

第 11 章 考察と結論

11.1 はじめに

東日本大震災を引起こした 2011 年東北地方太平洋沖地震の本震（3 月 11 日午後 2 時 46 分）によって、川崎市幸区にあるミュージア川崎シンフォニーホールのホール内天井が広範囲に落下し、また宙吊りになった部分もあった。当時公演等の催しは行われておらず、客席部分には人はいなかった。パイプオルガンの練習をしていた奏者は、地震発生と同時にドア付近に逃れ、その後ホール外に出たため、落下の最中には、ホール内に人はいなかった。

本章では、第 10 章までに記述した現場調査・測定、実験、解析等の情報を簡単にまとめるとともに、それらの結果をもとに行った落下原因に関する考察と結論について述べる。

11.2 地震動と建物の応答

この地震によるこのホールの場所（幸区内）での震度は、直接の記録はないが、気象庁の発表では、幸区で震度 5 弱、川崎区で 5 強である。また、約 1km 離れたところの地震計の記録から、この地点の地震動波形を計算し、それから震度を求めたところ、5.1（震度 5 強）であった。

この地震動波形では、最大加速度が、東西方向（長辺＝前後方向、X 方向）、南北方向（短辺＝左右方向、Y 方向）ともに、約 150 ガルである。また、上下方向は、100 ガル弱である。

この地震動波形を用いて、建物の地震応答解析（固有周期 長辺（X）方向 1.09 秒、短辺（Y）方向 1.02 秒、減衰定数 5%）を行った結果、小屋トラス部分での最大応答加速度は、水平 X,Y 両方向とも、500 ガル程度であり、上下方向は、200 ガル強である。天井はこの小屋トラスから吊られたブドウ棚から吊られている。

このブドウ棚の水平方向の固有周期は、いくつかの仮定をした上で、X,Y 両方向とも 0.15 秒程度であるので、実際上も相当剛性が高く、ブドウ棚は全体としては、おおむね小屋トラスと同じように揺れると考えられる。ただし、このブドウ棚には、図面上長辺（X）方向にブレースが描かれているが、上層ブドウ棚の上手寄りの 4 スパンには、図面にあるブレースが存在しない。このことによって、ブドウ棚には、ねじれ振動が生じたと考えられる。

11.3 天井の構成と被害状況

この天井は、平面的には、ステージ上部の天井反射板とシーリングルーム部分などの中央の高天井部分を、客席上部である外側環状部分（壁沿い部分）が囲む形をしている。中

央部分では、シーリングルームの下の天井が落ちているが、反射板の上の天井は、下地組に多少の変形や損傷があるものの、落ちていない。反射板より前側（オルガン寄り）は、宙吊りになっている。周辺部分では、上手側ステージ脇あたりから後方座席、さらに下手側の半ばあたりまでの天井が落下している。ここから前方、パイプオルガンあたりまでは、落下していない。

この天井は吊り天井であり、その部材と接合部の構成は、最も多く採用されている二段吊りのところで、おおむね次のようになっている。

ブドウ棚下部の H 形鋼－先行ピース－一次下地（リップ溝形鋼）－フック状金具（商品名 つりっこ 2 号、または溶接）－吊りボルト－防振ゴム－吊りボルト－ハンガー－二次下地（リップ溝形鋼）－フック状金具－吊りボルト－ハンガー－野縁受－クリップ－野縁－（ビス）－天井板（5 枚張り）

落下した天井は、ほとんどが一次下地（リップ溝形鋼）からフック状金具が外れて（あるいは溶接が切れて）落ちている。フック状金具は、商品名「つりっこ」であり、そのうちおもに「つりっこ 2 号」が使われていた。なお、「つりっこ 3 号」も使われていたが、その全体としての使用量は 2 割弱である。この 3 号は、2 号よりも板厚が大きく、強度も大きいとみなしうる。このほか、後付ピースの分離、先行ピースからの一次下地の分離、などが見られた。

11.4 天井の特徴と揺れおよび下地組にかかった力

(1) この天井の特徴

この天井は、一般的な天井と比較して、次の 2 点に大きな特徴がある。

- ①天井板が 5 枚張りになっており、非常に重いこと
- ②全面にわたり凹凸があり、非常に複雑な形をしていること

これらの特徴が、今回の地震被害と密接に関係していることは、確かだと思われるが、その因果関係を検討するのに先立って、まず、この天井が今回の地震で、どの程度揺れた可能性があるかをまとめておく。

(2) 天井の揺れ方

この天井の全体が一体となって揺れたとすれば、天井面での最大加速度は、小屋トラスの応答加速度（水平 2 方向、上下方向）から計算したフロアレスポンススペクトル（減衰定数 $h=5\%$ とする）によると、水平方向では、建物の固有周期（長辺（X）方向 1.09 秒、短辺（Y）方向 1.02 秒）あたりで、3.0G 内外、上下方向では同じく固有周期 0.41 秒あたりで 0.8G 程度である。

他方、本調査の一環として行われた未落下部分の天井での自由振動実験（天井面に水平方向に衝撃を与えた）の結果では、振動周期は、吊り長さの違い（2.1m と 3.9m）にかかわらず、1 秒から 2 秒程度であり、かつ方向によって異なる値であった。重力で周期が決まる振り子であれば、吊り長さが 2.1m では 2.9 秒、3.9m では 4.0 秒となるはずであり、また固有周期には方向による違いはないはずなので、単なる振子として揺れたわけではない。つまりこの部分の天井は、下地組の剛性や周囲の境界条件等の影響を受けて揺れたと考えられる。

また、部分によって自由振動周期が異なるということは、全天井面が一体として揺れたわけではなく、部分ごとに揺れ方が異なったということであり、ひいては、天井面の面内剛性が高くないことを意味している。したがって、天井が周囲の壁に接するところでは、押す方向には変位の拘束があるものの、天井面の各部分では、前後左右に揺れることが可能であると考えられる。

したがって、この天井は、全体としても部分的にも、独立した振動系を構成しているわけではないので、固有周期というものがあるとはいえないが、上記の自由振動周期で揺れるということは、この周期で強制加振されれば、部分的には共振する可能性があることを意味している。

以上のように、水平方向の揺れに関しては、建物の固有周期が 1 秒程度であり、天井も部分的には 1 秒程度の自由振動周期のところがあるので、そこでは、共振的に大きく揺れた可能性がある。上記のフロアレスポンススペクトルでは、方向にもよるが、0.5 秒から 1.2 秒あたりでは、天井の最大加速度が 1G を超え、建物の固有周期近傍では 2G から 3G くらいになることが読みとれる。

天井の振動に関する減衰定数の値に関してはほとんど情報がないが、上記の自由振動実験結果の対数減衰率から求めた減衰定数は 5%前後であった。したがって、この天井の応答を考えるにあたって、減衰定数 h を $h=5\%$ と見なしても大過ないであろう。

また、水平変位に関しては、建物の固有周期（約 1 秒）あたりでは、フロアレスポンススペクトルによると、線形応答だとすると、小屋トラスに対する天井の水平相対変位は 100cm くらいに達する。この値は、部材同士（たとえばスピーカーボックスとキャットウォーク）の揺れの違いによる擦過傷などの痕跡からみて、相対変位が片振幅で少なくとも 20cm 程度は揺れたとみられることと矛盾しない。

なお、（上層）ブドウ棚のブレースの配置が偏っていることによるねじれにより、（上層）ブドウ棚の長辺（X）方向の上手側は、（上層）ブドウ棚全体の平均的な揺れよりも大きく揺れた可能性がある。したがって、天井も長辺（X）方向の上手側は天井全体の平均的な揺れよりも大きく揺れた可能性がある。このことは、このあたりの 1 次下地（リップ溝形鋼、X 方向に配されている）に、フック状金具の滑りによって付けられたとみられる長い擦過傷があることと矛盾しない。

天井の上下方向の揺れに関しては、実験と計算から求めた下地組（二段吊り）の鉛直方向の剛性から算出した固有周期は 0.3 秒である。もちろんこの値は、下地組の構成や吊り長さによって変わるものであるが、この天井の上下方向の応答を考える上で、ひとつの目安になるであろう。ちなみに、減衰定数 h を $h=5\%$ と仮定した場合の小屋トラスの上下方向のフロアレスポンススペクトルの値は、0.3 秒あたりで 0.8G 程度である。すなわち、瞬間

的には、天井面に自重による力 1G（相当）と合わせて、2G（相当）に近い下向きの力が作用した可能性がある。

(3) 重さの影響

上記①の重いということに関しては、体育館などの一般的な天井が下地込みで、単位面積 1m^2 あたりの質量がせいぜい 30kg であるのに対し、この天井は 100kg 近くもある。したがって、常時（鉛直方向力のみ）にも、地震時（水平方向力も加わる）にも、天井下地組に大きな力がかかることになる。さらに、凹凸があることにより天井面は必然的に傾斜しており、したがって平面投影面積に対する単位面積あたりの荷重は上記よりもさらに大きくなるので、それに応じて、下地組にかかる力も大きくなる。ちなみに 45 度以上の傾斜はないが、実際にある 30 度の場合でも、平面投影面積に対する単位面積あたりの荷重は、水平の場合と較べて、約 1.35 倍になる。ただし、垂直面になっている天井はあるが、その部分は吊りボルトのピッチが標準とは異なる。

なお、1次下地からの吊りボルトの標準的な配置は、2方向のピッチがそれぞれ 1.2m と 1.5m であり、負担面積は約 1.80m^2 である。したがって、天井板が水平であるとした場合、1次下地からの吊りボルト一本にかかる長期（常時・鉛直荷重）の引張り力は、 180kg (1.8kN) 弱になる。以下の検討では、この引張り力を 180kg (1.8kN) とみなす。

(4) 天井の凹凸と揺れ方

次に、②の凹凸があるということに関していえば、まず、天井面全体が一体として揺れたとは考えにくい。すなわち吊り長さに長短があり、各部分が異なる揺れ方を強いられる可能性がある。したがって、複雑な形であることは、複雑な揺れをもたらすと考えられる。それにとまって、下地組、とくに吊りボルトひいては吊り元にかかる力にも、大きな違いが生じる。

そこで、天井の部分的な形状の違いと、それが揺れた場合に吊りボルトまたは吊り元にかかる力の大きさとの関係について、ケース分けして考察する。この天井は、立体的に凹凸があるが、原理的な考察をするため、2次元（立断面）で考える。なお、凹凸の形状や、部材（野縁など）の接合は様々であるため、下記のケースは、すべてのケースを尽くしているわけではないが、落下したケースがあり得ることを示すには、大過ないであろう。

まずこの天井の断面を模式的に描くと、図 11.4.1 のようになる。また、各部分の揺れ方を描くと、図 11.4.2 のようになる。これらの図では、吊りボルトの位置や負担面積は実際のもを反映しているわけではない。

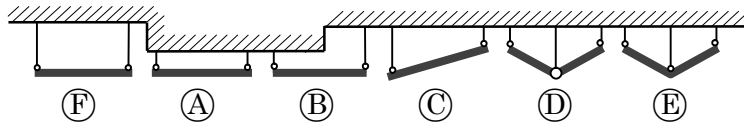


図 11.4.1 天井の断面模式図 (天井の吊られ方のケース分け)

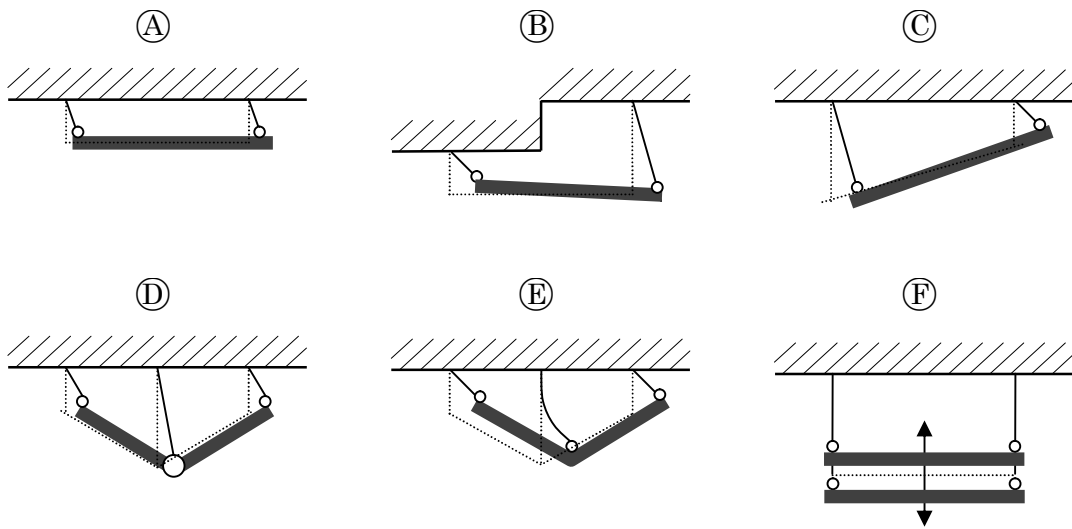


図 11.4.2 各ケースの揺れ方

A : 部分（場所、平面的な位置）ごとに見た場合でも、吊りボルトの長さが短い部分もあれば、長い部分もある。したがって、これらの部分が単独に吊られていたとしても、小屋トラスに対する水平方向の応答は、部分毎に異なり、部分によっては共振的な現象により大きな応答になる可能性がある。その結果吊り元には（鉛直力に加えて）大きな水平力が作用する。

B : 天井面が水平でも、吊り元に高低差がある場合（つまり、高さの違うブドウ棚にまたがって吊られている場合）は、その中の平面的な位置によって吊りボルトの長さが異なることになる。このような天井板が水平方向に揺れた場合、すなわち水平変位を生じた場合、短い吊りボルトの角度は長い吊りボルトの角度より大きくなる。その結果、吊りボルトにかかる水平方向の力は、長い方よりも短い方で大きくなる（この場合、鉛直方向の力は変わらない）。つまり、短い吊りボルトの吊り元に、斜め方向の大きな力が作用する。

C : 天井に凹凸がある場合、ひとつのパネル状の天井板に着目してみると、やはりその中の平面的な位置によって吊りボルトの長さが異なる。したがって、B と同じような現象が生じる。

ここまでは、ひとつのパネル状の場合であるが、天井面に凹凸を作るために、2 枚以上のパネルがある角度を持って接合されている場合について考える。そこで、V 字形を例にとる。この場合、接合部（野縁同士または野縁受同士の接合部）の曲げ剛性が問題になるが、簡単のため、ピンである場合と、剛節である場合とを考える。

D : 接合部がピンである V 字形の天井が水平方向に揺れた場合、すなわち水平変位を生じた場合、片側のパネル状の天井板は、上記 B のパネル状天井板と同じ状況になる。すなわち、短い吊りボルトに斜め方向に大きな引っ張り力が生じる。

E : 接合部が剛節である V 字形の天井が水平方向に揺れた場合、すなわち水平変位を生じた場合、次のような現象が起こりうる。まず、中央の長い吊りボルトは緩んで鉛直荷重を負担しなくなり、その分、両端の短い吊りボルトの鉛直荷重の負担が大きくなる。それに加えて、短い吊りボルトは大きく斜め方向に引張られる。これらのことから、短い吊りボルトには斜め下方向に大きな引っ張り力を受けることになる。したがって、この吊り元は、おなじく斜め下方向に大きな引っ張り力を受けることになる。

F : 天井面に凹凸がなく水平に張られた天井板の場合でも、上下動によって慣性力が生じる。その慣性力が下向きの場合には、重力と加算されて、吊りボルトの引っ張り力が大きくなる。

以上の各ケースように、この天井の下地組には、さまざまな力がかかった可能性がある。

11.5 下地組の強度

先行ピースから天井板までの部材・接合部を真下に引張った場合、接合部で破壊すると考えられるが、その接合部の強度の大小関係は、第 8 章の実験等から判断して、おおむね次のようになっている。

- ①フック状金具（つりっこ 2 号）の最大耐力は 600kg（6kN）近くある。1 次下地からの吊りボルトの負担面積は、標準的なピッチのところでは、 1.8m^2 （ $1.5\text{m} \times 1.2\text{m}$ ）である。
- ②カタログにあるつりっこ 2 号の最大荷重の値（510kg、5kN）は、この実験結果とおおむね整合している。
- ③しかし、斜め下方に引張られると、最大耐力はその方向に対して 400kg（4kN）あまりに低下する。
- ④ハンガーの最大耐力は約 1900kg（19kN）である。負担面積は、同じく 1.8m^2 である。
- ⑤防振ゴムは、ハンガーよりも強い。負担面積は、同じく 1.8m^2 である。
- ⑥クリップの最大耐力は 500kg（5kN）弱である。負担面積は、 0.4m^2 （ $0.45\text{m} \times 0.9\text{m}$ ）である。
- ⑦天井板をとめ付けているビス(群)は、標準的な仕様（ピッチ）のところでは、負担面積を勘案した場合、クリップよりも強い。

以上のことから、負担面積を勘案すると、フック状金具が最も破壊しやすいことになる。このことは、被害状況と一致する。

ただし、溶接部分がフック状金具よりも弱い可能性があるが、定量的評価は困難である。

そこで、吊りボルトの吊り元であるこのフック状金具に着目して、上記の実験結果を見直してみる。実験では、吊りボルトに鉛直荷重をかけながら、水平方向に加力するという実験を行っている。その結果のうち、1 次下地のリップ溝形鋼（長辺方向に配されている）と直角方向（すなわち短辺方向）に、その開いている向き（C の字でいえば右向き、平面でいえば下手から上手方向）に水平加力したとき、フック状金具が破断または変形によってリップ溝形鋼から外れるのは、鉛直荷重との組み合わせで、次の通りである（図 11.5.1）。

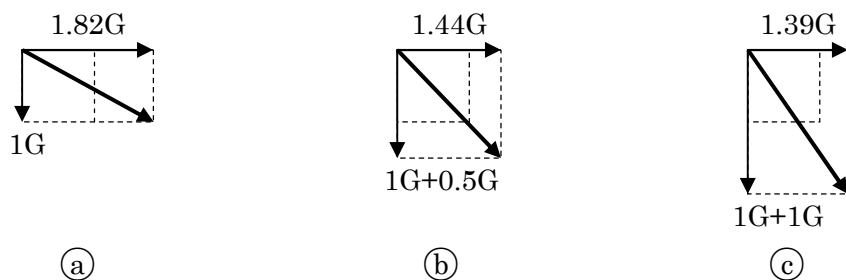


図 11.5.1 フック状金具に斜め方向に力がかった場合に外れる条件

ただしここでは、吊りボルトが標準的なピッチで配置されており、したがって一本あたりの常時の負担荷重、すなわち自重が 180kg であることを前提としている。

鉛直荷重が 1.0G (すなわち自重のみの場合) : 水平荷重が 1.82G で外れる

鉛直荷重が 1.5G (すなわち、上下方向の応答が 0.5G の時) : 1.44G で外れる

鉛直荷重が 2.0G (すなわち、上下方向の応答が 1.0G の時、) : 1.39G で外れる

この結果をおおざっぱに言えば、上下動がなくても、水平方向の応答が 2G 近くになればフック状金具が外れる、上下動の応答値として 0.5G~1.0G が同時に加わるとすれば、水平方向の応答が 1.5G 未満でフック状金具が外れることになる。

なお、吊りボルトを 1 次下地のリップ溝形鋼 (長辺方向に配されている) と平行方向 (すなわち長辺方向) に水平加力した場合には、フック状金具はリップ溝形鋼を滑る場合とひっかかる場合とがあるが、ひっかった場合には、金具の二つあるツメの片方だけで支えることになり、やはり最大耐力が落ちるので、上記の場合と大同小異の現象を呈する。ちなみに、フック状金具に対するこの方向の加力実験の結果によると、1G 相当の上下動の時、1.45G 相当の水平力で破断したものがある。

11.6 落下のトリガーとなった状況の検討

この天井は、少なくともどこか一か所の破壊がトリガーとなり、その後の連鎖的な破壊により、広範囲の天井が落ちたと考えられる。そこでまず、11.4 で述べた天井の揺れ方によって下地組にかかった力と、11.5 で述べた下地組の強度を比較することにより、落下のトリガーになった状況を推測する。先に挙げた図 11.4.2 の各部分の揺れ方の各ケースについて定量的に検討する。

A : 天井の自由振動周期が $T \approx 1.0$ 秒となるような部分では、建物の $T_x = 1.09$ 秒、 $T_y = 1.02$ 秒と共振し、 $h = 5\%$ のフロアレスポンスで 3G の応答になる。したがって、フック状金具が外れた可能性がある。

B : 高低差のあるブドウ棚にまたがって吊られている場合には、天井面が水平でも吊り長さが異なる。天井の周期が建物 (ブドウ棚) の固有周期約 1 秒あたりになる場合には、共振状態になり、フロアレスポンスで 1~3G になりうる上に、短い吊りボルトには相対的に大きな水平力が加わる可能性がある。したがって、短い吊りボルトのフック状金具が外れる可能性が高い。シーリングスポット室下とその後ろ側とにわたって吊られている天井板ではこの状態になる。

C : 天井面に凹凸があり、したがって天井面が傾斜している場合にパネル状 (単一平面) の天井板を取り出すとこの

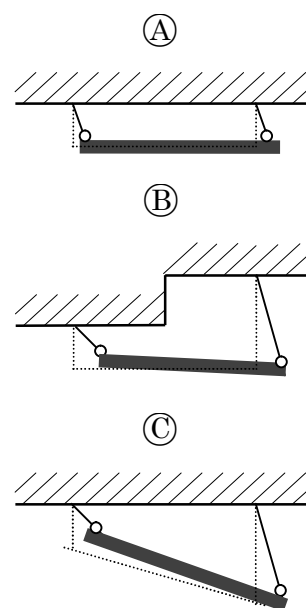


図 11.6.1 各ケースの揺れ方 (図 11.4.2 再掲)

形になる。吊り長さが異なることは B と同じであり、同様の現象が生じる。

D：周期や吊りボルトの負担面積を考えなければ B と同じ状況になる。

E：接合部分（野縁受または野縁の接合）が剛接である場合は、水平に揺れることにより、中央の長い吊りボルトが緩み、両側の短い吊りボルトの鉛直力が増加する。ただし、この接合部分は、部材と同断面の断面性能でも水平 1G で降伏して塑性ヒンジ状になり、D に近い状態になる。さらにこの接合部は、接合されていても簡易な溶接であり、また接合されていないものもあった。

F：ステージ上部の平天井で、2 次下地にかかっていたフック状金具が外れ、ほぼ真下に約 2m 落下して、バトンで吊られていた部分は、上下動による引張力が過大となったことが考えられる。

しかし、この部分の吊りボルト 1 本当当たりの負担面積は $0.9\text{m} \times 0.8\text{m}$ で、（常時）荷重は 70kg 程度である。したがって、最大耐力が 600kg (6kN) 近くあるフック状金具が外れるためには、 $600/70 - 1 \approx 7\text{G}$ くらいの上下動（応答）が必要である。したがって、この部分が上下動によって落下したとは言い切れない。

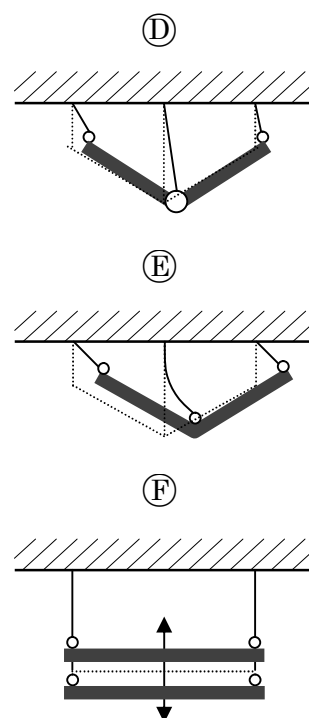


図 11.6.1 各ケースの揺れ方（つづき）

以上の検討により、天井の落下のトリガーとなった可能性が高いのは、B、C、D のケースで、A のケースもあり得たと言える。E のケースは、結果的には D のケースと同じになりうるので、このケースの可能性もある。F のケース（上下動による場合）は、数値的にみて可能性が低いですが、天井面のばたつきなどで、部分的に吊りボルトの負担荷重が大きくなれば、起こった可能性を否定はできない。

なお、音響関係を含め設備関係の機器・配管やケーブルがこの天井の落下を促したかどうかについては、それらの落下によって天井が落ちたとか、それらの揺れが天井に悪影響を与えたとかいうことはなかったと考えられる。

また、この天井の落下と地震の継続時間が非常に長かったこととの関係としては、水平応答のピーク値と上下応答のピーク値が同時発生する機会が多かったことは十分に考えられるので、このことがフック状金具の外れる（破断する）可能性を高めたことはあると思われる。

11.7 連鎖的な落下のプロセス

次にこの天井が連鎖的に落下したプロセスについて検討する。先に 11.4 で述べたように、吊り元のフック状金具が外れて（あるいは破断して）天井が落下する状況は、複数考えら

れる。そのうちたとえば B または C のケース（ひとつのパネル状天井板の中で、吊り長さが違う場合）について、天井の連鎖的な落下に至るプロセスは、次のようだったであろうと推測される。（図 11.7.1）

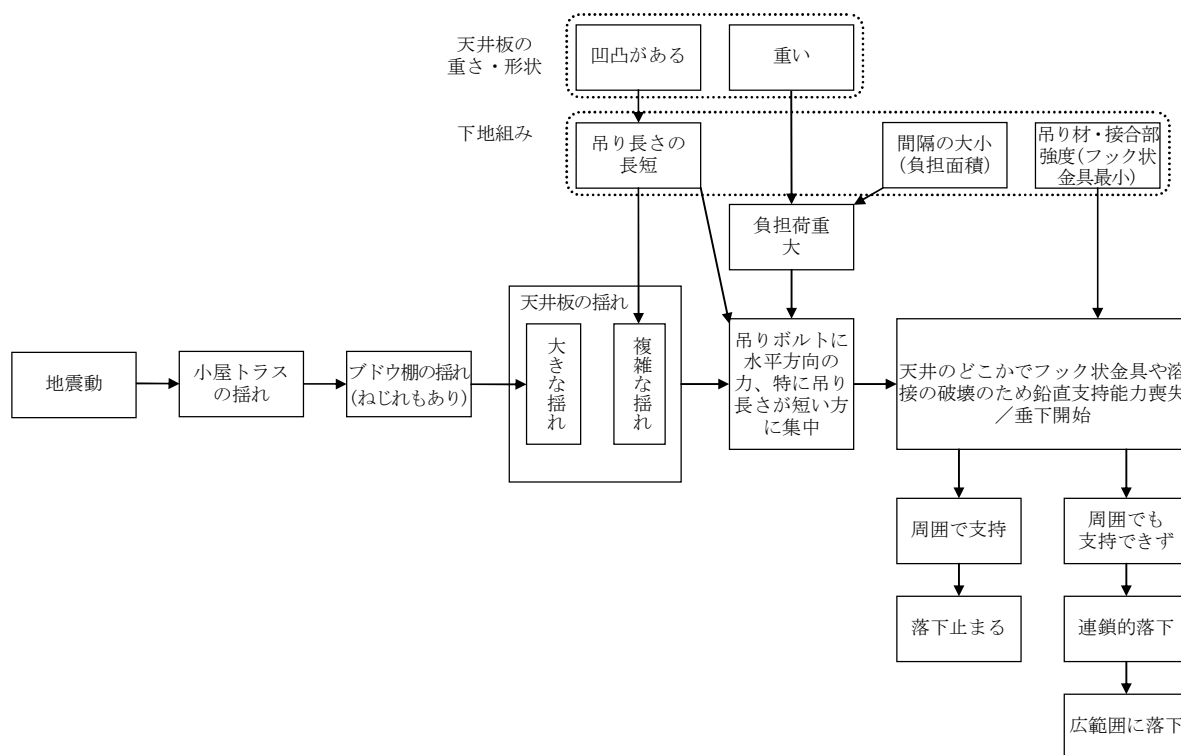


図 11.7.1 連鎖的な天井落下のプロセス

①先に述べたように、この天井は凹凸があり複雑な形状をしていることと、非常に重いという特徴がある。そして凹凸のあることにより、吊り長さに長短があり、そのことから非常に複雑な揺れ方をすると同時に、吊りボルトにかかる引張り力にも増加するもの（短い吊りボルト）と減少するもの（長い吊りボルト）とがあった。

②しかも、今回の地震動の強さは、きわめて稀とはいえないが、震度 5 程度であり、稀な地震といえる。その地震動によって、建物が大きく応答しさらに天井も大きく揺れた。

③このように天井が、大きくかつ複雑に揺れたことにより、吊り長さの短い吊りボルトは、水平方向の大きな力を負担することになった。

④そして、吊りボルトを上端で支えているフック状金具（つりっこ 2 号）には、鉛直方向には自重と上下応答による力、水平力方向には上記の水平応答による力がかかり、その組み合わせの力がフック状金具の斜め方向加力に対する最大耐力を超えたときに、フック状金具が 1 次下地（リップ溝形鋼）から外れた。（フック状金具ではなく、溶接の場合でも、破断することにより、同じような状況になったと思われる。）

なお、そのような破壊（外れ）が、平面的に見てどの場所から始まったか、またそのような場所が一カ所だったか、複数カ所だったかは、特定できなかったが、そのような可能

性のある場所は複数ある。たとえば、シーリングスポット室下から後方にまたがって吊られている部分など。

⑤このような破壊の結果、その場所の天井の下地組は鉛直荷重の支持能力を失い、天井が垂下し始めるが、もし隣接する下地組が健在で、増大した負担荷重を支持できれば、落下を免れたはずである。たとえば、下手側のキャットウォークから吊られている部分など。

⑥しかし、隣接する下地組のフック状金具が増大した負担荷重に耐えきれず外れた場合（あるいは溶接が破断した場合）で、かつ、さらにこれらに隣接する下地組でも荷重を負担できなかった場合、これらの部分は落下せざるをえなかったはずである。

⑦このようにある場所で天井の落下が始まると、垂下あるいは落下した部分が負担していた荷重は、次々に隣接する下地組みに負担を強いることになり、連鎖的に破壊（フック状金具の外れ、溶接の破断）が進行し、広い面積にわたって天井が落下するに至った。

11.8 むすび

以上のように、この天井の落下が始まった場所の特定までには至らなかったが、この地震によって、この天井の下地組の接合部のうちのフック状金具（あるいは溶接部分）のいずれかに、その最大耐力を超える力がかかったことにより、この部分が壊れて天井が垂下し、隣接する下地組でも支持できなくなり、連鎖的に天井が落下していったであろうことが、計算や実験の結果から説明できる。