

林の周辺における乱流の測定

Tamotsu ISHIDA, Teisaku KOBAYASHI and Hideo IMAI: Measurement of Atmospheric Turbulence around a Forest.

石 田 完*
小 林 禎 作*
今 井 秀 雄*

§ 1. ま え が き

海上から陸地へ移流してくる霧が林の影響を受けて消散する過程には、霧が林によつて直接捕捉される効果と、林の周辺の気温上昇によつて霧が蒸発する効果とが考えられるが、この捕捉効果も温度効果も空気の乱流によつて一層効果的となる。われわれはこの林の防霧作用にあずかっている乱流について測定を行い、霧水量に関する拡散方程式並びに大気中の熱伝導の方程式に含まれるところの大気の乱流の程度によつて決まるいわゆる渦動拡散係数（交換係数）——これによつて効果の大小が支配される——を求めた。

§ 2. 測 定 装 置

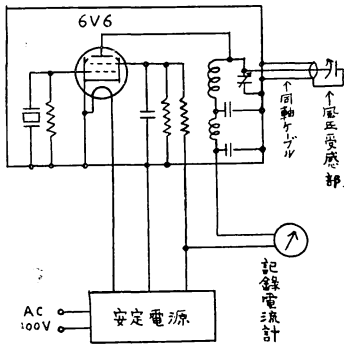
空気の乱流を測定するには熱線風速計を用いるのが普通であるが、われわれの場合には

1. 霧のなかで使用できること。
2. 風速の大きさの広い範囲にわたつて直線性であること。
3. 鉛直方向の風速については、上向き下向きの方向がそのまま記録されること。
4. 長時間の連続測定が出来るように写真などによらないペン書き記録が出来ること。
5. なるべく簡単な装置であること。

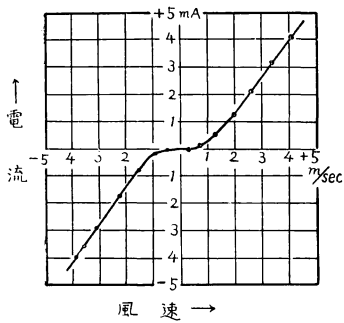
等の要求にしたがつて電気容量可変式とも云える風速計を新たに製作し使用した。

これはピアース型水晶発振器の陽極同調回路の微小な容量変化に対し、陽極電流が大きく変化する¹⁾ことを利用したもので、ピラム型風速計の羽をヒゲ全舞で束縛し、風力による羽のかたむきで、容量を変化させるようにしたものである。その電気回路は第1図のごとくで、容量変化に対する陽極電流の関係は第2図のようになる。羽の廻転角度、すなわちコンデンサーの廻転角度はだいたい風速の2乗に比例するからコンデンサーの廻転極板を適当な形にすると陽極電流は風速に比例するようになる。われわれが用いた風速計の特性は第3図に示されるように風速の極く小さい所を除いては直線的である。機械的構造、バリアブルコンデンサーの形の改良によつて、風速の小さなところまで良好な特性とすることも容易であらう。実際の構造は

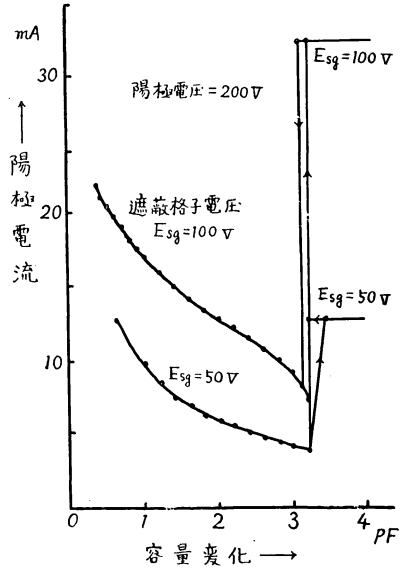
* 北海道大学低温科学研究所気象学部門



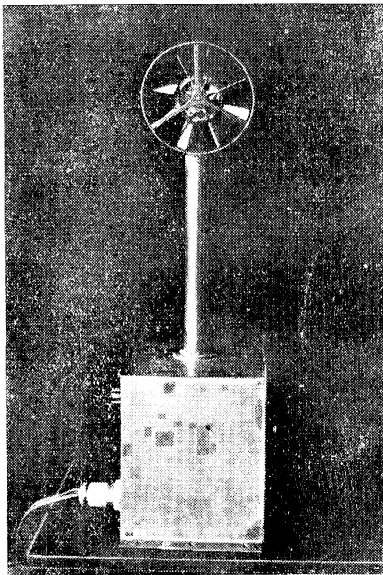
第1図 風速計の電気回路



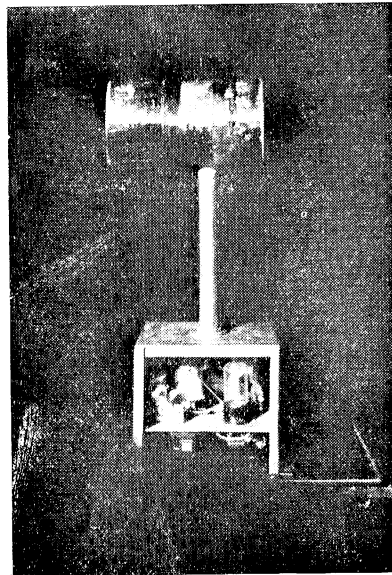
第3図 風速計の特性



第2図 水晶発振器の陽極同調回路の容量変化に対する陽極電流



第4図 A 風速計の正面



第4図 B 風速計の側面

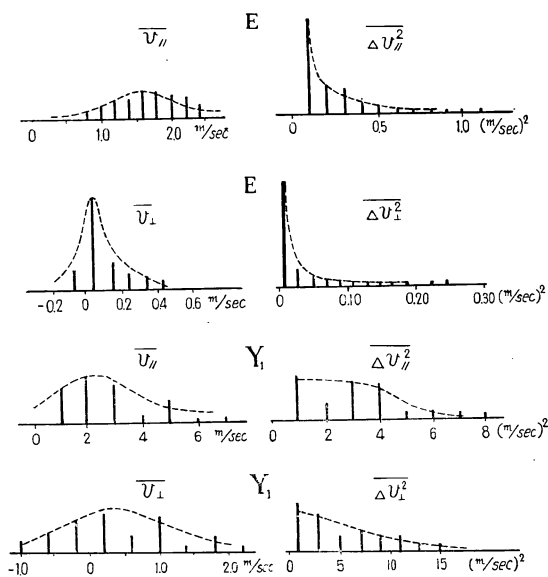
第4図の写真に示されるようなもので、これを測定箇所水平または垂直に設置し、陽極電源回路を延長して、交流 100V から得られる真空管式安定化直流電源および陽極電流を記録させる 10mA 記録電流計は屋内に置かれる。測定器の時定数は記録電流計のそれによつて制限され約 0.5 秒である。

§ 3. 測定の結果

測定は厚岸アイカツ岬の高度 70 m の台上にある防霧林で行われた。測定器は 2 台しか製作出来なかつたので、1 台は主風向の方向に水平に、他の 1 台は鉛直方向に設置して、この対を測定箇所にしたがつて移動した。測定箇所は林の前縁から風上に 60 m へだたつた草地の E 点^{*)}の観測塔上、高度 10 m および林内へ 20 m 這入つた Y₁ 点の観測塔上、高度 14 m と 18 m に選んだ。木の高さは 12~14 m なので丁度梢の所と、梢の上 4 m の所となる。

記録紙は 50 秒間に 1 cm という速さで送られたので記録曲線から 5 秒ごとの風速を読みとつた。以後の計算はすべてこの 5 秒ごとの数値によつてなされたので今までのところ 10 秒以上の周期の乱流のみが得られた。まず 50 秒ごとの平均風速 \bar{v} と、その平均風速からの偏差の 2 乗平均 $\overline{\Delta v^2}$ 、すなわち周期 10~50 秒の乱流の平均エネルギーの頻度分布を求めると第 5 図

のようになる。平均風速はだいたいガウス分布になるが林の上(Y₁点、高さ 18 m) のものは測定箇数が少ないためになめらかではない。垂直風速は下向きの場合を正にとつている。林の前面、上方ともに平均として下向きの風となつているが、これは地形、或いは林の構造の影響と考えられる。平均エネルギーは、林の前(E点、高さ 10 m) では水平成分、垂直成分ともに小さなエネルギーが大部分で大きい方に急速に減少しているのに対し、林の上では水平方向、垂直方向ともに小さいものから大きいものまで比較的一様に存在する。すなわち林の上では激しい拡散が起つていることを示している。



第5図 林の前(E点、高さ 10 m)と林の上(Y₁点、高さ 18 m)における 50 秒間の平均風速 \bar{v} と周期 10~50 秒の乱流の平均エネルギー $\overline{\Delta v^2}$ の頻度分布。指標 // および \uparrow はそれぞれ水平成分、垂直成分を表わす。

*) 本誌別稿の地図を参照

周期 10~50 秒の乱流の平均エネルギーの 30 分ごとの平均値を次表に示す。表中には平均エネルギーの平方根を平均風速で除した ($\sqrt{\Delta v^2} / \bar{v}$) いわゆる乱流の強さも示されているが、今の周期の範囲では平均風速と乱流エネルギーとの間に明らかな相関が見られないことは別に確かめられた。

林の前 (E点, 高さ 10m) 8月13日

| 時 | 間 | 17 h 00 m~17 h 30 m | 17 h 30 m~18 h 00 m |
|------|---------------------------------------------------------------------|---------------------|---------------------|
| 水平成分 | 平均風速 \bar{v} (m/sec) | 1.56 | 1.89 |
| | 平均エネルギー $\overline{\Delta v^2}$ (m ² /sec ²) | 0.410 | 0.157 |
| | $\sqrt{\overline{\Delta v^2}} / \bar{v}$ | 0.41 | 0.21 |
| 垂直成分 | 平均風速 \bar{v} (m/sec) | 0.38 | 0.24 |
| | 平均エネルギー $\overline{\Delta v^2}$ (m ² /sec ²) | 0.147 | 0.0242 |
| | $\sqrt{\overline{\Delta v^2}} / \bar{v}$ | 1.01 | 0.65 |

林の前 (E点, 高さ 10m) 8月14日

| 時 | 間 | 15h00m~ 15h30m | 15h30m~ 16h00m | 16h00m~ 16h30m | 16h30m~ 17h00m | 17h00m~ 17h30m |
|------|------------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 水平成分 | \bar{v} | 1.23 | 1.62 | 1.69 | 1.70 | 1.63 |
| | $\overline{\Delta v^2}$ | 0.137 | 0.156 | 0.278 | 0.188 | 0.238 |
| | $\sqrt{\overline{\Delta v^2}} / \bar{v}$ | 0.30 | 0.25 | 0.31 | 0.25 | 0.30 |
| 垂直成分 | \bar{v} | | | 0.18 | 0.06 | 0.04 |
| | $\overline{\Delta v^2}$ | | | 0.0625 | 0.0124 | 0.00765 |
| | $\sqrt{\overline{\Delta v^2}} / \bar{v}$ | | | 1.4 | 1.9 | 2.1 |

梢 (Y₁点, 高さ 14m) 8月6日

| 時 | 間 | 21h55m~22h25m | 22h25m~22h55m | 22h55m~23h25m |
|------|------------------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| 水平成分 | \bar{v} | 0.23 | 0.19 | 0.21 |
| | $\overline{\Delta v^2}$ | 0.104 | 0.0282 | 0.0019 |
| | $\sqrt{\overline{\Delta v^2}} / \bar{v}$ | 1.37 | 0.88 | 0.21 |

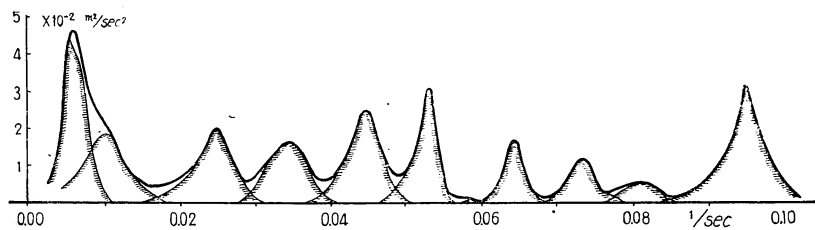
林の上 (Y₁点, 高さ 18m) 8月11日

| 時 | 間 | 12 h 48 m~13 h 18 m | |
|---|------------------------------------------|---------------------|---------|
| | | 水 平 成 分 | 垂 直 成 分 |
| | \bar{v} | 3.30 | 0.50 |
| | $\overline{\Delta v^2}$ | 3.43 | 6.70 |
| | $\sqrt{\overline{\Delta v^2}} / \bar{v}$ | 0.56 | 5.1 |

これから林の上の乱流の平均エネルギーは、林の前のものの水平成分では 10 倍以上、垂直成分では 100 倍以上であることが判る。

交換係数

大気中の乱流による拡散の現象を取り扱うには、問題の性質——すなわち樹冠の大きさ、林の高さ、林の広がりや云つたような対象の大きさ、或いは取り扱う現象の時間によつて乱塊の大きさを適当に制限しなければならないことが知られている。そこでわれわれはまえがきに述べたような意味での、拡散の効果の大きさを支配する交換係数をいろいろな大きさの乱塊（いろいろな周波数における乱流エネルギー）について求めた。



第6図 林の前 (E点, 高さ 10m) における垂直方向の乱流のエネルギースペクトル。
交換係数を計算するためにいくつかの独立したスペクトル (個々の乱塊) に分解する

乱流のエネルギースペクトルをみると (第6図), 比較的孤立したスペクトルからなっている。この孤立した1つのスペクトルは近似的に減幅調和振動のスペクトルとみなすことが出来るから、風速 $v(t)$ を

$$v(t) = \sum_{i=0}^n v_i(t)$$

の如く、お互に独立な乱塊 $v_i(t)$ ——ここで $v_i(t)$ は ν_i から ν_{i+1} までの振動数を含むものとする——にわけると乱流を

$$\frac{dv_i}{dt} + \beta_i v_i + \omega_i^2 x_i = p_i(t)$$

のようにモデル化することが出来る。ここで

$$\frac{dx_i}{dt} = v_i, \quad \omega_i = 2\pi\nu_i$$

また $p_i(t)$ は全くでたらめな外力であつて

$$\begin{aligned} \overline{p_i(t) p_i(t+\tau)} &= 0, & \tau \neq 0 \\ &= 2D_i, & \tau = 0 \end{aligned}$$

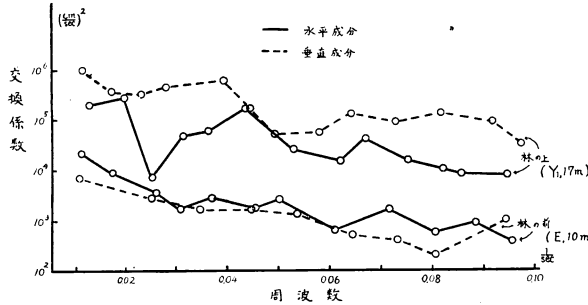
のような性質をもつものとするれば各乱塊についての交換係数は

$$A_i = -\frac{D_i}{\beta_i \Omega_i}, \quad \Omega_i = \omega_i^2 - \frac{\beta_i^2}{4}$$

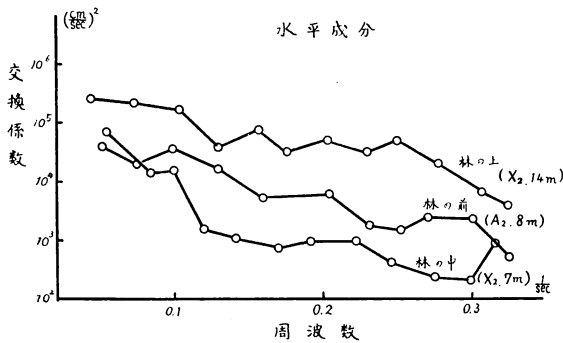
の如く与えられることが今堀²⁾ (さらに詳細には堀³⁾) によつて示されている。実際の計算には 26 年度の報告¹⁾ にあるように取り扱いやすい形に変形して、乱流のエネルギースペクトル $E_i(\nu)$ から

$$A_i = \frac{T}{2\pi\nu_i} \int_{-\infty}^{\infty} E_i(\nu) d\nu$$

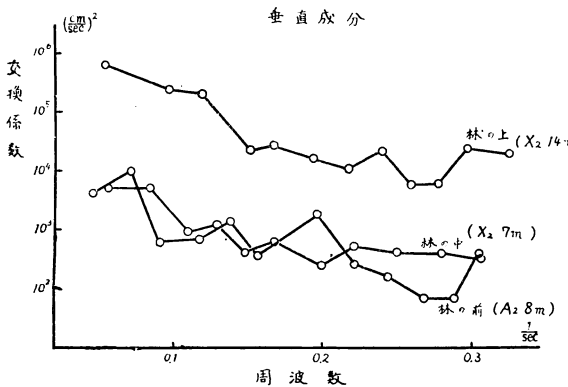
によつて計算した。ここで T は周波数スペクトルを求める際の分析時間である。



第 7 図 いろいろな大きさの乱塊についての交換係数
林の上は 8 月 11 日 13 時、林の前は 8 月 13 日 18 時の測定、林の高さは約 14m



第 8 図 いろいろな大きさの乱塊についての交換係数
26 年 2 月 23 日落石における測定、林の高さ約 12m



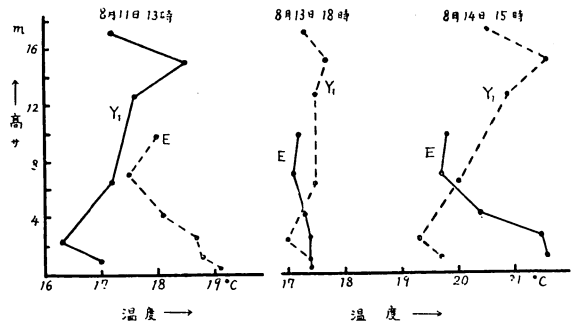
第 9 図 いろいろな大きさの乱塊についての交換係数
26 年 7 月 23 日落石における測定、林の高さ約 12m

第 7 図は林の前と林の上について求められた水平方向、垂直方向の各振動数に対する交換係数であつて、6 分間の風速の 72 等分周期解析から得られた乱流エネルギー Spektrum から計算された。前に述べたように風速は 5 秒ごとに読みとられたのでここでは振動振が 0.1 より高い乱流については求められていない。そこで 26 年度の落石における熱線風速計の記録について 108 秒間の 72 等分周期解析を行い交換係数を求めたものを第 8 図、第 9 図に示す。これは 26 年度に報告された振動数 0.3~0.4 と本年度の厚岸における振動数 0.01~0.1 の範囲の中間にある。林の前と上とは交換係数において 1 桁以上の開きがあるが、本年度厚岸において求められたものは、林の前については 8 月 13 日 18 時、林の上については 8 月 11 日 13 時の観測から得られたので、両者を比較する場合、特に垂直方向の乱流については、気温の垂直分布の相異を考慮しなければならない。各観測時刻における気温の垂直分布を示したのが第 10 図であるがこれを見ると、林の前方と林内における垂直温度分布の相異は時刻の相異によるというよりも

しろ草原と林内の特性を示していると考えられる。したがって交換係数の大きな値の開きは林の影響によるものとみてさしつかえないであろう。

各乱塊はそれぞれ独立なものとして取り扱ってきたので、ある周波数範囲の交換係数は、その範囲内の個々の交換係数を加え合せることによつて求められる。次表に

26年度落石の観測から得られたものも含めて3つの周波数範囲の交換係数を示した(単位は cm^2/sec)。



第10図 気温の垂直分布、実線は乱流測定時におけるその場所の1時間平均気温、点線はその時の他の地点における温度

周波数 0.01~0.1

| | 林の前 (高さ 10 m) | 林の上 (高さ 18 m) |
|------|-------------------|-------------------|
| 水平成分 | 4.5×10^4 | 8.9×10^5 |
| 垂直成分 | 1.7×10^4 | 3.4×10^6 |

周波数 0.05~0.3

| | 林の前 (高さ 8 m) | 林の中 (高さ 7 m) | 林の上 (高さ 14 m) |
|------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 水平成分 | 1.3×10^5 | 1.0×10^5 | 9.3×10^5 |
| 垂直成分 | 2.0×10^4 | 1.5×10^4 | 1.2×10^6 |

周波数 0.3~0.4

| | 林の前 (高さ 14 m) | 林の上 (高さ 14 m) | 林の後 (高さ 14 m) | 林の前 (高さ 8 m) | 林の中 (高さ 8 m) |
|------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------|-----------------|
| 水平成分 | 4.5×10^3 | 1.9×10^4 | 1.5×10^4 | 10^5 | 2×10^3 |
| 垂直成分 | 13? | 2.4×10^4 | 4.6×10^3 | 2×10^3 | 10^3 |

§ 4. む す び

林に固有なものとして林の構造と乱流のエネルギースペクトル或いは交換係数との関係を明らかにすることは重要であるが、Bartlett⁵⁾が注意しているように、乱流のようなランダムな要素を含んだ現象については十分に多くの資料によつてスムーズイングしたスペクトルでないという意味がないのであつて、われわれの場合においてはまだ観測資料の不足、計算操作の不足からスペクトルそのものに充分意味を持たせるまでに至っていない。簡単な境界条件における乱流場の測定のような基本的研究或いは林に捕捉される霧水量の直接の測定から求められる交換係数と、乱流から得られるそれとの関係を明らかにすること等によつて不完全なわれわれの結果をおぎなつてゆけば防霧林の設計に有用な、さらにくわしい林の霧に関する捕捉能が求められるであろう。

文 献

- 1) 野村民也 (1950): 微小容量変化の検出, 生産研究, 第2巻, 第9号, 376.
- 2) K. Imahori and J. Hori (1951): On the Diffusion by Turbulent Motion. Journ. Met. Soc. Japan. 29, No. 10, 328.
- 3) 堀淳一 (1953): 林の周辺の乱流による拡散が霧粒の捕捉に与える影響について (抄録), 本誌 88.
- 4) 石田完, 楠宏, 浅田宏, 今井秀雄 (1952): 乱流の測定及びその分析, 防霧林に関する研究, 第2輯, 259.
- 5) M. S. Bartlett (1950): Periodogram Analysis and continuous Spectra. Biometrika. 37, Parts I and II.

Résumé

In the foggy season of 1952, the measurement of the horizontal and vertical components of wind velocity at several heights around the fog-preventing forest on a marine terrace near Akkeshi was carried out with electro-mechanical anemometers. From the energy spectra of turbulent flow the Austausch coefficient (the exchange coefficient) was computed according to the theory of diffusion by turbulent motion established by K. Imahori and J. Hori (Journ. Met. Soc. Japan, Vol. 29, No. 10, pp. 327—335, 1951). The Austausch coefficient of turbulent flow in the range of frequencies 0.01~0.4 c.p.s. came out to be $10^3 \sim 10^6$ cm²/sec around the forest at the height of over ten meters (much of the same height as the trees).