



## 資料

### 高層建物周辺の流れ場の乱流計測

#### Turbulent measurements of the flow field around a high-rise building

孟 岩\*<sup>1</sup> 日比一喜\*<sup>2</sup>

Yan MENG Kazuki HIBI

#### 1. はじめに

近年流体解析技術の進歩とコンピュータの性能の向上により、市街地の風環境や市街域での大気拡散を流体解析ソフトにより評価することが可能になってきた<sup>例</sup>例えば、<sup>1)~3)</sup>。しかしながら、これらの解析結果はどの程度の精度で建物周りの複雑乱流場を予測しているかについて論じた例<sup>4)~6)</sup>が少ない。一般に風洞実験により風環境を評価する場合、実験の簡便さから平均風速に関してはサーミスタ風速計あるいはI型熱線風速計を用いることが多い。これらの風速計は逆流を感知できないため、実際より平均速度を大きく、変動速度を小さく評価する。現在、逆流を含む複雑乱流場を計測できる風速計としては、レーザ流速計の他、Pulsed-wire<sup>7)</sup>、Shielded Parallel-array<sup>8)</sup>、Tandem<sup>9)</sup>、Split-fiber<sup>10)</sup>、Triple-split fiber<sup>11)</sup>等のプローブを用いた熱線風速計が挙げられる。またこれらの風速計を用いてモデル建物周辺の流れ場を定量的に測定した例も幾つか報告されている<sup>9), 12)~17)</sup>。しかし、建物周りの複雑乱流場の予測精度を定量的に評価するためには3方向の速度成分の平均値とその標準偏差が必要の上、数値解析の流入条件としての風洞気流に関する測定結果も必要となる。現時点ではこれらの条件を満たしているデータベースはまだ少ない。

そこで、本研究では、逆流を検出できるスプリットファイバースプロブを用い、自然風を模擬した乱流境界層に置かれた2:1:1(高さ:幅:奥行き)の直方体モデ

ル建物周りの各速度成分の平均値及びその標準偏差を測定し、数値解析コードの検証データを提供する。

#### 2. 実験概要

##### 2.1 風洞と模型

実験は清水建設(株)技術研究所の小型回流式風洞を用いた。風洞の測定部の長さは7m、測定断面の高さと幅はそれぞれ0.9mと1.1mである。風洞気流の乱れの強さは約0.5%である。モデル建物は高さ160mm、幅と奥行き80mmの亚克力製直方体(実スケールで高さ80mの高層建物に相当)であり、測定部入り口より風下方向4.6mの所に設置した。風洞風速は6.75m/sに設定した。建物の見付け幅 $b$ と軒高風速 $U_{Oh}$ により求められたレイノルズ数 $(U_{Oh} b/\nu)$ は約 $2.4 \times 10^4$ である。実験風向は最も代表性のある0度を選んだ。Fig. 1には本研究に用いた座標系と記号の定義を示す。 $x, y, z$ 軸をそれぞれ流れ方向、流れ直角方向、鉛直方向にとり、 $x, y, z$ 方向の速度成分はそれぞれ $u, v, w$ とする。

##### 2.2 測定方法

建物モデルが設置されていない時の風洞気流はX型熱線プローブにより測定し、建物周りの流れ場の計測はスプリットファイバースプロブを用いた。流れ方向の速度成分は直線型のプローブ(DANTEC, 55R55)により、流れに直角となる速度成分は90度型のプローブ(DANTEC, 55R57)により測定した<sup>10)</sup>。Split-fiber

\*1 清水建設(株)技術研究所 研究員 工博  
Institute of Technology SHIMIZU CORPORATION Researcher DR. ENG

\*2 清水建設(株)技術研究所 首席研究員 工博  
Institute of Technology SHIMIZU CORPORATION Chief Researcher DR. ENG  
(原稿受理:平成10年1月20日)

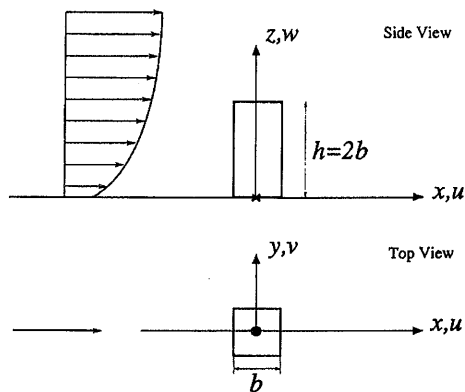


Fig. 1 座標系と符号  
(Coordinate system and notations)

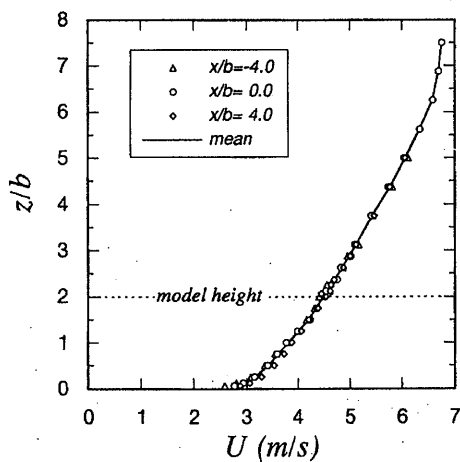


Fig. 2 接近流の平均速度の鉛直分布  
(Mean velocity profiles of the incident flow)

プローブの較正方法は佐々木, 木谷<sup>18)</sup>及びBoerner & Leutheusser<sup>19)</sup>により提案され, 著者ら<sup>20)</sup>により改良された。本研究では著者らが改良した方法を用いた。具体的な手順については文献20を参照されたい。

本実験では, ローパスフィルタのカットオフ周波数を500Hzに設定し, 風速計からの出力が1msの間隔でA-D変換された。安定した統計量を得るために, 各速度成分の平均値とその標準偏差の平均時間を60秒とした。

### 2.3 風洞気流

本研究では, 都市域における高層建物を対象にしているため, 粗度区分IV<sup>21)</sup>に相当する大気乱流境界層をIrwin<sup>22)</sup>の方法により作成した。用いたスパイヤとフェンスの高さはそれぞれ600mmと100mmである, また, フェンスの下流側に高さ60, 20, 10mmの3種類のラフ

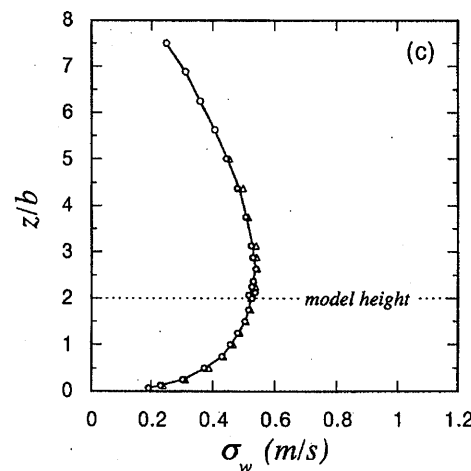
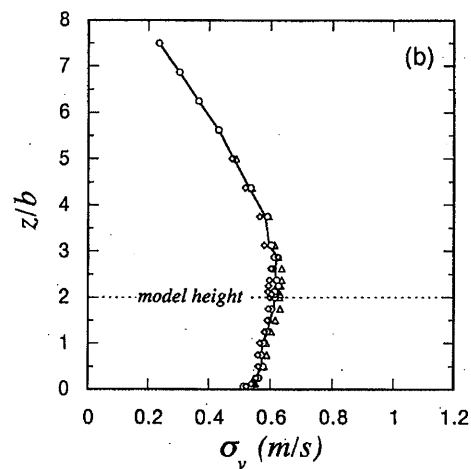
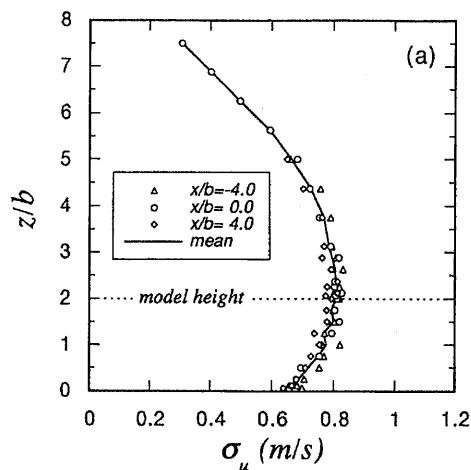


Fig. 3 接近流の変動速度の鉛直分布  
(Turbulent velocity profiles of the incident flow)

ネスを設置し地表面粗度を模擬した。作成した乱流境界層のスケールは実大気の約1/500である。Fig. 2に

Table 1 風洞気流の測定結果の一覧表  
(List of data measured for the incident flow)

z/b	U (m/s)	$\sigma_u$ (m/s)	$\sigma_v$ (m/s)	$\sigma_w$ (m/s)	-uw (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )
0.0625	2.745	0.663	0.518	0.190	0.014
0.1250	2.935	0.669	0.545	0.234	0.021
0.2500	3.175	0.687	0.555	0.306	0.032
0.5000	3.435	0.717	0.572	0.378	0.056
0.7500	3.627	0.749	0.573	0.432	0.079
1.0000	3.824	0.777	0.576	0.460	0.097
1.2500	4.021	0.766	0.591	0.484	0.110
1.5000	4.210	0.799	0.599	0.506	0.124
1.7500	4.362	0.793	0.609	0.519	0.131
2.0000	4.491	0.807	0.614	0.526	0.142
2.0625	4.502	0.798	0.615	0.520	0.133
2.1250	4.586	0.813	0.608	0.533	0.151
2.2500	4.606	0.799	0.617	0.530	0.145
2.3750	4.712	0.808	0.617	0.533	0.144
2.6250	4.854	0.806	0.615	0.542	0.153
2.8750	4.993	0.795	0.620	0.535	0.148
3.1250	5.132	0.784	0.597	0.530	0.148
3.7500	5.449	0.767	0.582	0.509	0.152
4.3750	5.782	0.725	0.530	0.486	0.127
5.0000	6.077	0.663	0.479	0.447	0.106
5.6250	6.338	0.594	0.431	0.407	0.088
6.2500	6.588	0.496	0.366	0.359	0.063
6.8750	6.693	0.402	0.304	0.311	0.046
7.5000	6.751	0.307	0.236	0.249	0.029

は流れ方向の速度成分の平均値の鉛直分布を示す。図中のプロットは  $x/b = -4, 0, 4$  の3つの位置での測定結果を示し、実線はその平均値を表している。平均風速は下流に行くにつれて若干大きくなっており、風洞気流が少し回復していることを伺わせる。Fig. 3 (a) ~ (c) には3つの変動風速の標準偏差の鉛直分布を示す。 $\sigma_u$ ,  $\sigma_v$  に比べ、直角方向の速度成分の標準偏差  $\sigma_w$  はばらつきが小さく、流れ方向の変化も殆ど見られない。風洞気流の測定結果 (3つの測定位置の平均値) は Table 1 に示す。

### 3. 実験結果

建物周辺の流れ場は建物近傍の渦運動の影響を強く受ける。建物近傍の代表的な渦運動は、建物の屋根面と側面に存在する剥離渦、建物後流に存在するアーチ型の渦やカルマン渦及び地面付近に存在する馬蹄形渦等が挙げられる。本実験ではこれらの渦運動の影響を受けている領域でのデータを得るために、 $y/b = 0$  の鉛直断面 (建物の中心断面) 及び建物高さの  $1/16$  ( $z/b = 0.125$ ) と  $10/16$  ( $z/b = 1.25$ ) の水平面において乱流計測を行った。鉛直と水平面における測定点の配置はそれぞれ Fig. 4 と Fig. 5 に示し、また測定結果は Table 2 ~ 4 に示した。

#### 3.1 $y/b = 0$ の断面内における測定結果

Fig. 6 には建物の中心断面 ( $y/b = 0$ ) における平均速度の測定結果を示す。図中の一点鎖線は接近流の値を表す。建物前面では、逆圧力勾配の影響で、流れ方向の平均速度  $U$  は建物高さ以下の領域で大きく減少する。鉛直方向の平均速度  $W$  は建物高さ付近で流れの上昇に伴い増大し、建物高さの  $2/3$  以下のところで負となる。一方、建物屋根面では、流れ方向の平均速度  $U$  が屋根面前縁での流れの剥離の影響を受け、屋根面付近で大きく減少するが、屋根面から離れると逆に増大する。屋根面近傍 (屋根面から5mmを離れた高さ) の測定結果 (Fig. 13) によると、流れ方向の平均速度  $U$  が屋根面前縁から屋根面の中心にかけて負となり、逆流が発生していることが分かる。鉛直方向の平均速度  $W$  も流れの剥離の影響により建物前縁で正となり、建物後縁で負となる。建物の後流域では建物の影響で流れ方向の平均速度  $U$  は建物高さ以下の領域で大幅に減少し、建物の直後では負の値を示す。鉛直方向の平均速度  $W$  は、建物の直後の領域において建物高さ付近から上空にかけて下降流となり、それ以下のところで上昇流となっている。尚、スパン方向の平均速度  $V$  については実験誤差

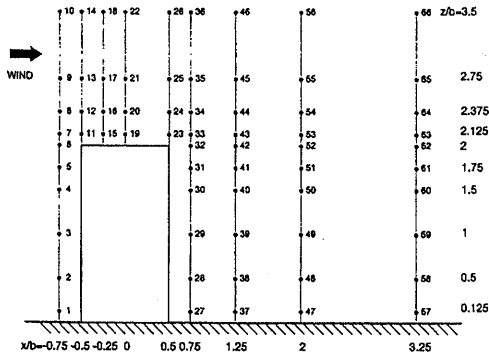


Fig. 4 鉛直断面内の測定点の配置  
(Points of measurement in the vertical plane)

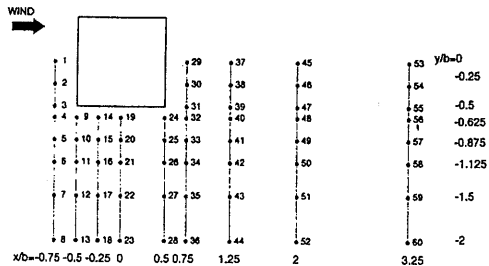


Fig. 5 水平面内の測定点の配置  
(Points of measurement in the horizontal plane)

Table 2  $y/b = 0$  の断面内の測定結果の一覧表  
(List of data measured in the  $y/b = 0$  plane)

番号	U (m/s)	V (m/s)	W (m/s)	$\sigma_u$ (m/s)	$\sigma_v$ (m/s)	$\sigma_w$ (m/s)
1	0.208	-0.088	-0.667	0.878	0.478	0.907
2	1.267	-0.046	-0.621	0.623	0.532	0.582
3	1.409	-0.042	-0.291	0.603	0.579	0.620
4	1.701	0.022	0.328	0.603	0.621	0.569
5	2.067	0.078	0.837	0.604	0.673	0.533
6	3.044	0.081	1.341	0.706	0.664	0.532
7	3.654	0.068	1.312	0.781	0.673	0.522
8	4.539	0.034	0.906	0.843	0.658	0.513
9	4.962	-0.009	0.442	0.849	0.617	0.509
10	5.351	-0.021	0.104	0.809	0.607	0.513
11	4.281	0.113	2.580	0.862	0.704	0.699
12	4.937	0.019	1.091	0.834	0.633	0.554
13	5.138	-0.006	0.418	0.827	0.623	0.522
14	5.402	-0.045	0.012	0.783	0.580	0.525
15	1.681	-0.109	0.271	2.309	0.955	0.814
16	5.568	0.014	0.834	0.897	0.621	0.573
17	5.268	-0.009	0.298	0.813	0.629	0.525
18	5.416	-0.048	-0.015	0.785	0.594	0.527
19	1.250	-0.122	-0.186	1.972	1.087	1.061
20	5.461	-0.024	0.221	1.148	0.693	0.518
21	5.307	-0.011	0.144	0.803	0.633	0.523
22	5.402	-0.041	-0.047	0.771	0.605	0.527
23	2.743	0.007	-0.330	1.689	1.254	0.873
24	4.824	-0.022	-0.411	1.303	0.842	0.588
25	5.212	-0.012	-0.139	0.788	0.855	0.530
26	5.504	-0.039	-0.139	0.789	0.582	0.529
27	-0.641	-0.077	0.318	0.624	0.753	0.409
28	-0.576	-0.094	0.374	0.606	0.776	0.517
29	-0.522	-0.060	0.550	0.582	0.717	0.569
30	-0.345	-0.028	0.629	0.569	0.650	0.560
31	-0.055	-0.006	0.547	0.588	0.620	0.521
32	2.273	0.000	-0.347	1.281	1.027	0.828
33	3.487	0.024	-0.505	1.497	1.168	0.811
34	4.689	-0.007	-0.485	1.249	0.880	0.612
35	5.213	-0.021	-0.260	0.831	0.642	0.533
36	5.463	-0.038	-0.167	0.770	0.585	0.526
37	-0.707	-0.164	0.354	0.811	1.058	0.502
38	-0.739	-0.159	0.350	0.749	0.999	0.762
39	-0.568	-0.127	0.311	0.788	1.006	0.836
40	-0.053	-0.099	0.147	0.834	1.063	0.923
41	0.748	-0.059	-0.232	0.993	1.042	1.030
42	3.018	-0.029	-0.781	1.409	1.031	0.924
43	3.768	0.000	-0.763	1.386	1.013	0.798
44	4.624	-0.009	-0.546	1.115	0.849	0.619
45	5.113	-0.034	-0.290	0.825	0.653	0.539
46	5.369	-0.037	-0.173	0.778	0.570	0.539
47	0.225	-0.056	0.191	0.928	1.066	0.516
48	0.463	-0.032	0.121	0.961	1.173	0.811
49	0.766	-0.055	-0.067	1.025	1.302	1.002
50	1.441	-0.025	-0.390	1.046	1.256	1.102
51	2.226	-0.010	-0.582	1.151	1.124	1.089
52	3.264	-0.020	-0.696	1.240	0.999	0.892
53	3.805	-0.019	-0.647	1.227	0.939	0.784
54	4.549	-0.015	-0.509	1.013	0.796	0.632
55	4.927	-0.030	-0.319	0.847	0.661	0.564
56	5.394	-0.057	-0.172	0.795	0.567	0.558
57	1.402	0.001	0.045	0.839	0.885	0.474
58	1.841	0.008	-0.066	0.901	1.085	0.734
59	2.363	0.009	-0.226	0.944	1.159	0.886
60	2.873	0.002	-0.426	0.998	1.038	0.935
61	3.331	0.004	-0.429	1.069	0.957	0.876
62	3.844	-0.005	-0.423	1.054	0.862	0.770
63	4.080	0.000	-0.400	1.044	0.833	0.721
64	4.556	-0.012	-0.301	0.968	0.742	0.634
65	4.876	-0.023	-0.254	0.832	0.645	0.567
66	5.343	-0.042	-0.177	0.771	0.556	0.545

Table 3  $z/b = 0.125$  の平面内の測定結果の一覧表  
(List of data measured in the  $z/b = 0.125$  plane)

番号	U (m/s)	V (m/s)	W (m/s)	$\sigma_u$ (m/s)	$\sigma_v$ (m/s)	$\sigma_w$ (m/s)
1	0.210	-0.079	-0.764	0.882	0.496	0.933
2	0.418	-0.784	-0.603	0.900	0.590	0.950
3	0.994	-1.583	-0.238	0.994	0.732	1.086
4	1.487	-1.669	0.057	1.017	0.779	1.068
5	2.135	-1.526	0.213	1.089	0.778	0.723
6	2.720	-1.267	0.124	0.954	0.773	0.436
7	3.131	-0.804	0.048	0.727	0.669	0.280
8	3.298	-0.522	-0.006	0.683	0.575	0.253
9	2.786	-2.893	1.571	0.987	0.917	0.812
10	2.986	-1.628	0.253	0.918	0.855	1.015
11	2.987	-1.299	-0.080	0.947	0.789	0.662
12	3.228	-0.909	0.071	0.777	0.721	0.385
13	3.358	-0.515	0.003	0.657	0.619	0.252
14	0.653	-0.055	0.404	1.461	0.624	0.822
15	3.738	-1.146	0.567	0.971	0.822	0.900
16	3.386	-1.186	0.070	0.882	0.786	0.749
17	3.398	-0.873	0.072	0.778	0.799	0.394
18	3.481	-0.531	0.011	0.669	0.646	0.273
19	0.829	0.268	-0.024	1.561	0.781	0.716
20	3.389	-0.360	0.394	1.408	0.590	0.751
21	3.621	-0.849	0.100	0.867	0.693	0.683
22	3.507	-0.817	0.053	0.770	0.798	0.429
23	3.564	-0.493	0.010	0.657	0.664	0.277
24	1.471	0.012	-0.183	1.789	0.846	0.643
25	2.997	0.114	-0.010	1.469	0.676	0.652
26	3.597	-0.284	0.020	0.976	0.533	0.585
27	3.690	-0.492	-0.016	0.734	0.707	0.417
28	3.630	-0.362	0.007	0.679	0.703	0.287
29	-0.662	-0.134	0.102	0.640	0.782	0.420
30	-0.485	-0.370	0.070	0.696	0.765	0.388
31	0.590	-0.012	-0.055	1.189	0.869	0.522
32	1.784	0.136	-0.126	1.689	0.882	0.619
33	2.939	0.156	-0.211	1.433	0.738	0.641
34	3.484	-0.126	-0.162	1.050	0.564	0.547
35	3.676	-0.363	-0.045	0.744	0.666	0.410
36	3.639	-0.358	0.005	0.654	0.718	0.292
37	-0.683	-0.022	0.081	0.823	1.030	0.546
38	-0.225	0.152	-0.016	1.169	1.117	0.568
39	1.078	0.431	-0.111	1.655	1.026	0.581
40	1.742	0.392	-0.160	1.748	0.930	0.596
41	2.822	0.291	-0.143	1.407	0.755	0.556
42	3.263	0.075	-0.107	1.120	0.622	0.511
43	3.591	-0.144	-0.064	0.813	0.605	0.385
44	3.636	-0.208	-0.028	0.687	0.696	0.280
45	0.223	-0.086	-0.087	0.904	1.050	0.526
46	0.548	0.148	-0.134	1.140	1.056	0.549
47	1.243	0.334	-0.181	1.408	0.952	0.551
48	1.560	0.326	-0.188	1.489	0.933	0.542
49	2.312	0.264	-0.165	1.490	0.798	0.531
50	2.805	0.156	-0.127	1.229	0.676	0.470
51	3.274	-0.005	-0.084	0.974	0.641	0.373
52	3.546	-0.106	-0.062	0.740	0.661	0.281
53	1.371	-0.022	-0.196	0.836	0.869	0.508
54	1.462	0.014	-0.203	0.902	0.854	0.500
55	1.679	0.035	-0.201	0.982	0.872	0.502
56	1.804	0.069	-0.185	1.027	0.807	0.483
57	2.114	0.030	-0.160	1.086	0.761	0.469
58	2.465	0.020	-0.128	1.113	0.744	0.429
59	2.874	-0.039	-0.086	1.009	0.689	0.370
60	3.248	-0.018	-0.061	0.875	0.633	0.304

Table 4  $z/b = 1.25$  の平面内の測定結果の一覧表  
(List of data measured in the  $z/b = 1.25$  plane)

番号	U (m/s)	V (m/s)	W (m/s)	$\sigma_u$ (m/s)	$\sigma_v$ (m/s)	$\sigma_w$ (m/s)
1	1.514	0.091	0.061	0.601	0.624	0.537
2	1.595	-0.718	0.185	0.594	0.602	0.543
3	2.345	-1.418	0.296	0.653	0.658	0.531
4	2.921	-1.438	0.289	0.729	0.658	0.515
5	3.666	-1.112	0.244	0.778	0.648	0.493
6	4.009	-0.781	0.185	0.786	0.638	0.490
7	4.191	-0.494	0.123	0.774	0.602	0.483
8	4.389	-0.286	0.110	0.764	0.598	0.478
9	3.629	-2.841	0.196	0.854	0.874	0.736
10	4.118	-1.428	0.194	0.781	0.752	0.520
11	4.258	-0.871	0.168	0.777	0.660	0.501
12	4.350	-0.517	0.096	0.775	0.601	0.490
13	4.417	-0.294	0.091	0.782	0.608	0.491
14	0.504	-0.245	0.278	2.020	0.748	0.836
15	4.815	-1.233	0.086	0.974	0.836	0.596
16	4.636	-0.763	0.137	0.772	0.690	0.506
17	4.419	-0.467	0.088	0.761	0.617	0.489
18	4.466	-0.278	0.089	0.782	0.604	0.485
19	0.003	-0.045	0.078	1.915	0.929	0.897
20	4.447	-0.491	0.092	1.729	0.694	0.739
21	4.848	-0.552	0.068	0.833	0.732	0.519
22	4.604	-0.343	0.079	0.766	0.635	0.494
23	4.544	-0.236	0.083	0.765	0.613	0.494
24	0.883	-0.147	0.134	1.968	1.104	1.024
25	3.095	0.171	0.009	2.175	0.951	0.860
26	4.644	-0.068	0.019	1.189	0.699	0.652
27	4.728	-0.125	-0.007	0.760	0.640	0.488
28	4.558	-0.138	-0.005	0.733	0.600	0.483
29	-0.466	-0.055	0.370	0.594	0.703	0.544
30	-0.347	-0.289	0.446	0.630	0.708	0.585
31	0.736	0.021	0.378	1.304	0.954	0.794
32	1.705	0.086	0.184	1.842	1.021	0.946
33	3.315	0.250	-0.031	1.944	0.967	0.854
34	4.442	0.144	-0.044	1.240	0.737	0.634
35	4.698	-0.009	-0.011	0.775	0.626	0.488
36	4.578	-0.064	-0.017	0.752	0.602	0.478
37	-0.384	-0.182	-0.128	0.787	1.067	0.819
38	0.081	0.220	-0.132	1.057	1.141	0.860
39	1.595	0.523	-0.117	1.689	1.083	0.951
40	2.278	0.559	-0.135	1.851	0.984	0.965
41	3.373	0.507	-0.128	1.804	0.904	0.820
42	4.166	0.364	-0.097	1.322	0.736	0.664
43	4.625	0.168	-0.052	0.828	0.618	0.495
44	4.631	0.044	-0.031	0.734	0.582	0.484
45	0.997	-0.057	-0.312	1.020	1.287	0.946
46	1.402	0.307	-0.343	1.244	1.305	0.955
47	2.208	0.514	-0.305	1.533	1.126	0.923
48	2.663	0.530	-0.263	1.622	1.022	0.903
49	3.387	0.523	-0.184	1.473	0.853	0.759
50	3.941	0.410	-0.153	1.266	0.719	0.652
51	4.446	0.266	-0.083	0.903	0.620	0.517
52	4.567	0.111	-0.081	0.751	0.575	0.494
53	2.533	0.036	-0.311	0.960	1.097	0.830
54	2.666	0.167	-0.295	1.055	1.092	0.788
55	2.942	0.208	-0.243	1.151	0.991	0.752
56	3.168	0.278	-0.243	1.193	0.925	0.748
57	3.467	0.294	-0.162	1.195	0.835	0.687
58	3.718	0.245	-0.131	1.115	0.748	0.604
59	4.105	0.226	-0.090	0.934	0.632	0.521
60	4.325	0.122	-0.071	0.770	0.562	0.494

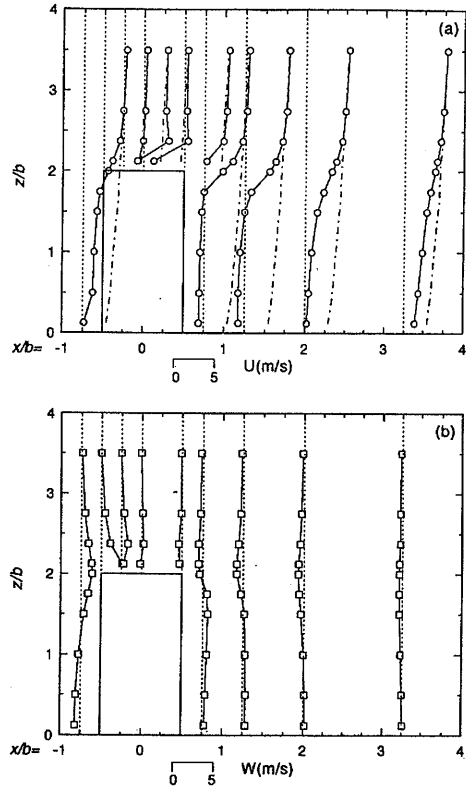


Fig. 6  $y/b = 0$  の断面内における平均速度の鉛直分布  
(Vertical profiles of three mean velocity components in the  $y/b = 0$  plane)

の範囲内においてはほぼ0となる。

Fig. 7には建物の中心断面 ( $y/b = 0$ ) における変動速度の標準偏差の測定結果を示す。建物前面では、逆圧力勾配の影響で、流れ方向の変動速度  $\sigma_u$  は減少し、鉛直とスパン方向の変動速度  $\sigma_v$ ,  $\sigma_w$  は若干増大する。ただし、地面に近いコーナ域では馬蹄形渦の影響で、 $\sigma_u$  と  $\sigma_w$  は増大し、 $\sigma_v$  は僅かに減少する。変動速度の増大が最も顕著である場所は建物屋根面近傍にある。3つの変動速度成分の鉛直分布はよく似ており、またその大きさは流れ方向、スパン方向、鉛直方向の速度成分の順になっている。一方、建物の後流域では、3つの変動速度の鉛直分布とその大きさは下流にいくにつれ変化している。建物の直後では3つの変動速度のピークが建物屋根面より少し高い位置に見られるが、下流にいくと  $\sigma_v$  のピークは建物高さの半分のところに見られ、その値も流れ方向の速度成分の値よりも大きくなっている。

建物周辺の乱流場は建物近傍の渦運動の影響を受け、その性質は場所によって大きく変化する。乱流の性質

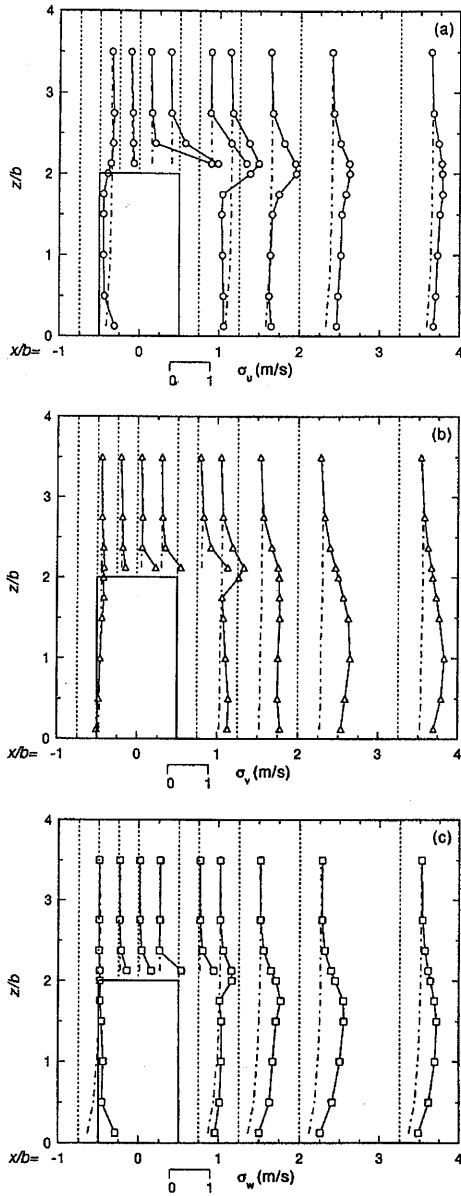


Fig. 7  $y/b = 0$  の断面内における変動速度の鉛直分布  
(Vertical profiles of three normal stress components in the  $y/b = 0$  plane)

を表す物理量の一つは次式により表せる応力非等方テンソルがある。

$$b_{ij} = \frac{\overline{u_i u_j}}{2k} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \quad (1)$$

等方乱流では  $b_{ij} = 0$  となる。応力非等方テンソルは乱れの性質を表す最も重要な物理量の一つで、最近の乱流モデルにはこの応力非等方テンソル及びその第2不変量

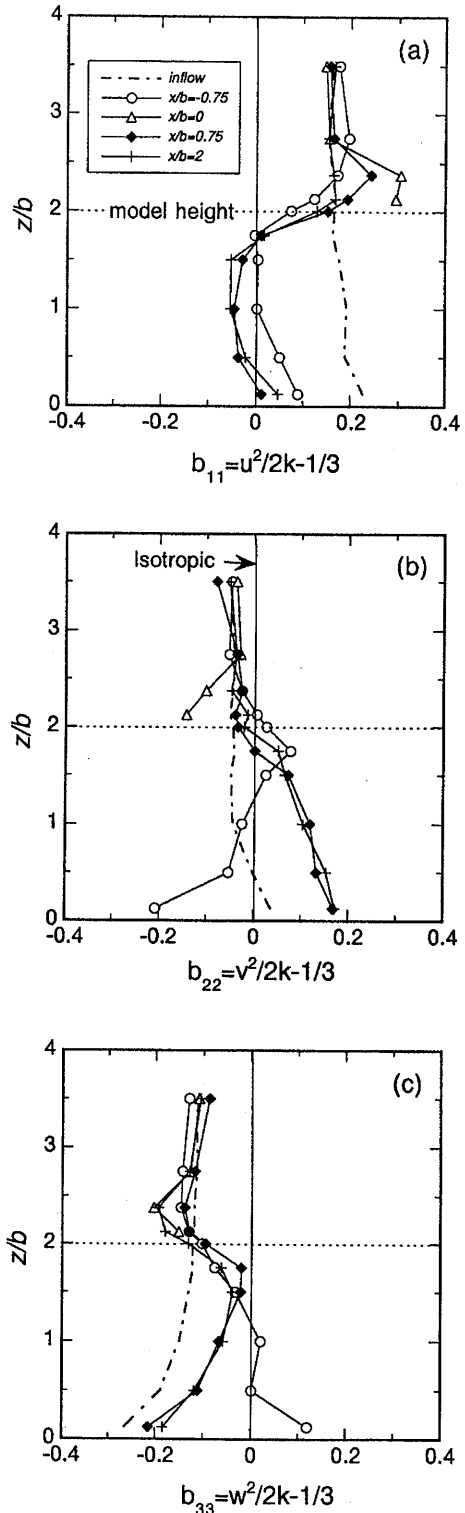


Fig. 8  $y/b = 0$  の断面内における応力非等方テンソルの鉛直分布  
(Vertical profiles of the anisotropy tensor in the  $y/b = 0$  plane)

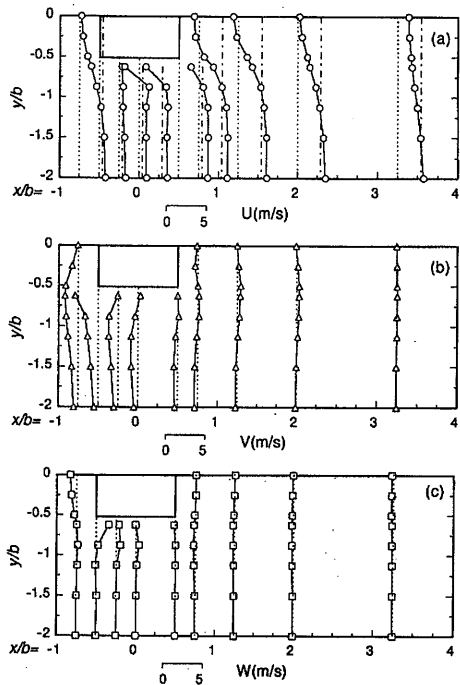


Fig. 9  $z/b = 0.125$ の平面内における平均速度の方向分布  
(Lateral distributions of three mean velocity components in the  $z/b = 0.125$  plane)

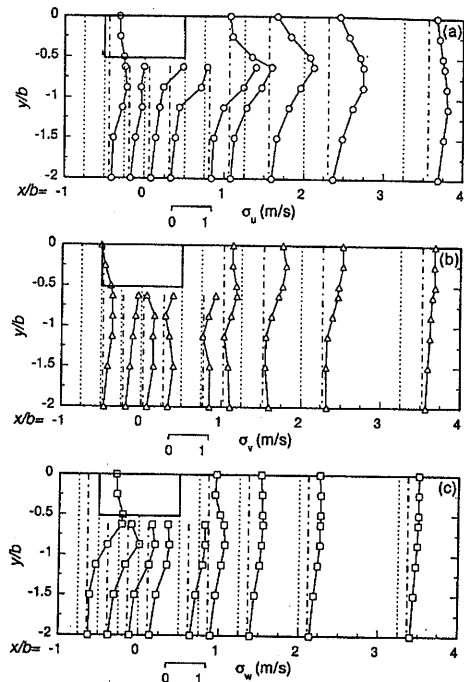


Fig. 10  $z/b = 0.125$ の平面内における変動速度の方向分布  
(Lateral distributions of three normal stress components in the  $z/b = 0.125$  plane)

( $\Pi = -b_{ij}b_{ji}/2$ ) と第3不変量 ( $\text{III} = -b_{ij}b_{jk}b_{ki}/3$ ) がよく用いられる。Fig. 8には  $y/b = 0$  の断面内における応力非等方テンソルのノルマル成分の鉛直分布を示す。図中の一点鎖線は接近流の値を表している。建物の前面では  $b_{11}$  が等方乱流の値に近いが、 $b_{22}$  と  $b_{33}$  が非等方性を示す。建物の後流域では建物の前面と同様に  $b_{22}$  と  $b_{33}$  が非等方性を示すが、その符号が逆になっている。すなわち、建物の前面では  $b_{33}$  が卓越するのに対して、建物の後流域では  $b_{22}$  が卓越する。一方、建物の屋根面付近では  $b_{11}$  が大きく、 $b_{22}$  と  $b_{33}$  が接近流の値よりも小さくなっている。これは建物の屋根面付近に流れ方向の速度変動が卓越していることを示している。このような建物周辺の流れ場の乱流量は建物近傍に存在する渦運動に依存し、複雑な性質を示している。

### 3.2 $z/b = 0.125$ の平面内における測定結果

Fig. 9には  $z/b = 0.125$ の平面内における平均速度の測定結果を示す。建物前面においては流れ方向の平均速度  $U$  が壁面の影響を受け小さくなっている。スパン方向の平均速度  $V$  は建物をまわり込む流れの影響を受け、建物の側面付近で負になっている。鉛直方向の平均速度  $W$  は建物前面で下降流に伴い負になっているが、

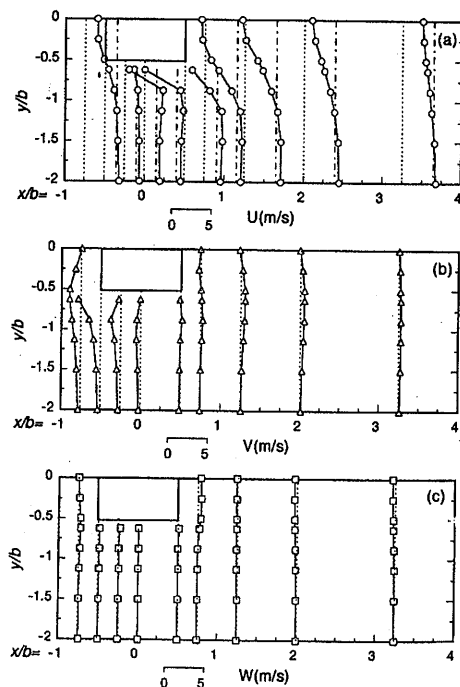


Fig. 11  $z/b = 1.25$ の平面内における平均速度の方向分布  
(Lateral distributions of three mean velocity components in the  $z/b = 1.25$  plane)

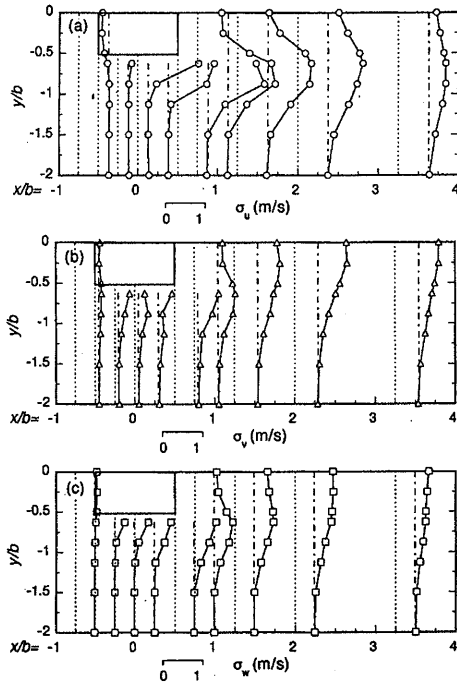


Fig. 12  $z/b = 1.25$ の平面内における変動速度の方向分布  
(Lateral distributions of three normal stress components in the  $z/b = 1.25$  plane)

建物から離れると僅かに正になる。一方、建物側面では流れ方向の平均速度  $U$  が建物側壁面前縁の剥離流の影響で小さくなるが、建物から離れると逆に増大している。この風速の増大はビル風の要因にもなっている。スパン方向の平均速度  $V$  については建物近傍での剥離流の影響により僅かに正の値になるが、剥離領域から離れると負の値を示す。全体的に見ると、建物側面では流れ場は屋根面のそれに良く似ている。ここで特徴なことは建物前縁の角部に平均速度  $W$  が大きな正の値を持っている点である。この強い上昇流は建物脚部に発生する円錐渦に何らかの関係があると思われる。建物の後流域では、流れ方向の平均速度  $U$  は建物の影響で負となっている。

Fig. 10 には  $z/b = 0.125$  の平面内における変動速度の標準偏差の測定結果を示す。建物前面においては鉛直方向の変動速度の標準偏差  $\sigma_w$  が最も高い値を示す。これは建物前面に馬蹄形渦によって作られているものである。一方、建物側面では3つの変動速度の標準偏差は複雑な分布となっている。側面前縁では、 $\sigma_w$  の値が最も高くなっているが、そこから下流にいくと  $\sigma_u$  は建物側壁面に近いところで最も高い値を示す。これは側

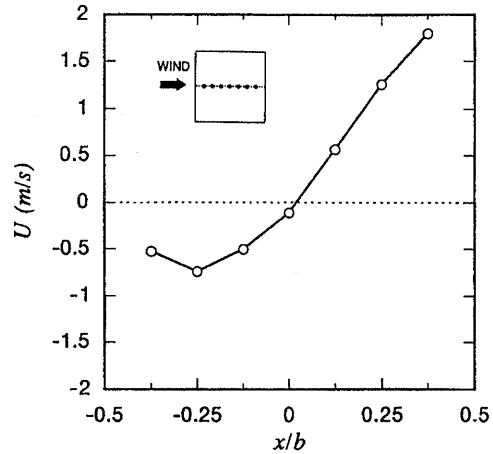


Fig. 13 建物屋根面近傍の速度成分  $u$  の流れ方向分布  
(Streamwise distribution of the velocity component  $u$  on the roof)

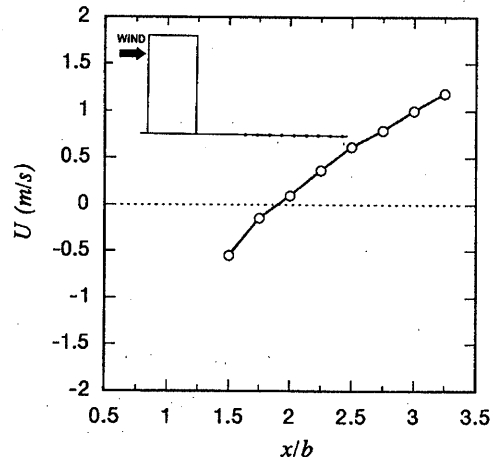


Fig. 14 建物の後流域における速度成分  $u$  の流れ方向分布  
(Streamwise distribution of the velocity component  $u$  in the wake region)

面前縁での流れの剥離によるものである。この影響は建物背後の領域まで続く。ここで特徴なことはスパン方向の変動速度  $\sigma_v$  は側面から離れるところに最小値をとり、またその位置が徐々に外側に移動する点である。この現象は建物の近傍に存在する馬蹄型渦と何らかの関係があると思われる。後流域において建物の中心線上では  $\sigma_v$  が最も大きくなっている。

### 3.3 $z/b = 1.25$ の平面内における測定結果

Fig. 11 には  $z/b = 1.25$  の平面内における平均速度の測定結果を示す。全体的に見ると、流れ場の性質は  $z$



$z/b = 0.125$ の平面における流れ場のそれによく似ている。異なるところは建物側壁面の前縁の角部に上昇流が見られない点である。建物の直後では鉛直方向の平均速度がわずかに正となる。これは建物中心断面に見られるような大きな循環流によるものである。

Fig. 12には $z/b = 1.25$ の平面内における変動速度の標準偏差の測定結果を示す。全体的に見ると、変動速度の標準偏差の性質は $z/b = 0.125$ の平面のそれによく似ているが、建物前面では $z/b = 1.25$ の高さで淀み点が存在するため、 $\sigma_u$ は建物前面で減少している。側面では剥離流の影響により、3つの変動速度の標準偏差ともに大きくなっている。

#### 3.4 建物表面での再付着点の測定

建物の屋根面及び後流域における再付着点の位置は建物近傍の流れを表す重要なパラメーターの一つである。本研究では再付着点の位置を調べるために、建物の屋根面または床面から5mm離れた位置で流れ方向の速度成分を測定した。Fig. 13には屋根面における平均速度 $U$ の流れ方向の分布を示す。平均速度 $U$ の値が0となる位置を再付着点に定義すれば、屋根面における再付着点はほぼ屋根面の中心位置に見られ、剥離バブルの長さ $L_c/b$ は約0.52となる。この長さは同じ気流条件で測定された立方体モデルのそれ( $L_c/b = 0.5$ )とほぼ同じである<sup>17)</sup>。一方、後流域では再付着点の位置は $x/b = 1.92$ のところに見られ(Fig. 14)、建物背後の循環流の長さ $L_c/b$ は約1.42となる。この長さは立方体モデルの場合( $L_c/b = 1.13$ )より少し長くなっている<sup>17)</sup>。建物高さの変化が建物近傍の流れ場に与える影響は建物屋根面より建物の後流の方が大きい。

#### 4. まとめ

本実験では、スプリットファイバースプロブを用いて建物近傍の各速度成分の平均値及び標準偏差を測定し、数値解析結果の検証データを得た。これらの実験データを今後流体解析ソフトの予測精度の検討に役立てたいと考えている。

#### 参考文献

- 1) 村上, 持田, 林, 高橋: 実物市街地に計画された中・高層建物群周辺気流の解析, 第10回風工学シンポジウム, 1988, pp.187-192.
- 2) 赤林, 坂口, 持田, 富永, 大阿久: 新潟市の風環境に関する数値解析, 日本風工学会誌, No.71, 1997, pp.179-180.
- 3) 西村, 伊藤: 市街域での拡散予測に関する研究, 第38大気環境学会年会講演要旨集, 1994, pp.278.
- 4) S. Murakami, A. Mochida and Y. Hayashi: Scrutinizing  $k$ -epsilon EVM and ASM by means of LES and wind tunnel for wind field around cube, 8th Symposium on Turbulent Shear FLOws, 1991.
- 5) 何, 片山, 林, 堤: 建物模型周辺気流に関する3種類の風速計による風洞実験と数値シミュレーションの比較, 第13回風工学シンポジウム, 1994, pp.567-572.
- 6) S. Takakura, Y. Suyama, M. Aoyama: Numerical simulation of flowfield around buildings in an urban area. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., Vol.46, 1993, pp.765-771.
- 7) L.J.S. Bradbury and I.P. Castro: A pulsed-wire technique for velocity measurements in highly turbulent flows, J. of Fluid Mech. Vol.49, part 4, 1971, pp.657-691.
- 8) N.J. Cook and D. Redfearn: Calibration and use of a hot-wire probe for highly turbulent and Reversing flows, J of Ind. Aerodyn., No.1, 1975, pp.221-231.
- 9) 村上, 小峯: タンデム型熱線風速計による変動風速の3次元的な測定, 日本建築学会論文報告集, 第297号, 1980, pp.59-68.
- 10) DISA Information Sheet on "Split-fiber Probes, Types 55R55, 55R56, 55R57, 55R58 for two-dimensional flow field measurements", DISA Elektronik, A/S, Skovlunde, Denmark, 1980.
- 11) F. E. Jorgensen: Characteristics and calibration of a triple-split probe for revering flows, DISA Information, No.27, 1982, pp.15-22.
- 12) I.P. Castro, and A.G. Robins: The flow around a surface-mounted cube in uniform and turbulent streams, J. Fluid Mech., Vol. 79, 1977, pp.307-335.
- 13) A.G. Robins and I.P. Castro: A wind tunnel investigation of plume dispersion in the vicinity of a surface-mounted cube, Part1 The Flow Field, Atmos. Environ., Vol.11, 1977, pp.291-297.
- 14) Y. Ogawa, S. Oikawa, and K. Uehara: Field and wind tunnel study of the flow and

- diffusion around a model cube, Part1. Flow measurements, Atmos. Environ., Vol.17, 1983, pp.1145-1159.
- 15) R. Martinuzzi and C. Tropea : Flow around surface-mounted cube, Proc., 6th Symp. on Appl. of Laser Tech. to Fluid Mechanics, Lisbon, 1992, pp.399-414.
- 16) R. Martinuzzi, A. Melling and C. Tropea : Reynolds stress field for the turbulent flow around a surface-mounted cube placed in a channel, Proc. of 9th symposium on turbulent shear flow, 1993, pp.13-4-1.
- 17) 孟, 老川 : 建物近傍の乱流計測, 第38大気環境学会年会講演要旨集, 1997, pp.320.
- 18) 佐々木, 木谷 : スプリットフィルムプローブによる逆流領域の乱流測定, 日本機械学会論文集, B 51, 1985, pp.1615-1618.
- 19) Boerner, T. and Leutheusser, H. J. : Calibration of split-fiber probe for use in bubbly two-phase flow, DISA Info., No.29, 1984, pp.10-13.
- 20) 孟, 日比 : 高層建物屋上の流れ場の乱流特性と組織運動, 日本風工学会誌, No.72, 1997, pp.21-34.
- 21) AIJ recommendations for loads on buildings, Architectural institute of Japan, 1996.
- 22) H.P.A.H. Irwin : Design and use of spires for natural wind simulation, National Aeronautical Establishment, Laboratory Technical Report, LTR-LA-23, 1979.