる。また、 A_2 、 A_3 は粒子の断面積、体積に関する形状係数で定数である。

$$u_c = u_b - u_s \dots\dots\dots (5.15)$$

とおくと、式(5.15)を式(5.14)に代入することにより、

$$\frac{u_c^2}{(\sigma/\rho - 1)gd} = \frac{2}{C_D} \frac{A_3}{A_2} \tan \phi_s \dots\dots\dots (5.16)$$

となり、右辺は定数となることが推測される。式(5.16)の左辺は式(5.9)を式(5.7)に代入することにより無次元掃流力と同じ形をしていることが分かる。また、 u_c は式(5.15)より粒子が運動を続けるのに必要な流速の最小値を意味するので、式(5.16)の左辺は限界掃流力と呼ばれる。すなわち、流速 u_d が u_{*c} より大きければ掃流砂が発生するが小さければ発生しない。そういう意味で移動限界と呼ばれることもある。式(5.15)の u_s を式(5.1)に代入すると、 $h_s=d$ 、 $u_d \propto u_{*c}$ に注意して、流砂量関数として次式が得られる。

$$q_{s*} = \frac{q_s}{u_* d} \propto \tau_* \left(1 - \frac{u_c}{u_d} \right) \dots\dots\dots (5.17)$$

式(5.17)の右辺の括弧内の u_d は $u_d = A_r u_{*c}$ であるので

$$\frac{u_c}{u_d} = \frac{u_c}{A_r u_*} = \frac{u_c / A_r}{u_*} \dots\dots\dots (5.18)$$

となる．ここで，式(5.18)の u_c/A_r を u_{*c} とおくと次式のように，無次元移動限界掃流力を含む式形に書き改められる．

$$q_{s*} = \frac{q_s}{u_* d} \propto \tau_* \left(1 - \frac{u_{*c}}{u_*}\right) = \tau_* \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\tau_*}}\right) \dots\dots\dots (5.19)$$

式(5.19)から $\tau_* < \tau_{*c}$ の時は $q_{s*}=0$ ，すなわち流砂量が 0 となる．また， u_c/A_r を u_{*c} とおくことで式(5.18)は

$$\frac{u_s}{u_*} = A_r \left(1 - \frac{u_{*c}}{u_*}\right) \dots\dots\dots (5.20)$$

と変形でき，粒子の平均移動速度を表すことができる．

5.2 実験概要

使用したハイドロフォンの構成は，基本的には第 3 章の図-3.1 とほぼ同じである．違いは，ハイドロフォンの径が異なるため，バンドパスフィルターで 4.6 kHz 周辺の波形を抽出したこと，回数を Method2 で記録したこと，アンプの倍率を 1, 4, 16, 64, 256, 1,024 倍の 6 段階に設定したことである．現地との相違点は，実験規模でも衝突音を生じさせるためパイプをモルタルで固めずにプリアンプの倍率を下げた点である．ここでは，実験と現地のプリアンプは 10 倍程度の違いなので，流砂量解析に影響はないと考えた．水路は，長さ 5 m，幅 0.5 m，勾配 1/50 の直線矩形断面水路を使用し，河床には 1.5 mm の砂を貼り付けた．ハイドロフォンは，長さ 10 cm と 50 cm，外殻 48 mm，肉厚 2 mm のステンレス製のパイプを使用し，水路下流端に設置した．水は 20 l/s を水路上流端から供給した．土砂はホッパーを用いて定常的に与え，ハイドロフォンから 5 m 上流の水路中央の位置から投入した．流砂がハイドロフォンに到達してから数秒間流し続けて，定常状態になってから計測を開始した．実験使用砂は，一様砂の場合で d_1 : 17.5 mm, d_2 : 12.3 mm, d_3 : 7.1 mm, d_4 : 3.1 mm の 4 種類，一様砂を混合した混合砂の場合で d_5 : 17.3 mm (d_1 : d_2 : d_3 : d_4 =4: 3: 2: 1), d_6 : 14.7 mm (d_1 : d_2 : d_3 : d_4 =1: 1: 1: 1), d_7 : 12.1 mm (d_1 : d_2 : d_3 : d_4 =1: 2: 3: 4) の 3 種類である．()内は一様砂を混合させた時のそれぞれの割合である．実験ケースを表-5.1, 5-2 に示す．

表-5.1 一様砂を使用した実験ケース

ケース	粒径 mm	粒子数 s^{-1}	ハイドロフォンの長さ cm
1	17.5	1.00	50
2		5.43	
3		7.19	
4		9.49	
5	12.3	1.00	
6		20.00	
7		38.89	
8		58.06	
9	7.1	1.00	
10		67.17	
11		100.69	
12		134.16	
13	3.1	1.00	
14		806.05	
15		1210.15	
16		1450.70	
17	7.1	13.45	10
18		20.26	
19		26.56	
20	3.1	161.02	
21		242.36	
22		289.74	

表-5.2 混合砂を使用した実験ケース

ケース	平均粒径 mm	粒子数 (s^{-1})				ハイドロフォンの長さ cm
		d_1	d_2	d_3	d_4	
23	17.3	0.53	1.15	3.99	23.98	10
24		0.79	1.72	5.94	35.71	
25		1.08	2.33	8.08	48.51	
26	14.7	0.22	0.62	3.23	38.78	
27		0.33	0.95	4.95	59.42	
28		0.52	1.49	7.75	93.12	
29	12.1	0.08	0.48	3.76	60.26	
30		0.14	0.81	6.35	101.76	
31		0.29	1.66	12.93	207.16	

5.3 空気中と水中における運動量と最大振幅値の比較

水中における運動量と振幅の関係を、ガラスビーズを衝突させて 1,024 倍の倍率のアンプで確認した。両者の関係は、第 4 章の実験から得られた振幅と運動量の関係と同じものと考えて振幅値が運動量の 0.7 乗に比例するとした。図-5.3 に結果を示す。図中の破線は第 4 章で行った空気中での結果で、実線は今回の結果と他の倍率に適用した時の結果である。材質の違いにもよるが、空気中より水中の方が振幅が小さくなった。両者の関係は、最大振幅値 $=0.0034 \times (\text{運動量})^{0.7} \times \text{倍率}$ で表される。

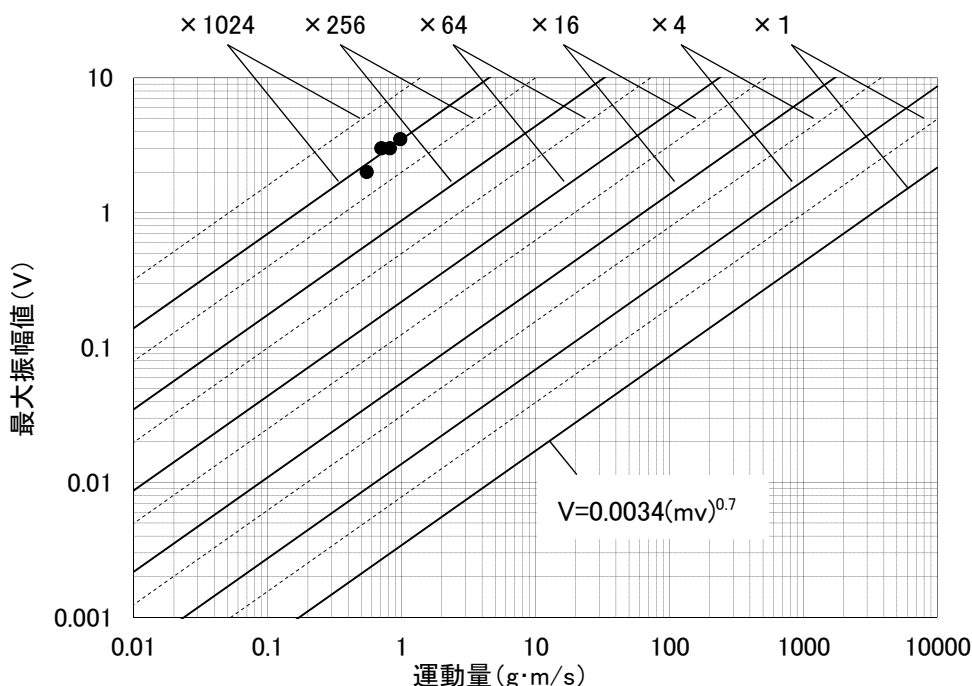


図-5.3 水中での円周方向モードの運動量と最大振幅値の関係

5.4 一様砂に関する実験

5.4.1 検出回数と粒子数の関係

表-5.3, 5.4 に一様砂を使用した時の粒子数と各倍率で得られた検出回数の結果を示す。粒子数や検出回数は単位時間当たりの値である。ケース 1, 5, 9, 13 は 1 つの粒子を流した結果である。 d_1 : 17.5 mm は 4 倍, d_2 : 12.3 mm は 16 倍, d_3 : 7.1 mm は 16 倍, d_4 : 3.1 mm は 256 倍の倍率で回数が検出された。また, 1 つの粒子を流すと, 粒子数と検出回数が一致する。粒子を集団で流すと, 比較的, 粒子数が少ない条件では個別で流した時と同様に, 粒子数と回数がほぼ一致する。なお, ケース 3 のように粒子数より回数が多く検出される場合があるが, これは 1 つの粒子がハイドロフォンに複数回衝突したと推測される。粒子数が 40 s^{-1} 程度になると, 粒子数と回数に差が生じて, 粒子数が 100 s^{-1} を超える条件では, 粒子数に対して検出回数が少なくなり両者に大きな差が生じる。これは, 粒子がハイドロフォンに衝突する割合 (衝突率=衝突した粒子数/供給した

粒子数)が低下したこと、衝突しても検出されない割合(検出率=検出回数/粒子数)が低下したこと、この2つが主な原因と考えられる。衝突率については、式(5.4)より本条件下では h_s は0.5 cm、 D は1.2 cm、 d は0.3~1.7 cmであったため、ほぼ全ての粒子が衝突したと推測される。検出率は、長谷川ら⁴⁶⁾が指摘しているように、粒子が複数で衝突するとそれぞれの音響信号の波形が重なり、その波形の振幅値が設定閾値を下回らず回数が検出されなくなり、1以下になることがある。

d_3 と d_4 についてはハイドロフォンの長さ10 cmに変更して、同様の実験を行った(d_3 はケース17~19、 d_4 はケース20~22)。なお、粒子数は10 cm幅(ハイドロフォンの長さ)あたりの結果とした。表-5.5に実験結果を示す。

ハイドロフォンの長さを短くすると、衝突する粒子数が少なくなるため、検出率が上昇する。ハイドロフォンをそのように短くしても、 d_4 :3.1 mmは検出率が6~10 %程度である。全ての粒子を検出するには、これよりも短いハイドロフォンが必要であるが、流れの全幅に対する割合が小さくなりすぎると測定誤差が大きくなる。ここでは、粒径をある程度大きなものに限定すれば、現在用いられているハイドロフォンの長さでも検出回数から流砂量を推定可能とみなした。

表-5.3 一様砂使用時の粒子数と検出回数の結果(ケース1~8, ハイドロフォン 50 cm 使用)

ケース	粒径 mm	粒子数 s^{-1}	検出回数(s^{-1})						
			× 1	× 4	× 16	× 64	× 256	× 1024	合計
1	17.5	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00
2		5.43	0.00	0.29	2.29	1.43	1.43	0.00	5.43
3		7.19	0.00	0.31	3.44	2.50	1.25	0.00	7.81
4		9.49	0.00	0.34	1.36	2.37	4.41	1.02	9.15
5	12.3	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
6		20.00	0.00	0.00	4.86	6.29	4.29	4.29	19.71
7		38.89	0.00	0.00	12.22	5.28	3.33	5.28	26.11
8		58.06	0.00	0.00	17.42	9.03	2.26	1.29	30.00

表-5.4 一様砂使用時の粒子数と検出回数の結果(ケース 9~16, ハイドロフォン 50 cm 使用)

ケース	粒径 mm	粒子数 s^{-1}	検出回数(s^{-1})						
			× 1	× 4	× 16	× 64	× 256	× 1024	合計
9	7.1	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
10		67.17	0.00	0.00	3.40	7.17	3.02	0.75	14.34
11		100.69	0.00	0.00	5.15	5.84	2.75	2.06	15.81
12		134.16	0.00	0.00	6.21	4.97	1.86	0.93	13.98
13	3.1	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00
14		806.05	0.00	0.00	0.00	0.00	10.23	11.16	21.40
15		1210.15	0.00	0.00	0.00	0.00	7.89	5.26	13.16
16		1450.70	0.00	0.00	0.00	0.00	4.23	1.41	5.63

表-5.5 一様砂使用時の粒子数と検出回数(ケース 17~22, ハイドロフォン 10 cm 使用)

ケース	粒径 mm	粒子数 s^{-1}	検出回数(s^{-1})						
			× 1	× 4	× 16	× 64	× 256	× 1024	total
17	7.1	13.45	0.00	0.00	2.92	7.31	2.05	1.75	14.04
18		20.26	0.00	0.00	4.50	9.97	3.22	2.25	19.94
19		26.56	0.00	0.00	5.26	13.46	4.28	3.28	26.28
20	3.1	161.02	0.00	0.00	0.00	0.00	9.15	5.08	14.24
21		242.36	0.00	0.00	0.00	0.00	15.28	8.33	23.61
22		289.74	0.00	0.00	0.00	0.00	10.26	6.73	16.99

5.4.2 最大検出粒子数

実験結果より、粒子数が約 30 s^{-1} 以下では検出率（検出回数/粒子数）がほぼ 1 になることから、粒子衝突後から約 0.033 s 後に次の粒子が衝突すると回数が検出されることがわかる。衝突波形には残響音が混在し、複数の碟が衝突する場合はその残響音の影響を受けて、振幅が飽和状態（閾値を下回らない状態）となる場合がある。そのため、回数を検出するためには残響音が十分に小さくなるまで衝突頻度が低下しなければならない。図-5.4～5.7 にそれぞれの粒子の衝突波形を示す。

これらの波形から、0.033 s 後の振幅値は粒径に関係なく最大値の約 1/10 であった。検出可能な衝突頻度については、最大振幅値の 1/10 になるまでの時間から推定可能である。ハイドロフォンの長さは、この時間と計測対象の粒径から設定できる。

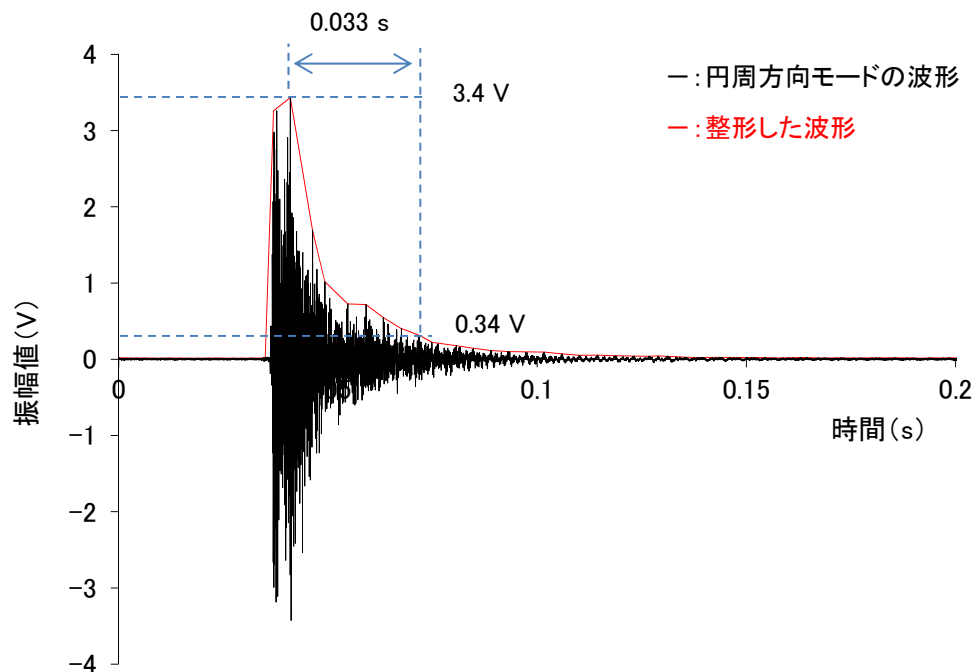


図-5.4 個別衝突の音響信号の一例(d_1 : 17.5 mm)

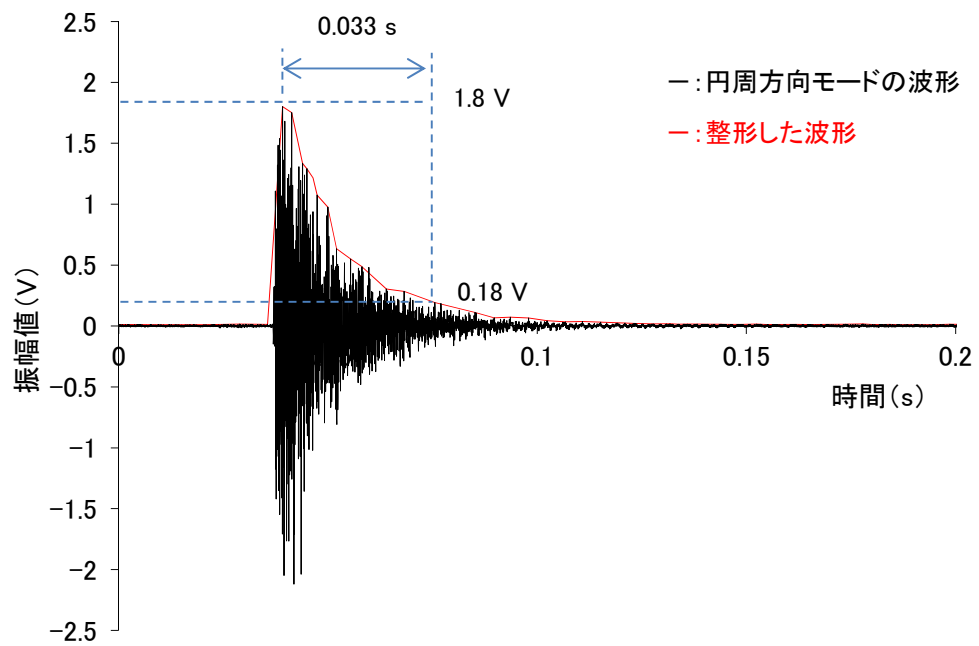


図-5.5 個別衝突の音響信号の一例 (d_2 : 12.3 mm)

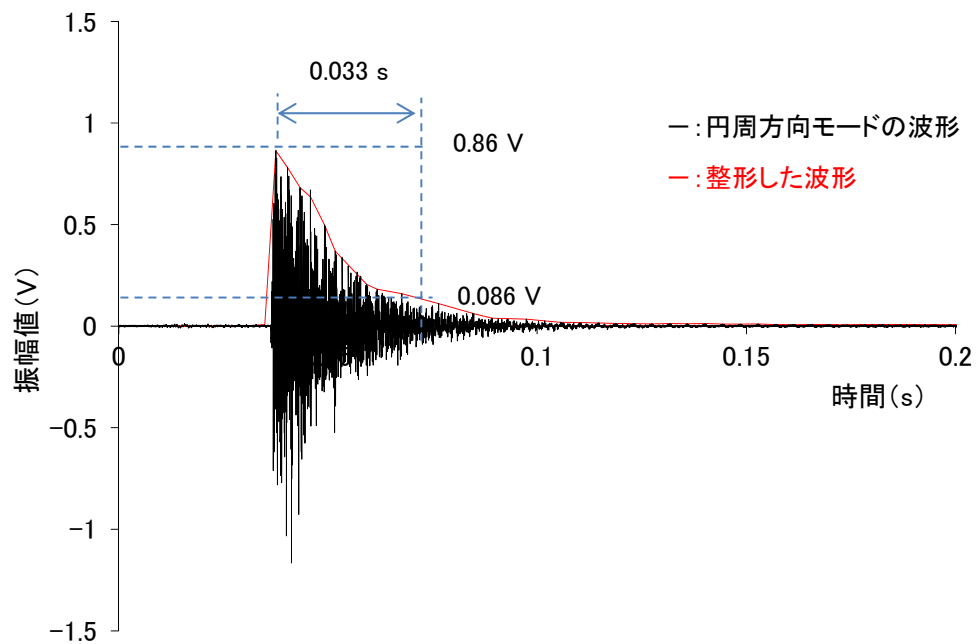


図-5.6 個別衝突の音響信号の一例 (d_3 : 7.1 mm)

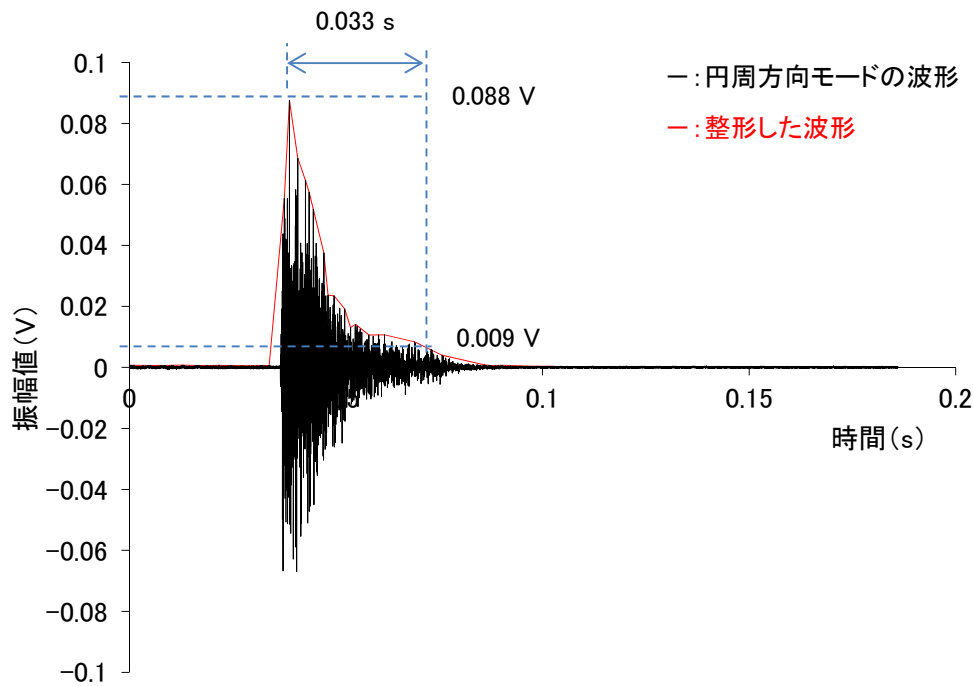


図-5.7 個別衝突の音響信号の一例(d_4 :3.1 mm)

5.4.3 運動量を求める時の速度

各倍率で検出された回数がどの粒径が衝突して得られたのか確認した。倍率は振幅値（閾値）で表されることから、図-5.3にある粒子の運動量との関係と u_* 、 u_{*c} 、 u_d から求められる粒子の移動速度 u_s から、倍率に対応した粒径を求めることができる。図-5.8に粒径と振幅値の関係を示す。

図中の実線は、粒子の移動速度を用いた場合、流れの平均流速を用いた場合の計算結果を、プロットは 1,024 倍の倍率での実験結果を、破線はそれぞれの、倍率での閾値を表す。実験結果を見ると、同じ粒径でも振幅値がばらつき、小粒径の方が振幅値が大きくなる場合もある。平均値や最大値を見ると、粒径に対して振幅値が大きくなる傾向である。流れの平均流速と粒子の移動速度を用いた場合の計算結果を比較すると、粒径 5 mm 以下は両者の関係がほぼ一致するが、それ以上の粒径では流れの平均流速を用いると振幅値が急増する。これは、流れの平均流速は同じ摩擦速度 u_* では常に一定であるが、粒子の移動速度は粒径により変化するためである。流れの平均流速を用いると 15.5 mm 以上の粒径は、振幅値が 10V を超えて、本システムの上限值を超える。しかし、実験で 17.5 mm の粒子を流すと 0.12~2.62V（4 倍~256 倍）の閾値で回数が検出されることから、衝突粒子の運動量は流れの平均流速より粒子の移動速度で求める方が近い値を示す。従来の検討においても流速の影響が示唆されているが^{35),50)}、具体的には検討されていない。しかし、粒子の移動速度は同じ摩擦速度 u_* においても数倍程度小さくなるため、他の解析手法を用いる際も粒子速度を導入すると信頼性の高い解析結果が得られる。

粒子の移動速度を用いると、粒径が 16.1 mm で最大振幅値を取り、それ以上の粒径では振幅値が小さくなり、粒子と振幅の正の相関関係が逆転し、 $u_* = u_{*c}$ で 0 となる。しかし、掃流砂が間欠的に運動していると考え、逆転現象が生じる移動限界付近の条件では個々の粒子が式(5.19)の移動速度でパイプに衝突するかは不明であり、水路実験を通じて今後の検討が必要である。

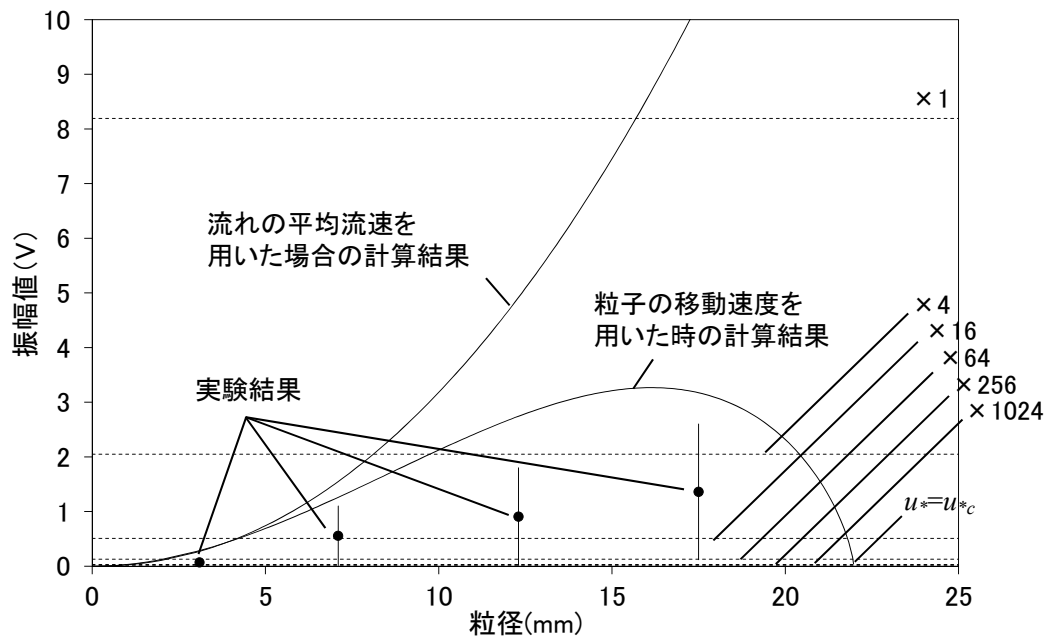


図-5.8 粒径と運動量から得られる振幅値の関係

5.4.4 粒子の運動による振幅のばらつき

表-5.3～5.5 の集団衝突実験の結果を見ると、検出回数は1つの倍率で検出されず複数の倍率で検出される。ここでは、粒子の中には小跳躍で移動しているものあり、パイプへはある角度を持って衝突していると考えた。

式(5.20)から求めた粒子の移動速度 u_s は、流れ方向に対する速度で、パイプの中心と粒子の中心が直線で結ばれる時の衝突速度はそれよりも小さくなる時がある。そこで、図-5.9 のように粒子の衝突速度 u_s' を定義して、図-5.3 の関係 ($V=\alpha(mu_s')^{0.7}$) よりそれぞれの振幅値で検出回数が出された時の衝突速度 u_s' を求めた。 α は 3.5/各倍率で求めることができる。図-5.10 に速度比 (u_s'/u_s) と頻度 (各閾値での検出回数/総回数) の累計値の関係を示す。なお、1 つの粒子を衝突させた時の結果は頻度を示さないでここでは対象としない。

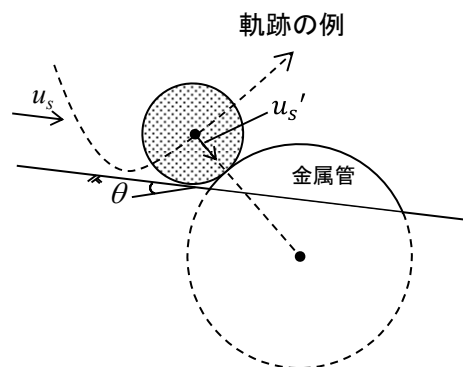


図-5.9 粒子の衝突速度の模式図

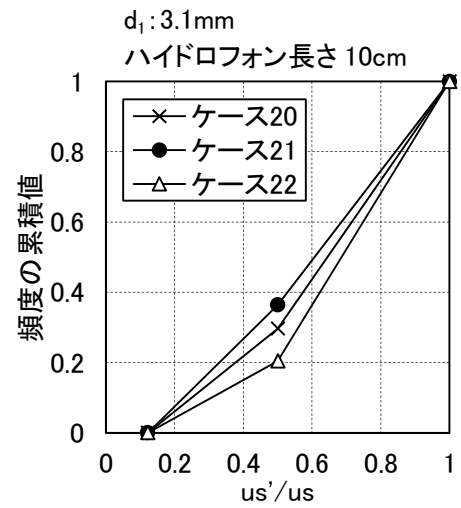
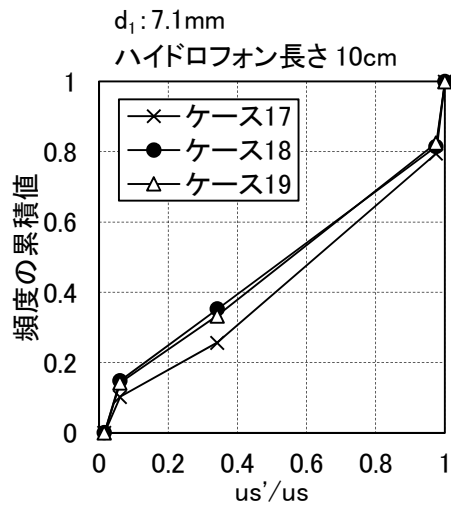
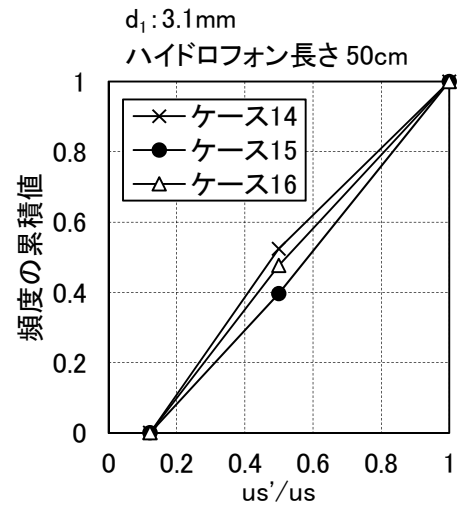
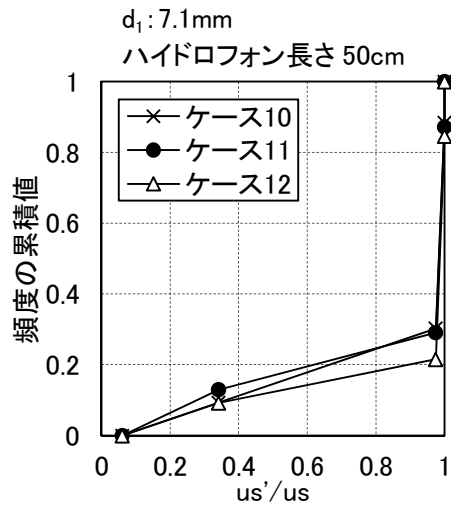
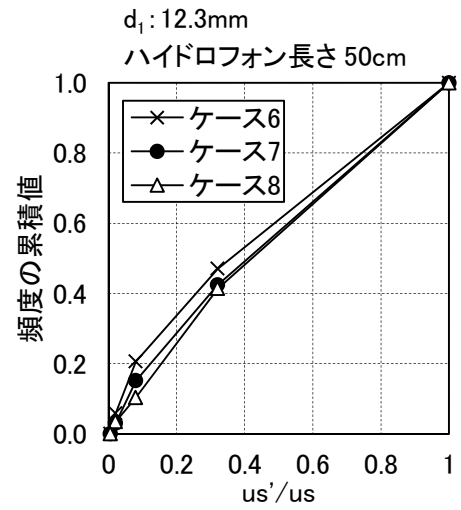
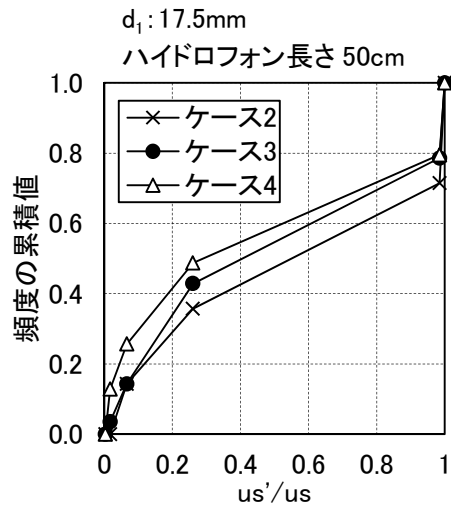


図-5.10 u_s'/u_s と頻度の累積値の関係

実験結果より衝突速度 u_s' はばらつきを持ち、平均移動速度 u_s より小さくなる。ただし、閾値の取り方によっては u_s より大きくなる場合もある。 u_s' が u_s の 0.1～0.2 倍になる場合もあるが、これは、図-5.6 に示したように粒子の移動する方向が上向きの際にパイプと擦って接触する時には u_s' が小さくなる。同じ粒径では粒子数に関係なく速度比と頻度の累積値のは同じ傾向を示した。ハイドロフォンの長さを変えた時の違いで見ると（ケース 10～12 とケース 17～19、ケース 14～16 とケース 20～22）、表-5.3～5.5 にある粒子数が多いケースは u_s' は u_s に近い値になる割合が多い。これは、粒子数が多いと振幅値が大きくなりやすいことを意味する。すなわち、衝突頻度が大きいと場合によっては運動量に対して振幅値の値が異なる。そのため、衝突頻度を小さくするようにハイドロフォンの長さを設定する必要がある。全ての粒径に対する頻度の平均値を取ると（ d_3 はケース 17～19、 d_4 はケース 20～22）、 $u_s'/u_s=0.9\sim1.0$ は 0.13、 $u_s'/u_s=0.3\sim0.9$ は 0.55、 $u_s'/u_s=0.0\sim0.3$ は 0.32 である。これらの結果から、ほとんどの粒子はハイドロフォンに衝突しても u_s より速度が小さくなり、流砂量を推定に影響を及ぼすため、その割合を予め設定する必要がある。

5.5 混合砂に関する実験

5.5.1 行列 A の計算

栗原ら³⁵⁾の手法によると、ある粒径（一様砂）を持った流砂のパイプへの相対運動量の統計的な分布が与えられたとし、その分布を n 階に区分し、各階毎の割合が A_i で表されるとする。すなわち、 N 個の粒径を流して各階毎の回数をカウントすることを考える。すると、それぞれの検出回数は L_i は、

$$\begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ \vdots \\ L_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_n \end{bmatrix} \cdot N \dots\dots\dots (5.21)$$

で表される。ある一定の水理量のもとで混合粒径を流すと、 n 階に区分されたそれぞれの粒子の衝突の仕方が線形（独立）であると仮定すると、流砂の粒子個数と衝突回数は

$$\begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ \vdots \\ L_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \cdots & A_{1m} \\ A_{21} & A_{22} & \cdots & A_{2m} \\ \vdots & & & \\ A_{n1} & A_{n2} & \cdots & A_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ \vdots \\ N_n \end{bmatrix} \dots\dots\dots (5.22)$$

なる関係で表される。係数行列 A_{ij} は水理量、パイプ径と粒径との比などに依存していることになる。一様砂の実験結果から行列 A を求めた。対象粒径が 4 種類で、閾値が 6 段階のため、行列 A を 4×4 にするため閾値を（1 倍と 4 倍）、（16 倍）、（64 倍）、（256 倍と 1024 倍）の 4 段階とした。

表-5.6 行列 A(ケース 1~8)

ケース	検出回数 (s ⁻¹)	行列				粒子数 (s ⁻¹)
1	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.29	0.05	0.00	0.00	0.00	5.43
	2.29	0.42	0.00	0.00	0.00	0.00
	1.43	0.26	0.00	0.00	0.00	0.00
	1.43	0.26	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.31	0.04	0.00	0.00	0.00	7.19
	3.44	0.48	0.00	0.00	0.00	0.00
	2.50	0.35	0.00	0.00	0.00	0.00
	1.25	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.34	0.04	0.00	0.00	0.00	9.49
	1.36	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00
	2.37	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00
	5.42	0.57	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	4.86	0.00	0.24	0.00	0.00	20.00
	6.29	0.00	0.31	0.00	0.00	0.00
	8.57	0.00	0.43	0.00	0.00	0.00
7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	12.22	0.00	0.31	0.00	0.00	38.89
	5.28	0.00	0.14	0.00	0.00	0.00
	8.61	0.00	0.22	0.00	0.00	0.00
8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	17.42	0.00	0.30	0.00	0.00	58.06
	9.03	0.00	0.16	0.00	0.00	0.00
	3.55	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00

表-5.7 行列 A(ケース 9～16)

ケース	検出回数 (s^{-1})	行列				粒子数 (s^{-1})
9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	3.40	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00
	7.17	0.00	0.00	0.11	0.00	67.17
	3.77	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00
11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	5.15	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00
	5.84	0.00	0.00	0.06	0.00	100.69
	4.81	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00
12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	6.21	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00
	4.97	0.00	0.00	0.04	0.00	134.16
	2.80	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00
13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00
14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	21.40	0.00	0.00	0.00	0.03	806.05
15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	13.16	0.00	0.00	0.00	0.01	1210.15
16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	5.63	0.00	0.00	0.00	0.00	1450.70

表-5.8 行列 A(ケース 17~22)

ケース	検出回数 (s^{-1})	行列				粒子数 (s^{-1})
17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	2.92	0.00	0.00	0.22	0.00	0.00
	7.31	0.00	0.00	0.54	0.00	13.45
	3.80	0.00	0.00	0.28	0.00	0.00
18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	4.50	0.00	0.00	0.22	0.00	0.00
	9.97	0.00	0.00	0.49	0.00	20.26
	5.47	0.00	0.00	0.27	0.00	0.00
19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	5.26	0.00	0.00	0.20	0.00	0.00
	13.46	0.00	0.00	0.51	0.00	26.56
	7.56	0.00	0.00	0.28	0.00	0.00
20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	14.24	0.00	0.00	0.00	0.09	161.02
21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	23.61	0.00	0.00	0.00	0.10	242.36
22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	16.99	0.00	0.00	0.00	0.06	289.74

行列 A の 1 列目には d_1 の割合を, 2 列目には d_2 の割合を, 3 列目には d_3 の割合を, 4 列目には d_4 の割合を代入した. また, それぞれの割合は各粒径での平均値とした. 1 つの粒子を衝突させた時は頻度を表さないため, 対象としなかった. d_3 と d_4 は, 衝突頻度が小さくなるようにハイドロフォンの長さ 10 cm の結果とした. d_1 の頻度の累計値は 1.01, d_2 は 0.72, d_3 は 0.95, d_4 は 0.08 である. d_1 の頻度の累計値は 1 を超えているが, これは 1 つの粒子が複数回衝突したためだと考えられる. また, d_4 はほとんど粒子が検出されなかったことになる. これらの結果から, 行列 A を作成する. 1 列目には d_1 の平均値 (ケース 2~4) を, 2 列目には d_2 の平均値 (ケース 6~8), 3 列目には d_3 の平均値 (ケース 17~19), 4 列目には d_4 の平均値 (ケース 20~22) を代入すると,

行列 A は式(5.23)のようになる。なお、粒子数が 1 つの結果は分布を示さないため結果から外した
また、混合砂の実験はハイドロフォンの長さを 10 cm で実施したため、 d_3, d_4 のケースは長さ 10 cm
のケースの結果を用いた。 d_1, d_2 は検出限界を大きく超えなかったため、長さによる違いはない
ものと考えた。

$$\begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \\ L_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.04 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.35 & 0.29 & 0.20 & 0.00 \\ 0.29 & 0.20 & 0.50 & 0.00 \\ 0.34 & 0.24 & 0.27 & 0.08 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \\ N_4 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (5.23)$$

行列 A に逆行列が存在するため、式 (5.23) は次式のように変形できる。

$$\begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \\ N_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 22.76 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ -25.83 & 4.87 & -1.94 & 0.00 \\ -2.63 & -1.96 & 2.78 & 0.00 \\ -10.16 & -7.76 & -3.42 & 12.27 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \\ L_4 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (5.24)$$

5.5.2 流砂量解析手法の検討

表-5.9～5.11 に粒子数と流砂量の実測値と解析結果を示す。閾値は粒径の条件数に合わせて 4
段階に区分けした。この結果を式(5.24)に代入すると検出回数から粒子数が得られる。表中の粒子
数の上段には実測値を下段には解析結果を示した。解析決壊の値が負になる場合はゼロ ((0.00)
と表示) とした。

表-5.9 粒子数と検出回数の結果(ケース 23～25)

ケース	粒子数 (s ⁻¹)				検出回数 (s ⁻¹)			
	N ₁ 17.5mm	N ₂ 12.3mm	N ₃ 7.1mm	N ₄ 3.1mm	L ₁ 1 倍 4 倍	L ₂ 16 倍	L ₃ 64 倍	L ₄ 256 倍 1024 倍
23	0.53	1.15	3.99	23.98	0.00	1.50	3.50	6.50
	0.00	0.51	6.77	56.14				
24	0.79	1.72	5.94	35.71	0.00	2.96	3.70	4.81
	0.00	7.24	4.47	23.41				
25	1.08	2.33	8.08	48.51	0.00	3.00	4.67	2.33
	0.00	5.55	7.07	(0.00)				

表-5.10 粒子数と検出回数の結果(ケース 26～31)

ケース	粒子数 (s^{-1})				検出回数 (s^{-1})			
	N ₁	N ₂	N ₃	N ₄	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄
	17.5mm 1 倍 4 倍	12.3mm 16 倍	7.1mm 64 倍	3.1mm 256 倍 1024 倍				
26	0.22 0.00	0.62 1.27	3.23 4.63	38.78 24.69	0.00	1.29	2.58	3.55
27	0.33 0.00	0.95 0.02	4.95 7.29	59.42 (0.00)	0.00	1.46	3.66	1.71
28	0.52 2.33	1.49 1.87	7.75 6.09	93.12 (0.00)	0.26	2.56	4.10	1.79
29	0.08 0.00	0.48 2.45	3.76 2.75	60.26 29.90	0.00	1.25	1.88	3.75
30	0.14 0.00	0.81 (0.00)	6.35 8.16	101.76 17.97	0.00	1.05	3.68	3.16
31	0.29 0.00	1.66 5.25	12.93 7.86	207.16 (0.00)	0.00	3.07	5.00	2.86

表-5.11 粒径別流砂量と全流砂量(ケース 23～31)

ケース	粒径別流砂量 (cm^3/s)								全流砂量 (cm^3/s)	
	実測値				解析結果				実測値	解析結果
	17.5 mm	12.3 mm	7.1 mm	3.1 mm	17.5 mm	12.3 mm	7.1 mm	3.1 mm		
23	1.49	1.12	0.75	0.37	0.00	0.49	1.27	0.88	3.73	2.64
24	2.22	1.68	1.11	0.56	0.00	7.05	0.84	0.37	5.56	8.26
25	3.03	2.27	1.51	0.76	0.00	5.41	1.33	0.00	7.57	6.73
26	0.62	0.60	0.61	0.60	0.00	1.24	0.87	0.39	2.43	2.49
27	0.93	0.93	0.93	0.93	0.00	0.02	1.37	0.00	3.71	1.39
28	1.46	1.45	1.45	1.45	6.55	2.25	1.14	0.00	5.82	9.95
29	0.22	0.47	0.70	0.94	0.00	2.38	0.52	0.47	2.34	3.37
30	0.39	0.79	1.19	1.59	0.00	0.00	1.53	0.28	3.96	1.81
31	0.81	1.62	2.42	3.23	0.00	5.12	1.47	0.00	8.09	6.59

図-5.11 に粒径別流砂量の実測値と解析結果の関係を示す．粒径別流砂量は式(5.25)から求めた．

$$q_{si} = n_i \cdot \frac{\pi}{6} d_i^3 \dots\dots\dots (5.25)$$

ここに、 q_{si} :粒径階 i の流砂量、 n_i : 粒径階 i の個数、 d_i : 粒径階 i の粒径である． d_1 はほとんど検出されず、検出時は実測値より解析結果の方が流砂量が多くなる．これは、最大閾値で回数が記録されると、行列 A より d_1 の粒子数の割合が多く記録されるからである．すなわち最大閾値で回数が 1 回記録されるかされないかで流砂量が大きく異なる． d_2 は流砂量に関係なく全てのケースで検出される．全てのケースで 2 番目に大きい閾値で回数が記録されており、この閾値で記録された回数は行列 A より d_2 の粒子数の割合が多く記録されるからである． d_3 は実測値と解析結果がほぼ一致する．これは、混合砂においても適正な閾値とハイドロフォンの長さを設定すれば、検出されることを意味する． d_4 は実測値より解析結果の方が小さい． d_4 はほとんどのケースで検出限界以上の粒子数となるが、一様砂の結果から検出率に相当する 0.08 が行列 A に含まれているため、その影響は小さいと考えられる．そのため、混合砂での実験は一様砂とは異なり、大粒子の衝突後に小粒子が衝突する場合があったり、その反対の現象もあるため、必ずしも d_4 の振幅値が一様砂と同じ振幅値とならず、最小の閾値で回数が記録されなかったと考えられる．すなわち、混合砂での閾値（振幅値）と運動量の関係は一様砂と異なることが想定される．

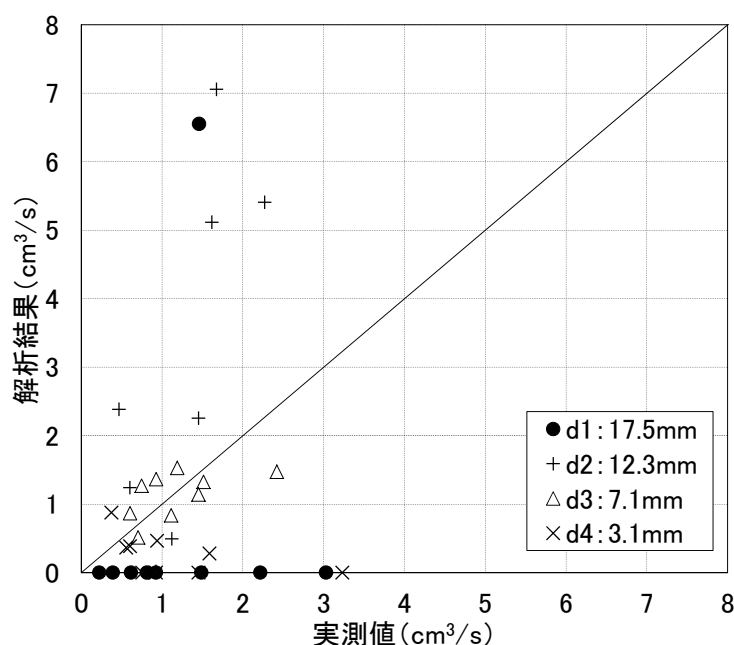


図-5.11 粒径別流砂量の実測値と解析結果の比較

図-5.12 に全流砂量の実測値と解析結果の関係を示す。全流砂量にすると、流砂量の大小に関係なく、ほぼ一様に実測値と解析結果が分布し、実測値と解析結果の流砂量は約 2～3 倍の範囲内に収まる。解析結果の流砂量は d_1 、 d_2 の影響が大きく、検出時は実測値より大きくなり、検出されない時や検出数が少ない時は流砂量が小さくなる。また、図-5.11 の結果からもわかるように d_4 はほとんどが検出されないが、全流砂量にはほとんど影響しない。これは d_1 は d_4 に対して約 180 倍、 d_2 は約 62.5 倍に相当するため、 d_4 が 100 回程度検出されなくても、 d_1 や d_2 が 1 回でも検出されれば流砂量にはそれほど影響しないと考えられる。現地でも、小さな粒径は計測対象とせず、ある程度大きな粒径を対象として実施すれば、流砂量をオーダーベースで議論することが可能である。

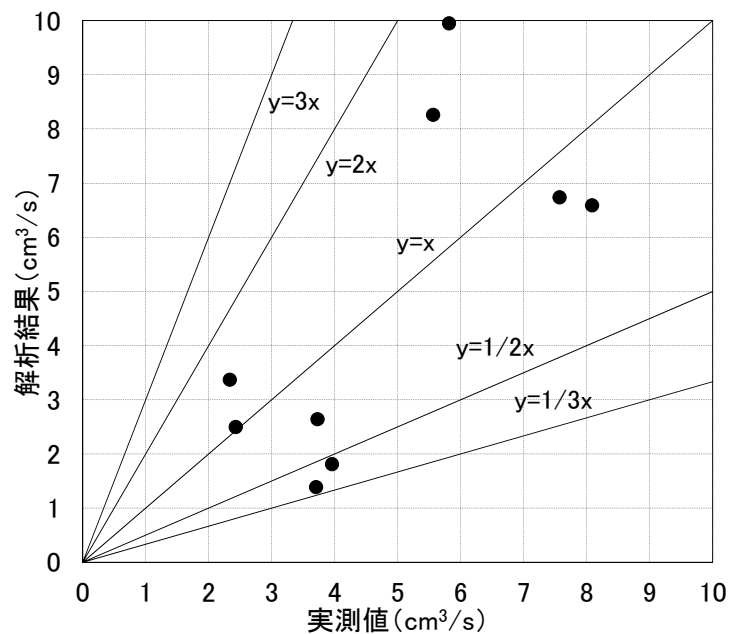


図-5.12 全流砂量の実測値と解析結果の比較

5.6 結語

本章では、円周方向の固有振動モードを利用した運動量と振幅の関係性を用いて、実験水路でハイドロフォンの適用性を検討した。一様砂の結果から、流砂量が多い状態ではハイドロフォンで記録される回数が極端に少なくなり、検出率が低下することを確認した。力の釣り合いから流砂移動層厚を推定すると、本実験条件下ではほぼ全ての粒子がハイドロフォンに衝突したと推測される。そのため、連続して粒子が衝突すると音響信号の波形が重なって閾値を下回らない状態が継続して、回数が記録されずに検出率が低下したことが原因に挙げられる。回数を確実に検出するには、個々の粒子の音響信号を分離して計測させることが必要である。実験結果より、粒子数が約 30 s^{-1} 以下では検出率（検出回数/粒子数）がほぼ 1 になり、粒子衝突後から約 0.033 s 後に次の粒子が衝突すると回数が検出されることがわかる。1 つの粒子を衝突させた時の音響信号の波形から、 0.033 s 後の振幅値は最大値の約 $1/10$ であった。すなわち、最大振幅値の $1/10$ 以下になれば、波形の重なりによる影響が小さくなる。本実験で用いたハイドロフォンで単位幅流砂量 $10 \text{ cm}^2/\text{s}$ を計測するには、粒径 10 mm では長さ 2.6 cm 、粒径 20 mm では長さ 21 cm 、粒径 50 mm では長さ 327 cm 以下にする必要がある。なお、管内の空間体積と残響時間は比例関係にあるため、長さが短い（空間体積が小さい）と検出限界が増大する。固定方法も含めて、ハイドロフォンの諸条件と残響時間の関係について別途検討が必要である。

栗原ら³⁵⁾が提案した流砂量解析手法を基に、一様砂の実験結果から、粒径別の粒子数と各倍率での検出回数を表す行列 A を求めた。この行列 A は逆行列が存在することから、検出回数から粒子数を推定することができる。この結果を、混合砂に適用すると、粒径別流砂量を求めることができる。主に、大きい粒径は 1 回でも回数が検出されると、流砂量が実測値よりも大きく求めらえる。一方で、小さい粒径はほとんど検出されず、流砂量が実測値よりも小さくなる。本実験で使用したハイドロフォンでは、粒径 7.1 mm で実測値と解析結果がほぼ一致した。全流砂量で比較すると、流砂量の大小に関係なく、ほぼ一様に実測値と解析結果が分布し、実測値と解析結果の流砂量は約 2~3 倍の範囲内に収まる。解析結果の全流砂量は粒径 17.5 mm 、 12.3 mm の影響を大きく受けて、検出される時は実測値より大きくなり、検出されない時や検出数が少ない時は流砂量が小さくなる。粒径 3.1 mm はほとんど検出されなかったが、全流砂量には大きく影響しない。現地では、小さな粒径は計測対象とせず、ある程度大きな粒径を対象として計測を実施すれば、流砂量をオーダーベースで議論することが可能である。

第 6 章 結論および展望

本研究においては、総合土砂管理の観点から流砂量観測の必要性を示し、近年、水源域での土砂管理型の施設として進められているシャッター付砂防堰堤にも活用が期待されているハイドロフォンについての検討を行った。ハイドロフォンとは、河川を流れる流砂がパイプに衝突した時に発生する音からパイプに衝突した回数を検出し、その回数から流砂量を推定する計測システムである。ハイドロフォンについては、これまでの数多くの検討が行われてきたが、流砂の運動形態を考慮した具体的な解析方法は検討されていなかった。本論文では、それらを考慮した流砂量解析手法を提案し、ハイドロフォンの流砂観測法の標準的な仕様を提案した。

6.1 結論

第 1 章では、研究を実施した背景を記述し、本研究の位置づけを示した。研究の背景となる日本における総合土砂管理については、相互に影響するため砂防・河川・海岸などの領域ごとの個別の維持管理では限界があること、そのために領域を繋いで流砂系全体での土砂管理や流砂観測が必要であることを示した。流砂観測を実施するには土砂移動現象を分類して、その移動形態（浮遊・各個運搬・集合流動）に適した計測方法を選定する必要があることを確認した。流砂観測を実施するには、(1)連続的に観測できること、(2)信頼性の高い解析手法であること、(3)流水によって破壊されないこと、という 3 つの要件を満たすことが重要である。流砂量計測方法を評価する際は、この中から「連続的に観測できること」「信頼性の高い解析手法であること」の 2 つの要件が重要となる。計測方法については、直接法と間接法、またそれぞれで固定式と可搬式が挙げられる。固定式と可搬式を比較すると、連続計測を目的とした場合には固定式が有用であり、現在設置され運用されている機器のほとんどは固定式である。一方で、固定式は一度設置するとその地点でしか計測ができず容易に観測点の変更が行えないため、地点の選定が重要である。そのため、可搬式はその選定作業を行う際や、大出水時における流砂の移動形態を把握する際には、有効な方法である。直接法では、直接採取した土砂の粒度を解析することが可能で、流砂量や粒径の大小が直観的に把握できる利点がある。その一方、直接的に土砂を採取するためには施設の建設・維持管理に多大な費用と労力を要すること、出水中の流砂量の変化を連続的に追跡することが困難であること、計測可能な時間が設備の容量と流砂量に支配され長期間にわたる観測が困難であることなどの課題がある。直接法の欠点を補う方法として提案されたのが、土砂移動に伴う副次的な現象を利用して流砂量を推定する間接法である。間接法には、超音波映像法・地盤振動法なども挙げられるが、ハイドロフォンは上記に示した 3 つの要件を満たし、比較的安価で水源域での観測事例も多く、複数の研究者によって直接法で採取した流砂量とのキャリブレーションにより流砂量を推定する検討が実施されている。日本では京都大学防災研究所穂高砂防観測所

などをはじめ各地で 1980 年代後半からハイドロフォンシステムが運用されており、平成 23 年からは全国各地の水源域に設置されて流砂量観測が実施されている。これまでのハイドロフォンの適用事例と課題を整理するとともに、本研究の位置づけの構成と内容を示した。

第 2 章では、ハイドロフォンの原理と装置や回数の記録方法やハイドロフォンに関する既往研究についてレビューするとともに、従来の主な流砂量解析法について整理を行った。ハイドロフォンを用いた流砂量解析には、(1)衝突粒子の音響信号を整形して振幅に閾値を設けて離散化して回数を記録する方法、(2)閾値を超える時間（持続時間）を記録する方法、(3)信号の正の値の面積（積分値）を記録する方法がある。(2)、(3)の方法では、これまでに連続衝突や残響が長引く大礫の衝突に対して検出率が低下することが確認されており、流砂量が多くなると回数を記録する方法よりも検出率（回数/流砂量，持続時間/流砂量，積分値/流砂量）が低下するため、信頼性の高い流砂量解析が行えない。このような課題に対して、粒子数から検出率の低下を考慮した解析方法が考案されているが、衝突頻度が大きい時のパイプの振動の影響が考慮されていないこと、波形を合成させる方法の検証が十分に行われていないこと、流砂量を推定するために必要な独立変数を求めるための関係式についての検討が不十分であること、などの課題が残されている。そのため、本論文では(1)の方法で検討する立場を取ることとした。

この方法で流砂量を推定するには、粒径別の衝突粒子数を推定する必要がある。そのためには、他の方法と同じように流砂の運動量と振幅値の関係を知り、運動量を推定する必要がある。運動量は粒子の移動速度から求められるため、流れの条件が計測できれば、運動量を推定することができる。しかしながら、現状では流砂の運動量を推定するための計測機器が標準的に設置されていない。さらに、回数を記録するには検出限界があることや流砂の運動によるばらつきを考慮した解析手法の必要性が示されているが、具体的な検証が行われていない。現状では、回数と直接法で採取した流砂量をキャリブレーションして、連続的な流砂量を推定する方法が実施されている。次章では、この方法について実験水路で流砂量解析法を評価することの必要性を示した。

第 3 章では、実験水路でハイドロフォンによる流砂量解析法を検証し、この解析法の問題点を整理した。ハイドロフォンは現地観測で使用しているシステムとほとんど同じ構成である。粒子が接触するパイプは、外径 27.2 mm、内径 25.2 mm の円形断面で、流砂が衝突する部分の長さは、現地の地形を模した水路および直線水路ともに 0.6 m である。回数は Method1 で記録した。

地形を模した水路実験から、ハイドロフォンによる最大記録回数は Ch ごとに異なることを確認した。Ch1 と Ch2 は流砂量の時間的変化の傾向を表し、Ch3 と Ch4 は流砂量が小さい時は回数が記録されるが、流砂量が大きい時は回数が極端に少なくなって流砂量の時間的変化の傾向が合わない。回数から流砂量を推定するには、条件に合った Ch の設定が必要であることを確認した。

直線水路の実験より、粒径ごとに記録される Ch を確認し、流砂量と回数の関係を整理した。一様砂の結果から、本実験条件下では 1 mm と 2 mm はほとんど回数が記録されなかった。4 mm は各 Ch で総回数のばらつきが大きく、8 mm や 16 mm ではばらつきが小さくなり、特に 16 mm は

各 Ch での総回数のばらつきがほとんどなく、流砂量から推定した粒子数と回数がほぼ一致した。アンプの倍率と粒径の対応は、4 mm は 5.0~7.1 倍で応答性が高く、8 mm と 16 mm は倍率の違いによる差はほとんど見られなかった。各 Ch の回数の差を求めると、信号の飽和状態をある程度確認することができる。これは、各 Ch での回数は同じタイミングで記録したと仮定した場合のときである。Method1 で記録した結果から Method2 の結果を求めると、同じ u^* でも 1 つの Ch で記録されずに、複数の Ch で記録されたが、これは流砂の運動による速度がばらつくからである。Method1 は各 Ch の回数の差を取ることで、信号が飽和状態かどうかを確認することはできるが、飽和状態では流砂量の推定はできない。一方、Method2 を用いると振幅のばらつきが確認できる。

混合砂の結果から、本実験条件下では混合砂 I は各 Ch での回数の割合が粒度分布の重量比を表したが、混合砂 II と混合砂 III では割合が重量比と一致しなかった。これは、一様砂のとき 4 mm でアンプ倍率による変化を表し、平均粒径 5.5 mm の混合砂 I では変化を表したが、平均粒径 7.9 mm と 11.0 mm の混合砂 II と混合砂 III はどの倍率でも回数に変化が出にくい粒度分布の砂であったためである。混合砂でも一様砂と同様に各 Ch で記録された回数の差を求めたが、混合砂は粒径によって振幅値が異なるため一様砂と同様のことが示されなかった。Method1 で記録した結果から Method2 の結果を求めると、平均粒径が小さいと運動量が小さく振幅も小さくなるため倍率が小さい Ch2, 3 で記録される回数が多い。平均粒径が大きくなると、倍率の大きい Ch1 で記録される回数が増える。しかしながら、流砂の運動により速度がばらつき、運動量ひいては振幅値にばらつきが生じることや、振幅値は粒径の 3 乗に比例するため、混合砂では速度のばらつきより粒径の変化の方が大きく影響すると考えられるが、本システムではその割合を確認できないことを明らかにした。

第 4 章では、前章で解析の必要性を明らかにしたパイプ内の音響特性について、空気中でパイプに粒子を衝突させて、その運動量と振幅値を広い範囲にわたって確認した。ハイドロフォンの外殻のパイプは外径 48.6 mm、内径 44.6 mm、長さ 50 cm のステンレス製である。音響信号は、単一の倍率のハイドロフォンアンプで最大 5 V まで記録できるものと、1 倍~1024 倍まで 4 倍刻みで増幅可能なアンプを用いて最大 10 V まで計測可能なシステムを用いた。粒子の運動量は質量の異なる粒子を、高さを変えて自由落下させて変化させた。また、パイプ衝突時の速度はハイスピードカメラで計測した。粒子とハイドロフォンとの衝突位置をマイクから 10, 20, 30, 40 cm とした。その結果、ハイドロフォンから得られる音響信号は、軸方向モード (0.4kHz 周辺)、円周方向モード (4.6 kHz 周辺)、径方向モード (9.4 kHz 周辺) が卓越していることを確認した。また、運動量が小さい場合、軸方向モードの振幅が他のモードと比べて小さく、運動量が大きくなると各モードの振幅がほぼ同程度となることを確認した。軸方向モードは、粒子の衝突位置がマイクロフォンから離れると振幅が小さくなることが示された。さらに、円周方向モードや径方向モードの振幅は、粒子の衝突位置に無関係であること、運動量大きい領域においては信号が飽和することを明らかにした。実験の範囲では、3 方向の固有振動のうち円周方向の固有振動の振幅は運動量のおよそ 0.7 乗に比例し、径方向の固有振動ではおよそ 2.1 乗に比例する。単一の倍率のア

ンプを用いる場合、より幅広い運動量に対応できる点から円周方向の固有振動モードを利用する方が望ましい点を示した。また、本実験のハイドロフォンシステムでは、計測できる運動量の上限値は $20 \text{ g}\cdot\text{m/s}$ であった。振幅はダイナミックレンジ以下でも飽和する場合があるため、1つのハイドロフォンでは限られた範囲の運動量しか計測できない。しかしながら、特性の異なるハイドロフォンを複数用いると、広い粒度分布幅に対応した計測が可能になる。

第5章では、円周方向の固有振動モードを利用した運動量と振幅の関係性を用いて、実験水路でハイドロフォンの適用性を検討した。実験は、直線矩形断面水路を用いて、勾配と流量を一定にして一様砂を個別、集団で流した場合と、一様砂を混合した混合粒径を集団で流した場合を実施した。一様砂の結果から、流砂量が多い状態ではこれまでの検討と同様に、ハイドロフォンで記録される回数が極端に少なくなり、検出率が低下することを確認した。力の釣り合いから流砂移動層厚を推定すると、本実験条件下ではほぼ全ての粒子がハイドロフォンに衝突したと推測される。そのため、連続して粒子が衝突すると音響信号が重なって閾値を下回らない状態が継続して、回数が記録されずに検出率が低下したことが原因に挙げられる。回数を確実に検出するには、衝突頻度を小さくし、個々の粒子の音響信号を分離して計測させることが必要である。実験結果より、粒子数が約 30 s^{-1} 以下では検出率（検出回数/粒子数）がほぼ1になり、粒子衝突後から約 0.033 s 後に次の粒子が衝突すると回数が検出されることがわかる。1つの粒子を衝突させた時の音響信号の波形から、 0.033 s 後の振幅値は最大値の約 $1/10$ であった。すなわち、最大振幅値の $1/10$ 以下になれば、波形の重なりによる影響が小さくなる。

栗原ら³⁵⁾が提案した流砂量解析手法を基に、一様砂の実験結果から、粒径別の粒子数と各倍率での検出回数を表す行列 A を求めた。この行列 A は逆行列が存在することから、検出回数から粒子数を推定することができる。この結果を、混合砂に適用すると、粒径別流砂量を求めることができる。主に、大きい粒径は1回でも回数が検出されると、流砂量が実測値よりも大きく求めらえる。一方で、小さい粒径はほとんど検出されず、流砂量が実測値よりも小さくなる。本実験で使用したハイドロフォンでは、粒径 7.1 mm で実測値と解析結果がほぼ一致した。全流砂量と比較すると、流砂量の大小に関係なく、ほぼ一様に実測値と解析結果が分布し、実測値と解析結果の流砂量は約2～3倍の範囲内に収まる。解析結果の全流砂量は粒径 17.5 mm 、 12.3 mm の影響を大きく受けて、検出される時は実測値より大きくなり、検出されない時や検出数が少ない時は流砂量が小さくなる。粒径 3.1 mm はほとんど検出されなかったが、全流砂量には大きく影響しない。現地では、小さな粒径は計測対象とせず、ある程度大きな粒径を対象として計測を実施すれば、流砂量をオーダーベースで議論することが可能である。

6.2 ハイドロフォンに必要な仕様

以上のことから、ハイドロフォンを用いた流砂量解析を実施するために必要な項目を取りまとめ、ハイドロフォンによる流砂観測法に必要な仕様を提案する。

- 運動量と振幅の関係は、ハイドロフォンの現地の実際の固定方法により変わることが想定される。したがってハイドロフォンは単体としてではなく、図-6.1 に示すように固定基礎と一体形成で製作し、その状態での運動量と振幅の関係を確認する。

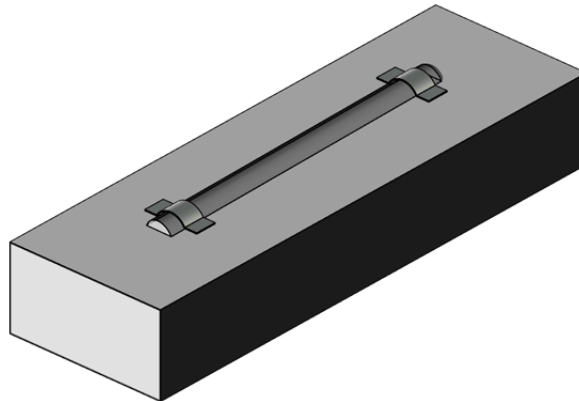


図-6.1 ハイドロフォンを固定する装置のイメージ図

- 現地の地形、水理条件から計測範囲を確認する。
- 現地では洪水時の粒子の移動速度を推定する必要があるため、流速計もしくは水位計を設置する。機器はハイドロフォンの直上流で流れが乱れない箇所に設置する。
- 1つのハイドロフォンはダイナミックレンジが限られているため、より広い範囲の条件を計測するには、運動量と振幅の関係が異なる複数のハイドロフォンが必要である。具体的にはパイプの肉厚を変える。
- 個別の衝突波形から検出される限界衝突頻度を確認し（波形の最大値の約 1/10 になるまでの時間）、計測の対象となる粒径と摩擦速度 (u_*) からハイドロフォンの長さを設定する。
- 長さが極端に短い場合は、円周方向と軸方向の固有振動モードの信号がカップリングして、同じ特性のハイドロフォンであっても運動量と振幅の関係が長さによって異なる場合がある。本実験で用いた長さ 10cm のハイドロフォンではその影響は見られなかった。
- 粒径別流砂量を計測するためには、ハイドロフォンアンプは複数段階設定する必要がある。倍率は最小倍率（最大閾値）で回数が記録されないように、最大倍率（最少閾値）で記録されるように設定する。
- 予め設定された閾値（倍率）では、 u_* が変化した場合に回数が検出されなくなる可能性がある。 u_* の変化に伴う運動量の変化は、粒径が変わることによる運動量の変化よりも非常に小さく、 u_* の変化で運動量が変化すると、各閾値で計測できる範囲から外れる。

そのため、それぞれの u_* に対応した閾値を設定する必要があり、洪水中の u_* の変化に対応した閾値を自動で変動できるような方法にすると回数をより確実に検出できるようになる。この方法については粒子の運動による相対速度のばらつきも含めてさらなる検証が必要である。

参考文献

- 1) 国土交通省水管理・国土保全局：「流砂系の総合的な土砂管理に向けて」報告，河川審議会 総合政策委員会 総合土砂管理小委員会，1998
- 2) 高橋保：流砂系の総合的な土砂管理に向けて，河川，p.3-5，1998
- 3) 水野秀明・南哲行：山地流域における土砂移動の実態－粒径別土砂収支の作成－，土木技術資料，Vol.41，No.7，p.48-53，1999
- 4) 芦田和男・江頭進治・中川一：21 世紀の河川学，京都大学学術出版会，2008
- 5) 国土交通省 国土政策総合研究所：山地河道における流砂水文観測の手引き（案），国総研資料 第 686 号，2012
- 6) 国土交通省中部地方整備局静岡河川国道事務所：安部川総合土砂管理計画（案），2013
- 7) 水山高久：シャッター付き砂防堰堤の運用のための情報システム，砂防学会誌，Vol.57，No.4，p.66-67，2004
- 8) 中谷加奈・井元大希・里深好文・水山高久：数値シミュレーションを用いたシャッター付砂防堰堤の土砂調節効果の検討，砂防学会誌，Vol.63，No.6，p.43-51，2011
- 9) 安田武道・青柳泰夫・今井一之・植野利康：シャッター付き砂防えん堤について，第 56 回平成 19 年度砂防学会研究発表会概要集，p.468-469，2007
- 10) 三上幸三・長山孝彦・田方智・伊藤隆郭・水山高久：常願寺川における可動式シャッター砂防堰堤の設置と運用について，砂防学会誌 Vol.66，No.5，p.42-48，2014
- 11) 澤田豊明：山地河川における土砂流出の観測研究－観測法と計測機器－，京都大学博士論文「山地流域の土砂流出に関する研究」，1985
- 12) 国土交通省水管理・国土保全局：河川砂防技術基準調査編，平成 24 年 6 月版，2012
- 13) 建設省土木研究所；建設省流砂観測資料集，土木研究所資料第 625 号，1971
- 14) 芦田和男・高橋保・奥村武信・道上正規・澤田豊明：山地流域における出水と土砂流出（5）－穂高砂防観測所の観測結果－，京都大学防災研究所年報第 15 号 B，p.349-361，1972
- 15) Baezinger. R. and H. Burch：Acoustic sensors (hydrophones) as indicators for bed load transport in a mountain torrent，Hydrology in Mountain Regions，1-Hydrological Measurements；the Water Cycle，Proceedings of two Lausanne Symposia，August 1990，IAHS Publ. No.193，1990
- 16) Dallas C.: Field Comparison of Six Pressure-Difference Bedload Samplers in High-Energy Flow, U.S. Geological Survey Water Resources Investigations Report 92-4068, 59p, 1999
- 17) 芦田和男・高橋保・澤田豊明：山地流域における出水と土砂流出（2），京都大学防災研究所年報第 20 号 B-2，p.387-403，1977

- 18) 芦田和男・高橋保・澤田豊明：山地流域における出水と土砂流出（10），京都大学防災研究所年報第 24 号 B-2，p.223-238，1981
- 19) 伊藤仁志・矢澤聖一・石田勝志・山下伸太郎・佐光洋一・高橋健太・水山高久：天竜川水系と田切川における流砂計測，砂防学会誌，Vol.61，No.6，p.19-26，2009
- 20) 須賀堯三・星畑国松：最近の流送土砂量調査法の紹介，土木技術資料，Vol.12，No.4，p.36-41，1973
- 21) 建設省土木研究所，掃流砂量観測，1970
- 22) Helley, E.J., and Smith, Winchell: Development and calibration of a pressure-difference bedload sampler, U. S. Geological Survey Open-File Report, 1971
- 23) 水山高久・里深好文：ピット掃流砂計測装置のハイドロフォンのキャリブレーションへの適応，砂防学会誌，vol.56，No3，pp.55-56，2003
- 24) 板倉安正・加藤幸則・高濱淳一郎・能和幸範：土石流発生検知及び流量推定のための音響センサ，SICE，第 14 回センシングフォーラム，1997
- 25) 疋田誠・吉田美幸・前村洋作：振動センサーを利用した火山性土石流の現地計測，土木学会第 53 回年次学術講演概要集，共通セッション，p. 4-5，1998
- 26) 諏訪浩・山越隆雄・佐藤一幸：地盤振動計測 による土石流の規模推定，砂防学会誌，Vol.52，No. 2，p.5-13，1999
- 27) 澤井健二・塚田貴久・永長昭彦・岡田浩史：水路床に埋設した振動計による流砂量および粒径の推定，第 41 回土木学会関西支部年次学術講演会講演概要，II.31.1-II.31.2，1999
- 28) 小倉久直・中山純一・澤井健二・鈴木宏・宮本邦明：超音波による流砂の映像化と流砂量計測について，自然災害科学，7(2)，p.73-78，1988
- 29) 澤井健二：音響ならびに超音波映像による流砂量計測法，京都大学防災研究所研究発表会，1989
- 30) 澤井健二・小倉久直・中山純一・高橋信行：超音波映像による間接的流砂量測定法の基礎実験，平成 4 年度砂防学会研究発表会，p.166-169，1992
- 31) 澤井健二：流砂の衝突音ならびに超音波映像による山地河川の流砂量計測システムの開発，平成 5 年度科学研究費補助金試験研究(B)研究成果報告書，p.21-23，1994
- 32) 谷口伸一・板倉安正・清野雅雄・鈴木宏・澤井健二・小倉久直：流砂量の間接的な測定法としての音響法の提案とその信号処理，第 26 回計測自動制御学会学術講演会論文集，pp.667-668，1987
- 33) 流砂量測定手法研究会：可聴音による間接的流砂量測定法（パイプ法）の基礎実験，昭和 63 年度砂防学会研究発表会概要集，pp.139-140，1988
- 34) 谷口伸一・板倉安正：音響法による流砂量計測のための信号解析，滋賀大学紀要（彦根論叢），第 276・277 号，p.323-346，1992
- 35) 栗原淳一・宮本邦明：音響を利用した流砂量計測装置について，砂防学会誌（新砂防），vol44，No5，pp. 26-31，1992

- 36) 水山高久・野中理伸・野中伸久：音響法による流砂量の連続計測，砂防学会誌，vol49，No4，pp.34-37，1996
- 37) 水山高久・富田陽子・野中理伸・藤田正治：ハイドロフォンによる流砂量の観測（続報），砂防学会誌，vol.50，No6，pp.44-47，1998
- 38) 水山高久・野中理伸・藤田正治：常願寺川津之浦下流砂防堰堤におけるハイドロフォンによる流砂観測，砂防学会誌，Vol.55. No.3，p.56-59，2002
- 39) 高濱淳一郎・渡部文人・右近則男・安養寺信夫：音響法による流砂計測，砂防学会誌，Vol.54，No.6，p. 59-63，2002
- 40) 小田晃・長谷川祐治，水山高久，野中理伸，宮本邦明：水理模型実験におけるハイドロフォンを用いた流砂量計測，水工学論文集，第 48 巻，pp.745-750，2004
- 41) 星野和彦・酒井哲也・水山高久・里深好文・小杉賢一郎・山下伸太郎・佐光洋一・野中理伸：流砂等計測システム（六甲住吉型）と観測事例，砂防学会誌，Vol.56，No.6，p.27-32，2004
- 42) 小田晃・長谷川祐治・水山高久・野中理伸・宮本邦明：ハイドロフォンによる流砂量計測の水理模型実験への適用，砂防学会誌，Vo.58，No.2，p.15-25，2005
- 43) 中谷洋明：ハイドロフォンシステムの流砂捕捉率に対する流量の影響に関する事例検討，砂防学会誌，Vol.61，No.4，p.12-20，2008
- 44) 中谷洋明：ハイドロフォン観測による小規模出水時の流砂量の統計解析，砂防学会誌，Vol.61，No.5，p.4-11，2009
- 45) 長谷川祐治・宮本邦明：ハイドロフォンによる流砂量計測に関する研究，平成 21 年度砂防学会研究発表会，p.282-283，2009
- 46) 長谷川祐治・鈴木拓郎・平澤良輔・宮本邦明・野中理伸：ハイドロフォンによる流砂量計測に関する研究(2)，平成 22 年度砂防学会研究発表会，p.288-289，2010
- 47) 鈴木拓郎・水野秀明・小山内信智・平澤良輔・長谷川祐治：音圧データを用いたハイドロフォンによる掃流砂量計測手法に関する基礎的研究，砂防学会誌，Vol.62，No.5，p.18-26，2010
- 48) 長谷川祐治：掃流砂の運動形態を考慮したハイドロフォンによる流砂量計測に関する研究，平成 23 年度砂防学会研究発表会，p.60-61，2011
- 49) 長谷川祐治：流砂量が多い状態でのハイドロフォンパルスを活用した流砂量推定手法，平成 24 年度砂防学会研究発表会，p.104-105，2012
- 50) 鈴木拓郎・内田太郎・岡本敦・高橋健太・山下伸太郎・小菅尉多・福本晃久：音圧データを用いたハイドロフォンによる掃流砂観測手法の現地適用性の検証，砂防学会誌 Vol.66，No.1，p.4-14，2013
- 51) 長谷川祐治・宮本邦明：ハイドロフォン内部の音響特性と流砂量計測に関する実験，砂防学会誌 Vol.66，No.5，p.23-32，2014
- 52) 芦田和男・塩見靖国：水路における砂礫堆の水理特性について，京都大学防災研究所年報第 10 号，p.457-477，1966

- 53) Egashira, S., Miyamoto, K. and Itoh, T. : Constitutive Equations of Debris Flow and Their Applicability, 1st Int. Conf. on Debris-Flow Hazards Mitigation, ASCE, p.340-349, 1997
- 54) 芦田和男・道上正規：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，第 206 号，p.59-69，1972

謝辞

本論文は、筑波大学生命環境系 宮本邦明教授のご指導の下にまとめられたものです。宮本教授には研究の機会を与えてくださり、問題の設定や捉え方、解決に至るまでの過程に加え、博士のあり方や仕事と学業を両立させる心構えなど、熱心にかつ丁寧なご指導をいただきました。宮本教授には深甚なる謝意を表します。また、奈佐原顕郎准教授、堀田紀文准教授、水野秀明准教授には、論文の作成を一から指導してくださり、解析の方法を示唆してくださるなど貴重なアドバイスをたくさんいただきました。また、各先生方にはお忙しい中、副査を引き受けて頂きましたことを、深く感謝いたします。

一般財団法人建設技術研究所飯島尚理事長には、厳しい社会情勢の中、学位取得の貴重なチャンスを与えて下さったことにこの上ない恩義を感じております。また、杉浦信男専務理事には、業務遂行上ご迷惑をおかけする場面が多々あったかと思いますが、研究活動を支援して下さい、大変感謝しております。京都大学大学院農学研究科 水山高久教授にはハイドロフォンの研究のきっかけを与えてくださり、研究会を通じたディスカッションの場や各種資料をご提供頂くなどの便宜を図っていただきました。心より感謝申し上げます。

筆者の立命館大学大学院理工学研究科在学中の指導教員の江頭進治元教授（現在、独立行政法人土木研究所 ICHARM 研究・研修指導監）には、研究や学問に対する姿勢など幅広くご教示いただきました。心から感謝いたします。日本大学生産工学部 小田晃教授とは実験を一緒に行い、様々な苦勞を共にし、貴重なデータを提供して頂きました。本当にありがとうございます。防衛大学 石川信隆元教授（現在、鋼構造物研究会技術顧問）、別府万寿博准教授には研究の相談に乗っていただいたり、公私に渡って大変お世話になりました。心より感謝いたします。京都大学大学院農学研究科 糸数哲さん、高木将之さん、京都大学大学院工学研究科 山野井一輝さん、国土交通省国土技術政策総合研究所 奥山悠木さんには有意義なご意見やコメントを数多くいただきました。本当にありがとうございます。株式会社ハイドロテック 野中理伸社長にはハイドロフォンのアンプを作成していただき、ハイドロフォンの現地観測での留意点など、技術的なアドバイスをたくさんいただきました。心から感謝いたします。また、業務を遂行するにあたり、一緒に作業してくれた方々にはご迷惑をお掛けしたかと思いますが、それでも、様々なことに迅速に対応していただき、何とか学業と両立することができました。関係した皆さまには深く感謝しております。

最後になりましたが、京都大学大学院農学研究科 中谷加奈助教には、効率的なデータ作成方法や効果的なプレゼンテーションの組み立て方など、多くのアドバイスをいただいただけでなく、論文執筆中は生活が不規則になりがちで、大変な時期もありましたが、笑顔で励ましてくれたことや時には激励の言葉を発してくれたことで、これを超えることができました。研究者としてだけでなく家族として応援してくれたことに多大なる感謝の意を表します。