

東西線列車転覆に関するたつ巻のモデル*

内田 英治** 立平 良三***
 多部 一朗**** 大塚 和之****

要旨

1978年2月28日夜、川崎市(神奈川県)より鎌ヶ谷市(千葉県)にわたり、突風が発生し、東西線列車の転覆をはじめ、家屋、自動車、船舶、などに多大の被害を与えた。当時の気象データ(天気図、自記風向・風速計、自記気圧計、レーダエコー、アメダスなどによる)と被害状況より判断して、突風は、直径が数十kmのたつ巻低気圧中に発達したたつ巻であると考えられた。また、このたつ巻は、寒冷前線の進行前方のスコールライン付近の収束・不安定域において発生した。観測によるとたつ巻のスケールは、コア(最大風速域)の直径が100~200m(半径50~100m)、最大風速は60~80m/sec、進行速度が約25m/secと推定された。

このたつ巻について、単一構造(一個の円柱型構造)と等速直線運動をする単純なモデルを仮定する。そして、列車とこのモデルのたつ巻が遭遇する場合のシミュレーションを行なう。列車が転覆する限界風速を考慮に入れて、転覆の状況と最も適合するたつ巻のスケールは、コア直径が150~200m(半径75~100m)最大風速が70~80m/sec、進行速度が25~35m/secとなり、観測結果とだいたい一致する。これによってこのモデルの妥当性がほぼ検証される。

1. はじめに

昭和53年2月28日夜、東京とその近郊を襲ったたつ巻については、天気図、自記風向・風速計、自記気圧計、レーダエコー、アメダス等の記録および被害状況を綿密に収集できたため、これを基にして、たつ巻のモデルを考えることができた。すなわち、東西線列車転覆事故現場付近の詳細なデータ解析と、列車転覆に関する動力学的研究によって、工学的モデルとも言うべき解析をすることができた。

この論文では、たつ巻のスケールに関する要素(このモデルではコア直径(最大風速域に相当)、最大風速、進行速度)の推定、列車転覆に適合するシミュレーション上の仮定、そして、転覆に関するモデルの最適の適合条件を述べて、モデルの妥当性を検証する。

2. たつ巻のスケールの推定

今回の突風においては、夜間であったため目視観測がなく、回転性の実体は把握されていない。しかし、次の理由によりたつ巻と考えられた(内田, 1979)。

(1) 風向: Fujita *et al.* (1976)の研究で、藤田等がたつ巻低気圧と呼んでいる直径数10kmの反時計廻りの回転性風向変化が確かめられた。たつ巻が存在する時は、たつ巻低気圧が存在することが多い。

(2) 風速: 極めて単発、瞬間的に、それまでの風速の数~十数倍の突風が急に吹く記録が得られた。

(3) 気圧: 今回の記録では±2mb程度に過ぎなかったとはいえ、短時間内の気圧変化が認められた。これはたつ巻の通過を示唆する。

(4) フックエコー: レーダエコーの中にフックエコーの表われたとき、たつ巻であることが多いが、今回も列車転覆後にフックエコーが観測された。

(5) 被害状況: たつ巻の通過したときは、狭い幅(たつ巻のスケールにより数十m~数km)で細長く被害域が残るのがふつうであるが、今回も幅500m~1.5km、長さ30kmにわたって突風の被害があった。また、各所における被害状況がたつ巻の存在を裏づけている(内田, 1979)。

* Modelling of 1978 Tokyo Tornado for Overturning of Tozai Subway Train.

** Eiji Uchida, 気象研究所予報研究部.

*** Ryozo Tatehira, 気象庁予報部予報課.

**** Kazuro Tabe and Kazuyuki Otsuka, 帝都高速交通営団 運転部
 —1979年6月14日受理—
 —1979年10月5日受理—

これらの理由でたつ巻と考えられたが、そのモデルのスケールについては次のように推定した。

(1) コアの半径 (A) [今後半径表示]

まず、1個の単一たつ巻が地上で円型等風速線をもつことを仮定する。これは、今までの研究によっても無理のない事実である(内田, 1979)。そして、たつ巻中の最大風速の円をコアと名づける。そのコアの半径は、被害の詳細な調査(たとえば、相馬, 1978)から50~100 mと考えられた。相馬(1978)によれば、たつ巻は3個の複合体であるという考えもある。しかし、列車転覆事故を引き起したたつ巻は、その事故付近の調査からこの付近では単一のたつ巻であると考えれば、その大きさはだいたいこの程度となる。

(2) 最大風速 (V_m)

被害域に沿って転覆現場から約8 km 風上のところの10号信号所の記録は、最大 52 m/sec を示していた。この風速計は、風車型発電式自記風速計(作動範囲2~60 m/sec, いすず製作所)で、風速計本体の距離定数(時定数×風速)は8 m である。したがって、50 m/sec の風速に対しては時定数は0.16 秒であり、記録器まで含めると約2秒の遅れは考えられる。もちろん、これは風が水平に当たった時であって、傾斜した風については感度は減少する。このような瞬間的突風が勢よく過ぎてゆく場合には、真の値の70~80%の値を示していると思われる。実測値 52 m/sec に対しては60~80 m/sec の瞬間最大風速が考えられる(帝都高速度交通営団, 1979)。

(3) 進行速度 (V_1)

被害発生時刻から、たつ巻は上空の風で流され、だいたい 25 m/sec の速度で進行したと思われる(帝都高速度交通営団, 1979)。

これをとりまとめると、次のようになる。

- (1) コアの直径は100~200 m (半径50~100 m)
- (2) 最大風速は60~80 m/sec
- (3) 進行速度は25 m/sec

3. 列車転覆に関するたつ巻のモデル

われわれのモデルを設定するための3要素(コアの直径, 最大風速, 進行速度)の推定値は第2章で述べたとおりであるが、これが、列車転覆に適合するスケールとして充分か否かについてシミュレーションを行なった。

その際、たつ巻は地上において左まわりの円形等風速線群を形成するとともに、半径方向の風速分布はラン

キン渦の分布をするものと仮定する(帝都高速度交通営団, 1979)。これは、豊橋のたつ巻(石崎他, 1969)にてもだいたい成り立つことがわかった。したがって、コア内は中心を風速0として直線的に増加し、コア外は半径に逆比例して減衰する。

つぎに、このシミュレーションは、単一のたつ巻が直進し、線路に対して45°の角度で通過したとする。これは現場検証の結果、だいたい正しい。ただし、列車はこの時、等減速進行をしたため、たつ巻の進行速度により、列車とたつ巻の相対角を調べると18~25°に変化した。

また、このモデルは現場付近で考えたものであり、先に述べたように列車に当たるたつ巻は直進してきたものとする。このモデルを M_1 とする。

これに対し、単一のたつ巻の曲進が考えられる。それは、サイクロイドまたはトロコイド状であろうと推定される(Fujita, 1978)。これを M_2 とする。

さらに、2~3の複合したたつ巻、または、いわゆる非回転性の突風とたつ巻との複合体が直進または曲進したものととも考えられる(藤田, 1973; Agee *et al.*, 1976)。これを M_3 とする。

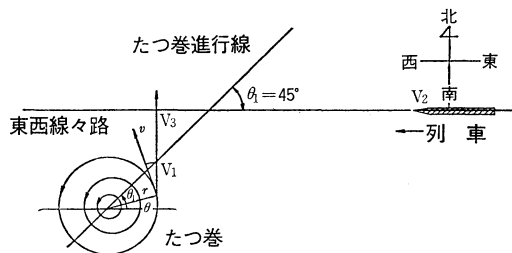
われわれは、まず M_1 を考え、それを列車転覆にて検証しようとする。 M_2 および M_3 については、データが少なく、モデル化する時の独立要素数が増加してしまって確証性がうすくなる。この M_2 , M_3 については、またあとでふれる。

それで、 M_1 についてシミュレーションをする際、独立要素(変数) A, V_m, V_1 の範囲を次のように広範囲にとることにする。

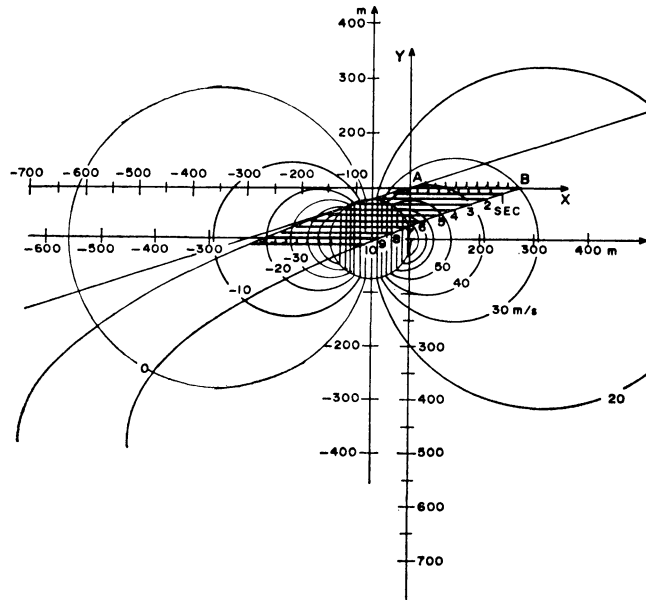
$$\begin{cases} A & (25, 50, 75, 100 \text{ m}) \\ V_m & (60, 70, 80 \text{ m/sec}) \\ V_1 & (15, 25, 35 \text{ m/sec}) \end{cases}$$

そして、これらの仮定は第1図のように図示される(帝都高速度交通営団, 1979)。

そして、列車に直角に当る風の成分は次式のような



第1図 単純モデル (M_1)



第2図 たつ巻の中心を固定して描いた V_3 (列車と直角に当る風速) の分布と $V_1=15$ m/sec のときの列車の軌跡 (コアー半径 $A: 75$ m, 最大風速 $V_m: 80$ m/sec, たつ巻の進行速度 $V_1: 15$ m/sec).

注) A-B は10両編成の列車で, 列車の先頭車が風速 40 m/sec の円弧に接してからの経過時刻 (秒) は斜線上の数字で示す.

る (ただし, 次式はおもにたつ巻の最大風速域付近 (コアー) に適用されるものと考えた方がよい).

$$V_3 = v \cos \theta + V_1 \sin \theta_1 \tag{1}$$

ただし,

V_1 : たつ巻の進行速度 (m/sec)

V_2 : 列車の進行速度 (m/sec)

V_3 : 列車に直角な風速の成分 (m/sec)

v : たつ巻の中心から r (m) はなれた点における渦の接線方向の風速 (m/sec)

θ : たつ巻の中心を通る x 軸 (列車の進行方向と平行) より, 反時計方向にとった角度

θ_1 : x 軸とたつ巻の進行方向とのなす角度

また, ランキン渦を仮定しているのでたつ巻のうずの中の風速分布は次のようになる.

$$v = \begin{cases} \omega r & r \leq A \\ \omega A^2 \cdot \frac{1}{r} & r \geq A \end{cases} \tag{2}$$

ただし,

v : たつ巻の内部の風速

A : コアー半径 (最大風速域に対応)

ω : 定数

r : たつ巻の中心から考えている地点までの距離

列車は, $V_2=78$ km/h= 21.67 m/sec の等速度で進んできたが, ブレーキのかかった時から等減速進行をした. その時の等減速速度は, 0.72 m/sec² であったので, 各時刻 t (sec) の V_2 は次式のようになる.

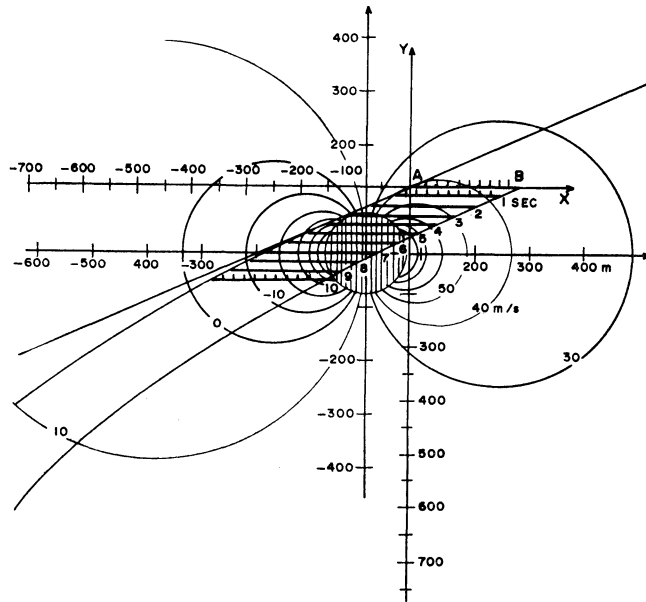
$$V_2 = 21.67 - 0.72 t \tag{3}$$

ただし, これは列車転覆までに適用される式である.

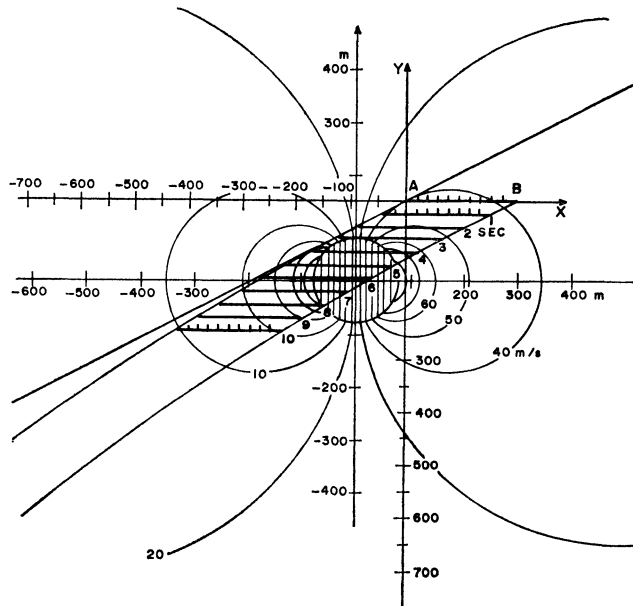
4. 列車転覆への最適条件抽出への考察

第2, 3, 4図は, V_3 (列車に直角に当る風速) および V_1 (たつ巻の進行速度) を変えた場合の図例であり, 列車の転覆までの時間経過も合せて示してある.

今回の事故の際, 先頭車はまず車体が浮き上がるようなショックを受けた. これは, 車両に関する動力学的研究 (帝都高速度交通営団, 1979) から, 車両側面に直角に当たる水平の横風が約 40 m/sec をこえる場合であることがわかっている. すなわち, この風速以上になると, 車体の受ける揚力と抵抗の計算より, 風上側の片車輪がレールより離れる.



第3図 $V_1=25$ m/sec のときの列車の軌跡 (A: 75 m, $V_m: 80$ m/sec, $V_1: 25$ m/sec).



第4図 $V_1=35$ m/sec のときの列車の軌跡 (A: 75 m, $V_m: 70$ m/sec, $V_1: 35$ m/sec).

第1表 適合性の比較

V_{max} (m/sec)		60			70			80		
		15	25	35	15	25	35	15	25	35
A (m)	25	△	△	△	△	△	△	△	△	△
	50	△	△	△	△	△	△	△	△	△
	75	△	△	⊙	△	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙
	100	△	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙

(注)Ⓐはもっとも適合性のよいもの、Ⓑはやや適合性のよいもの、Ⓒは大体の傾向の見えるもの、Ⓓは若干の傾向が見えるもの、Ⓔはやや傾向が見えるもの、△は関係のないもの。

したがって、運転手がブレーキをかけた時は、図中の40 m/sec の等風速線の円弧に、列車の先頭車の軌跡線が接した時(A点)と考えてよい。

そして、事故後の詳細な調査により、ブレーキをかけたからの空走時間は2秒であり、実質的に制動が効き出して、後部車両が転覆するまでは約5秒(±1秒)かかっている(帝都高速度交通営団, 1979)。

この7秒間内の刻々の列車の位置は図中に示してある。この1秒毎の車両の位置と風の分布の相対位置を追跡して、最後部2両が強風域に入る条件を抽出する。車両に対する動力学的研究から、両車輪がともにレールより離れて浮上するのは、車両側面に直角に当たる水平の横風が約80 m/sec 以上の場合であることが知られている(帝都高速度交通営団, 1979)。したがって、最後部2両が V_3 が80 m/sec の範囲内にどの程度ピタリと落ち込むかを調べる。

その結果を表にしたのが第1表である。そして、Ⓐは最も適合性がよく、5~7秒の頃に最後部2両が80 m/sec の範囲にうまく落ち込んだ例であり(第3図)、以下その適合性の順で、Ⓒは2車両の半分ほどがこの領域に落ち込んだ例(第2図)、Ⓔは車両の一部がこの風速の領域をかすめた程度の例である(第4図)。△は、この落ち込みが全然不適當な例である。

したがって、第1表より各要素の最適条件の範囲を2ランク幅で示すと、A: 75~100 m, V_m : 70~80 m, V_1 : 25~35 m/sec となる。これは、第2章で推定した観測値とほぼ合致する。

さらに、 M_2 , M_3 について若干の追記をしておく。

今回は、最後部2両の転覆を中心に考察した。これは、乗客の証言と転覆事実が明瞭であることによる。と

ころが、その他の8両については先頭の2車両以外に証言がない。この中間の6両に強風が当たったか否かは、 M_2 , M_3 の決め手にもなる。これについては、次の二つのことが考えられる。

(1) 強風が真中の6両にも当たったが証言がなかったに過ぎないという想定。

これについては、連結器があるため乗客への反応が少なかったことも考えられる。ただし、列車の外的被害(たとえばパンタグラフなど)は見当たらない。しかし、これについては M_1 で充分説明はできよう。

(2) 強風は中間の6両に対しては当たらず、事実上、列車への被害もないという想定。

これに対しては、 M_1 (ランキン渦を仮定しても内部の風速分布には±10~30%の変動は考えられるので、6両は風の弱いところに遭遇したとも考えられる)、 M_2 , M_3 のいずれもあてはまる。 M_1 を積極的に考えたのは、 M_2 , M_3 について積極的、一義的証拠がないためである。すなわち、 M_2 を考えた場合、先頭車がまずたつ巻に当たり、約5秒後に反転したたつ巻に後尾車が当たるとすれば、あまりにも短時間すぎて不合理であると思われる。 M_3 を考えた場合、二つのたつ巻が約200 m 離れて存在する例もない訳ではない。しかし、列車に影響を与えるたつ巻が二つ近接して存在し、今回のように偶然、前部と後部車両にぶつかるチャンスは非常に小さいと言える。またこれは、藤田の言う suction vortex (Fujita *et al.*, 1976) であるとしても、実証データがない。また、いわゆる突風とたつ巻の複合体としても、突風はもう少し広い範囲で吹くと思われ、現場から約800 m 西に離れたところに設置してあった風速計が事故当時10分平均値(21時30~40分間)に2 m/sec しか記録していないことを考えると難点が多い。

以上の理由で、列車転覆現場の近辺については M_1 の単一なモデルにて一応工学的見地からの説明ができたものと考えた。

謝辞

この研究を行なうに当たっては多くの方々の御世話となった。

シカゴ大学の藤田哲也教授、オクラホマ大学の佐々木嘉和教授には専門家としての貴重な御意見と文献、資料の御援助を載いた。また、国内では京大防災研の光田寧教授、相馬清二博士、気象庁予報課の宮沢清治主任予報官、衛星センターの松村照男技官、気象大学校の荒川正一助教授、甲府地方気象台の島田守家台長、東京管区気

象台技術部の大石正二調査課長、熊谷地方気象台の杉本豊台長、気象庁観測部測候課の徳植弘風洞係長などの御意見や御援助を載せて感謝にたえない。ここにあつく御礼申し上げたい。

文献

Agee, E.M. J.T. Snow and P.R. Clare, 1976: Multiple vortex features in the tornado cyclone and the occurrence of tornado families, *Mon. Wea. Rev.*, **104**, 552-563.

藤田 哲也, 1973: たつまき(上), 共立出版, 科学ブックス.

Fujita, T.T. *et al.* 1976: Close-up view of 20 Mar. 1976 Tornadoes: Sinking cloud tops to suction vortices, *Weatherwise*, **29**, 116-131.

Fujita, T.T., 1978: Workbook of tornadoes and high winds for engineering applications, *Satellite and Mesometeorology Research Project*, **165**, 17-60.

石崎潑雄, 光田 寧, 川村純夫, 室田達郎, 木本英爾, 田平 誠, 1971: 1969年12月7日, 豊橋市を襲った「たつまき」に関する調査報告, 京都大学防災研究所年報, 第14号A, 481-500.

相馬清二, 1978: たつ巻ならびにその同類現象について, 第5回構造物の耐風性に関するシンポジウム講演.

東西線列車災害事故対策研究報告書. 帝都高速度交通営団, 東西線列車災害事故対策研究委員会, 昭和54年3月.

内田英治, 1979: たつ巻研究の諸断面, *天気*, **26**, 51-73.



気象ハンドブック編集委員会編 気象ハンドブック

朝倉書店, 1979年, A5版,
698頁, 9800円

20年ほど前に技報堂から「気象学ハンドブック」、10年ほど前に共立出版から「気象ポケットブック」が出ている。これらの本には、気象に関連する数式や簡単な解説、詳しい表や図、公式などが載っており、たいへん便利でいまでも使っている。今度、朝倉書店から「気象ハンドブック」が出たと聞き、この2書を連想し、その最新刊かと思っていた。ところが手にして内容を見たところ、全くといってよいほど違っており、むしろ、新しい気象学—理論と応用—とでも題してよいような気象の解説書であった。

まえがきには、気象の事典のような、短かい知識の羅列は避けたと書いてあり、事実その通りであるが、ハンドブックというよりは気象の事典に近い感じである。

主な項目をあげてみると、(1)気象のガイド、(2)地球と太陽、(3)大気の構造と運動、(4)気候とその変化、(5)気象器械、(6)気象観測、(7)天気図の作り方と利用、(8)最近の天気予報とその利用法、(9)気象の理論、(10)気象の実験、(11)生活と気象、(12)産業と気象、(13)交通と気象、(14)汚染と気象、(15)防災と気象、(16)気象教育、(17)気象資料とその利用、付録、となっている。

これからわかるように、基礎から応用まで実に広い範囲について書かれており、気象器械、気象の実験、気象教育、気象資料とその利用など、他書にはちょっと見られない項目もある。また、気象衛星による観測結果のカラー写真、オーロラや新しい測器の写真なども載せられており、ごく最新の知見も紹介されている。

付録には、気象に関する各種の気候表や年表、単位や換算式、定数や計算式、略号表、気象通報の時刻、気象官署の一覧表なども載せられている。なお、地震の震度、マグニチュードも載せられているが、これは本書としては蛇足ではなからうか。

執筆者たちは、気象庁、気象研究所、大学、農業技術試験所、都市教育研究所などの、それぞれの方面の専門家であり、内容は信頼がおける。

何分にも範囲が広く、一般の読者を対象としており、頁数の関係もあるためであろうか、水蒸気圧の表などが、他のハンドブックに比較すると簡単なのがちょっと物足りない。しかし、新しいところから古いところまで、たとえばハンチントンの気候と文明まで要領よく解説しており、手もとにおいて、辞書がわりに使うのもよい。700頁近くもあり、価格が10,000円近くにもなり、ちょっと手を出しにくいかもしれないが、それだけの価値はある。

本箱の一隅に一冊おいておくと、何かにつけ便利であろう。

(高橋浩一郎)