

傾斜地設置型/営農型/水上設置型

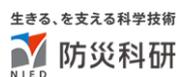
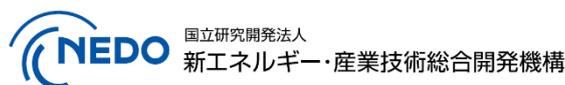
太陽光発電システムの設計・施工ガイドライン 2025 年版

技術資料：

太陽光発電システム用架台のフレーム構造解析

この成果物は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務（JPNP20015）「太陽光発電主力電源化推進技術開発／太陽光発電の長期安定電源化技術開発」事業の結果として得られたものです。

2025 年 4 月 11 日



更新・修正履歴

・ 2025/04/11 公開：2025 年版

太陽光発電システム用架台のフレーム構造解析

1. 概要

太陽光発電用架台の設計時には、作用荷重に対する架構の発生応力分布を構造解析により推定する。その際、架構形式を正確に再現することが理想であるが、フレームで補剛された太陽電池パネル、太陽電池パネルの部材への固定方法、部材同士の接合方法など、解析モデル構築において簡略化を余儀なくされる部位は多い。そこで本資料では、傾斜地設置型太陽光発電システムの設計・施工ガイドライン 2025 年版【技術資料：太陽光発電システム用架台の耐風性能試験（一部杭基礎支持力が不足している場合）】¹⁾（結果詳細は文献 2））のうち、基礎不良の無い全ての柱脚が健全に固定されている場合を対象に、解析的な再現を試みる。そのうえで、簡易解析モデルによる試験結果の再現性や課題を明らかにし、解析モデルを構築するうえでの注意事項をまとめる。

2. 3D 数値解析モデル

図 2-1 に、圧力载荷試験を実施した太陽電池パネル架台試験体^{1,2)}を模した解析モデル全体概要を示す。解析ソフトには、一般汎用構造解析ソフト SAP2000³⁾を使用した。試験体は、東西に配した 5 本のパネル受け材を南北に 3.4 m ピッチで配した 3 構面の筋交付き架構で支持した、アルミニウム製架台である。太陽電池パネルは、4 行×5 列配してある。解析モデルは、太陽電池パネル面を全体座標の X-Y 軸とし、支持する柱や南北筋交を太陽電池パネル面が地面に対して傾きが約 20°となるように架構を作成した。

図 2-2 に、図 2-1 を構成する柱、南北筋交、梁およびパネル受け材の断面形状を、表 2-1 にアルミニウム部材の材料諸元を示す。なお、表のアルミニウム材料諸元は、試験体部材から切り出した試験片の引張試験より得た値である。なお、表 2-1 に示したヤング係数は一部の部材から切り出した全ての試験片で非常に低いものとなった。こちらは原因が定かでないため、ここではあくまで参考値とする。太陽電池パネルのモデル化は、後述する。

なお、幾何学的線形・弾性解析とし、解析では材料の降伏および部材の座屈や局部座屈などの不安定現象は考慮しない。

(1) 架構部材の要素モデル

南北構面を構成する柱および南北筋交端部はボルト 1 本で金具に固定する端部の回転を許容する接合方法が採用されている。そこで、太陽電池パネルを支持する東西方向のパネル受け材および南北方向の梁には曲げを考慮するため梁要素、柱および南北筋交にはトラス要素を採用した（図 2-1）。図において、柱および南北筋交部材端部のピン（○）はトラス要素であることを示す。太陽電池パネルにはシェル要素を用い、解析時は 6×8 でメッシュを設けた。太陽電池パネルは、ガラスで保護された太陽光モジュールを縁にフレームを添わせることで補強している。このモデル化については、後述する。

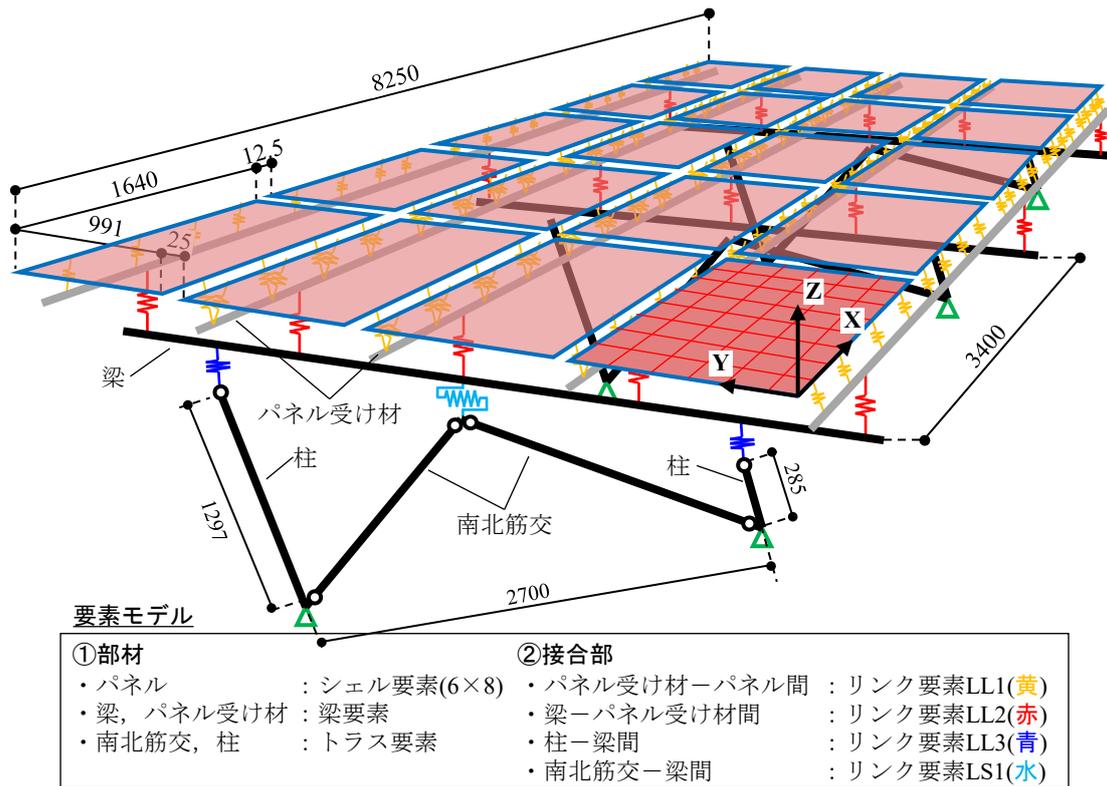


図 2-1 太陽電池パネル架台のフレーム解析モデル全体概要

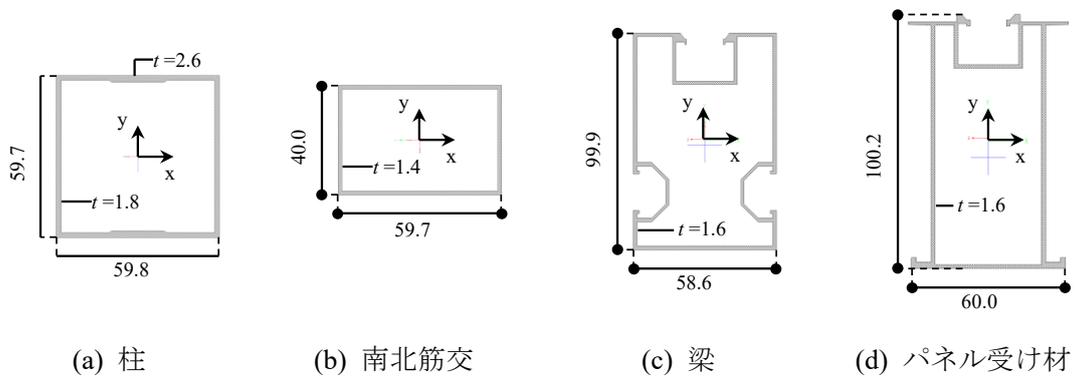


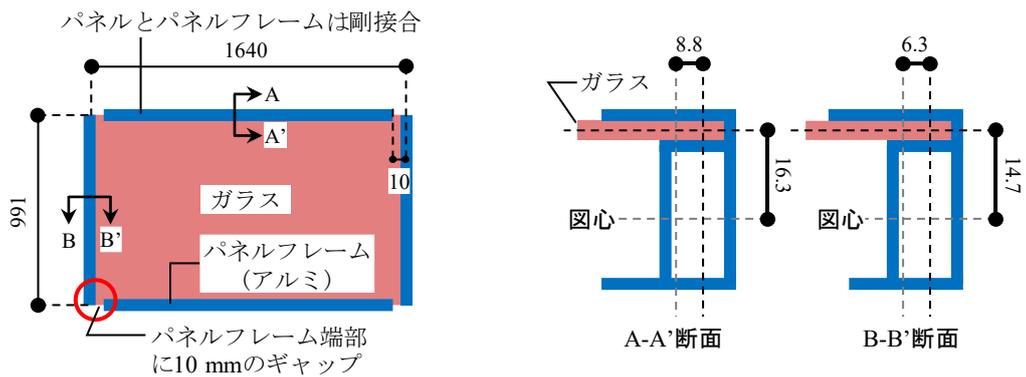
図 2-2 架構部材の断面形状

表 2-1 アルミニウム部材の材料諸元

部材名	ヤング係数 [N/mm ²]	降伏強度 [N/mm ²]
パネル	71,600	
パネルフレーム	70,000	240
パネル受け材	52,300	238
梁	58,500	266
柱	57,200	271
東西筋交	35,200	208

(2) 太陽電池パネルのモデル化

太陽電池パネルは、一般的に周囲をアルミ製のパネルフレームで補強されている。数値解析モデルでは、太陽電池パネルをガラス ($E=71600 \text{ N/mm}^2$) の薄板としてシェル要素でモデル化し、その周囲にアルミ材のフレーム ($E=70000 \text{ N/mm}^2$) を固定した。ここでは、文献 1,2) で使用した太陽電池パネルに従い、長辺と短辺方向のパネルフレームは接合せず、間に隙間を設けた。



(a) 太陽電池パネルのパネルフレーム

(b) パネルフレームの断面

図 2-3 太陽電池パネルのモデル化

(3) 支持条件および部材間接合のモデル化

図 2-4 に、東西および南北構面に配した部材間接合部のモデル化を示す。表 2-2 に、架構の支持条件を、表 2-3 に、架構の支持条件および部材間接合部のモデル化で用いたリンク要素についてまとめる。

① 架構支持条件（柱および南北筋交の柱脚）（表 2-2）

先述した通り、南北構面を構成する柱および南北筋交は端部の回転を許容した接合を行っていることから、6 箇所ある柱と南北筋交の接合部である柱脚はピン支持とした。

② パネルフレームーパネル受け材（表 2-3）

表 2-3 に示すように、太陽電池パネルは、押え金具にパネルフレームをひっかけることでパネル受け材に固定されている。そこで、リンク要素を用いてパネル押え金具の水平移動および捻じれ回転を固定した。

③ パネル受け材ー梁間接合部

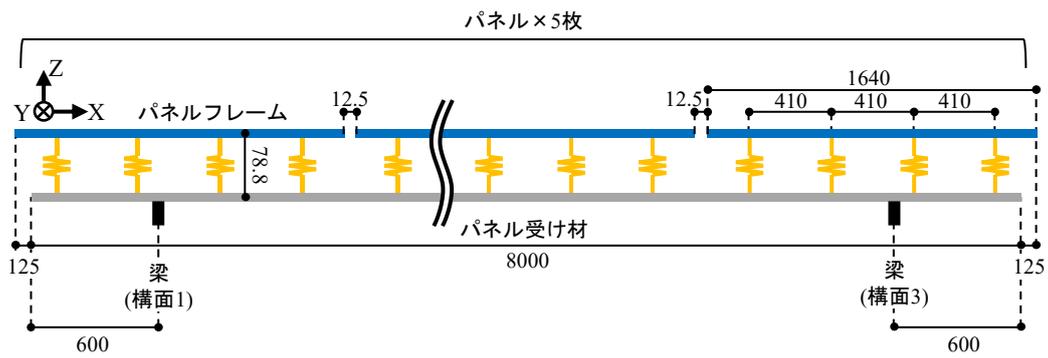
表 2-3 に示すように、パネル受け材は、押え金具を介して梁に固定されている。そこで、②パネルフレームーパネル受け材と同様に、リンク要素を用いて梁上辺の溝の方向（全体座標：Y 軸方向）の滑りおよび全ての軸に関する回転を許容した。

④ 梁ー柱間接合部

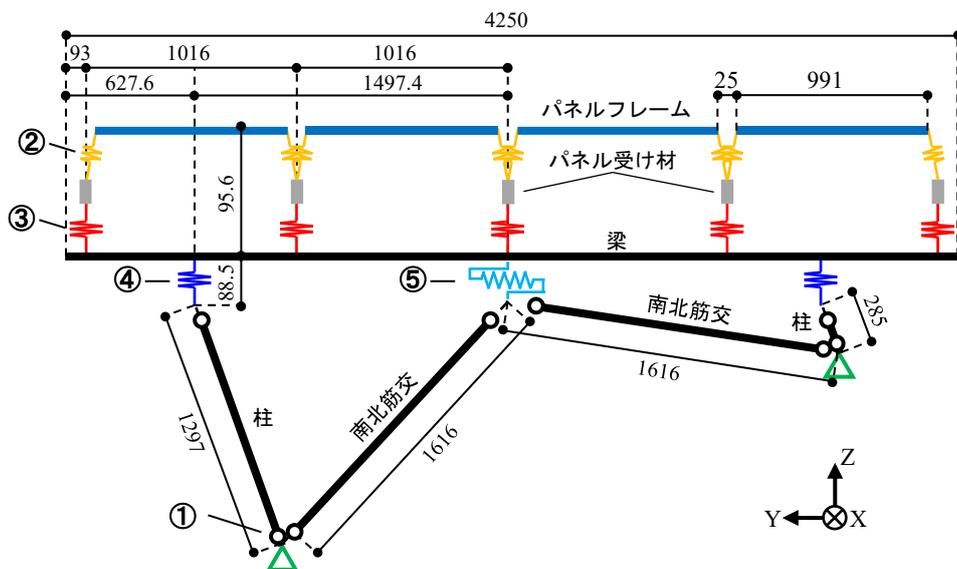
表 2-3 に示すように、柱端部は回転を許容する接合となっているが、接合金具を介して傾斜した梁に接合されるため、柱接合部と梁の図心までの距離に応じて梁に回転力が作用する。そこで、剛なリンク要素を用いて応力作用間距離を考慮した。

⑤ 南北筋交ー梁間接合部

④梁ー柱間接合部と同様に、南北筋交と梁は、接合金具を介して接合される（表 2-3）。また、南側と北側に配した南北筋交の発生軸力の差により、接合金具が梁軸上を滑るという現象が試験で確認された。そのため、④と同様に応力作用間距離を考慮するための剛なリンク要素を用い、梁の部材軸方向には一定荷重以上のせん断力がリンクに作用するとせん断変形（滑り）を発生するようにモデル化した。なお、表 2-3 に示したリンクのせん断力ーせん断滑り変位関係は、実験で得た接合部への作用力とずれ変位に合うように試行錯誤的に定めたものである。



(a) 架構モデルの東西構面



(b) 架構モデルの南北構面

図 2-4 太陽電池パネル架台のフレーム解析モデルの東西構面・南北構面

表 2-2 解析モデル 1: 架構支持条件

	接合部詳細	支持モデル	支持条件
①柱脚接合部			x Fixed
			y Fixed
			z Fixed
			θ_x Free
			θ_y Free
			θ_z Fixed

表 2-3 解析モデル 2: リンク要素による接合部のモデル化

	接合部詳細	接合モデル	固定条件												
② パネルフレーム-パネル間 (LL1)			<table border="1"> <tr><td>x</td><td>Fixed</td></tr> <tr><td>y</td><td>Fixed</td></tr> <tr><td>z</td><td>Fixed</td></tr> <tr><td>θ_x</td><td>Fixed</td></tr> <tr><td>θ_y</td><td>Free</td></tr> <tr><td>θ_z</td><td>Free</td></tr> </table>	x	Fixed	y	Fixed	z	Fixed	θ_x	Fixed	θ_y	Free	θ_z	Free
x	Fixed														
y	Fixed														
z	Fixed														
θ_x	Fixed														
θ_y	Free														
θ_z	Free														
③ パネル受け材-梁間 (LL2)			<table border="1"> <tr><td>x</td><td>Fixed</td></tr> <tr><td>y</td><td>Fixed</td></tr> <tr><td>z</td><td>Free</td></tr> <tr><td>θ_x</td><td>Free</td></tr> <tr><td>θ_y</td><td>Free</td></tr> <tr><td>θ_z</td><td>Free</td></tr> </table> <p>レール上滑り・回転考慮</p>	x	Fixed	y	Fixed	z	Free	θ_x	Free	θ_y	Free	θ_z	Free
x	Fixed														
y	Fixed														
z	Free														
θ_x	Free														
θ_y	Free														
θ_z	Free														
④ 柱-梁間 (LL3)			<table border="1"> <tr><td>x</td><td>Fixed</td></tr> <tr><td>y</td><td>Fixed</td></tr> <tr><td>z</td><td>Fixed</td></tr> <tr><td>θ_x</td><td>Fixed</td></tr> <tr><td>θ_y</td><td>Fixed</td></tr> <tr><td>θ_z</td><td>Fixed</td></tr> </table> <p>相対変形無</p>	x	Fixed	y	Fixed	z	Fixed	θ_x	Fixed	θ_y	Fixed	θ_z	Fixed
x	Fixed														
y	Fixed														
z	Fixed														
θ_x	Fixed														
θ_y	Fixed														
θ_z	Fixed														
⑤ 南北筋交-梁間 (LS1)			<table border="1"> <tr><td>x</td><td>Fixed</td></tr> <tr><td>y</td><td>Fixed</td></tr> <tr><td>z</td><td>※</td></tr> <tr><td>θ_x</td><td>Fixed</td></tr> <tr><td>θ_y</td><td>Fixed</td></tr> <tr><td>θ_z</td><td>Fixed</td></tr> </table> <p>せん断滑りのみ考慮</p>	x	Fixed	y	Fixed	z	※	θ_x	Fixed	θ_y	Fixed	θ_z	Fixed
x	Fixed														
y	Fixed														
z	※														
θ_x	Fixed														
θ_y	Fixed														
θ_z	Fixed														
⑤ 南北筋交-梁間 (LS1)	<p>(※) z 軸方向のせん断力-滑り変位関係 (接合金具の滑りを考慮)</p>														

3. 数値解析結果と耐風圧試験結果との比較

2章に記述した解析モデル・条件を用いた解析結果と、文献1,2)の太陽光発電用架台の耐風性能試験の試験結果との比較を行う。耐風圧試験では、架台周囲を圧力壁で囲って太陽電池パネル面を上面とする閉塞空間（圧力箱）を設けて圧力箱内部の圧力を上げることで、太陽電池パネルが浮き上がる方向の風荷重（負圧）に相当する太陽電池パネル面に法線方向の圧力を作用させた。数値解析では、図2-1に示すようにX-Y平面に平行に設けた太陽電池パネルを模したシェル要素にZ軸方向圧力を作用させた。

図3-1に、筋交を有する南北構面の応力分布（①軸力（柱・南北筋交）、②軸力（梁）、③せん断力（梁）および④曲げモーメント（梁））を、試験と解析結果を比較して示す。ここで、試験結果の応力分布は、柱、南北筋交、梁に貼付した歪ゲージの計測値に、材料試験で得たヤング係数（表2-1）および断面形状（図2-2）を乗じて算出した。図3-1より、概ね試験結果の傾向をよく捉えているといえる。しかし、梁に対する角度が小さくなる南北筋交いの南側の筋交の軸力および梁に発生する軸力で大きな誤差が生じた。筋交軸力における差は部材の角度に実際とは誤差が発生したなどの可能性が考えられる。太陽電池パネルを固定する勾配を持った部材に近い角度を有する部材については、応力解析において誤差が生じやすい可能性が示された。一方、梁の軸力については、梁の降伏軸力の1%にも満たない発生軸力のため、計測精度による誤差の範囲と考えられる。

図3-2に、パネル付きパネル受け材の曲げモーメント分布を示す。パネル面に面圧が作用すると、太陽電池パネルが固定されたパネル受け材は、パネル受け材単体の曲げモーメント M_{pr} の他、パネル受け材とパネルフレームがペアとなった偶力モーメント M_c が発生する。そこで、図3-2(a)にパネル受け材の曲げモーメント M_{pr} 、(b)パネルとパネル受け材に発生する軸力による偶力 M_c 、(c)に(a)(b)の合計として算出したパネル付きパネル受け材の曲げモーメント分布を示す。

図3-2(a)の黒プロットは、パネル受け材で計測した歪ゲージ計測値より推定したパネル受け材曲げモーメントである。図3-2(a)より、パネル受け材曲げモーメント M_{pr} の解析結果（ピンクプロット）は試験結果（黒プロット）とよく対応した。

図3-2(b)に、偶力モーメント分布 M_c の数値解析結果を示す。なお、数値解析においてパネル受け材とパネルフレームがペアとなった偶力モーメント M_c は、図3-3(a)に示すようにパネル面とパネル受け材に発生する軸力は大きさが同じで逆方向に作用するとし、パネル受け材の発生軸力にパネルとパネル受け材の図心間距離を乗じることで求めた。図3-2(b)より、偶力モーメントは固定金具間で発生し、固定金具より外側（パネル端部側）では発生しないことが分かる。

図3-2(c)に、パネル付きパネル受け材合成部材の曲げモーメント分布（ $M_{pr}+M_c$ ）の数値解析結果を示す。図には試験結果から推定したパネル付きパネル受け材合成部材の曲げモーメント分布も示す。ここで、試験における合成部材の曲げモーメント分布は、図3-3(b)に示すように各パネル受け材が固定されている梁からの反力の合計値（つまり各パネル受け

材が負担する負圧抵抗力) がパネル受け材に等分布すると仮定し曲げモーメント分布を推定した (図 3-2 右黒破線)。パネル受け材 1 以外は良く対応した。

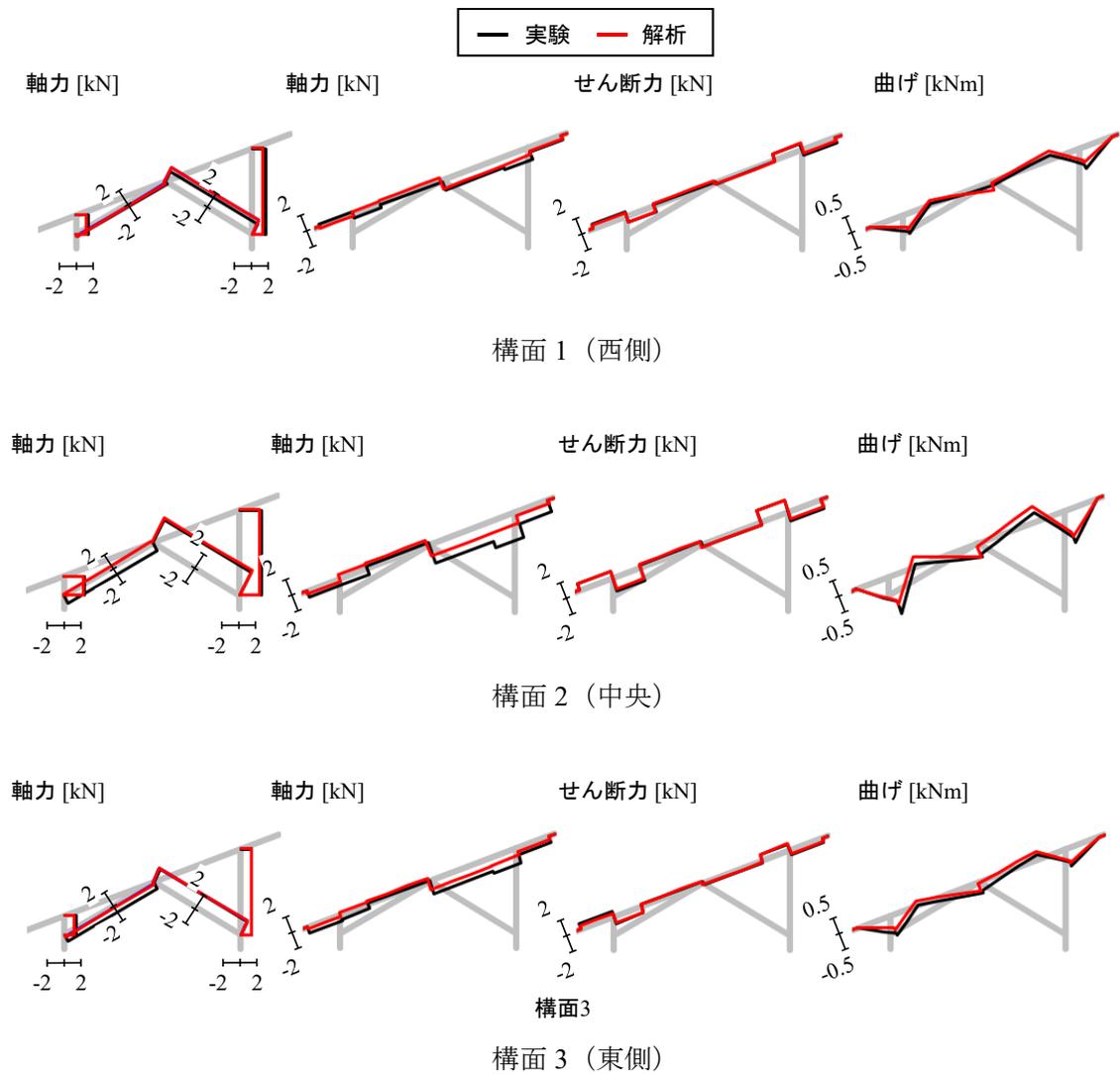


図 3-1 試験結果と解析結果の比較：南北構面架構応力分布 (500 Pa 時)

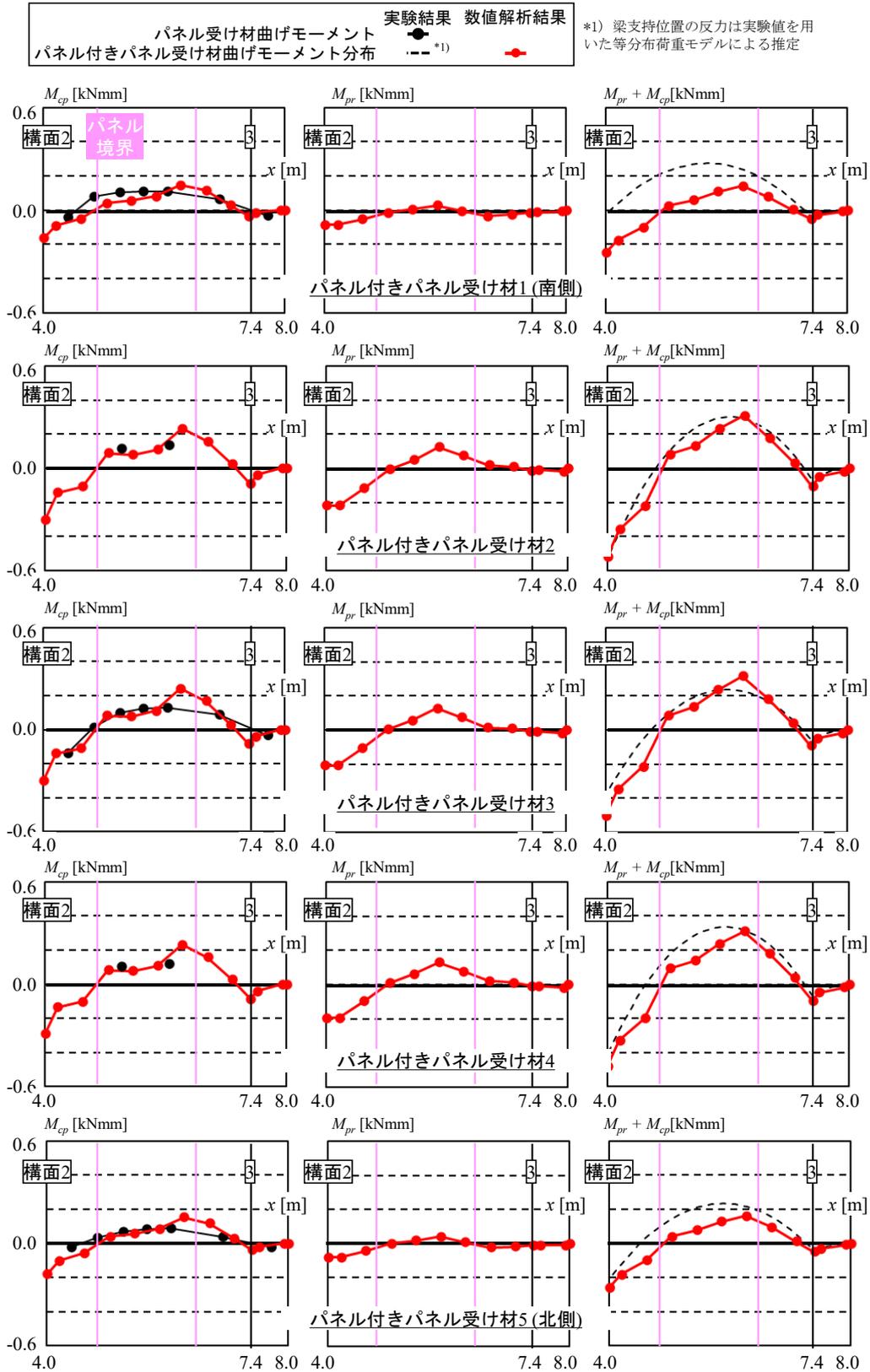
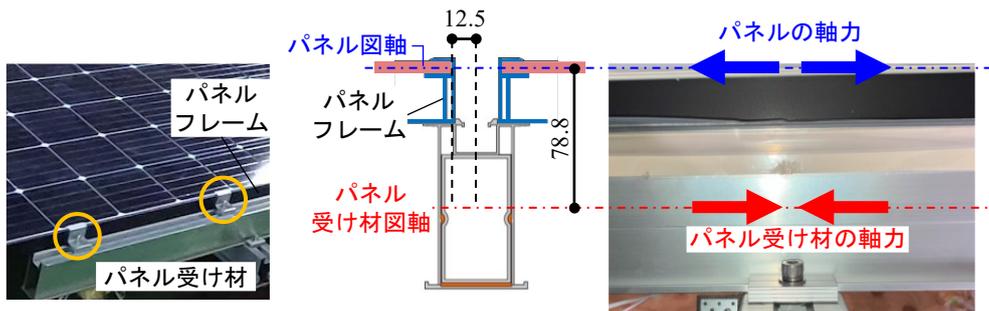
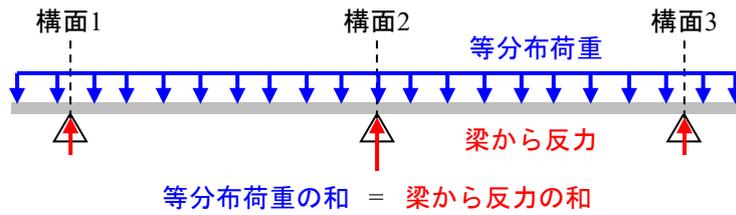


図 3-2 試験結果と解析結果の比較：パネル付きパネル受け材曲げモーメント分布



(a) パネルーパネル受け材偶力の算定



(b) 等分布荷重によるパネル付きパネル受け材合成部材の曲げモーメント分布の推定

図 3-3 パネル付きパネル受け材合成部材の曲げモーメント分布の推定

4. 解析モデルの検討 ～解析モデルの簡易化～

(1) 南北筋交－梁間の接合部考慮と非考慮の比較

数値解析モデルにおいて、南北筋交と梁間の接合金具や梁せいの考慮の有無の架構発生応力への影響を検討する。図 4-1 に、解析モデルを示す。接合金具や梁せいを考慮しない場合は、梁の図心で柱や南北筋交と接合するモデルとなる。

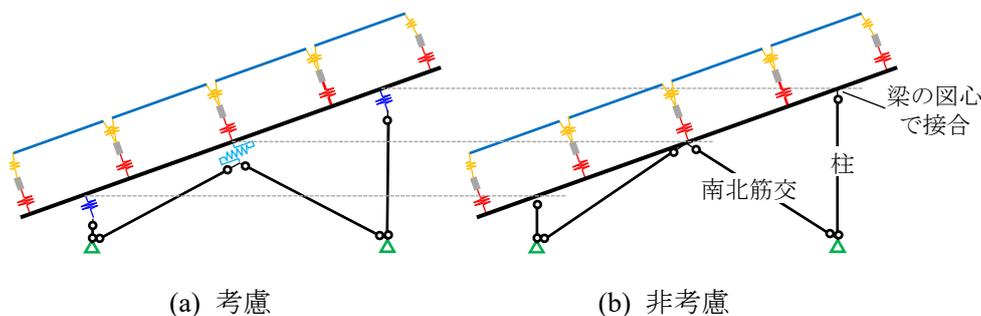
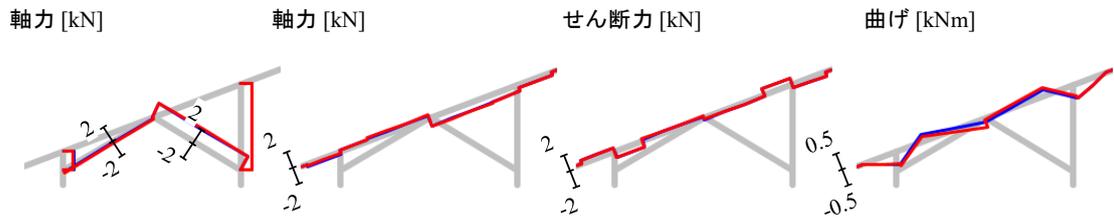


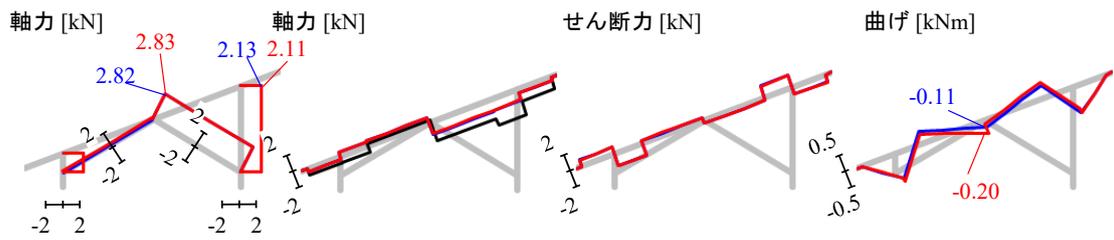
図 4-1 南北筋交－梁間接合部の考慮・非考慮モデル

図 4-2 に、南北筋交と梁間の接合金具や梁せいの考慮有無での架構応力分布の違いを比較する。柱や南北筋交および梁せん断力で顕著な違いは生じなかった。また、梁に発生する最大曲げモーメントについても、架構モデルの違いの影響は小さい。一方で、梁と南北筋交の接合部において、梁に発生する曲げモーメントに 2 倍の差が生じた。表 2-3⑤に示すように、南北筋交の軸心が梁に対して偏心していることから、実際には集中曲げモーメントが梁に作用する。一方で、図 4-1(b)に示す非考慮モデルでは、この偏心を完全に無視した状態となるため、梁と南北筋交間接合部に発生する曲げモーメントは小さく留まる。なお、表 2-3⑤に示す梁と南北筋交を接合する接合金具を梁に固定している 2 本の M8 ボルトの距離は 74 mm であることから、500 Pa 時点で約 3 kN の支圧がボルトに作用していることになる。

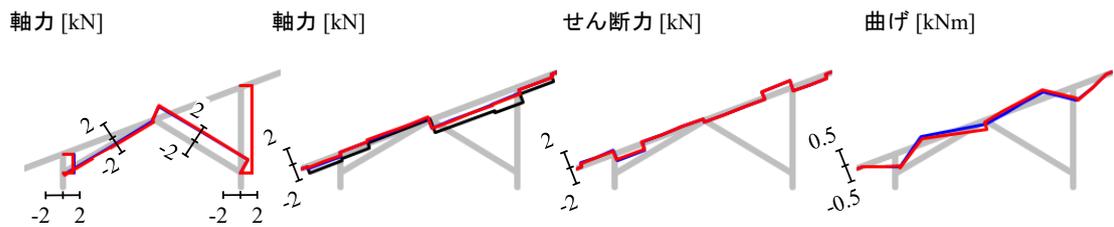
以上から、接合部や部材せいを無視した架構モデルにおいて、部材に発生する最大応力については影響がほぼ見られなかったが、接合部への作用力の推定においては特に注意を要すると言える。なお、本数値解析モデルでは、柱脚における柱と南北筋交接合部が同一軸でピン接合されていないことは無視してモデル化している。こちらも柱脚接合部には集中曲げモーメントが作用することになるため、接合部設計では注意を要する。



構面 1 (西側)



構面 2 (中央)



構面 3 (東側)

図 4-2 南北筋交一梁間接合部の考慮・非考慮の架構応力分布への影響 (500 Pa 時)

(2) 3D 解析と 2D 解析の比較

太陽電池パネル架台の応力解析では、一般的に東西構面と南北方向に傾斜した部材を支持する南北構面に対してそれぞれ別々に 2 次元フレームモデルを構築し、節点に集中荷重が作用するものとして解析する。一方で、実際には太陽電池パネル架台では、風圧はパネル面に圧力として作用する（図 4-3(a)）。ここでは、太陽電池パネルをモデル化せず、パネル受け材 1~5 にそれぞれの有効幅を考慮した 1:2:2:2:1 の比となる等分布荷重を作用させた場合（図 4-3(b)）の架構に発生する応力分布を求め、パネルを考慮しない場合の結果と比較する。

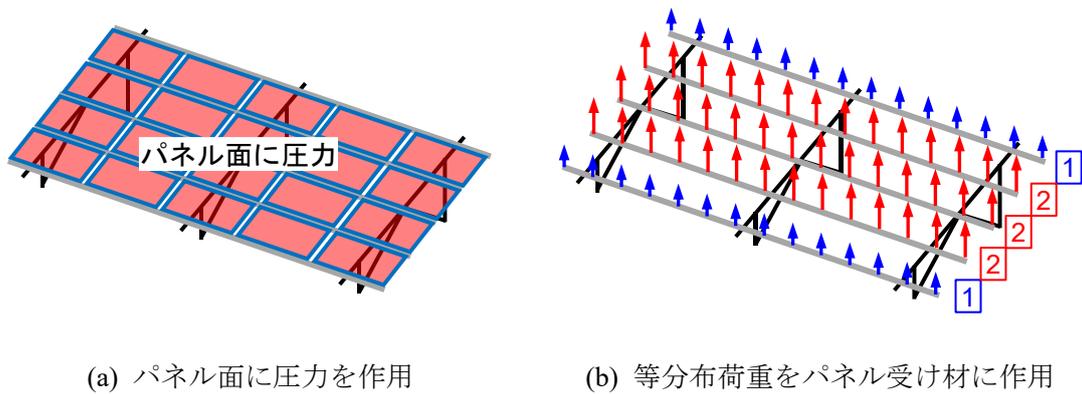
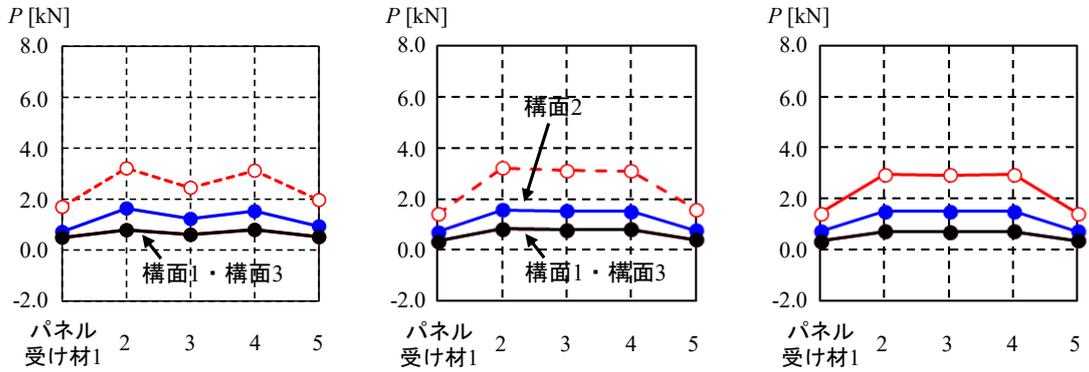


図 4-3 加力方法（パネル有無）の比較

まず、図 4-4 に東西部材であるパネル受け材の各 3 点ある梁支持反力分布を、文献 1,2) の実験結果、数値解析については図 4-3(a)に示すパネル面に圧力を作用させた場合と図 4-3(b)に示すパネル受け材に等分布荷重を作用させた場合について示す。図 4-4 より、いずれも傾向は等しく、両端の構面 1,3 と中央の構面 2 はおおよそ 1:2 の大きさとなり、かつ各構面におけるパネル受け材 1~5 の梁からの支点反力は 1:2:2:2:1 となった。したがって、東西部材（パネル受け材）から南北架構（梁と支持部材）に作用する荷重は、図 4-4 (b)でも十分に再現できると言える。

図 4-5 に架構応力分布、図 4-6 にパネル付きパネル受け材の曲げモーメント分布の違いを加力方法で比較する。図より、パネルをモデル化せず、図 4-6 (b)に示すようにパネル受け材に有効面積分の等分布荷重を作用させる方法でも、十分にパネル付きパネル受け材の曲げモーメント分布が再現できると言える。



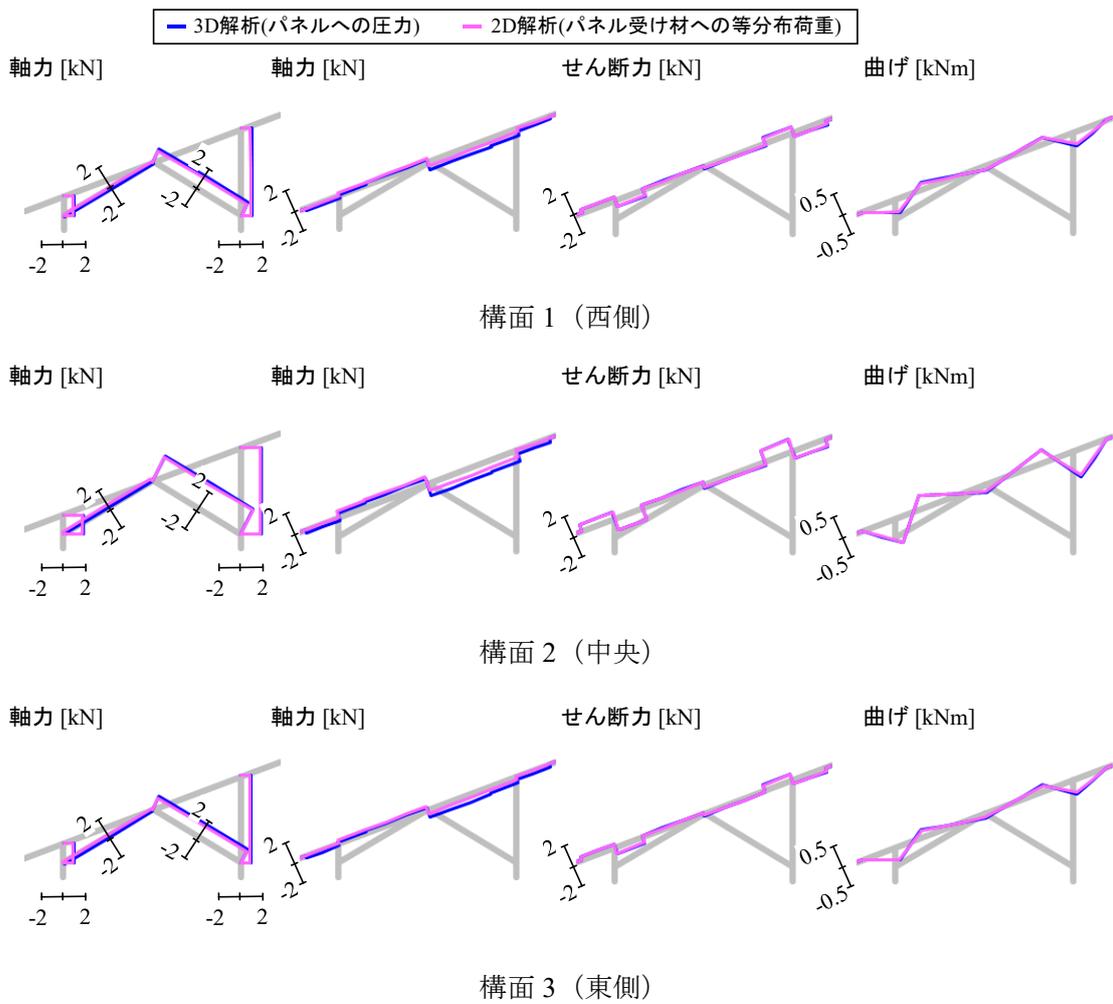
(a) 実験結果

パネル面圧力

パネル無し分布荷重

(b) 数値解析

図 4-4 加力方法（パネル有無）のパネル受け材の梁支持反力分布への影響

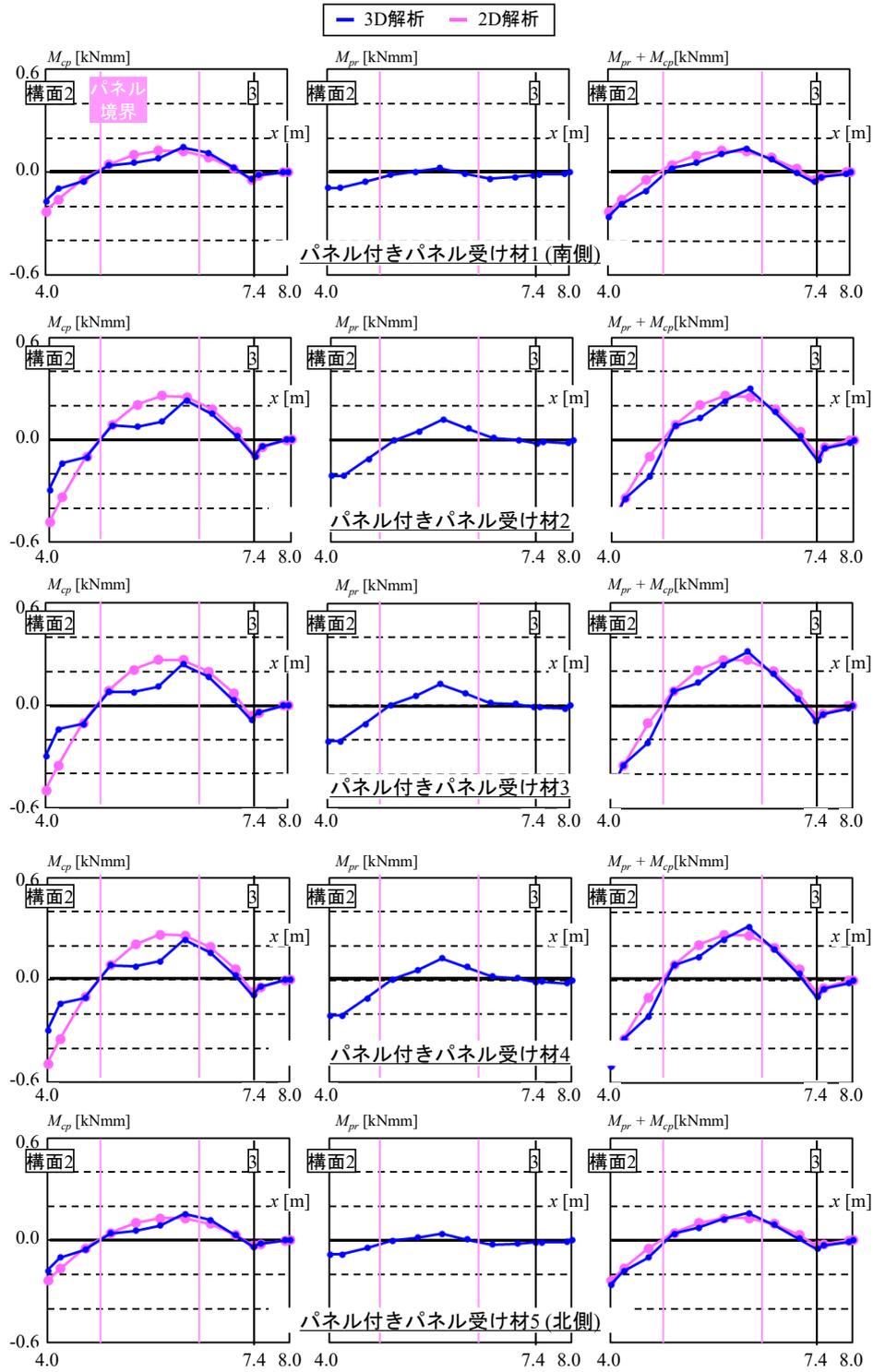


構面 1 (西側)

構面 2 (中央)

構面 3 (東側)

図 4-5 加力方法（パネル有無）の架構応力分布への影響（500 Pa 時）



(a) パネル受け材曲げモーメント (b) パネルーパネル受け材偶力 (c) 合計

図 4-6 加力方法（パネル有無）のパネル付きパネル受け材曲げモーメント分布への影響（500 Pa 時）

5. 設計時の留意点

本技術文書では、実際のアルミ製太陽電池パネル架台の耐風圧実験により得た架構の応力分布の数値解析による再現性を検討した。以下に主な知見をあげる。

- (1) 太陽電池パネルをシェル要素、曲げモーメントが発生する部材を梁要素、軸力部材をトラス要素でモデル化し、各接合部については、接合方法を簡易的にモデル化したリンク要素を設けることで、負圧（太陽電池パネル面法線方向上側の圧力）を受ける太陽電池パネル架台の応力分布を十分に再現できることが示された。
- (2) (1)のような接合部をも考慮した詳細なモデルを用いなくても、部材軸心で接合されるとした簡易的な架構モデルによって、架構を構成する部材に発生する応力は十分に推測可能である。一方で、接合部への作用力については、接合部における部材の偏心を考慮したモデル化をしない限り、危険側評価となるため注意を要する。
- (3) 太陽電池パネル架台の応力解析は、東西架構と南北架構について別々に2次元フレームモデルで用いて行うことが多い。今回対象とした太陽電池パネル架台に関しては、架構の安全性に影響を及ぼすような課題は見当たらなかった。

参考文献・注釈

- 1) 傾斜地設置型太陽光発電システムの設計・施工ガイドライン 2025年版 技術資料：太陽光発電システム用架台の耐風性能試験(一部杭基礎支持力が不足している場合)
- 2) 三上大輝、古川幸、奥地丈浩、高森浩治、谷口徹郎：基礎不良を考慮した太陽光発電用架台の耐風性能、日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿）B-1、構造 I、pp.155-156、2023年7月
- 3) SAP2000 Structural Analysis and Design Software version24.2.0, Computers and Structures, Inc.
- 4) セントラル硝子プロダクツ板ガラス総合カタログ参照
<https://www.catalabo.org/catalog/detail/82716670000?categoryID=83110000&ref=h> (2025/2/3)

この成果物は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務（JPNP20015）「太陽光発電主力電源化推進技術開発／太陽光発電の長期安定電源化技術開発」事業の結果として得られたものです。