

1053 (日本版改良藤田スケール; JEF スケール; 被害指標 DI; 被害度 DOD; 藤田スケール; EF スケール)

2. 日本版改良藤田スケール (JEF スケール) の策定

田村 幸雄*

1. はじめに

2015年12月21日に、気象庁より日本版改良藤田スケールに関するガイドライン (気象庁 2015) (以下、JEF ガイドライン) が公表され、2016年4月1日より運用が開始された。日本の建築物等の材料、構法等に合った竜巻の被害スケールができたのである。ご承知のとおり、従来の藤田スケール (以下、F スケール) は、ビュフォート風力階級の概ね風力8から音速に相当するマッハ1までを12分割し、F0からF6に竜巻の強さと建物等の被害の程度を当てはめたものである。ただし、F6はほぼ皆無とされている。第1表にFスケールF0~F5の風速区分と竜巻被害の程度を示す (Fujita 1971)。

それぞれの風速区分に相当する建物等の被害の程度を表す記述は、米国の1970年頃の建物等の状況に基づくもので、Fスケールは日本にとっては歪んだ物差しであった。これが今回、日本の状況に合った真っ直ぐな物差しになったということである。

なお、従来のFスケールは、Fastest 1/4 mile 風速に基づいており、約400m吹走する間の平均風速であり、第1表にはおよその平均化時間が示されている。F0であれば15秒前後、F5であれば3秒前後と風速によって平均化時間が異なり、強風ほどいわゆる瞬間風速に近くなる。天気予報等で使われる瞬間風速 (3秒平均値、あるいは3秒ガスト) に慣れている者からすると、直感しにくい風速であった。日本版改良藤田スケール (以下、JEF スケール) では3秒ガストに統一された。

また、Fスケールは10種類に満たない被害指標に基

づいて20 m/s くらいのピッチで風速を推定していたのであるが、JEF スケールでは30種類の被害指標に基づき5 m/s ピッチでの評価をすることとなった。つまり、“真っ直ぐで細かい目盛り”の物差しができ、より精度の高い風速推定が可能となったわけである。

2. JEF スケール策定の背景

2005年12月25日夜、山形県庄内町でJR羽越本線の特急列車が突風で転覆し、5名が亡くなられた。日本風工学会は、2006年4月24日、国土交通大臣宛に、下記に要約した5項目の提言を発信した (日本風工学会2006)。つまり、1. 事前に強風発生を予測し、情報を伝達するシステムの構築、ハード・ソフト両面での事故や被害の対策、2. 小規模気象擾乱を精度良く捉えるためのドップラレーダの配備、3. ドップラレーダの情報などに基づき、数分、数十分後の発生を予測するナウキャスト技術の開発と、情報を速やかに公開、共有できる仕組み作り、4. 過去に頻発している地域での類似例の調査研究と予測技術開発への寄与、5. 小規模気象擾乱そのものと被害防止策に対する気象学、風工学、構造工学、防災工学、社会学等の学際的なプロジェクトの立ち上げ、国や地方自治体の真剣な取り組み、である。この背景には、2002年10月6

第1表 従来のFスケール (風速値は気象庁による) (Fujita 1971)。

F スケール	風速 (m/s)	被害の程度	平均化時間 (s)
F0	17-32	Light	15
F1	33-49	Moderate	10
F2	50-69	Considerable	7
F3	70-92	Severe	5
F4	93-116	Devastating	4
F5	117-142	Incredible	3

* 東京工芸大学風工学研究拠点。
yukio@arch.t-kougei.ac.jp

© 2016 日本気象学会

日、7日に鹿児島県から千葉県にかけて連続的に発生した広域竜巻等突風被害、あるいは羽越本線の特急列車脱線事故の前後にも、2005年11月8日の秋田県大潟村、琴丘町、12月6日福井県三国町、12月26日秋田県峰浜村など、竜巻等の突風被害が多発している事実があり、風工学の研究者間では竜巻等突風による大きな災害ポテンシャルが強く危惧されていたからである。この提言に対して、残念ながら直ぐには国や自治体のアクションは無かった。しかし、提言の5ヶ月後の2006年9月17日に宮城県延岡市でも竜巻が発生し、3名が亡くなられ、JR日豊本線の特急列車が転覆事故を起こした。更に11月7日には北海道佐呂間町の竜巻で9名が亡くなられた。ここに来て初めて、事態の深刻さが認識されたようである。

翌2007年度の科学技術振興調整費が竜巻等の研究に当てられ、気象学、風工学に関連する研究者が協力して、竜巻を生み出す環境場、発生機構、発生予測手法、監視技術、竜巻等による突風災害対策などが調査研究され、2008年3月に竜巻防災対策に関するロードマップを含む成果「竜巻等の実態および発生予測と対策」(田村ほか 2008)が公表された。気象庁でも、竜巻予測、予報のための施設整備や解析技術の開発がなされ、2008年3月26日から「竜巻注意情報」の運用が開始された。2006年の一連の竜巻被害直前に日本風工学会から出された提言が、ようやく実現を見たのである。

スマートフォンの普及等とも相俟って竜巻映像がTVで度々報道され、温暖化、気候変化の影響で強い竜巻が将来増えるのではないかと懸念もあり、より世間の関心が高まってきているのが現状である。

これに呼応して、(独)日本原子力安全基盤機構でも、原子炉等の原子力施設への竜巻の影響を考慮した対策のための研究を2009年から開始し、奇しくも2011年3月の東日本大震災での福島第1原発事故の直前に成果報告書(東京工芸大学 2011)が出された。

これら一連の動きの中で、気象庁・気象研究所、(独)建築研究所、国土交通省・国土技術政策総合研究所、東京工芸大学の4機関が、2010年から「竜巻等の突風による被害調査に関する共同研究」を開始し、竜巻等の被害調査の実施、被害調査マニュアルの作成、および日本版改良藤田スケールの開発がなされた。

2012年5月6日には、北関東で竜巻が発生し、つくば市では1名の方が亡くなられた。ここで、従来のF

スケールに基づく風速評価と、最新の風工学や構造工学の知見に基づく風速評価との間に乖離のあることが改めて顕在化し、2013年7月、気象庁に「竜巻等突風の強さの評定に関する検討会」が発足した。これとほぼ軌を一にして、前述4機関による共同研究を継承する形で、2013年9月に文部科学省・共同利用共同研究拠点(東京工芸大学・風工学研究拠点)の特定課題研究「日本版竜巻スケールおよびその評価手法に関する研究」が開始され、数多くの機関の方々が参画して、JEFスケールの原案策定作業が進められた。そこでの研究成果(奥田ほか 2015)が、JEFガイドラインのDI(Damage Index:被害指標)・DOD(Degree of Damage:被害度)と風速の対応付けに活用され、2015年12月21日に気象庁「竜巻等突風の強さの評定に関する検討会」で正式に承認され、公表に到ったのである。

3. JEFスケールの概要

JEFスケール策定作業には、2つの大きな柱があった。1つは被害指標DIと被害度DODに対応した風速の算定である。実際の竜巻は、縦渦としての複雑な3次元的风速分布、急激な気圧低下や風速変化を伴う複雑な現象で、これらが正確に把握され、かつそれらによる力学的影響等が明らかでない、被害から実際にそこで発生していたであろう風速は推定できない。しかし、これらは実のところ良く分かっていない。現状では、台風や季節風と同じストレート風としての境界層乱流による空力的効果等に関する知見に基づいて、作用風速を推定するしか方法が無い。結果的に、台風等と同じようなストレート風での等価な被害風速を推定していることになる。したがって、DI・DODに対応する被害風速は、急激な気圧降下や風速変化の影響も含んで発生した実被害と同じ被害を発生させるストレート風の「等価瞬間風速」(3秒ガスト)なのである。そこに風速計を置いていたら記録されたであろう実際の風速ではないことに注意されたい。逆に言えば、ここで算定されたDI・DODと風速の関係は、原則として台風等による被害にも適用できるわけである。ただし、アスファルト路盤についてのみ風速算定上の仮定が異なり(気象庁 2015)、竜巻時に限定される。第2表は、JEFスケールで採択された30の評価指標DIである。被害指標DIの名称はJEFガイドラインに従っているが、スペースの関係上、省略した表現のものもある。第2表中のSは鉄骨、RCは鉄

筋コンクリートを表す。

また、一例として、DI-1「木造の住宅又は店舗」のDODと対応する風速を第3表に示す。これらの対応関係は、建築物等の設計に関する規基準類、耐力試験の結果、風洞実験結果等々に関する知見を集めて評価したものである。しかし、被害から風速を推定するには必ず精度に限界があり、風速値は5m/sピッチの数値で表している。また、建築物等の設計法、構工法、部材の接合方法、使用材料等々は多種多様であり、経年劣化の影響等もあって、現実の建築物等の耐力にはばらつきが大きい。空気力学的な条件も、隣接建物や周辺地形の影響など多種多様である。

第2表 JEFスケールで用いる評価指標DI(気象庁2015)。

No.	被害指標DI	No.	被害指標DI
1	木造の住宅又は店舗	16	鉄道車両
2	S系プレハブ住宅店舗	17	電柱
3	RC造集合住宅	18	地上広告板
4	仮設建築物	19	道路交通標識
5	大規模庇、独立上屋	20	カーポート
6	鉄骨造倉庫	21	塀
7	木造の非住家建築物	22	木、アルミ、樹脂フェンス
8	園芸施設	23	防風・防雪フェンス
9	木造の畜産施設	24	野球場、ゴルフ場ネット
10	物置	25	広葉樹
11	コンテナ	26	針葉樹
12	自動販売機	27	墓石(棹石)
13	軽自動車	28	路盤
14	普通自動車	29	仮設足場(壁つなぎ材)
15	大型自動車	30	ガントリークレーン

第3表 DI-1 木造の住宅又は店舗(気象庁2015)。

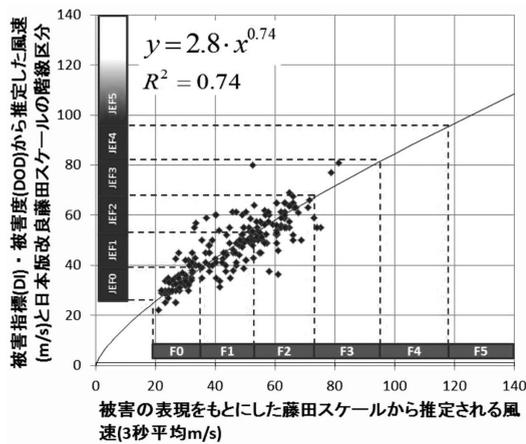
No.	被害度DOD	風速(m/s)			
		代表値	下限値	上限値	
1	目視で分かる程度の被害、窓ガラスの損壊	30	25	35	
2	比較的狭い範囲での屋根ふき材の浮き上がり又ははく離	粘土瓦ぶき	35	25	50
		金属板ぶき	40	30	55
3	比較的広い範囲での屋根ふき材の浮き上がり又ははく離	粘土瓦ぶき	45	30	60
		金属板ぶき	50	40	65
4	屋根の軒先又は野地板の破損又は飛散	50	40	65	
5	上部構造の変形に伴う壁の損傷(ゆがみ、ひび割れ等)	55	40	65	
6	金属系の外壁材のはく離	60	45	70	
7	小屋組の構成部材の損壊又は飛散	65	50	75	
8	上部構造の著しい変形又は倒壊	75	55	85	

したがって、被害に対応する風速も幅を持って評価する必要があり、上限値、下限値が示されている。どのような場合に代表値、下限値、上限値をとるべきかについては、JEFガイドラインを参照されたい。

風速算定に用いた風圧係数、風力係数は、原則として境界層乱流中での建物等の頂部風速から求めた平均速度圧に基づくものであるが、対象によっては、高さ方向に風速一定の状況での風力係数によるものもある。算定風速の多くは対象物の頂部での風速に対応することとなるが、実際の竜巻時での風速分布とは一致していないので、注意が必要である。建築物等の設計の観点からは、実風速でなくとも、破壊等をもたらす等価風速が与えられれば十分な場合が多い。作用風力や被害がそれで再現できるからである。なお、ストレート風での等価瞬間風速を与えているという意味では、従来のFスケール、米国のEFスケール(Texas Tech University 2006)も同じである。

もう1つの柱はJEFスケールの風速階級の策定である。これには多くの議論があった。米国のEFスケールと同様の方法でJEFスケールの風速階級を見直そうとする気象分野の方々の意見と、現行のFスケールの風速階級を維持して、対応するDI・DODを見直せば良いとする風工学分野の方々の意見が、終盤まで対立した。しかし、JEFスケールを実際に運用するのは、主として気象庁の方々であるということと、各竜巻を代表する風速が記録として残されれば、風工学的実用の面では十分であるということから、JEFスケールでも、米国のEFスケールと同様の方法で風速階級の変更がなされた。

第1図の横軸は被害の表現によるFスケールに基づいて推定された風速値で、縦軸は第3表に例示されたようなDI・DODに対応する風速値であり、JEFスケールの風速区分は両者の回帰曲線に基づいて定められた。各プロットは、2007年～2013年に発生した主な竜巻(被害事例30件以上)、および千葉県茂原市(1990)、愛知県豊橋市(1999)、北海道佐呂間町(2006)でのF3相当の竜巻による被害事例215件に対



第1図 過去の被害事例のFスケールによる風速評定とDI・DODによる風速評定(気象庁 2015)(風速は3秒ガスト)。

応している。プロットの横座標は、気象庁の職員5名がそれぞれの被害事例に対してFスケールから風速値を評定し、5名の平均値をとったものである(気象庁 2015)。プロットの縦座標は、風工学の専門家5名がDI, DODを判定したものに第3表の例にあるような風速を当てはめ、評定者の平均値をとったものである(気象庁 2015)。図の回帰曲線は、Fスケールでの風速値を x (m/s)、JEFスケールでの風速値を y (m/s) とすると $y=2.8x^{0.74}$ と表され、JEFスケール各階級での下限は $V_L=14 \times (\text{JEF階級}) + 25$ (m/s)、上限は $V_U=14 \times (\text{JEF階級}) + 38$ (m/s)と表現でき、第4表のようにまとめられる。

今後は各竜巻に対して、JEFスケールのみならず、その竜巻を代表する風速(評定風速)も発表、記録される。評定風速 V_R は、複数の被害事例の DI_i , DOD_i から等価瞬間風速 V_i を推定し、原則としてその中の最大値 $V_{i,max}$ を採るものとしている。等価瞬間風速 V_i 、あるいは評定風速が得られれば、工学的な実務からは、それらがJEFスケールでどの階級に入るかということはそれほど重要ではない。マッハ1までを分割して規定した従来のFスケールを、美しいとして尊重する向きには、これらの風速 V_i あるいは V_R をFスケールの枠組みに当てはめることも可能なのである。

なお、ある風速で物が壊れるとすると、その後でそれ以上強い風が吹いても、壊れてしまった物からはその高い風速は推定できない。サチュレートしてしまっ

第4表 JEFスケールの風速階級(気象庁 2015)。

JEFスケール	風速範囲(3秒ガスト) m/s
JEF 0	25 - 38
JEF 1	39 - 52
JEF 2	53 - 66
JEF 3	67 - 80
JEF 4	81 - 94
JEF 5	95 - 99

た計測器の様なものである。複数のDOD, 複数のDIをよく見定めて、推定風速の確からしさを上げることが必要となる。しかし、被害からの風速推定には本質的にこの側面があることに注意が必要である。

4. 今後の課題

個々の建築物が竜巻に遭遇する確率は4万年に1度程度と極めて低く、大被害を生じる強い竜巻となると数十万年に1度程度でしかない(田村ほか 2008)。このような極めて稀な事象に建築物等のハード面に対応するのは、経済的合理性を持たない。しかし、市町村規模で考えると百年に1度程度となり、都市防災の対象としては考える必要がある。また、年間数個の竜巻が鉄道線路を横切っており、鉄道事故防止のターゲットとはすべきである。原子力発電所のような被害後の社会的インパクトが極めて大きい高重要度施設、高危険度施設については、極端事象であっても対策の必要がある。人命保護の観点からは、予報、あるいは適切な避難のためのソフト面での対策が必要となる。これらハード、ソフトの対策を適切に行うには、どの程度の風速の竜巻がどの程度の頻度で発生するのか、竜巻内で風速がどのように分布しているのか等の情報が必要である。

今後、JEFスケールを有効に活用し、精度良い情報を蓄積して、突風防災に役立てることが極めて重要である。世界的にも竜巻等の突風に対する関心は高く、JEFスケールは世界共通の竜巻スケールの構築にも貢献できるものと確信する。建築物の構工法等も必ず変化して行くものである。使う中で改良点を見いだし、気象学、風工学、構造工学等の分野横断的な協力を継続させ、より良いものにしていくことが重要である。

謝 辞

JEF スケール策定は、文献（気象庁 2015；奥田ほか 2015）に示されているように、数多くの方々のご協力、ご努力による成果である。ここに厚く御礼申し上げる次第である。

参 考 文 献

Fujita, T.T., 1971: Proposed characterization of tornadoes and hurricanes by area and intensity. SMRP Research Paper No.91, The University of Chicago, 42 pp.
気象庁, 2015: 日本版改良藤田スケールに関するガイドライン. http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tornado/kentoukai/kaigi/2015/1221_kentoukai/guideline.pdf (2015.12.21 閲覧).

日本風工学会, 2006: 積乱雲に伴う竜巻あるいはダウンバーストなどの小規模気象擾乱による風災害抑制に関する提言. 風学発2006-第0001号.

奥田泰雄ほか, 2015: 日本版改良藤田スケールの開発全体概要. 日本風工学会誌, 40, 117-118.

田村幸雄ほか, 2008: 竜巻等の実態および発生予測と対策. 平成19年度科学技術振興調整費・重要政策課題への機動的対応の推進・研究成果報告書.

Texas Tech University, 2006: A recommendation for an enhanced Fujita scale (EF-Scale) submitted to the National Weather Service and other interested users, Revision 2.

東京工芸大学, 2011: 竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究. 平成21~22年度原子力安全基盤調査研究, (独)原子力安全基盤機構成果報告書, 424pp.