

世界貿易センタータワーは何故崩壊したか—科学、工学及び推測

1. はじめに

世界貿易センター（WTC）ツインビル（図1左）は、テロによって2001年9月11日瞬時に完全崩壊して多数の犠牲者を出し、米国のみならず全世界に大きな衝撃を与えた。ビルに構造的欠陥がなかったのか、鋼製コラムが溶融したのか等その他について、誤った憶測を含めて、事故原因について多くの報道がなされている。この事故では、イ）大型航空機が、多量の燃料を積載してビルに激突し、構造物外周コラムに損傷を与えた。ロ）続いて起った大火災によって、鋼構造の強度を失わせ、曲がりが生じた。ハ）崩壊は内部で起こり（図2右）、倒壊しなかった。これらの項目を、科学、工学及び推測から議論する。

2. タワーの設計と構造

タワーの設計と構造の各項目を表1に示す。設計は“perimeter tube”（外周を持つチューブ）デザインが採用され、ビル容積の95%が空洞の中空鉄骨構造（図2）で、外部コラムと内部コアからなり、高さ／幅比6.8の巨大帆船様の形状で、強度はビル自体の重量よりも、ハリケーンによる風圧負荷に耐えるように設計され、通常の場合1～2のコラムが損傷しても倒壊しない設計であった。

3. ジェット機の激突と着火

ビルは航空機の総重量の30倍の風負荷に耐えるように設計されていたし、機体の床のAl合金製龍骨で外部コラムの若干は破損したが倒壊しなかった。続いて起った積載の9万立の燃料の着火によって1～2のフロアー全面に起った大火災が明らかに崩壊の大きな原因の一つである。

4. 火災によって発生した最高温度

若干のメディアが報道した火災で鋼構造が溶融したという議論は正しくない。これは温度と熱を混同した結果で誤った推測である。温度は示強変数、熱は示量変数である。熱は物質の量によって変化するが、温度は量によって変化しない。WTCの火災で、数フロアーに9万立もの、多量のジェット燃料が散布された事象は異常な高温が発生することを意味しない。表2に燃料科学における3タイプの火炎を示す。温度は燃焼様式によって変化する。WTCで起った火災は多量の黒煙の発生が見られた事実より、最も低い温度の“diffuse flame”である。その火炎温度は計算できる。ジェット燃料の炭化水素が純酸素中で着火すると最大火炎温度は約3000℃になる。しかし空気中では

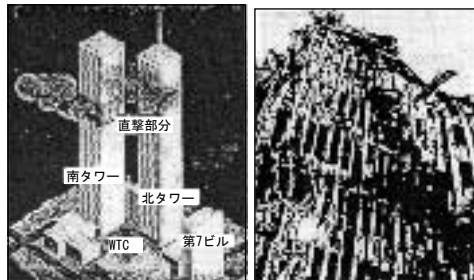


図1 WTCツインタワーと2機の航空機の直撃部分（左）崩壊したWTCタワーの鉄骨構造（右）

表1 世界貿易センタータワー設計と構造

- 1) 建設：1960年中頃から1970初頭に建設された。
- 2) デザイン：巨大片持梁垂直コラム工法による“erimeter tube”（外周を持つチューブ）構造
- 3) 構造：鋼製箱形（36cm）断面の244の外部コラムとビル総量50万トンを支える27m×40mの内部コアからなり、95%は空洞の中空構造で、64m角、地上411m、地下21m、高さ／幅比6.8の巨大帆船状の形状。（図2参照）
- 4) 強度：ビル自体の荷重よりも、風圧負荷が重視され、225/km/hのハリケーンにも耐える強度に設計され、1～2のコラムが損傷しても、荷重は隣接コラムに移り、ビルは倒壊しない。

2/3だけ減少するので、約1,000℃になる。この理由は、各O₂分子はCOとH₂O分子の生成熱を必要とする。純O₂の場合には2個の分子の加熱だけでよいが、空気の場合は4個のN₂



図2 WTCタワーの鉄骨構造

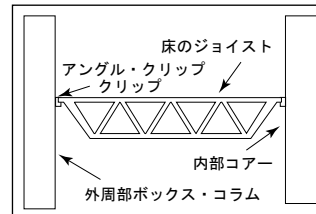


図3 WTCタワーの床のジョイストとコラムの連結の構造の模式図

表2 燃焼科学に於ける3タイプの火炎

- 1) jet burner : 燃料と酸化剤が略当量比に混合され、一定容積の空間で着火する。燃焼生成物は膨張しないので、高速の完全に燃焼したジェットとして噴出する。ジェット エンジンで起こる。最も強い熱を発生する。
- 2) pre-mixed flame : 予め混合した当量比の混合物が一定圧力下で、ノズルから噴出する時に着火する。jet flameの火炎速度には達しない。オキシアセチレン・トーチやブンゼンバーナーで起こる。
- 3) diffuse flame : 着火前には、燃料と酸化剤は混合されない無制御の状態を流出し、燃料／酸化剤の比が一定値に達した時に燃焼する。暖炉の火炎や、WTCの火災は、空気中でのこの燃焼である。3タイプの中では、最も低い強度の熱を発生する。

分子をも加熱しなければならないからである。diffuse flameの場合には最適混合比になることは少ないし、WTCでは余分の燃料の加熱に熱が使われたと考えられ、750～800℃以上にはならなかったと思われる。鋼の溶融温度（約1500℃）には達していない。

5. タワー崩壊の原因

崩壊はジェット機の力学的衝突だけでは起らなかった。続いて生じた火災による800℃程度の加熱で、外周部コラムの強度低下と曲がりが生じた。これに加えて、図3のような外周部壁上のコラムと内部コア構造体の間のフロアーを支えるangle clips（隅のつかみ）が構造的弱点になったことが崩壊の直接の引き金になったことが多くの専門家に認められている。9万立の火災で最もひどく燃焼した1～2のフロアーの桁が強度を失い、外部コラムが外方に曲がり数個のフロアーが落下した。10個のフロアーが落下したとして、約45,000トンの重量は、angle clipsで持ちこたえることは無理で、次々と起る落下がドミノ現象を呈し、ビルの内部は10秒以内に底部まで、200km/hの高速で崩壊したと思われる。このビルには一般的な設計や構造の欠陥はなかった。如何なる設計者もビルのフロアーに一度に9万立の火炎ビンが飛び込んでくるとは予想しなかったし、それは無理である。数秒で4000m²のフロアー全面に火災が一樣に拡がり、大量の熱で外部コラムの強度低下が起り、angle clipsへの荷重の集中で、フロアーの落下が次々と起り、異常現象が重畳して、考えられないような大事件が起ったのである。

6. 今回のような災害の防止対策

WTCのタワービルは、ハリケーン等に対する強度対策は十分であったにも拘らず崩壊した。巨大ビル設計・構造を改良

しても、今回のような災害を防止することは出来ない。人命保持を最優先するために、緊急時の避難のスピードアップの方策とビル構造に対しては、構造メンバーの火災に対する強化、煙の発生と吸入を防止できるようなシステムの構築、エネルギー吸収材料の利用等によって、避難に対して可能な限りの余裕を生み出す方策が必要であろう。

最後に犠牲になられた多くの方々への御冥福を祈る。

参考文献：下記から多くを利用した。深謝する。

T. W. Eagar and C. Musso : Why Did the World Trade Center Collapse? Science, Engineering, and speculation, Journal of Metals, Vol. 53 (2001), No.12, 8～11.