# ソーラーパネル架台の凍上被害発生メカニズムの解明

Elucidation of the Mechanism of Frost Heaving Damage to Solar Panel Mounts

北見工業大学大学院社会環境工学専攻 ○学生員 本田佳広 (Yoshihiro Honda) 北見工業大学工学部社会環境系 正 員 中村 大 (Dai Nakamura)

# 1. はじめに

近年、温室効果ガスの排出量ゼロを目指す「脱炭素化」 が世界的な潮流となっており、我が国も化石燃料から再 生可能エネルギーへの転換を迫られている。我が国にお ける太陽光発電の導入は、2012年に制定された固定価 格買取制度(FIT)開始後に急拡大した。この流れを受 け,広大な土地を有する北海道においても,山間部や遊 休農地などにおいて、大小様々な規模の太陽光発電施設 が積極的に建設されている。しかしながら、凍上現象に よる様々な被害が散見されるようになってきた。図-1 は北海道東部で発生したソーラーパネル架台の凍上被害 の例である。図から、ソーラーパネルを支える支柱(C 形鋼)が大きくねじれている様子(図-1(a))や,スパ ン間で段差が生じて、パネルが反り上がっている様子 (図-1(b))が確認できる。架台が変形し続けるとパネ ルの傾きや破損、倒壊へと繋がる恐れもあることから発 生メカニズムの解明が急務である。特に、図-1(a)に示 した支柱のねじれについては、筆者が調べた限り、これ までに報告された被災事例は確認できなかった。

そこで本研究では現地調査を行い、凍上による支柱の ねじれ発生メカニズムについて仮説を立てて、これを立 証するための現地計測と、室内模型実験を実施した。

#### 2. 現地調査

被害が確認された北海道東部の太陽光発電施設は 2017年1月に工事が終了し,種々の検査を受けた後に, 同年3月から発電が開始された。しかしながら,同年4 月,融雪時期に支柱(C形鋼)のねじれが確認された。 支柱の回転は軽微なものも含めて,施設全体の7~8割 程度に上る。架台が積雪荷重や風等の外力に対して十分 な強度を有していることから,この原因は凍上現象と推 測される。なお,当該箇所の地盤は非常に軟弱で支持力 不足のため,ソイルコラム(直径0.4 m,深さ2.0 m)で 改良が行われている。

図-2 は 2019 年 3 月に撮影した現地の様子である。パ ネルとパネルの間(以下,パネル外)には積雪が見られ るが,パネル直下(以下,パネル内)では地表面が露出 した状態であることがわかる。また,中心部分は幾分盛 り上がっていた。このことから,パネル内の地盤は寒気 の影響を直接受けて凍結線が地中深くまで進行し,大き く凍上していると考えられる。一方,積雪のあるパネル 外の地盤は,雪の断熱効果の影響で,寒気の影響を受け ていないと推測される。積雪が 20 cm に達すると凍結線 (0 ℃線)が進行しなくなること<sup>1)</sup>を踏まえると,パネ ル外の地盤の凍上は軽微であったと考えられる。



図-1 ソーラーパネル架台の凍上被害



図-2 2019年3月における現地の様子

上述の調査結果を踏まえて、本研究では凍上による支 柱のねじれ発生メカニズムについて、図-3 に示すよう な仮説を立てた。凍結深さはパネル内で深く、パネル外 で浅くなるため、パネル内の凍上量は大きく、パネル外 の凍上量は小さくなる。この凍上量の差異に起因して支 柱に水平方向の凍上力が作用し支柱がねじれるものと考 えられる。

## 3. 現地で採取した土の凍上性

図-4 は現地で採取した土の粒径加積曲線で,粗粒 分・細粒分含有量から細粒分質砂質礫に工学的に大分さ れる。図から,シルト分と粘土分を合わせた細粒分含有 率 F。が 31%と高いことが確認できる。

図-5 は地盤工学会基準「凍上性判定のための土の凍



図-3 現地調査をもとに立てた凍上による支柱の ねじれ発生メカニズムの仮説

上試験方法(JGS 0172-2009)」に準じて実施した凍上 試験結果である。凍上速度は 0.378 mm/h であり、「凍 上性が高い」と判定される 0.3 mm/h を超えている。こ の試験結果は、シルトの凍上性が最も高くなることを解 説した Casagrande の研究成果(例えば、社団法人地盤工 学会北海道支部発行の寒冷地地盤工学の解説<sup>2)</sup>等)とも 良い一致を示している。

以上の試験結果から,現地で採取した土が凍上性を有 していることがわかった。また,現地調査で河川が近く, 地下水位が高いことも確認されていることからも,当該 箇所の支柱のねじれは,凍上が主な原因であると考える ことが妥当だと言える。

## 4. 現地計測

本研究では 2019 年度にパネル内外における凍結深さ と凍上量,2020 年度には支柱に作用する水平方向の凍 上力の現地計測を実施した。

#### 4.1 パネル内外における凍結深さと凍上量

図-6 は 2019 年度の現地計測で設置した各種の計測機 器を模式的に示したものである。温度計測ロッドは木材 に温度センサーを固定して作製しており,センサーは地 表面を起点として 0.5 m間隔で深さ1mまで配置した。 凍上量計は下端をモルタルで固定した異径鉄筋に変位計 を取り付け,地表面の変位に伴う受圧板の上下動を計測 するものである。土中温度,凍上量はいずれも,ソーラ ーパネル内外の中央付近に配置し,毎時自動計測した。

図-7 は当該地域における AMeDAS の日平均気温と積 雪深さの経時変化である。図中には,現地で実測した積 雪深さも示しており,パネル内外において積雪深さに大 きな差異を確認することができた。

図-8 はソーラーパネル内外の凍上量と凍結深さの経時変化である。積雪の断熱効果で凍結深さには最大 46 cm の差が生じており,凍上量においてもパネル内外で39 mm の差が生じていることが確認できた。

# 4.2 支柱に作用する水平方向の凍上力

図-9 は 2020 年度の現地計測で設置した各種の計測機 器の配置を模式的に示したものである。現地計測では支 柱(C 形鋼)およびソイルコラム(直径 0.4 m)に作用 する凍上力と支柱近傍の地盤の凍上量,パネル内外の土 中温度を計測することに取り組んだ。土圧計(直径 0.1



図-5 現地で採取した土の凍上試験結果



図-6 2019 年度の現地計測で設置した各種の計測
機器の配置図

m) は支柱から 0.2 m 離れた箇所を開削して, 深さ 0.4 m の位置に埋設した。一般的に, 土圧計は受圧面を上にし て水平に設置されるが, ここでは受圧面が鉛直となるよ うに設置している。なお, 水平方向の凍上力がどの方向 から作用するのか明らかにするため, 支柱を囲うように 複数の土圧計を埋設している。凍上量計, 温度計測ロッ ドについては前年度と同様のものを用いているが, 温度 計測ロッドのセンサーは地表面を起点として深さ 0.3 m,



図-9 2020 年度の現地計測で設置した各種の計測
機器の配置図

0.6 m, 1.0 m に配置した。土圧,土中温度,凍上量は毎時自動計測した。

図-10 は凍結深さと水平土圧,凍上量の経時変化である。なお、図中には AMeDAS の日平均気温と積雪深さも示した。降雪の開始が 2021 年 1 月 7 日と遅かったこともあり、2021 年 1 月中旬頃までパネル外の方が、パネ



ル内に比べて凍結深さが大きかった。ただし,積雪が開始した1月7日以降,パネル外の凍結深さは小さくなり, パネル内の凍結深さが逆転して大きくなっていることが わかる。水平土圧については,凍結深さが土圧計の埋設 深さに達するタイミングで計測されており,現地におい て支柱に水平方向の凍上力が作用していることが確認で きた。さらに,水平方向の凍上力は融解が始まった2月 中旬頃から再度上昇し,凍上量が最大となる3月7日頃 にパネル内に設置した土圧計(Ch.1)が最大値を示した。

#### 5. 室内模型実験

図-11 は模型実験で使用した装置,支柱(C 形鋼)の 寸法とその回転角の計測方法を模式的に表したものであ



図-11 実験装置,C形鋼の寸法,回転角の計測方法

る。アクリル製の透明な土槽に凍上性の高い風化火山灰 を入れ、支柱を設置しながら高さ 20 cm になるまで締め 固めた。土試料は含水比 w=80%に調整している。なお、 土試料は現地で採取したものではなく、模型実験用によ り凍上性の高いものを用意した。凍結は地表面に設置し た冷却板で行い, 支柱の左右で凍結深さに差を生じさせ, パネル内外で生じる不均一な凍上現象を再現した。支柱 には現地と同様にC形鋼を用いており、模型実験の縮尺 に合わせて厚さを 0.4 mm とした。また,支柱は上部で フレームに固定している。実験中は地表面の凍上量を変 位計で、土中温度を熱電対で、支柱に作用する水平方向 の凍上力を土圧計(直径 3 cm)で計測し,支柱の挙動 をカメラでインターバル撮影した。なお、土圧計は受圧 面が鉛直となるように、C 形鋼に固定した。さらに、図 -11(c)のように、土槽を上面から見て、X軸からのC形 鋼の傾きを回転角θとして読み取った。実験装置や土試 料の詳細については、中村ら3を参照されたい。

図-12 は地表面温度,凍上量,C 形鋼の回転角,凍結 深さ,水平土圧の経時変化である。図-13 は実験後の様 子であり,C 形鋼が大きく回転して座屈していることが 確認できる。図-12 から,パネル内を模擬した土槽右側 では地表面温度が低下するに従って,凍上量が増加して いることがわかる。一方で,パネル外を模擬した左側で は凍上量が小さく,パネル内外の大きな凍上量の差異を 再現できていることがわかる。C 形鋼の回転角は地表面 が融解し始め,凍上量が最大となる辺りで,最も大きく なっていることが確認できる。

水平土圧については、凍結深さが土圧計埋設深さに近 づくと、土槽右側の土圧計が徐々に増加していくが、C 形鋼の回転が始まると徐々に減少していることがわかる。 一方で、土槽左側の土圧計は支柱の回転と同じタイミン グで、水平土圧が急増していることがわかる。土槽左側 の水平土圧が最大値となるタイミングは、地表面が融解 し始め、凍上量が最大となる辺りと概ね同じであった。 以上のように、現地計測において計測された水平方向の 凍上力が、室内模型実験でも計測された。さらに、水平 方向の凍上力が最大値を示すタイミングは、当初想定し ていた厳寒期ではなく、融解期であることも明らかとな った。ただし、水平方向の凍上力が融解期に増大するメ カニズムについては明らかにできていない。



図-12 地表面温度,凍上量,C形鋼の回転角, 凍結深さ,水平土圧の経時変化



図-13 実験後の様子

# 6. おわりに

本研究では現地調査を行い,凍上による支柱のねじれ 発生メカニズムについて仮説を立てて,これを立証する ための現地計測と,室内模型実験を実施した。その結果, ソーラーパネル内外で凍結深さ,凍上量に大きな差異が 生じることが確認された。また,これに起因して,支柱 に水平方向の凍上力が作用することも確認できた。さら に,水平方向の凍上力は融解期に増大することも明らか となった。現地計測,室内模型実験からは仮説を支持す る結果が得られたが,まだまだ不明な点が多い。このた め,今後も研究を継続していていきたい。

## 参考文献

- 原田ら:長期観測に基づく積雪下の土の凍結融解特 性、雪氷、Vol.71, No.4, pp.241-251, 2009.
- 2) 地盤工学会北海道支部:寒冷地地盤工学-凍上被害 とその対策-,2009.
- 中村ら:室内模型実験を用いた構造物の凍着凍上挙 動に関する基礎的研究,日本雪工学会誌, Vol.37, No.3, pp.59-69, 2021.