

画像計測による開水路直角合流部の表面流況解析
Analysis of Surface-flow Patterns at a Right-Angled Open-Channel Confluence
by an Image Processing Technique

岐阜大学工業短期大学部 藤 田 一 郎 Ichiro FUJITA
岐阜大学工学部 河 村 三 郎 Saburo KOMURA
岐阜大学工学部 和 田 賢 Ken WADA

Two-dimensional water-surface flow structure at a right-angled open-channel confluence is investigated by applying an image processing technique. In this study, the correlation method is used to obtain instantaneous velocity distributions. From the successive two-dimensional velocity distributions, unsteady features of a separation bubble at the confluence for different discharge ratios and the Reynolds numbers are investigated. The result shows that the separation bubble is distorted into two or three groups of vortices at low frequency and a distorted vortex-group moves downstream at a speed of about half of the main-stream velocity. Turbulent characteristics obtained by the correlation method agree well with the results by point measurements near the water-surface.

Keywords: confluence, image processing, separation bubble, flow visualization

1. まえがき

開水路合流部では、合流点で剥離した流れが本流側壁に再付着して再循環領域（剥離泡）が形成される。再循環領域は非定常な伸張・収縮を繰り返しており、合流後の拡散現象等に重要な影響を及ぼしていると考えられるが¹⁾、この領域の時間変動特性あるいは剥離渦の運動に関する十分な検討は行われていない。再循環領域の挙動は空間的なものであり、点計測による解析ではこのような二次元的な時間変動特性の把握は困難である。そこで本研究では、近年著しく発達してきた画像計測手法の一つである相関法を合流部表面流況に対して適用し、剥離渦を含む二次元的な大規模渦運動の非定常特性について検討を行った。

2. 実験装置および画像処理装置

実験には本流水路（長さ10m、幅0.3m）と支流水路（長さ2.5m、幅0.2m）を直角に合流させた循環式の合流水路を用いた。実験条件は流量比 $Q_r (= \text{支流流量} Q_2 / \text{全流量} Q_3)$ とレイノルズ数 $Re (= U_3 H_3 / \nu)$ の影響を調べるために表-1のように設定した。ここに、 U_3 :合流後断面の断面平均流速、 H_3 :合流後断面の平均水深。水路幅・水深比は一定($B_3/H_3=6.0$)とした。表面流況は、平均粒径が1mm程度のおがくずをトレーサとして、可視化し、水路上方に設置したCCDカメラを通して合流部の流況をVTRに記録した。用いたCCDカメラには1/1000秒のシャッター機能があり、瞬間的なトレーサの分布状況を静止画像的に記録できる。ビデオ画像には1/100秒読みのタイムカウンタ（朋栄製VTG-33）により画像時刻も記録した。

画像計測システムの概要を図-1に示す。画像計測にはパソコン用の画像処理装置（三谷商事製IPM/PC-256:8ビット, 256x256画素, 4画面）を用いた。得られた濃淡画像データはミニコンピュータ（三菱製MX3000）に転送し、相関法の計算および結果の出力を行った。本研究では150組(300枚)～

表-1 実験条件

RUN	Q_3 (l/s)	Q_r	H_3 (cm)	U_3 (cm/s)	Fr_3	Re_3	Δt (sec)	Δt_s (sec)
B1	2.5	0.2	5.0	16.67	0.238	8300	0.0667	0.133
B2	2.5	0.4	5.0	16.67	0.238	8300	0.0667	0.133
B3	2.5	0.6	5.0	16.67	0.238	8300	0.0667	0.133
A2	5.0	0.4	5.0	33.33	0.476	16700	0.0333	0.133
C2	1.2	0.4	5.0	8.00	0.114	4000	0.1333	0.267

250組(500枚)の画像データ进行处理している。一組の画像の時間間隔 Δt と流速データのサンプリング間隔 Δt_s も表-1に示している。 Δt は画像上のトレーサ粒子の最大移動画素が5~6程度になるように決めた。

3. 相関法

3.1 相関法の概要²⁾⁻⁵⁾

相関法は、微小時間 Δt だけずれた二枚の画像を用いて画像上の流速ベクトルを算出する画像計測法の一つである。相関法の概念図を図-2に示す。相関法では、まず初期画像上で流速ベクトルの始点Pとなる画素を中心として $M \times N$ 画素の微小な領域(ここでは参照フレームと呼ぶ)をとる。次に第二画像の探索領域内で参照フレームの位置を $Q_1, Q_2, Q_3, \dots$ と変化させ、初期画像の参照フレームとの間で相互相関係数 R_{ab} を計算する。相互相関係数は、各参照フレームの濃淡分布をそれぞれ a_{ij}, b_{ij} ($i=1 \sim M, j=1 \sim N$) とすると次式で定義される。

$$R_{ab} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \{(a_{ij} - \bar{a}_{ij})(b_{ij} - \bar{b}_{ij})\}}{\{ \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (a_{ij} - \bar{a}_{ij})^2 \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (b_{ij} - \bar{b}_{ij})^2 \}^{1/2}} \quad \dots (1)$$

R_{ab} が最大となる参照フレームの位置(例えば点 Q_1)は、点P付近のトレーサの分布パターンが平均的に移動した位置を示しており、その移動距離と Δt より流速ベクトルを求めることができる。このように相関法ではトレーサ粒子群を面的に追跡するために、空間的な分解能はトレーサ粒子をひとつひとつ追跡する場合よりは低下するが、トレーサ粒子同士の接触・非接触の状況とは全く無関係に流速ベクトルを得ることができる。

3.2 参照フレームサイズの決定方法

参照フレームが大きすぎると空間的分解能の低下、小さすぎると異常ベクトル(過誤ベクトル)の増大をまねくが、本研究では参照フレーム内のラベル個数に注目して最適サイズの決定を行った。参照フレーム内のラベル個数は二値化する「しきい値」によって図-3のように変化し、各サイズの参照フレームに対してラベル個数の最大値 L_{max} が存在する。図-3は一樣流にトレーサを粗あるいは密に分布した画像に $M \times N$ 画素の参照フレームを適用して得ているが、 M の値が小さくなると異常ベクトルが増大する。その発生率 Er と L_{max} の関係は図-4のようであり、 L_{max} が10程度となるように M の値を決定すれば、異常ベクトルの発生率を2%程度以下にできることがわかる。本研究ではこの指針を合流部の画像に適用し、 $M=11$ として計算を行った。探索領域の大きさは流下・横断方

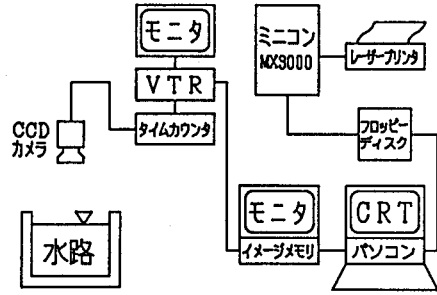


図-1 画像計測システム

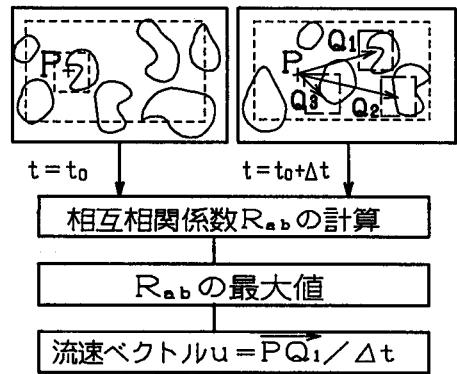


図-2 相関法の概念図

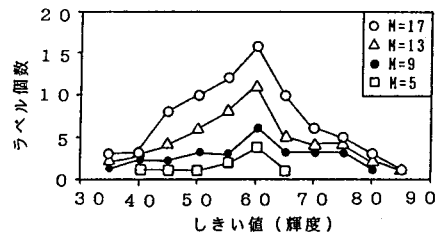


図-3 しきい値による参照フレーム内のラベル個数の変化

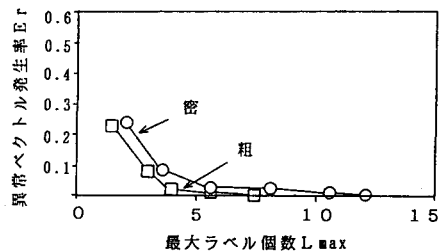


図-4 L_{max} と Er の関係

向の最大・最小流速から決定した。探查領域内の相互相関係数の分布例を一樣流領域と渦領域について示したのが図-5である。渦領域では流れの回転やひずみ加わるため、一樣流と比べると相関値が若干低くなっているが、ピークは明確であり、相関法によって良好に流速ベクトルが得られることがわかる。画像計測に用いた画像の例を図-6に示す。これらの画像では雑音などを除去するために原画像から背景画像を差し引いている。

なお、参照フレームには画素単位の移動ではなく、画素中心間の濃淡を二次元的に内挿した微小な移動を与え精度の向上を図った。また、以上の点を考慮しても異常ベクトルが計算された場合には、そのベクトルを周囲の値から内挿したベクトルと置換した。

4. 結果ならびに考察

4. 1 合流部剥離泡の時間変動

相関法によって得られた瞬間的な流速ベクトル、渦度分布、流線および等流速分布の例を図-7に示す。流速ベクトルと流線より支流の流れが合流点で剥離してせん断層が形成され、その一部が側壁に再付着して剥離泡が

$\therefore U/U_{\infty} = 1.0$

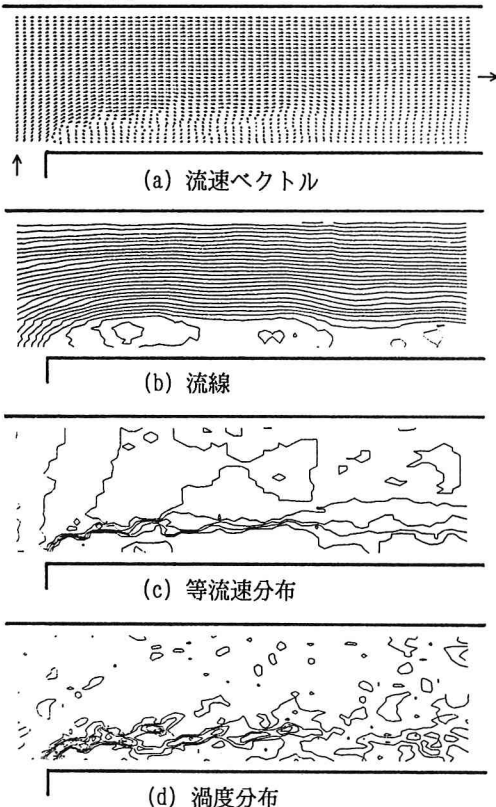
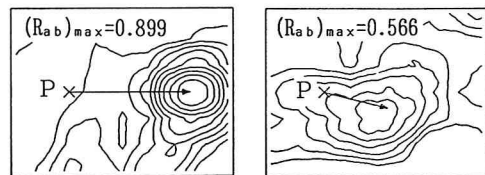


図-7 瞬間的な流れ場の特性(RUN B2)



(a) 一樣流

(b) 渦領域

図-5 探查領域内のRab分布

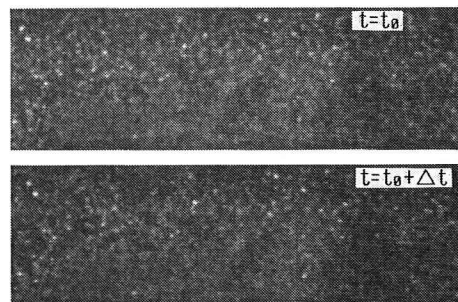


図-6 対象画像(RUN B2, $\Delta t = 1/15 \text{ sec}$)

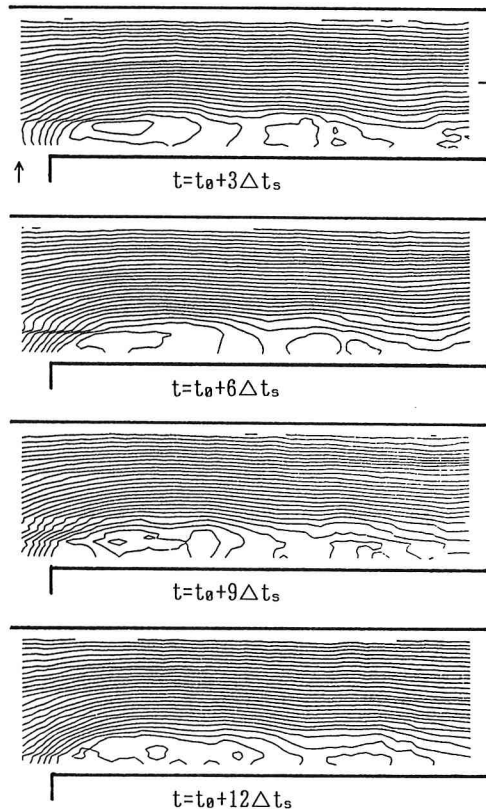


図-8 流線の時間変動(RUN B2)

生じている様子がわかる。剥離泡内部にはいくつかの大規模な渦構造が存在しており、それがせん断層の揺動に影響を与えていると考えられる。等流速分布図には、剥離せん断層が剥離泡内の渦構造の影響で部分的に狭くなるものの、流下につれて幅方向に拡散していることが示されている。渦度分布は剥離直後では非常に大きな値を示しているが、下流側では剥離せん断層に沿って減衰していることがわかる。

図-7を初期状態とする流線パターンの時間変化を図-8に示す。剥離泡は最初の画像では一つにまとまっているが、時間経過につれて下流側の渦塊が分離して流下し、剥離泡が二つに分裂しつつある様子が得られている。このような剥離泡の分裂あるいは発達の特徴について次に検討する。

4. 2 再付着点の時間変動

剥離泡側の側壁に沿う流向の時間変化を図-9に示す。 x は剥離点から下流に取った座標である。メッシュの入った領域が順流、入らない領域が逆流の状態を示している。順流と逆流の境界が再付着点にほぼ対応

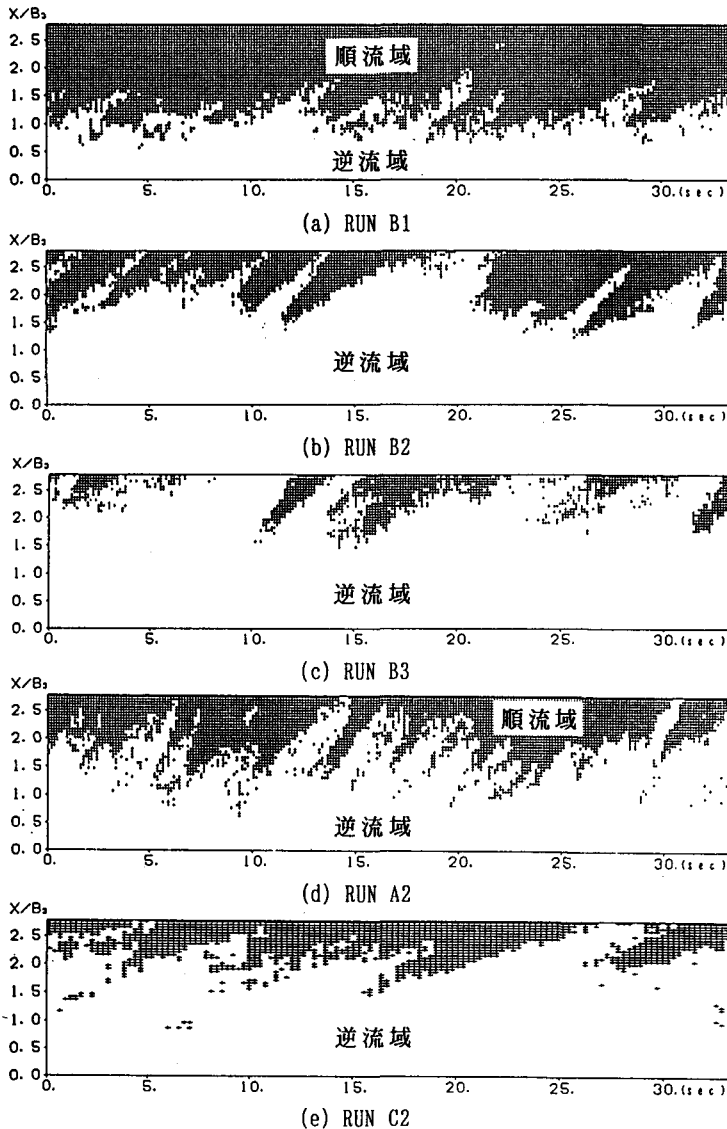


図-9 再付着点変動

すると考えられるが、どのケースにおいても発達してきた逆流域がいくつかの再付着点によって複数の領域に分断されている。分断された下流側の部分は時間とともに流下し消失する。そして上流側の逆流域は再び発達し、同様の分裂・発達を繰り返している。逆流領域が下流に細長く伸びている部分の傾きは分裂した渦塊の移動速度を表わしているが、その値はレイノルズ数あるいは流量比によらず、剥離泡外部の一樣流速の1/2程度であることがわかる。分裂・発達の周波数は大規模な変動と小規模な変動が不規則に混在しているため明確ではないが、レイノルズ数の増大に伴う周波数の増加傾向は認められる。また、瞬間的な再付着点距離は平均値を中心に±50パーセント程度変化しており、剥離泡が大規模な変動を繰り返していることがわかる。図-9から読み取った再付着点距離 L の平均値とレイノルズ数 Re_s および流量比 Qr の関係を図-10に示す。 L は Qr に伴って増大し、また、 Re_s の増大に伴って若干減少していることがわかる。

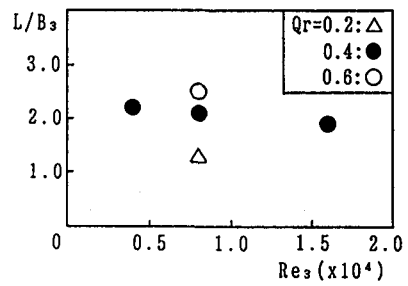


図-10 L/B_s vs. Re_s

4.3 剥離泡幅の時間変動
剥離泡幅の変動特性を明らかにするために、剥離泡の幅が最大となる断面の流速分布形から剥離せん断層の中央および逆流域に対応する点を求め、その時間変動を調べた。せん断層中央は剥離泡外部

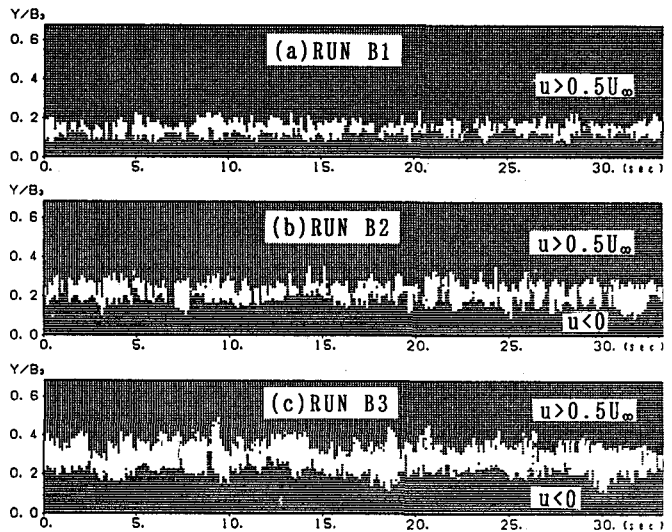


図-11 剥離泡幅の時間変動

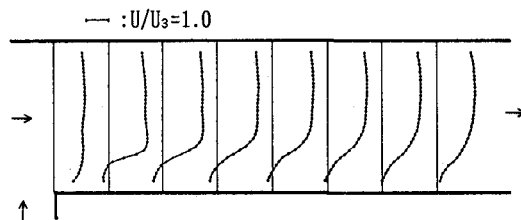


図-12 平均流速分布 (相関法, RUN B2)

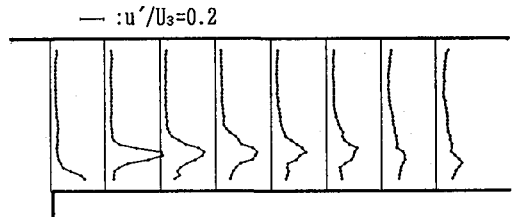


図-14 乱れ強度分布 (相関法, RUN B2)

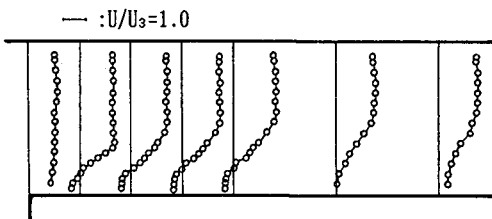


図-13 平均流速分布 (点計測, RUN B2, $z/H_3=0.9$)

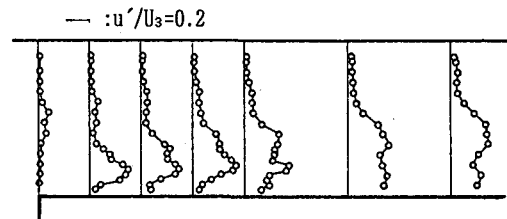


図-15 乱れ強度分布 (点計測, RUN B2, $z/H_3=0.9$)

における平均的な一様流速を U_0 としたとき、 $U=0.5U_0$ となる点、逆流域は $U=0$ となる点で表わした。図-11には $U>0.5U_0$ の領域を(+), $U<0$ の領域を(-)のメッシュで表わしている。これより剥離泡幅は再付着点の変動と比べて高周波の変動特性を有していることがわかる。その変動幅は流量比に伴って増大しており、剥離せん断層が激しく揺動していることを示している。また、二つのメッシュに挟まれた領域はせん断層幅を表わす尺度と考えられるが、その幅がほとんど0となり流速勾配が非常に大きくなるくびれの部分が、ある程度周期的に生じていることがわかる。この周期は、間欠的に剥離せん断層が巻き上がり渦が放出される周期に対応していると考えられる。その発生周波数は流量比の増大とともに減少している。

4.4 平均流特性

20秒間の流速ベクトルから求めた流下方向の平均流速分布を図-12に示す。比較のために正逆プロベラ流速計によって得られた水面近傍の流速分布を図-13に示す。参照フレームのサイズが有限であるために側壁のごく近傍のデータは得られていないが、逆流域やせん断層における分布形状を含めて両者の一致は良好であり、相関法によって定量的な平均流計測が可能であることが検証できた。

4.5 乱流特性

同様に、相関法により得られた流下方向の乱れ強度分布を図-14, プロベラ流速計による水面近傍における測定結果を図-15に示す。平均流速に比べるとデータのばらつきは大きいですが、せん断層に沿う乱れ強度の増大は良好に得られている。ただし、せん断層幅が参照フレームサイズに比べて小さい剥離直後の部分においてはピークの位置に若干のずれが生じている。これはトレーサ粒子群のせん断層における歪みに参照フレームが十分に追従できないためであり、この領域では相関値も低くなっている。図-16では剥離泡が発達した断面($x/B_0=0.667$)におけるレイノルズ応力の分布を、ホットフィルム流速計による水面近傍の結果と比較している。この断面における結果は良好であり、乱流二次統計量の計測手法としての相関法の可能性を示唆しているが、本装置では参照フレームの空間的分解能を十分に高めることができなかったため、空間的なレイノルズ応力の分布を示すことはできなかった。

5. あとがき

本研究で得られた結論をまとめると次のようである。

- (1)最大ラベル個数によって参照フレームサイズを決定する指針を示した。
- (2)相関法が乱流計測手法として使用できることを明らかにした。
- (3)合流部剥離泡の時空間変動特性を明らかにした。

参考文献

- (1)藤田・河村:離散渦法による合流部流れの解析, 土木学会論文集, No.411/II-12, pp.52-61, 1989.
- (2)寛:トレーサ画像の相関処理による流速計測, 流れの可視化, Vol.3, No.10, pp.189-192, 1983.
- (3)木村・高森・井上:相関を利用した流れの画像計測-非定常流れへの適用-, 流れの可視化, Vol.6, No.22, pp.105-108, 1986.
- (4)藤田・河村・旧井:画像処理による開水路合流部の流れの解析, 流れの可視化, Vol.8, No.30, pp.263-266, 1988.
- (5) Fujita, I. and Komura, S.: Visualization of the flow at a confluence, Proc. 3rd International Symposium on Refined Flow Modelling and Turbulence Measurements, pp.611-618, 1988.

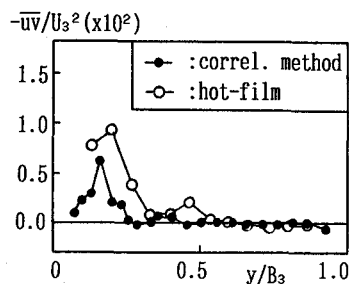


図-16 レイノルズ応力分布(RUN B1, $x/B_0=0.67$)