

ドームふじの大型望遠鏡架台設営に関する検討



株式会社 竹中工務店 技術研究所

太田 義弘

本多 剛、岡崎 智仁、櫛部 敦道、大野 定俊

南極に新拠点構想
 生まれたて銀河観測 100万年前の水揺動

南極に新拠点構想
 生まれたて銀河観測 100万年前の水揺動

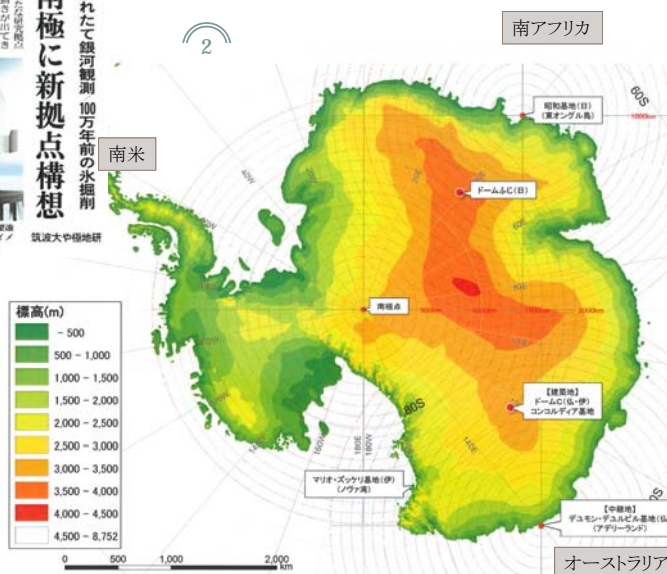
南極に新拠点構想
 生まれたて銀河観測 100万年前の水揺動



南極観測基地の天体望遠鏡の建設を計画する「マイグレーション」計画のイメージ

概要

2



2017/3/5
 日経新聞

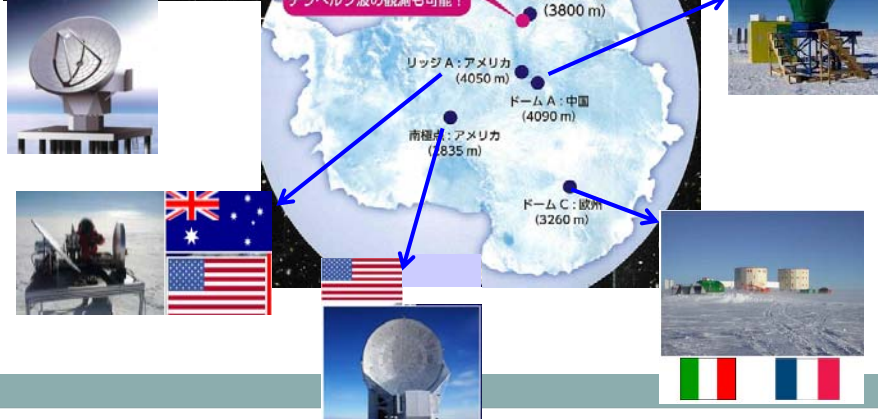
2017/5/30

世界の内陸観測基地の設置状況

10 m 級テラヘルツ望遠鏡仕様

| | |
|-------|-------------------|
| 口径 | 10 m 以上 |
| 光学系 | リッチー・クレチアン |
| 鏡面精度 | 20 μm 以下 |
| 指向精度 | 0.5" |
| 視野 | 1' (世界最大) |
| 観測周波数 | 200 GHz - 1.5 THz |

世界各国が天文観測地として着目

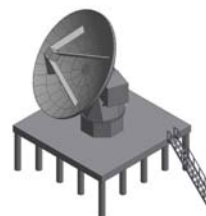


ドームふじおよびドームCの環境条件

| 項目 | 単位 | ドーム C | | | ドームふじ | | | 【参考】昭和基地 | | |
|-------------|---------|-----------|-----|----|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|----------|
| | | 夏季 | 中間季 | 冬季 | 夏季 1月 | 中間季 9月 | 冬季 6月 | 夏季 1月 | 中間季 4月 | 冬季 8月 |
| 最高気温 | (°C) | - | - | - | -18.9 | -43 | -50 | 1.5 | -8.4 | -18.1 |
| 平均気温 | (°C) | ドームふじと同程度 | | | -35 | -59 | -66 | -1.2 | -10.7 | -22.2 |
| 最低気温 | (°C) | - | - | - | -50 | -73 | -79.7 | -3.9 | -13.7 | -27.0 |
| 水温 (GL-約5m) | (°C) | - | - | - | -40 | - | - | - | - | - |
| 瞬間最大風速 | (m/sec) | - | - | - | - | - | - | 24.1 | 35.0 | 43.5 |
| 最大風速 | (m/sec) | - | - | - | 6.3 | 11.2 | 11.2 | 20.1 | 28.3 | 33.5 |
| 平均風速 | (m/sec) | 3.0 | - | - | 4.0 | 6.5 | 7.0 | 3.5 | 9.0 | 7.3 |
| 風向 | (-) | - | - | - | - | - | - | 北東 | 北東 | 北東 |
| 合計降雪量 | (cm) | - | - | - | - | - | - | 27 | 30 | 39 |
| 最深積雪量 | (cm) | - | - | - | - | - | - | 102 | 87 | 128 |
| 平均気圧 | (atm) | 約0.6 | | | 0.58 | 0.56 | 0.55 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| 緯度 | 南緯 | 75度06分 | | | 77度19分01秒 | | | 69度00分22秒 | | |
| 経度 | 東経 | 123度20分 | | | 39度45分12秒 | | | 39度35分24秒 | | |
| 標高 | (m) | 3250 | | | 3800 | | | 29.18 | | |
| 気圧高度 | (m) | - | | | 4500 | | | - | | |

望遠鏡等架台に求められる性能と課題

1. 設置場所（ドームふじの場合）：
昭和基地から南西に約1000km、標高約3780m。
設置場所の地盤は雪
2. 望遠鏡について：
パラボラ直径10~12m、重さ100~140トン
(将来は更に大型化)
設置面は六角形 直径5~6m
望遠鏡は低温用鋼材を使用。（-80°C 対応）
3. 望遠鏡基礎について
望遠鏡使用期間 20年 最低10年
雪だまりを防ぐ必要がある
基礎部にも厳しい精度（鉛直変位）が求められる
(特に望遠鏡稼働中の安定性が求められる)
地盤（=雪面）の支持物性値は不明確
不同沈下補正が求められる



架台の設計や施工における課題

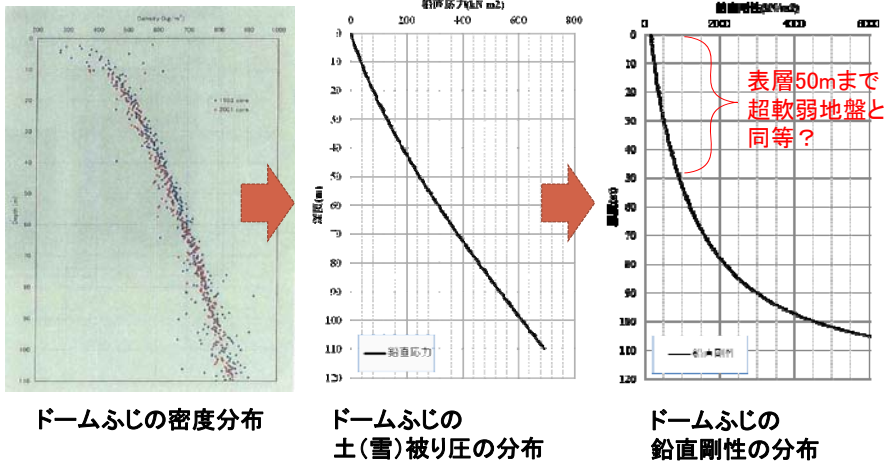
| 項目 | 課題 |
|------------|--|
| 地盤 (雪面) | <ul style="list-style-type: none"> ・重量物を長期に安定して支持できる地盤とはいえない。 ・地盤(雪面)の補強や沈下対策技術が未確立 ・沈下予測技術も未確立(物理的特性 v.s. 時間・温度) |
| 上部構造 | <ul style="list-style-type: none"> ・高い精度が求められる(観測機器の運転時) 施工精度、ジャッキアップ時の精度の確保 地盤(雪面)に伝わる動的荷重の影響 |
| 吹溜り対策 | <ul style="list-style-type: none"> ・風による吹き溜まり対策が必要 (高床式、ジャッキアップ ⇄ ジョブ構造性能 の両立) |
| 材料 | <ul style="list-style-type: none"> ・極低温鋼の建設用鋼材がない。非常に高価になる。 |
| 施工 | <ul style="list-style-type: none"> ・輸送への配慮が必要 ・建設期間、建設機械に限られる |

基礎構造

地盤(雪)の支持条件と設計の考え方

雪の物性の設定①

地盤の物性は土被り圧(平均密度×深さ)で決まる。
(雪も地盤と同じだと仮定すると・・・)



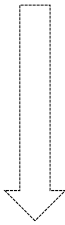
基礎構造

地盤(雪)の支持条件と設計の考え方

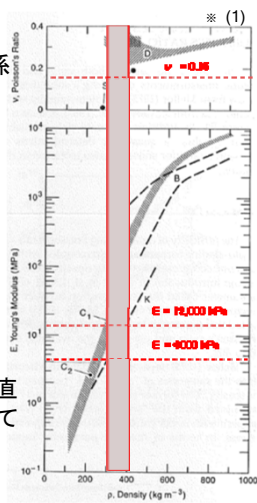
雪の物性の設定② 既往のデータでは・・・

鉛直剛性はやや高いが、強度がかなり小さい。

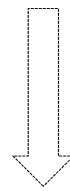
密度とヤング率、ポアソン比の関係



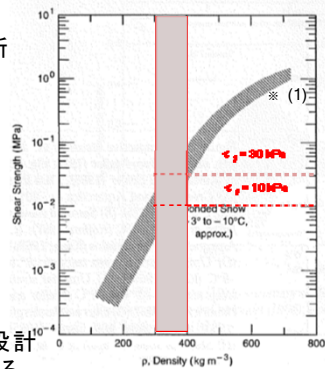
焼結作用で鉛直剛性が高くなっている。



密度とせん断強度の関係



荷重分散が設計のポイントになる。



※(1) Lewis H. Shapiro, et al., "Snow Mechanics, Review of the state of knowledge and Applications", US Army Corps of Engineers, Cold Regions Research & Engineering Laboratory, Report 97-3, Aug. 1997.

基礎構造

地盤(雪)の支持条件と設計の考え方

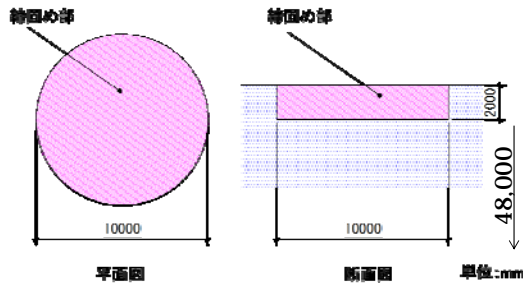
設計条件

建物荷重
 検討深度

W: 1652kN
 H: 地表~50mの深さまでを影響範囲として考える。

目標性能(仕様)

- ① 締固め部直下の鉛直荷重度を20kN/m²程度
 - ② 締固め部のパンチング破壊を防止
 - ③ 沈下量を50mm以内
- 締固め部は直径10m、深さ2mとする。



雪の定数設定

$E = 12,000 \text{ kPa}$ $\nu = 0.15$
 $\tau_f = 30 \text{ kPa}$

$E = 4000 \text{ kPa}$ $\nu = 0.15$
 $\tau_f = 10 \text{ kPa}$

基礎構造

地盤(雪)の支持条件と設計の考え方

基礎の即時沈下量

→ 最大41 mm (平均32 mm)

※一般の建物の場合、即時沈下量は最大50mmが限界

多層地盤上の円形基礎の沈下量

| | Total Settlement (mm) | 1st layer | | 2nd layer | | 3rd layer | | 4th layer | | 5th layer | |
|------------------------------|-----------------------|-----------|--------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|--------|
| | | 21.0 | 21.0 | 21.0 | 21.0 | 21.0 | 21.0 | 21.0 | 21.0 | 21.0 | 21.0 |
| 荷重, q (kN/m ²) | | 21.0 | 21.0 | 21.0 | 21.0 | 21.0 | 21.0 | 21.0 | 21.0 | 21.0 | 21.0 |
| ヤング率, E (kN/m ²) | | 12,000 | 12,000 | 4,000 | 4,000 | 4,000 | 4,000 | 4,000 | 4,000 | 4,000 | 4,000 |
| ポアソン比, ν | | 0.3 | 0.3 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 |
| 半径, a (m) | | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| 深さ, z (m) | | 0 | 2 | 2 | 10 | 10 | 20 | 20 | 30 | 30 | 50 |
| 係数, l=z/a | | 0.000 | 0.400 | 0.400 | 2.000 | 2.000 | 4.000 | 4.000 | 6.000 | 6.000 | 10.000 |
| Is | | 1.00 | 0.86 | 0.82 | 0.36 | 0.36 | 0.19 | 0.19 | 0.13 | 0.13 | 0.08 |
| 中心部沈下量 | 40.63 | | | | | | | | | | |
| 沈下量, Dz (mm) | | 15.95 | 13.66 | 42.40 | 18.52 | 18.52 | 9.94 | 9.94 | 6.72 | 6.72 | 4.06 |
| 相対沈下量, Sz (mm) | | | 2.29 | | 23.88 | | 8.58 | | 3.22 | | 2.66 |
| 平均沈下量(剛体) | 31.89 | | | | | | | | | | |
| 沈下量, Dz (mm) | | 12.52 | 10.73 | 33.29 | 14.54 | 14.54 | 7.80 | 7.80 | 5.28 | 5.28 | 3.19 |
| 相対沈下量 Sz (mm) | | | 1.80 | | 18.75 | | 6.73 | | 2.52 | | 2.09 |

基礎構造

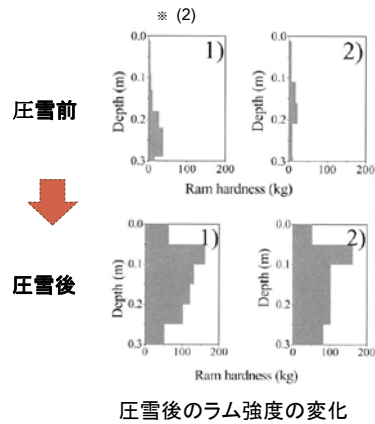
地盤(雪面)の課題と検討事項

1) 雪面の締固め/補強 について

- ・圧雪により強度増加が期待される。
- ・人力による圧雪では効果は表層部のみ
- ・対応策については実証的な検討が重要

2) 建造物の沈下量の変化のモニタリング

- ・軟弱地盤上の建造物では長期に沈下量を計測している



※(2) 金高義, 沖田博文, 市川隆, M.C.B. Ashley, 「南極ドームふじにおける9m天文観測架台の圧雪基礎造成と不動変位観測」, 第29回寒地技術シンポジウム, pp.74-78, 2013.11.

上部構造

観測用架台部構造の設計の考え方

上部架台の例

観測への影響・精度の確保

- **トラス架構による高剛性架構**

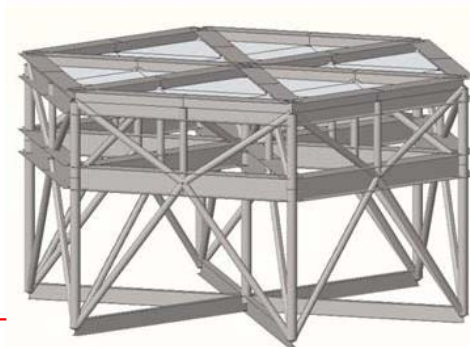
不同沈下対策

- **ジャッキアップ機構**

日射による温度変化対策

- **断熱材による構造体・部材のカバー**

(雪だまり対策の効果を相殺する可能性が高いので十分な配慮が必要)



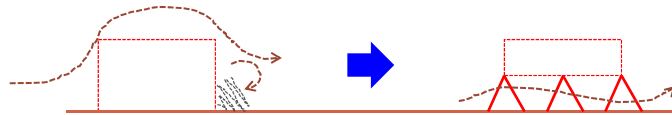
※断熱用カバー材は省略

上部構造

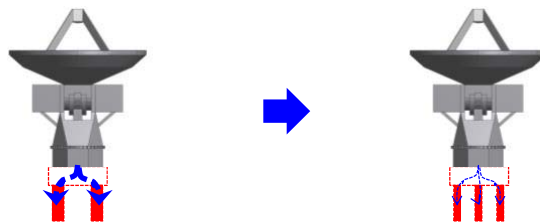
観測用架台部構造の設計の考え方

立面計画

高床式とすることで吹き溜まりを防止



柱本数を増やすことで望遠鏡重量を分散して地盤に伝達



上部構造

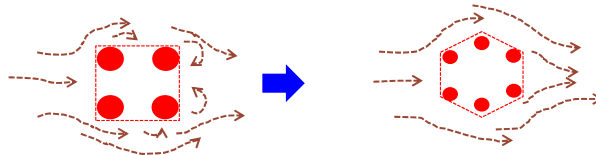
観測用架台部構造の設計の考え方

平面計画

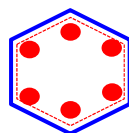
・多角形の平面形状とすることで風荷重を受け流す

- 浮上り防止
- 吹き溜まり防止

実験や風致解析で詳細見当が可能



・日射による温度変化(熱変形)防止のため、周辺部や部材を断熱材で覆う



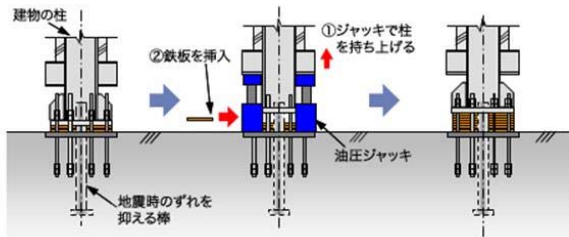
上部構造

観測用架台部構造の設計の考え方

不同沈下対策

不同沈下対策としてジャッキアップ機構を設ける

➤ 国内で実績のある簡易なジャッキアップ機構



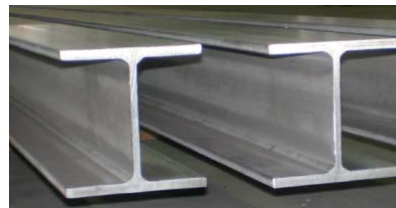
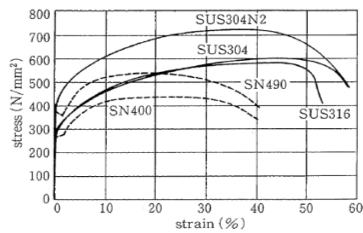
但し、零下20℃以下での運用に関しては検討が必要

材料

極低温下で使用可能な架台用材料について

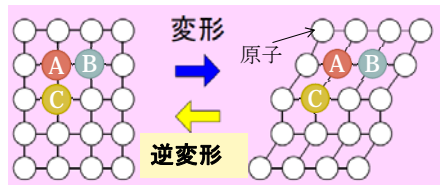
使用材料の検討

| | 一般建築での使用実績 | 極低温下での耐久性・耐候性 | コスト |
|--------|------------|---------------|-----|
| 一般炭素鋼 | ◎ | × | ◎ |
| 極低温鋼 | △ | ◎ | × |
| CFRP | × | △ | × |
| ステンレス鋼 | ○ | ○ | ○ |



材料 低温環境で使用できるFe-Mn-Si系新合金

一般鋼材比約10倍の疲労寿命

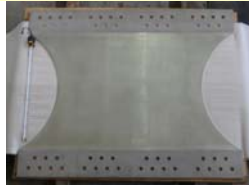


原子結合が切れにくく **疲労に強い!**

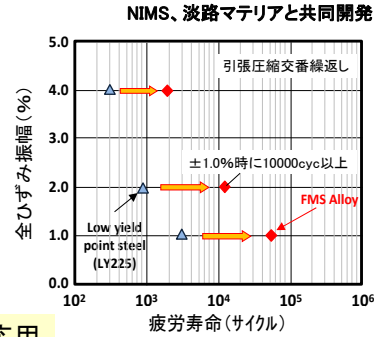
地震エネルギーを吸収する制振ダンパーへ応用



せん断パネル型
新合金制振ダンパー



新合金製ダンパー用芯材



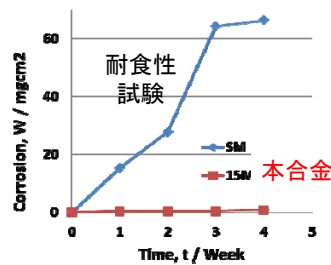
優れた疲労、制振性能に加え
 ・低温靱性
 ・非磁性
 ・高耐食性 を有する

材料 Fe-Mn-Si系新合金鋼材の特長

表 Fe-Mn-Si系合金の機械的性質

| 板厚 mm | 採取方向 | 0.2%耐力 | 引張強さ | 伸び | 降伏比 |
|----------|------|-------------------|-------------------|------|------|
| | | N/mm ² | N/mm ² | % | % |
| 16 | C方向 | 269 | 665 | 73.9 | 40.6 |

SUS304と同等の機械的性質



優れた耐食性

極低温(液体窒素温度)においても
 シャルピー試験の吸収エネルギー
 の低下が少なく、優れた靱性を維持



制振・耐疲労のみならず南極環境下の
 躯体用鋼材としても極めて有望

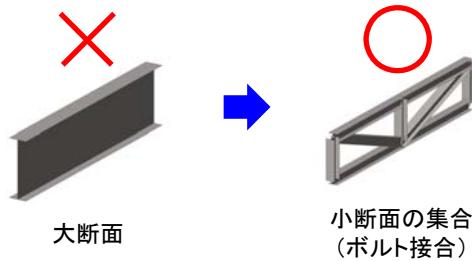
輸送・施工

架台部材の輸送と組立について

部材サイズ

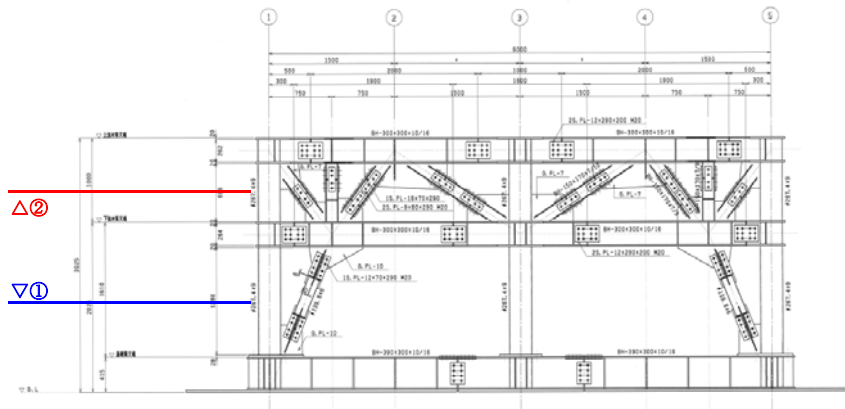
運搬時の寸法制限と現地における組み立て

- 20フィートコンテナでの輸送
- 現地(南極大陸)での運搬
- 人力でのハンドリング
- 最小限の施工機械(クレーン等)での



輸送・施工

南極テラヘルツ望遠鏡架台の分割検討



輸送効率・施工性

- 小径部材の集合体
- ボルト接合による接合



- 分割①が基本:地盤の沈下対策機構を兼用
- 分割②他の位置で架台柱を分割も検討可能
- 分割数や位置増加 ⇒ コスト増

御清聴ありがとうございました。

END

謝辞
筑波大学、中井直正教授、久野成夫教授には、南極天体望
遠鏡計画や発表内容について貴重な情報提供やご指導を
頂きました。ここに記して謝意を表します。