

# 建設現場上空の気象予報と警報システム

大塚 清敏

地上 600 m を超える高さに達する建設現場は、厳しい自然環境のなかでの安全施工が、当初からの大きな課題であった。天候の変化による作業可能性の事前把握、台風・低気圧・前線の接近通過による強風、あるいは雷、地震など災害につながる恐れのある自然現象の襲来に対し、超高層鉄塔という特殊な現場環境のなかで適切なタイミングでの作業の中断や避難を行えるようにすることが、安全管理上必要であった。そうした目的のために気象予報と警報システムを導入し安全管理に供した。ここでは、その概要について述べる。

キーワード：強風、雷、地震、超高層鉄塔、施工、避難、安全

## 1. はじめに

東京スカイツリー®の建設工事(図1)を安全に工期内に完成させるうえで、最も影響が大きかつ未知の部分が多いのは上空の気象などの自然条件である。気象庁は東京上空での定常観測は実施していないが、例えば地上と比べ風はどの程度強いのか、塔体が高くなるにつれて落雷の状況はどのように違うのか、など日常の作業環境から災害に至るまで注意すべき課題が多くあった。

建設地である東京を含む関東地方は、自然現象が必ずしも穏やかとはいえない地域である。図2に茨城沖の太平洋上空から関東地方を南西方向に俯瞰した画像を示すが、関東平野は本州の脊梁山脈から太平洋に突き出した形をしており、風が通り抜けやすい地形をしているのがわかる。また、東京の西方や北方には東京に襲来する雷雲の発生地域を控え、これに世界有数の有感地震多発地帯という事情が加わる。このため気象・地震の両方に対し、鉄塔建設という通常の建物とは異なる状況を反映した安全管理上の配慮を十分に行う必要がある。

こうした背景を踏まえ、以下では毎日の作業にかかわる建設現場上空の「気象予報システム」、災害の発生に関連する地震や雷、風についての「警報システム」、それらの際の「行動計画」について述べる。

## 2. 気象予報について

気象学では風の流れに対して、建物・樹木など地上の障害物による摩擦や地面温度など、地面の影響が直



図1 建設中の東京スカイツリーからの眺望

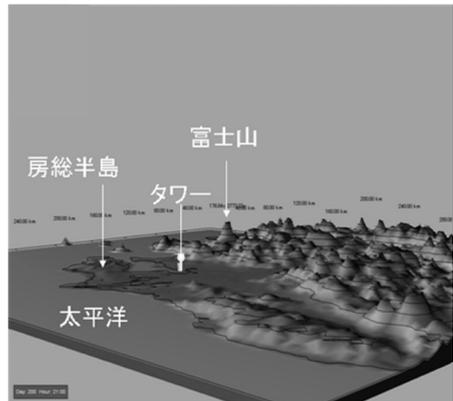


図2 関東地方の地形の俯瞰

接的に及ぶ気層を接地境界層といい、それより上の部分を自由大気という。境界層の高さはおよそ1kmくらいである。東京スカイツリーはこうした境界層に完全に含まれる。境界層のなかでも地上から高度300mくらいまでは、建物の耐風性や風環境評価などの風工学分野の研究から、風の性質が比較的良好に知られている。一方で、境界層より上の自由大気は気象学の主な研究対象でもあり、多くの知見がある。しかしながら、それらの中間の地上300mあたりから同1kmくらい

おおつか きよとし  
株式会社大林組 技術本部 技術研究所 環境技術研究部  
〒204-8558 東京都清瀬市下清戸 4-640

の間は、風を始め不明な点が最も多い高さの範囲であり、東京スカイツリーの建設現場はまさにこの高さ範囲にある（図3）。

施工範囲の風を観測的にとらえるため、大気中の細かい塵の動きを赤外線レーザーの反射を利用してとらえるドップラーライダー風観測装置を導入し、上空風況の把握を行った。それによると例えば、地上では日中にその日の最大風速が出て夜間には風が弱まることが多いが、地上数100m以上では逆に夜間に風が強まったり、地上でほとんど無風のときでも高さ600m付近では強風であるなど、高さによる風の違いが簡単ではないことが明らかになった。

図4は台風通過時の観測例を示している。時間経過により高さ500~600mで最も風速が高くなるなど、単純な予報ができないことがわかる。

東京スカイツリーの建設は鉄骨工事が全体のなかで最も主要な部分を占める。鉄骨工事はタワークレーンを使って、鉄骨を地上からそれまでに組み上がった鉄



図5 クレーンによる建設部材の揚重

骨の最上部まで楊上し、溶接により積み上げていくことを日々繰り返す（図5）。そのため、日々の工事に先立つ気象状況、あるいは施工作业中の天候の変化の把握は必須である。中でも風は作業の進捗に大きな影響を与えるが、それらの例を2つ示す。

例1：クレーンに関する安全規則により、10分間の平均風速が秒速10mを超えるとクレーン作業はできない。長時間にわたる中断は、その日の予定作業の翌日への持ち越しにつながり、それによる作業ヤードでの鉄骨部材の残留は搬入予定の変更を余儀なくさせる。鉄骨部材は交通の少ない夜間に陸送されるので、そうした変更には早めの対応が必要となる。

例2：ゲイン塔のリフトアップ作業では風が強くなると揺れが生じ、垂直の精度の確認が困難になる。リフトアップ作業はおよそ10日に一度行われ、約10mのリフトアップ作業に半日を要する。日程の変更は、リフトアップ前後に行われるゲイン塔へのアンテナ取り付け作業の進捗に影響を及ぼす。

このように作業の突然の変更や直前の調整を少しでも減らすことは、作業の効率的な進捗に直接的につながる。そのためきめ細かな気象情報が求められる。

気象庁の数値予報と現地上空風の観測結果に基づいた補正手法をあわせ、地表から上空までの風予報の最適化による予測精度の向上を行った（図6）。それにより工事場所の上空の予報を1日2回、12時間ごとに出し、風速の段階に応じて色分けした情報を提供するなどし（表1）、日々の細かな作業調整に活用した。こうした手法は鉄骨の作業予定の調整、ゲイン塔のリフトアップ実施日の確定など、円滑な現場運営に寄与させることができた。

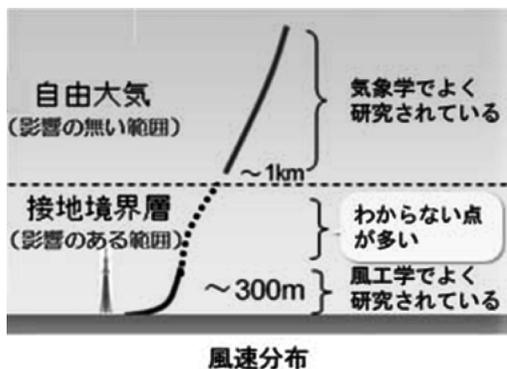


図3 高さによる大気の構造と既往の研究知見

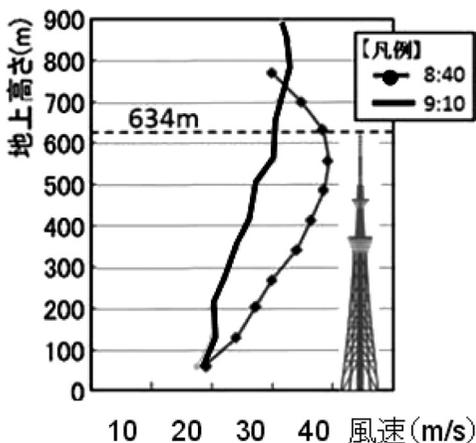


図4 台風時の風速の観測例

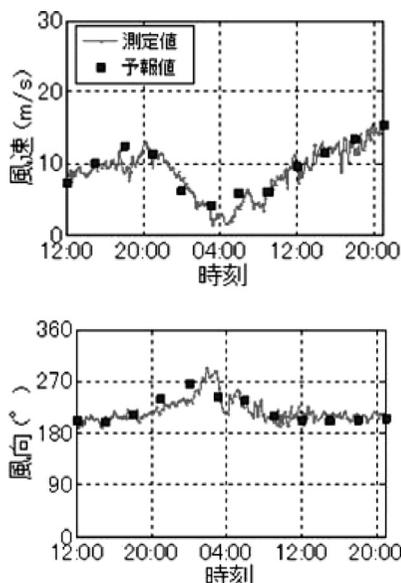


図6 高度 500 m 風速・風向の予測と実測の対応状況

表 1 高さ別の風・気温予測の例 (抜粋)

			3月30日 0時	3月30日 3時	3月30日 6時	3月30日 9時
地上650m	風速 (m/s)		8.0	10.0	12.0	11.0
	風向 (方位)		北東	東北東	東北東	東北東
	気温 (℃)		9.2	8.9	8.9	9.0
			3月30日 0時	3月30日 3時	3月30日 6時	3月30日 9時
地上500m	風速 (m/s)		7.0	9.0	10.0	9.0
	風向 (方位)		北北東	北北東	北北東	北東
	気温 (℃)		13.5	13.1	13.6	13.7

### 3. 地震・雷・風の警報システム

#### 3.1 システムの概要

地震や雷、突風は突然発生し、災害や事故を引き起こす要因となる。

未知の高さの東京スカイツリーの工事では、それらの予測につながる情報をモニタリングしながら警報を発する気象地震監視警報システムを開発 (図 7)、それを活用して安全に作業を行い行動計画を作り実施した。

地震については気象庁が発信する緊急地震速報を活用した。緊急地震速報を受信すると現場内にはスピーカーによる放送と回転灯による表示で警報が発せられ、同時に現場事務所内の警報監視 PC に緊急地震速報に連動した震源、地震の規模などが表示される (図 8, 9)。

雷や風に対しては、気象予報や現場での観測に基いて警報システム構築した。気象庁の注意報・警報も民間気象会社からの提供を通じシステムに取り込んだ。

警報監視 PC に取込まれた各種気象情報から現場内

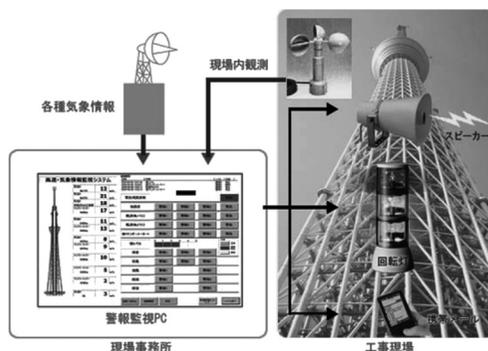


図 7 気象地震監視警報画面とスピーカー・警告灯



図 8 緊急地震速報に基く震源・規模の表示 (画面の中の円は地震の規模を表す)

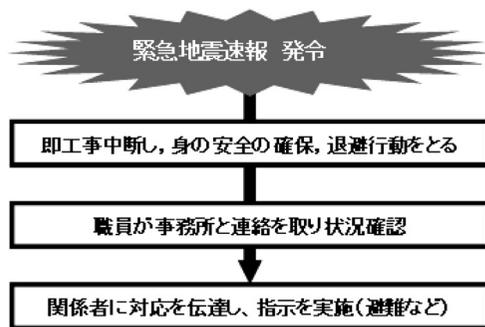


図 9 緊急地震速報発令時の行動様式

にスピーカーによる放送と回転灯による表示で警報を発する。警報は、後述するように観測による発雷や上空の雲の帯電状況、気象庁降雨レーダーおよび上空風情報による雷雲の接近・移動の把握により、また風については建設中のタワー頂部の風速変化状況により、図 10 に示すようなレベル 1 からレベル 4 (緊急) までの 4 段階で行い、レベルに応じた行動をとった。

#### 3.2 建設中の雷からの避難

雷は発生頻度が高く、超高所の屋外作業ということ

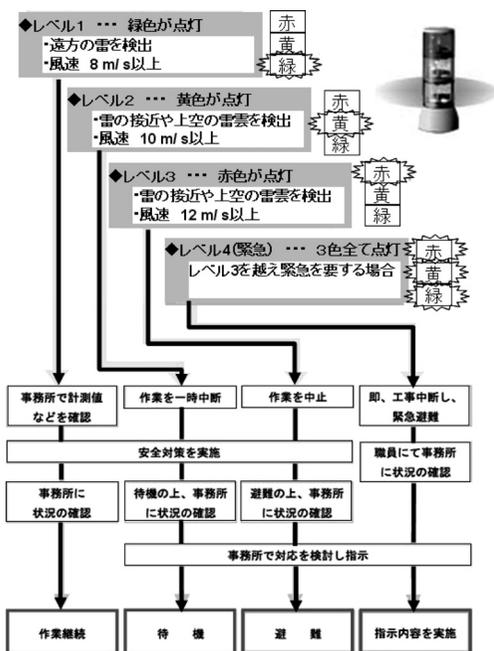


図 10 雷および強風の警報レベルと行動様式

もあり、とりわけ注意を払うべき自然現象である。

完成後の東京スカイツリーは雷に対して十分に安全な建物である。しかし、建設途中は完成体の仕様が未達であることや、建設作業のため作業員が外部足場などの場所にいることもあり、危険性が高くなる可能性がある。そのため、雷の発生や接近状況を事前に適切に把握し、状況に応じた速やかな避難を行うことが必要となる。

超高層鉄塔への落雷の実態については、既往の研究がない。そのため、雷保護範囲の考え方や落雷電流による高電圧発生箇所について詳細な検討を行った。それに基づいてクレーンの吊り荷を經由した再放電、塔体外周での作業中の側方からの雷直撃など、とりわけ危険性の高い状況を列挙、避難先として適切な箇所、速やかに退避すべき箇所の要件をまとめた。

その結果は、図 11 のように警報指示が発令された際の避難場所と退避すべき箇所とを色分け表示して作業員に周知し、警報とともに直ちに避難することで安全確保を図ってきた。こうした運用による対策に加え、例えばリフトアップ中のゲイン塔と塔体との間の再放電防止のための仮設導線による等電位化をはかるなど、ハード的な安全対策にも力を入れた。

### 3.3 雷警報の信頼性向上のための観測

雷警報の発令では運用上のいくつかの課題があった。安全側に余裕を見過ぎると警報が多くなり、作業の中

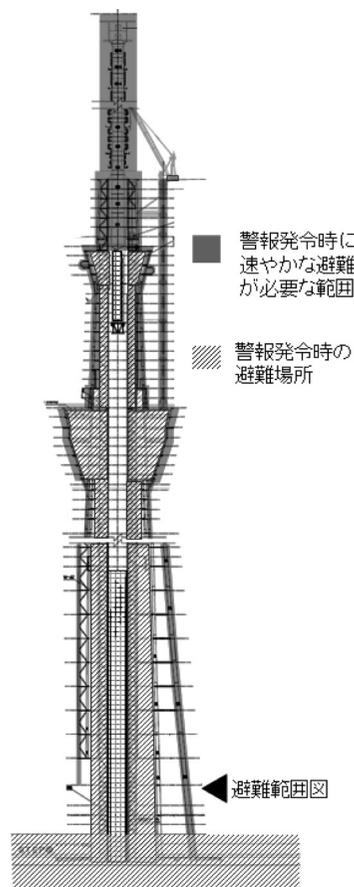


図 11 警報発令時の危険箇所・避難場所

断が必要以上に頻繁に発生する事態になるといった側面がある。こうした事情は本報の警報に限らず、このような注意情報に広く一般にいえることである。そのため、独自の雷観測を行い気象情報とあわせた総合的に解析により、警報の信頼性を向上させる次のような取り組みも行った。

雲間雷や落雷のような雷放電に伴って発生する電磁波測を測定することにより、発雷や雷雲の活発さの度合い、あるいは接近状況を把握した。用いた機器では 100 km 以上離れた雷まで検出することが可能であるため、これにより発雷は事実上完全に捕捉される。合わせて地上での静電界を測定することで、現場直上の雲の危険性の度合いの判定に役立てた。静電界の観測により、単に徐々に接近する雷だけでなく、現場上空での雷雲発生も検知されることになる。

これらの雷観測に対し気象庁降雨エコーの動きを合わせることで、雷の接近状況や危険性の度合いを適切に判断することができ、さらに、作業再開のタイミングも適切に与えることができた。



図 12 東京スカイツリー頂部への落雷の例

図 12 は完成高さ 634 m に到達後に雷観測装置により撮影された塔頂部への落雷である。写真の撮影日に公的な落雷記録はないが、634 m の頂部から雲に向かう上向きの落雷であることが明瞭である。建設中に数回落雷があったが、警報による塔体内への避難が適切

に実施され作業員の被害は皆無であった。これらは、完成後の東京スカイツリーの雷に対する安全性を図らずも実証したことにもなる。

#### 4. まとめ

ここで紹介してきたように、気象予報や地震や雷、風などの警報システムの開発と適用、日頃からの避難行動計画立案と実行を行い、作業者の安全確保をしながら建設を進めてきた。奇しくもゲイン塔リフトアップの最終段階において東北地方太平洋沖地震が発生した。そのときも警報システムの適切な動作により避難・退避行動が速やかに行われ、人的被害は皆無でありその後の工程に大きな影響を与えるものではなかった。立地の自然環境の厳しさと正しく向き合い、合理性ある状況想定を大いにめぐらすことが、未知の領域での安全性の確保においてもっとも肝要なことであると考えている。