

大気境界層における乱流エネルギー収支の研究

光田 寧・塚本 修・片岡 毅

MEASUREMENT OF TURBULENT KINETIC ENERGY BUDGET IN THE ATMOSPHERIC BOUNDARY LAYER

By Yasushi MITSUTA, Osamu TSUKAMOTO and Tsuyoshi KATAOKA

Synopsis

The turbulent kinetic energy budget was examined experimentally including the direct measurement of the pressure transport term by the use of the newly designed static pressure probe. Observations were made at three levels, 25 m, 50 m, and 100m on the tower, and the energy budgets were examined at two layers, 25-50 m (lower layer) and 50-100 m (upper layer). In the unstable case, the pressure transport term was found to be energy loss and to include large errors. However, the kinetic energy balance was satisfied much better by considering the pressure transport term in stable condition.

1. はじめに

乱流エネルギー収支を表わす式は、水平方向の一様性と、最も小さな運動のスケールでの等方性を仮定すれば、次のように書くことができる。

$$\underbrace{\frac{1}{2} \frac{\partial E}{\partial t}}_{(a)} = - \underbrace{\overline{u'w'}}_{(b)} \frac{\partial U}{\partial z} - \underbrace{\left(-\frac{g}{T} \overline{w'\theta'} \right)}_{(c)} - \underbrace{\frac{1}{2} \frac{\partial \overline{w'E'}}{\partial z}}_{(d)} - \underbrace{\varepsilon}_{(e)} - \underbrace{\frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{w'p'}}{\partial z}}_{(f)} \dots\dots\dots(1)$$

$$E = u'^2 + v'^2 + w'^2, \quad \varepsilon = 15\nu \left(\frac{\partial u'}{\partial x} \right)^2$$

ここで $\bar{}$ は時間平均を示している。また E は乱れの運動エネルギーを表わし、 U, u' は流線方向 (x 方向) の風速の平均値と変動成分、 v' はそれに垂直な水平方向 (y 方向) の風速変動成分、 w' は鉛直方向 (z 方向) の風速の変動成分を表わしている。また T, θ' は温度の平均値と変動量、 p' は気圧の変動量、 ρ は空気密度、 g は重力加速度、 ν は空気の動粘性係数をそれぞれ示している。

(1)式の各項の意味は次のようなものである。

- (a) : 乱れの運動エネルギー、 E の局所的時間変化
- (b) : 平均流の速度勾配とレイノルズ応力、 $\overline{u'w'}$ との相互作用による乱流エネルギーの生成率を表わし、shear production と呼ばれている。
- (c) : 浮力に抗しての仕事率を表わしており、buoyant production と呼ばれている。
- (d) : 乱流のエネルギーフラックスの発散を表わしており、turbulent transport と呼ばれている。
- (e) : 粘性力の働きによる乱流エネルギーの内部エネルギーへの変換率を表わしており、dissipation rate と呼ばれている。
- (f) : 圧力の変動による乱流エネルギーフラックスの発散を表わしており、pressure transport と呼ばれている。

以上のような乱流エネルギー収支の関係について、今までにいくつかの観測が行なわれてきた。しかし、

(f) の pressure 項は, McBean and Elliot²⁾ 以外の研究では測定されず, 他の項の残差として得られているにすぎなかった。また, McBean and Elliot の例も地表面付近 (約 6 m) における一高度のみでの測定結果から, Monin-Obukhov の相似則を用いて $\partial/\partial z$ を安定度に対する微分におきかえて(f)項を求めたものであり, その高度変化率を直接測定したのではなかった。つまり(f)項を厳密な意味で直接測定により求めた例は未だ報告されていない。

これまでに行なわれた乱流エネルギー収支の観測結果で代表的なものは, Wyngaard and Coté¹⁾ により報

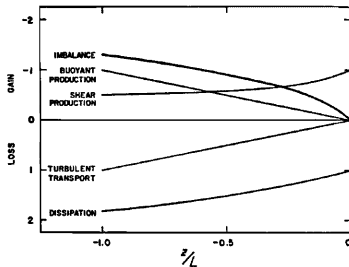


Fig. 1 Dimensionless energy budget terms under unstable condition.
(after Wyngaard and Coté¹⁾)

告されたカンサスにおける観測結果である。ここでは, (f)項は測定されておらず, (a)項の非定常性の項とともに, (b)~(e)項の残差として出てくる imbalance の中に含まれている。彼らの得た(b)~(e)項, imbalance の5つの項の相対的な大きさが Fig. 1 に示されている。横軸には安定度 z/L をとり, 中立 ($z/L=0$) から不安定の場合について示してある。これによると, (c)の buoyant production (gain)と(d)の turbulent transport (loss) が逆符号でほぼ同程度の大きさを示し, (b)の shear production (gain) と(e)の dissipation (loss) 及び, imbalance (gain) がバランスしており合計が零になるとされている。imbalance 項の中には(f)の pressure 項以外に, 非定常性による(a)項, 場の非一

様性による寄与などが含まれているが, それらは非常に小さいと考えられている。よって imbalance の大部分は(f)の pressure transport の項によるものと推論している。このように(f)の pressure 項は, 乱流エネルギー収支の中で, 特不安定度がますます重要な役割を果たしているものと期待される。しかしながら, 屋外で静圧変動を測定する際, 動圧の影響を除くことが困難であったために, 上述の McBean and Elliott の例以外(f)項の測定は行なわれなかった。そこで今回これらの項を完全に実測に基づいて評価出来るような観測を計画して, 静圧変動を測定する測器を試作した。そして, これを用いて三高度において風速変動, 温度変動および圧力変動を測定し, 乱流エネルギー収支に関連した全ての項を実測により求めて見ようを試みた。

2. 気圧変動計

今回この研究のために試作した気圧変動計の概略図を Fig. 2 に示す。これは大別すると感圧部, 接続部および変換部とからなり, おのおの概略は以下に示すとおりである。

(a) 感圧部

大気中の圧力変動から動圧を除去し, 静圧のみを取り出す部分であり, その原理は Huey⁴⁾ に基づくもので次のとおりである。

流体中におかれた球体の表面における圧力分布は subcritical flow (Reynolds 数; 1.63×10^4) では Fig. 3 のようになることが知られている。図において ΔP は球の表面圧力と静圧との差, u_∞ は一般流の流速を表わしている。つまり, 縦軸はよどみ点における圧力で表面圧力を規格化したものである。横軸に示した角度は, 一般流の流線方向上流側を 0° ととり, 180° は流れの背面にあたっている。ここで β は 0° から β まで (または $-\beta$ から 0° まで) の ΔP を積分する (斜線の部分) と, その結果が零となる角度, つまり, その間の表面圧力の平均が静圧と等しくなる角度を表わしている。この図より角度 β を求めると, $\beta \approx 115^\circ$ となるが, 著者らが風洞においてプラスチック球を用い β を変化させて得られた値は, Reynolds 数 1.16×10^4 において $\beta \approx 106^\circ$ であった。したがって, 今回の観測では感圧部として直径 34 mm のプラスチック球に, 幅 1.5 mm, $\beta \approx 106^\circ$ のスリットを水平方向に入れたものを用いることにした。Flachsbart の実験によれば,

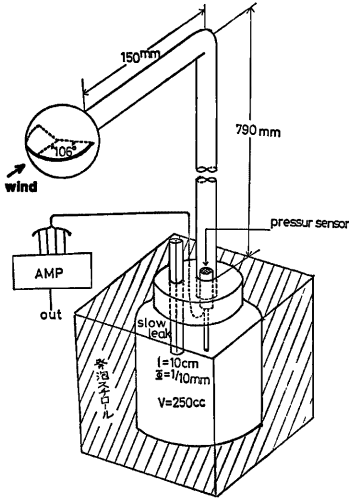


Fig. 2 An appearance of newly designed static pressure probe.

管を用いた。管の表面には日射，気温の変化の影響を除くため，スチロールシートを巻いた上にシリコンチューブを通し，さらに白いビニールテープを巻いて断熱した。

(c) 変換部

感圧部で得られた静圧と，基準圧としての広口ビン内との気圧差を，高感度差圧型圧力センサ (TEAC/KULITE XCS-093) を用いて検出し，電気信号に変換する部分である。

広口びんは内径1/10 mm，長さ10 cm の毛細管によって外気とつながっており，時定数約25分のハイパスフィルタの役目をしている。時定数 τ は，広口びんの容積を V ，空気分子量を m ，動粘性率を ν ，毛細管の長さとお内半径をそれぞれ l, a ，気体定数を R ，絶対温度を T とすると，

$$\tau = \frac{8Vmv l}{RTa^4\pi} \times \frac{1}{60} \text{ (min).}$$

で表わされる。今の場合は $V=250 \text{ cm}^3$ ， $a=1/200 \text{ cm}$ ， $l=10 \text{ cm}$ として， $\tau=25$ 分となるようにしてある。また，この部分は日射，気温の変化の影響を受けないように，発泡スチロールをつめた白い木箱の中におさまられている。

この気圧変動計を風洞内で検定した結果は Fig. 4 に示すように，水平方向の風向変化が $\pm 33^\circ$ ぐらいの範囲内においては動圧の影響はほとんどなく，風向がある程度変化しても，動圧の影響がほとんど見られないことがわかった。これは Fig. 3 において，角度 β 付近での圧力分布がほぼ平坦な形をしており，角度 β および $-\beta$ が図上である程度左右にずれても斜線全体の面積は変わらないことによるものである。

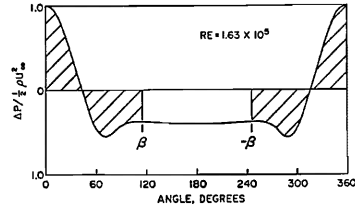


Fig. 3 Pressure distribution around a sphere in subcritical flow. (after Huey⁴⁾)

球の抗力係数は Reynolds 数 $1 \times 10^3 \sim 2 \times 10^5$ の範囲では大きく変化しないのでこの圧力計の場合風速 90m/s 以下において使用可能である。またプラスチック球の内部には空気の流れが生じないように通気性のスポンジで球の内部を満たしてある。

(b) 接続部

感圧部を支えるとともに，感圧部と変換部とをつなぎ，感圧部からの静圧を変換部に伝える役目をする。これには，外径 7 mm，内径 5 mm の真ちゅう

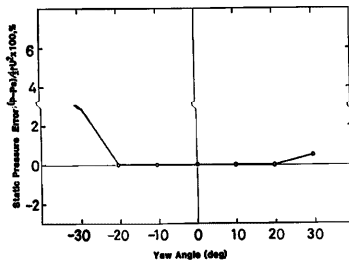


Fig. 4 Static pressure error as a function of yaw angle for a Reynolds number of 11600.

3. 観測及び計算方法

観測は1982年9月27日、筑波研究学園都市内の気象研究所構内にある気象観測用鉄塔において行った。

鉄塔の25 m, 50 m, 100 m の三高度において三次元超音波風速温度計、熱電対乾湿計、気圧変動計を鉄塔の南側のアームに南向きに設置し、風速3～7 mの南風について測定した。これらのすべての信号は各チャンネル20 Hz で A/D 変換して磁気テープに収録した。本観測のブロックダイアグラムを **Fig. 5** に、測器の設置状況を **Photo 1** に示す。

測定は三高度について行なったが、乱流エネルギー収支は100m-50m間の層 (upper), 50m-25m間の層 (lower) の2層に分けて計算を行なった。計算に用いたデータは **Table 1** に示す通り Run 11~Run 42までのうち合計 6 Run である。Run 11~Run 22 は昼間の不安定時, Run 41, Run 42 は夜間の安定時のものである。各 Run を通して平均風向は南あるいは南南西であった。

(1)式において $\bar{u}$ で表わされる平均時間は40分間とし、 $\partial/\partial z$ は三高度の差分でおきかえた。(e)項は u' についてのパワースペクトル $S(f)$ を求めて、波数 k と周波数 f との間に $k=2\pi f/U$ の関係を仮定し、コルモゴロフの仮説 $F(k)=a\varepsilon^{2/3}k^{-5/3}$ を満たしている波数

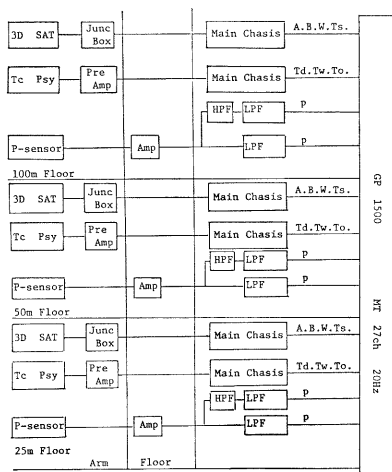


Fig. 5 Block diagram of observation at 213 m tower.

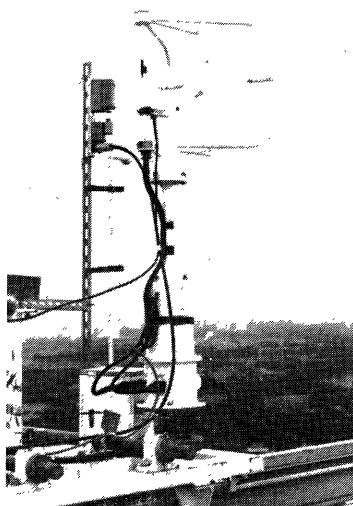


Photo. 1 Mounting of the instruments on the arm of the tower; three dimensional sonic anemometer thermometer, thermocouple psychrometer and static pressure probe.

Table 1 List of observation

	Date	Time	Wind speed (m/s)			Wind direction (deg.)		
			100m	50m	25m	100m	50m	25m
RUN 11	27 Sept. 1982	13: 11—13: 51	5.8	5.4	4.1	194	185	186
RUN 12	27 Sept. 1982	13: 51—14: 31	5.5	5.1	4.0	192	181	180
RUN 21	27 Sept. 1982	14: 47—15: 27	4.7	4.3	3.2	191	181	181
RUN 22	27 Sept. 1982	15: 27—16: 07	5.6	4.9	3.7	192	183	183
RUN 41	27 Sept. 1982	18: 17—18: 57	6.8	4.5	2.9	192	179	176
RUN 42	27 Sept. 1982	18: 57—19: 37	6.8	4.6	2.8	193	179	177

領域において、Kolmogoroff Constant a を0.5として求めた。**Fig. 6** にスペクトルの具体例を示しており、図に破線で示したように1～10 Hzの範囲で $-5/3$ 乗則を適用した。

4. 観測結果

(a) 圧力変動

まずこの観測で得られた25m, 50 m, 100 mの各高度における圧力変動の時間変化の例を **Fig. 7** に示す。これは元のデータを0.2秒ごとに平均をとり約7分間にわたる変化を見たものである。圧力は Pascal ($=1\text{N/m}^2=0.01\text{ mb}$) で表わしてある。細かなスケールの変動は測定高度によりかなり異なっているが、大きなスケールの変動は各高度に共通して現われている。変動の大きさは、25mのものが最も大きく10 pascal 程度にまで達することもある。変動の rms 値は、100mで 2.99 pascal, 50mで 3.34 pascal, 25mで 5.49 pascal であった。

次にこのデータについてスペクトル解析を行なった結果を **Fig. 8** に示す。変動の r. m. s. 値は上層へ行くに従って小さくなっていったがこの周波数範囲 (0.01～5 Hz) におけるスペクトル密度においては50 mと100mとの間にはほとんど差が認められない。また、全体の形は各高度において互いによく似た形を示している。また各高度とも周波数 f に対してはほぼ $-5/3$ 乗で減衰している。一般に風速変動のポワースペクト

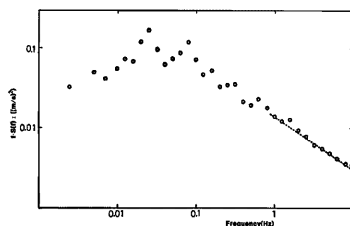


Fig. 6 An example of power spectrum of longitudinal velocity for the estimation of energy dissipation rate. The $-5/3$ power law is fitted in the frequency region as shown in dashed line.

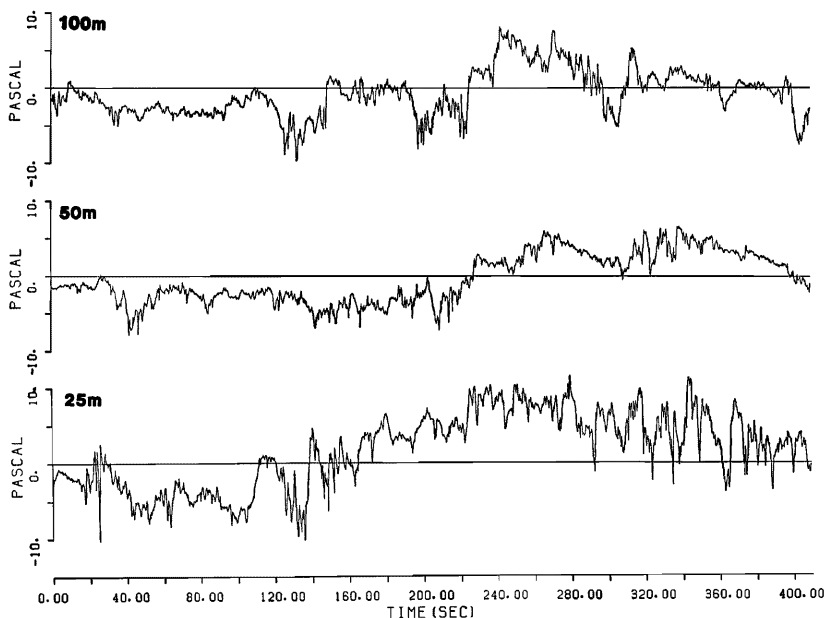


Fig. 7 An example of time changes of pressure fluctuations at three levels.

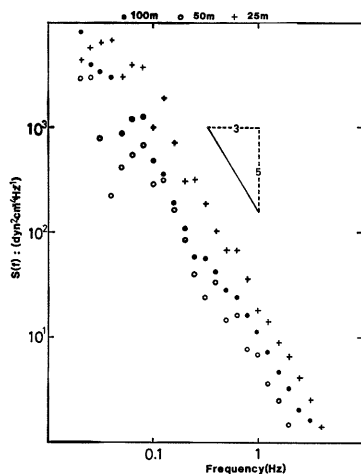


Fig. 8 An example of power spectral densities of pressure fluctuations at three levels.

ルに関しては、周波数 f に対して、慣性小領域において $-5/3$ 乗で減衰することが次元解析から導かれ、また実測によっても確かめられている。それに

対し、圧力変動のスペクトルは次元解析によると $-7/3$ 乗で減衰すると考えられる。ところが今回の観測においても、また Elliott³⁾ あるいは他の研究者らが地表面において行なった測定例においても、圧力変動のスペクトルはほぼ $-5/3$ 乗で減衰するという結果が得られている。Fig. 9 に過去における圧力変動のスペクトルの観測例（地表面付近）を示しておく。これらは変動の分散値で規格化したものである。この次元解析と実測との食い違いについて、Elliott は、このような周波数領域においては、大気乱流の等方性が十分に成り立っていないことが原因なのではないか、としているが、今後検討していくことが必要である。

また、乱流エネルギー収支を考える際に問題となるのは、圧力変動 p' と鉛直方向の風速変動成分 w' との covariance ($w'p'$) である。Fig. 10 にこれをスペクトル解析した w' と p' の cospectrum を示す。ほぼ全周波数領域において、 w' と p' とは負の相関を示している。また 0.01~0.1 Hz の間では特に負の大きな値を持っており、輸送への寄与の大きいことがわかる。

(b) 乱流エネルギー収支

Table 2 に各 Run における乱流エネルギー収支の計算結果を示す。また Fig. 11 は、大気が不安定 (unstable) な場合の例として Run 12、大気が安定 (stable) な場合の例として Run 42 について、上層 (100~50 m) 及び下層 (50~25 m) での乱流エネルギー収支の各項の大きさを図示したものである。ここで(1)式において、 $\bar{E}$ が増加する向きを gain、減少する向きを loss とする。つまり、(a)項については正の場合 gain を表わし、(b)~(f)項については負の場合 gain を表わすことになる。また、理論的にはこれら(a)~(f)項を足し合わせると零となるべきであるから、差引不足分を error として図示している。error の原因としては、測定誤差、水平方向の非一様性の効果などが考えられる。

乱流エネルギー収支の各項について見ると、(a) 項は平均時間を 40 分間とすると、この観測では他の各項に比べ非常に小さく、非定常性の効果は乱流エネルギー収支を考える際に無視してよいと思われる。(b) の

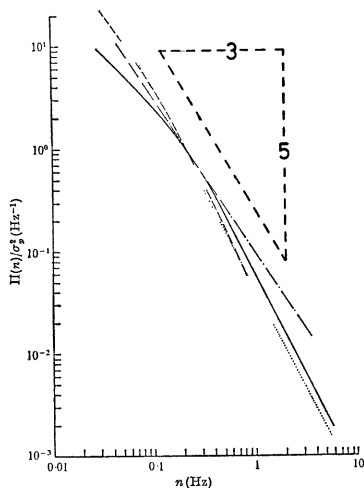


Fig. 9 Comparison of the averaged slope of pressure spectra obtained in the atmospheric boundary layer by various authors. solid line : Elliott, dashed line : Priestley, dot-dashed line : Gossard, dotted line : Gorshkov. (after Elliott³⁾)

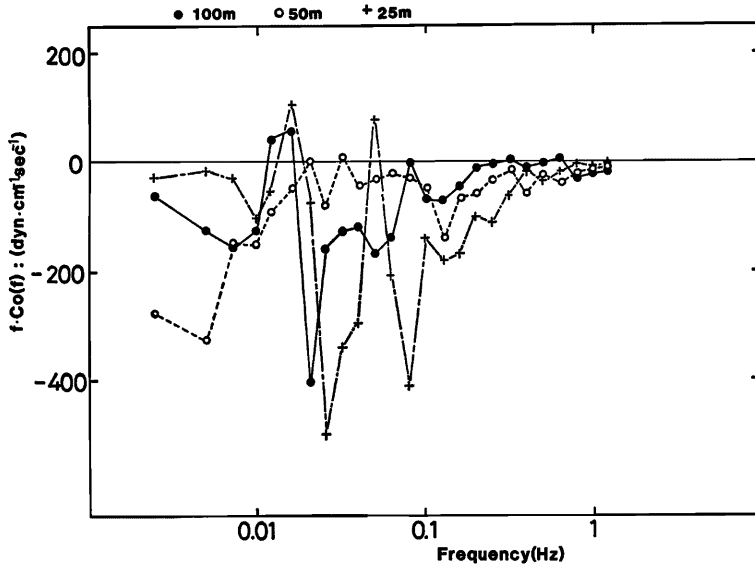


Fig. 10 An example of cospectrum between vertical velocity and pressure at three levels.

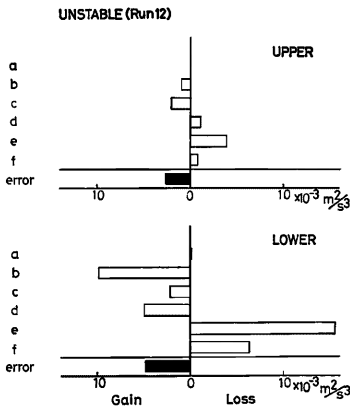


Fig. 11 (a) Turbulent kinetic energy budget of each layer in unstable condition.

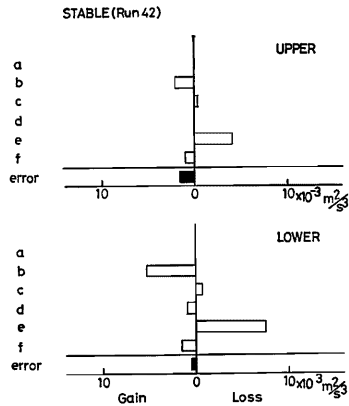


Fig. 11 (b) Same as Fig. 11(a) except for stable condition.

shear production 項は gain の中心的な項で、下層ほど gain の中で占める割合が大きくなっている。(c)の buoyant production の項は、安定時には loss、不安定時には gain を示し、(e)の dissipation 項は energy loss の主たる部分である。(d)の turbulent transport 項は、今回の観測では安定、不安定にかかわらず上層で loss、下層で gain となり、不安定時における下層では前述の Wyngaard and Coté の例とは異なる結果

Table 2 Turbulent kinetic energy budget terms during the observation

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	Total [m ² /s ³]
	$\frac{1}{2}\frac{\partial \bar{E}}{\partial t}$ [m ² /s ³]	$\frac{\overline{u'w'}\partial U}{\partial z}$ [m ² /s ³]	$-\frac{g}{T}\overline{w'\theta'}$ [m ² /s ³]	$\frac{1}{2}\frac{\partial \overline{w'E'}}{\partial z}$ [m ² /s ³]	ϵ [m ² /s ³]	$-\frac{1}{\rho}\frac{\partial \overline{w'p'}}{\partial z}$ [m ² /s ³]	
RUN 11 upper (100m—50m) lower (50m—25m)	-0.09×10 ⁻³ -0.14×10 ⁻³	-1.65×10 ⁻³ -15.98×10 ⁻³	-2.51×10 ⁻³ -3.08×10 ⁻³	2.32×10 ⁻³ -2.61×10 ⁻³	4.91×10 ⁻³ 16.10×10 ⁻³	2.10×10 ⁻³ -3.36×10 ⁻³	5.08×10 ⁻³ -9.07×10 ⁻³
RUN 12 upper (100m—50m) lower (50m—25m)	-0.09×10 ⁻³ -0.14×10 ⁻³	-0.98×10 ⁻³ -9.77×10 ⁻³	-2.07×10 ⁻³ -2.16×10 ⁻³	1.09×10 ⁻³ -4.98×10 ⁻³	3.90×10 ⁻³ 15.54×10 ⁻³	0.80×10 ⁻³ 6.29×10 ⁻³	2.65×10 ⁻³ 4.78×10 ⁻³
RUN 21 upper (100m—50m) lower (50m—25m)	-0.08×10 ⁻³ -0.08×10 ⁻³	-1.32×10 ⁻³ -10.95×10 ⁻³	-1.59×10 ⁻³ -1.52×10 ⁻³	0.72×10 ⁻³ -0.42×10 ⁻³	2.25×10 ⁻³ 10.21×10 ⁻³	1.03×10 ⁻³ 2.07×10 ⁻³	1.01×10 ⁻³ -0.69×10 ⁻³
RUN 22 upper (100m—50m) lower (50m—25m)	-0.08×10 ⁻³ -0.08×10 ⁻³	-0.27×10 ⁻³ -6.87×10 ⁻³	-0.01×10 ⁻³ -0.21×10 ⁻³	-0.80×10 ⁻³ -1.48×10 ⁻³	2.36×10 ⁻³ 11.44×10 ⁻³	2.36×10 ⁻³ 1.19×10 ⁻³	3.56×10 ⁻³ 3.99×10 ⁻³
RUN 41 upper (100m—50m) lower (50m—25m)	-0.04×10 ⁻³ -0.06×10 ⁻³	-2.75×10 ⁻³ -5.18×10 ⁻³	0.43×10 ⁻³ 0.72×10 ⁻³	0.50×10 ⁻³ -1.13×10 ⁻³	4.47×10 ⁻³ 7.35×10 ⁻³	-1.70×10 ⁻³ -0.40×10 ⁻³	0.91×10 ⁻³ 1.30×10 ⁻³
RUN 42 upper (100m 50m) lower (50m—25m)	-0.04×10 ⁻³ -0.06×10 ⁻³	-1.94×10 ⁻³ -5.24×10 ⁻³	0.39×10 ⁻³ 0.72×10 ⁻³	0.01×10 ⁻³ -0.89×10 ⁻³	4.08×10 ⁻³ 7.50×10 ⁻³	-0.96×10 ⁻³ -1.52×10 ⁻³	1.54×10 ⁻³ 0.51×10 ⁻³

となった。(f)の pressure transport 項は昼間の不安定時には energy loss を、夜間の安定時には energy gain を示す向きとなった。不安定時においては、Fig. 1 に示されたように pressure transport 項は energy gain を示すものと期待されたが、今回の観測では逆の結果となった。その結果不安定時には loss の総和が gain の総和よりかなり大きくなり、Fig. 11 に示すような大きな error を生じた。しかし安定時には、pressure transport 項 (gain), shear production 項 (gain), dissipation 項 (loss) の3項がほぼ釣り合っており、pressure transport 項を加えることで、ほぼ均衡のとれた収支となった。

5. ま と め

大気境界層における乱流エネルギー収支について、今までほとんど測定されなかった pressure transport の項を含め、各項を実測によって求め各項間の大きさを評価した。圧力変動のスペクトルに関しては、これまでの観測例と大差なく、周波数の $-5/3$ 乗で減衰するという結果となった。エネルギー収支における pressure transport 項は、不安定時には energy loss、安定時には energy gain を示し、不安定時にはこれまで考えられてきたのとは逆の結果となっている。しかし、安定時にはこの項を考慮することで、ほぼエネルギー収支を満足することがわかった。

今回試作した気圧変動計は水平方向の風向変動に対しては、 $\pm 20^\circ$ までは、動圧の影響はほとんどないと考えられる。しかし観測結果をみると、鉛直方向の風向変動もかなり大きく、不安定時には $\pm 20^\circ$ 程度にもなるが、この気圧変動計はスリットを水平に入れている関係上鉛直方向の風向変動に対しては、動圧の影響を受けやすいのではないと思われる。したがって、鉛直方向の大きな風向変動にも使用可能な気圧変動計に改良することが今後の課題である。

本研究の一部は文部省科学研究費補助金、特定研究(I) (No. 57109008; 研究代表者 山元龍三郎) によって行われた。

参 考 文 献

- 1) Wyngaard, J. C. and O. R. Coté : The budgets of turbulent kinetic energy and temperature variance in the atmospheric surface layer, J. Atmos. Sci., Vol. 28, pp. 190-201, 1971.
- 2) McBean, G. A. and J. A. Elliott : The vertical transports of kinetic energy by turbulence and pressure in the boundary layer, J. Atmos. Sci., Vol. 32, pp. 753-766, 1975.
- 3) Elliott, J. A. : Microscale pressure fluctuations measured within the lower atmospheric boundary layer, J. Fluid Mech., Vol. 53, pp. 351-384, 1972.
- 4) Huey, L. J. : A yaw-insensitive static pressure probe, J. Fluid Eng., Vol. 100, pp. 229-231, 1978.