

ジェット旅客機 Boeing787 の重量を測定した

名古屋営業所

近藤 浩

キーワード ひずみゲージ試験 ST 荷重測定 4 アクティブゲージ

1. 概要

運用を終えた Boeing787 初号機(ZA001)がセントレア（中部国際空港）に寄贈され屋内展示されることになった。機体の展示は着陸装置（Landing Gear）を高さ約 2mの架台の上に載せるもので、ジャッキアップされた機体を架台上に設置した時の各架台の受ける荷重の測定をゼネコンから依頼された。

名古屋営業所では過去に経験した事のない仕事だったが、ひずみゲージ測定装置メーカー大手に依頼し計測作業をおこなった。

2. ひずみゲージ試験とは

「ひずみゲージ」を物体の表面に張り付け、物体が変形するとき、これに追従して伸縮するひずみゲージの電気抵抗の変化を測定し、ひずみ（伸び又は縮み）を求める。このひずみからヤング率を比例定数として「応力」を求めることができる。

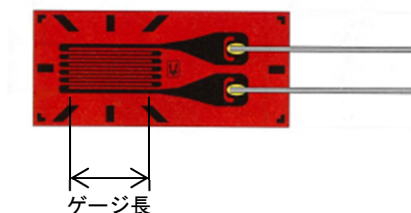


図1 単軸ゲージ

R : ゲージの抵抗 ΔR : 抵抗の変化量 L : ゲージの長さ ΔL : ゲージ長さの変化量
とすれば

$$\frac{\Delta R}{R} \propto \frac{\Delta L}{L} \propto \varepsilon \qquad \frac{\Delta R}{R} = K_s \cdot \varepsilon \qquad K_s : \text{ゲージ率 (およそ 2)}$$

一般的に R は約 120 Ω 、 ε は μ (10^{-6}) で表されるので $\frac{\Delta R}{R}$ は極めて微小な量であるので、抵抗の変化はゲージをブリッジ回路に組み込んで測定する。

ひずみ ε を求めたら、フックの法則 $\sigma = \varepsilon \cdot E$ （E : 縦弾性係数）から応力 σ を求め、 σ に断面積を乗ずれば荷重を計算することができる。

実際の測定では単軸ゲージ以外に、2枚のゲージを直交させ1枚のベースに張り付けた「直交ゲージ」や、主応力の方向を求めることもできる、方向が45度異なる3枚のゲージで構成される「3軸ロゼットゲージ」なども用いられる。(本測定では図2の直交ゲージを使用した)

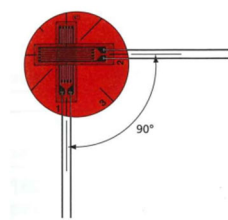


図2 直交ゲージ

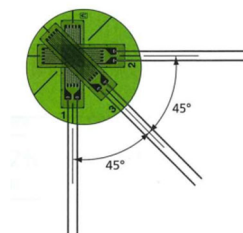


図3 3軸ロゼットゲージ

3. 計画

3.1 予想されるひずみの計算

着陸装置	支持体	想定全荷重	パイプ1本当たり		
			荷重	応力 (σ)	ひずみ (ε)
Nose Gear	$\Phi 216.3 \times 12.7 \text{ t} \times 1 \text{ 本}$	10 t (98KN)	10 t (98KN)	1.23 kg/mm^2 (12.1 N/mm^2)	-58.6μ
Main Gear (R)	$\Phi 216.3 \times 12.7 \text{ t} \times 2 \text{ 本}$	50 t (490KN)	25 t (245KN)	3.08 kg/mm^2 (30.2 N/mm^2)	-146.6μ
Main Gear (L)	$\Phi 216.3 \times 12.7 \text{ t} \times 2 \text{ 本}$	50 t (490KN)	25 t (245KN)	3.08 kg/mm^2 (30.2 N/mm^2)	-146.6μ

ひずみ (ε) のマイナス符号は圧縮ひずみ

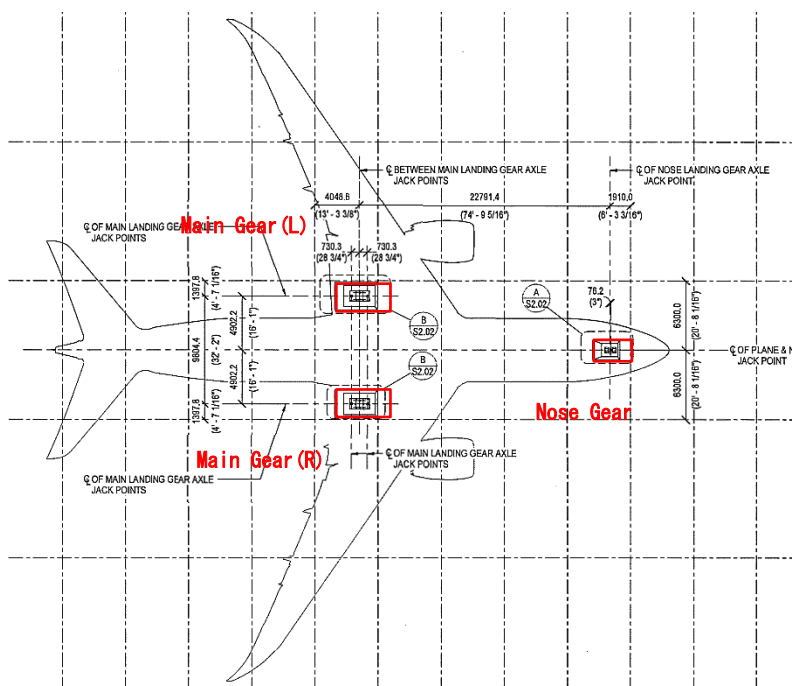
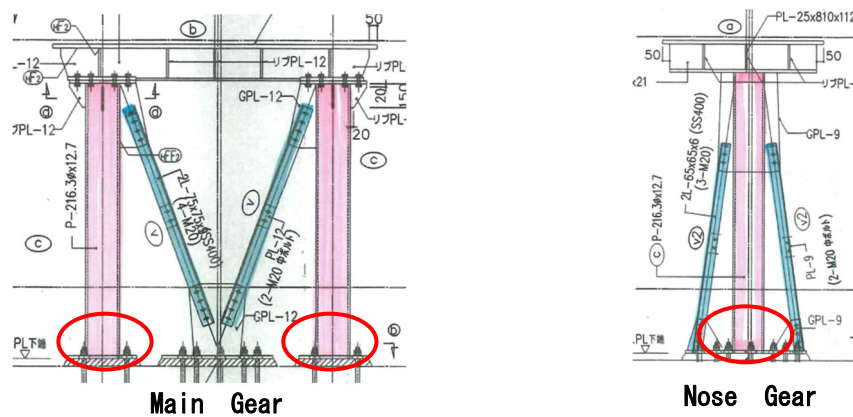


図4 Landing Gear



○ : ゲージ貼り付け位置

図5 架台の鉄骨パイプ柱

3.2 ゲージとブリッジ回路の選択

下図のような4アクティブゲージ法で回路を構成した。この回路の利点は

- ・ 温度変化による見かけのひずみの発生を相殺してくれること（温度補償）
- ・ 曲げの影響を除去される
- ・ 実際のひずみより $2(\nu+1) = 2.6$ 倍出力が大きい ν : Poisson 比

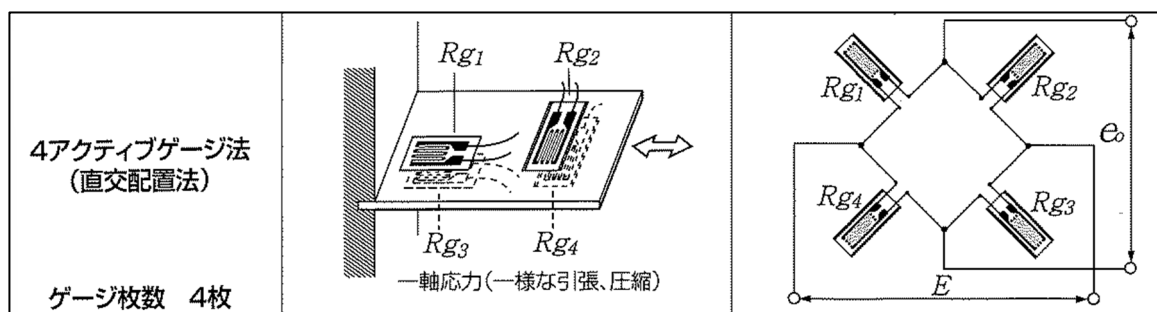


図6 4アクティブゲージの結線

実際のブリッジは1本のパイプ柱の直交するX、Yの2方向で、それぞれ直交ゲージ2枚（単軸ゲージ4枚）でブリッジ回路を構成した。

Nose Gear のひずみ

$$\frac{\epsilon_{X1} + \epsilon_{Y1}}{2} = \epsilon_{\text{Nose}}$$

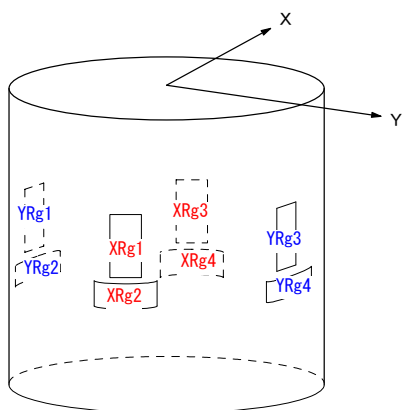


図7

Main Gear の荷重を求めるためのひずみはパイプ2本なので左右それぞれ

$$\frac{\epsilon_{X2} + \epsilon_{Y2}}{2} + \frac{\epsilon_{X3} + \epsilon_{Y3}}{2} = \epsilon_{\text{Right}}$$

$$\frac{\epsilon_{X4} + \epsilon_{Y4}}{2} + \frac{\epsilon_{X5} + \epsilon_{Y5}}{2} = \epsilon_{\text{Left}}$$

3.3 配線

データロガー・P Cの設置位置、各架台からデータロガー・P Cまでの配線の経路は、下見をおこない、当日場内で動き回るフォークリフト、ラフタークレーンなどの動線をあらかじめ聞き取り調査し決定した。幸い現地にはトレンチが有り、ゲージを張り付けた鉄骨パイプ柱の周辺以外は、他と干渉することなく配線することができた。

3.4 使用機器

機 器	型 式	製造者	数 量
ひずみゲージ	KFGS-2-120-D16-11 L1M2R	(株)共和電業	20 枚
温度計（熱電対）	BT-200B	(株)共和電業	1 台
ブリッジボックス	DB-120A	(株)共和電業	10 台
スキャンニングユニット	USSB-51B	(株)共和電業	2 台
データロガー	UCAM-550A	(株)共和電業	1 台
ケーブル	N-84	(株)共和電業	30m×12 本
センサーチェッカー	WDS-500B	(株)共和電業	1 台
安定化電源装置	ASA-100	(株)東京理工舎	1 台
無停電電源装置	EC-550	APC	1 台

3.5 システムダイアグラム

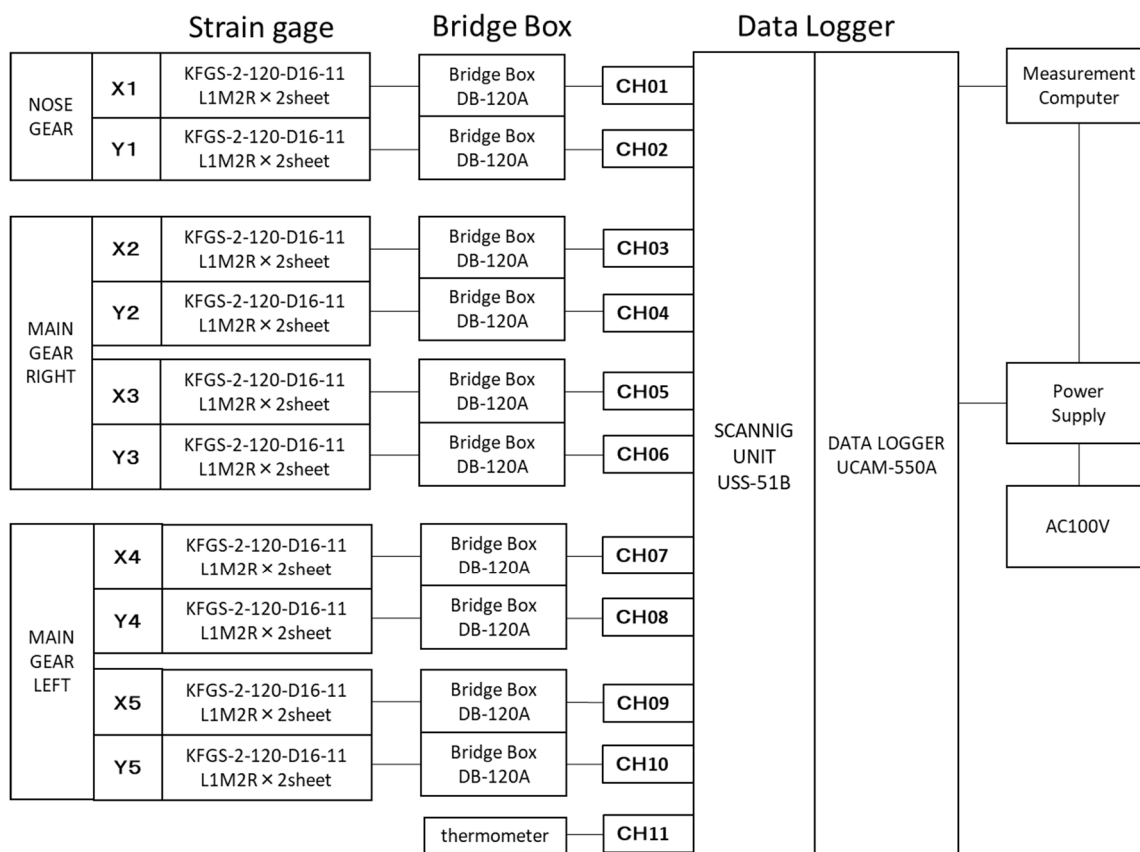


図 8

4. 測定

4.1 測定結果

測定値（ ε ）から荷重への計算は

$$\frac{\varepsilon}{2.6} \times E = \sigma$$

2.6 = $2 \times (1 + \nu)$: 4 アクティブゲージによる測定倍率

ν : Poisson 比 (0.3)

鋼管断面積 : $8.12 \times 10^{-3} \text{m}^2$

E (縦弾性係数) : 206 GPa ($206 \times 10^9 \text{N/m}^2$)

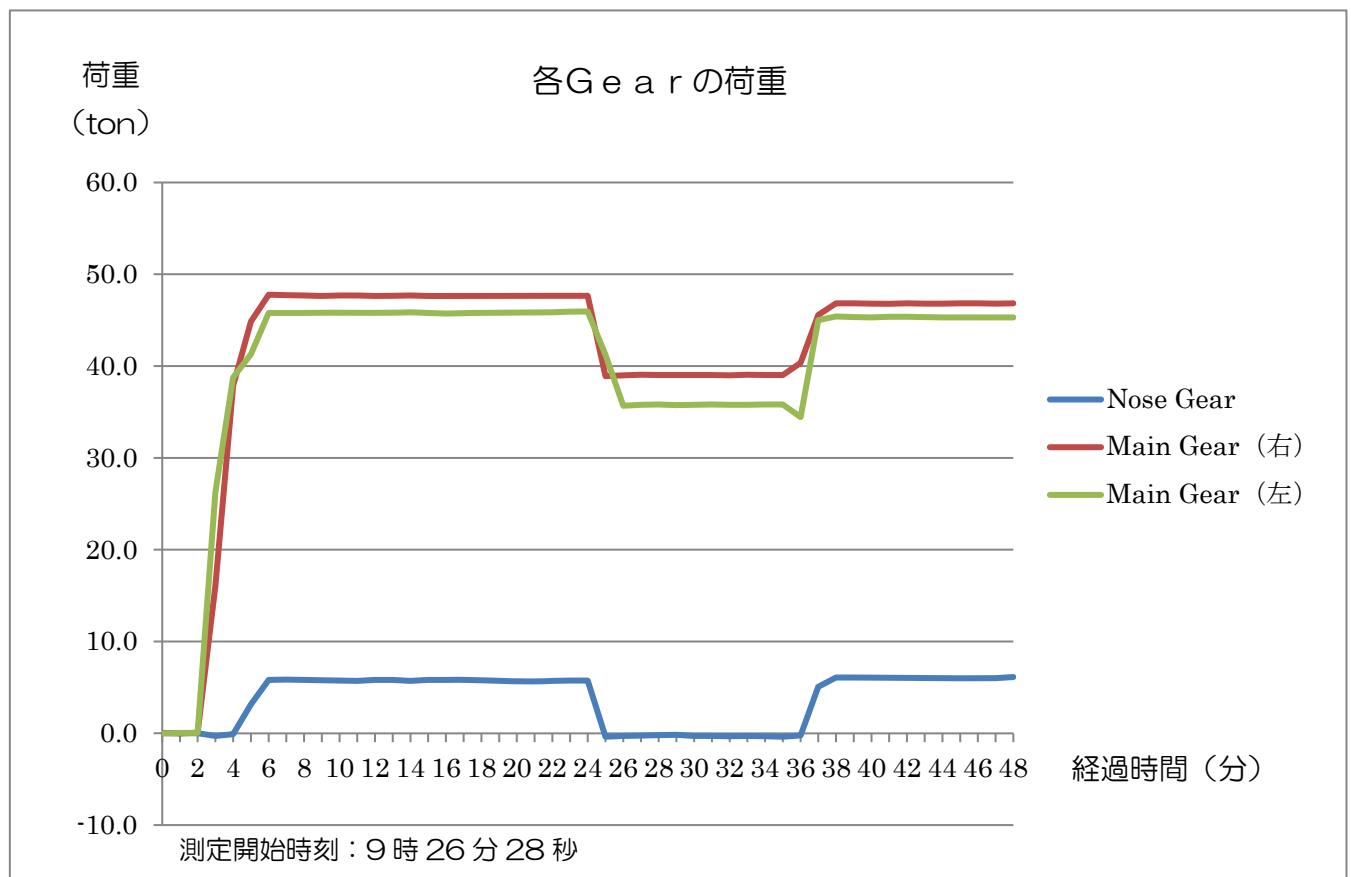


図9 荷重の推移

最終荷重 : Nose Gear 6.1 ton
: Main Gear (R) 46.8 ton
: Main Gear (L) 45.3 ton

概ね予想された荷重だった。3 ページ図5の斜材（青色）は荷重が架台に掛かりきってから本締めをおこなったが、Nose Gear には図示されていない垂直部材（Lアングル）があり、こちらはジャッキダウン前に本締めをおこなったので Nose Gear 架台にはプラスアルファの荷重が存在する。

5. まとめ

5.1 失敗したこと① 回路の誤り

測定が始まりしばらくして、各パイプ柱のX方向とY方向の測定値が場所によっては50%程度も異なっていることに気付いた。X方向とY方向の平均値では概ね予想された値で、各 Gear の最終的な荷重も予想されたものだったが、後日ゲージの結線方法に誤りがあることに気付いた。

今回の結線方法（P 3、図 6）は板の表裏での測定に使用すれば曲げの影響その他を除去するが、パイプの対面同志では除去することができないうえに、ひずみゲージの取り付け精度も測定に影響すると思われる（ただし、X、Yの平均をとればよい）。そもそも、パイプに円周方向 90° ピッチに張り付けたゲージが対面同志でのみ繋がっているのはおかいと気付くべきだった。

正解は下図（NDI「ひずみ測定問題集」より）、この結線なら平均を計算する必要もなかった。

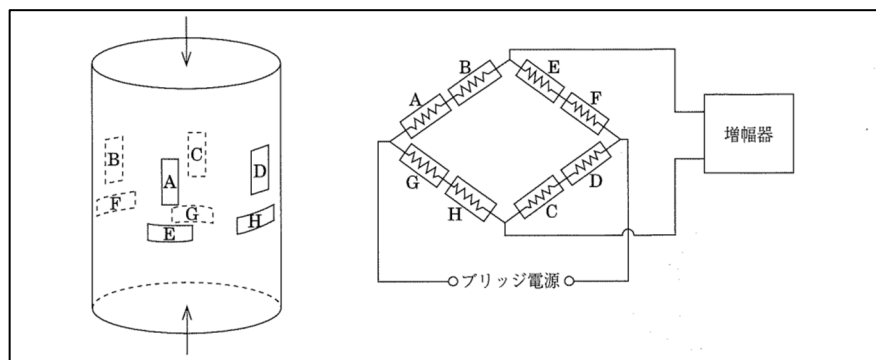


図 10

未経験の仕事で、国内最大手のメーカーに全面的に頼り切り、疑問を持たず、計画の検証を怠った（その能力がなかった）ことが失敗の原因だった。

5.2 失敗したこと② データの採取数

ジャッキダウン開始前にBoeingのエンジニアにジャッキダウンの速さを質問したところ「Very slowly」という回答だったが、安全側にと考え、使用したデータロガーの最大のスキャン速度（全チャンネル同時で最大 20ms（50 回/秒））で、データを採取した。

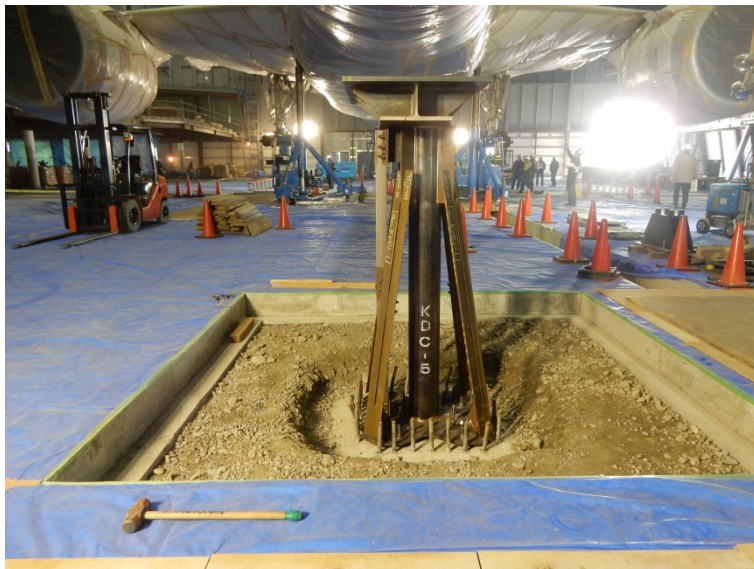
計測を依頼した会社には「CSVファイル渡し」と依頼していたので測定時間約 48 分 30 秒（145578 行）のデータの内から、グラフを書くために使用したデータは 1 分間隔で 47 個（×11CH）のみ、残りの 145531 組のデータを削除することに苦労した。思考錯誤し、新しい列に 2999 個（60 秒×50 個-1）おきに「1」を、残りのセルに「0」をドラッグして入力、オートフィルターで「1」のみ抽出し、数値のみ別シートにコピーという方法で整理した。（もっとスマートで良い方法があると思うが）

膨大なデータは取り扱いに苦労するので、計測会社側で専用ソフトを使いある程度整理してもらう方が良かった。

【状況写真】



・ 場内



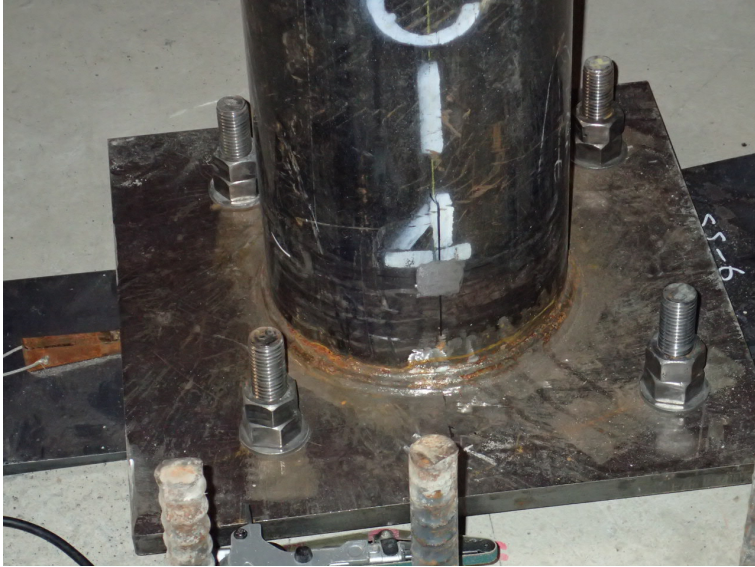
・ Nose Gear

（この架台の溶接検査は長野営業所の吉澤さんがおこなっていた）



・ ゲージ貼り付け位置ケガキ

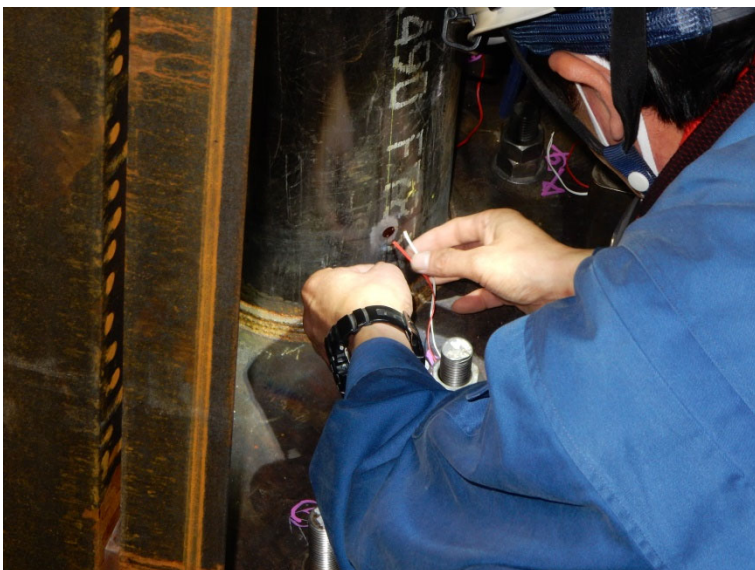
【状況写真】



- ・ ゲージ貼り付け位置研磨
(小型ベルトサンダー使用)



- ・ ゲージ貼り付け位置
脱脂 (アセトン)



- ・ 直交ゲージ貼り付け

【状況写真】



・ 結線



・ Nose Gear 結線

○ : ブリッジBOX

○ : ひずみゲージ

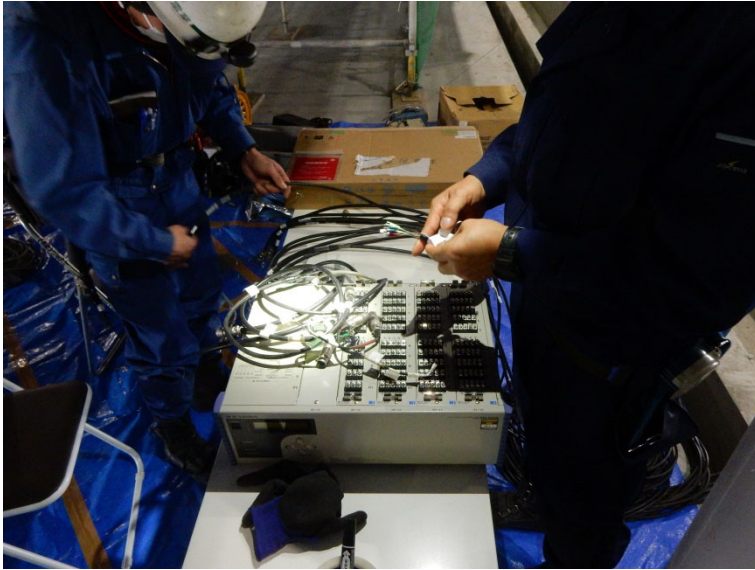
○ : リード線

矢印のケーブルはトレンチから
計測器へ



・ トレンチ内の配線

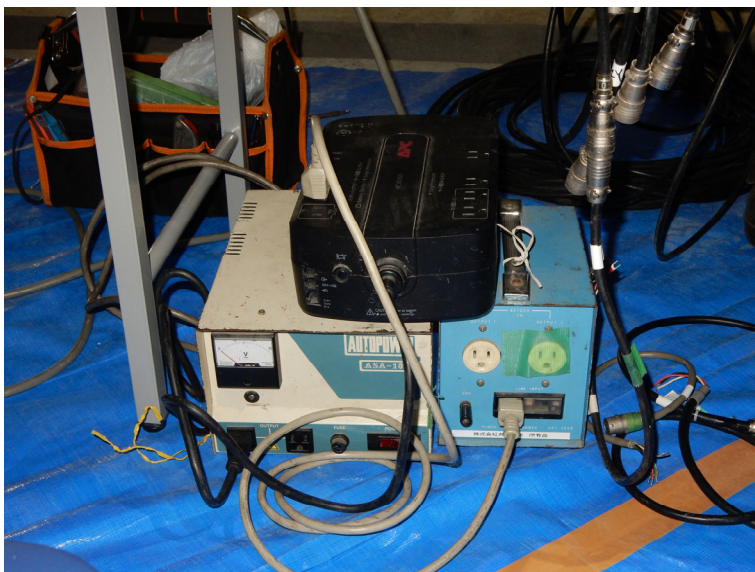
【状況写真】



- ・ データロガーへ結線



- ・ 回路チェック
センサーチェッカーで回路の点検

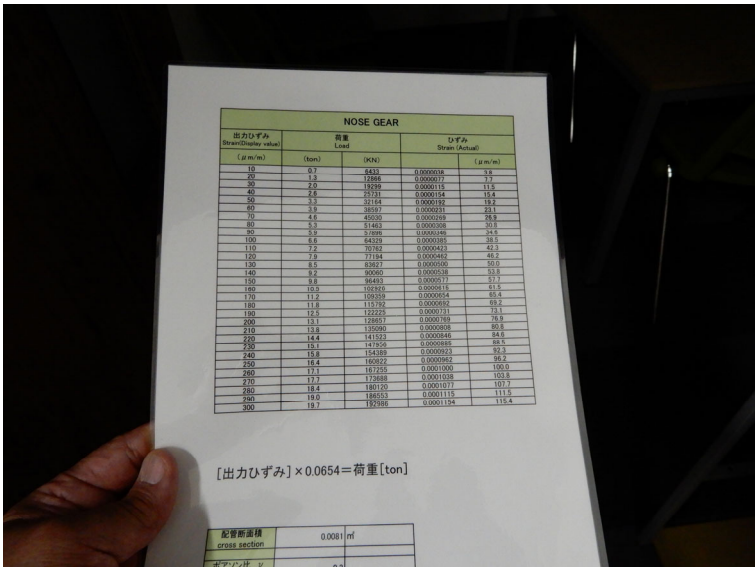


- ・ 安定化電源装置、無停電電源装置

【状況写真】



- ・計測中



- ・早見表

出力されるデータはひずみ（ε）
なので、トン（t）への換算表を
用意した。



- ・ Main Gear
- ・ 降下後、架台上の接続金物と
連結
- ・ 接続金物は製作工場及びジャッキ
ダウン後現場で磁粉探傷（MT）
を実施（英文の検査要領書、報告
書を書いた）

6. おまけ

愛知県、岐阜県には航空機をテーマとしたミュージアムが3か所にある。そのすべての鉄骨を名古屋営業所にて溶接検査をおこなった（増築含む）。

□「Flight of Dream」

愛知県常滑市、中部国際空港（セントレア内）、本年10月12日にオープン。シアトルの街をテーマとした食事&ショッピング、Boeing787のフライトシミュレーター（画像はセントレア）、Boeing ショップなど。 お金がかかりそう?? 関空に比べ飛行機の離発着数は格段に少ない。

空港の開港当初、空港島内の建物の半分以上はJ U S Tで検査していた。

□「あいち航空ミュージアム」

愛知県豊山町、県営名古屋空港内。YS11、ゼロ戦などが展示されている。展示している飛行機はほぼ「三菱製」（名古屋空港に隣接）。空港の離発着ではFDAのカラフルな機体が目を引く。平日は小牧基地の輸送機のタッチ&ゴーや、定期検査中の戦闘機のテスト飛行がみられる。鈴鹿でF1を開催しているときは、プライベートジェットが多く駐機している。

□「岐阜かかみがはら航空宇宙博物館」

岐阜県各務原市、航空自衛隊岐阜基地となり。 自衛隊で使用していた航空機がほぼ展示されている（三菱製は少ない、岐阜基地となりは川崎重工）。 つい最近まで岐阜基地で飛んでいた飛行機が退役と同時にここに収まっている。 実験機が多い。フライトシミュレーターの機体はブルーインパルスで使用されているT4練習機、画像は岐阜基地。 展示機数はかなり多い。平日に行けば隣の岐阜基地で戦闘機が飛びまくる。 休日は何も飛ばない。