

「移動する台風の風速分布を表す計算式について」に対するコメント

孟 岩*

私は「天気」の愛読者の一人で、いつも学会誌に掲載されている論文に興味をもって拝見している。本誌10月号に掲載された「移動する台風の風速分布を表す計算式について」と題する論文(藤部, 1996, 以下原論文と呼ぶ)について気になる点がいくつかあり、これらを述べてみたいと思う。

台風に伴う強風場を精度よく求めることは土木建築, 防災工学にとって大変重要な課題である。これまでに台風に伴う強風の予測モデルを開発することを目的とし, 多くの研究者(例えば, Meyers and Malkin, 1961; Rosenthal, 1962; Yoshizumi, 1968; Shapiro, 1983; 孟ほか, 1993, 1995, 1996など)は努力してきた。その成果として, 過去幾つかの有用なモデルが提案され, 土木建築設計, また防災の面に役に立ってきた。よりよい予測モデルを開発するためにこれらのモデルを正しく評価することは重要であり, また過去に提案されたモデルの比較を行い, これらのモデル間の違いを明らかにすることも有意なことである。

一般にモデルは, 物理現象の本質を損わない前提で複雑な物理現象を単純化して作られたものであり, 複雑な物理現象を完全には再現できない。とは言え, モデルが作られた際に, その妥当性を証明するために実験(物理実験もしくは数値実験)あるいは実測のデータとの比較を行っている。もし, 物理方程式を近似して作ったモデルを評価したいのであれば, モデル間の比較を行うのではなく, 近似のない物理方程式を正しく解いた結果(例えば, 成功した台風の数値予報の結果), もしくは精度の高い観測結果とを比較しなければならぬ。

以下, 原論文について気になる点を具体的に指摘し,

* 清水建設(株)技術研究所・環境技術研究部。

—1997年1月9日受領—

—1997年6月27日受理—

私の意見を述べてみたいと思う。

1. 基礎方程式について

まず, 原論文の出発点とも言うべき(1)式は台風の研究に用いられてきたモデル式であるが, この式を使う時には台風の半径方向の気圧勾配が鉛直方向に変化しないという前提条件が必要となる。もし上空の気圧勾配が鉛直方向に変化していれば, 上空風は2次元的に近似することができなくなる。実際の台風に伴う上層の風速場は極めて複雑で, また, 台風の移動もこの上層風速に強く依存している。このことはすでに台風の実測と数値解析の結果から明らかにされている。従って, 著者は原論文の(1)式が上空風を正確に記述できる式であることを証明しない以上, この式に基づいて行った計算により, どのモデルがよいかどのモデルが悪いかということ論じることはできないと思う。モデルを評価するには, やはり台風の観測データあるいは成功した台風の数値予報の結果との比較を行うしかないと思う。もう一つ気になる点は原論文の中で一般風の風速と台風の移動速度とを一緒に議論していることである。本来台風の移動速度は台風本体と一般風との相互作用により決まる。一般風を考慮する場合, 台風の移動速度は台風の数値予報の結果として得られる。一方, 台風をモデル化した場合には台風の移動速度が既知のパラメータとして用いられる。一般風と台風の移動速度を同時にモデルの中に入れると, 移動に対する評価は重複となる。

2. 移動座標系による移動する台風の記述

著者は「台風と一緒に動く座標上の傾度風を求める方法が力学的な観点から見れば最も合理的である」と結論づけている。この結論について私は全く反対の意見を持っている。確かに台風と一緒に動く座標上で台風のモデル化を行うのは運動学的な観点から見れば問

題がないが、力学的なバランスを考える時に用いた仮定とそこから導かれた結果が実現象をうまく説明できるかは問題となる。例えば、1991年の台風19号のような移動速度の非常に速い台風（その移動速度は25m/sに近く達していた）では、台風の移動速度を移動座標上で気圧のバランスから求められた相対速度に足すと、台風の左側の速度は時計まわりになってしまう。実際、ひまわりの写真と比較すれば分かるように、台風の左側に時計まわりの雲は全く見られない。この結果は移動する台風に伴う風速場を少なくとも下層大気において移動速度と移動座標上で気圧のバランスから求められた相対速度との和で表せないことを意味している。

実際、台風を移動座標上でモデル化する考え方はYoshizumi (1968)の論文以前にもある。現在にも台風の移動を川の中の渦の移動と例える人がいる。確かにこの例えは非常に分かりやりに、誤解を招く恐れもある。川の流れの原動力は重力であり、流れが定常であれば、重力の河床方向の成分と川の底面及び側面の摩擦力とが釣り合っている。この時の流れの方向は川の表面から川の底面まですべて同じ方向となっている。そこで何らかの理由で渦ができたとなると、渦が川の流れにより流されていく。この場合、渦の中心付近の流速は近似的に渦自身のもつ速度と川の流速との和で表すことができ、また渦の中心から離れた地点での速度は川の流速となる。一方、移動する台風の場合はどうかというと、まず、大気中には常に様な気圧勾配が存在しない。また、大気は成層しているために上層で風が吹いても下層で必ずしも同じ風が吹くとも限らない。これは低層大気中の移動する台風に伴う風速場を安易に移動座標上でモデル化することができない理由の1つである。

3. Blaton の式による移動する台風の記述

移動する台風に伴う風速場を表すモデルとしては絶対速度を用いて作られたものもある。例えば Meyers and Malkin (1961)により提案されたモデルは、下式により表すことができる。

$$-\frac{v_g^2}{r_t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + f v_g \quad (1)$$

$$\frac{1}{r_t} = \frac{1}{r} \left(1 - \frac{c_\theta}{v_g}\right) \quad (2)$$

ここで、 $c_\theta = c \cos \theta$ で、台風の移動速度の θ 方向の成分である。(2)式は原論文の(18)式と同じで Blaton の式と呼ばれている。(2)式を(1)式に代入し整理し直すと、(3)式が得られる。

$$v_g = \frac{c_\theta - fr}{2} + \sqrt{\left(\frac{c_\theta - fr}{2}\right)^2 + \frac{r}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r}} \quad (3)$$

原論文の結論部分では「(18)式等…これはエレガントな発想であるが、流跡線の曲率を的確に計算することは難しく、実用性は低い」との記述がある。(3)式を用いれば、難しい計算がひとつもなく、傾度風速を求めることができる。実際、この計算式は多くの研究者 (Meyers and Malkin, 1961; Georgiou *et al.*, 1983; 藤井・光田, 1986など)により使われてきた。全く別の観点から導かれた孟ほか (1993)の台風モデルは傾度風速の計算式が(3)式と同じ形となっている。Blatonの式による移動する台風の記述の物理的意味を理解するため、ここで孟ほか (1993)の台風モデルについて簡単に紹介する。

ご存じのように、台風中心が低気圧となっているのは、台風中心の上空部分で暖かい気団が存在していることによるものである。また台風あるいはハリケーンにおける温度偏差は5km~12kmの上空で最も大きく、そこが台風の中心となっている。このような高い上空で一般風が存在すれば、暖かい気団が一般風によって流され、結果的に地表面付近での低気圧場が移動することとなる。すなわち、台風の移動現象(β 効果を除いて)は、近似的に上空の暖かい気団の移動現象として理解することができる。そして、大気境界層内における風速場は、そこに存在する気圧勾配とコリオリ力及び地表面の摩擦力とバランスしながら形成される。このことから、上空の暖かい気団の性状が短い間に変化しないで移動していると仮定すれば、大気境界層内の気圧パターンも変化しないで移動していると考えることができる。この仮定の妥当性はすでに地表面付近での多くの気圧場の観測結果により裏づけられている。そして、気圧場の移動に伴い大気境界層内の風速場はそこで新たに形成され、あたかも風速のパターンが保存されたままで移動しているように見ることができる。このように台風に伴う強風場の移動現象を風速のパターンが短い間に保存されたままで移動しているということで近似的に表すことができた。この仮定に基づき、孟ほか (1993)は摂動法を用いて傾度風速

を表す式を導出した。ただし、ここで言う傾度風とは大気境界層外縁の風を指しており、その高さは一般に1km~2kmの範囲内にあると考えている。この高さ以下の大気境界層においては台風風の半径方向の気圧勾配が高さ方向にほぼ一定となっている。この事実は台風モデルを作る際に変重要なことであり、運動方程式から傾度風の記述式を分離する時の根拠ともなっている。このように、移動する台風に伴う風速のパターンが短い間に保存されたままで移動していると仮定したことで、大気境界層外縁の傾度風速を簡単に求めることができた。この台風モデルを用いて、長崎(孟ほか, 1993)、東京(松井ほか, 1993)、千葉(松井ほか, 1996)において過去に観測された多くの台風について計算し、観測された風速の記録(気象庁の観測データを含む)と比較した結果は何れの地点において満足できるものであった。

4. 表面摩擦の影響と地形の効果

原論文の最後の部分に、「本稿の議論は表面摩擦を無視しているので、地上風とそのまま対応するわけではない。摩擦を取り入れた計算例としては、Yoshizumi (1968)、Shapiro (1983)、孟ほか(1993)などがあるが、何れも様々な仮定に基づいている上、大量の繰り返し計算を要する。また現実には地形の影響や前線の存在によって風速分布はいっそう複雑になり、摩擦を入れてもなおその正確な再現は無理である。」という記述がある。

実際、台風モデルを作る際に、地表面の影響をどのように取り入れるかは重要なポイントとなる。なぜならば、我々人間は地表面に住み、建物も地表面に建てられているからである。傾度風しか記述できない台風モデルは不完全なモデルであり、実際に使用する際に傾度風から地表風への変換は問題となる。従って、移動する台風風の風速分布を表す計算式を提案する際には地表面の影響を必ず一緒に考えなければならない。因みに、孟ほかのモデル(1993, 1995, 1996)では地表摩擦の影響を地表面の粗度としてモデルに取り込んでいる。地表面の摩擦を考慮しても、その計算は現在のパソコンで一瞬のうちに終わる。特に地表摩擦を考慮した孟ほか(1995, 1996)の強風に関する一般的な予測式は非台風時の強風に関する過去の観測データ(例えば、Counihan, 1975; Csanady, 1967)を説明できる上、過去の台風観測(Choi, 1983; 甲斐, 1982; Georgiou, 1983)で見られた台風特有な現象も説明するこ

とができる。

勿論、孟ほかの台風モデルは他の多くの大気境界層に関するモデルと同じように、対象地点の周辺に地形がないということを前提にしているが、地表面粗度が一樣な場合の台風に伴う強風場の問題を解決できれば、地形の問題に対する解決方法も比較的容易に見つけることができる。実際、地形の効果は台風に限った問題ではない。季節強風の場合も同様な問題がある。また、それに対する解決方法も提案されている。例えば、中小地形の場合は風洞実験あるいは数値解析により、地形ありと地形なしの場合の風向・風速の差を求め、そして地形なしの場合に求めた風向・風速に地形の効果を加算することにより、地形ありの場合の風向・風速を求めることができる。このような方法は台風についても適用できる。また、大地形の場合には、地形の影響を考慮していないモデル式により求めた風速・風向と実際の観測データを幾つかの台風において比較することにより、大地形の影響を抽出することができ、また、このように得られた補正係数を用いれば、大地形の影響を考慮した台風に伴う強風場の予測ができる(松井ほか, 1994)。

最後に、前線の存在による影響の問題について、現在この前線の影響を考慮した台風モデルはまだないと思う。ただ、前線の影響が台風の影響に比べてどの程度のものかについてはまだ明確にされていないように思われる。何れにしても、現在の台風モデルは台風に伴う強風場に対して1次近似精度(2次微小量を無視した)のものである。このようなモデルの予測精度が工学的に要求されている精度を満足していれば、それ以上にモデルの精度を上げる必要がないと思う。この問題については今後の研究に委ねる。

以上、私が思いついたことを述べたが、よりよい台風モデルの開発のためにこれからも活発な議論を心待ちにしている。

参考文献

- Choi, E. C. C., 1983: Gradient height and velocity profile during Typhoons, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, **13**, 31-41.
- Counihan, J., 1975: Adiabatic atmospheric boundary layers, A review and analyses of data from the period 1880-1972, *Atmos. Environ.*, **9**, 871-905.
- Csanady, G. T., 1967: On the "Resistance Law" of a turbulent Ekman layer, *J. Atmos. Sci.*, **24**, 467-471.

- 藤部文昭, 1996: 移動する台風の風速分布を表す計算式について, 天気, **43**, 671-680.
- 藤井 健, 光田 寧, 1986: 台風の確率モデルによる強風のシミュレーション, 日本風工学会誌, **28**, 1-12.
- Georgiou, P. N., A. G. Davenport and B.J. Vickery, 1983: Design wind speeds in regions dominated by tropical cyclones, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., **13**, 139-152.
- 甲斐憲次, 1982: 台風8115号の乱流特性について, 第7回風工学シンポジウム論文集, 23-30.
- 松井正宏, 孟 岩, 日比一喜, 1993: 台風シミュレーションによる設計基準風速の評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1059-1060.
- 松井正宏, 孟 岩, 日比一喜, 1994: 台風シミュレーションを用いた設計風速の設定に関する一考察, 第13回風工学シンポジウム, 473-478.
- 松井正宏, 孟 岩, 日比一喜, 1996: 台風シミュレーションを用いた年最大風速の推定, 第14回風工学シンポジウム, 97-102.
- 孟 岩, 松井正宏, 日比一喜, 1993: 台風に伴う強風場を求めるための解析モデルの提案, 日本風工学会誌, **57**, 1-14.
- 孟 岩, 松井正宏, 日比一喜, 1995: 中立時の大気境界層における強風の鉛直分布特性, その1 非台風時の強風, 日本風工学会誌, **65**, 1-15.
- 孟 岩, 松井正宏, 日比一喜, 1996: 中立時の大気境界層における強風の鉛直分布特性, その2 台風時の強風, 日本風工学会誌, **66**, 3-14.
- Meyers, V. A. and W. Malkin, 1961: Some properties of hurricane wind fields as deduced from trajectories, National Hurricane Res. Project Rep., No. **49**.
- Rosenthal, S. L., 1962: A theoretical analysis of the field of motion in the hurricane boundary layer, National Hurricane Res. Project Rep., No. **56**.
- Shapiro, L. J., 1983: The asymmetric boundary layer flow under a translating hurricane, J. Atmos. Sci., **40**, 1984-1998.
- Yoshizumi, S., 1968: On the asymmetry of wind distribution in the lower layer in typhoon, J. Meteor. Soc. Japan, **46**, 153-159.

Comment on "On the Formulae for Wind Distribution in a Translating Typhoon"

Yan Meng*

* *Environmental Engineering Department, Institute of Technology, Shimizu Corporation, Tokyo 135, Japan.*

(Received 9 January 1997 ; Accepted 27 June 1997)
