

防府市西目山火災雲の解析

塩月善晴*・藤原輝男**

Thermal Analysis of Cumulus Clouds Produced by Mountain
Fire in Hofu City, Yamaguchi Prefecture

Yoshiharu SHIOTSUKI and Teruo FUJIWARA

Abstract

Cumulus clouds formed by a hill fire at Mt. Nishime in Hofu City were observed with the use of photogrammetric method and some analyses of their growth characteristics were done with the theory of "thermal". It results that growth characteristics of present "artificial" thermal is much similar to thermals observed both in the atmosphere and in the laboratory experiments. Because of unusual dry air layer of 8% relative humidity at 700mb level, present thermals cannot develop over the height of 2500 meter and none of precipitation from them are observed.

Results of Analyses

- (1) Mean height of cloud base (or cloud condensation level; CCL) is 2050 meters.
- (2) Life time of present thermal is 5-6 minutes and this is shorter than usual atmospheric thermal.
- (3) The more vertical velocity has thermal, the higher level it can reach and also the longer life time it can get.
- (4) The erosion level of thermal is nearly in accord with the level at which the greatest deceleration occurs and the thermal has the maximum diameter.
- (5) Excess temperature of thermal near the burning ground is estimated 10 degree in centigrade. 10°C is obtained by bringing down the air parcel of thermal at CCL to the ground surface along the dry adiabat.
- (6) On EMAGRAM as thermal has yet the excess temperature 1°C at CCL, it could develop up to Cumulonimbus (Cb) along the wet adiabat. But in fact it cannot develop so much because it evaporates remarkably in unusual dry air layer at 700mb.
- (7) Excess temperature computed by "Momentum Eq.(4)" changes its sign at the erosion level as well as the atmospheric and experimental thermals.
- (8) Tall thermal has the low value of Z_0 (vertical origin of thermal) and the high value of D (thermal diameter) and W (vertical velocity) at each level.

1. ま え が き

昭和42年9月18日午後3時半ごろ、山口県防府市右田の西目山(312m)の西側中腹の雑木林から出火した山火事は、折りからの日照り続きの乾燥した山林で延延50時間燃えつづけ、焼失面積は600ha、損害は8,500万円にのぼった。この火事に伴って積雲が発生したが、折よくその一部を写真観測することができた

のでその成長発達について解析を行なった。なお、降雨があったかどうかの詳しい報告は受けていないが、写真観測では認められなかった。

2. 解 析

2.1 発達状況

写真例から判るように火災雲はほぼ垂直に発達して

* 九州大学農学部気象学教室

** 土木工学教室

おり、火災現場の位置が判っているので簡単な写真解析¹⁾(一点解析)により雲の位置、大きさなどを計算した。Fig. 1 は火災現場を示す地図であり、撮映場

所は山口大学農学部(山口市)で、火災現場から約10 kmの地点である。

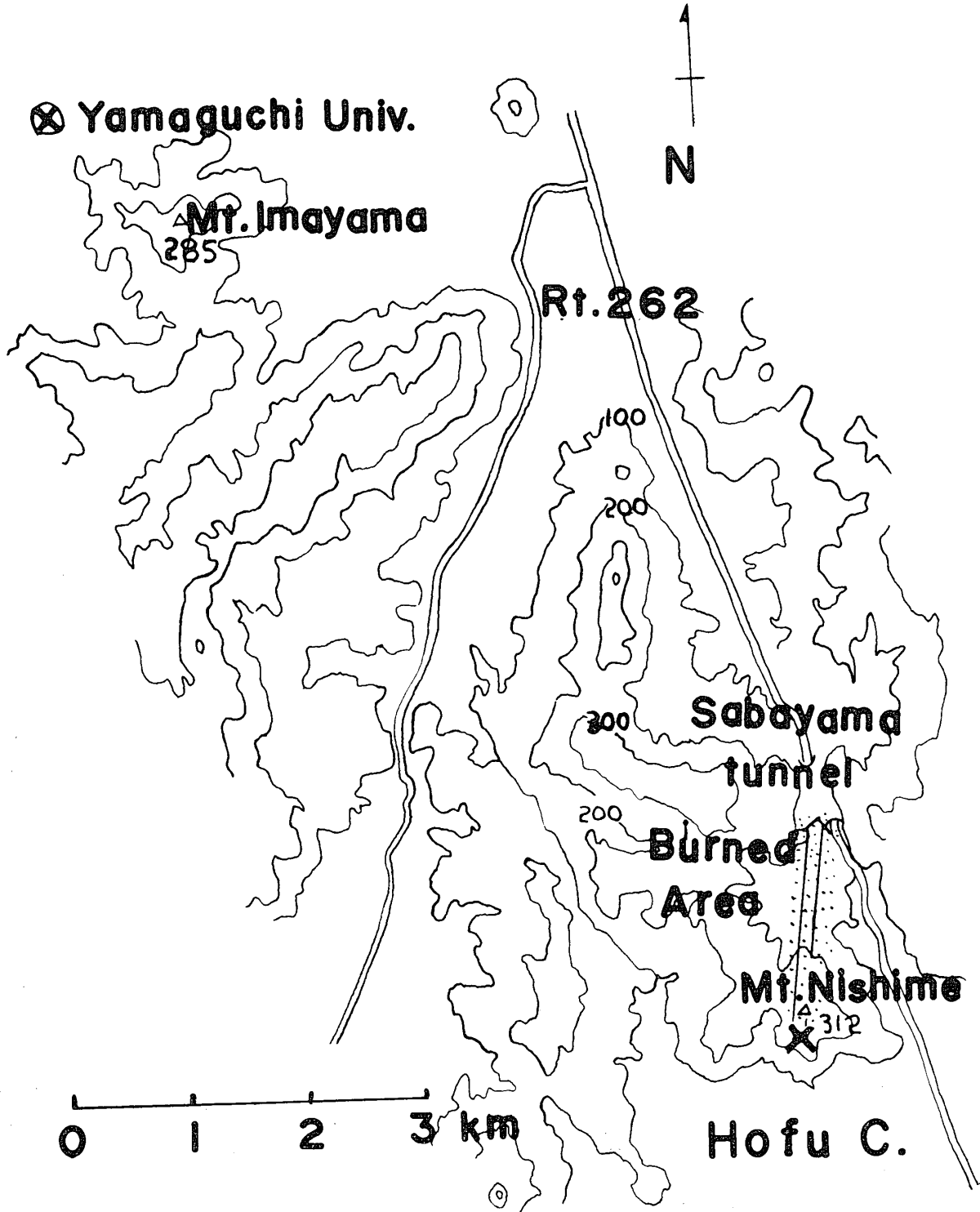


Fig. 1 Map of mountain area in Hofu City

⊗ and × indicate the observing camera location and the occurrence point of fire respectively

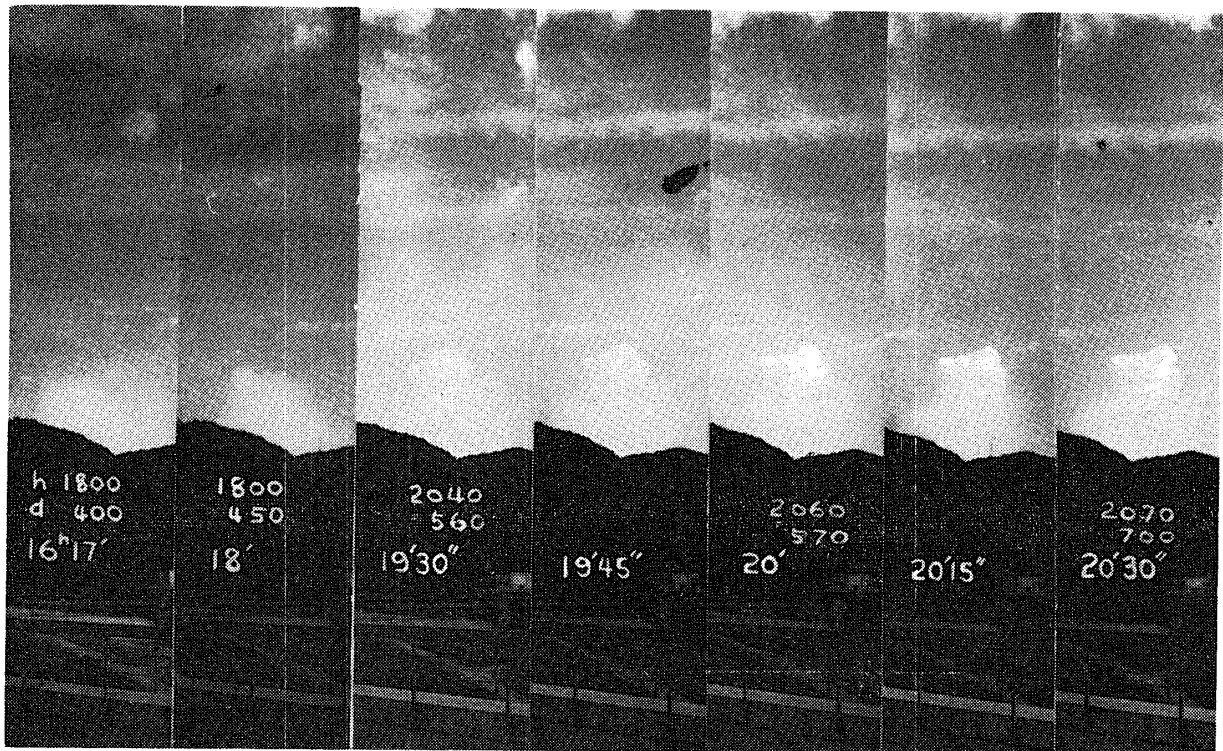


Photo. 1 Pictures of growing cumulus clouds formed by a mountain fire for 16^h 17^m ~ 16^h 20^m 30^s, Sep. 19, 1968. *h* and *d* mean the height and the diameter of thermal in meter respectively

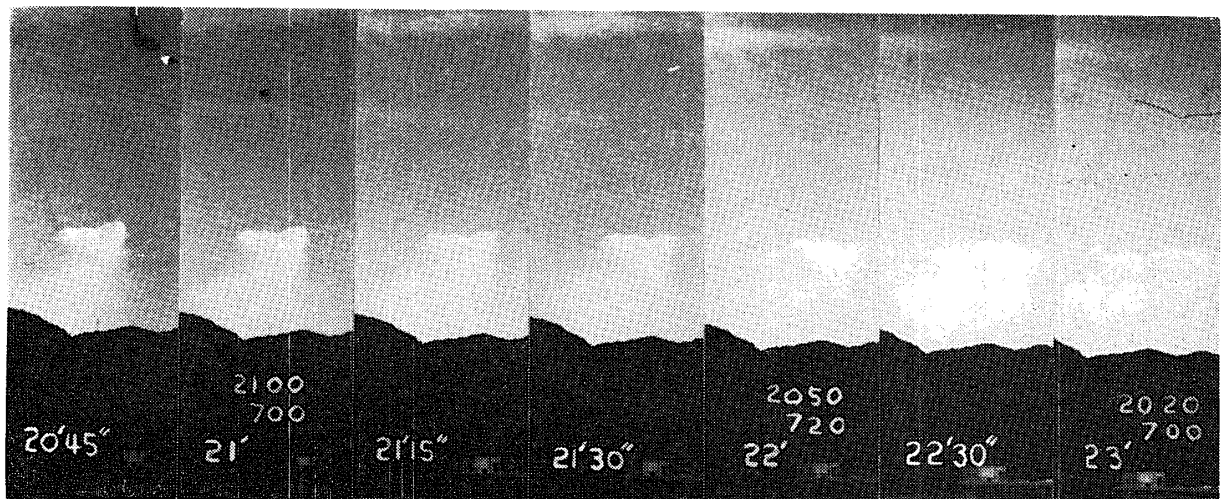


Photo. 2 Continued pictures from Photo. 1 for 16^h 20^m 45^s ~ 16^h 23^m

Photo. 1, 2, 3は、サーマル（上昇温暖気塊）の発達を示す写真例であり、写真中の数字はそれぞれ時刻、サーマルの高さ *h* (m)、直径 *d* (m)である。Photo. 1, 2は9月19日16時17分から23分までのもので、17分、18分はまだ煙の状態であるが19分30秒にはすでに雲になっている。22分ではサーマルの右上方が崩れ始めているが、サーマルの直径はこの時最大値

(720m)を示し、23分には頂部で全体的に erosion が起きている。なお Photo. 1, 2でははっきりつかめなかったが、Photo. 3は煙が凝結高度へ達して雲になった部分を明らかに示している。時間は9月19日15時52分から55分までで、52分では高さ1,900mでまだ煙であったのが53分では1,960mになって凝結高度に達している。すなわら写真では煙の頭が灰色から白

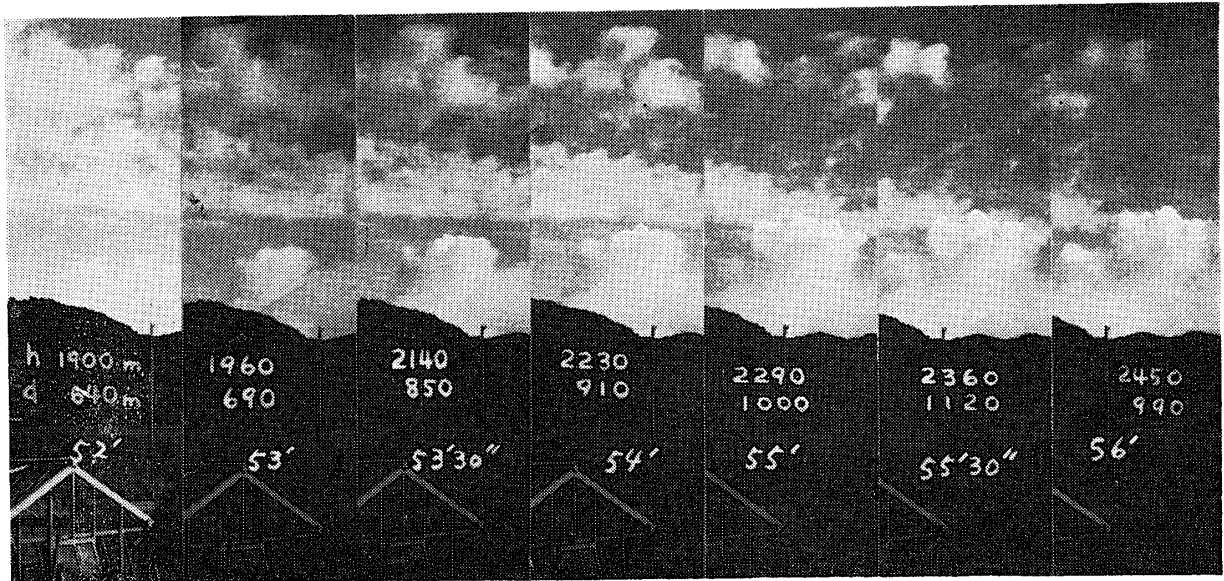


Photo. 3 Another pictures for 16^h 52^m~56^m. It is found that thermal begins to condense at 16^h 53^m (1960 meters)

輝化することで判るが、Photo. 1, 2 と同じように 55分30秒にはerosion が起こっており、直径はやはり最大値 1,120m になっている。56分ではさらに高度は高くなるがサーマルは衰退しつつあり、この写真の左側では新しいサーマルの出現したことが判る。以下9月19日15時20分から16時45分までに出現したサーマルについての発達状況について調べた結果を示すと、

(1) サーマルの寿命時間は大体 5~6 分²⁾ で自然のそれ³⁾ の約半分である。

(2) サーマルの最大垂直速度が大きいほど到達高度は高い。(Fig. 2)

(3) サーマルの到達高度が高いほど寿命時間は長い。(Fig. 3)

(4) サーマルの崩壊 (erosion) の始まる高度は垂直方向の最大減速が起こる高度に相当し (Fig. 4), あとのサーマル解析でも判るように、これはまたサーマルの直径が最大になる高度にも対応する。

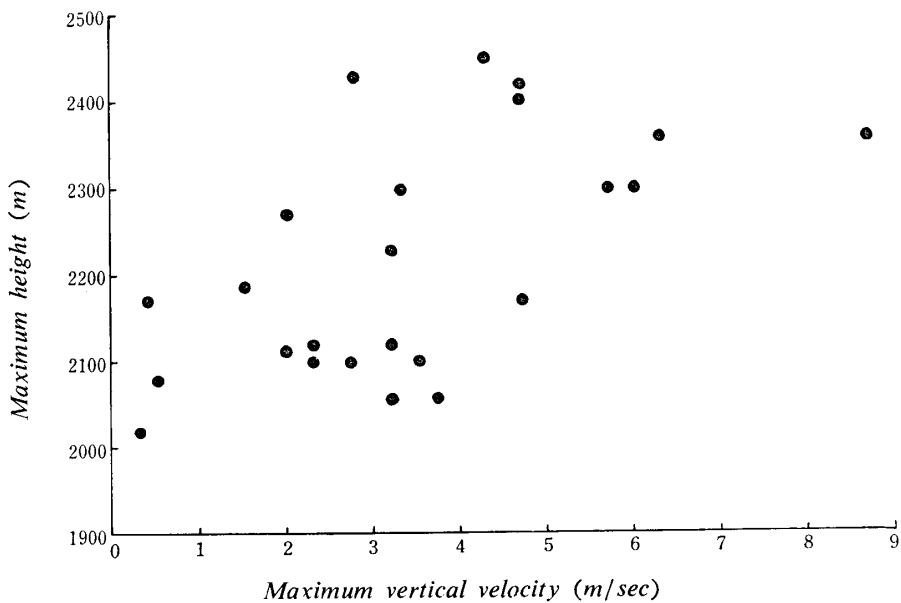


Fig. 2 Maximum height of thermal versus maximum vertical velocity

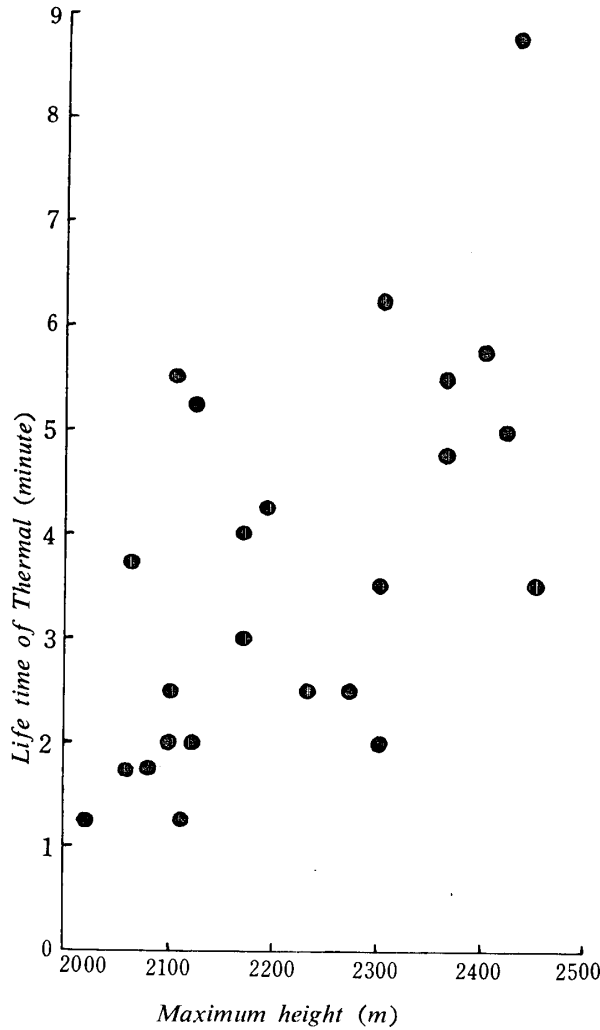


Fig. 3 Maximum height of thermal versus its life time

2・2 エマグラム

つぎにエマグラムより見たサーマルの発達についての考察を行なう。Fig.5 は9月19日15時の福岡のエマグラムで、風向、風速は15時のものであるが、気温、露点温度は9時と21時の平均値をとった。火災現場から福岡まではほぼ100kmも離れているが、付近に高層気象観測所がないため、福岡のもので考察する。いま、通常の空気なんらかの原因で持ち上げられた場合、乾燥断熱線で上げて飽和比湿線と交わる場所を見ると約1,000m位であり写真でもこの高さのところに小積雲が見られる。(エマグラム上では乾燥断熱で上げた時、厳密には1,000mあたりで状態曲線より冷たくなるが、この点多少の誤差を含んでいる。)今回は火災による加熱のため地上の空気はさらに高い温度で上昇するはずであるが、写真解析から求めた平均のサーマルの凝結高度は2,050mであるので、この高さより乾燥断熱線に沿って地上(火災現場は約1,000mb

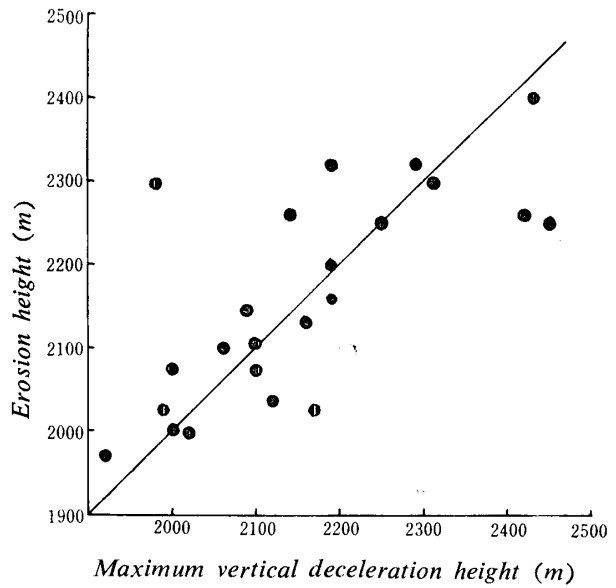


Fig. 4 Erosion height versus height at which maximum vertical deceleration occurred

の所)へおると約30°Cとなって、自然の空気に対して10°Cの超過温度を持つことになる。

凝結高度でサーマルはまわりの空気に対してまだ1°C位の超過温度 $\overline{\Delta\theta}$ をもっており、さらに上昇することになり、今度はサーマルは飽和しているので湿潤断熱線で上げれば積乱雲まで発達することになる。しかし、実際には写真例から判るようにサーマルの雲頂はせいぜい2,500m位であるのは、700 mbの相対湿度8%もの超乾燥層のためと思われる。すなわち、サーマルはまわりの空気との混合により、著しく蒸発したものであると思われる。この混合過程を Scoser⁴⁾ にならって、エマグラムで推定して見よう。いま700 mbあたりから、サーマルおよびまわりの空気を断熱的に凝結高度付近におろした場合、サーマルは9.5g/kg(露点14°Cに対する)の比湿をもったまま湿潤断熱線に沿って10°C位の気温となり、まわりの空気は乾いているので比湿0.6g/kg(露点28°Cに対する)をもって乾燥断熱線に沿って16°Cとなり、混合が1対1の割合で行なわれたとすると混合空気は温度13°C、比湿5g/kgをもつことになる。これを再び乾燥断熱線に沿って700mbまで戻してやると、一応飽和には達するが、気温は周囲の空気よりはるかに低くなるので、実際は状態曲線と交わる場所で上昇は止まってしまうはずである。この交わる高さを求めると約2,500mで実際とよく適合する。Fig.5の▲印は凝結高度(CCL)より、乾燥断熱線と湿潤断熱線の間で上げた場合、これも2,600m位で状態曲線と交わる。

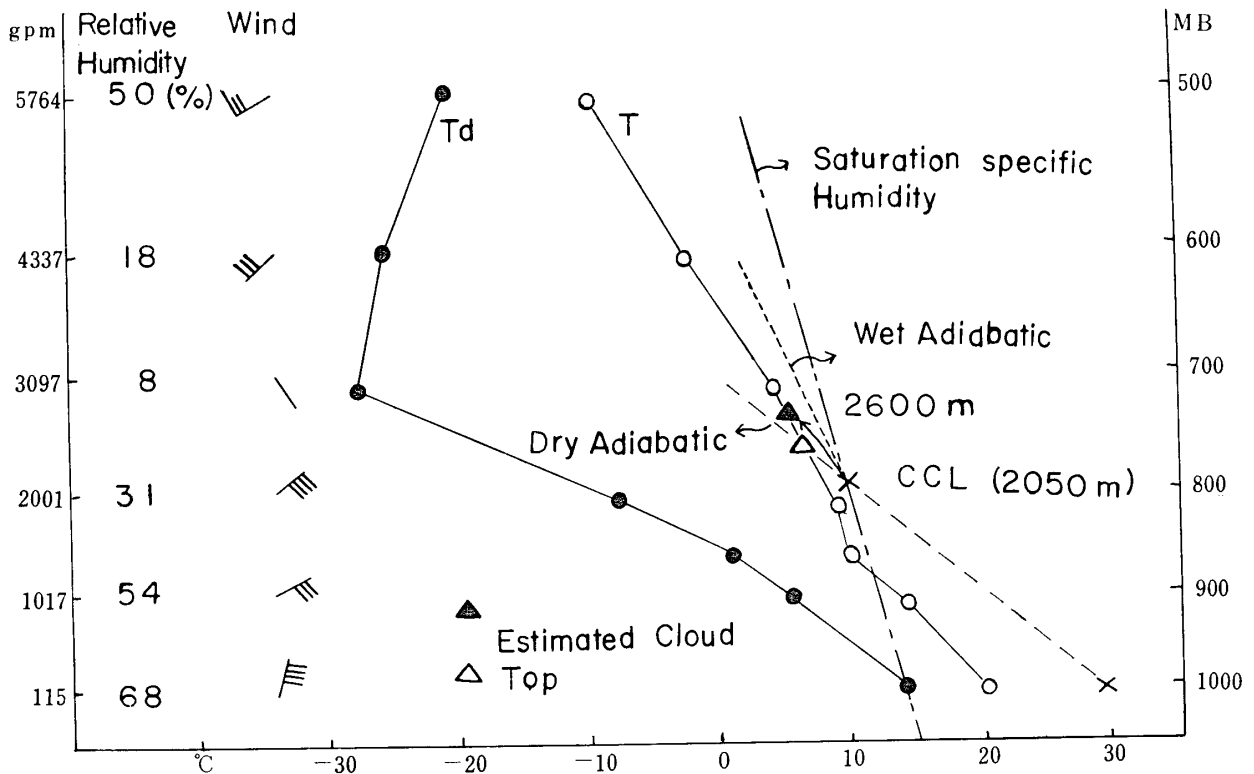


Fig. 5 EMAGRAM

1968. Sep. 19. 1500 JST, Fukuoka, Japan.

2・3 サーマル解析

以上のように、今回の山火事によるサーマルの発達
は従来の自然のものに対して規模は小さいが、その状
況はほぼ類似しているのので、以下さらにサーマル理論
に従って解析を行なう。

一般にサーマル発達について次式が成り立つ。³⁾

$$D = m(Z - Z_0) \quad (1)$$

$$t = k(Z - Z_0)^2 \quad (2)$$

$$W^2 = C^2 g \bar{B} (dD/dZ) \quad (3)$$

$$dW/dt + 3(W^2/D)(dD/dZ) = (1/\alpha)g\bar{B} \quad (4)$$

ここで D: サーマルの直径

Z: 高度

Z₀: 発現高度 (virtual origin)

W: 垂直速度

m: 拡がりの係数

c: フルード数

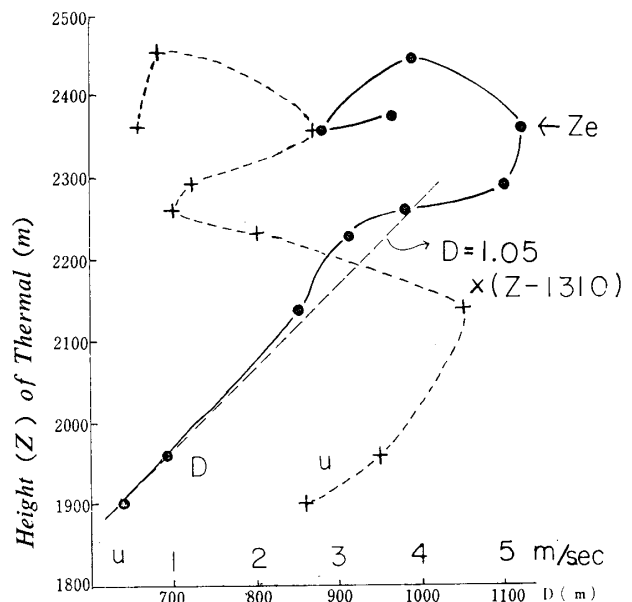
g: 重力の加速度

\bar{B} : サーマルの周りの空気に対する超過温
度の周りの空気の気温 (°k) に対する比

α, k : 定数

である。ただし、c, α は Saunders⁵⁾にならって中立状
態での値1.2, 1.5をそれぞれ使用した。 Fig. 6 以下
Fig. 9までは上の四つの式について調べたものの代表

例 (サーマル No.13, 9月19日15時51分~57分) で
ある。



Vertical velocity and thermal diameter

Fig.6 Height of thermal versus diameter
and vertical velocity.

Ze indicates erosion height

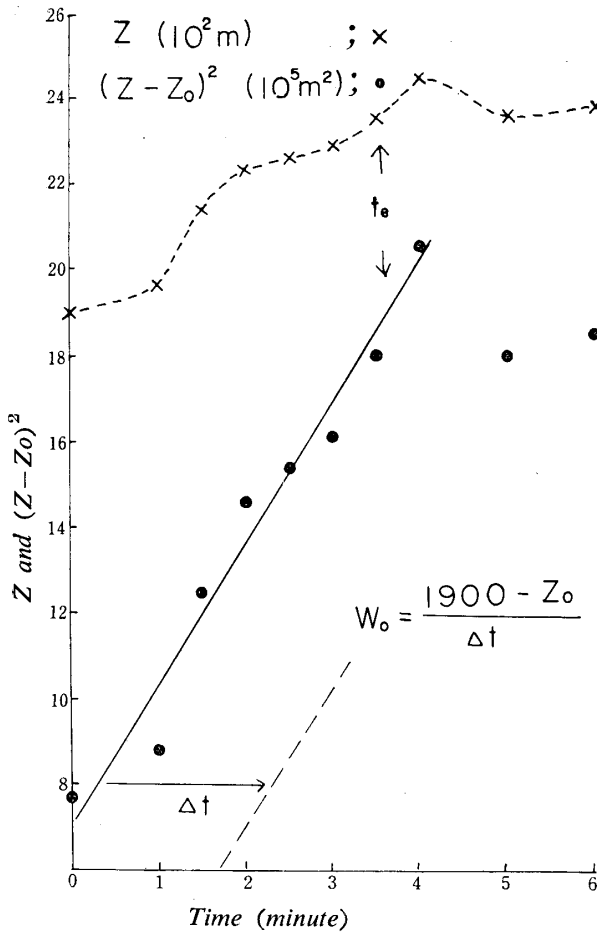
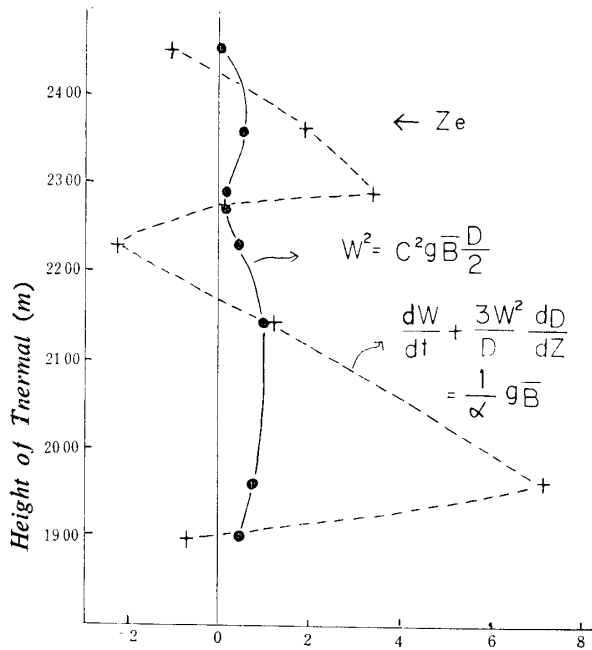


Fig. 7 Time change of thermal height and $(Z-Z_0)^2$ versus time (Eq.2)

Fig.6 は垂直速度 (+) 及びサーマルの直径(•)の高度に対する分布を示す. 解析でサーマルの崩壊高度 Z_e は直径が最大になったときの高さを用いるが, 図によればこれは垂直方向の最大減速が起こる高度および, この場合の目視の Z_e 2,400m にはほぼ一致する. また Z_e までは D はほぼ直線に乗っていることが判るが, 最小二乗法で求めると Z_0 は 1,310 (m), 拡がりの係数 m は 1.05 となった. Fig. 7 はサーマルの高度 (Z) の時間変化 (X) と $(Z-Z_0)^2$ の時間変化(•)を見たもので, 縦軸 Z は 10^2 m 単位, $(Z-Z_0)^2$ は 10^5 m² 単位でとっている. 図から判るように第(2)式は erosion の起こる時刻 t_e まではよく適合している. 図中の時間 t は解析した最初のサーマル (高さ 1,900 m) からの時間をとっているため, 実際の $t=0$ (Z_0 の時刻) はさらに左へ平行移動しなければならない. これは点線の直線式を縦軸に沿って $(1,900-Z_0)^2$ だけ平行移動した時の横方向のズレ Δt で示される. したがって Z_0 から最初の写直のサーマルの高さ 1,900m までの平均上昇速度は図に示した $W_0 = (1,900 - Z_0) / \Delta t$ で与えられる. Fig.8 は各高度での超過温度 $\overline{\Delta\theta}$ を Scorer の式 (実線は(3)式) 及び運動量方程式 (点線は(4)式) よって求めたものを示す. 図によれば Scorer の式の方が実際的な値を示しており, また, 運動量方程式よりの $\overline{\Delta\theta}$ は大きな振れを示しているが, Z_e 付近で $\overline{\Delta\theta}$ が正から負へ移行するのは従来の結果と同じである. ただし自然サーマルの場合は正から負



Computed Excess Virtual Temperature
Fig. 8 Height of thermal versus computed excess temperature determined from Eq. (3) and (4)

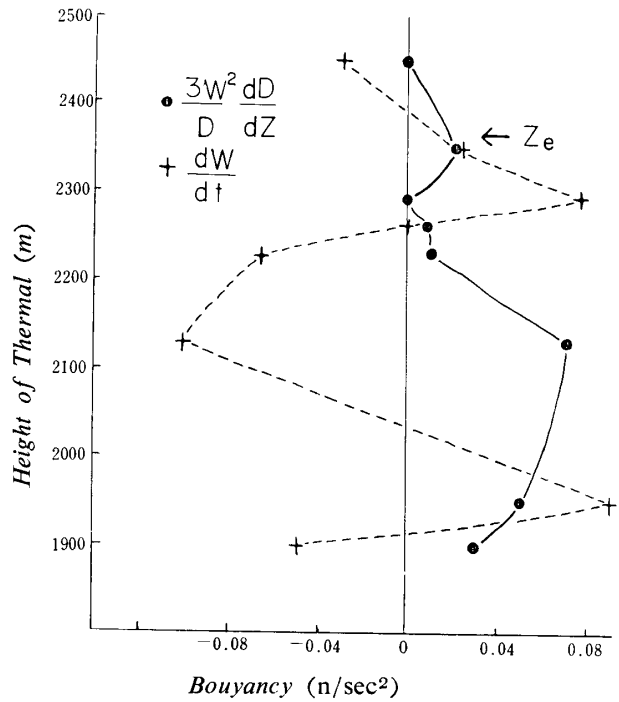


Fig. 9 Two components of buoyancy in Eq.4 versus thermal height

への移行が Z_e より低いところで起こるのに対し、今回は Z_e より高いところで起こっている。このことは自然の場合は、正から負へ $\overline{4\theta}$ が移行してもまだ発達を続けることを意味するのに対し、今回の場合のようにそれ以前に erosion が起こることはやはり超乾燥層のためと思われる。Fig.9 は式(4)の運動量方程式中の浮力に対する二つの成分、エントレインメントおよび

垂直加速度の影響の大きさを見たもので、これによると、両者は高度 2,100mあたりで大きな逆相関を示しており、これはエントレインメントが大であれば垂直加速度 dW/dt の減少があることを示す。

3. 結 言

Table 1 Summary of data on thermals

Thermal	Zmax m	Zo m	Zb m	Ze m	Ze' m	Db m	De m	m	Wo m/sec	Wb m/sec	We m/sec
No. 13	2450	1310	2050	2360	2370	770	1120	1.05	4.9	6.0	2.7
15	2190	1680	2040	2120	2190	470	510	1.32	2.8	1.5	0.9
21	2300	1520	1910	2150	2300	640	1060	1.71	6.4	6.3	2.5

where Zmax : Maximum height of thermal
 Zo : Height of virtual origin
 Zb : Height of thermal beginning to condense
 Ze : Erosion height determined by thermal diameter
 Ze' : Erosion height by observation
 Db : Thermal diameter at condensation level
 De : Thermal diameter at erosion height
 m : Broadening coefficient
 Wo : Vertical velocity at virtual origin
 Wb : Vertical velocity at condensation level
 We : Vertical velocity at erosion height

Table はサーマル解析を行なった結果の代表例を示したものである。表内の添字 o, b, e はそれぞれサーマルの発原点高度、雲底高度、崩壊高度を示し、Zmax. は最大到達高度、Ze' は目視による崩壊高度を

示し、単位はそれぞれmおよび m/sec を用いた。これによると背の高いサーマルほど発原高度Zoは低く、各高度での直径および垂直速度は大である。また、拡がりの係数は自然サーマルの0.5~1に対して大きな値を持っているが、これは今回の特徴であろう。以上のように、今回の火災サーマルは従来のサーマル理論および観測にほぼ類似したものであることが判る。今後は火災サーマルによって果して降雨が期待できるか（これができれば真の意味での人工降雨である）について数値実験などに努力を向けたいと思う。

最後に高層気象データについては福岡管区気象台に大変お世話になり、記して謝意を表する次第である。

参 考 文 献

1. 孫野長治, 葛西俊行: 天気, 13, No. 9, 325 (1966)
2. 櫻井兼市: 天気, 10, No. 4, 136 (1963)
3. M. Grass & T. N. Carlson: Jour. Atmospheric Sci. 20, 397 (1963)
4. R. S. Scorer: "Natural Aerodynamics", Pergamon Press, 261 (1958)
5. P. M. Saunders: Jour. Meteorology, 18, 451 (1961)

(昭和43年11月18日受理)