



# 雪面押込み変形特性を考慮した 橇の牽引力に関する検討

第14回南極設営シンポジウム

2017.6.27

金沢大学 香川博之

1

## 物資輸送用の橇



内陸旅行隊の橇列



2t木橇



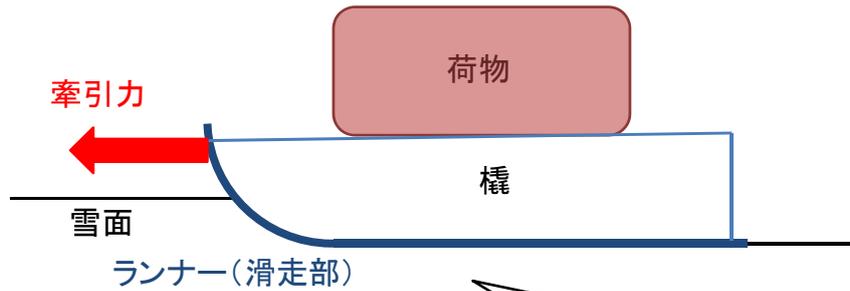
20ftコンテナ橇

2

## 橇の基本構造



ランナーが雪面を押し込み加工しながら進むと考える



雪の変形特性を把握する必要がある

## 雪面硬度測定



雪面硬度測定装置

装置仕様	寸法
圧子形状	頂角120° の円すい
底面の直径	180mm
圧子重量	2.3kg
錘の重量	0.5・1.0・1.5kg
錘の落下高さ	100~400mm

木下式硬度計を改良



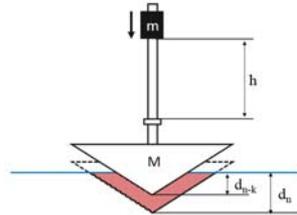
## 雪面硬度の評価方法



$$\text{雪面硬度} = \frac{\text{変形に使われたエネルギー}}{\text{押し込まれた体積}}$$

単位: Pa

$$H_{n,k} = \frac{g \{ kmh + (m + M)(d_n - d_{n-k}) \}}{\pi(d_n^3 - d_{n-k}^3)}$$



m: 錘の質量  
M: 円すい圧子の質量  
h: 錘の落下高さ  
d<sub>n</sub>: 押し込み深さ  
g: 重力加速度  
k: 落下回数

## 実験条件



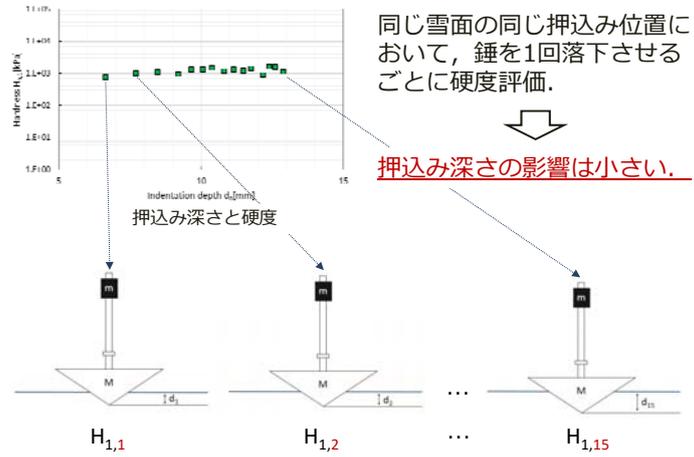
- 粒子径を選別した人工雪および自然雪を用いて、場所・深さ方向によらず均質な雪面を作成した。



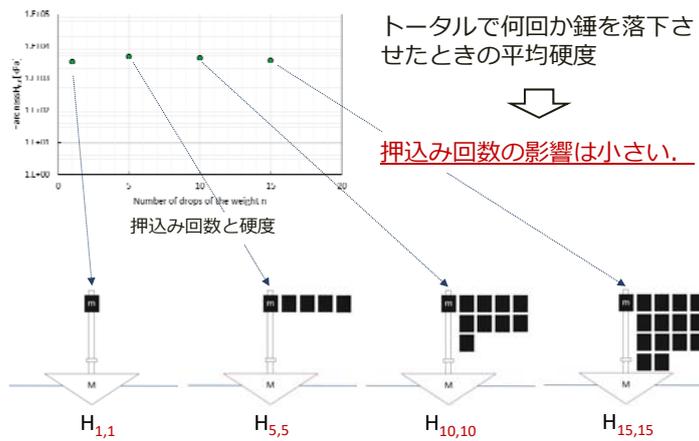
- 作成した雪面を一晩おき、焼結させた。
- 低温実験室で粒子径や温度を制御した。
- 自然環境下では、実験中がほぼ一定温度とみなせる場合にのみ測定を行った。

	人工雪	自然雪
測定場所	雪氷防災研究センター(山形)	宇宙電波観測所(長野)
温度[°C]	-15, -10, -5, -1(制御下)	-10~-2(自然下)
粒子径[mm]	約0.08 ~ 0.80	約0.2 ~ 0.5

## 押込み深さの影響



## 押込み回数の影響



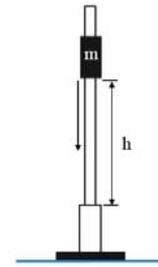
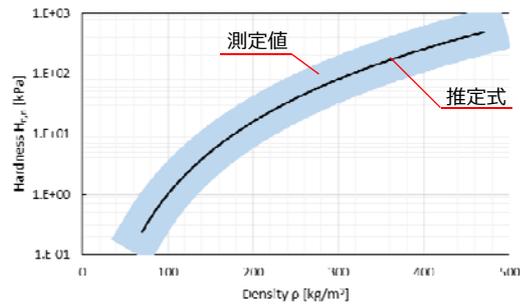
## 密度の影響



☆木下硬度推定式（自然雪40~470[kg/m<sup>3</sup>]

$$H = 10^{-8} \rho^4$$

H : 木下硬度[kPa]    ρ : 密度[kg/m<sup>3</sup>]

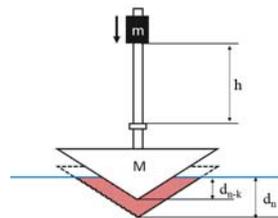
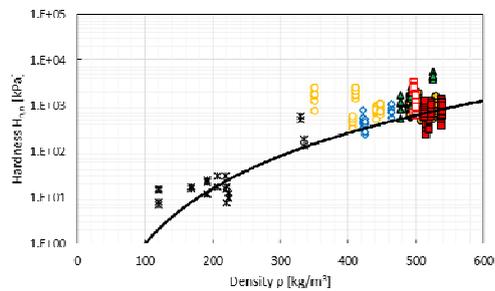


## 密度の影響



円すい圧子の場合にも

木下の硬度式に従い、密度が増加すると硬度が上昇した。



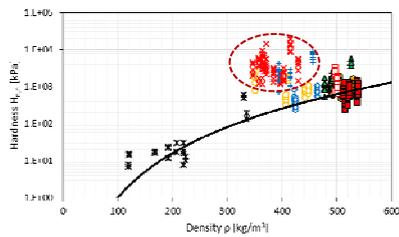
## 粒子径の影響



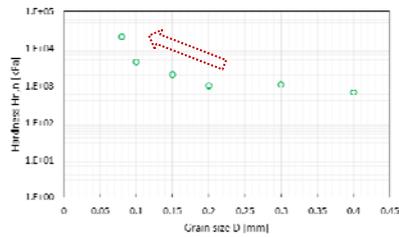
しかし、粒子径が小さいと木下の推定式よりも高くなる。



粒子径が小さいほど接触点が増え、粒子間の結びつきが強くなったものと考えられる。



密度と硬度の関係



粒子径と硬度の関係

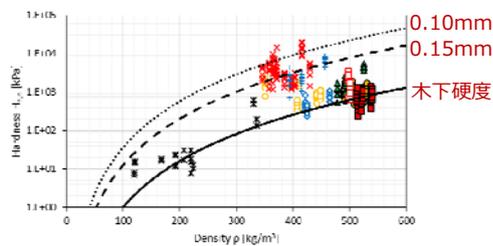
## 粒子径の影響



粒子径の影響を補正する実験式を作成した。

$$H_D = f(D)H$$

$H_D$  : 粒子径における硬度[kPa]    $H$  : 木下硬度[kPa]    $D$  : 粒子径[mm]  
 $f(D)$  : 実験により求めた補正関数



密度と硬度の関係

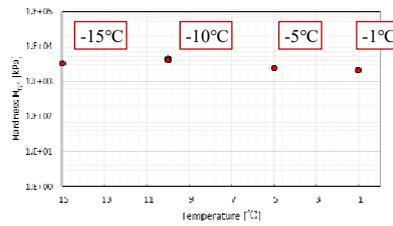
## 温度の影響



低温実験室において、 $-15 \cdot -10 \cdot -5 \cdot -1^\circ\text{C}$ の4パターンに温度を制御した。

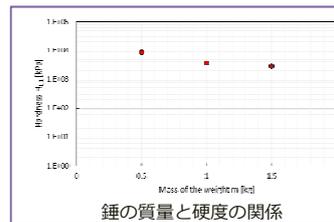
⇒ 温度の影響は小さい。(円すい圧子)

参考：円板圧子などの場合には温度変化あり



温度と硬度の関係

## 錘の質量と落下高さの影響

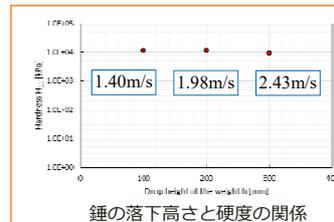


錘の質量と硬度の関係

錘の質量を変化させる  
⇒ エネルギーが変化する。



錘の質量の影響は小さい。



錘の落下高さとの関係

錘の落下高さを変化させる  
⇒ 衝突速度が変化する。



錘の落下高さの影響は小さい。

注意： 準静的試験のように極端に速度が小さいと影響する場合がある。

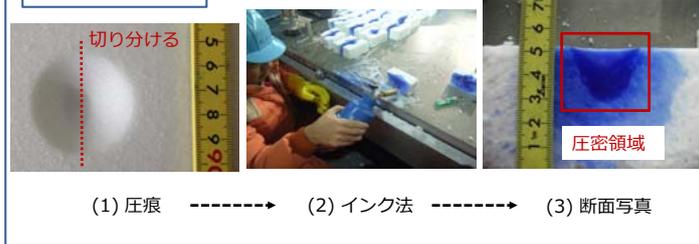
## 断面の観察



圧子押し込み後の断面をインク法により観察する。

⇒ 圧痕の下に周囲よりも密度の高い「**圧密領域**」が観察される。

### 断面観察の方法



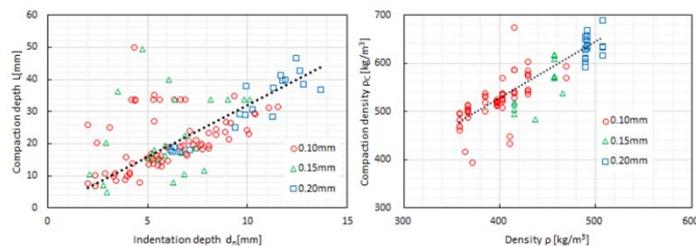
## 圧密領域の大きさ



圧密領域の深さは押し込み深さによって決定され、圧密領域内の平均密度は雪面の初期密度よりも一定倍の大きさになる。

$$L = 3.20d_n$$

$$\rho_c = 1.26\rho$$



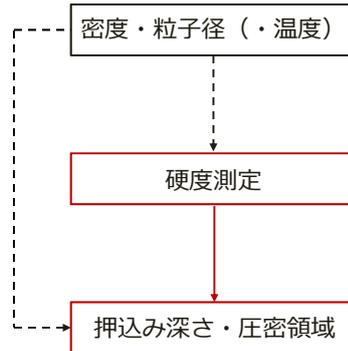
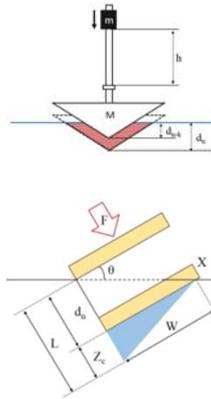
押し込み深さと圧密領域の深さ

初期密度と圧密密度

## 雪面硬度のまとめ



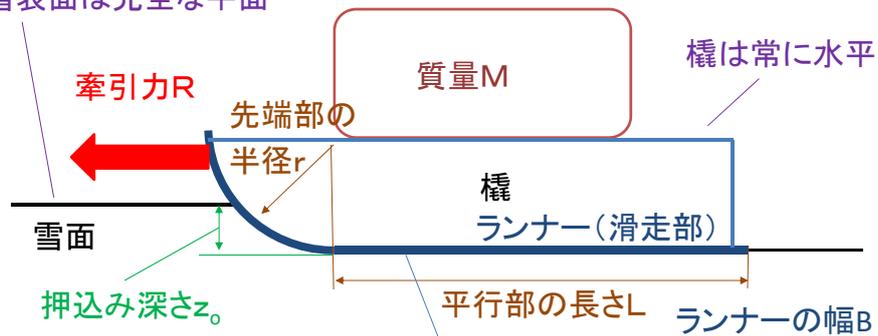
雪面硬度を測定することで、様々な圧子の押し込み深さも推定できる。



## 解析モデル



雪表面は完全な平面



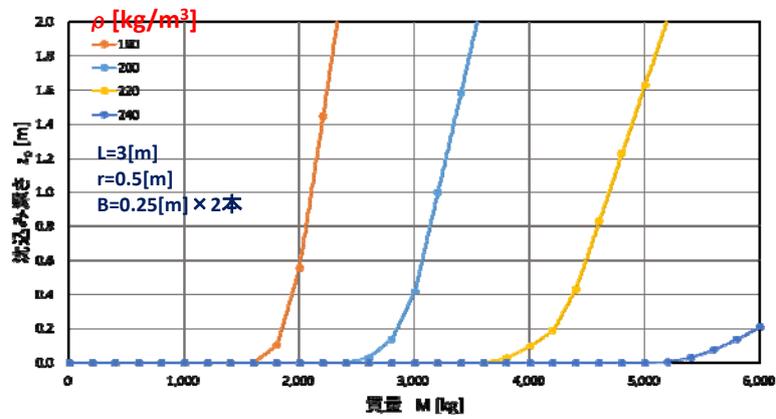
雪面硬度H

雪面のせん断強度 $\tau_0$

雪面の初期密度 $\rho$  (均一)

ランナーと雪面の摩擦係数 $\mu$

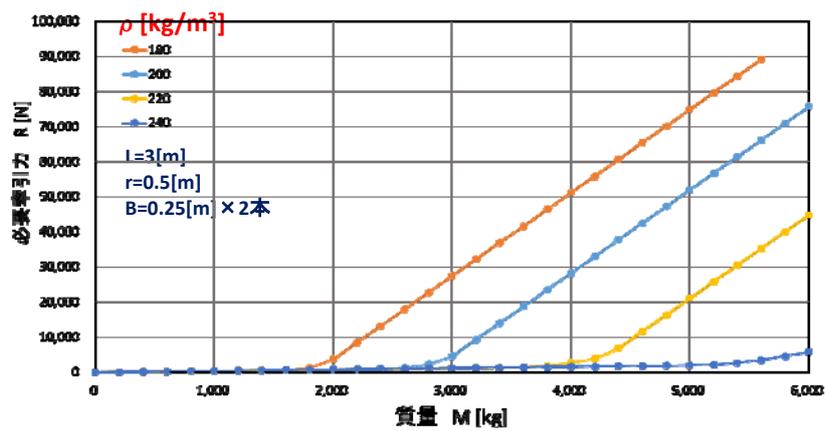
## 解析結果の例 質量の影響



- ・質量が大きいほど雪面に沈込む
- ・密度が低いほど雪面に沈込む
- 密度が高いほど質量を大きくできる

19

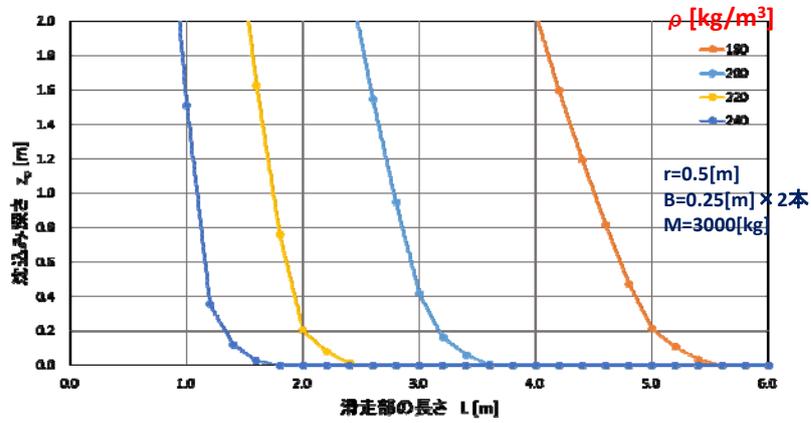
## 解析結果の例 質量の影響



- ・質量が大きいと牽引力が大きくなる
- ・密度が高いほど牽引力が小さい
- 密度が高いほど質量を大きくできる

20

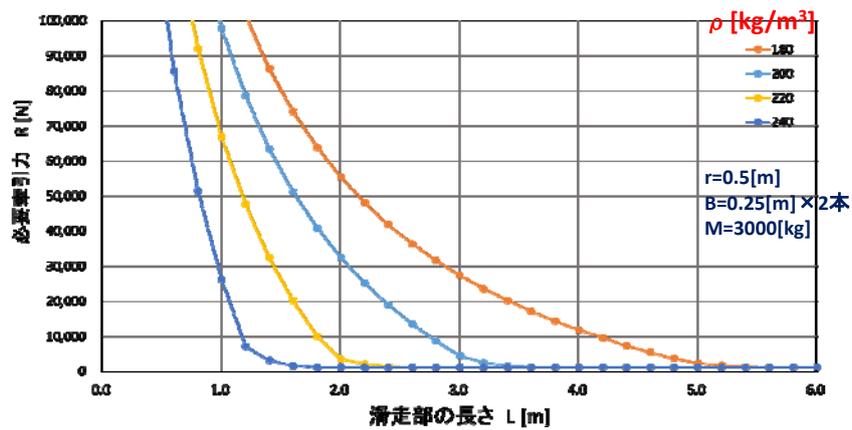
## 解析結果の例 平行部長さの影響



- 平行部が短いほど雪面に沈込む
- 密度が低いほど雪面に沈込む
- 密度が高いほど平行部を短くできる

21

## 解析結果の例 平行部長さの影響

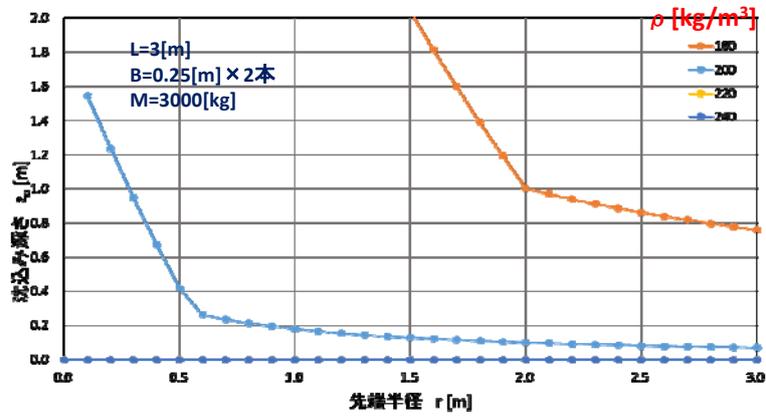


- 平行部が短いほど牽引力が大きい
- 密度が低いほど牽引力が大きい
- 密度が高いほど平行部を短くできる

22

## 解析結果の例

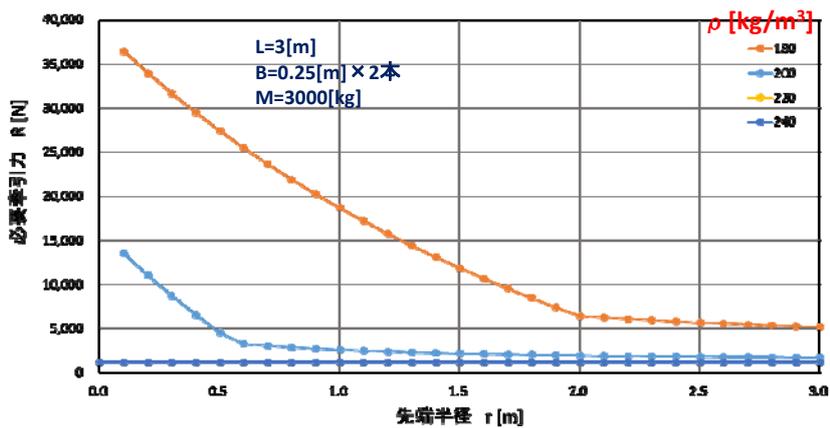
### 先端半径の影響



- ・先端半径が小さいと沈込む
- ・密度が低いと沈込む
- 先端半径が大きいほど沈込みが小さい

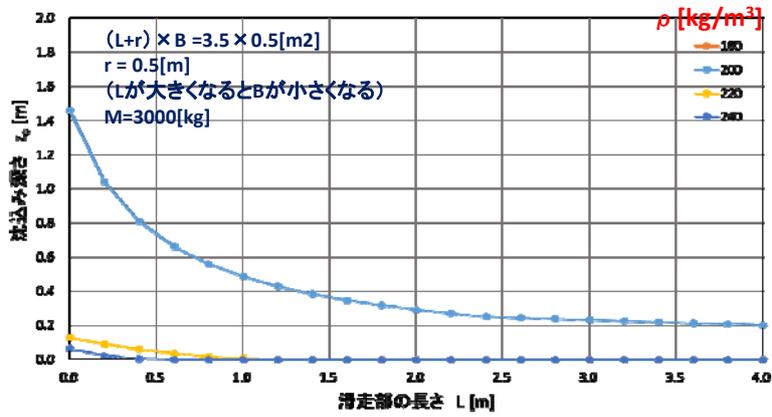
## 解析結果の例

### 先端半径の影響



- ・先端半径が小さいと牽引力が大きい
- ・密度が低いと牽引力が大きい
- 先端半径が大きいほど牽引力を小さくできる

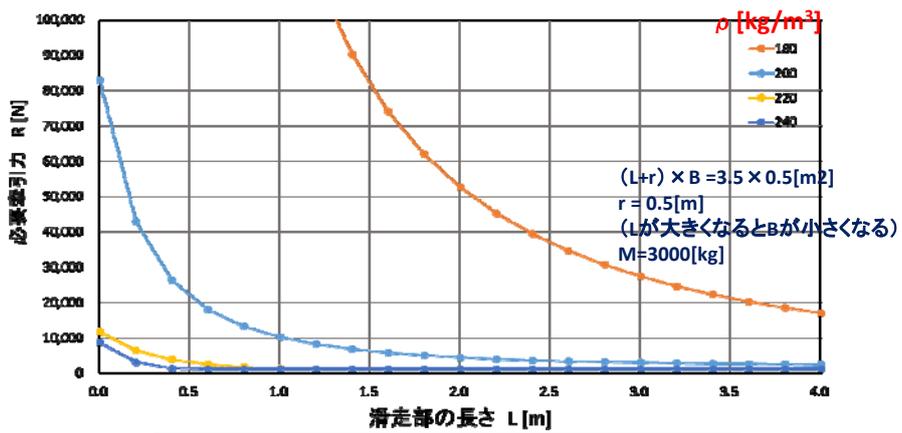
## 解析結果の例 縦横比の影響



- ・平行部の長さが大きいほど幅が減少する
- ・平行部が短いほど沈込む
- ・密度が低いと沈込む
- 同一面積なら縦長の方が沈込みが小さい

25

## 解析結果の例 縦横比の影響



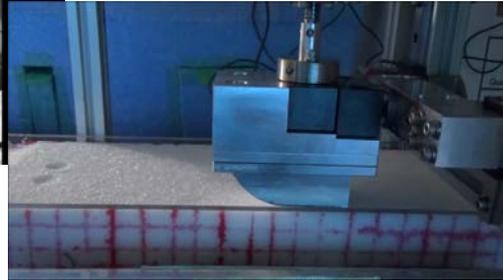
- ・平行部の長さが大きいほど幅が減少する
- ・平行部が短いほど沈込む
- ・密度が低いと沈込む
- 同一面積なら縦長の方が沈込みが小さい

26

## おわりに



- 例えると、南極大陸は硬い氷の上にビスケットのような雪で覆われている。
- その厚さや硬さは場所によって違う。
- 輸送は、そのビスケットを壊さないように行くと効率が良さそう。



27



ご清聴ありがとうございました

28