

補強ワイヤーに発生した張力について

排気筒は角柱型であり、4つの面はそれぞれほぼ東西南北方向を向いている（添付資料 4 参照）。本事象時の風向きは北北東であったことから、ここでは排気筒の北面のみに風荷重が発生したと考える。

まず、排気筒が受ける風荷重を考える。風速 v [m/s] の北からの風によって排気筒の北面が受ける風荷重 F_0 [kgf] は、 $F_0 = Aq$, $q = 0.6Ev^2$ と表される。ここで、 A は排気筒側面の面積であり $A = 7.5 \times 1.2 \text{ m}^2$ 、 q は速度圧 [kgf/m²]、 E は建造物の高さや周辺環境等に依存する係数である。ここでは、近隣（本センターから約 200 m）に位置する JMTR 冷却塔における q と v との関係が本センター排気筒でも成り立つと仮定し、風荷重 F_0 と風速 v との関係を図 1 のように求めた。

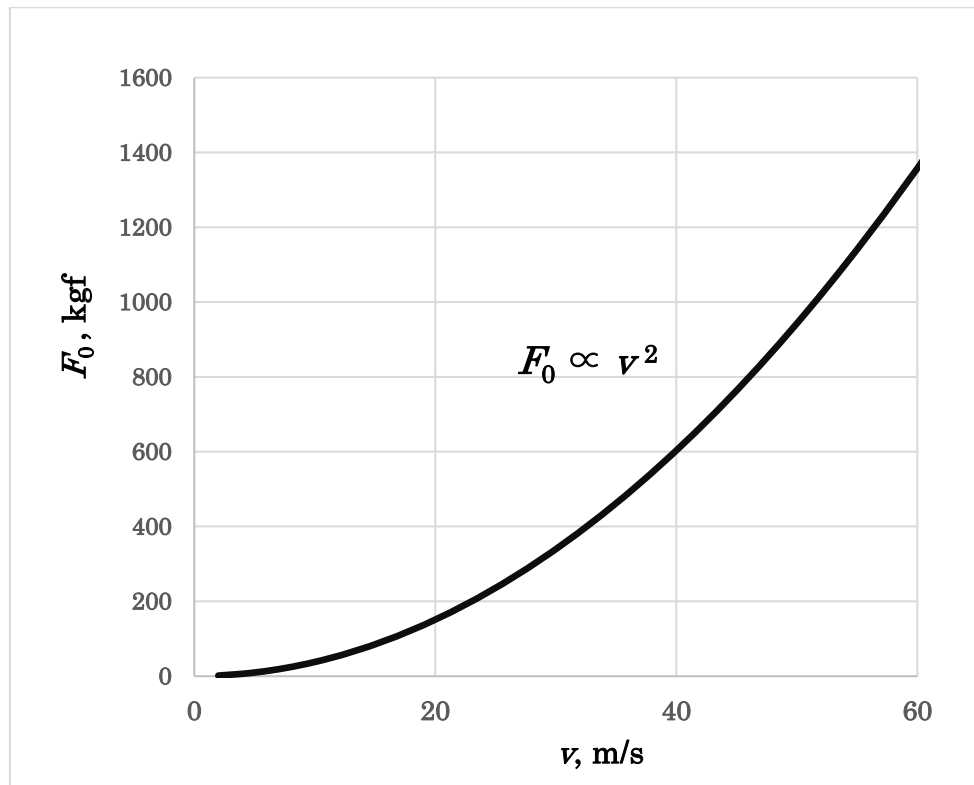


図 1：風速 v [m/s] の北からの風による風荷重 F_0 [kgf]。

図 1 より、30.9 m/s（令和元年 9 月の台風 15 号時の JAEA 大洗研究所気象観測塔での観測値）の風が排気筒に加わる力が最大の向きとなる真北から吹いたとき、 F_0 は約 360 kgf となる。本事象で想定される最大瞬間風速 35.3 m/s の北北東の風（真北から 22.5°）では、排気筒北面が受ける風荷重 F は、 $F = F_0 \times \cos 22.5^\circ = 465$ （図 1 より） $\times \cos 22.5^\circ =$ 約 430 kgf となる。

次に、排気筒の補強ワイヤーに発生した張力を考える。ここでは、ワイヤー1 およびワイヤー4 へのみ風荷重による張力が発生したと仮定する。

排気筒とワイヤーとの位置関係は添付資料 4 の通りであった。これを基に、北北東の風によって排気筒に作用する風荷重 F とワイヤー1 およびワイヤー4 の張力（それぞれ T_1 および T_4 ）の関係を図 2 のようにして求めた。なお、排気筒底部の拘束はなく 2 本のワイヤーでのみ排気筒を拘束していると仮定した。

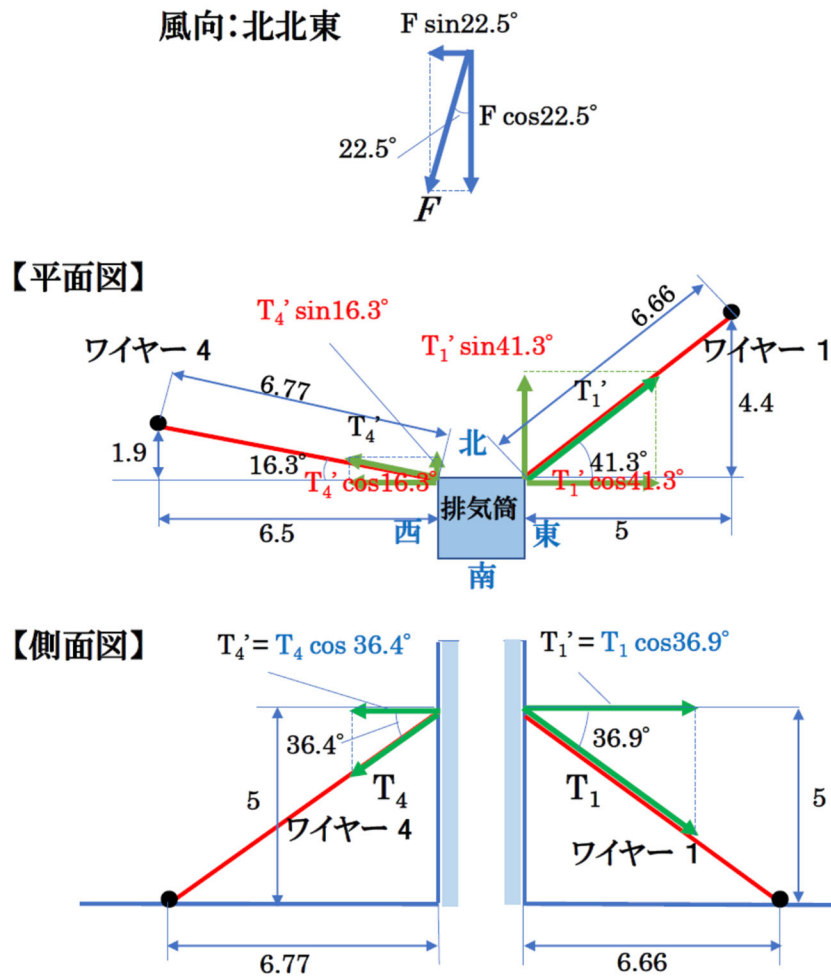


図 2：北北東の風による風荷重 F とワイヤーの張力。

これにより、風速 v [m/s] の北北東からの風によって発生するワイヤー1、ワイヤー4 の張力 T_1 、 T_4 は図3 のようになる。

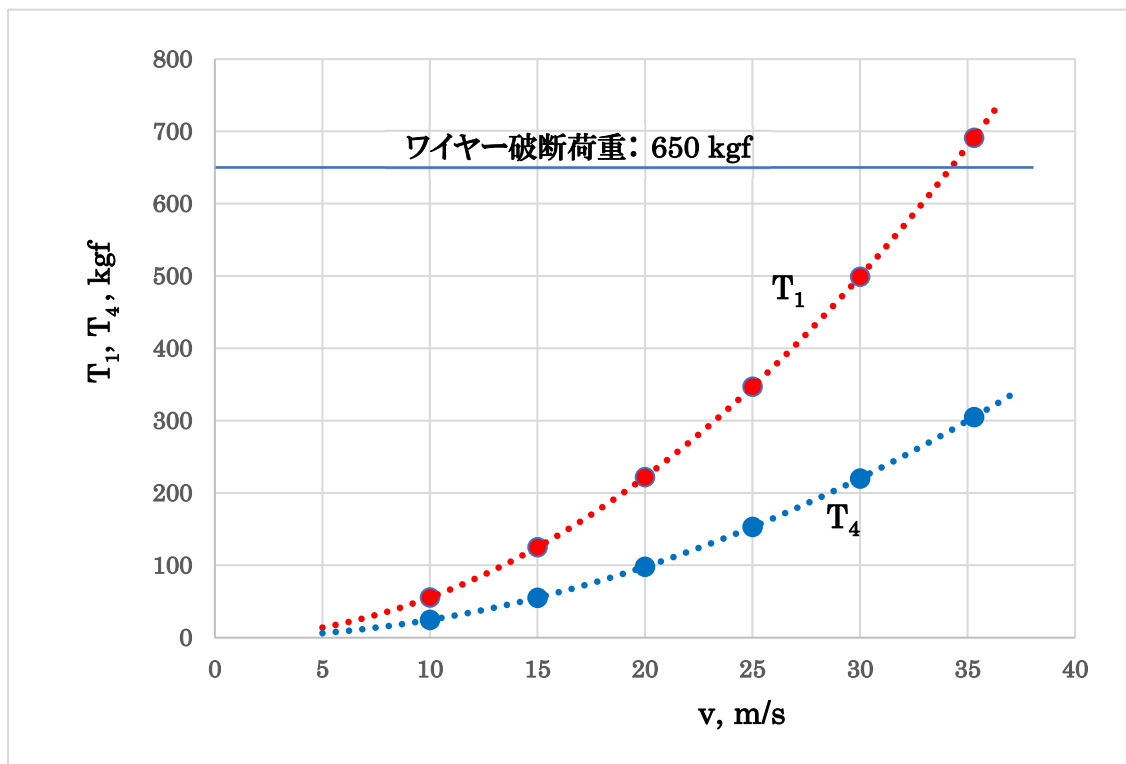


図3：風速 v の北北東からの風によってワイヤー1、ワイヤー4 に発生する張力 T_1 、 T_4 。

図3より、風速 35.3 m/s の北北東の風（本事象時）では $T_1 = 691$ kgf、 $T_4 = 305$ kgf と求められた。販売元の製品情報によればワイヤー1本あたりの（静的な）耐荷重は約 650 kgf であるため、ワイヤー1では耐荷重を上回る張力が生じて破断した可能性が示唆された。なお、風速 30.9 m/s（令和元年9月の台風15号時）の北北東の風では $T_1 = 530$ kgf となり、ワイヤーの耐荷重よりも低い値である。

ワイヤー張力への風向の影響に関して、風向を真西-真北-真東に変化させたときのワイヤー1 から4 に発生する張力 $T_1 - T_4$ を、図2と同様にして評価した。結果を図4に示す。

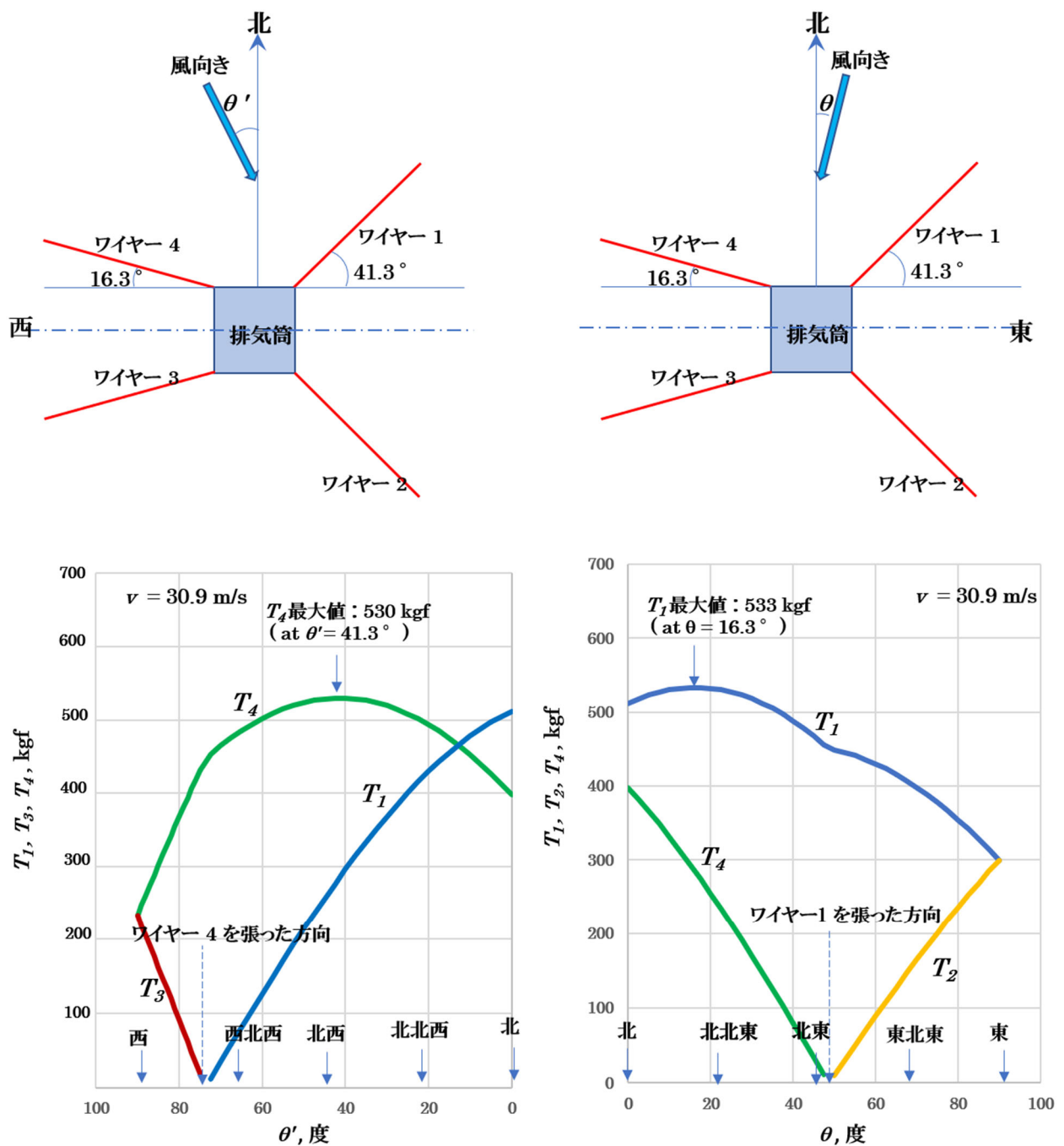
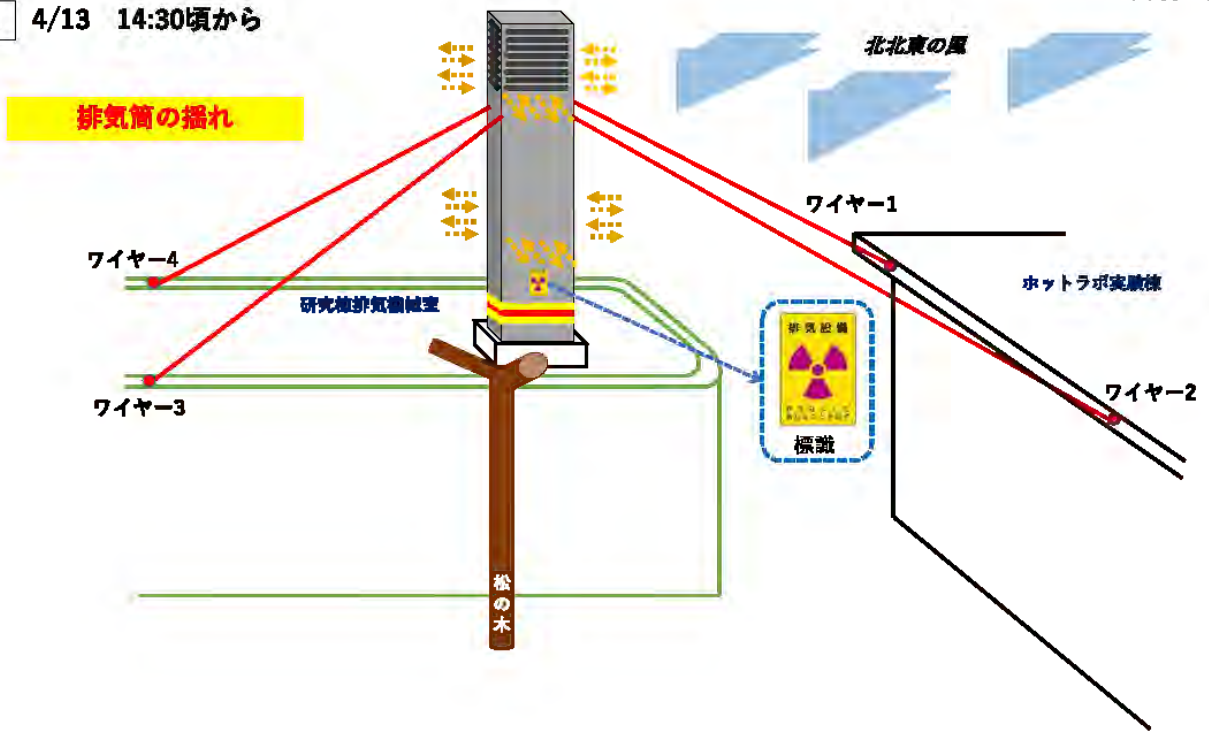


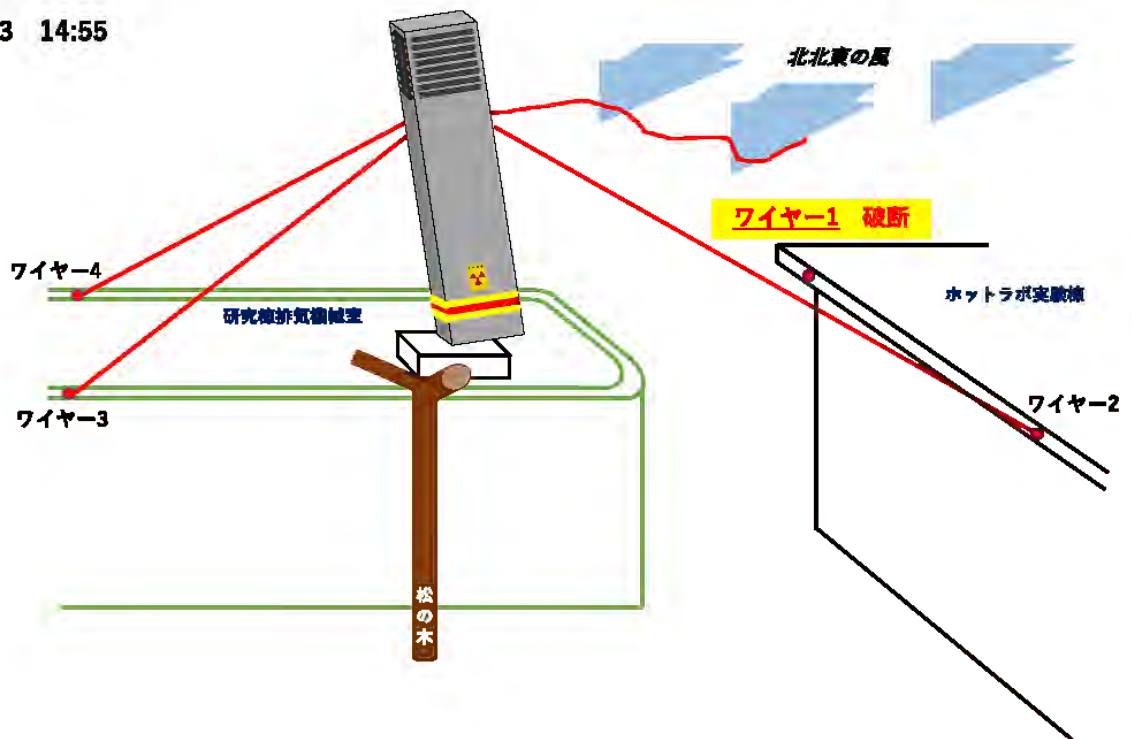
図4：風速 30.9 m/s の風によってワイヤー1-4 に発生する張力 $T_1 - T_4$ に対する風向の効果。

図4より、風向がほぼ北北東方向の時にワイヤー1に最大張力（風速 30.9 m/s では 533 kgf）が発生すると評価された。本事象時の風向は、ワイヤーにとって最も厳しい条件に近かったと考えられる。

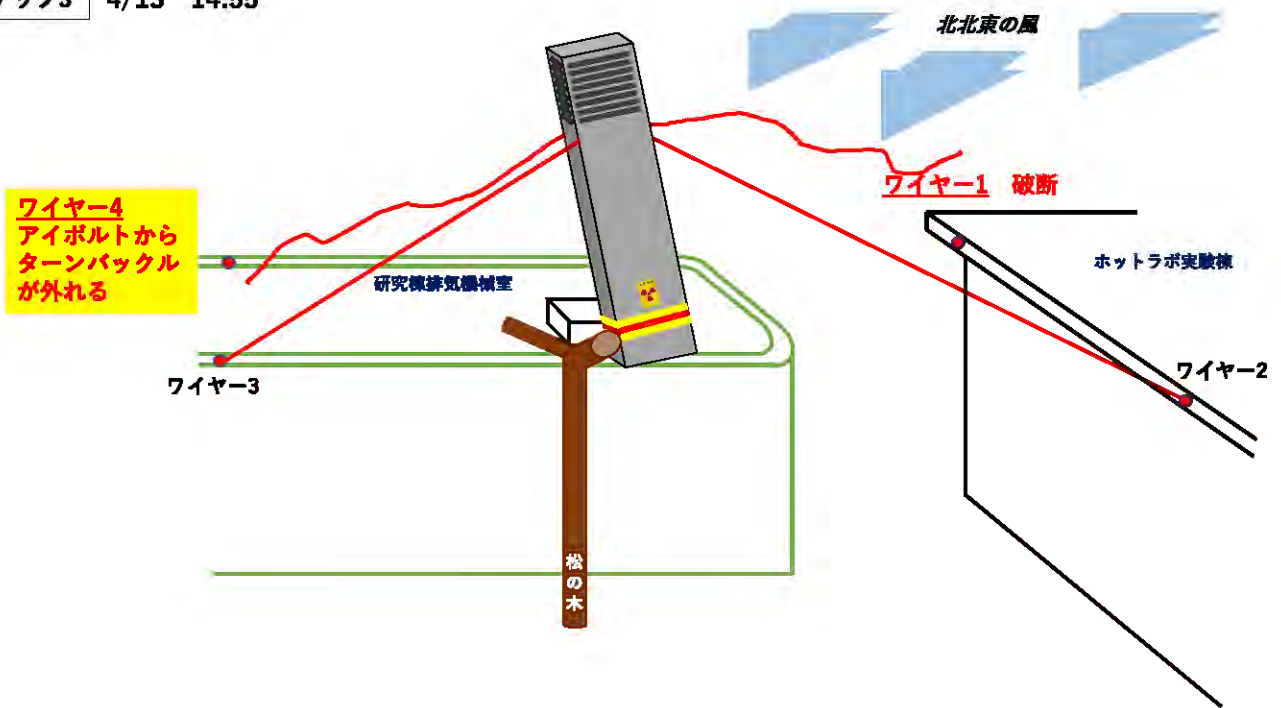
ステップ1 4/13 14:30頃から



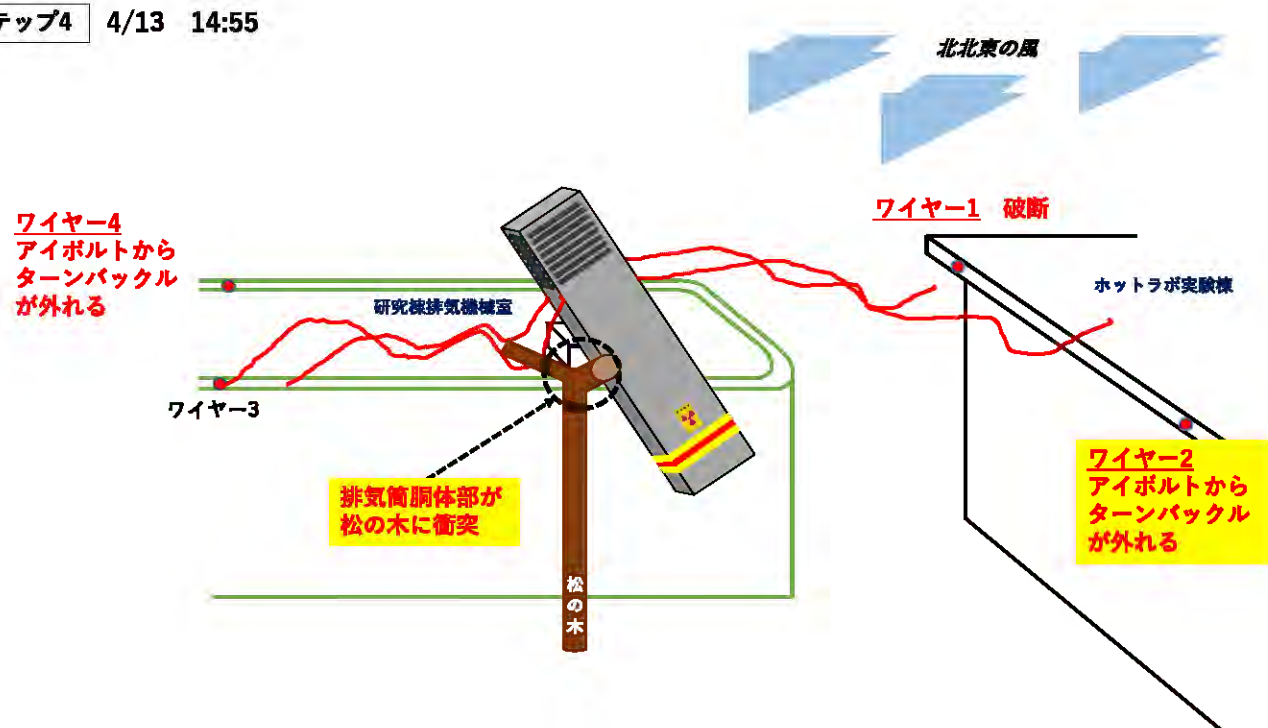
ステップ2 4/13 14:55



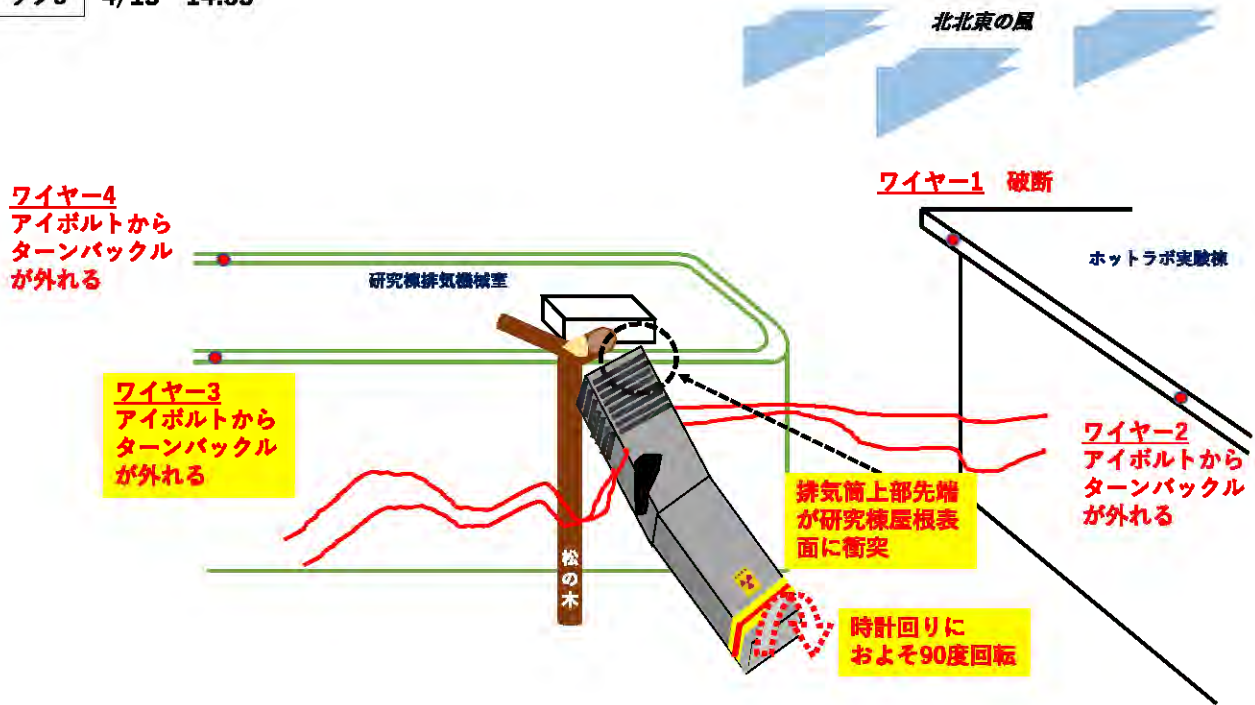
ステップ3 4/13 14:55



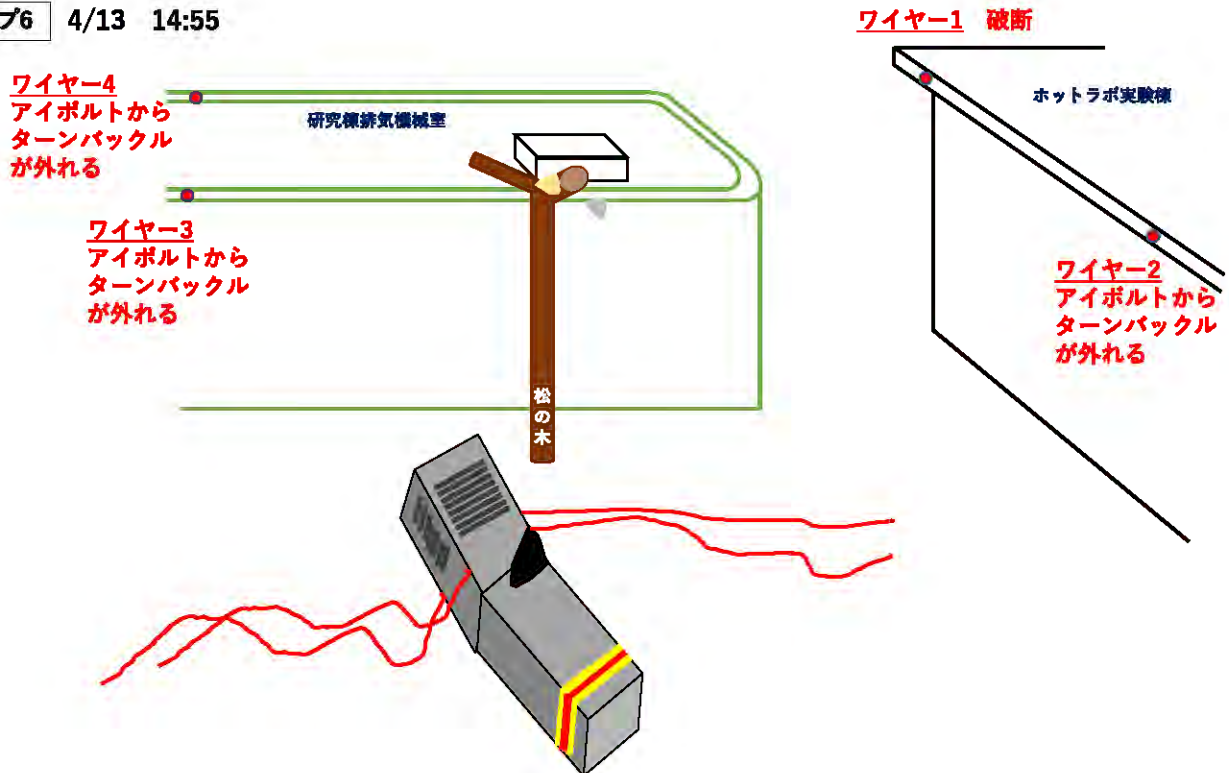
ステップ4 4/13 14:55



ステップ5 4/13 14:55



ステップ6 4/13 14:55



排気筒－屋根基礎部の接合状態の調査

研究棟屋根基礎部と排気筒底面の鉄骨部品（添付資料 19 参照）との接合状態を調査した。

図 1 に、研究棟屋根基礎部の全体写真を示す。研究棟屋根にコンクリート基礎部（約 150 cm×150 cm）が設けられている。排気第 1 系統および排気第 2 系統（添付資料 4 を参照）のダクトが見られる。

図 2 に、研究棟屋根基礎部の構造の模式図を示す。基礎部の寸法は、平面図に示すように、外寸約 150 cm×150 cm、内寸約 120 cm×120 cm である。コンクリート製基礎部の高さは、展開側面図に示すように、北側および東側では約 31 cm、南側および西側では約 33 cm である。コンクリート製の基礎部の上にモルタルが盛られており、モルタル厚さは、北側では（5－7）cm、東側では（1－4）cm、南側では（1－3）cm、西側では（3－4）cm である。施工時には、モルタル厚さの調整によってモルタル上面の水平を確保したものと考えられる。

図 3 に、排気筒底面の鉄骨部品の写真を示す。図 4 に、研究棟屋根基礎部とこの鉄骨部品との接合の模式図を示す。鉄骨部品は約 130 cm×130 cm×10 cm である。図 5 に、研究棟屋根基礎部に鉄骨部品を乗せた状態の写真を示す。上から撮影した写真である。鉄骨部品は、基礎部あるいはモルタルに固定された鉄筋と合計 21 箇所接合されていた。接合箇所の位置は不規則であり系統的に決められたとは考えにくく、排気筒設置はいわば現物合わせのような方法で施工された可能性が示唆された。このことは、モルタルの厚さを調整して水平をとった可能性からもうかがえる。

接合箇所の呼び名を北 1－6、東 1－6、南 1－3、西 1－6 とし、北、東、南、西の各部位について、上からおよび横から観察し、倒壊前の鉄筋の状態を推定した。各部位について、写真および鉄筋の位置関係の模式図（推定図）を図 6－図 9 にそれぞれ示す。鉄筋の直径は約 8.3 mm だった。

各接合箇所の写真を図 10－図 31 に、接合箇所および鉄筋の状況を表 1 にそれぞれ示す。いずれの接合箇所でも、接合は部材の接触部を一点で溶接した施工が行われていた。すなわち、研究棟屋根基礎部から 21 本の鉄筋が顕出しており、それぞれの鉄筋が排気筒底面鉄骨部品に一点で（1－3 cm 程度の領域で）溶接されているのみであり、それを 21 箇所行うことによって強度を得る構造であったことが分かった。

合計 21 本の鉄筋の接合について、18 箇所では鉄骨部品と鉄筋との溶接部が破断していた。3 箇所（東 6、西 1、西 5）では鉄筋と鉄筋との溶接部が破断していた。21 箇所の破断箇所のいずれにおいても破断面の腐食（錆）が進行しており、金属光沢を有する新しい破断面は見られなかった。したがって、21 箇所の破断箇所全てにおいて、破断は本事象以前に起きていた可能性が高い。

基礎側の鉄筋について、西 2、西 3 および西 6 の鉄筋②は西向きに傾いていた。さらに、西 2 と西 3 では、鉄骨部品との距離が大きかった。南 1 は東向きに傾いていた。南 2 は溶接部が下向きとなって北向きに倒れていた。南 3 は東向きに倒れていた。これら 6 箇所では排気筒倒壊の際に鉄筋が変形した可能性も考えられる。

以上より推定された接合状態の時系列を図 32 に示す。

上に述べたように、21 の破断箇所全てにおいて、破断は本事象以前に起きていた可能性が高い。破断の原因としては経年による腐食等に伴う強度低下や外力（過去の強風や地震等による外力、その繰り返し

しによる疲労) およびこれらの重畳等が考えられる。破断に関して、以下の調査・検討を行った。

まず、複数の鉄筋について、溶接部近傍部位およびモルタルに埋め込まれていた部位（アルカリ性環境であるモルタル中では腐食が生じにくく鉄筋は初期状態に近いと考えられる）の直径を測定した。直径はいずれの測定箇所でも約 8.3 mm であり、溶接部近傍の鉄筋での減肉はほとんど認められないことが分かった。このことは、塩害による顕著な腐食減肉が生じていなかったことを示している（なお、塩害地域および非塩害地域における鉄筋の腐食速度は、例えば、千葉県銚子市（塩害）と茨城県つくば市（非塩害）では、それぞれ約 0.032 mm/year、約 0.018 mm/year と報告されている。50 年間での減肉量はそれぞれ約 1.6 mm、約 0.9 mm 程度となる）。したがって、塩害による急速な腐食が破断の原因であったとは考えられないことが分かった。

次に、21 箇所の破断箇所それぞれについてフラクトグラフィー（破断面に残る形状から破断形態等を推測する調査）を試みた。図 10 から図 31 までに示すように、いずれの破断面でも腐食が進行しており、破断面は錆に覆われていた。錆層は強固で鉄筋への密着性が高く除去することはできなかつたため、破断面のフラクトグラフィーは困難だった。このことは、破断からは相当の時間が経過している可能性を示唆している。

この錆層の状態を調べるため、破断部位および建設当初から大気曝露されていた鉄筋軸部位における錆層厚さを測定した。鉄骨部品－鉄筋の溶接部分が破断していた 18 箇所の中から東 4（図 20）、鉄筋－鉄筋の溶接部分が破断していた 3 箇所の中から東 6（図 22）をそれぞれ選び、下記の手順で錆層厚さを測定した。なお、他の破断部でも、図 10 から図 31 までに示した表面状態の類似性から、錆層厚さに大きな違いはないと推測される。

手順 1 東 4 の基礎側の鉄筋（図 33 (a)）について、先端から 2cm 程度の位置をグラインダーで切断した（図 33 (b)）。長さ 2 cm 程度の鉄筋を採取した（図 33 (c)）。採取した鉄筋の先端付近は、建設当初は溶接されていたがその後破断して露出した部位にあたる。採取した鉄筋の軸部分は、建設当初から露出していた部位にあたる。

手順 2 採取した鉄筋を高速ファインカッターを用いて短手方向に切断し、輪切り面を作った（図 33 (d)）。

手順 3 輪切り面をエポキシ樹脂に埋め込んだ（図 33 (e)）。

手順 4 手順 2 の残りの鉄筋を高速ファインカッターを用いて長手方向に切断し、縦断面を作った（図 33 (f)）。

手順 5 縦断面をエポキシ樹脂に埋め込んだ（図 33 (g)）。

手順 6 エポキシ樹脂に埋め込んだ試料を、エメリー紙（600 番から 2000 番まで）で研磨したのち、アルミナ砥粒（粒径 5 μ m）で研磨して鏡面に仕上げた。

手順 7 光学顕微鏡（KEYENCE 製、VHX-2000）で錆層の厚さを測定した。2 箇所または 3 箇所を測定した（図 34）。

手順 8 東 6 の鉄骨側の鉄筋についても手順 1-7 を行った。

下表に錆層厚さの測定結果を示す。錆層厚さは高々数 $10\mu\text{m}$ であり、前述のように鉄筋への密着性が高く容易に剥離はしなかった。したがって、錆の鉄筋内部への急速な侵入は生じていないことが分かった。

	破断部位での錆層厚さ [μm]	鉄筋軸部位での錆層厚さ [μm]
東 4	23、52 2箇所平均：38	73、110、86 3箇所平均：90
東 6	43、50 2箇所平均：47	86、67、97 3箇所平均：83

以上より、破断の原因は、あくまで推測の域を出ないが、急速な腐食が主因ではなく、21箇所の点溶接という方法のために、1点あたりの耐久性が低く、長年にわたる強風や地震等による応力の繰り返しによって一つ一つの溶接点が破断し、倒壊時以前に全ての溶接点が破断するに至ったことにあると考えられる。

図 1	研究棟屋根基礎部の全体写真	22-5
図 2	研究棟屋根基礎部の平面図、展開側面図	22-5
図 3	排気筒底面鉄骨部品の位置および写真	22-6
図 4	研究棟屋根基礎部と排気筒底面鉄骨部品との接合の模式図	22-7
図 5	研究棟屋根基礎部に鉄骨部品を載せた状態の写真（上から撮影）および模式図	22-8
図 6	北側部分の写真および模式図	22-9
図 7	東側部分の写真および模式図	22-10
図 8	南側部分の写真および模式図	22-11
図 9	西側部分の写真および模式図	22-12
図 10	北 1 の写真	22-13
図 11	北 2 の写真	22-13
図 12	北 3 の写真	22-14
図 13	北 4 の写真	22-14
図 14	北 5 の写真	22-15
図 15	北 6 の写真	22-15
図 16	北 6 および西 1 周辺の写真	22-16
図 17	東 1 の写真	22-16
図 18	東 2 の写真	22-17
図 19	東 3 の写真	22-17
図 20	東 4 の写真	22-18
図 21	東 5 の写真	22-18
図 22	東 6 の写真	22-19
図 23	南 1 の写真	22-19
図 24	南 2 の写真	22-19
図 25	南 3 の写真	22-20
図 26	西 1 の写真	22-20
図 27	西 2 の写真	22-20
図 28	西 3 の写真	22-21
図 29	西 4 の写真	22-21
図 30	西 5 の写真	22-22
図 31	西 6 の写真	22-22
図 32	研究棟屋根基礎部と排気筒底面鉄骨部品との接合状態の時系列（推定）	22-23
図 33	試料作製手順および観察部位	22-24
図 34	顕微鏡観察結果（東 4）	22-25
表 1	接合箇所および鉄筋の状況のまとめ	22-26

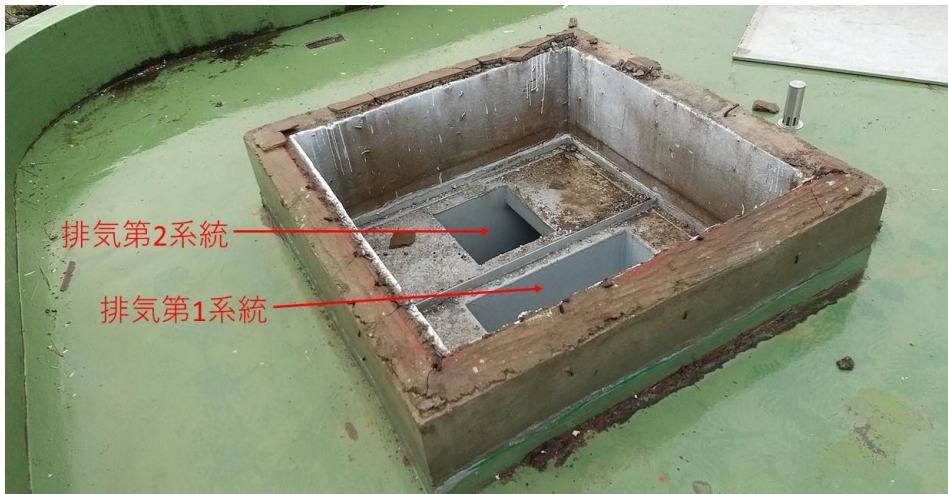


図1 研究棟屋根基礎部の全体写真

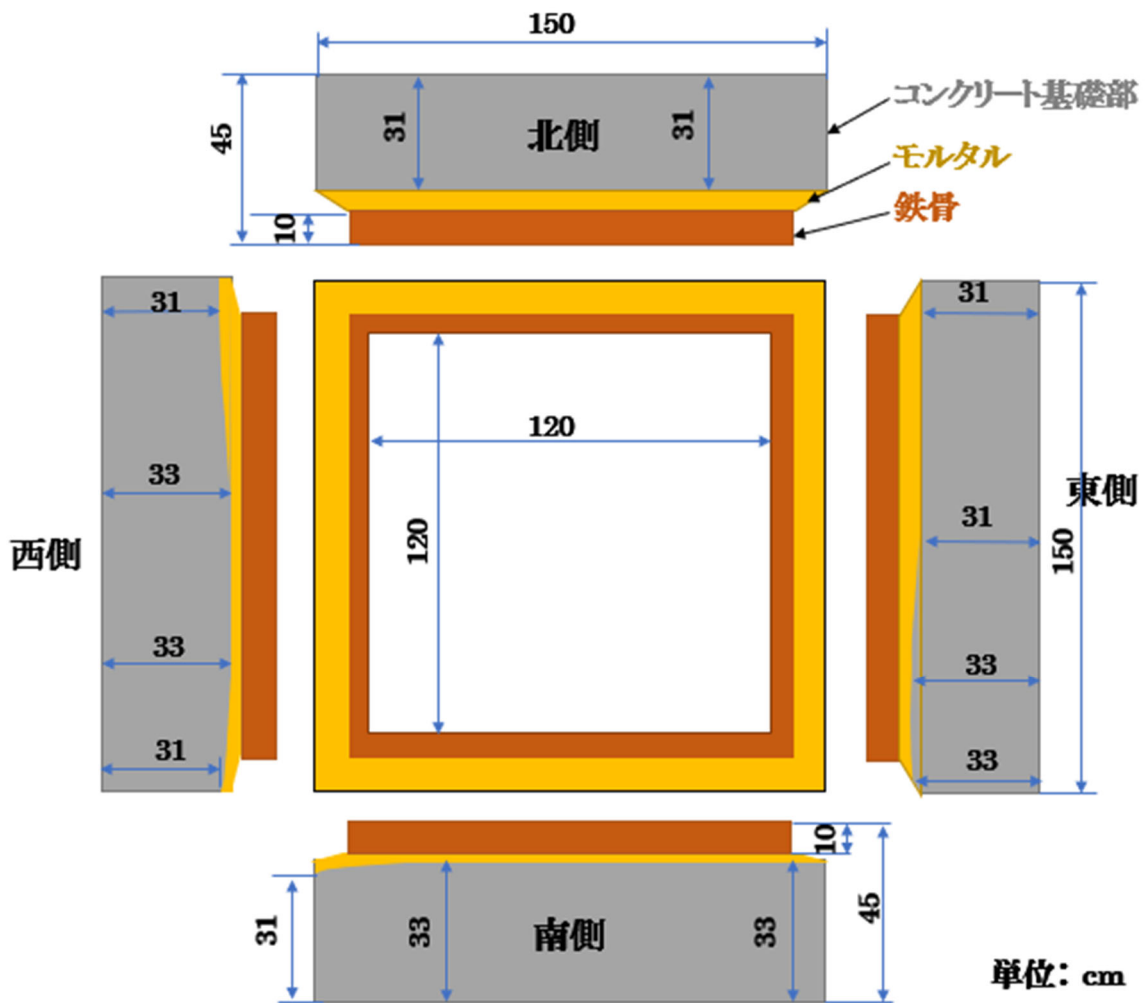


図2 研究棟屋根基礎部の平面図、展開側面図

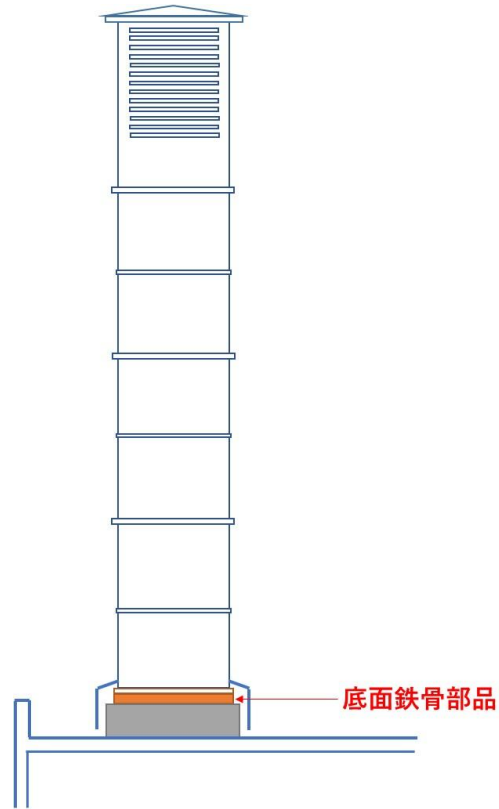


図3 排気筒底面鉄骨部品の位置および写真
(写真は倒壊した排気筒底面から取り外した状態であり、屋根基礎側が上側、排気筒側が下側)

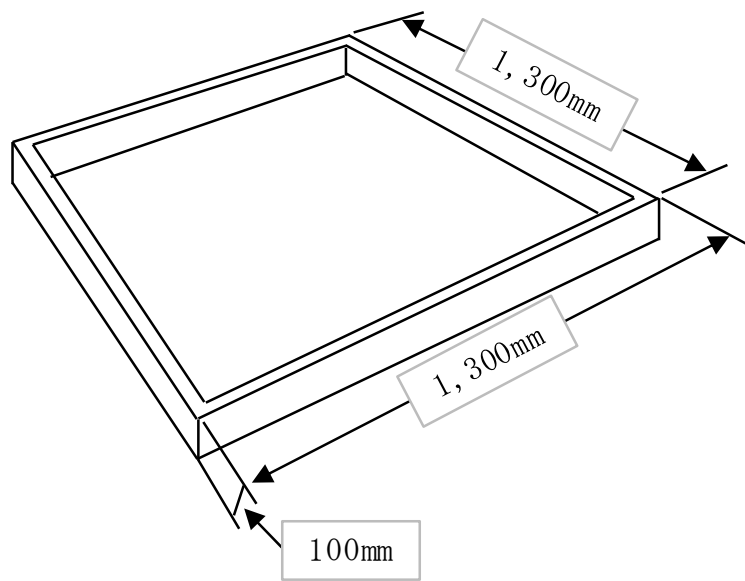


図 4 研究棟屋根基礎部と排気筒底面鉄骨部品との接合の模式図

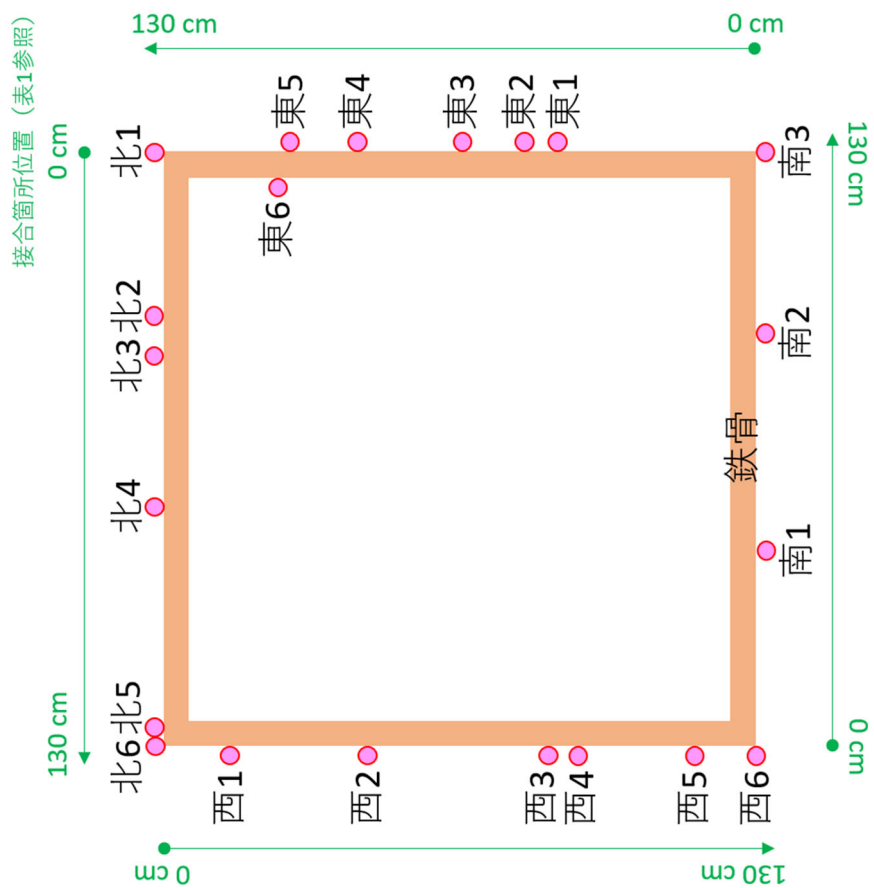


図5 研究棟屋根基礎部に鉄骨部品を載せた状態の写真（上から撮影）および模式図（模式図中に緑色で示す接合箇所位置座標に関しては表1を参照のこと）

北側部分を上から撮影



北側部分を横から撮影

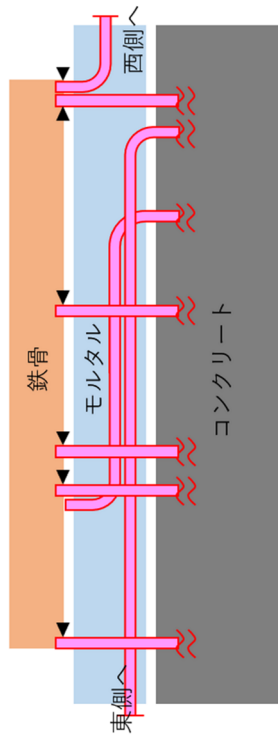
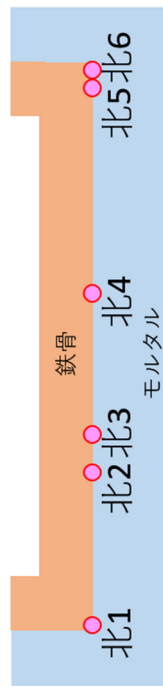
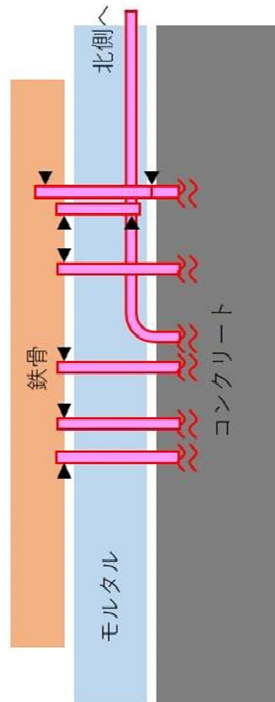


図6 北側部分の写真および模式図
(模式図には、鉄筋の位置関係の推定図も示す)

東側部分を上から撮影

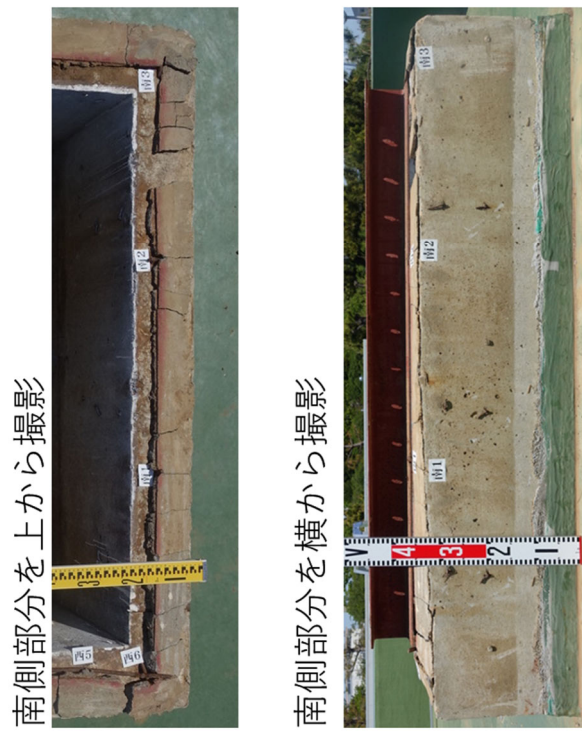


東側部分を横から撮影



◀は溶接部を示す
なお東6の溶接部
は鉄骨の内側。

図7 東側部分の写真および模式図
(模式図には、鉄筋の位置関係の推定図も示す)



南側部分を上から撮影

南側部分を横から撮影

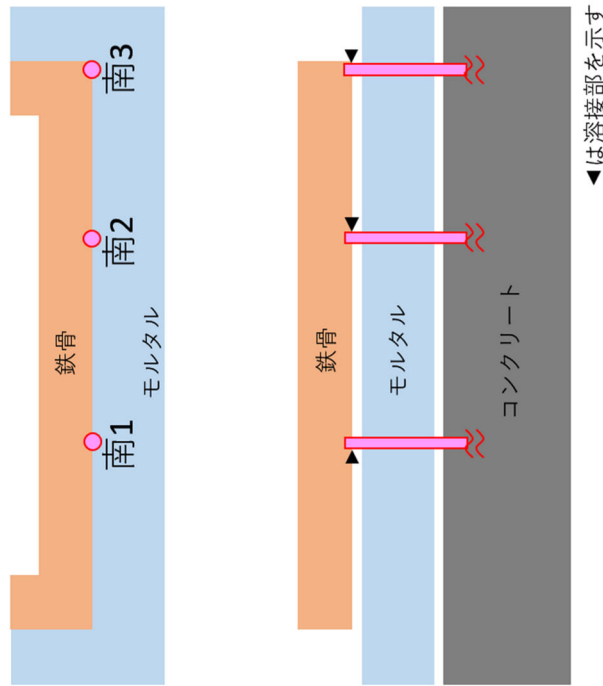


図8 南側部分の写真および模式図
(模式図には、鉄筋の位置関係の推定図も示す)

西側部分を上から撮影



西側部分を横から撮影

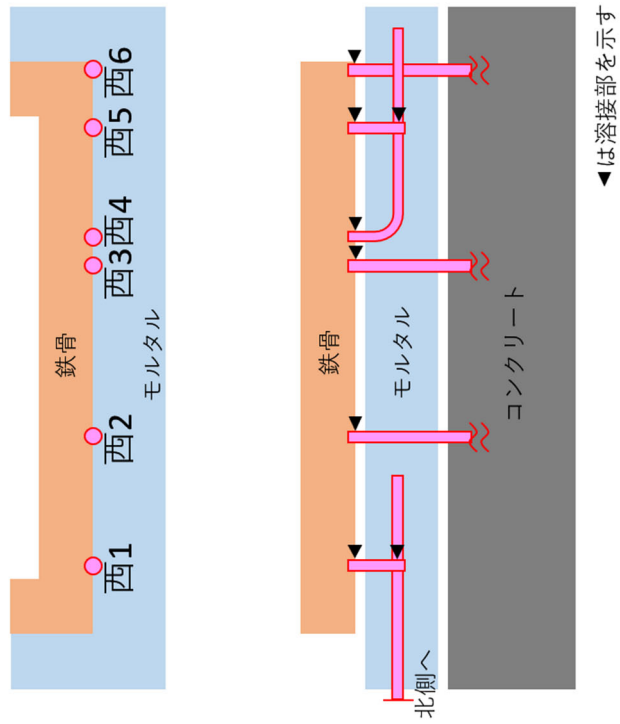
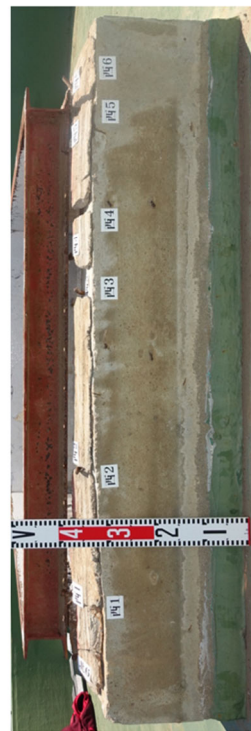


図9 西側部分の写真および模式図
(模式図には、鉄筋の位置関係の推定図も示す)