

暴風時における雨滴あるいは水滴の破壊作用について

光 田 寧

THE EFFECTS OF RAIN OR WATER DROPS ON STORM DAMAGES

By Yasushi MITSUTA

Synopsis

The effects of rain or water drops on storm damages are studied. The increase of mean air density from rain water contained in the air is negligibly small and wind force exerted on the structure does not increase even in heavy rain. However, the momentum of each droplet is estimated to be large enough to destroy a small part of structures, such as coating surface.

1. は し が き

本研究の目的は雨滴あるいは海面より舞上った水滴が空中に混在している場合、暴風の機械的破壊作用がそれを含まない場合に比して増大するかどうかということを再検討することにある。暴風雨の中に立てば顔に当る雨滴は我々に痛みを感じしめるし、また窓ガラスを打つ雨滴は非常に激しい音を立てる。しかし、その強さが我々が構造物を設計したりする時に考慮しなければならないほどの破壊作用を有するものかどうかということについてはあまり詳しく調べてられなかったのが実情である。

2. 問 題 の 概 要

1932年に Gherzi¹⁾ はこの問題に着目し、台風中の暴風雨の際には空気中には体積比にして約50%ほどもの雨水が含まれることがあり得るということを提案した。この考えによれば豪雨時には空気の密度が雨滴を含まない場合の500倍にもなることがあるということで、それに比例して暴風の破壊力も増加することになり、事実とすれば重大な問題である。しかし、この雨水の含有量から逆算すれば、降雨強度が5000mm/secにもなるということになり、1秒間に5米も水がたまることなど現実と考えられず、あまりにも過大である。また、このような提案にもかかわらず、風の破壊力を考える場合に雨滴の混存まで考慮に入れたという例は見られないようである。その後、1955年 Heywood²⁾ はこの考えが誤っていることを指摘し、現実に関測された最大の降雨強度から雨水の空中混在量を逆に推算することを試みた。彼は Jennings(1950)³⁾ の調査による最大の降雨強度すなわち、1926年 California で観測された1分間 16.5mm という値を利用し、雨滴の平均落下速度 9m/sec を仮定して、空気中に含まれる雨水の量は体積比にして約0.003%、空気密度の増加量として高々3%ぐらいにしかならないとした。これによって空中に雨滴が混在すること考えに入れても、風圧力の平均的な増しに対しては問題にならないということが一応示された。

しかし、以上の考えは雨滴の混入が平均的な空気密度の増大に影響するかという点で雨滴の影響を考えているのであって1つ1つの雨滴が破壊の原因になることがあるかどうかということについては考察されていない。たとえ雨滴は小さくても、その衝突によって極く小規模な破壊が生じ、それが原因となって大きな被害となることも充分あり得ることである。また、実際に台風通過後の被害を調査して見ると、雨滴の破壊作

用が被害の原因となっていると考えることによって説明が出来るような被害がかなりある。それは、構造物の全体的な破壊というようなものではないが、高い構造物たとえば煙突や鉄塔の風上に当る部分の塗装がはげるといふ被害である(第5図参照)。これは地上数十米のところあるいは海岸においても見られるところから地表より舞上った石や砂がその原因になっているとは考え難い、また単に風圧だけを考えたのでは高々 100gr/cm^2 の圧力にしかならないからこれだけでは破壊の原因とはなり得ない。従って雨滴が何らかの形でその原因と関係していると推論する他ない。このような点も考えて、Heywood の行った考察の内容をも含めて雨滴の混在による暴風の破壊作用の増大の有無を再検討することにしたのである。

ところで、実際風が最も強い状態と雨が最も激しい状態とが同時に発現しているのかどうかということは、この問題の検討に先立って検べておかねばならない。でなければ、両者の最も極端な場合を組合せることは影響を過大評価することになる。普通わが国での暴風の原因は台風であるが、最近の研究によれば台風の眼の周辺にある雨の激しい Eye Wall の部分が同時に最も風の強い部分であると考えるのが適当であるようである(例えば Gentry (1964)⁴⁾)。また、最近の激しい暴風雨の記録を作った宮古島における第2宮古島台風通過時の10分間平均風速と10分間降雨量の同時比較を行った Fig. 1 においても、風と雨は平行して変化しており、台風時には風の最も強い時に、雨も激しいものと考えねばならないことを示している。

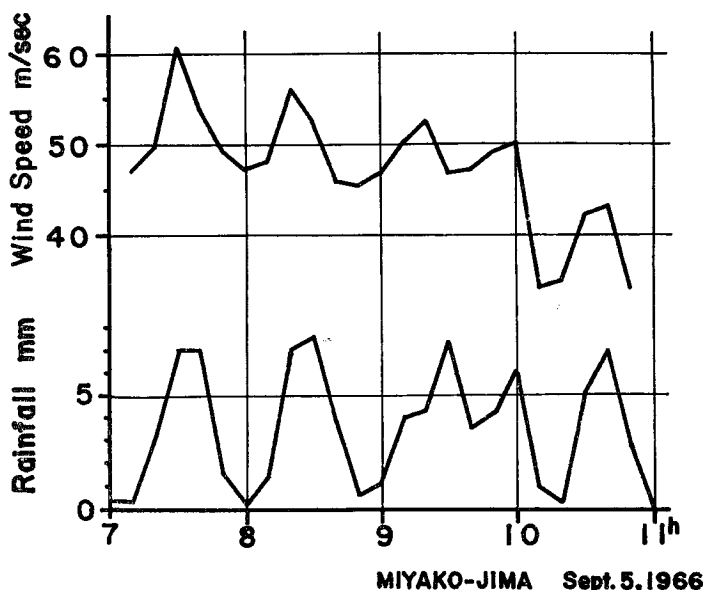


Fig. 1 Relation between wind speed and rainfall changes during a typhoon.

3. 雨滴の混在による空気密度の増加

先きに述べた Heywood の推算においては雨滴の落下速度はすべて一定であるという仮定がなされていた。しかし、現実には雨滴には種々の大きさのものが混っており、落下速度も異っている。最近、レーダー気象学の進歩と共に、レーダー電波の雨滴による反射能が雨滴の混在率、粒径分布によって決定されるところから、雨滴の粒径分布あるいは落下速度に関する研究が急速に進められているので、その結果を今回の考察に利用出来る。

Fig. 2 は Marshall and Palmer (1948)⁵⁾ が得た 降雨強度と 空中に存在する 雨滴の水量との関係であ

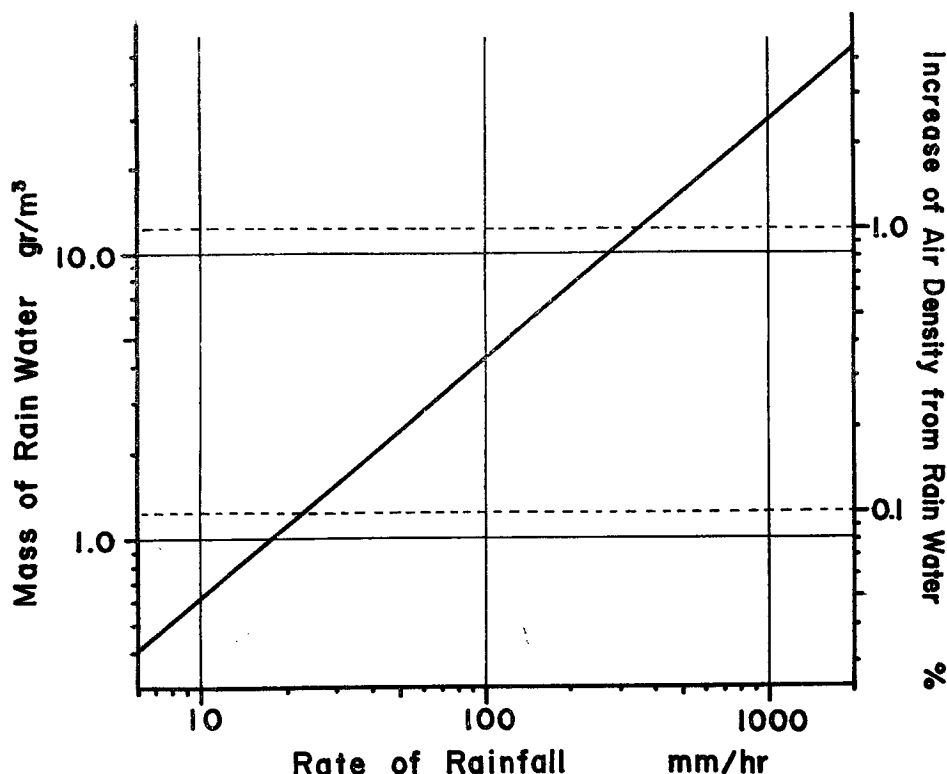


Fig. 2 Variation of mass of rain water contained in the air with rate of rainfall.
(after Marshall and Palmer⁵⁾)

る。この関係は彼等が Ottawa において観測した雨滴の粒径分布に基づいて算出したものであり、その後の他の観測者の結果もこれを支持するものが多い。降雨強度は mm/1hr の単位で示されているが、先きに Heywood が用いた資料によればその最大値は約 1000mm/hr になり、雨水の含有量は約 30gr/m³ すなわち体積比で 0.003% であることになる。結果は先きに Heywood の行った推算と一致する。日本での最大降雨強度の記録は潮岬で観測された10分間に 56mm という値である。これは換算すれば 340mm/hr に過ぎないが、値が小さいのは観測時間が10分間と長いためであって、現実には短時間について見ればもっと強い雨が降っているであろう。Fig. 2には実用的な目的のために雨水の混在による空気密度の増加率に換算した目盛を右側に記入してある。なおこの際の基準の空気密度は普通設計などに用いられる標準状態 (1/8 工学単位) を用いている。この図から見ても明らかのように、現在までに観測された最強の雨あるいはそれに数倍の確率的な余裕を見ても雨滴に起因した空気密度の増加は 5% 以下であると言える。従って、Heywood も結論したとおり、雨滴の混在による平均空気密度の増加は特殊な場合を除いて考慮しなくても良いと言えよう。

4. 雨滴の持つ運動量

前節において雨滴が混在する時の全体としての空気密度の増加を考えたが、ここでは個々の雨滴の破壊作用を調べるために、1ヶの雨滴が最大限どの程度の運動量を持ち得るかということについて調べて見る。

空中を自由落下する水滴はその表面張力によって形を保っているが、粒径が大きくなると表面積の割合に質量の増大率が大きいから、ある径以上のものは不安定となり存在し得ない、また存在可能なものでも粒

径の大きいもののほど寿命が短かくすぐに分裂して小さな水滴になってしまう。空中に浮遊する水滴の安定性については駒林等 (1964)⁶⁾ が詳しく研究している。その結果によれば、水滴として存在し得る限界の粒径は直径 8.5mm でそれ以下の粒径の水滴の平均寿命は Fig. 3 に示すとうりである。ここで示した平均寿命はある径の水滴の数が $1/e$ まで減ずるに要する時間と定義される。このように、空中に浮遊する雨滴を考

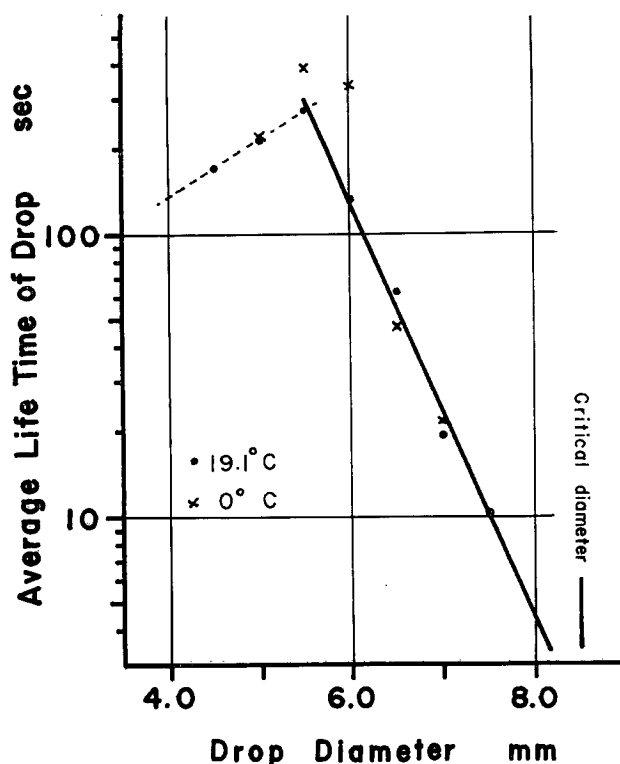


Fig. 3 Stability of water droplets in the air. (after Komabayashi et al⁶⁾)

える場合には最大限 8.5mm すなはち約 0.3gr の水滴を考えれば充分であるということになる。

雨滴は空中を落下しつつある時は重力と空気抵抗力とが平衡した状態すなはち終端速度に達している。そして、風が吹いている時には水平に風で流されている。しかし、地表付近におけるように乱れの多い気流の中では雨滴が短い周期の風速変動にまで追従しないことも有り得る。そこで、風速変動に対する雨滴の応答のし方について検べて見る必要がある。

落下しつつある雨滴が、横から風を受けた時の運動を示す方程式の水平成分は次のように書ける。

$$\frac{1}{6} \pi d^3 \frac{du}{dt} = \frac{1}{2} C_a \rho \frac{\pi d^2}{4} \frac{V-u}{\{(V-u)^2 + w^2\}^{\frac{1}{2}}} \{(V-u)^2 + w^2\} \dots \dots \dots (1)$$

ここで d は雨滴の直径, u , w は雨滴の水平および垂直方向の移動速度, C_a は雨滴の抵抗係数, ρ は空気密度そして V は風速を示す。いま, 落下速度 w は終端速度であって一定, しかも粒径が大きい場合を考えるとところから w は粒子の水平方向の対気速度 $(V-u)$ よりも大きいと仮定してこの方程式を線型化すると

$$\frac{1}{6} \pi d^3 \frac{du}{dt} = \frac{1}{8} C_a \rho \pi d^2 w (V-u) \dots \dots \dots (2)$$

となる。従ってこの式は次のような簡単な形で書けることになる

$$\frac{dv}{dt} + Av = 0 \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{ただし, } \begin{cases} v = V - u \\ A = \frac{3}{4} C_a \rho \frac{w}{d} \end{cases}$$

この方程式の解は1階の応答函数として知られているもので、階段状の風速変動に対しては

$$v = v_0 e^{-At} \dots\dots\dots (4)$$

となり指数函数的に速度差は減少することになる。そして時定数、 T_0 は

$$T_0 = \frac{4d}{3C_a \rho w} \dots\dots\dots (5)$$

によって与えられる。雨滴の空気抵抗係数については今まで多くの研究がなされているがここでは Gunn and Kinzer²⁾ の示した値を用いて、(5)式から雨滴の粒径と時定数の関係を計算したものが Fig. 4 である。その結果によれば、直径の小さい雨滴は0.1秒程度の短い時定数を持つが、今問題としている破壊作用に関係していると考えられるような大きな雨滴では約1秒程度であると言える。

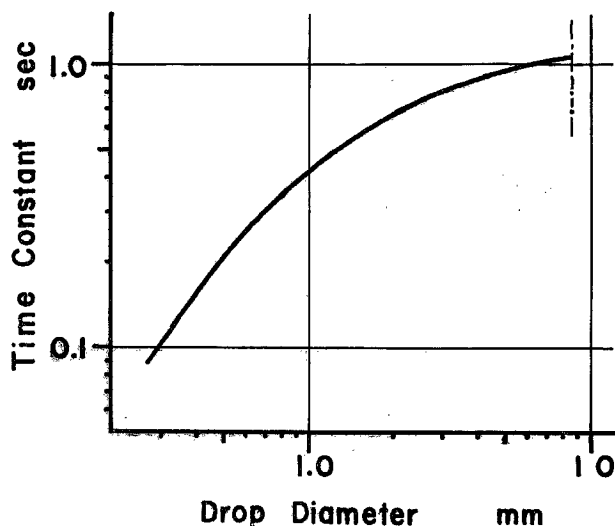


Fig. 4 Time constant of rain droplet movement in changing wind speed.

この時定数より見て雨滴は継続時間2秒程度以上の突風にはほとんど追従するものと見て大過ないから、雨滴の最大速度は評価時間ほぼ2秒の最大瞬間風速と一致するものと見て良いであろう。また、高さ50mぐらいまでの範囲を考えるならば、日本内地で期待される評価時間2秒の最大風速は高々90m/secぐらいであると考えても大過ないであろう³⁾。

以上の推算から雨滴の最大質量は約0.3gr、最大速度は90m/secぐらいという結論が得られた。これによって雨滴の持ち得る最大の運動量が求められる。その量の大きさは1grの物体が30m/secすなわち時速100kmぐらいで運動している時の運動量と同じぐらいである。実際に雨滴が物体に衝突した時に働く力を知るには衝突時の力の作用時間を知らねばならないが、これが雨滴がある面を通過するのに要する時間と同じであるとするならば、その作用力は30kg/0.6cm²すなわち50kg/cm²程度の大きさになる。もっとも作用時間は10⁻⁶sec程度という小さいものである。このような力がもし有効に働くものとしたら、その大きさは2秒間平均風圧のほぼ1000倍に達し小規模な破壊は発生しても良さそうな値となる。

5. 考 察

Photo. 1 は先きにも述べたような 台風通過時の 鉄塔の塗装が脱落した場合の 1 例である。このような例は他にも見られるものである。ここに示した例の場合は、海岸にある高さ約80米の塔で、風上側（海側）の面の高さ30米ぐらい以上の部分でこのような塗装の脱落が見られる。この時の最大瞬間風速（2 秒間）はそ

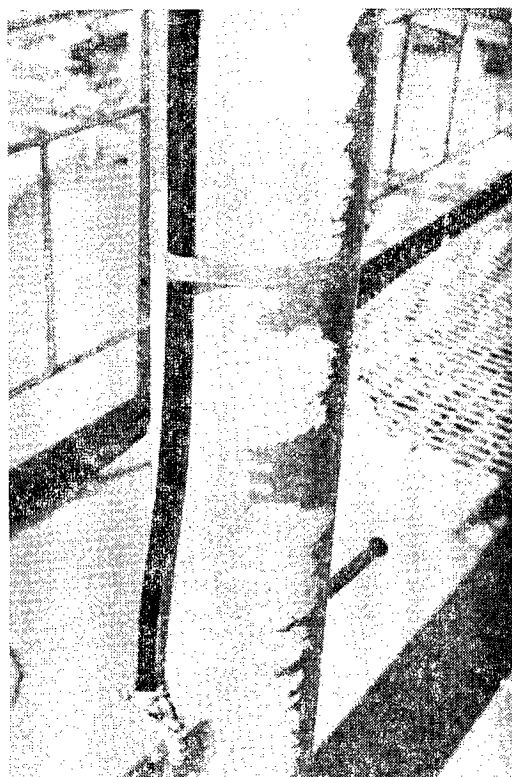


Photo. 1 An example of storm damages of paint coating on the tower.

の高さではば 60m/sec であったと推定される。塗装は台風通過の約6ヶ月前に行なはれ、下塗りを含めて6回塗り、上塗りはSDマリンペイントが用いられている。この被害が雨滴の作用によるものであると断定することは今のところ出来ないが、他に原因が考えられないところから、その可能性は非常に大きい。塗装面がどの程度の力で破壊されるかということがはっきりしないので断定は出来ないが、衝撃力で $5\text{kg}/\text{cm}^2$ 程度以上の力が働いた場合には破壊するという資料もあるので、この場合のように先きの例に示した運動量の最大値の約半分程度しか期待出来ない時でも充分塗装面の破壊の生じる可能性はある。なお台風の場合は先行した雨のため塗装面が水分を吸っていくぶん乾燥時より弱くなるということも 別な要素として考えられる。

個々の雨滴の運動量が大きいことは、飛行機上で雨滴の大きさを測定する場合に利用されている。すなわち空中にさらした金属箔に雨滴が衝突した際に出来る痕跡から雨滴の大きさを知ろうとするものである。市村と藤原(1963)⁹⁾の実験の際には 0.1mm 程度の金属箔が 80m/sec ぐらいの衝突速度を持つ水滴によって破ぶれることのあるのが確認されている。

以上は雨滴の破壊力の可能性を示す例であるが、逆に水滴混入が風の破壊力を増さなかったという実験結

果もある。これは送電線にぬったグリースが風で流されて風下側によってしまうという問題に関連して行なわれた非公式なものであるが、送風機で試験電線に風を吹きつけたのと、その吹き口にホースで水滴を飛ばせた場合とその影響には大差がなかったと報告されている。これはグリースのようなものは弾性体に近いので短い継続時間の衝撃的な力では大きな作用が生じないことと共に、ホースで入れた水滴の得た運動量の分だけは空気の方から失なわれているのであるから、1定の送風状態で水滴を入れても平均の運動量に増加はないことになり、平均的な風力は増加しないことになるから大きな差が生じなかったのではないかとも思われる。しかし、このような差は興味のあるものであるからさらに詳しく調べる必要がある。

なお、これまでの考察では雨滴の影響についてのみ考えて海の波のしぶき、特に海岸でくづれた波によって打ち上げられたしぶきの作用については論じなかった。波のしぶきの方が雨滴よりもずっと多く空中に浮遊するのではないかと思はれるし、両者が重なることもあるから破壊作用という点からは無視することは出来ない。しかし、波しぶきの量については定量的に論じることの出来るような資料は無い状態である。従って、吹飛ばされた海水滴の作用については論じなかった。今くづれた波が高さ20米まで水しぶきを打ち上げるとすれば、水は地面に再び達するまでに4秒以上かかるから、この間に風によってかなり内陸まで飛ばされ海に面した構造物に衝突することになる。この間に水滴は先きに述べたように直径8mm程度以下の小水滴に分裂してしまうであろうから、風速の短い周期の変動にも動かされ、粒径分布と風速分布の両者で決定される複雑な形に拡散することになる。いづれにしても海岸から百米前後の範囲では波しぶきの何らかの影響を受けることになる。この問題も詳しく調べるならば、海に面した建物の被害が目立って多いことの説明となるかも知れない。

6. 結 語

暴風時に空中に混在する雨滴あるいは水滴のために暴風の破壊力が大きくなるかどうかということについて検討して見た。その結果、空気平均密度の増加はほとんど問題にする必要はないが、ただ雨滴の1つ1つが衝突する際に極く局所的な破壊が生じ、それが重なりあるいは誘因となって被害が生じるということがあり得るのが示された。これについてはそれらしい被害の例もあるが、さらに現実の台風の被害と一般的に関連づけて考えるにはその発生機構に関する研究がさらに必要である。

参 考 文 献

- 1) 文献2)による
- 2) Heywood, G.S.P.; The pressure of typhoon winds on structures, Proceedings of the UNESCO Symposium on Typhoons, 1955, 11—21.
- 3) Jennings, A.H.; World's largest observed point rainfalls, Month. Weath. Review, Vol. 78, 1950, 4—5.
- 4) Gentry, R.C.; A study of hurricane rainbands, N.H.R.P. Report, No. 69, 1964.
- 5) Marshall, J.S. & W. Mck. Palmer; The distribution of raindrops with size, Journ. Meteor., Vol.5, 1948, 165—166.
- 6) Komabayashi, M., T. Gonba & K. Isono; Life time of water drops before breaking and size distribution of fragment droplets, Journ. Meteor. Soc. Japan, Ser. II, Vol. 42, 1964, 330—338.
- 7) Gunn, R. & G.D. Kinzer; The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air, Journ. Meteor., Vol. 6, 1949, 243—248.
- 8) 光田寧; 風荷重, 土木学会関西支部講習会テキスト・構造学, 1963, 8—27
- 9) 市村市太郎および藤原美幸; 衝撃法による雨滴の記録方法, 天気, Vol.10, 1963, 361—363.