

A D C Pによる河川流観測

武藤 裕 則

要 旨

河川流の内部流況を観測することを目的として、Acoustic Doppler Current Profiler (A D C P) を用いた速度計測を行った。船外機付小型ボートの舷側に A D C P を固定し、対象領域を航行することでデータを得た。対象とした領域は、連続する単断面蛇行河道の変曲点付近（平均水深 1.2m）および片側に水制群を有する直線河道（平均水深 3m）の 2 カ所である。3 次元構造を有する河川流に対する A D C P 観測の適用性について、L S P I V 法による表面流の観測結果と対比しながら検討した。

キーワード：A D C P，河川流，速度計測，河床計測，流れの 3 次元性

1. はじめに

Acoustic Doppler Current Profiler (A D C P) が開発されてから既に二十余年が経過している (柳, 2002)。この間、主として海洋観測分野において積極的に活用され、湾域や沿岸域から大水深を有する海域までカバーする広汎な適用範囲と得られたデータの信頼度の高さを示し、海流の内部構造の解明に多大な貢献をしてきたことは周知の事実である。A D C P には、計測線上の速度分布を瞬時に、しかも速度 3 成分同時に計測するという、従来の点計測法にはない大きなアドバンテージを有する。現地観測において速度計測を行う場合、プローブを用いた点計測法による労力は実験室のそれによる比ではないこと、また可視化法による計測は、表面流に関しては近年開発された Large-Scale Particle Image Velocimetry (L S P I V) がある程度信頼できる方法として認知されてきてはいる (藤田・武藤ら, 2003) もの、内部流況に対しては現時点ではほとんど手だてがないこと、等を考えると、A D C P による観測は、これらの手法を補うのみならず、これまで未知であった部分に関して新たなデータセットを与え得るということで多いに期待されてきた。このことは、流れの 3 次元性が卓越しその挙動が河道形態や

物質輸送に直結する河川流については特に要請の高い点であるが、A D C P の計測原理に関連するハード的な制約から、水深数 m 程度以下の浅い水域に適用することは長らく困難であった。しかしながらここ数年、そのような水域への適用を可能とする幾つかの新技术が開発され、A D C P による計測可能領域に水深 1 ～数 m 程度、河道幅 10 ～数十 m 程度の中規模以上の河川がようやく入ってきたといえる状況である。

本報告は、水深 1m 以下の水域への適用も可能なブロードバンド A D C P (ワークホース 1200 センチネル、米国 R & D 社製) を用いて行った河川流の観測結果である。観測はインドネシア国ブランタス川支流レスティ川および宇治川で行った。観測地点は、前者においては連続する単断面蛇行河道の変曲点を含む直線区間であり、観測区間の平均河道幅は約 15m、平均水深は約 1.2m である。また後者は片側に水制群を有する直線河道区間であり、観測区間の平均河道幅は約 60m、平均水深は約 3m である。本報では、主として平均速度場の水深方向への階層構造に着目するとともに、これまで観測実績のある宇治川での結果に関しては表面流況と内部との比較を行い、A D C P による河川流観測の妥当性についても検討を行う。

2. ADCP

ADCPの速度計測原理に関しては他の文献に詳しい(金子・伊藤, 1994; 柳, 2002)。ここでは、河川流のような浅い水域への適用を可能とした新技術について概観するとともに、今回の観測で採用したADCPの設定を記す。なお、これらの新技術の詳細については、R&D社のTechnical Noteや輸入代理店であるSEA社のカタログに詳しく、必要な場合そちらを参照されたい。

ADCPの適用可能範囲を、特に水深の浅い領域へと拡大した技術として、まずブロードバンドがあげられる。これは、計測時に発信する超音波パルスのパルス幅を短くするもので、通常短いパルスの方が広い帯域幅を有するのでブロードバンドと呼ばれる。この方式を採用することで、測線方向の分解能すなわち層厚を小さくすることが可能となる。R&D社のADCPの場合、計測層数は1から128までで任意に設定可能であるから、1層の層厚を小さくすることができればそれだけ水深の小さな水域への適用が可能となる。また、同時にデータの空間分解能も向上することは言うまでもない。ただし、逆に水深の大きな水域ではトランスデューサからある程度以上離れた領域における計測は不可能となる他、短いパルス幅を用いることから信号対雑音比が悪くなる(なお、信号雑音比の改善には位相変調によりコード化されたパルスを用いることで対応している。詳細は上記Technical Note等を参照)。ブロードバンドの採用により、従来600HzADCPで最小50cm程度であった層厚を5cmまで小さくすることが可能になった。

次に、計測精度とともに時間分解能を向上させた技術として、ハイスピードピンギングがあげられる。ADCPは超音波を発信し散乱体からの散乱音波のドップラー周波数シフトを計測して流速を計測している。このことから、超音波の発信時間間隔には特に信号発信後の発信体の減衰に関連するある限界が存在し、従来のタイプでは最高1~2Hz程度であった。流れの空間スケールが大きく、したがって時間スケールも大きい海流の場合は問題とならないが、代表スケールが海流に比して著しく小さい河川流の場合、この程度の信号発信間隔では3次元構造や乱れの計測には適さない。ハイスピードピンギングは、最小発信間隔を40Hzにまで高めることを可能としたものである。また、測定精度が発信回数のルートに反比例することから、ハイスピードピンギングを用いることで1計測あたりの精度も向上することとなる。さらに、1発信あたりの処理時間が短くなったことから、トランスデューサ前面のブランク距離(近接不感距離)も最小0とすること

が可能となった。

以上のブロードバンドおよびハイスピードピンギングを最大限活用した設定として、ハイレゾリューション・モードがある。これによれば、最小層厚1cm、最大層数255層、パルス発信間隔40Hzでの計測が可能となるが、水深および流速に対する許容範囲がかなり限られており(例えば1200Hzの場合、計測レンジ(m)×流速(m/s)<1)、今回の観測対象領域には適用できなかった。

今回用いたワークホースADCP1200センチネルは、以上の全ての機能を有しており、河川流観測に対してかなり広汎な適用が可能であると思われる。今回行った2河川における観測では、層厚は10cm、20cm、25cmと状況に応じて変化させた。層数は、観測対象区間の最大水深をカバーできるよう適宜設定した。ピンギング発信周波数は25Hzとし、20個のデータをアンサンブル平均することで1計測データとした。またブランク距離は5cmと設定した。この他、ボトムトラッキング(対地速度計測)を行うことで観測位置を把握するとともに、DGPSを併用することで位置に関する参照データを得た。

観測には、例えば宇治川の場合、5馬力の船外機を有する小型アルミボート(長さ3.3m、幅1.3m、定員3人)を用いた。ボートの操縦は著者自身が行い、対地速度が可能な限り1kt以下となるように操作した。ADCPはアルミ製の板やパイプを用いた手製の架台によってボートの片側舷側に取り付けた。船内には発電機を搭載し、ADCPやGPSの他、データ収録用のPCの電源に供した。データ収録にはR&D社によるソフトウェア(WinRiver, Ver.1.03.000)を用いた。インドネシア国レスティ川での観測では、ボート関係の機材および操縦者が異なるのみで、その他の設定は同様である。

3. 観測結果および考察

3.1 インドネシア国レスティ川における観測

レスティ(Lesti)川は、ジャワ島東部に広大な流域を有するブランタス(Brantas)川の左支川であり、その源は活火山スメル(Semeru)の山頂近くに位置する。始めポンチョクスモ(Poncokusumo)付近から西へ西南西流した後、ワジャック(Wajak)付近で南西に向きを変え、同様にスメルから流れ出す幾多の支流を合わせた後、タワングレジェニ(Tawangrejeni)で最大支流ゲンテン(Genteng)川と合流し再度西へ向かい、セングルー(Sengguru)でブランタスに合流する(Fig. 1)。今回の観測は、ゲンテン川合流点から約2km下流のタワングレジェニにおいて行った。Fig. 2に観測地点を含



Fig. 1 Lesti River basin

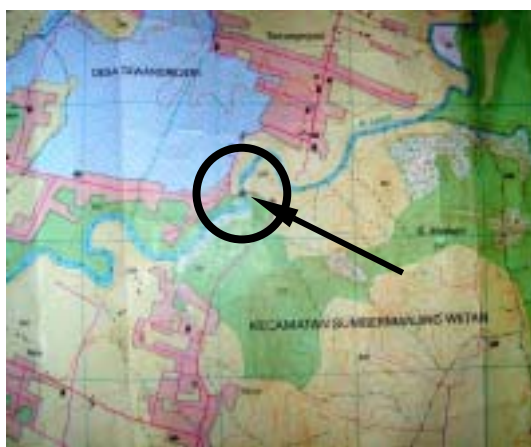


Fig. 2 Measurements point in Lesti (Tawangrejeni)

む付近の詳細な地図を示す。Fig. 1 ではこの区間はほぼ西流として描かれているが、Fig. 2 より実際にはかなり蛇行していることがわかる。図に示したように、観測地点は国道が渡河する地点の直下流である。前後の河道平面形状は、上流側が左湾曲、下流側が右湾曲であり、その中間の変曲点とその前後合わせて 50m 程度の直線区間を観測区間とした。観測区間を含む前後の区間は、国道の橋梁部を除いて護岸等はなく、単純な自然形状の断面である。なお、国道の橋脚（長さ約 10m）が河道のほぼ中央部に 1 本ある。また、この橋梁の上流部右岸側には水管理公団（JASA TIRTA I）の水位計

が設置されている。

この地域の雨期は 11 月～3 月であり、時には災害が発生するほどの洪水が流れ下る。例えば、2000 年 1 月には $1300\text{m}^3/\text{s}$ 以上の流量により水位が平常時より 10m 以上上昇している。Fig. 3 に 2002 年 12 月のタワングレジェニにおける流量記録を示す。このように、平常時の流量は $10\sim 15\text{m}^3/\text{s}$ 程度であるが雨期には $50\text{m}^3/\text{s}$ を越える小洪水は頻発するようである。しかしながら、今回の観測のために著者らが赴いた期間（2003 年 2 月 24 日～27 日）には顕著な洪水は発生しなかった。滞り期間中の流量記録を Fig. 4 に示す。水位は 314.3m 前後でほぼ一定であり、この値を平常時のものと考えてほぼ差し支えない。観測は 2 月 25 日および 27 日に行った。この時の観測区間の水深は平均で 1.2m、最大地点で 1.7m であった。河床形状の計測結果を Fig. 5 に示す。

仮に河道内の流量のみを算定することが目的であれば、ADCP を 1 度横断測線方向に移動させるだけで結果を得ることができる。加えて、ADCP の航跡で規定される断面（仮に S とする）内の速度分布を得ることができる。速度分布の計測精度を上げるための方法としては、この断面 S 内の速度分布を複数回計測することが考えられるが、今回採用した舷側設置型では計測断面の設定はひとえにボートの操船技術にかかっており、卓越する主流方向を有する河川流ではそのよ

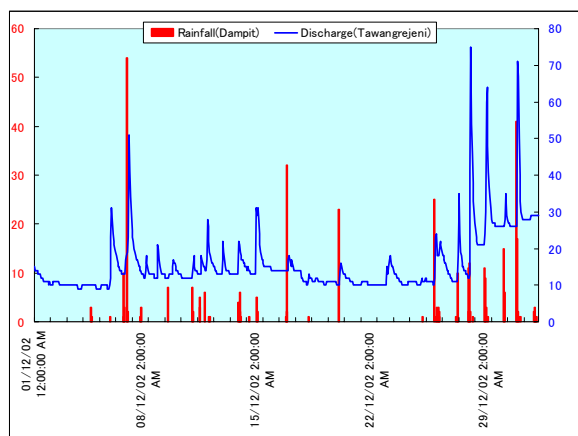


Fig. 3 Discharge data at Tawangrejeni in Dec. 2002

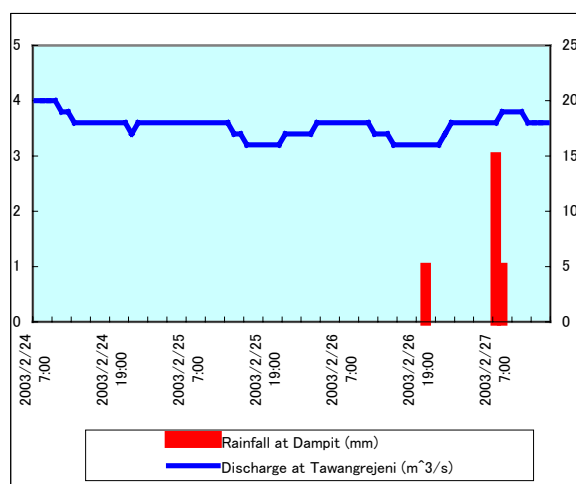


Fig. 4 Discharge data at Tawangrejeni in Feb. 2003

うに操船することは非常に難しい。したがって今回の観測では、流下方向にある程度の広がりを持った空間を考え、その空間内における速度場を得ることを目的とし、河道横断時に往路と復路の航路を小刻みに変化させることで空間内のあらゆる地点における速度情報を偏りなく得ることを目指した。このために、1回の計測につき河道を4～6往復程度移動した。そのような計測を複数回繰り返し、得られたデータを積算することで1データセットとした。以上の処理は、観測期間中水理条件がほとんど変化しないという前提のもとで有効であるが、流量・水位については観測中に適宜チェックし有意な変化が認められないことを確認した。このようにして得られたデータは、操船時の細心の注意にも拘わらず対象空間内に偏りが生じるが、以下の議論はそうにして得られたデータを内挿補完して空間内に均一に配置し直した結果を用いて進める。生データから内挿補完されたデータへの変換例を Fig. 6 に示す。

Fig. 7 は内部各層における速度分布の計測結果であ

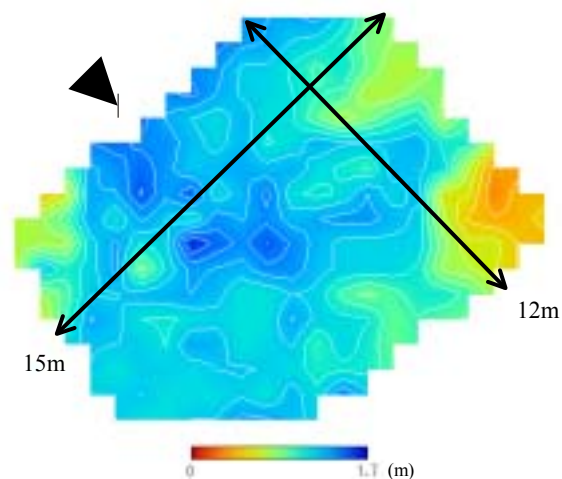


Fig. 5 Measured riverbed configuration

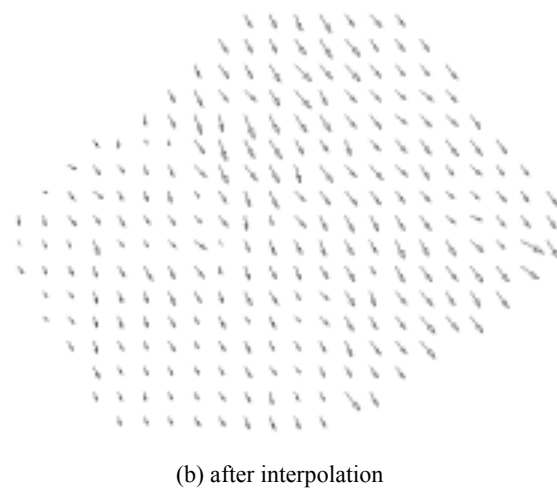
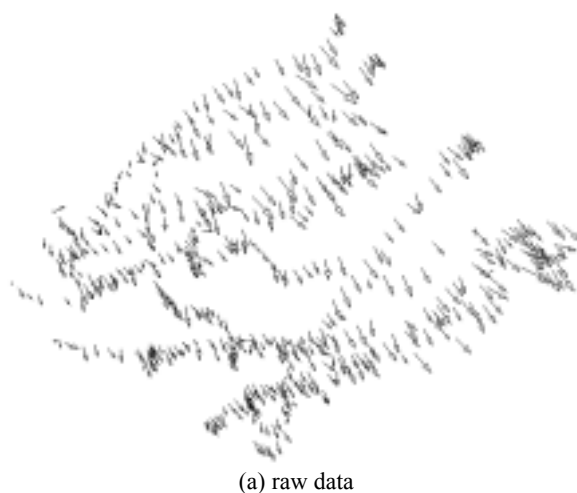
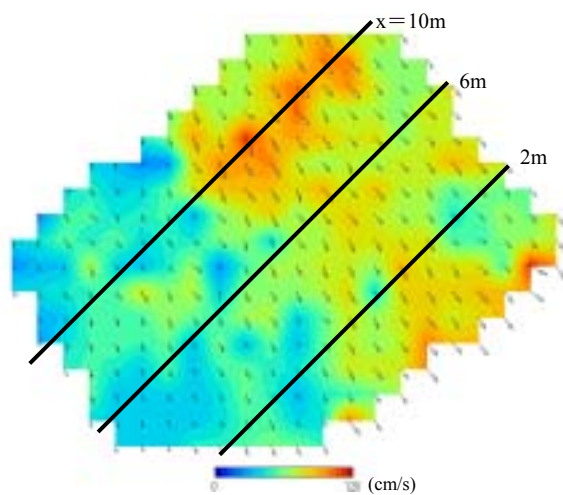
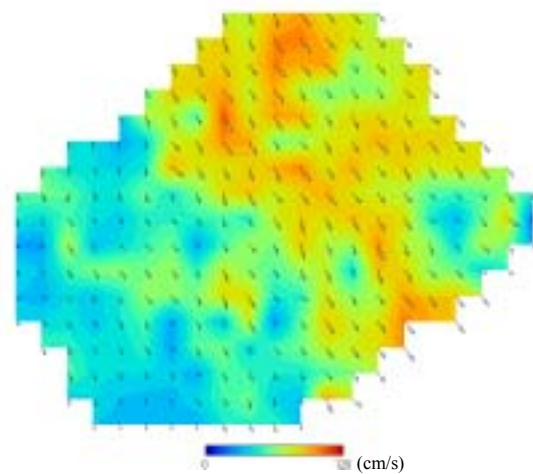


Fig. 6 An example of interpolation for velocity data

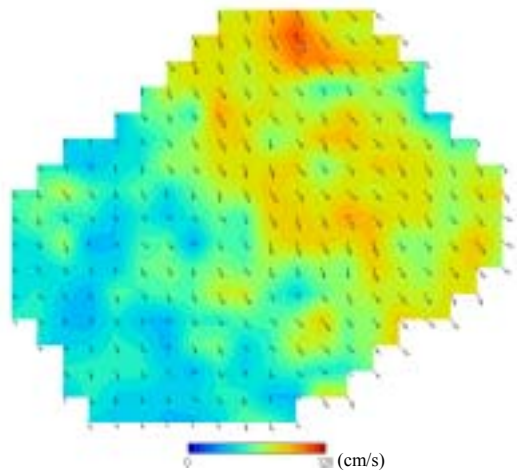
る。なお、図は上が北であり、現地での流向に従い北西から南東へ流れている。図よりこの区間の流下方向流速は遅いところで 30cm/s 程度、速いところで 1m/s 程度であることがわかる。ある同一の座標点について考えた場合、水面から河床へ近づくにつれて、速度の



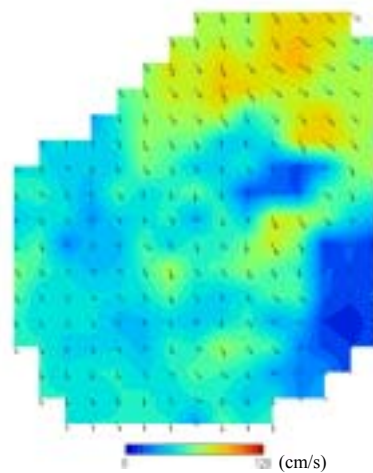
(a) 0.27m below WS



(b) 0.57m below WS



(c) 0.87m below WS



(d) 1.17m below WS

Fig. 7 Plan velocity distributions in several inner layers

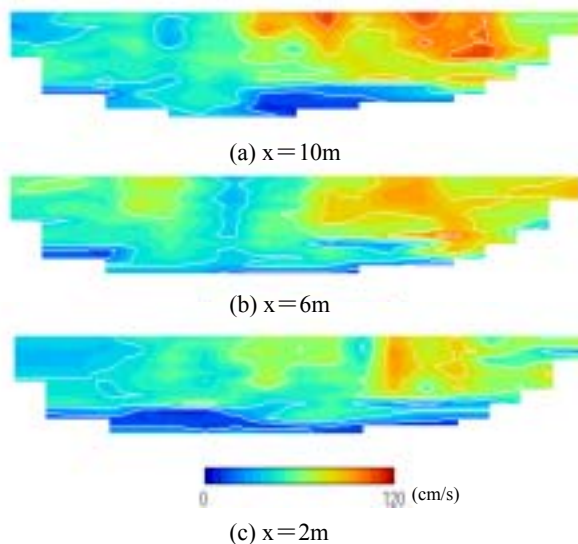


Fig. 8 Cross-sectional velocity distributions in several sections

絶対値がおしなべて小さくなっていることがわかる。

観測区間は蛇行の変曲点ではあるが、平均水深の 40 倍程度の延長を有する直線区間の一部であるためか、二次流ないしは水深規模の渦の存在をうかがわせる局所的な加・減速や流向の偏りはあまり見られない。河床形状 (Fig. 5) との対比で検討すると、河床は中央やや右岸よりに最深部が存在し、上流側の左湾曲からの出口の影響がうかがわれる。一方速度の横断方向分布を考えると総じて左岸側の方が流速が大きい。これは直上流部に位置する橋脚による整流効果の他、観測区間のすぐ下流側に続く右湾曲部の影響 (adjusting process) と考えられる。特に、河床に見られる上流側地形の影響と、流れに見られる下流側地形の影響が混在する様子は蛇行流変曲点付近の特徴的な状況であるが、そのことがかなり精緻に描き出されており、ADC P 観測の精度の高さを示している。

Fig. 7 (a) に示す 3 つの断面 ($x=2\text{m}$, 6m および 10m) 内における流下方向速度の分布を示したものが Fig. 8 である。観測区間最上流部 ($x=10\text{m}$) では左岸側に顕著な高速部が見られ、横断方向に偏りの大きい速度分

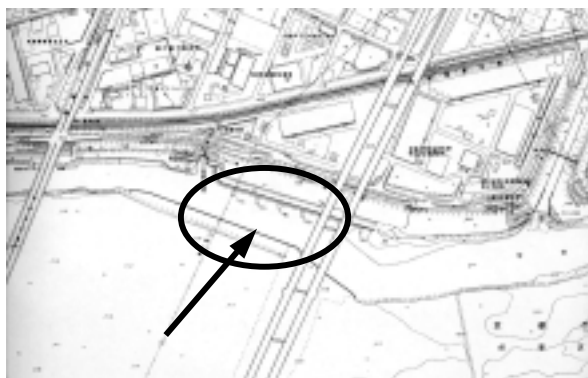


Fig. 9 Measurements point in Uji River



Photo 1 Measurements point in Uji River

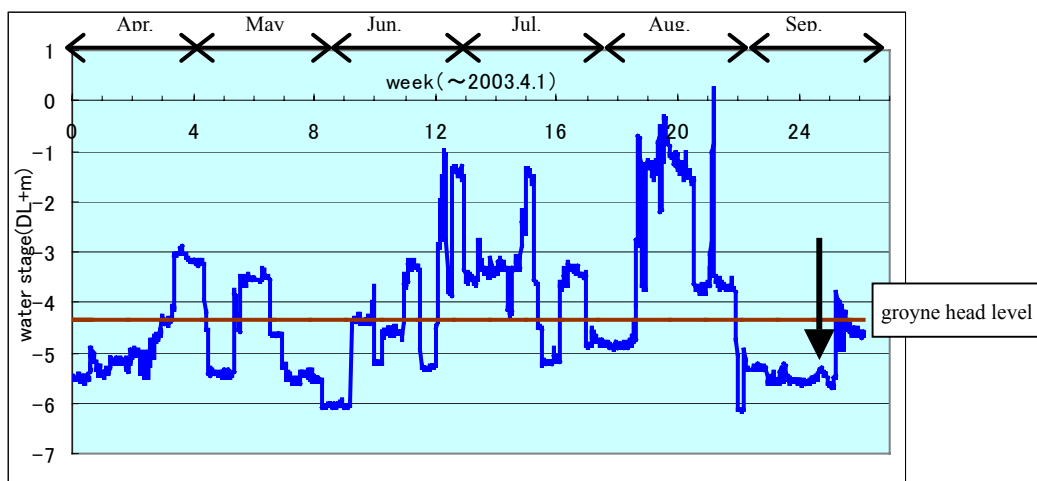


Fig. 10 Water stage data at Mukaijima from April to September, 2003

布となっているが、流下するにつれて左岸側が減速するとともに右岸側がやや加速され、一様な速度分布に近づいている様子がわかる。この速度分布を積分することで河道内流量を算定した。その結果、流量は $15 \sim 16 \text{ m}^3/\text{s}$ 程度と見積もられた。この時の水管理公団の水位計記録による流量換算値は $16 \sim 19 \text{ m}^3/\text{s}$ 程度と見積もられており、まずまずの精度となった。若干の差は積分時の境界条件の取扱に起因しているものと思われる。

3.2 宇治川における観測

宇治川における観測区間は、本研究所宇治川オープンラボラトリー南側に接する、淀川河口から 42.8km 付近の延長約 200m に渡る直線部である。この区間には約 60m の低水路幅に対して長さ 10m の石積水制が右岸側にのみ 40m の間隔で 4 基設置されており、平常時においても水制周辺部に特有の複雑な流況を呈している。観測区間の概要を Fig. 9 および Photo 1 に示す。著者らはこの区間においてこれまでも LSPIV 法による表面流況の観測を行ってきた (Muto et al., 2002 ; 藤田・武藤ら, 2003)。ここでは、それらの従来の観測結果と

の比較検討も行う。

観測は 2003 年 9 月 18 日に行った。Fig. 10 は観測区間の上流約 2km に位置する向島における 2003 年 4 月から 9 月にかけての水位の観測記録である。図中に直線で示すように、向島での水位が -4.36m を超えると上記の水制は水没（越流状態）する。2003 年は前線や台風等の影響により例年になく宇治川の流量の多い日が続き、4 月から 9 月のうち 90 日余りの期間にわたって越流状態となった。観測は越流状態が終結し、非越流状態となってある程度落ち着いてから行った。河床形状の計測結果を Fig. 11 に示す。

本区間における観測も、レスティ川におけるものと同様、ある程度の広がりをもった空間を考えることとした。本区間の場合、水制群の存在が流れに与える影響が主たる興味の対象であることから、4 基の水制群を含む流下方向に約 180m、横断方向に低水路幅である約 60m の領域を計測対象とした。主流域においては、操船すなわち ADCP の航跡を縦断方向に定め、操船経路を往路（流下時）と復路（遡上時）とで 5m 以内の間隔で小刻みに変えながら全領域をカバーするまで

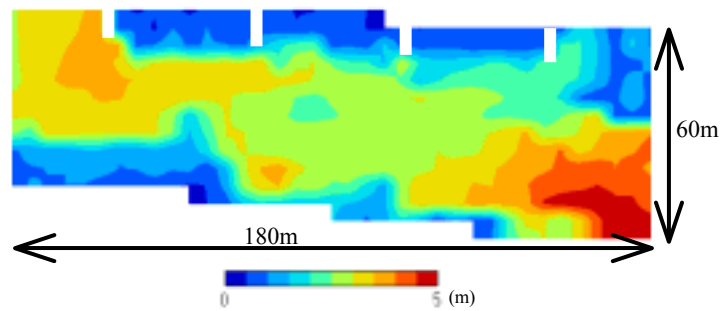


Fig. 11 Measured riverbed configuration

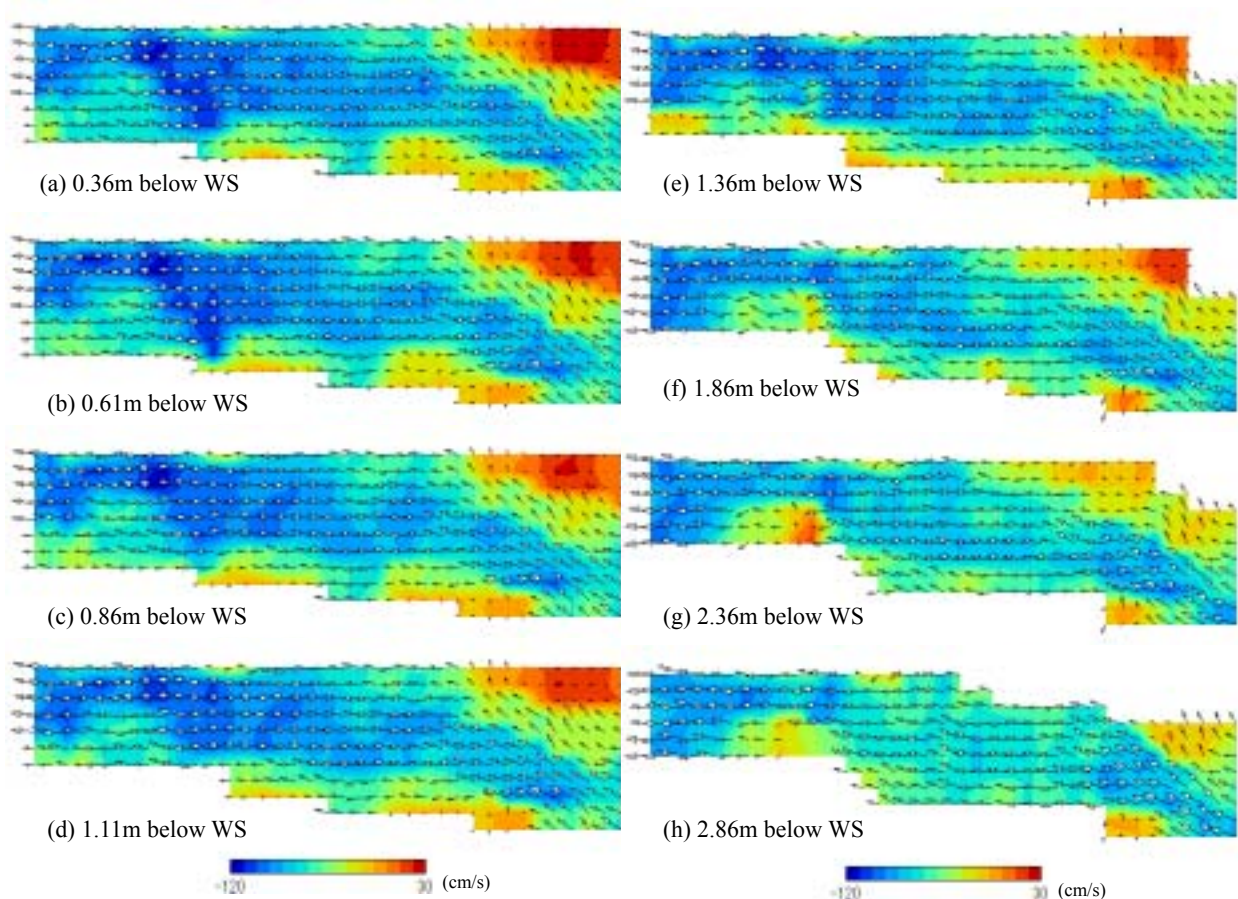


Fig. 12 Plan velocity distributions in several inner layers

往復することとした。水制域においては、往路と復路の間隔を 2m 以内とすることを目標とした。このような観測を、主流域・各水制域について数度行い、得られたデータを積算後、空間内挿補完することで以下の速度分布を得ている。なお、以上の過程から明らかに、1つの領域を対象とした複数のデータ間には観測時刻に差が生じることとなるが、この間の向島観測所における水位にはほとんど変化がなかったことが確認されている。

Fig. 12 は主流域の内部各層における速度分布の計測結果である。Fig. 7 と同様、図中上が北であり、この区間において宇治川はほぼ西流している。各図の上端が

水制の先端にほぼ一致する。図のコンターは、東流を西、西流を負として示しているが、主流速の絶対値は水面付近で 1.2m/s 程度、水面下 2.81m で 0.7m/s 程度であることがわかる。主流の流向は、中央やや左岸よりこの区間に入り、水路中央部を流下した後、やや右岸よりから流出していく様子が各層共通に見て取れる。これは、観測区間の上流右岸側に位置する砂州のため、主流はその砂州を迂回する形で左岸側から右湾曲しながらこの区間に入ることによる (Fig. 9 参照)。さらに、観測区間直上流に位置する巨大橋脚の影響も見逃せない。この砂州と巨大橋脚はほぼ一体となって流れを阻害しており、観測区間上流部右岸側に見られる逆流域

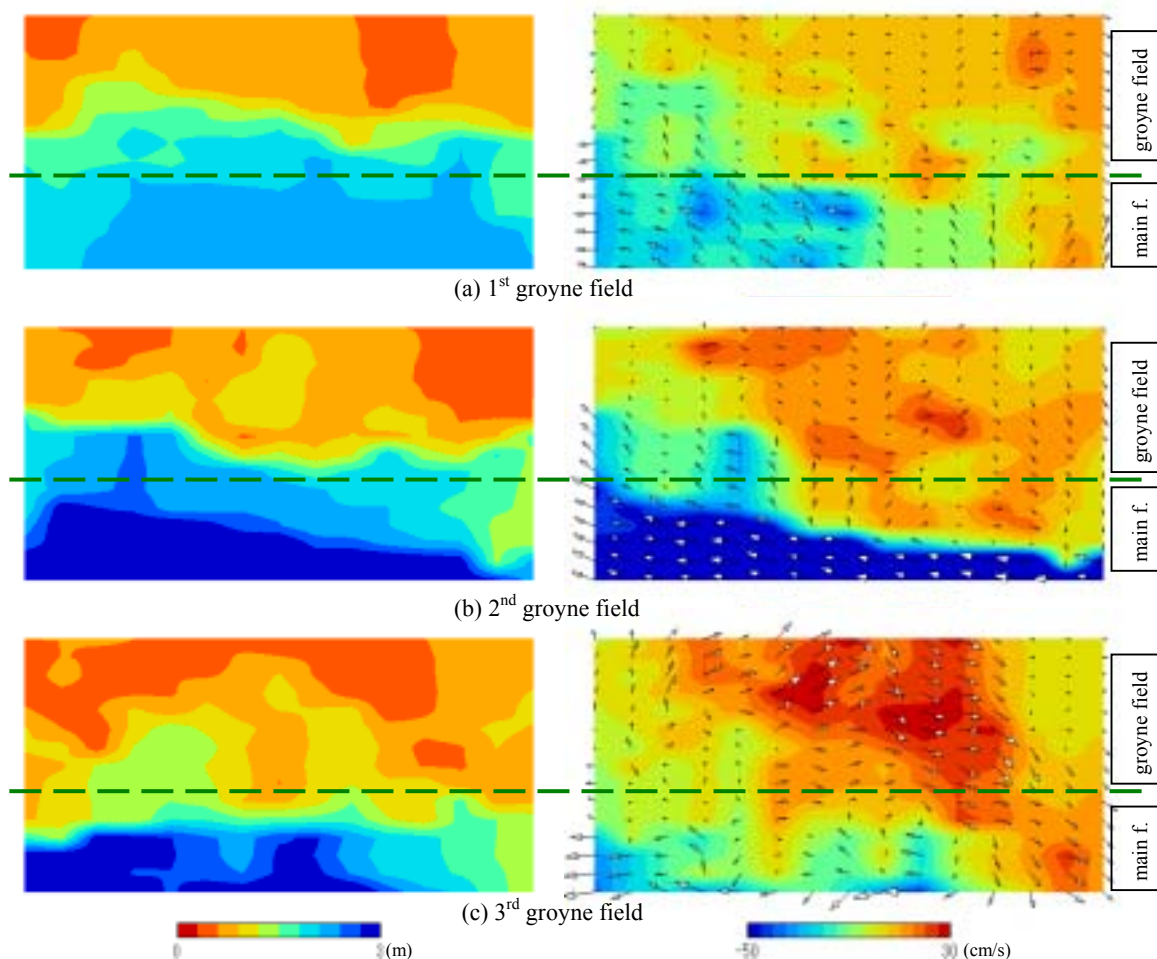


Fig. 13 Bed configurations (left) and velocity distributions at 0.36m below the water surface (right) in groyne fields

はその影響を顕著に表している。図中○で囲んだ水面下 1.81m 以下に見られる逆流域は、河床形状 (Fig. 11) の同様の場所に見られる局所的なマウンドの影響と考えられる。このマウンドによる流れの攪乱は、水面下 1.11m より上の層ではやや下流側に、その面積を広げてその影響を見ることができる。以上のことから、A D C P が砂州やマウンドなどの局所的な地形変化やそれに伴う流れ場の攪乱をかなり正確に捉えていることが伺われる。

Fig. 13 は各水制域の河床形状と水面下 0.36m の速度分布を示したものである。水制域の水深は、いずれの水制についても約 1m であるが、主流部との関係においてそれぞれの水制域で異なった特徴が見られる。第 1 水制域は Fig. 12 に示した主流の逆流域に面し、自身もほぼ全域が逆流していることに加えて、速度の絶対値は 10cm/s 内外とかなり小さい。これらの水制群が設置されてから既に 4 年が経過しているが、第 1 水制域におけるこのような流況のため 3 つの中で最も堆積が進み、河床形状に見られるように水制域前面の主流部においても水深 2m 以下と最も浅い水域となっている。第 2 水制域は主流の逆流域がほぼ解消された部分に位

置する。そこは Fig. 12 において主流が左岸寄りから水路中央部へと位置を変える部分と一致し、同時に主流が主流部・水制域の境界付近まで領域を拡大している。このため、主流の一部である西流速 50cm/s 以上の流れが境界部近傍まで接近し、東流が卓越する水制域への横断方向の速度の変化が境界部付近において顕著である。河床形状はこのような速度分布を反映して、速度勾配の大きい境界部付近で水深 1m 程度から 3m 近くへと急激に深くなっている。第 3 水制域は主流との位置関係においては第 2 水制域とほぼ同様であるが、主流・水制域間に形成される大きな速度勾配が、境界部よりやや主流側へ偏った位置に形成されているようである。この結果、ここに示した速度分布にはいわゆる主流の存在は明確ではなく、河床形状もそのような流況を反映して、水深 3m 近くまで深くなる位置が第 2 水制域に比して境界部よりやや主流部寄りの位置となっている。一方速度分布では、水制域内の東流速が 30cm/s 以上と大きく、水制域に形成される循環流の逆流部分の存在が 3 つの水制域の中で最も明白に認められる。

これまでの表面流況の観測結果 (Muto et al., 2002 ;

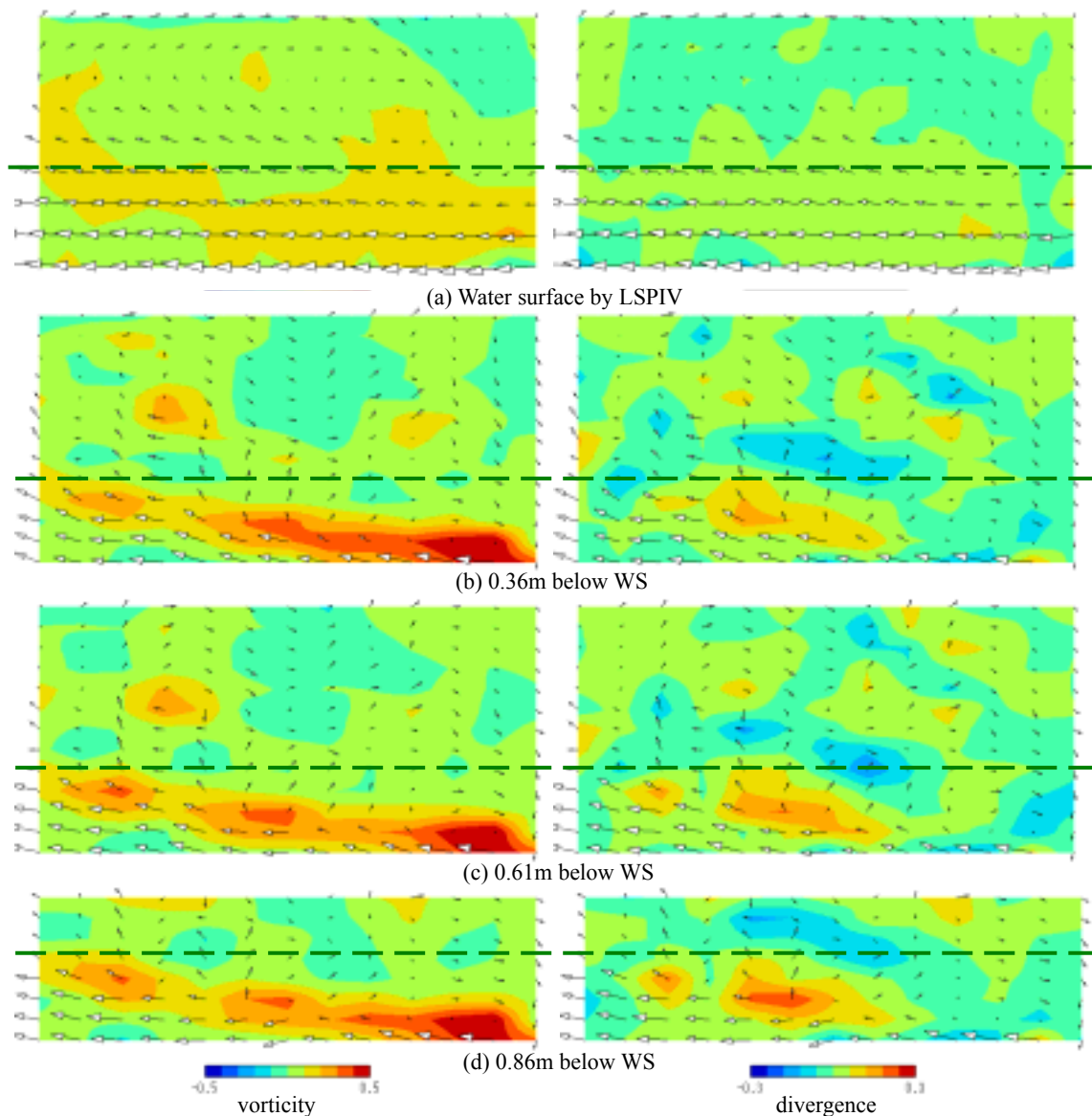


Fig. 14 Velocity distributions and vorticity in groyne fields

藤田・武藤ら，2003）と今回の観測結果との比較を第2水制域について行ったものが Fig. 14 および 15 である。これらの図では，表面と内部3層における速度分布をベクトルで表すとともに，速度分布から計算される渦度の分布を Fig. 14 に，発散の分布を Fig. 15 にそれぞれコンターで重ねて示している。Fig. 14 より，渦度が正である部分はほぼ同様の広がりを持つとともに，その極大値（ここでは時計回りを正としている）が水制域・主流部境界の上流側主流部寄りに位置することで各層一致しているが，その値は表面より内部各層の方が大きい。一方，水制域内の渦度はほぼ正の値を取るが絶対値はあまり大きくなく，明確な特徴が読み取れないが，内部の各層には表面とほぼ同様に1つの大きな時計回りの循環流が形成されている様子が流速ベ

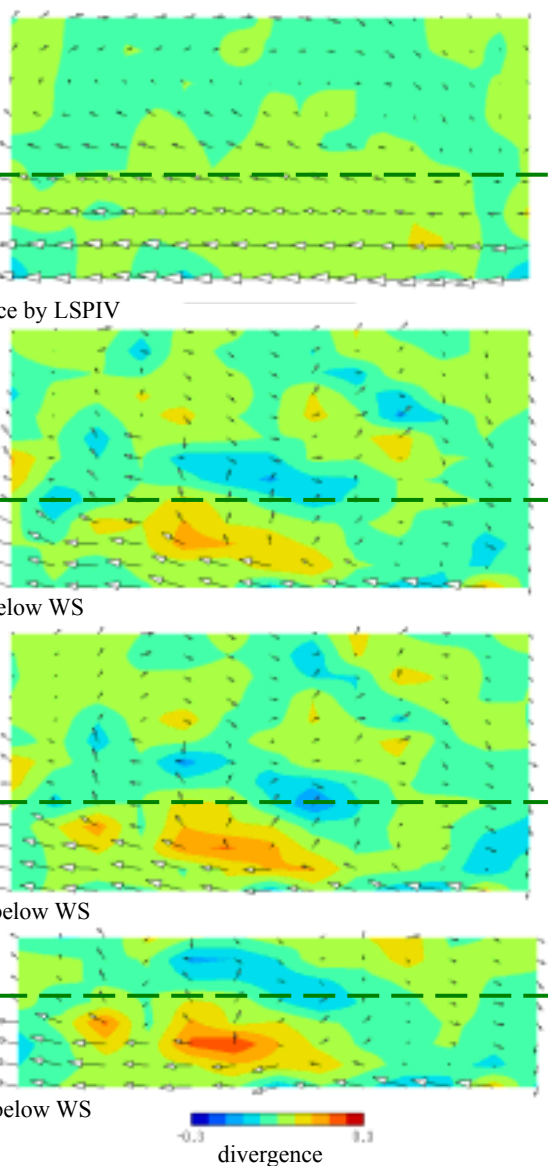


Fig. 15 Velocity distributions and divergence in groyne fields

クトルより読み取れる。Fig. 15 からは，内部各層には境界の下流側主流部寄りの位置にやや大きな正の発散が見て取れるが，表面においてはこれは明確ではない。水面から深くなるほどこの箇所の発散値が大きくなることと，周辺の数値ベクトルの大きさを勘案すると，鉛直（河床）方向への速度の減衰が主流部に比して水制域で顕著であるといえる。これは，Fig. 13 に示した河床形状，すなわちこの付近で主流部へ向けて急激に深くなることにも関係するものと思われる。

4. おわりに

ブロードバンド ADCP（R&D社製ワークホース1200 センチネル）を用いて河川流の観測を行った。そ

の結果、平均速度分布やそれに基づく河道内流量の計算、水制域内の大規模渦の位置や大きさの特定、河床の変化に伴う流れの攪乱の描出などに関してはほぼ満足のいく結果が得られた。しかしながら、水深規模の渦構造や構造物周辺の局所流特性など、より空間・時間スケールの小さな問題を対象とすることを考えた場合、舷側固定・航行型という計測方法も含めて、検討の余地があるものとする。今後、観測結果の蓄積・新たな観測地点の設定・計測手法の試行等を繰り返すことでデータの信頼性を向上させるとともに、これまでその重要性は指摘されつつも取組が困難であった実河川の流れの挙動とそれに伴う土砂動態の解明に幾ばくかの貢献ができればと考えている。

謝 辞

本報告の観測で使用したADCPは、CREST(代表：宝 馨教授)の研究経費により購入されたものである。インドネシア国レスティ川における観測はCRESTによる支援を受けるとともに、中川 一教授、里深好文助教授(農学研究科)、大石 哲助教授(山梨大学工学部)、佐山敬洋君(工学研究科博士課程学生)およびインドネシア国水管理公団(JASA TIRTA I)の協力を得た。宇治川における観測では土木学会関西支

部共同研究(代表：出口一郎大阪大学工学研究科教授)による支援を受けるとともに、綾 史郎教授(大阪工業大学工学部・防災研究所非常勤講師)、藤田一郎教授(神戸大学工学研究科)、高野保英助手(近畿大学理工学部)、北村耕一君、八木博嗣君(ともに工学研究科修士課程学生)および国土交通省淀川河川事務所の協力を得た。ここに記し、深甚なる謝意を表す。

参考文献

- 金子 新・伊藤集通(1994): ADCPの普及と海洋学の発展, 海の研究, Vol.3, pp.359-372.
- 藤田一郎・武藤裕則・嶋津良郎・椿 涼太・綾 史郎(2003): LSPIV法による水制周辺部の平水時および洪水時流れに関する検討, 水工学論文集, 第47巻, pp.943-948.
- 柳 哲雄(2002): 海洋観測入門, 第10章 ADCP, 恒星社厚生閣, pp.73-84.
- Muto, Y., Baba, Y. and Aya, S. (2002): Velocity Measurements in Open Channel Flow with Rectangular Embayments Formed by Spur Dykes, Annuals of Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ. (京都大学防災研究所年報), No.45B, pp.449-457.

River Flow Measurements by Means of a Broadband ADCP

MUTO Yasunori

Synopsis

A broadband Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) was applied to river flow measurements where the water depth is less than 10m. The ADCP was mounted on one side of the boat, and the boat was running across the river several times until covering the whole tested area. Two sites were selected for the measurements, one is the Lesti River in Indonesia, and the other the Uji River in Japan. The latter test section has 4 groynes, and the author have ever tried surface velocity measurements in the past. The results show acceptable values for the mean flow structure, with good correlation with that on the water surface.

Keywords: ADCP, river flow, velocity measurements, riverbed measurements, 3-dimentional structure