
2.6 全体挙動調査

(1) 目的

牛深ハイヤ大橋は長大で特殊な断面形状の曲線橋のため、複雑な挙動をしていたと考えられ、2.5 に示したとおり、支圧板の損傷は繰り返し変動する作用力を受け、進行したと考えられる。繰り返し作用のうち、活荷重や風荷重による損傷に至るような変動作用は見られなかったことから、日々の変動作用の要因は温度変化であると考えられる。そこで、温度影響により、橋としてどういった動きをしているのか、どういった応答がでているのかといったことを、支承や支点、部材、径間毎での計測結果から、橋の全体挙動として整理して、その傾向を把握し、上部構造各部材での温度差の把握、支承拘束の確認、解析の妥当性確認、恒久対策への活用を行うことを目的とする。表 2.6-1 にローラーおよび支圧板の損傷の分布を示す。部材表面の異常やき裂の発生は全径間で確認されているが、ローラーおよび支圧板の破断は固定支承である P3 より終点側 (A2 側) で確認されており、終点側 (A2 側) は起点側 (A1 側) と比べて厳しい条件であると考えられる。よって、固定支承である P3 より終点側 (A2 側) に着目して調査を実施する。しかし、P5 (左) 支承、P6 (右) 支承、A2 (右) 支承は応急対策済みであり、損傷前と支承条件は同じではなく、計測される全体挙動は損傷前とは異なると考えられる。ただし、P4 支承部は応急対策を実施していないこと、応急対策を実施した支承より固定点側であることから、計測される挙動と損傷前の挙動の違いは相対的には小さいと考えられる。以降に全体挙動調査において実施する各調査の目的を記す。

1) 支承間距離計測：設計図書との整合確認

各調査を実施し結果整理するうえで、前提条件となる牛深ハイヤ大橋の上部構造について、設計図書通りの支承間距離となっているかを確認する。

2) 桁の部材温度調査：恒久対策への活用

恒久対策を検討する際の条件としての活用することを目的に、全体の温度変化および部材間温度差の計測を実施する。なお、天候の影響を受けることが想定されるため、一定期間、経時変化を測定する。

3) 支承移動量調査：支承拘束の確認

支承拘束の影響を確認するために実施する。左右支承それぞれの挙動を確認するために左右の支承で計測を実施する。温度変化に伴い変位が生じることが想定されるため、一定期間、経時変化を測定する。

4) 下部構造変位計測：支承拘束の確認

支承拘束の影響を確認するために実施する。温度変化に伴い変位が生じることが想定されるため、一定期間、経時変化を測定する。

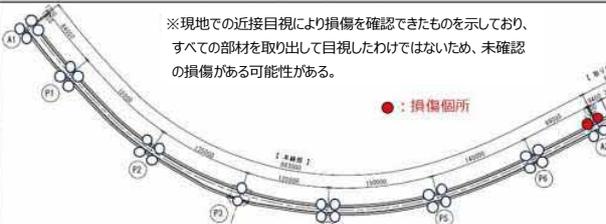
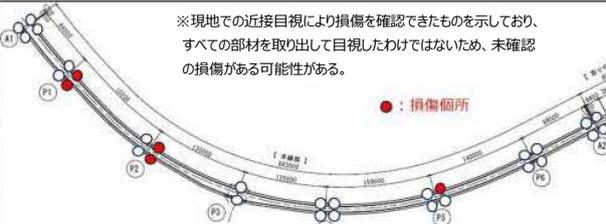
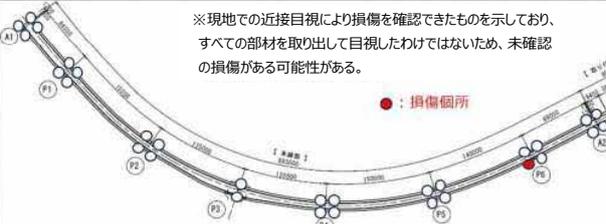
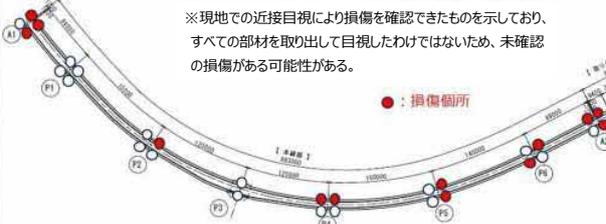
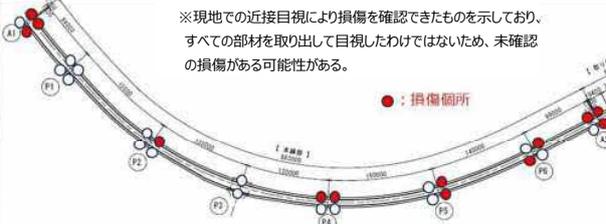
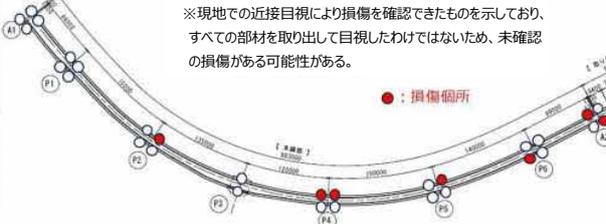
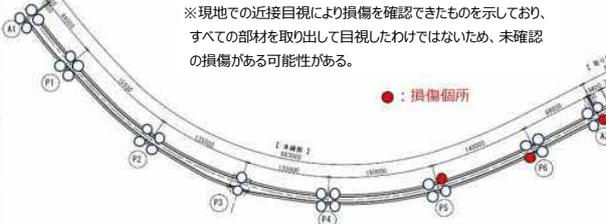
5) 桁伸縮量調査：温度変化に伴う桁の挙動の確認

温度変化に伴う桁の挙動を確認するために実施する。桁伸縮量は、一定期間、経時変化を測定する。また、数値解析におけるモデルの妥当性の確認にも使用する。

6) 支承反力調査：温度変化に伴う鉛直反力増減の確認

数値解析の結果、温度差により鉛直反力が生じることが確認されたため、実現象として温度変化に伴う反力変動を確認するために実施する。温度変化に伴い変位が生じることが想定されるため、一定期間、経時変化を測定する。

表 2.6-1 各損傷の分布

部材	損傷	左右	A1	P1	P2	P3	P4	P5	P6	A2	概要図			
			起終		起終									
ローラー	表面のかけ	左	-	-	-	-	-	-	-	-	○	○	 <p>※現地での近接目視により損傷を確認できたものを示しており、すべての部材を取り出して目視したわけではないため、未確認の損傷がある可能性がある。</p> <p>●：損傷箇所</p>	
		右	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		-
	ピニオン取付軸の破断	左	-	-	○	○	-	-	-	-	○	-	-	 <p>※現地での近接目視により損傷を確認できたものを示しており、すべての部材を取り出して目視したわけではないため、未確認の損傷がある可能性がある。</p> <p>●：損傷箇所</p>
		右	-	-	○	○	-	-	-	-	-	-	-	
	ローラー軸部の破断	左	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	 <p>※現地での近接目視により損傷を確認できたものを示しており、すべての部材を取り出して目視したわけではないため、未確認の損傷がある可能性がある。</p> <p>●：損傷箇所</p>
		右	-	-	-	-	-	-	-	-	○	-	-	
支圧板	表面の剥離	左	○	○	-	-	○	-	○	○	-	○	○	 <p>※現地での近接目視により損傷を確認できたものを示しており、すべての部材を取り出して目視したわけではないため、未確認の損傷がある可能性がある。</p> <p>●：損傷箇所</p>
		右	-	○	-	-	-	-	-	○	○	-	○	
	ローラー軸方向き裂	左	○	○	-	-	○	-	○	○	-	○	○	 <p>※現地での近接目視により損傷を確認できたものを示しており、すべての部材を取り出して目視したわけではないため、未確認の損傷がある可能性がある。</p> <p>●：損傷箇所</p>
		右	-	○	-	-	-	-	-	○	○	-	○	
	ローラー軸方向き裂と周辺破損・ローラー直角方向き裂	左	-	-	-	-	○	-	○	○	-	○	-	 <p>※現地での近接目視により損傷を確認できたものを示しており、すべての部材を取り出して目視したわけではないため、未確認の損傷がある可能性がある。</p> <p>●：損傷箇所</p>
		右	-	-	-	-	-	-	-	-	○	-	○	
破断	左	-	-	-	-	-	-	-	○	-	-	-	 <p>※現地での近接目視により損傷を確認できたものを示しており、すべての部材を取り出して目視したわけではないため、未確認の損傷がある可能性がある。</p> <p>●：損傷箇所</p>	
	右	-	-	-	-	-	-	-	-	○	-	○		

(2) 方法

1) 支承間距離計測

全下部構造を対象に、左右支承それぞれの座標を計測し、下部構造位置（下部構造中心位置）を算出し支間長の確認を行う。図 2.6-1 および図 2.6-2 に計測箇所と下部構造位置の設定を示し、図 2.6-3 に計測概要を示す。なお、他の調査で、温度変化に伴い支承に変位が生じるとともに下部構造にも変位が生じることを確認しているが、支承間距離計測調査では、高い精度は求めていないため、経時変化は考慮しない。

- ・計測実施日時：2023年2月27日 14時～17時、28日 10時～12時
 - ・天候：晴れ、14℃前後
 - ・対象範囲：A1 橋台、P1 橋脚、P2 橋脚、P3 橋脚、P4 橋脚、P5 橋脚、P6 橋脚、A2 橋台
- ※各位置の桁および下部構造の左右で実施。（32 か所）
- ・計測箇所：上部構造（支承取付構造部）左右、下部構造（支承サイドブロック）左右

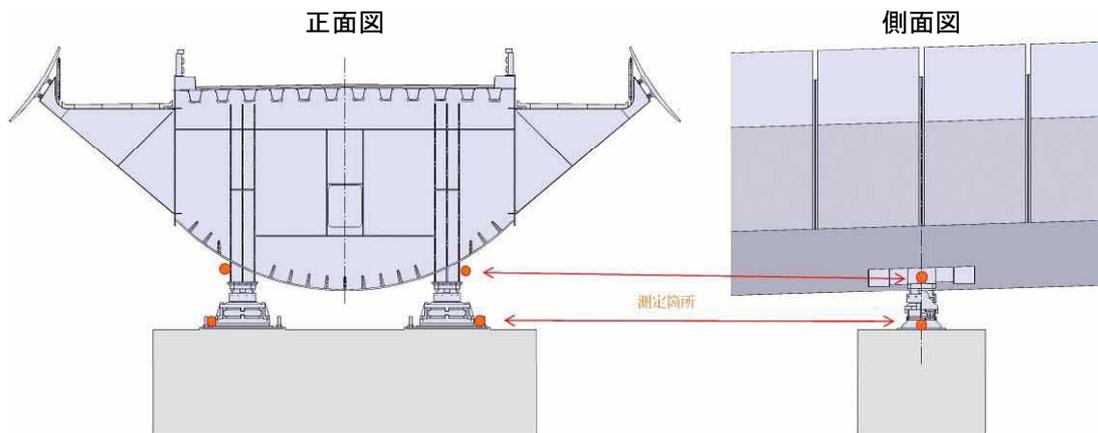
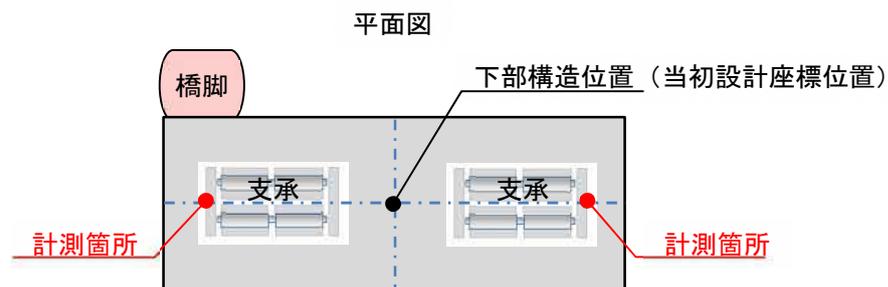


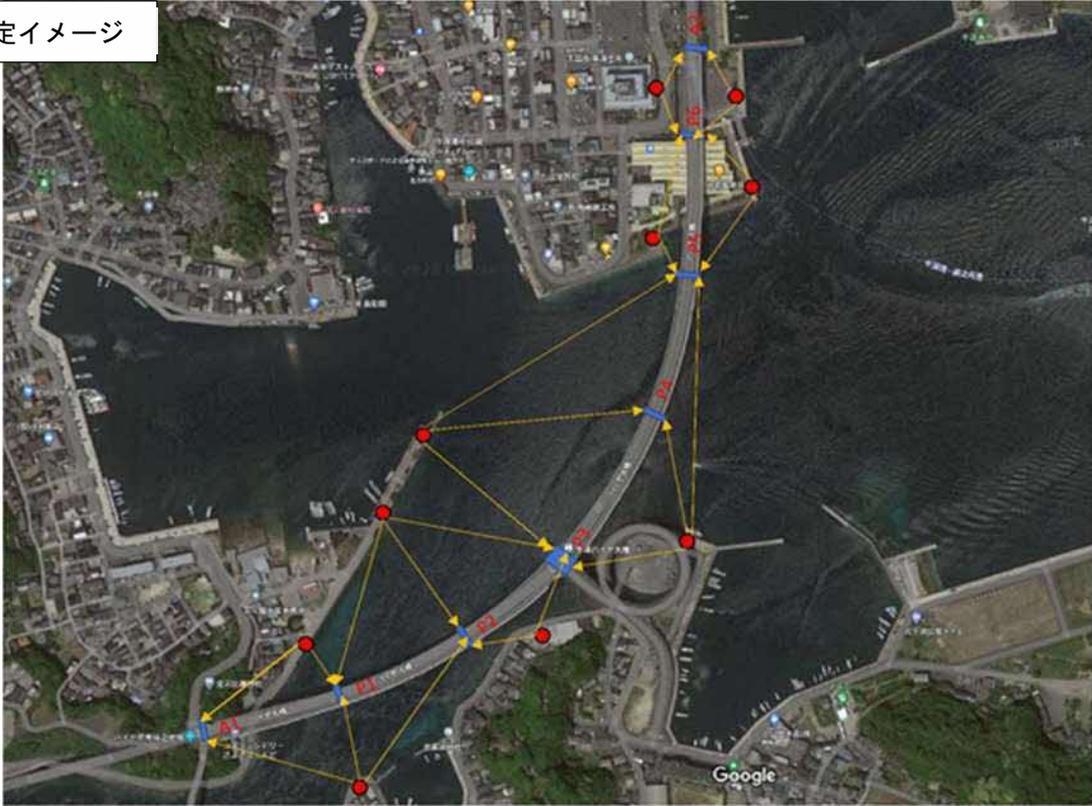
図 2.6-1 計測箇所



※左右支承で計測した座標値を結び、その中心位置を下部構造位置とする。

図 2.6-2 計測箇所と下部構造位置

測定イメージ



レーザー出力	クラス 1
測定距離	1.3~3500m
測距制度	0.8+1ppm*D
測角制度	0.5"
測定時間	0.9 秒以下
補正機能	±6°
最小表示	0.00001m
重量	6.8kg

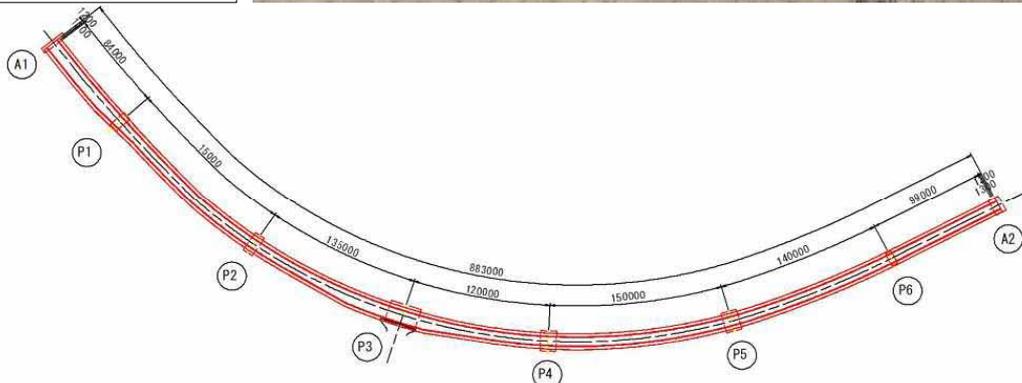
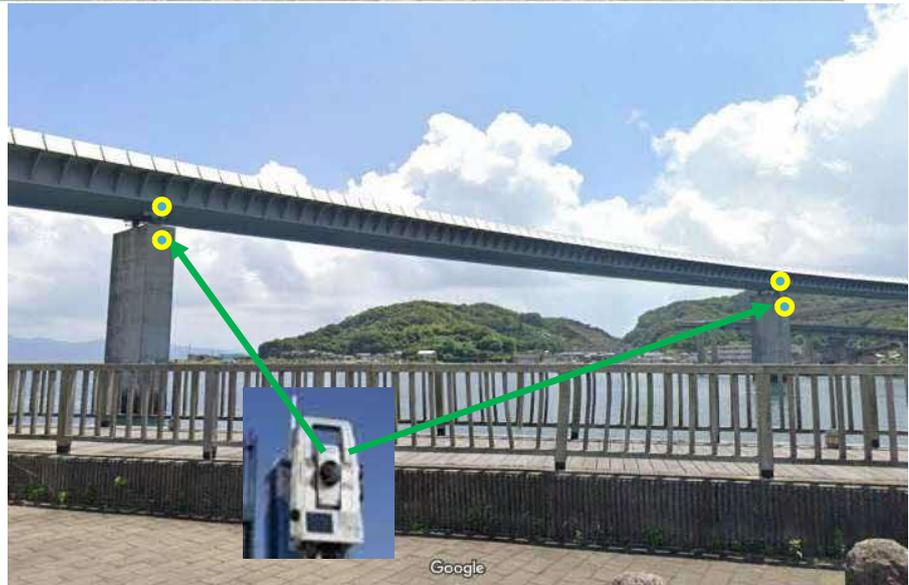


図 2.6-3 支承間距離計測概要

2) 桁の部材温度調査

箱桁の床版、下フランジ、左ウェブ、右ウェブの温度変化と部材間の温度差を確認するために、熱電対と赤外線計測機能付き UAV を使用した温度計測を実施した。図 2.6-4 に温度分布調査概要を示す。熱電対による温度計測は、P3 橋脚から A2 橋台の各径間で、支間中央の桁の温度（床版、下フランジ、左ウェブ、右ウェブ）を計測した。併せて、桁の左右の温度を面的に把握するために、P3 橋脚から A2 橋台を対象に赤外線計測機能付き UAV を使用し橋梁全体の温度分布の計測を行った。

熱電対による部材温度調査の概要を以下に示す。

- ・ 調査目的：温度変化と箱桁上下左右での差異の確認
- ・ 調査箇所：P3-A2 間の各径間の中央で箱桁断面の内側上下左右 4 面の各中央位置
- ・ 調査実施日：2022 年 6 月 13 日～30 日
- ・ 計測間隔：5 分（5 分毎に 1 回計測）
- ・ 使用機器：熱電対 17 台（支間中央部 4 断面×4 か所＋外気温用 1 か所）
- ・ 調査方法：箱桁内に設置した熱電対により計測

UAV による温度分布調査の概要を以下に示す。

- ・ 調査目的：桁の左右の温度を面的に把握
- ・ 調査箇所：P3～A2 間の各径間の左右
- ・ 調査実施日：2022 年 6 月 16 日
- ・ 計測間隔：2 時間（2 時間毎に 1 回計測）
- ・ 使用機器：赤外線計測機能付き UAV（赤外線サーモグラフィ H2640、測定精度：0.03℃）
- ・ 調査方法：赤外線計測機能付き UAV により左右ウェブの表面の温度を計測

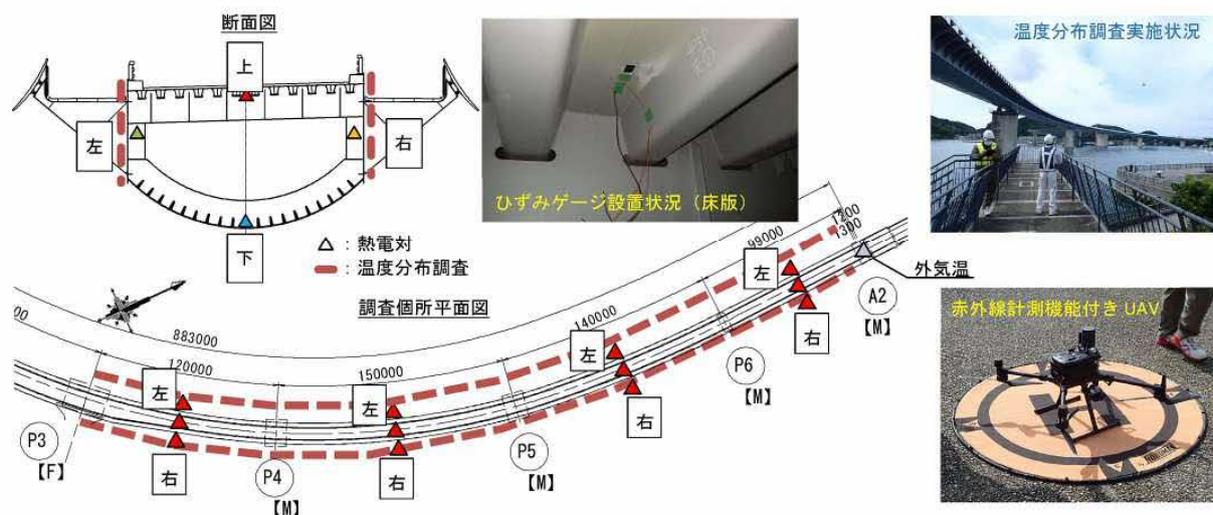


図 2.6-4 温度分布調査概要

3) 支承移動量調査

応急対策を実施した P3-A2 間の橋脚、橋台を対象に支承の温度変化に伴う支承移動量計測を行った。図 2.6-5 に支承変位の計測概要を示す。支承変位計測は、P3 橋脚から A2 橋台の各径間で、左右支承の橋軸方向と橋軸直角方向を計測した。

支承移動量調査の概要を以下に示す。

- ・調査目的：温度変化と支承移動量の関係および左右支承での差異を確認
- ・調査箇所：P3-A2 間（P4 橋脚、P5 橋脚、P6 橋脚、A2 橋台）
- ・調査実施日：2022 年 6 月 13 日～26 日
- ・計測間隔：5 分（5 分毎に 1 回計測）
- ・使用機器：変位計 16 台（下部構造 4 基×2 支承×2 方向）
 - ※ピボット支承である P3 橋脚を除く
- ・計測方法：下部構造側（支承ベースプレート）に固定し、上沓位置の橋軸方向および橋軸直角方向の水平変位を計測

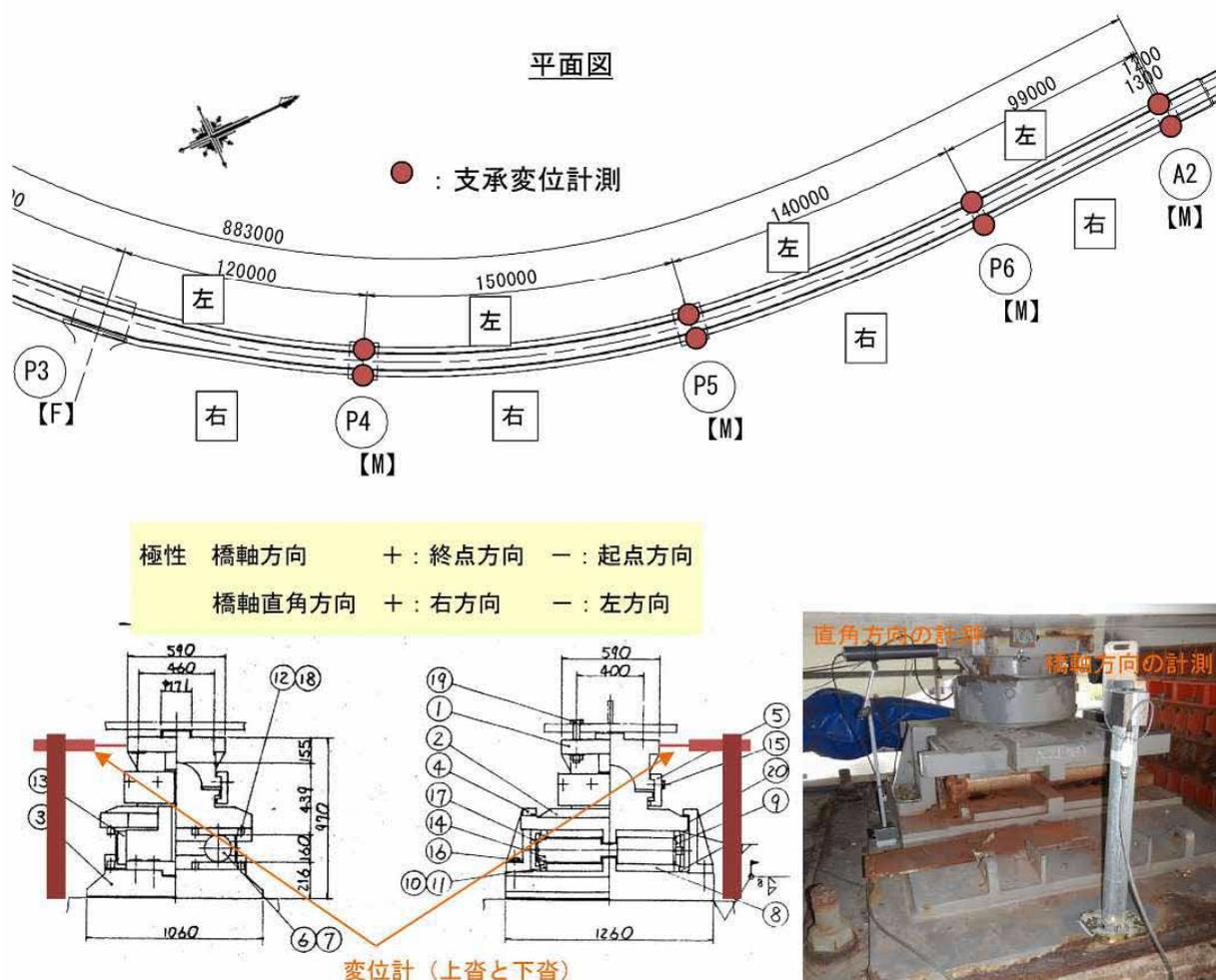


図 2.6-5 支承変位計測概要

4) 下部構造変位計測

可動支承の固定化により下部構造に不静定力が作用し水平変位が生じる可能性があるため、日中の温度変化に伴った下部構造天端の変位計測を実施した。図 2.6-6 に下部構造変位計測の調査状況を示す。対象は、応急対策を実施した P3-A2 間の橋脚・橋台とし、下部構造の軸方向と直角方向で計測した。

下部構造変位計測の概要を以下に示す。

- ・ 調査目的：桁伸縮による下部構造変位の把握
- ・ 調査箇所：P4 橋脚、P5 橋脚、P6 橋脚
- ・ 調査実施日：2022 年 6 月 16 日
- ・ 計測間隔：15 分（15 分毎に 1 回計測）
- ・ 使用機器：自動追尾式 TS（トータルステーション）
- ・ 計測方法：P3 橋脚、A2 橋台を基準点として、P4 橋脚、P5 橋脚、P6 橋脚に TS を設置し、P3 橋脚から A2 橋台の区間で放射トラバースを構成

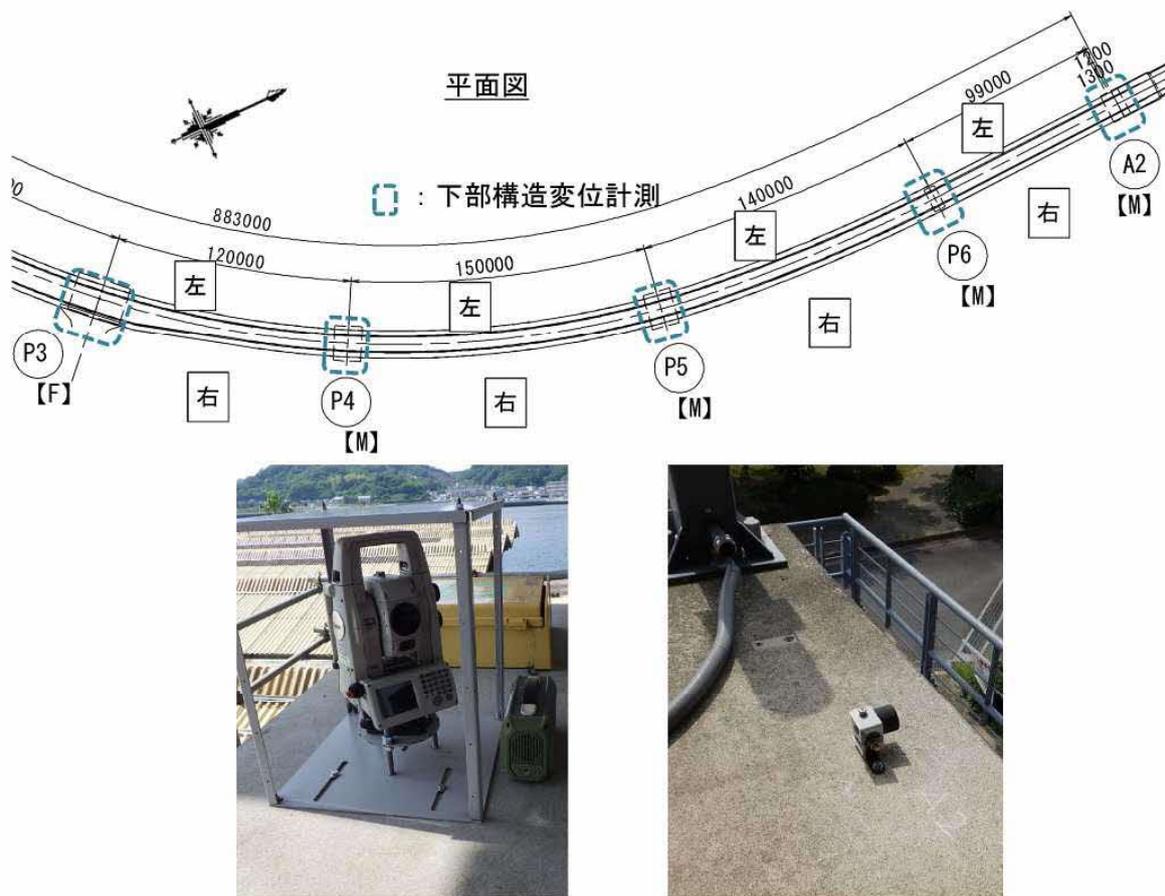


図 2.6-6 下部構造変位計測の調査状況

5) 桁伸縮量調査

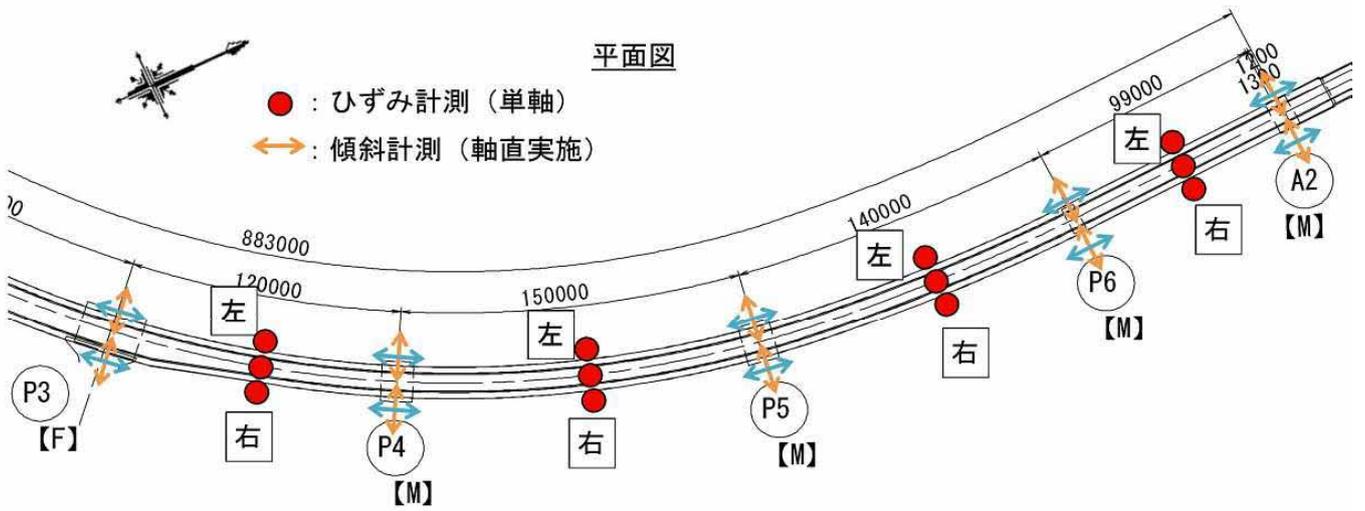
温度変化に伴う上部構造の挙動を確認するために、桁伸縮量と桁の傾斜の計測を行った。図 2.6-7 に桁伸縮量および傾斜計測概要を示す。桁伸縮量の計測は、常時における上部構造の伸縮量を把握するため、支間中央部に一軸ひずみゲージを設置し、桁の伸縮量（橋軸方向のひずみ）を計測した。傾斜は、各支承の上査もしくは支承取付構造に傾斜計（ピボット部）を設置し、桁側の橋軸・橋軸直角方向の傾斜を計測した。

桁伸縮量調査（ひずみ計測）の概要を以下に示す。

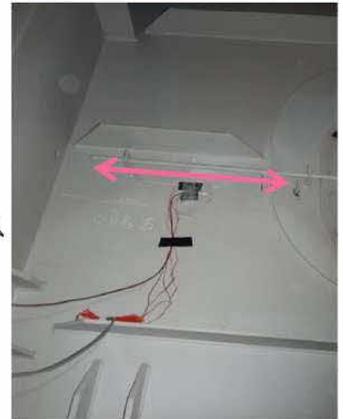
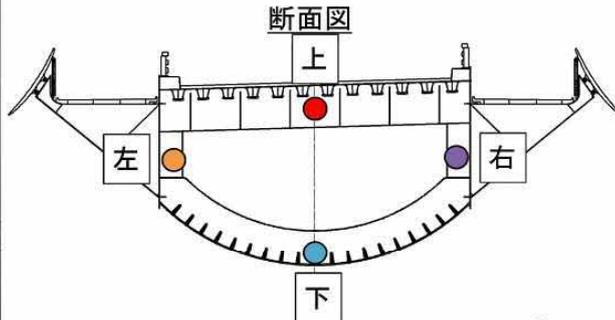
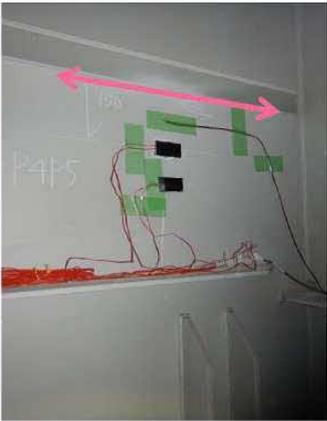
- ・調査目的：温度変化と桁伸縮量の関係および桁左右での差異を確認
- ・調査箇所：P3 から A2 の各径間の支間中央で実施（箱桁内部に設置）
- ・調査実施日：2022 年 6 月 13 日～26 日
- ・計測間隔：5 分（5 分毎に 1 回計測）
- ・使用機器：単軸型ひずみゲージ 16 台（支間中央部 4 断面×4 か所）
熱電対 17 台（ひずみゲージと同位置＋外気温用 1 か所）
- ・計測方法：橋軸方向の桁の伸縮を計測する目的で一軸ひずみゲージを箱桁断面の内側、上下左右 4 面の各中央位置に設置し常時計測

傾斜計測調査の概要を以下に示す。

- ・調査目的：温度変化と桁の傾斜の関係および桁左右での差異を確認する。
- ・調査箇所：P3-A2 径間（P3 橋脚、P4 橋脚、P5 橋脚、P6 橋脚、A2 橋台）
- ・調査実施日：2022 年 6 月 13 日～26 日
- ・計測間隔：5 分（5 分毎に 1 回計測）
- ・使用機器：2 軸傾斜計 10 台（下部構造 5 基×2 支承×1 か所）
- ・計測方法：傾斜計は、桁の傾斜を計測するため、上査もしくは、支承取付構造に設置、計測方向は各下部構造で橋軸方向および橋軸直角方向



ひずみ計測箇所



● : ひずみ計測 (単軸)

傾斜計測箇所

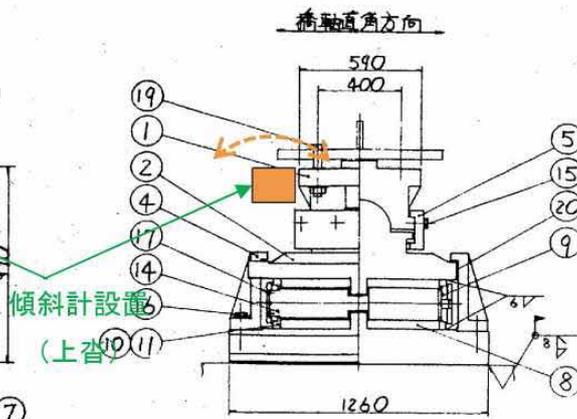
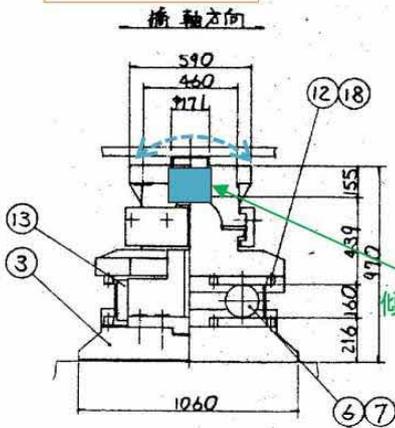


図 2.6-7 桁伸縮量 (橋軸方向ひずみ) および傾斜計測概要

6) 支承反力調査

P6 橋脚に反力計を設置し、1 日計測を実施した。図 2.6-8 に支承反力調査の実施箇所を示す。調査は P6 橋脚の左右支承で実施し、1 日の経時変化を計測した。

調査概要を以下に示す。

- ・ 調査目的：桁の温度伸縮により、想定以上の反力や左右支承での差異が発生していないかを確認
- ・ 調査箇所：P6 橋脚
- ・ 計測間隔：15 分（15 分毎に 1 回計測）
- ・ 調査実施日：2022 年 6 月 27 日～28 日
- ・ 使用機器：油圧ポンプ 4 台、温度計 1 か所

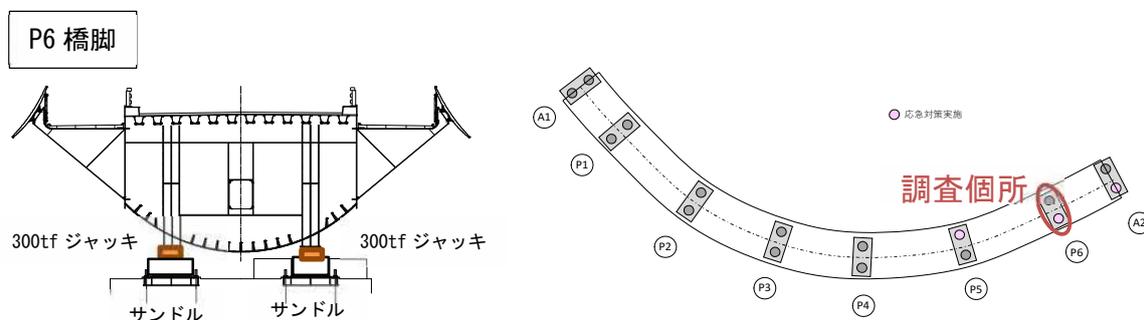


図 2.6-8 支承反力調査の実施箇所

(3) 結果

1) 支承間距離計測

表 2.6-2 に示すとおり、設計時の上部構造線形図に示される下部構造座標値より算出される支承間距離と下部構造測量より算出される支承間距離は、よく一致した。支承間距離の合計値は、既往図面と下部構造測量結果では 6mm の差となる。なお、2.6(2)1)の方法に記載したとおり、温度伸縮を考慮していないこと、温度変化に伴う下部構造変位は考慮しておらず、高い精度は不要としているため、参考として表 2.6-2 に施工管理基準値を記載するが、各径間の径間長の差は施工管理基準値以内となる。

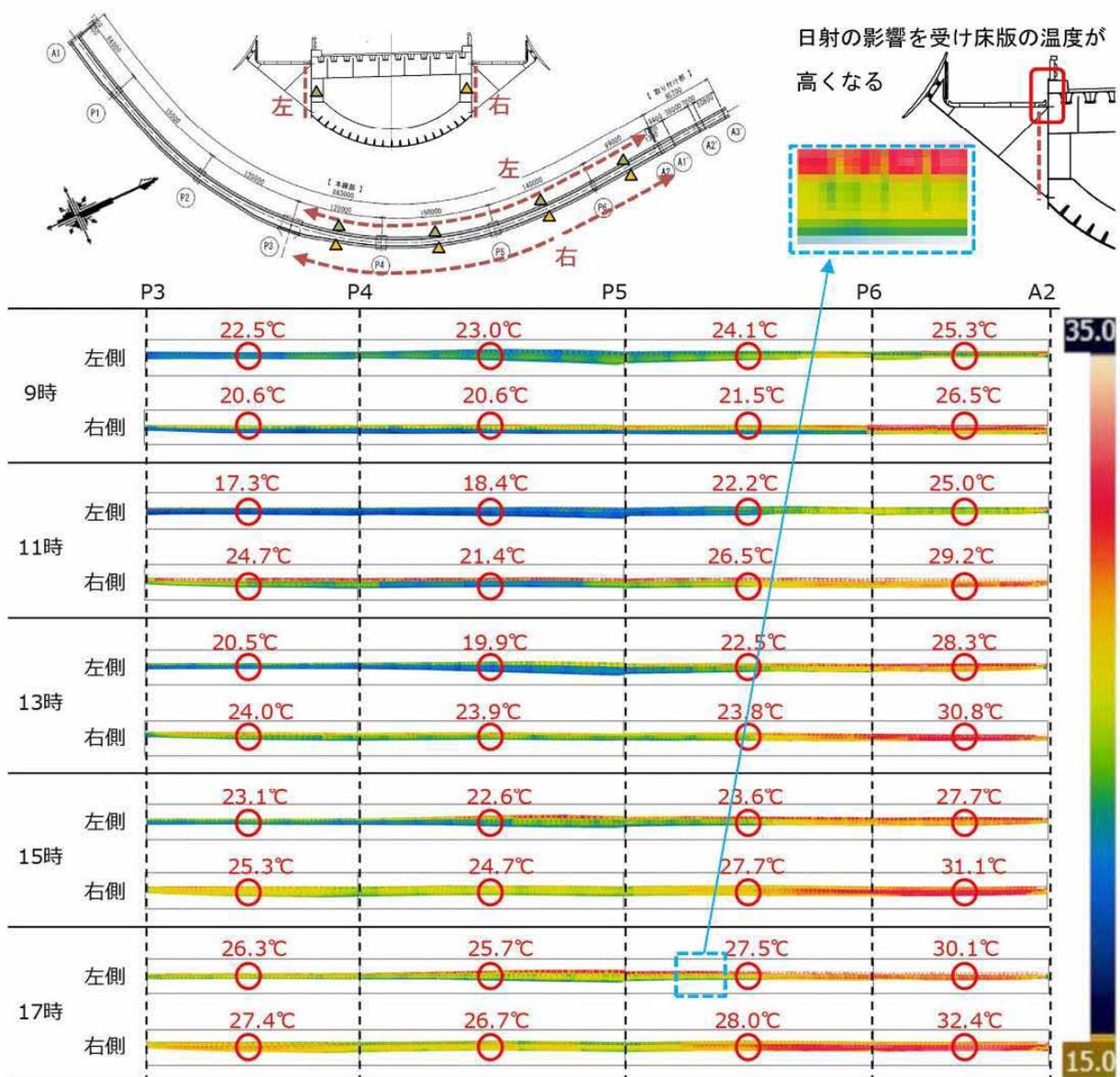
表 2.6-2 既往図面と測量結果（下部構造）の支承間距離

径間	①既往図面 (m)	②調査結果 (m)	差(②-①) (mm)	【参考】 施工管理 基準値 (mm)
A1 橋台-P1 橋脚	84.002	83.988	-14	±50
P1 橋脚-P2 橋脚	149.532	149.535	3	±50
P2 橋脚-P3 橋脚	134.748	134.746	-2	±50
P3 橋脚-P4 橋脚	119.868	119.842	-26	±50
P4 橋脚-P5 橋脚	149.340	149.379	39	±50
P5 橋脚-P6 橋脚	139.810	139.798	-12	±50
P6 橋脚-A2 橋台	99.002	99.008	6	±50
合計	876.302	876.296	-6	-

2) 桁の部材温度調査

a) 左右ウェブの温度分布

赤外線による左右ウェブの温度分布調査計測箇所結果を図 2.6-9 に示す。計測結果は、P3-A2 間の左右ウェブの 2022/6/16 の 2 時間毎 (9:00、11:00、13:00、15:00、17:00) のものである。図中に記載の温度は径間中央の桁の内側に設置した熱電対で計測した部材温度を示す。図 2.6-9 より、同時刻でも径間毎に左右ウェブに温度差が生じていることが確認でき、全体的な傾向としては、P6-A2 径間の温度が常に高いこと、P4-P5 径間は気温の上昇時に部材間で相対的に温度が低くなること、P3-P4 径間および P5-P6 径間は数値に多少の大小はあるが同程度であることを確認できる。また、ウェブの上下方向にも温度が分布し、日射による影響が大きい時刻 (右ウェブ 11:00、左ウェブ 15:00、17:00) で床版側のウェブ上部の温度上昇が確認される。以上より、日射の影響により、径間毎ならびに部材間の温度差が生じると考えられる。



○ : 径間中央の桁の内側に設置した熱電対で計測した部材温度

図 2.6-9 赤外線による温度分布調査結果

b) 部材毎の温度時刻歴変化

図 2.6-10 から図 2.6-13 に熱電対で計測した各部材の部材温度の時刻歴変化を示す。床版は他部材と比べて温度が高く、径間毎の温度に大きな差は確認できない。一方で、他の部材では径間毎に温度に差が生じており、下フランジや左右ウェブでは P6-A2 径間の温度が高い傾向が確認でき、同一部材においても径間毎の温度に差が生じる。また、左側ウェブでは 1 日の中で温度変化が大きい 6/15~19、22、27~30 の午後に P3-P4 径間、P4-P5 径間の温度が高くなるのが確認できる。これらが確認できる日は外気温の変化が大きい晴れの日であり、午後に日射の影響を受けていると考えられるため、径間毎に橋梁と太陽位置の関係に着目する。

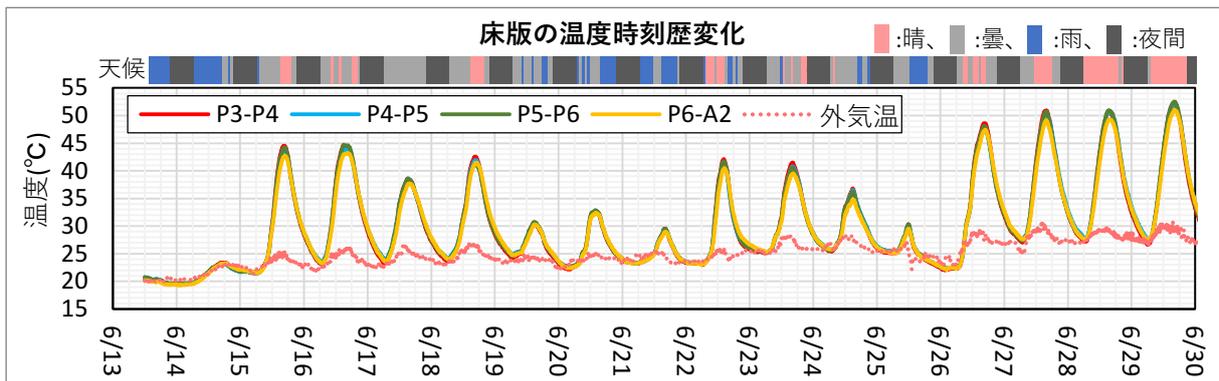


図 2.6-10 床版の部材温度の時刻歴変化 (期間 : 2022/6/13~30)

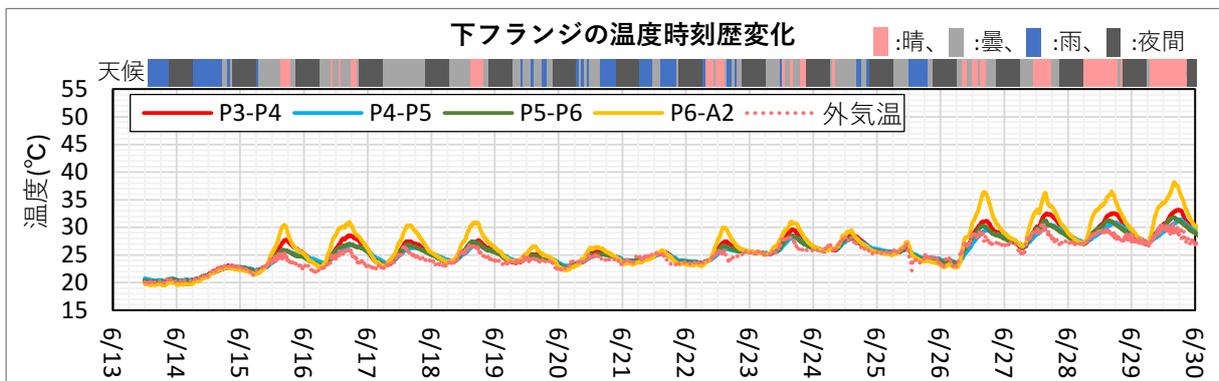


図 2.6-11 下フランジの部材温度の時刻歴変化 (期間 : 2022/6/13~30)

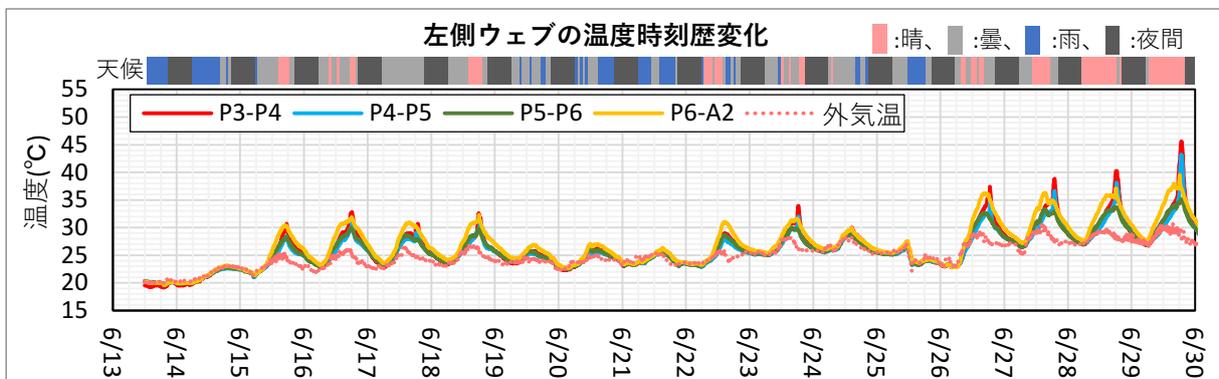


図 2.6-12 左側ウェブの部材温度の時刻歴変化 (期間 : 2022/6/13~30)

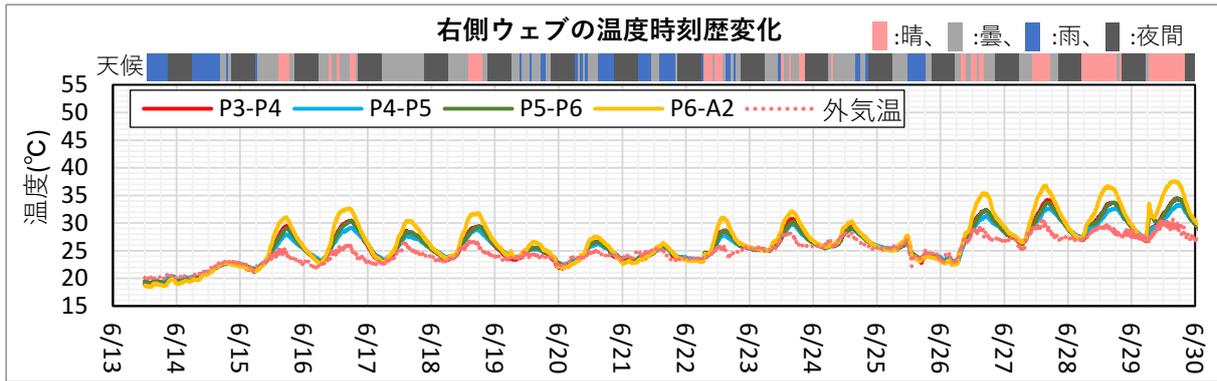


図 2.6-13 右側ウェブの部材温度の時刻歴変化（期間：2022/6/13～30）

図 2.6-14 は、2022/6/16 の牛深ハイヤ大橋の各径間に対して太陽の位置を左右に分け径間毎に整理し示したものである。A1-P1 径間および P1-P2 径間は、日の出時点では太陽が橋梁の左側にあるが、その後右側に移動し、午後になって左側に戻り日の入りを迎える。その他の径間は、日の出時点では右側に太陽が位置し、午後になると左側へ移動しているが、そのタイミングは P5-P6 径間と P6-A2 径間以外は径間毎に差異が生じる。図 2.6-15 に示す牛深ハイヤ大橋を中心とした太陽位置図では牛深ハイヤ大橋と太陽の時間帯による位置関係が確認できる。太陽は牛深ハイヤ大橋の北東から上がり、南側を通り、北西に沈むという軌跡を示すが、牛深ハイヤ大橋は曲線橋であり、各径間の桁方向の方位が異なるため、径間毎に日射による影響が異なる。P5-P6 径間と P6-A2 径間はほぼ同じ方位を向いており、太陽の位置に差が生じていないと考えられる。温度の時刻歴変化は、牛深ハイヤ大橋の各径間で日射方向が異なり、太陽の位置に差異が生じるため、径間毎かつ部材毎に把握することが重要である。

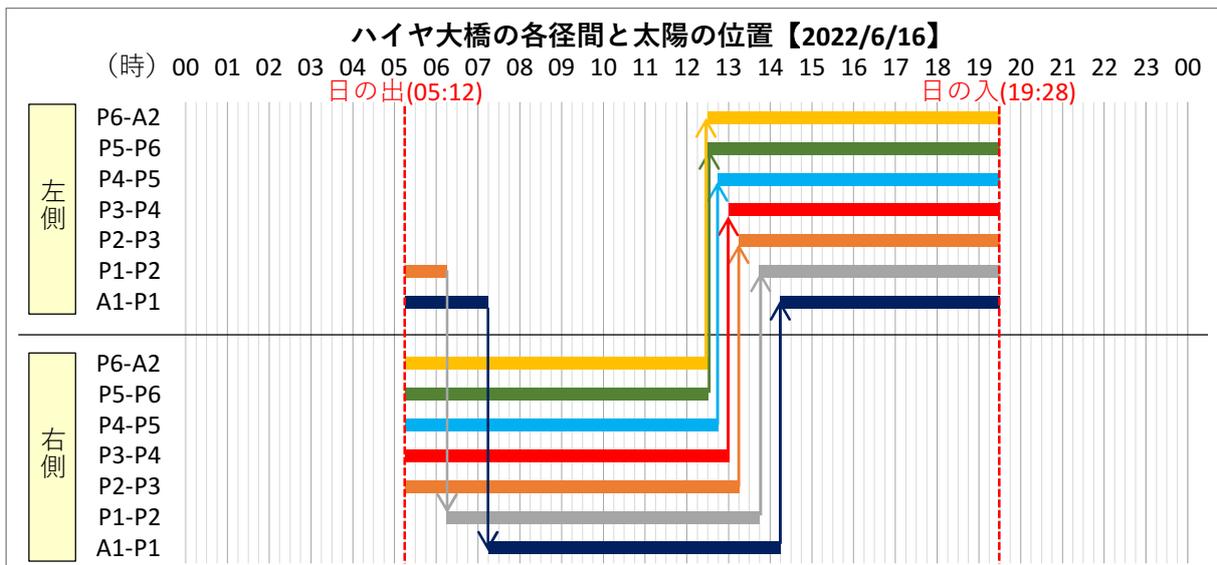


図 2.6-14 ハイヤ大橋の各径間と太陽の位置（2022/6/16）

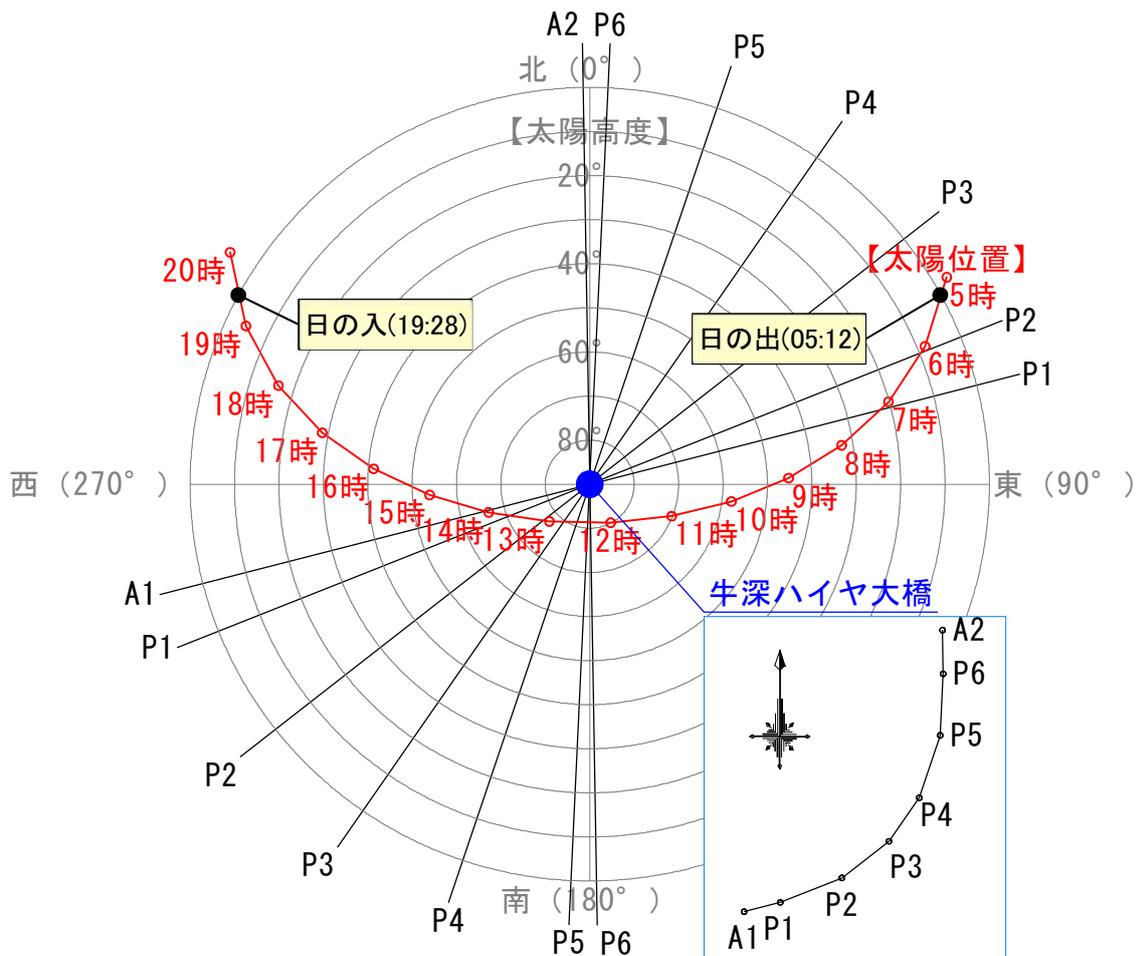


図 2.6-15 ハイヤ大橋を中心とした太陽位置図 (2022/6/16)

各径間の部材温度と外気温の関係を図 2.6-16 に示す。床版では、部材温度と外気温の関係はばらつきが大きく他の部材と比べて相関が弱い。床版は、他部材と比べて上面からの日射の影響を最も受ける部材であり、径間毎で日射の受け方に差がないためと考えられる。左側ウェブでは外気温が高い範囲で P3-P4 径間と P4-P5 径間にばらつきが生じる。これは、図 2.6-13 に示したように外気温の高い日のデータであり、晴れた日の西日の影響によるものと考えられる。P6-A2 径間は、下フランジ、左側ウェブおよび右側ウェブで他の径間と比べて部材温度が高い。これは、図 2.6-9 と同様の結果であり、図 2.6-16 は計測期間を通じた結果であることから、常にそのような状態であると考えられる。P6-A2 径間は地上部になるため日射の照り返しの影響によるものと考えられる。

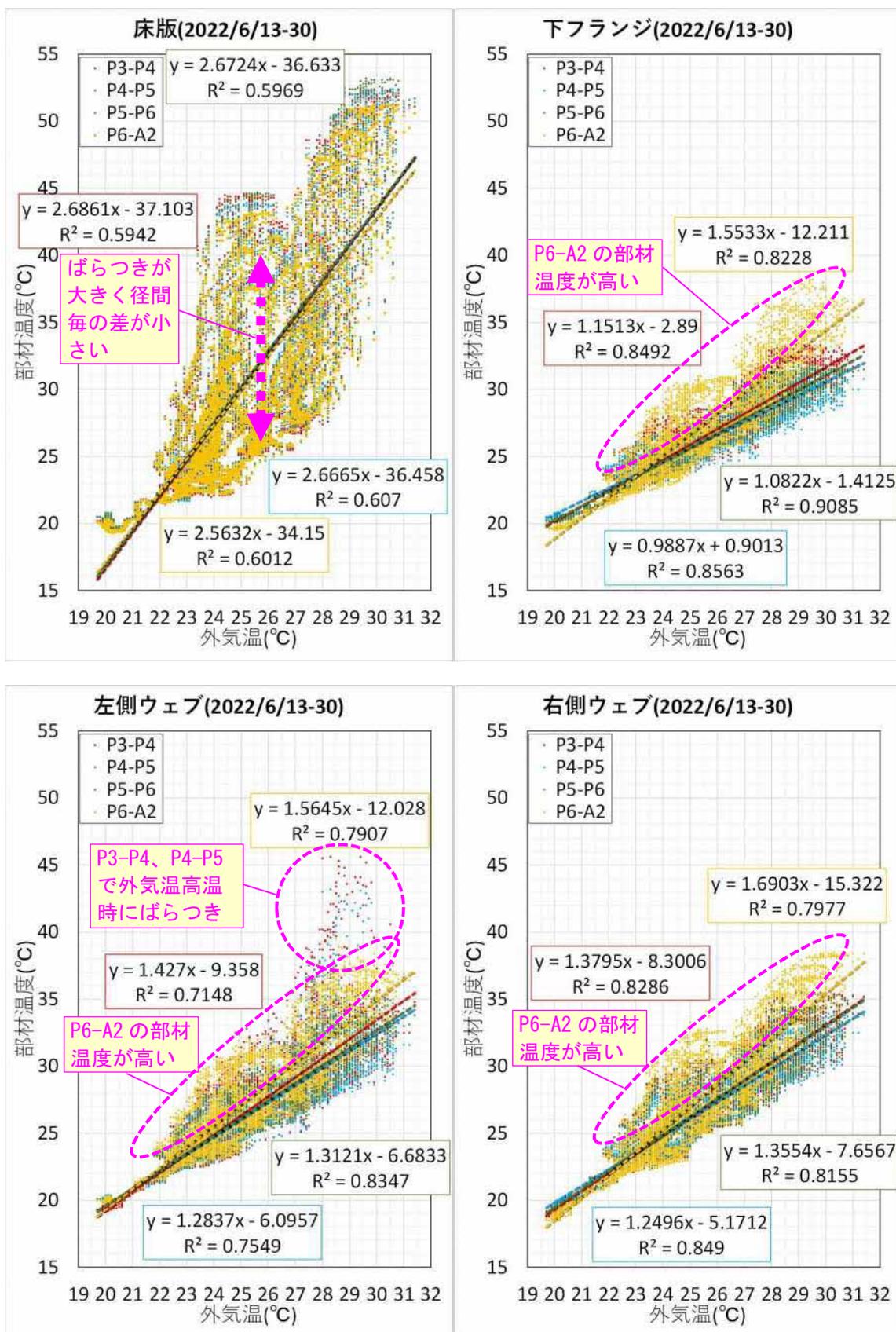


図 2.6-16 各部材温度と外気温の関係 (期間 : 2022/6/13~30)

c) P3-P4 径間の温度時刻歴変化

① 各部材の温度時刻歴変化

計測期間（2022/6/13～30）における床版、下フランジ、左側ウェブ、右側ウェブの熱電対で計測した部材温度の時刻歴変化を図 2.6-17 に示す。計測期間を通して、床版の温度が高く、午後後に左側ウェブの温度が上昇する傾向が確認できる。なお、6/14 は他の日で確認されたような床版の温度上昇が見られないが、これは天候によるものと考えられる。熱電対による部材温度調査結果では、床版の温度が非常に高く、下フランジと最大で 20℃ほどの温度差が生じる。左側ウェブでも最大で 13℃程度の温度差が生じる。1 日の中での部材の温度変化は、急激な温度上昇が確認される床版や左ウェブ以外の部材では、10℃程度である。

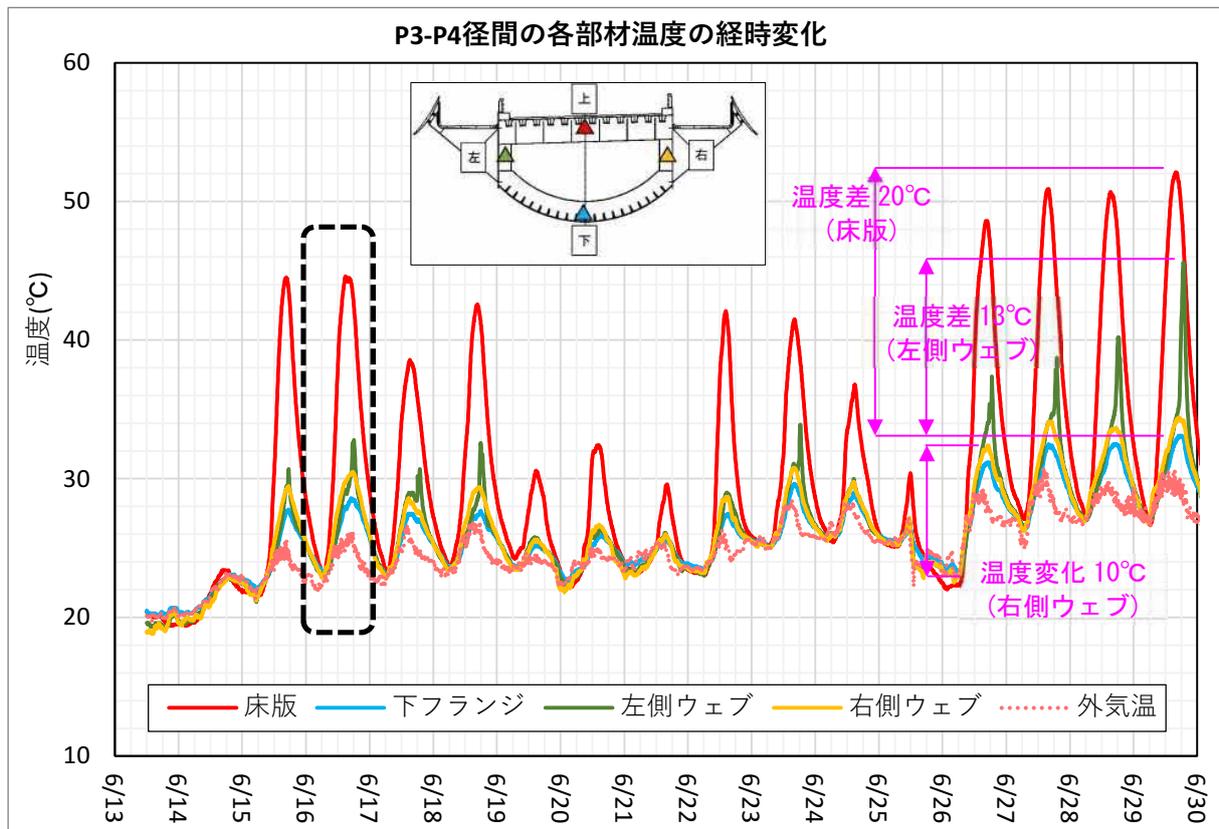


図 2.6-17 P3-P4 径間の各部材温度の時刻歴変化（期間：2022/6/13～30）

② 1 日の中での各部材の温度時刻歴変化

1 日（2022/6/13）における、床版、下フランジ、左側ウェブ、右側ウェブの熱電対で計測した部材温度の時刻歴変化を図 2.6-18 に示す。図より、日の出（5:12）後の 7 時以降から各部材で徐々に温度上昇が見られ、部材温度のピークの時刻は部材毎に異なるが、日の入りを迎える前の 15 時から 18 時となっており、そこから徐々に温度が低下する。1 日をとおして、各部材の部材温度は外気温より高く、日中の日射の影響で温度が上昇した橋梁が日没後も外気温と比べて高い部材温度を保ったまま徐々に外気温に近づき、6 時から 7 時頃で各部材の部材温度と外気温は同程度となる。

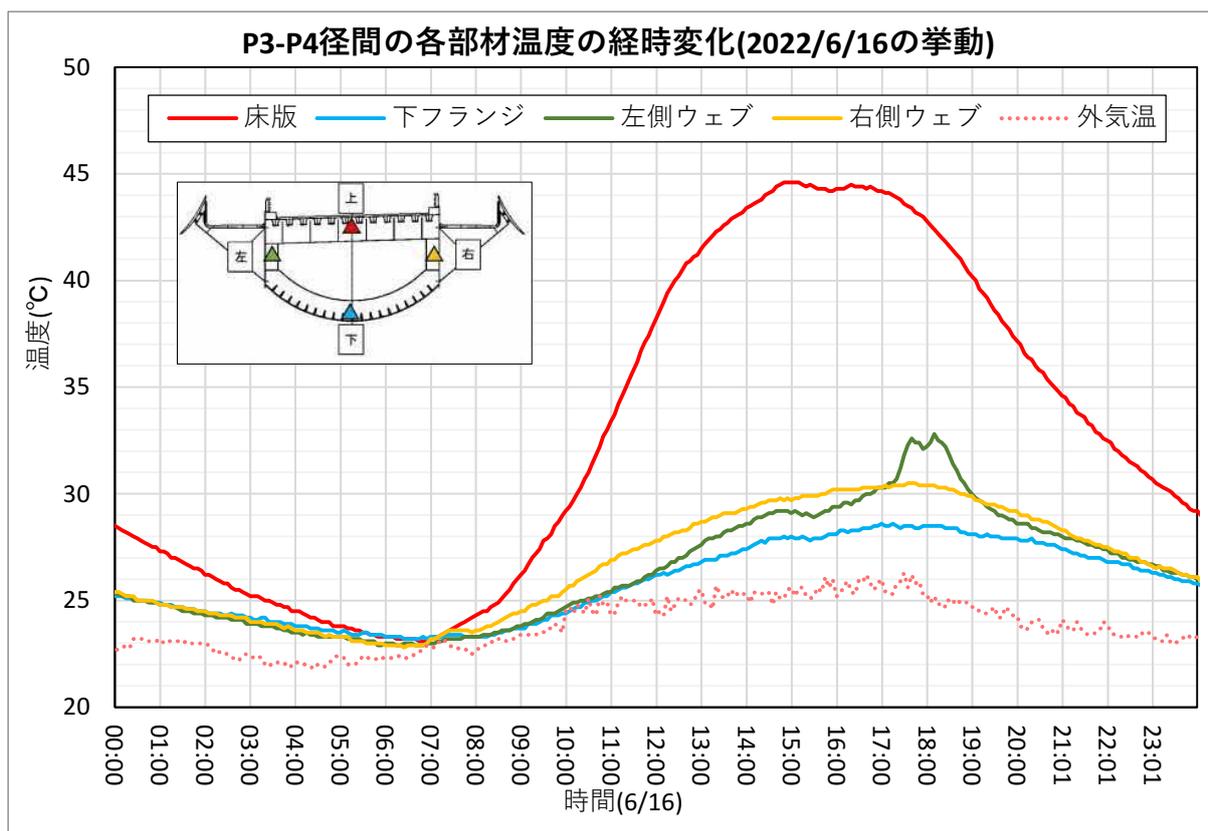


図 2.6-18 P3-P4 径間の各部材温度の 1 日の時刻歴変化（期間：2022/6/16）

各部材の最大温度および最低温度、それらの差（温度変化）を表 2.6-3 に示す。床版は日射の影響を最も受ける部材であり、他部材と比べても、1 日の中での温度変化が大きい。一方で、下フランジは直接太陽に照らされないため、日射の影響が小さく、温度変化も小さい。左右のウェブを比べると、最低温度は同程度であるが左側ウェブの方が右側ウェブと比べて最大温度が 2°C 程度高く、温度変化も 2°C 大きい。これは、太陽の上昇に伴い徐々に橋梁全体の温度が上昇していき、午後からは、左側が直接太陽に照らされるためであると考えられる。

表 2.6-3 P3-P4 径間の 1 日の各部材の最大・最低温度と温度変化（2022/6/16）

部材	床版	下フランジ	左側ウェブ	右側ウェブ
最大温度	44.6°C	28.6°C	32.8°C	30.5°C
[最大温度時間]	[14:50]	[17:00]	[18:10]	[17:35]
最低温度	23.1°C	23.2°C	22.9°C	22.8°C
[最低温度時間]	[6:45]	[6:25]	[5:50]	[6:25]
温度変化(最大-最小)	21.5°C	5.4°C	9.9°C	7.7°C

③ 1 日の中での各部材の温度差

図 2.6-19 は、対象径間の起点から終点の方向に断面をとり、その断面から見える 1 日（2022/6/13）の太陽の位置の変化を示したものである。P3-P4 径間では、日の出（5:12）時点で

は橋梁の右側に太陽が位置し、午後になって左側に移動し日の入り（19:28）を迎える。各部材の温度差は、**図 2.6-18** より、6 時頃ではほぼ 0℃であるが、太陽の上昇に伴い 7 時以降に床版と右側ウェブの温度が上昇し、他部材との温度差が生じる。

床版の温度上昇は他部材と比べて大きく、床版の温度がピークを迎える 15 時頃では、各部材との温度差は、下フランジで 18℃程度、左側ウェブで 16℃程度、右側ウェブで 15℃程度となる。温度差はそこから徐々に小さくなるが、日の入り（19:28）後も他部材との温度差を保つ。**図 2.6-20** は午前（5～12 時）、午後（12～19 時）、夜間（19～5 時）の時間帯毎の各部材温度と外気温の関係を示したものであるが、床版は時間帯によらずばらつきが大きい。部材温度は時間帯によらず外気温より高いが、午後の傾きが大きく、日射の影響が大きい。また、午前と夜間では気温が低い時間帯では、外気温と部材温度は同程度となっているが、夜間の傾きが午前の傾きより大きいことから、日の入り後、日中に温められた桁が徐々に外気温に近づき、日の出を迎え太陽の上昇とともに徐々に部材温度が上がっていくと考えられる。

下フランジは、日射の影響が小さくばらつきが小さい。午前は外気温と部材温度は同程度となるが、午後は部材温度が 1～2℃高く、その傾向は夜間まで続く。日射により温度が上昇した他の部材からの熱影響によるものと考えられ、日射が直接当たらない下フランジにおいても外気温以上となる。

右側ウェブは、**図 2.6-19** より、P3-P4 径間では太陽が右側から上昇するため、左側ウェブより 1℃ほど部材温度が高い。午後から夜間にかけては左側ウェブとの温度差は小さくなる。一方で、**図 2.6-18** より、左側ウェブの温度は 13 時以降も上昇し続け 17 時頃で左側ウェブの温度を逆転し、ピークとなる 18 時頃では、下フランジで 4℃程度、右側ウェブで 2℃程度の温度差が生じる。**図 2.6-20** においても、午後と夜間の外気温の高温時に部材温度が高くなっていることが確認できる。

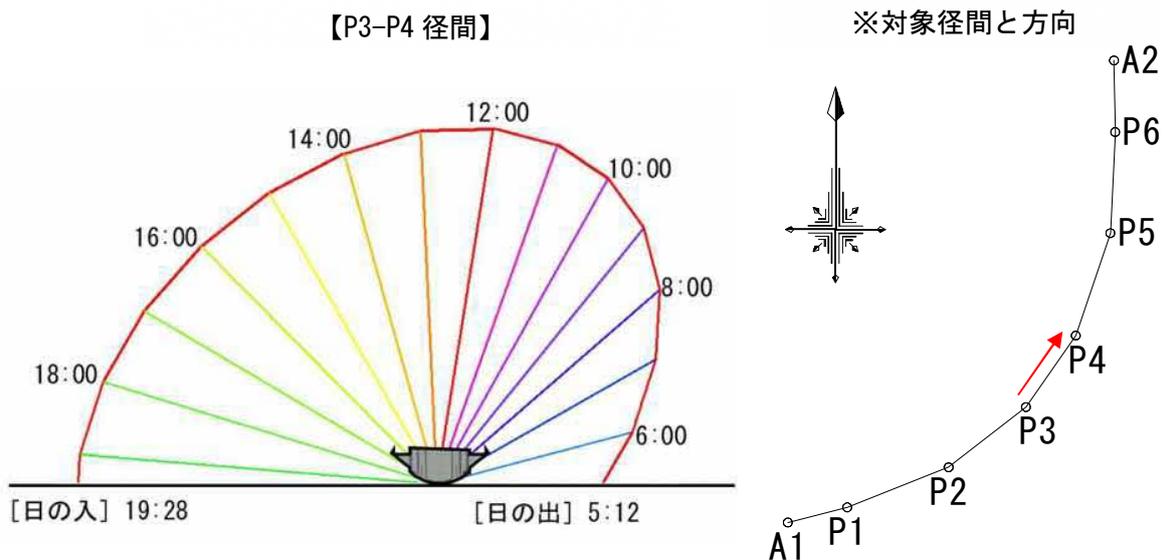


図 2.6-19 P3-P4 径間の 1 日の太陽位置の変化（2022/6/16）

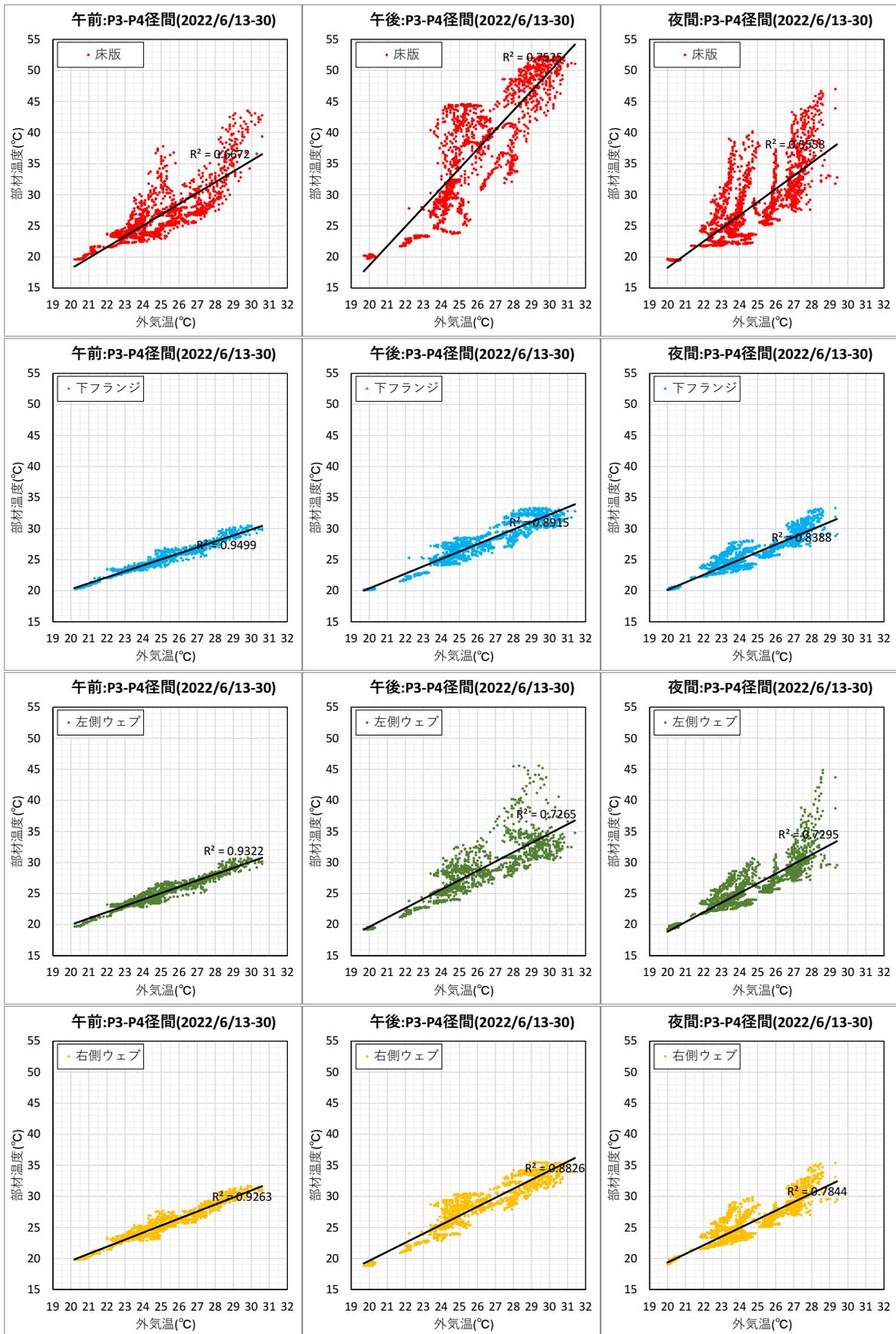


図 2.6-20 P3-P4 径間の時間帯毎の各部材温度と外気温の関係 (期間 : 2022/6/16)

d) P4-P5 径間の温度時刻歴変化

① 各部材の温度時刻歴変化

計測期間（2022/6/13～30）における床版、下フランジ、左側ウェブ、右側ウェブの熱電対で計測した部材温度の時刻歴変化を図 2.6-21 に示す。計測期間を通して、床版の温度が高く、午後には左側ウェブの温度が上昇する傾向が確認できる。なお、6/14 は他の日で確認されたような床版の温度上昇が見られないが、これは天候によるものと考えられる。熱電対による部材温度調査結果では、床版の温度が非常に高く、下フランジと最大で 20℃程度の温度差が生じる。左側ウェブでも最大で 12℃程度の温度差が生じる。1 日の中での部材の温度変化は、急激な温度上昇が確認される床版や左ウェブ以外の部材では、8℃程度である。これらの傾向は、概ね P3-P4 径間と同じであるが、左側ウェブで確認される温度差は P3-P4 径間より小さい。

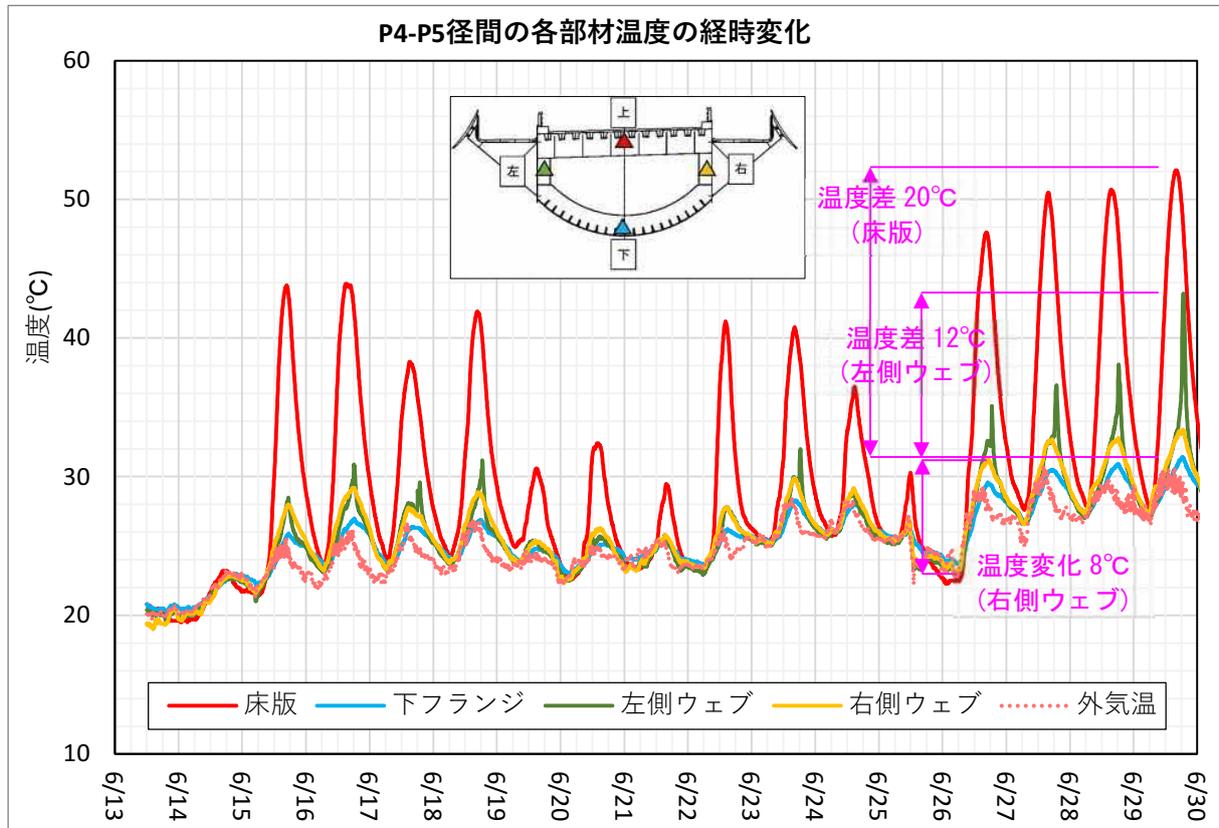


図 2.6-21 P4-P5 径間の各部材温度の時刻歴変化（期間：2022/6/13～30）

② 1 日の中での各部材の温度時刻歴変化

1 日（2022/6/13）における、床版、下フランジ、左側ウェブ、右側ウェブの熱電対で計測した部材温度の時刻歴変化を図 2.6-22 に示す。図より、日の出（5:12）後の 7 時以降から各部材で徐々に温度上昇が見られ、部材温度のピークの時刻は部材毎に異なるが、日の入りを迎える前の 15 時から 18 時となっており、そこから徐々に温度が低下する。1 日をとおして、各部材の部材温度は外気温より高く、日中の日射の影響で温度が上昇した橋梁が日没後も外気温と比べて高い部材温度を保ったまま徐々に外気温に近づき、6 時から 7 時頃で各部材の部材温度と外気温は同程度となる。

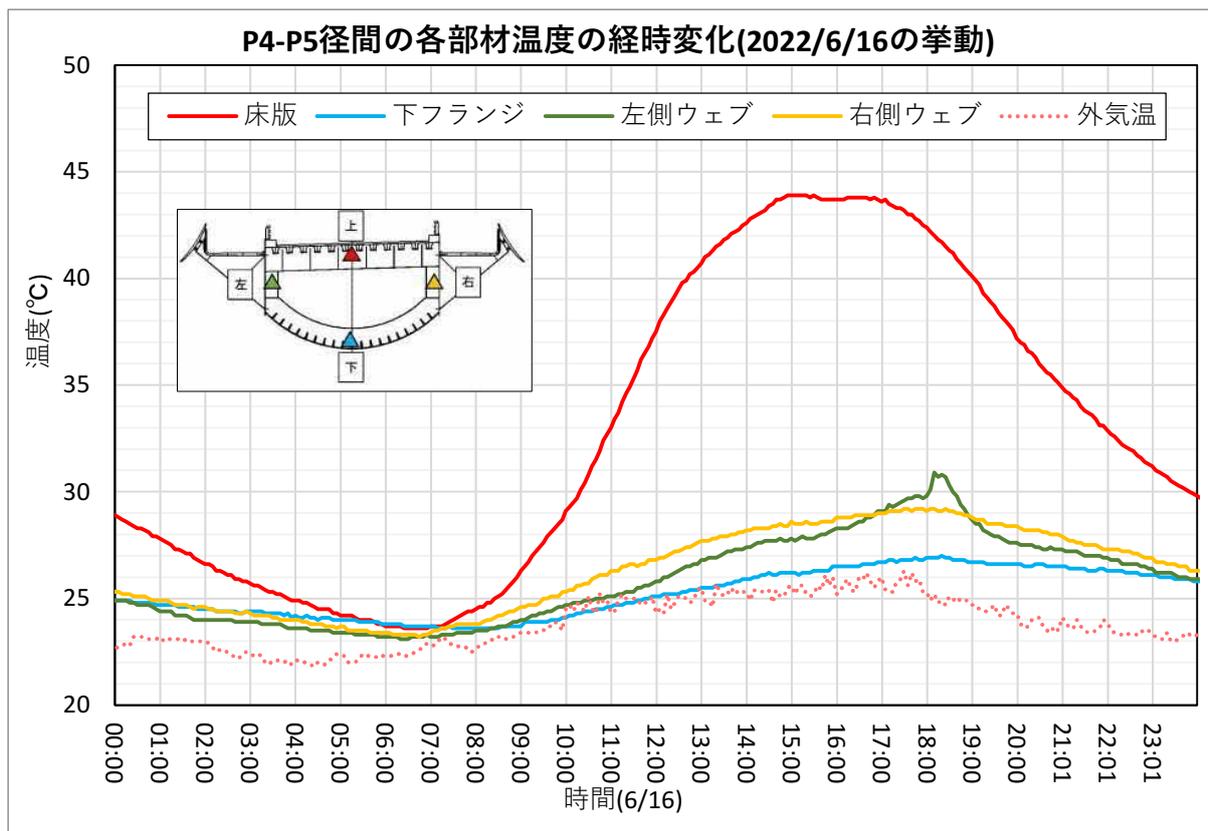


図 2.6-22 P4-P5 径間の各部材温度の 1 日の時刻歴変化 (期間 : 2022/6/16)

各部材の最大温度および最低温度、それらの差（温度変化）を表 2.6-4 に示す。床版は日射の影響を最も受ける部材であり、他部材と比べても、1 日の中での温度変化が大きい。一方で、下フランジは直接太陽に照らされないため、日射の影響が小さく、温度変化も小さい。左右のウェブを比べると、最低温度は同程度であるが左側ウェブの方が右側ウェブと比べて最大温度が 2°C 程度高く、温度変化も 2°C 大きい。これは、太陽の上昇に伴い徐々に橋梁全体の温度が上昇していき、午後からは、左側が直接太陽に照らされるためであると考えられる。

表 2.6-4 P4-P5 径間の 1 日の各部材の最大・最低温度と温度変化 (2022/6/16)

部材	床版	下フランジ	左側ウェブ	右側ウェブ
最大温度	43.9°C	27.0°C	30.9°C	29.2°C
[最大温度時間]	[14:55]	[18:20]	[18:10]	[17:30]
最低温度	23.6°C	23.6°C	23.1°C	23.2°C
[最低温度時間]	[6:25]	[7:10]	[6:20]	[6:45]
温度変化(最大-最小)	20.3°C	3.4°C	7.8°C	6.0°C

③ 1 日の中での各部材の温度差

図 2.6-23 は、対象径間の起点から終点の方向に断面をとり、その断面から見える 1 日 (2022/6/13) の太陽の位置の変化を示したものである。P4-P5 径間では、日の出 (5:12) 時点で

は橋梁の右側に太陽が位置し、午後になって左側に移動し日の入り（19:28）を迎える。各部材の温度差は、**図 2.6-22** より、6 時頃ではほぼ 0℃であるが、太陽の上昇に伴い 7 時以降に床版と右側ウェブの温度が上昇し、他部材との温度差が生じる。

床版の温度上昇は他部材と比べて大きく、床版の温度がピークを迎える 15 時頃では、各部材との温度差は、下フランジで 18℃程度、左側ウェブで 16℃程度、右側ウェブで 15℃程度となる。温度差はそこから徐々に小さくなるが、日の入り（19:28）後も他部材との温度差を保つ。**図 2.6-24** は午前（5～12 時）、午後（12～19 時）、夜間（19～5 時）の時間帯毎の各部材温度と外気温の関係を示したものであるが、床版は時間帯によらずばらつきが大きい。部材温度は時間帯によらず外気温より高いが、午後の傾きが大きく、日射の影響が大きい。また、午前と夜間では気温が低い時間帯では、外気温と部材温度は同程度となっているが、夜間の傾きが午前の傾きより大きいことから、日の入り後、日中に温められた桁が徐々に外気温に近づき、日の出を迎え太陽が上昇するとともに徐々に部材温度が上がっていくと考えられる。

下フランジは、日射の影響が小さくばらつきが小さい。午前中は外気温と部材温度は同程度となるが、午後は部材温度が 1～2℃高く、その傾向は夜間まで続く。日射により温度が上昇した他の部材からの熱影響によるものと考えられ、日射が直接当たらない下フランジにおいても外気温以上となる。

右側ウェブは、**図 2.6-23** より、P4-P5 径間では太陽が右側から上昇するため、左側ウェブより 1℃ほど部材温度が高い。午後から夜間にかけては左側ウェブとの温度差は小さくなる。一方で、**図 2.6-22** より、左側ウェブの温度は 13 時以降も上昇し続け 17 時頃で左側ウェブの温度を逆転し、ピークとなる 18 時頃では、下フランジで 4℃程度、右側ウェブで 2℃程度の温度差が生じる。**図 2.6-24** においても、午後と夜間の外気温の高温時に部材温度が高くなっていることが確認できる。

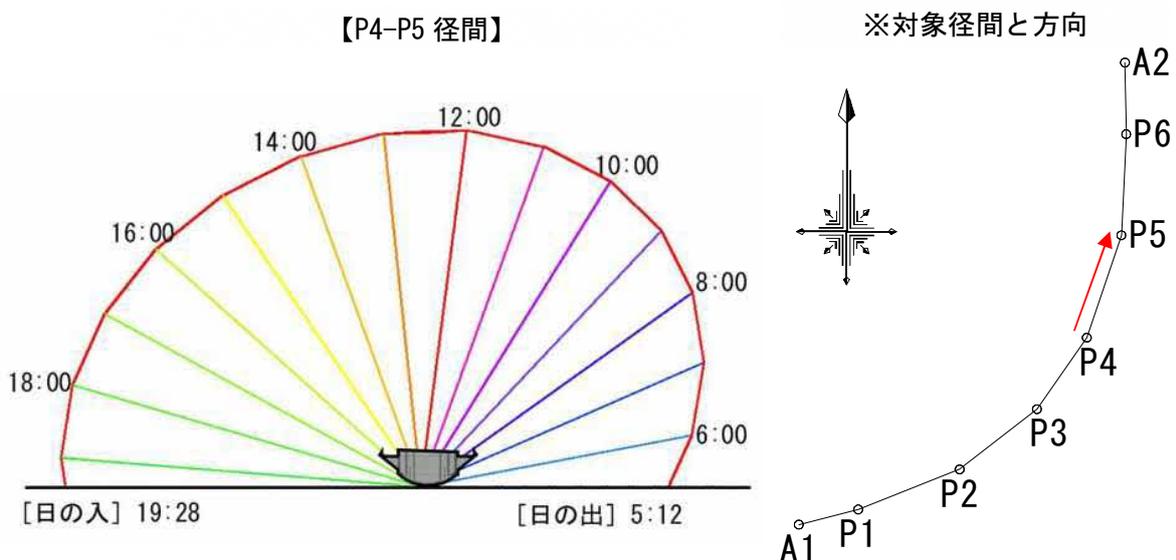


図 2.6-23 P4-P5 径間の 1 日の太陽位置の変化（2022/6/16）

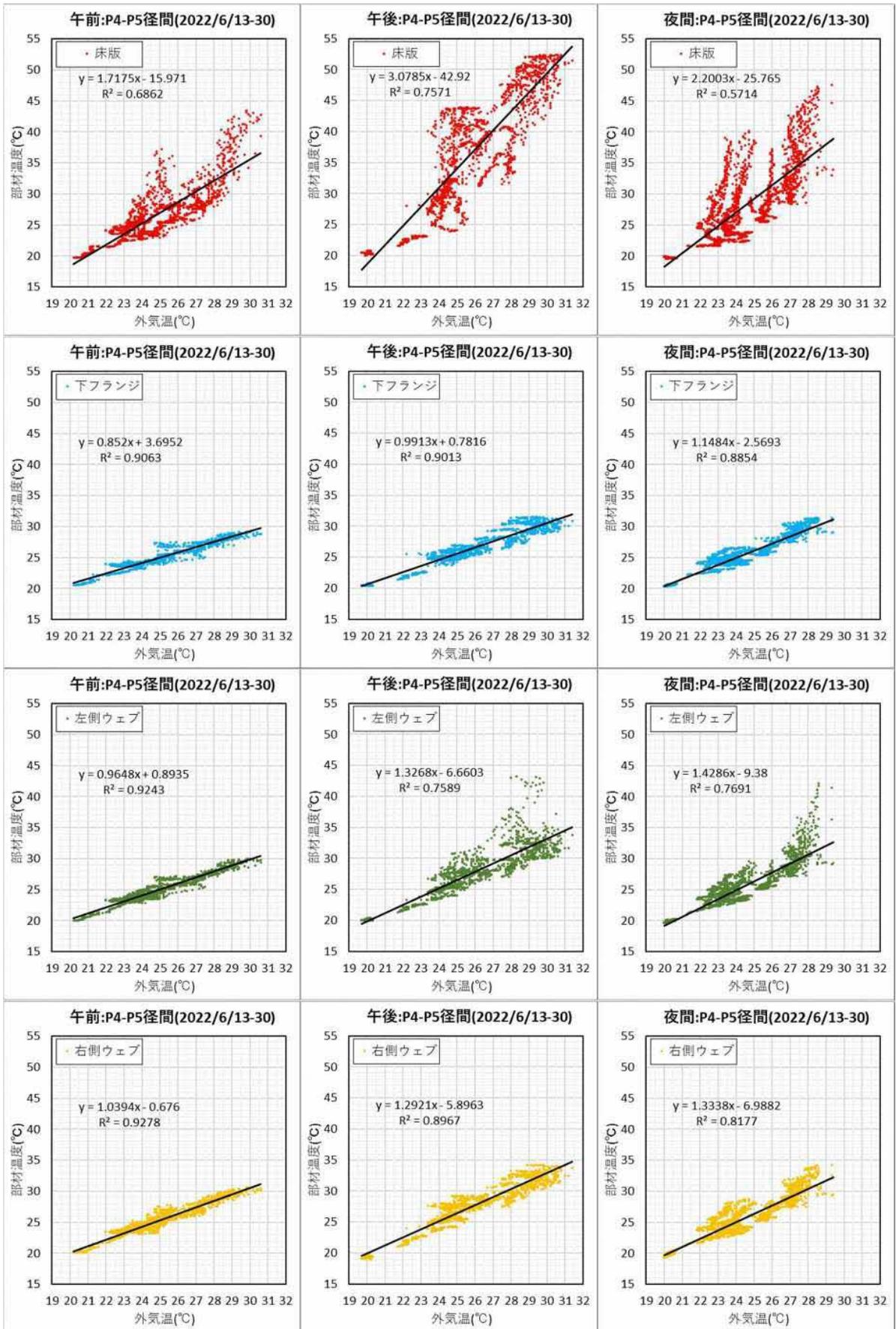


図 2.6-24 P4-P5 径間の時間帯毎の各部材温度と外気温の関係 (期間 : 2022/6/16)

e) P5-P6 径間の温度時刻歴変化

① 各部材の温度時刻歴変化

計測期間（2022/6/13～30）における床版、下フランジ、左側ウェブ、右側ウェブの熱電対で計測した部材温度の時刻歴変化を図 2.6-25 に示す。計測期間を通して、床版の温度が高いことが確認できる。P3-P4 径間・P4-P5 径間では、午後に左側ウェブの温度上昇が確認されたが P5-P6 径間では確認されない。なお、6/14 は他の日にちで確認されたような床版の温度上昇が見られないが、これは天候によるものと考えられる。熱電対による部材温度調査結果では、床版の温度が非常に高く、下フランジと最大で 18℃程度の温度差が生じる。1 日の中での部材の温度変化は、急激な温度上昇が確認される床版以外の部材では、10℃程度である。

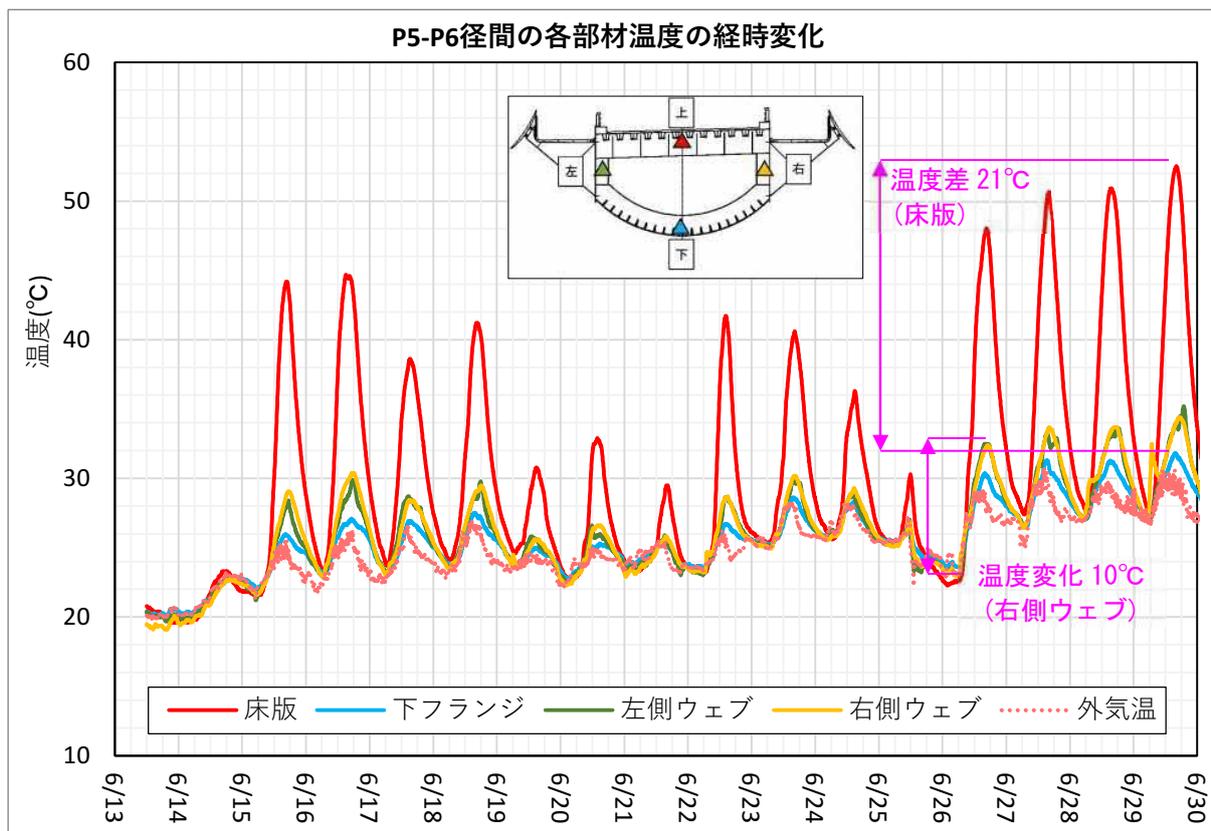


図 2.6-25 P5-P6 径間の各部材温度の時刻歴変化（期間：2022/6/13～30）

② 1 日の中での各部材の温度時刻歴変化

1 日（2022/6/13）における、床版、下フランジ、左側ウェブ、右側ウェブの熱電対で計測した部材温度の時刻歴変化を図 2.6-26 に示す。図より、日の出（5:12）後の 7 時以降から各部材で徐々に温度上昇が見られ、部材温度のピークの時刻は部材毎に異なるが、日の入りを迎える前の 15 時から 18 時となっており、そこから徐々に温度が低下する。1 日をとおして、各部材の部材温度は外気温より高く、日中の日射の影響で温度が上昇した橋梁が日没後も外気温と比べて高い部材温度を保ったまま徐々に外気温に近づき、6 時から 7 時頃で各部材の部材温度と外気温は同程度となる。

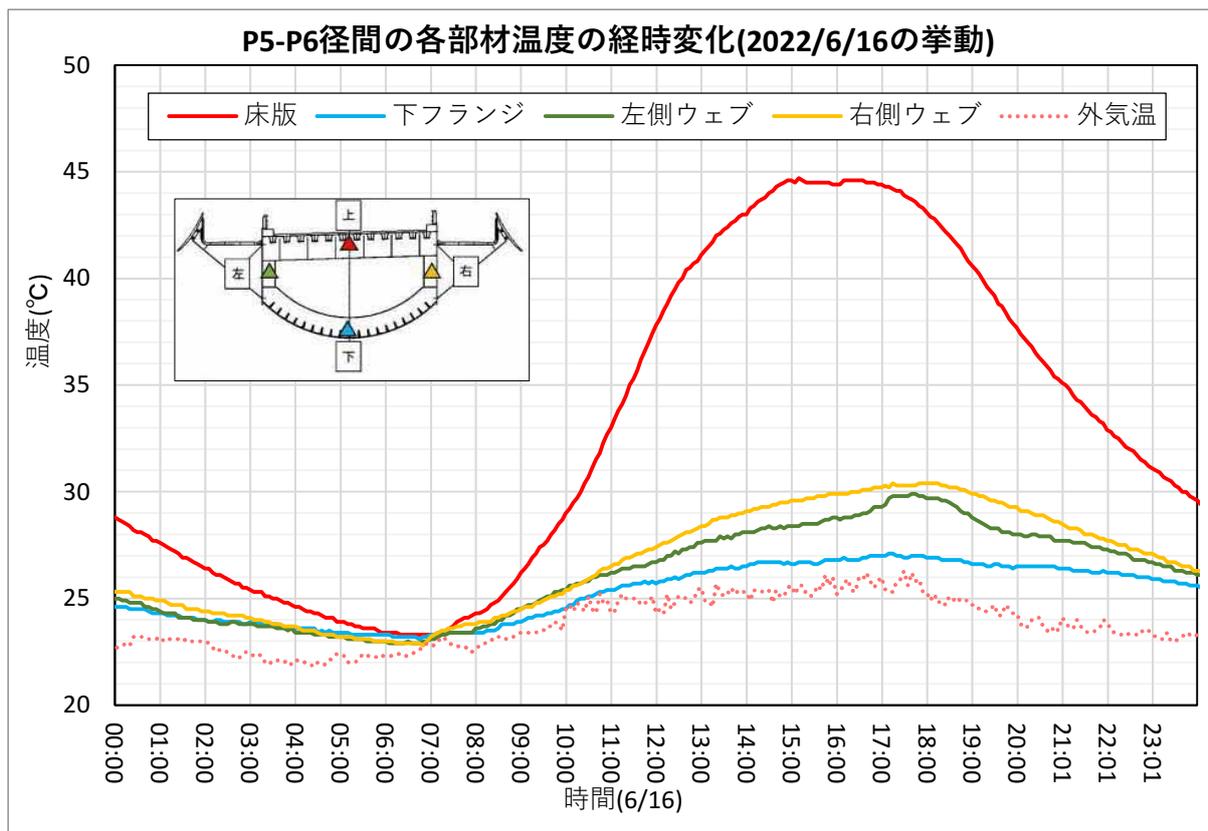


図 2.6-26 P5-P6 径間の各部材温度の 1 日の時刻歴変化 (期間 : 2022/6/16)

各部材の最大温度および最低温度、それらの差（温度変化）を表 2.6-5 に示す。床版は日射の影響を最も受ける部材であり、他部材と比べても、1 日の中での温度変化が大きい。一方で、下フランジは直接太陽に照らされないため、日射の影響が小さく、温度変化も小さい。左右のウェブを比べると、最低温度は同程度であるが左側ウェブの方が右側ウェブと比べて最大温度が 0.5°C 程度高いが P3-P4 径間・P4-P5 径間より差は小さい。

表 2.6-5 P5-P6 径間の 1 日の各部材の最大・最低温度と温度変化 (2022/6/16)

部材	床版	下フランジ	左側ウェブ	右側ウェブ
最大温度	44.7°C	27.1°C	29.9°C	30.4°C
[最大温度時間]	[15:10]	[17:10]	[17:40]	[17:15]
最低温度	23.3°C	23.1°C	22.9°C	22.8°C
[最低温度時間]	[6:20]	[6:45]	[6:05]	[6:50]
温度変化(最大-最小)	21.4°C	4.0°C	7.0°C	7.6°C

③ 1 日の中での各部材の温度差

図 2.6-27 は、対象径間の起点から終点の方向に断面をとり、その断面から見える 1 日 (2022/6/13) の太陽の位置の変化を示したものである。P5-P6 径間では、日の出 (5:12) 時点では橋梁の右側に太陽が位置し、午後になって左側に移動し日の入り (19:28) を迎える。各部材

の温度差は、**図 2.6-26** より、6 時頃ではほぼ 0℃であるが、太陽の上昇に伴い 7 時以降に床版と右側ウェブの温度が上昇し、他部材との温度差が生じる。

床版の温度上昇は他部材と比べて大きく、床版の温度がピークを迎える 15 時頃では、各部材との温度差は、下フランジで 18℃程度、左側ウェブで 16℃程度、右側ウェブで 15℃程度となる。温度差はそこから徐々に小さくなるが、日の入り（19:28）後も他部材との温度差を保つ。**図 2.6-28** は午前（5～12 時）、午後（12～19 時）、夜間（19～5 時）の時間帯毎の各部材温度と外気温の関係を示したものであるが、床版は時間帯によらずばらつきが大きい。部材温度は時間帯によらず外気温より高いが、午後の傾きが大きく、日射の影響が大きい。また、午前と夜間では気温が低い時間帯では、外気温と部材温度は同程度となっているが、夜間の傾きが午前の傾きより大きいことから、日の入り後、日中に温められた桁が徐々に外気温に近づき、日の出を迎え太陽の上昇とともに徐々に部材温度が上がっていくと考えられる。

下フランジは、日射の影響が小さくばらつきが小さい。午前中は外気温と部材温度は同程度となるが、午後は部材温度が 1～2℃高く、その傾向は夜間まで続く。日射により温度が上昇した他の部材からの熱影響によるものと考えられ、日射が直接当たらない下フランジにおいても外気温以上となる。

右側ウェブは、**図 2.6-27** より、P5-P6 径間では太陽が右側から上昇するが、P3-P4 径間・P4-P5 径間とは異なり、左側ウェブとの差は 7 時以降に確認できず、11 時以降に 1℃程度の差が生じる。また、17 時から 18 時頃での左右ウェブの温度差の逆転は生じない。

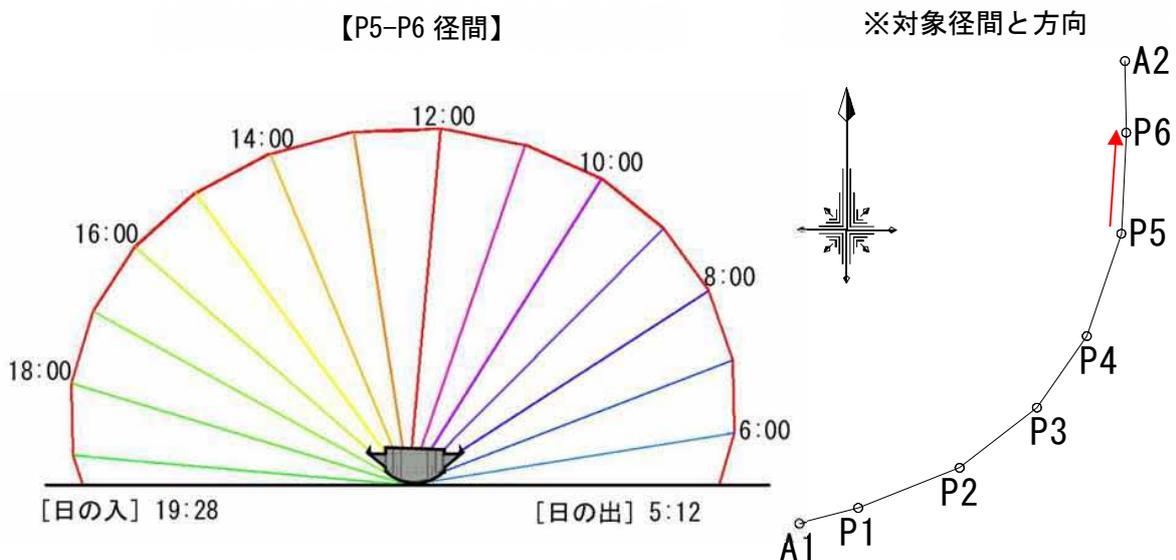


図 2.6-27 P5-P6 径間の 1 日の太陽位置の変化（2022/6/16）

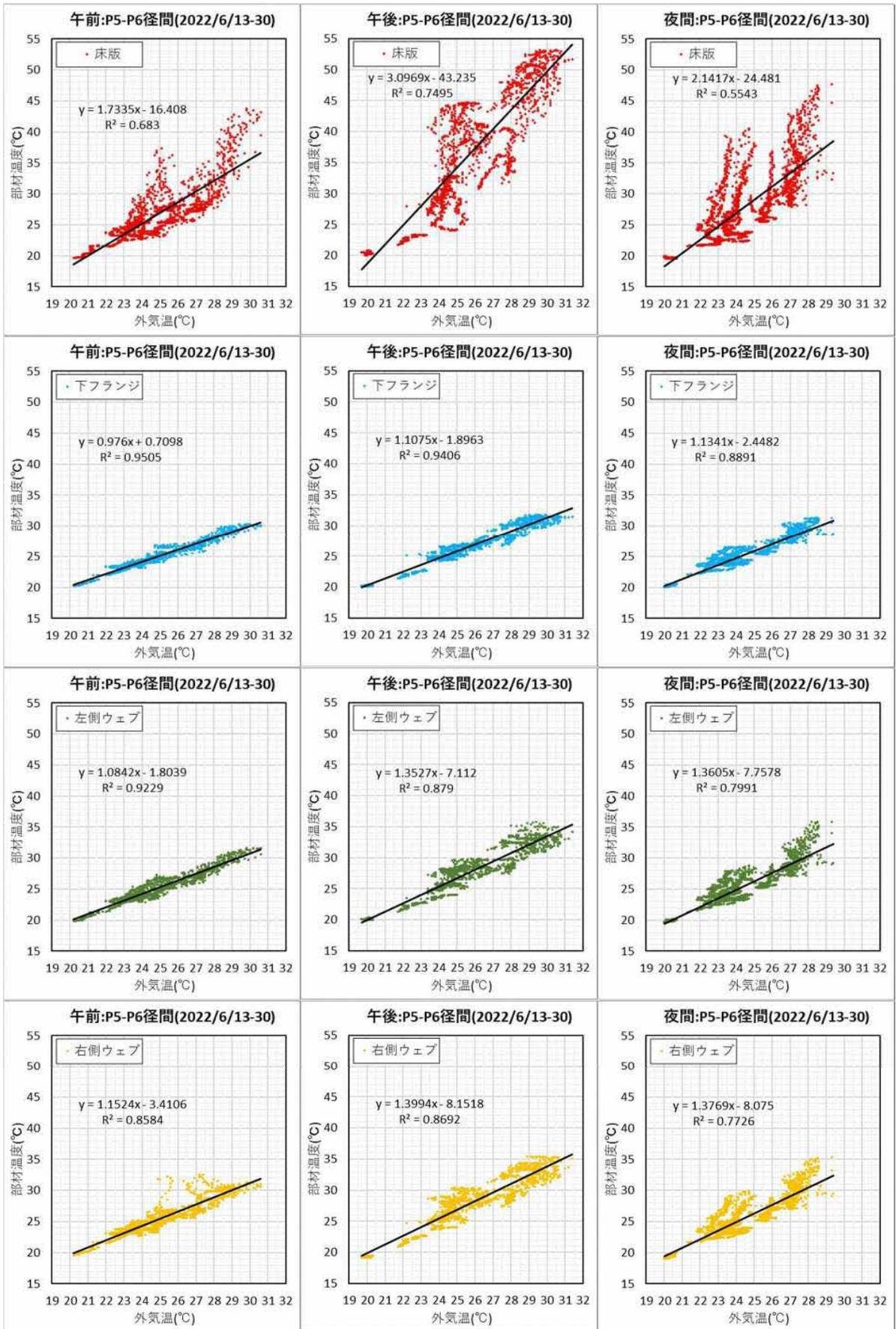


図 2.6-28 P5-P6 径間の時間帯毎の各部材温度と外気温の関係 (期間 : 2022/6/16)

f) P6-A2 径間の温度時刻歴変化

① 各部材の温度時刻歴変化

計測期間（2022/6/13～30）における床版、下フランジ、左側ウェブ、右側ウェブの熱電対で計測した部材温度の時刻歴変化を図 2.6-29 に示す。計測期間を通して、床版の温度が高いことが確認できる。P3-P4 径間・P4-P5 径間では、午後に左側ウェブの温度上昇が確認されたが P6-A2 径間では P5-P6 径間と同様に確認されない。なお、6/14 は他の日で確認されたような床版の温度上昇が見られないが、これは天候によるものと考えられる。熱電対による部材温度調査結果では、床版の温度が非常に高く、下フランジと最大で 13℃程度の温度差が生じる。1 日の中での部材の温度変化は、急激な温度上昇が確認される床版以外の部材では、12℃程度である。

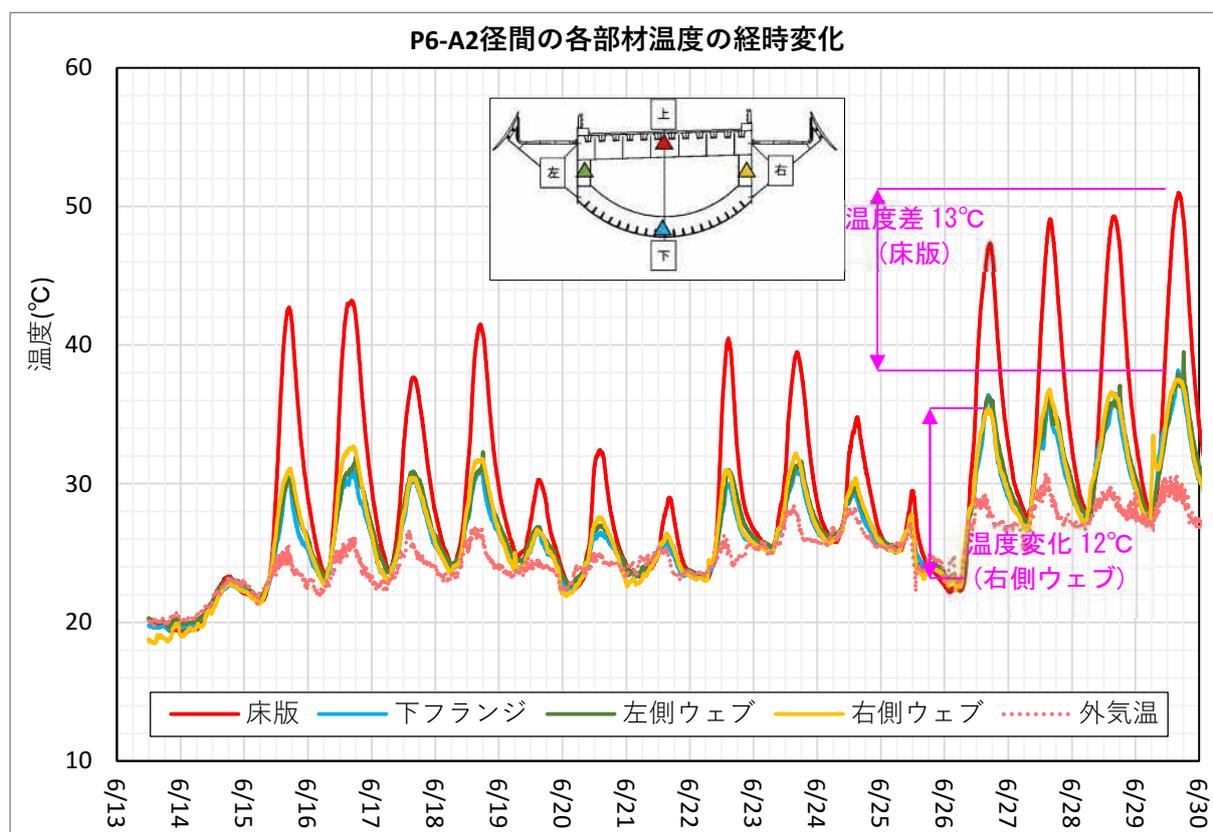


図 2.6-29 P6-A2 径間の各部材温度の時刻歴変化（期間：2022/6/13～30）

② 1 日の中での各部材の温度時刻歴変化

1 日（2022/6/13）における、床版、下フランジ、左側ウェブ、右側ウェブの熱電対で計測した部材温度の時刻歴変化を図 2.6-30 に示す。図より、日の出（5:12）後の 7 時以降から各部材で徐々に温度上昇が見られ、部材温度のピークの時刻は部材毎に異なるが、日の入りを迎える前の 15 時から 18 時となっており、そこから徐々に温度が低下する。1 日をとおして、各部材の部材温度は外気温より高く、日中の日射の影響で温度が上昇した橋梁が日没後も外気温と比べて高い部材温度を保ったまま徐々に外気温に近づき、6 時から 7 時頃で各部材の部材温度と外気温は同程度となる。

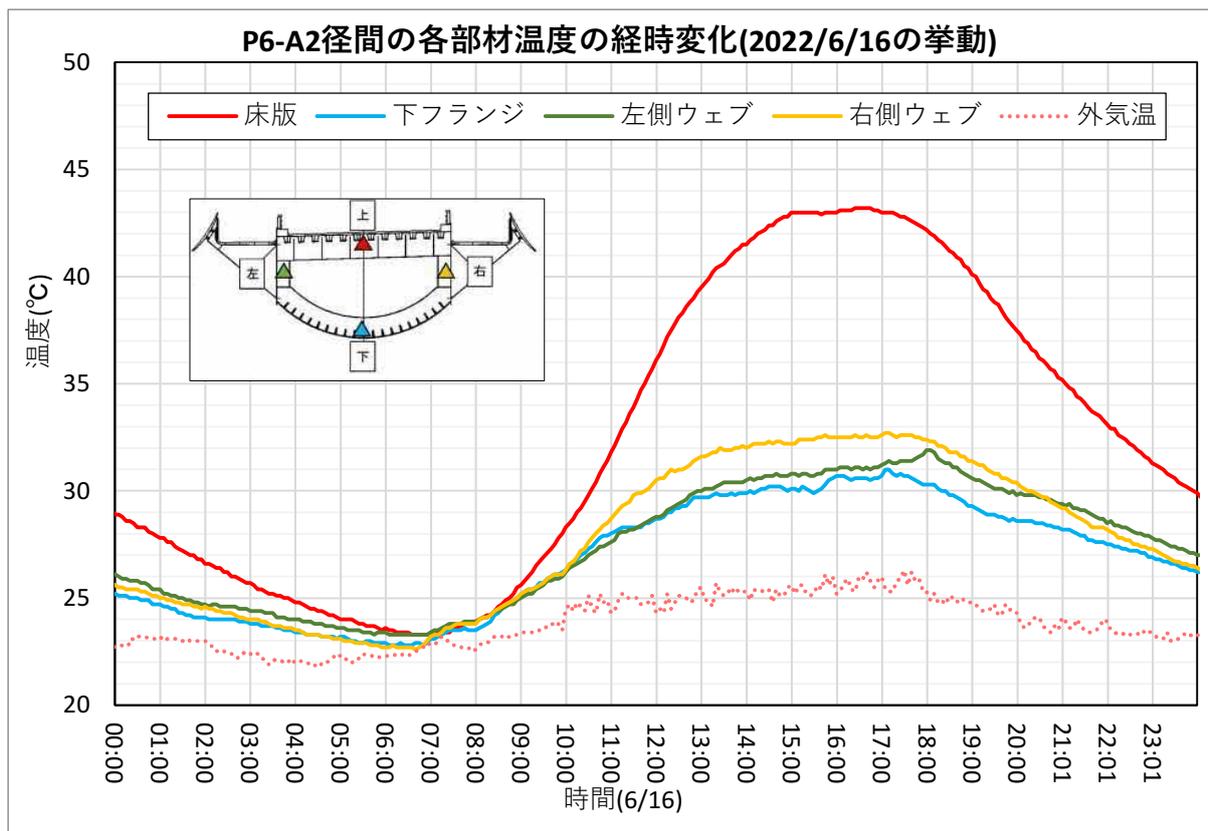


図 2.6-30 P6-A2 径間の各部材温度の 1 日の時刻歴変化 (期間 : 2022/6/16)

各部材の最大温度および最低温度、それらの差 (温度変化) を表 2.6-6 に示す。床版は日射の影響を最も受ける部材であり、他部材と比べても、1 日の中での温度変化が大きい。一方で、下フランジは直接太陽に照らされないため、日射の影響が小さく、温度変化も小さい。左右のウェブを比べると、最低温度は同程度であるが左側ウェブの方が右側ウェブと比べて最大温度が 0.8°C 程度高いが P3-P4 径間・P4-P5 径間より差は小さい。

表 2.6-6 P6-A2 径間の 1 日の各部材の最大・最低温度と温度変化 (2022/6/16)

部材	床版	下フランジ	左側ウェブ	右側ウェブ
最大温度	43.2°C	31.0°C	31.9°C	32.7°C
[最大温度時間]	[16:25]	[17:05]	[18:00]	[17:05]
最低温度	23.3°C	22.8°C	23.3°C	22.6°C
[最低温度時間]	[6:35]	[6:05]	[5:45]	[6:40]
温度変化(最大-最小)	19.9°C	8.2°C	8.6°C	10.1°C

③ 1 日の中での各部材の温度差

図 2.6-31 は、対象径間の起点から終点の方向に断面をとり、その断面から見える 1 日 (2022/6/13) の太陽の位置の変化を示したものである。P5-P6 径間では、日の出 (5:12) 時点では橋梁の右側に太陽が位置し、午後になって左側に移動し日の入り (19:28) を迎える。各部材

の温度差は、**図 2.6-30** より、6 時頃ではほぼ 0℃であるが、太陽の上昇に伴い 7 時以降に床版と右側ウェブの温度が上昇し、他部材との温度差が生じる。

床版の温度上昇は他部材と比べて大きく、床版の温度がピークを迎える 15 時頃では、各部材との温度差は、下フランジで 13℃程度、左側ウェブで 12℃程度、右側ウェブで 11℃程度となる。温度差はそこから徐々に小さくなるが、日の入り (19:28) 後も他部材との温度差を保つ。**図 2.6-32** は午前 (5~12 時)、午後 (12~19 時)、夜間 (19~5 時) の時間帯毎の各部材温度と外気温の関係を示したものであるが、床版は時間帯によらずばらつきが大きい。部材温度は時間帯によらず外気温より高いが、午後の傾きが大きく、日射の影響が大きい。また、午前と夜間では気温が低い時間帯では、外気温と部材温度は同程度となっているが、夜間の傾きが午前の傾きより大きいことから、日の入り後、日中に温められた桁が徐々に外気温に近づき、日の出を迎え太陽の上昇とともに徐々に部材温度が上がっていくと考えられる。

下フランジは、他径間と比べてばらつきが確認できる。午前中は外気温と部材温度は同程度となるが、午後は部材温度が 1~2℃高く、その傾向は夜間まで続く。日射により温度が上昇した他の部材からの熱影響によるものと考えられ、日射が直接当たらない下フランジにおいても外気温以上となる。

右側ウェブは、**図 2.6-31** より P6-A2 径間では太陽が右側から上昇するが、P3-P4 径間・P4-P5 径間とは異なり、左側ウェブとの差は 7 時以降に確認できず、11 時以降に 1℃程度の差が生じる。また、17 時から 18 時頃での左右ウェブの温度差の逆転は生じない。

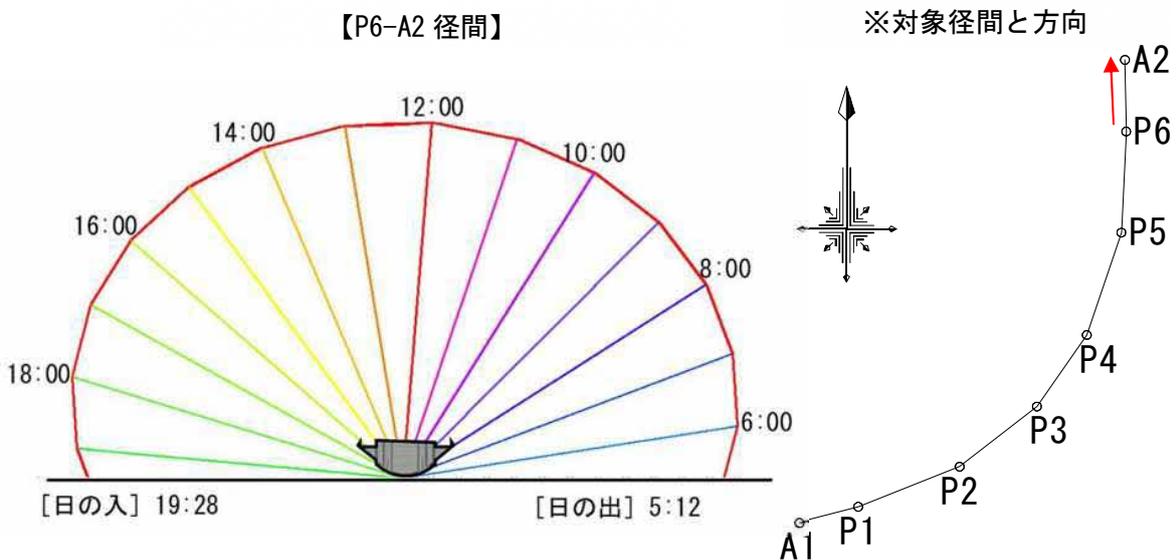


図 2.6-31 P6-A2 径間での 1 日の太陽位置の変化 (2022/6/16)

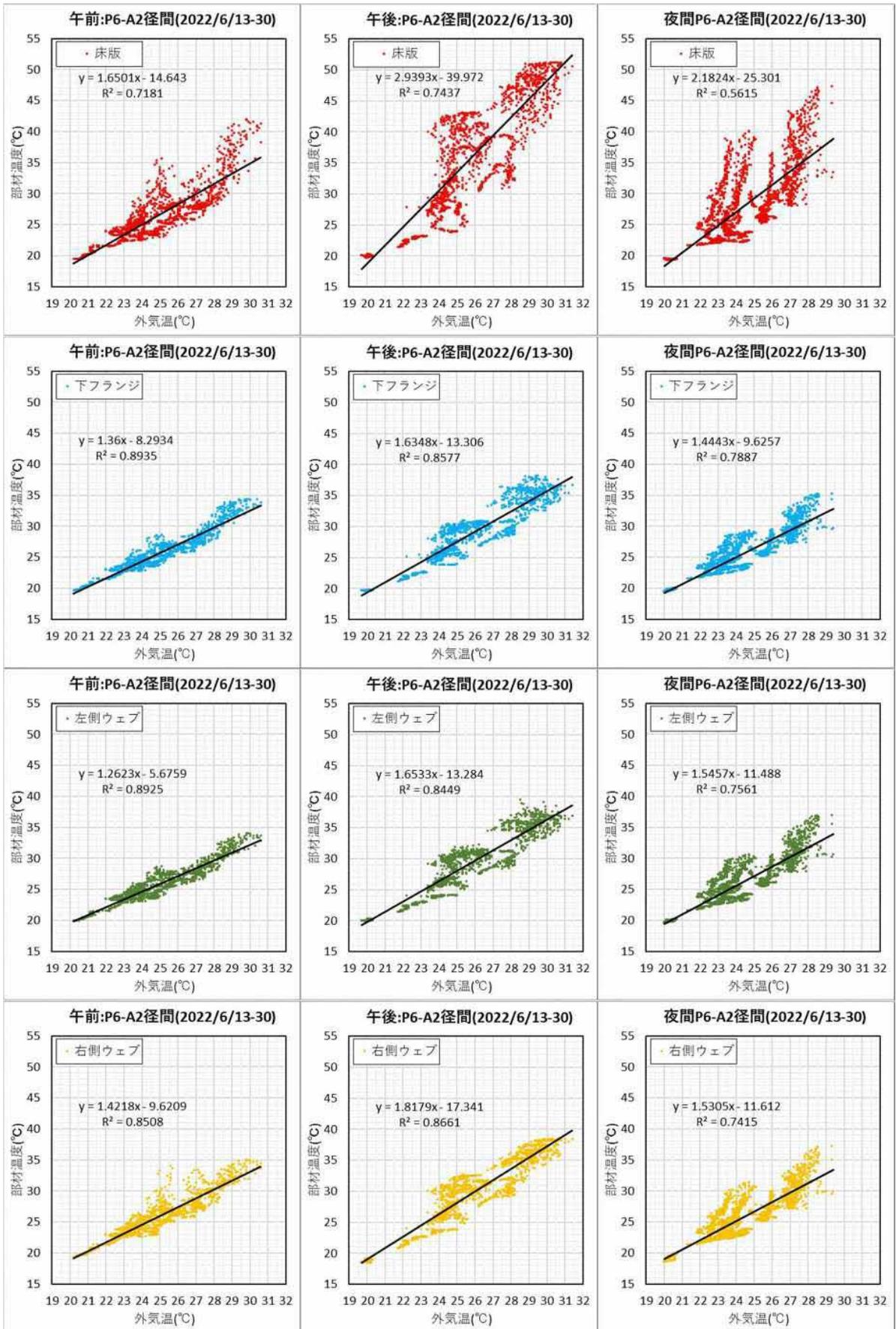


図 2.6-32 P6-A2 径間の時間帯毎の各部材温度と外気温の関係 (期間 : 2022/6/16)

g) 【参考】A1-P3 径間での 1 日の太陽位置の変化

A1-P3 径間では温度計測を実施していない。そのため、参考として、2022/6/16 の 1 日の太陽位置の変化を図 2.6-33、図 2.6-34、図 2.6-35 に示す。

P2-P3 径間では、P3-A2 間の各径間と同様に、日の出時点では太陽が橋梁の右側にあり、午後になって左側に移動し日の入りを迎えるが、A1-P1 径間および P1-P2 径間では、太陽が左側から上昇し、一旦右側に移動した後、午後に左側に移動し日の入りを迎える。8 時頃に橋梁の右側に移動するが太陽はほぼ直上に位置しており、ウェブが直接太陽に照らされる時間は他の径間と比べて短いと考えられる。

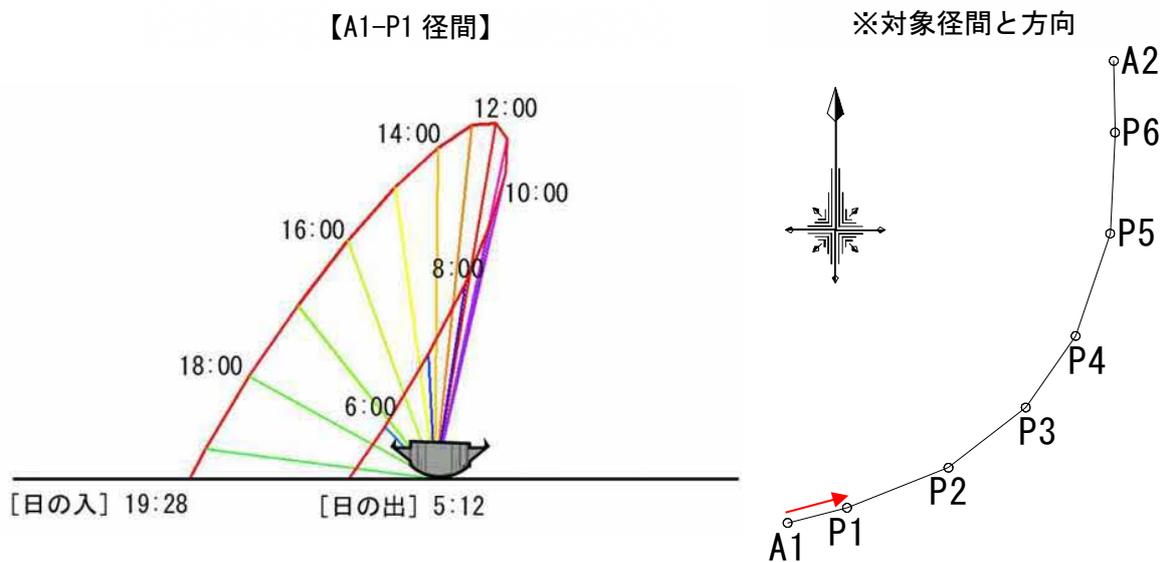


図 2.6-33 A1-P1 径間の 1 日の太陽位置の変化 (2022/6/16)

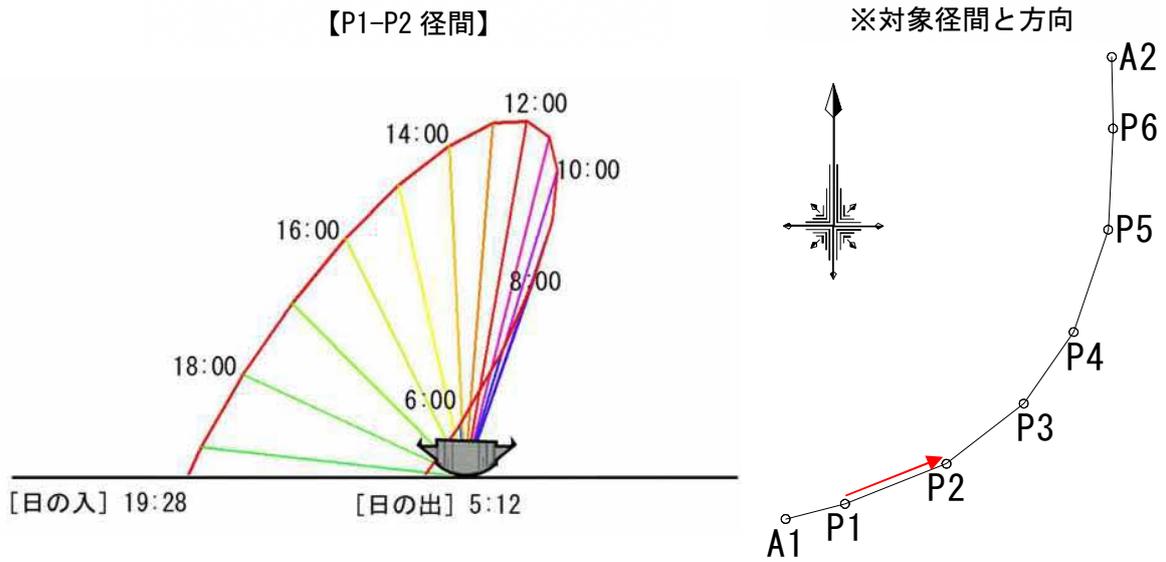


図 2.6-34 P1-P2 径間の 1 日の太陽位置の変化 (2022/6/16)

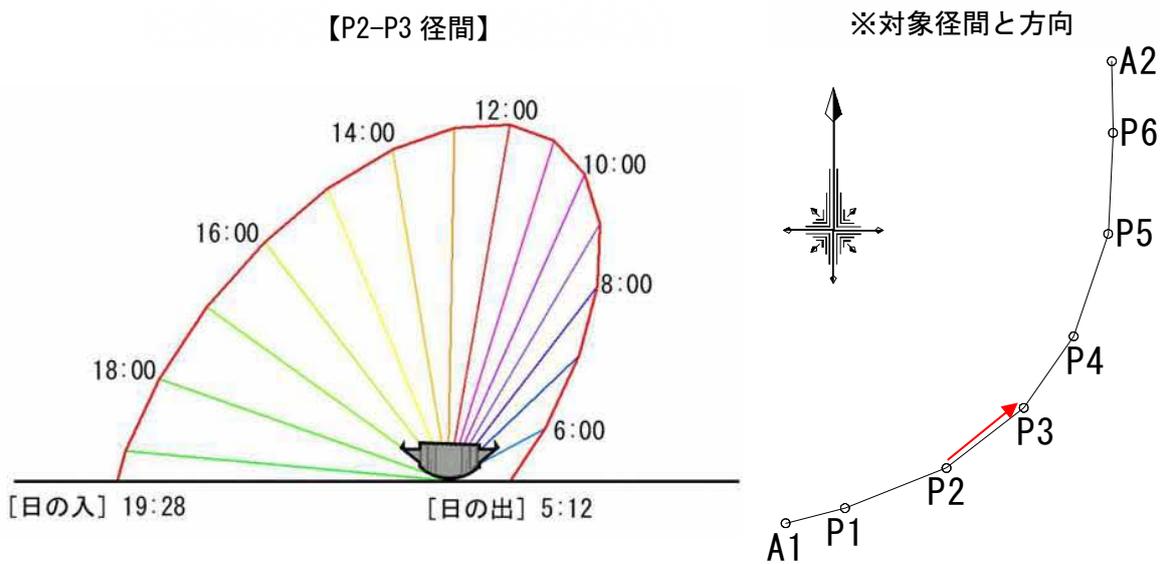


図 2.6-35 P2-P3 径間の 1 日の太陽位置の変化 (2022/6/16)

3) 支承移動量調査

図 2.6-36 に橋脚毎の左右支承変位の経時変化を示す。温度変化に伴い支承変位が生じており、変位量は、P4 支承、P5 支承、P6 支承、A2 支承の順に変位差が生じる。また、各橋脚で左右支承の変位に差が生じている。変位量は日により異なるが、これらの挙動は日による違いはみられず、計測期間では毎日同様の挙動を示す。応急対策していない P4 橋脚の左右支承の変位差を図 2.6-37 に示す。計測期間で最大 1.7mm の差が生じており、外気温の変化に伴い変位差も変化する。

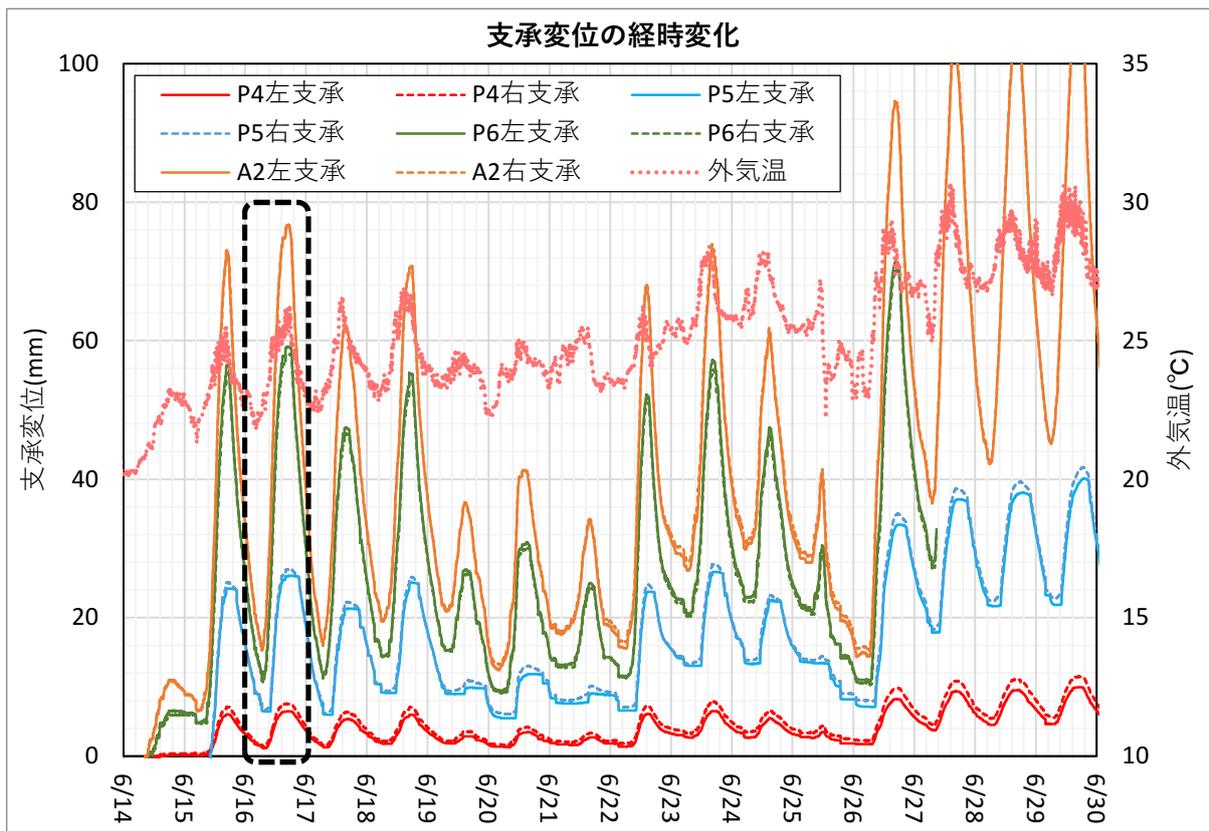


図 2.6-36 P4 支承変位の時刻歴変化

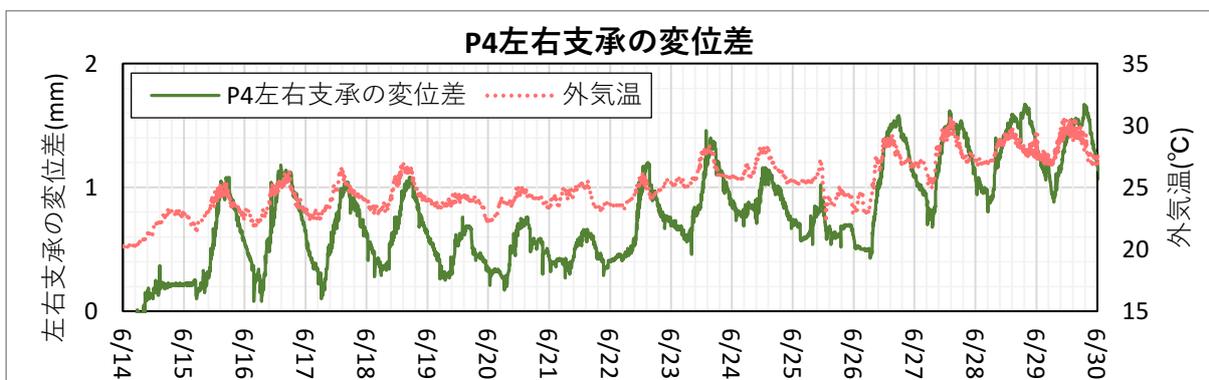


図 2.6-37 P4 左右支承変位差の時刻歴変化

図 2.6-38 に調査結果より整理した部材温度最低時である 6 時の支承変位と床版部材温度最高時である 16 時の支承変位の模式図を示す。図より、支承変位は温度と相関関係にあり、固定支承である P3 橋脚から離れるほど、変位は大きくなる。

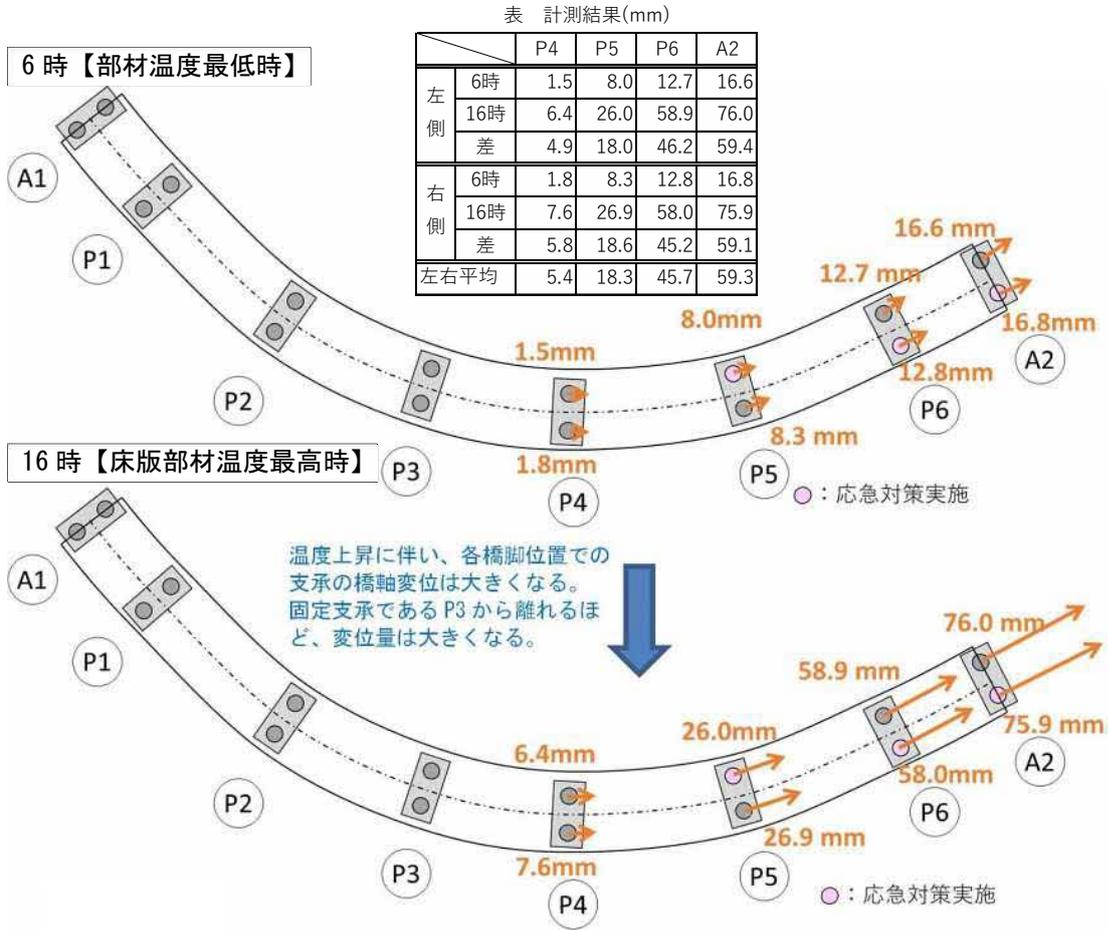


図 2.6-38 支承の橋軸方向変位挙動

4) 下部構造変位計測

図 2.6-39 に P4 橋脚、P5 橋脚および P6 橋脚の下部構造変位の経時変化を示す。計測値は各橋脚の方位角に合わせて補正し、下部構造軸方向および下部構造直角方向として整理した。図は計測を行った 2022/6/16 の 1 日の下部構造中心（左右の 2 支承間中心）の位置を示す。下部構造では下部構造軸方向および下部構造直角方向への変位が生じていた。

下部構造変位を示す図は 0 時を起点として整理した。経時変化の図より、温度上昇に伴い終点側に変位が生じ 17 時をピークに、以降は温度低下に伴い 0 時の位置に近づくことが分かる。支承可動方向である下部構造の軸方向に変位が生じていることから、支承が上部構造を拘束し下部構造に力を伝達したと考えられる。また、0 時と 24 時がほぼ同じ位置になることから、温度による変動作用の影響であると考えられる。

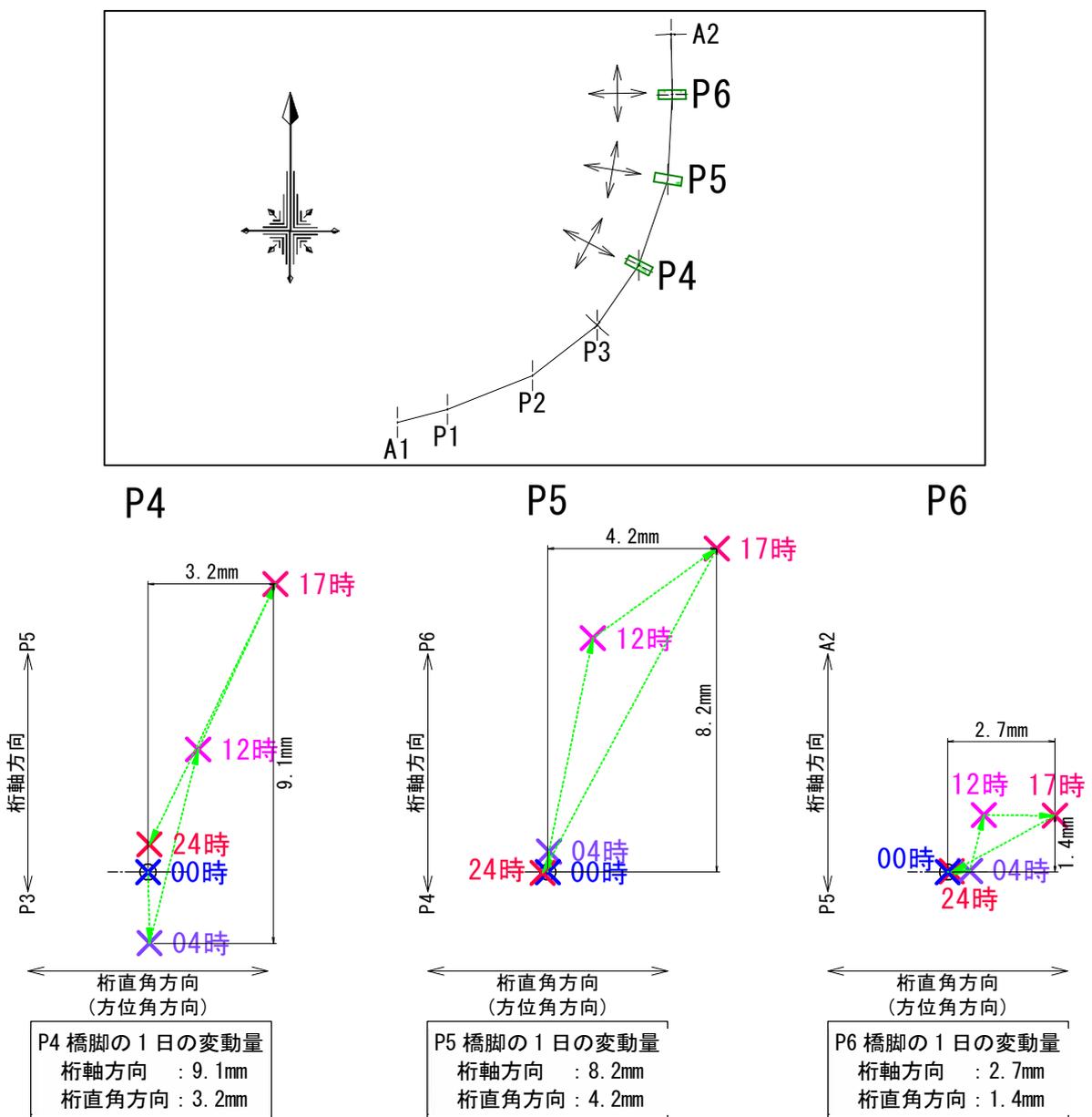


図 2.6-39 下部構造変位の経時変化

5) 桁伸縮量調査

a) 桁ひずみ計測

桁ひずみ計測では、自己温度補償型のひずみゲージを使用した。図 2.6-40 に P3-P4 径間の各計測箇所における桁ひずみの時刻歴変化の結果を示す。各計測箇所において温度とひずみは相関があり、1 日の温度変化に伴い、桁に圧縮ひずみや引張ひずみが生じることを確認した。図 2.6-41 に径間毎の各部材のひずみの 1 日の挙動を示す。ひずみの発生方向は径間および部材毎に異なり、その発生状況は表 2.6-7 のとおりである。

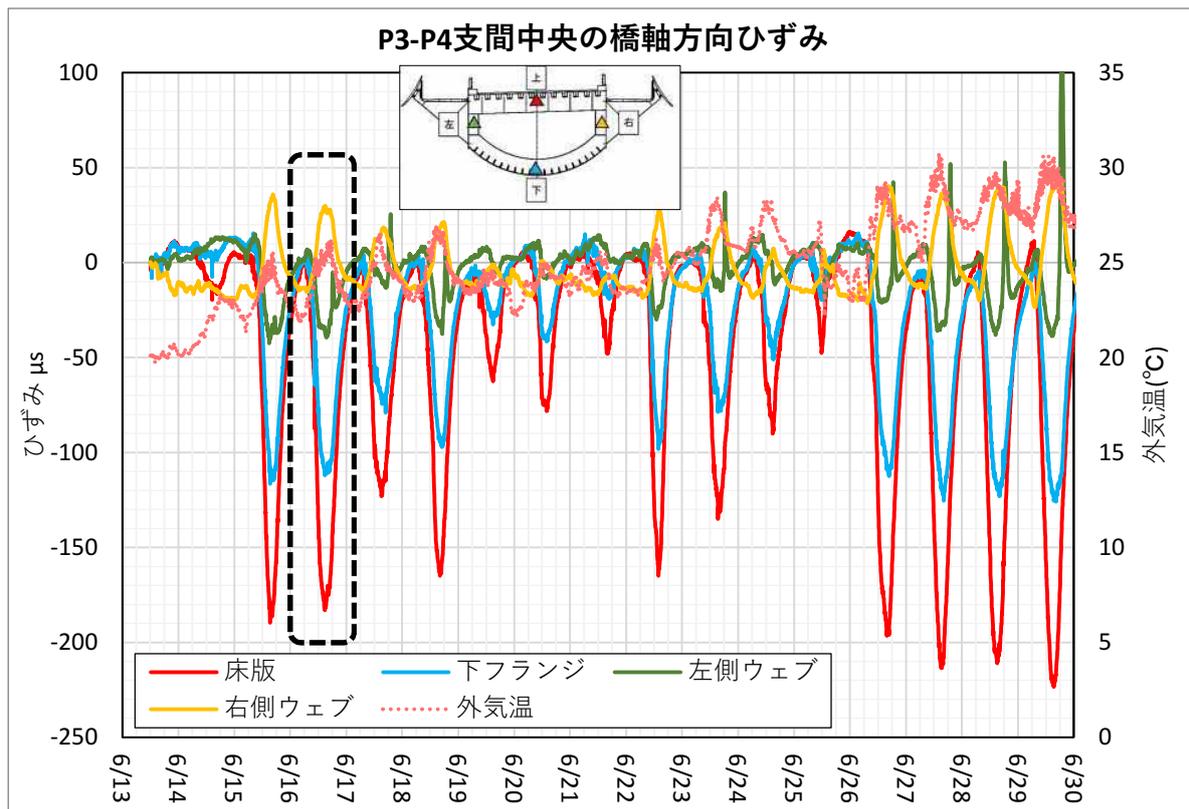


図 2.6-40 桁ひずみおよび外気温の時刻歴変化

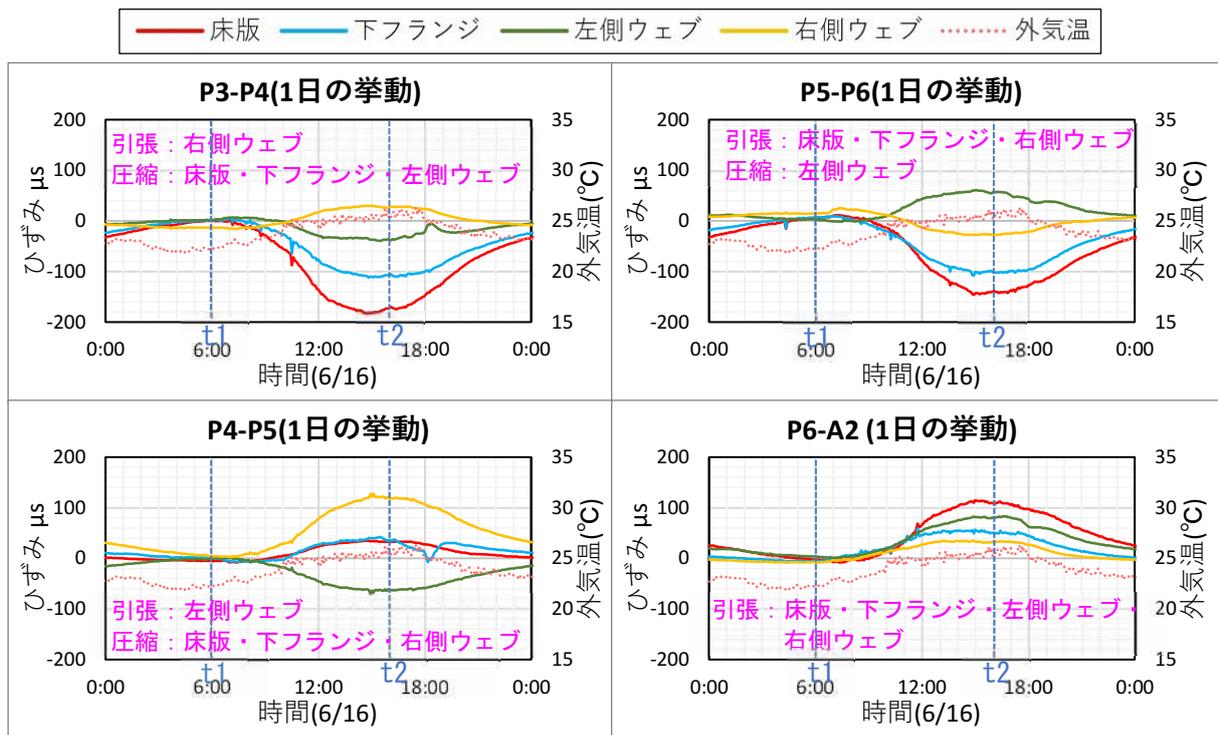


図 2.6-41 径間毎の桁ひずみの 1 日の温度変化

表 2.6-7 温度上昇時 (16 時) のひずみの方向

	P3-P4 径間	P4-P5 径間	P5-P6 径間	P6-A2 径間
床版	- (圧縮)	+ (引張)	- (圧縮)	+ (引張)
下フランジ	- (圧縮)	+ (引張)	- (圧縮)	+ (引張)
左ウェブ	- (圧縮)	- (圧縮)	+ (引張)	+ (引張)
右ウェブ	+ (引張)	+ (引張)	- (圧縮)	+ (引張)

温度変化に伴う鉛直方向の挙動を図 2.6-42 に示す。各部材温度が外気温と同程度となる (図 2.6-18 参照) 6 時では、床版および下フランジのひずみは小さく、径間によらずほぼ 0°C である。床版の部材温度最高時 (16 時) に計測されたひずみは床版と下フランジでひずみの発生方向は同じであり、P3-P4 径間は圧縮、P4-P5 径間は引張、P5-P6 径間は圧縮、P6-A2 径間は引張となる。左側ウェブの温度上昇時 (18 時) の各径間のひずみも同様の方向に発生する。なお、ひずみの大きさは、床版の部材温度最高時 (16 時) が左側ウェブの温度上昇時 (18 時) よりも高い。

温度変化に伴う水平方向の挙動を図 2.6-43 に示す。各部材温度が外気温と同程度となる 6 時では、床版および下フランジと同様にひずみは小さく、径間によらずほぼ 0°C である。床版の部材温度最高時 (16 時) では、P3-P4 径間および P4-P5 径間は、2.6(3)2 桁の部材温度調査で示したとおり、左側ウェブが 16 時以降に日射の影響により温度上昇するため、曲線の外側に膨らむような挙動となる。P5-P6 径間は曲線の内側にシフトしており、直線区間である P6-A2 径間は左右ウェブのひずみはともに引張となる。これは左側ウェブの温度上昇時 (18 時) も同様の傾向であるが、左右ウェブのひずみの大きさは、床版の部材温度最高時 (16 時) が左側ウェブの温度上

昇時（18時）よりも高い。日射を受ける左側ウェブも同様の傾向のため、橋梁全体のひずみは、温度変化が大きい床版の部材温度の影響を受けると考えられる。

また、2.6(3)2)桁の部材温度調査で示したとおり、P6-A2 径間の左右ウェブの部材温度は、他径間よりも高い傾向があるが、ひずみ計測では、P4-P5 径間で P6-A2 径間よりも大きなひずみが計測されており、ひずみの大きさに影響するのは部材温度の高低のみではないことが分かる。

本調査では、自己温度補償型のひずみゲージを使用しているため、計測されたひずみは、長大な曲線橋の桁の変形に起因すると考えられる。温度変化に伴った曲線の外側への桁の変形を支点部で直角方向に拘束していることからひずみが発生し、さらに左右のウェブで差異が生じていると考えられる。また、床版および下フランジでは、上下の温度差による変形が連続桁中間支点で拘束されるため、ひずみが発生すると考えられる。

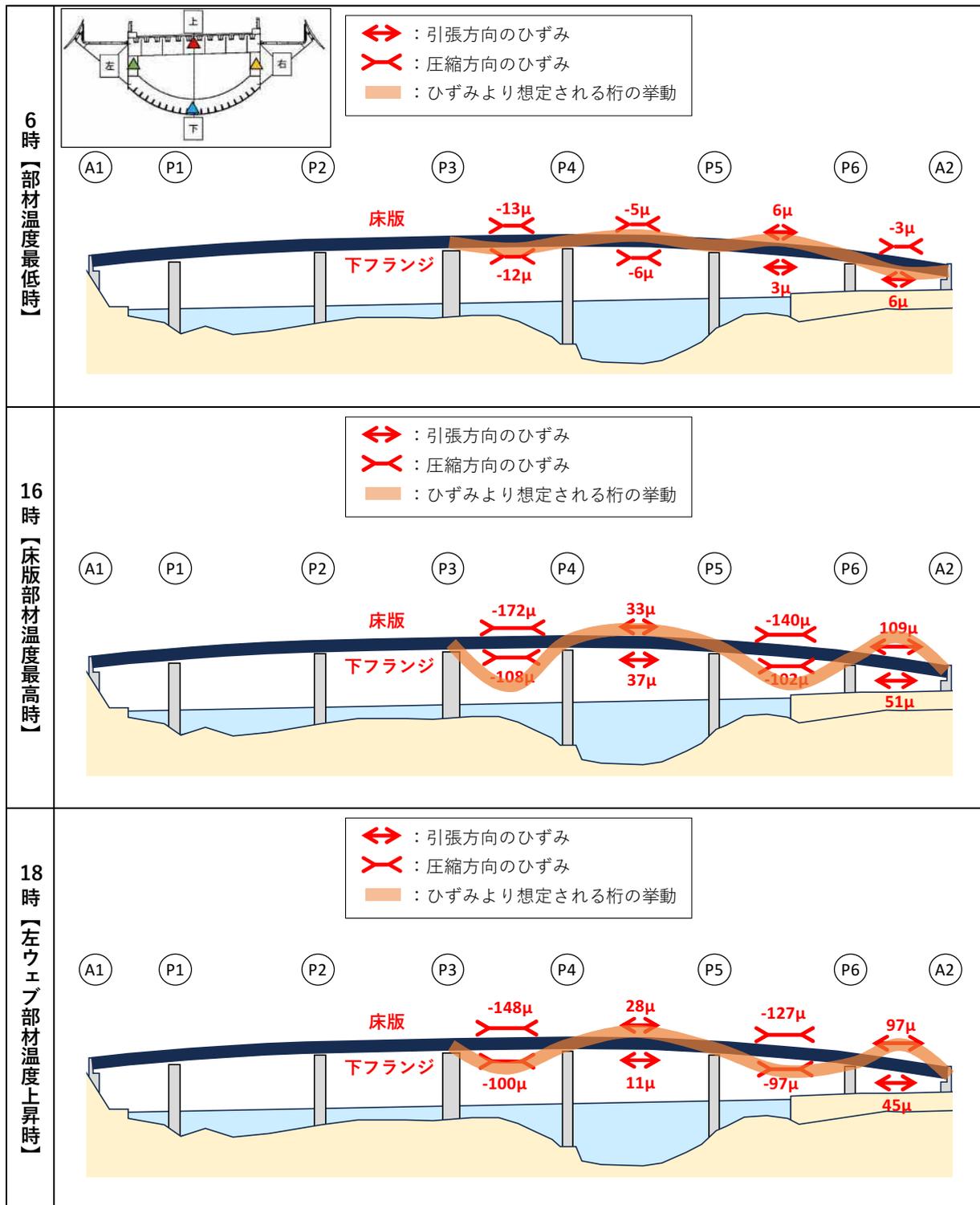


図 2.6-42 温度変化に伴う鉛直方向の想定される桁の挙動

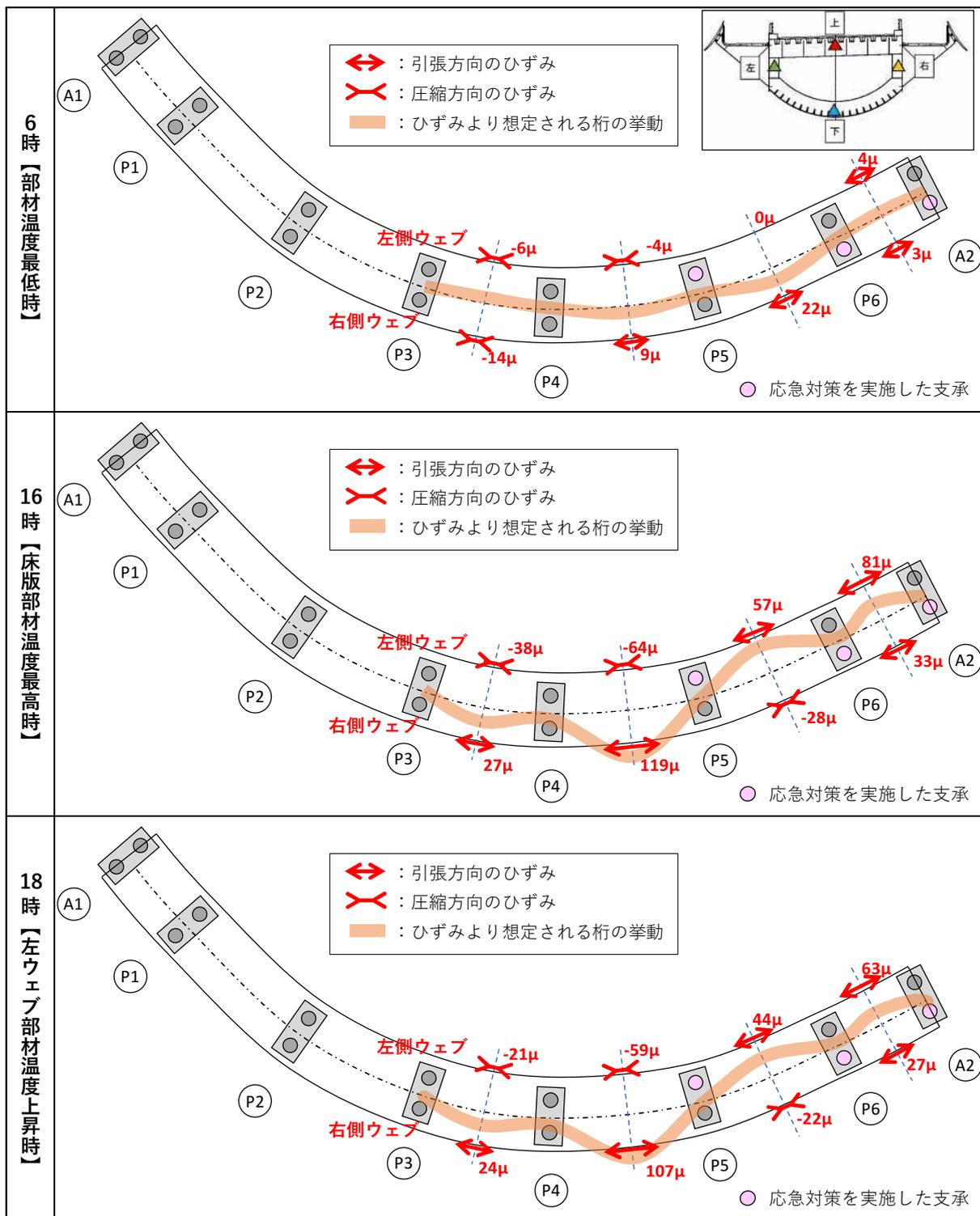


図 2.6-43 温度変化に伴う水平方向の想定される桁の挙動

b) 傾斜計測

支承の傾斜計測の結果、傾斜は温度と相関があり、1日の温度変化に伴い傾斜が生じることを確認した。最低気温時と温度上昇時の挙動を図 2.6-44 に示す。温度上昇時には、全体的に右側（曲線の外側）に傾斜することが分かる。傾斜角は支承の回転可能量（約 3.4° ：道路橋支承標準設計、平成 5 年 4 月、日本道路協会）と比べて小さい。また、P4 橋脚のみ左右の支承の軸方向の傾斜は反対の挙動を示し、その他の下部構造では傾斜の方向は同じとなる。

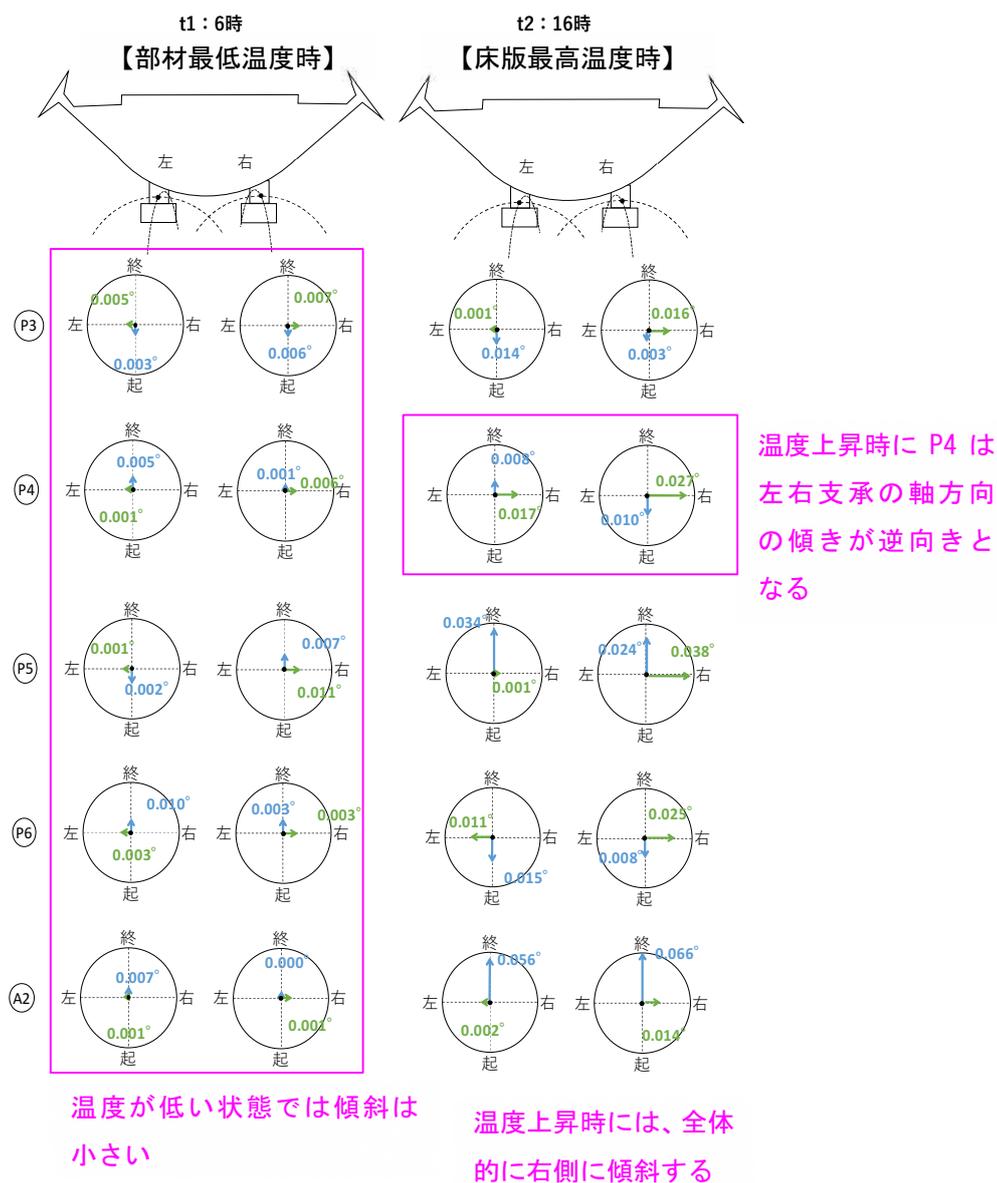


図 2.6-44 支承傾斜の温度上昇時の挙動

P4 支承の傾斜（橋軸方向）の時刻歴変化を図 2.6-45 に示す。支承の傾斜は温度との相関があることが分かる。今回確認した傾斜角は支承の回転可能量（約 3.4° ）と比べて小さい。図 2.6-46 に P3 支承から A2 支承の 1 日の傾斜の挙動を示すが、P4 支承のみ左右支承の軸方向の傾斜は反対の挙動を示し、その他の下部構造では左右支承の傾斜の方向は同じである。

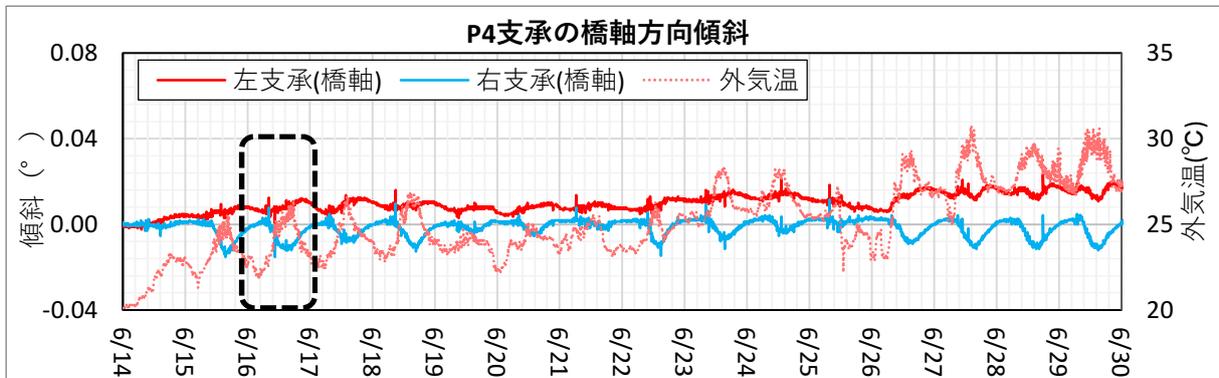


図 2.6-45 橋軸方向支承傾斜の時刻歴変化

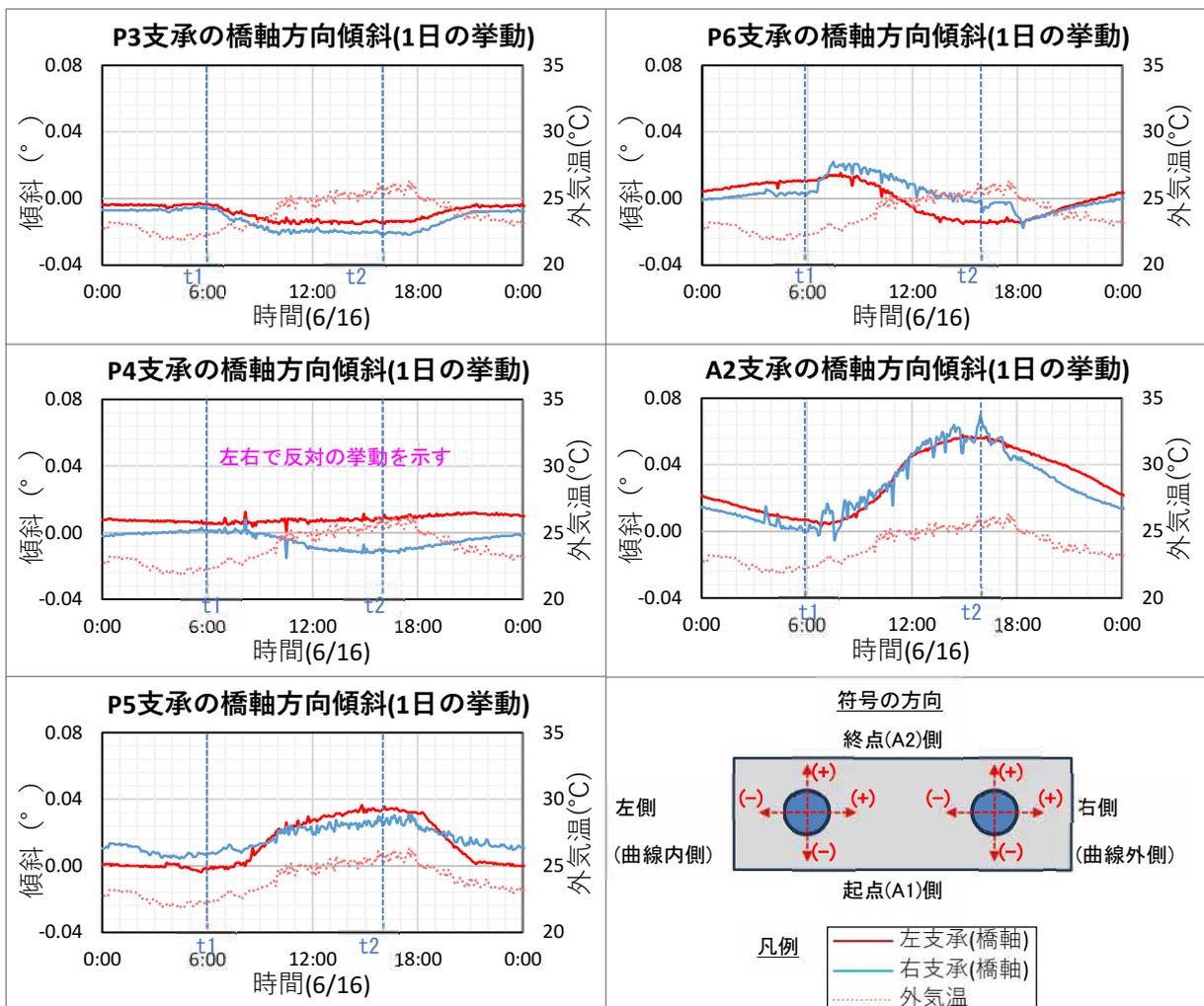


図 2.6-46 6/16 における各支点での橋軸方向支承傾斜の変化

P4 支承の傾斜（橋軸直角方向）の時刻歴変化を図 2.6-47 に示す。支承の傾斜は温度との相関があることが分かる。今回確認した傾斜角は支承の回転可能量（約 3.4° ）と比べて小さい。図 2.6-48 に P3 支承から A2 支承の 1 日の傾斜の挙動を示す。すべての支承で、全体的に右側（曲線の外側）に傾斜することが確認できる。

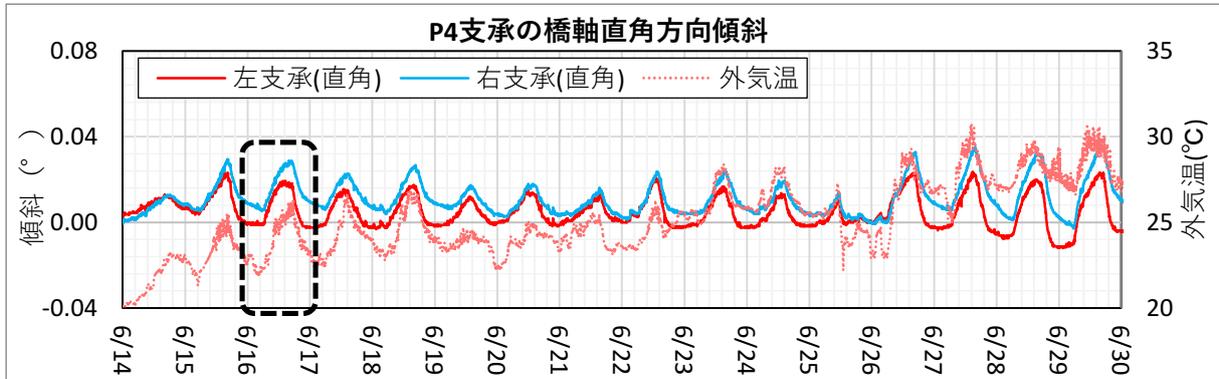


図 2.6-47 橋軸直角方向支承傾斜の時刻歴変化

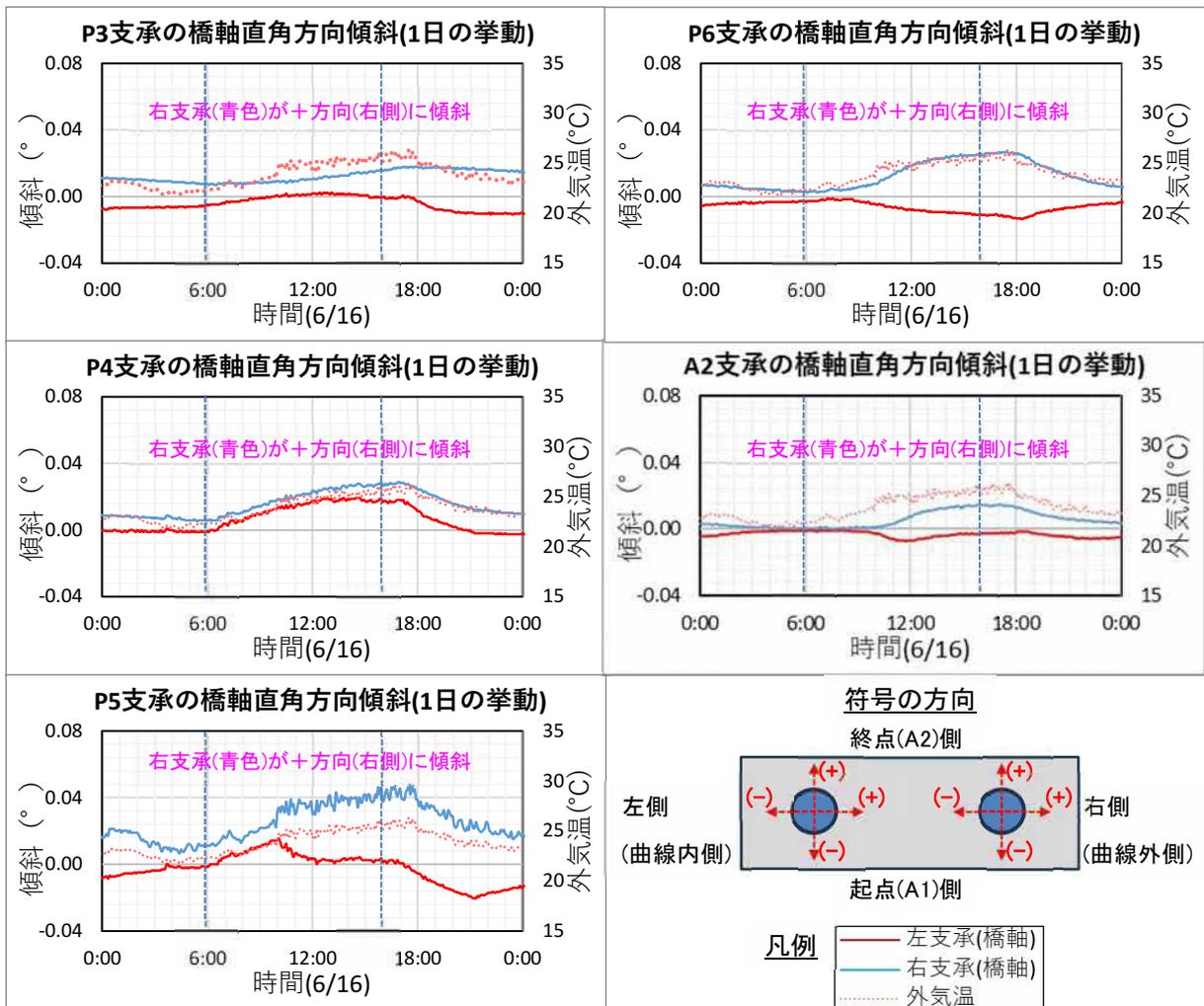


図 2.6-48 6/16 における各支点での橋軸緒角方向支承傾斜の変化

6) 支承反力調査

P6 橋脚の左右支承鉛直反力および P5-P6 径間支間中央における床版、下フランジ、左側ウェブ、右側ウェブの時刻歴変化を図 2.6-49 に示す。

左右ウェブには午前中に温度差が生じており、5 時過ぎから右側ウェブの温度が上昇し、10 時頃に左側ウェブと同程度の温度となる。これは、2.6(3)2)e) P5-P6 径間の温度時刻歴変化に示したように、橋梁の右側から太陽が上昇するため、日の出とともに右側ウェブの温度が上昇したものと考えられる。そしてこのタイミングは右側支承反力が増加傾向になるタイミングと一致する。また、その他の時間帯では、左右ウェブ温度差は小さい。

1 日をとおして床版の温度は高く、下フランジの温度は低いが、7 時頃では同程度の温度となる。これは、2.6(3)2) 桁の部材温度調査に記載のとおり、床版は日中に温度が上昇し、暖められた床版が夜間に冷やされて 7 時頃で他部材の温度と同程度になったものと考えられる。そして 7 時頃から太陽の位置が高くなったことで床版の温度が上昇していく。この時刻は左側支承の反力増加の時刻と一致する。

計測された左右の支承反力は、温度変化に伴い変動するが、それぞれの平均値と設計で用いられた鉛直反力とを比較すると、左側支承（曲線の内側）では同じ値となったが、右側支承（曲線の外側）では常に値が高く、平均値で 800kN 程度の差が生じていた。また、以下に記すとおり、温度上昇時に左右支承の反力比率が変化しており、温度の上昇に伴い、右側支承の反力が増加する。

部材最低温度時（6 時） 左側：右側 = 5,451/11,974 : 6,523/11,974 = 0.455 : 0.545

床版最高温度時（16 時） 左側：右側 = 5,139/11,949 : 6,810/11,949 = 0.430 : 0.570

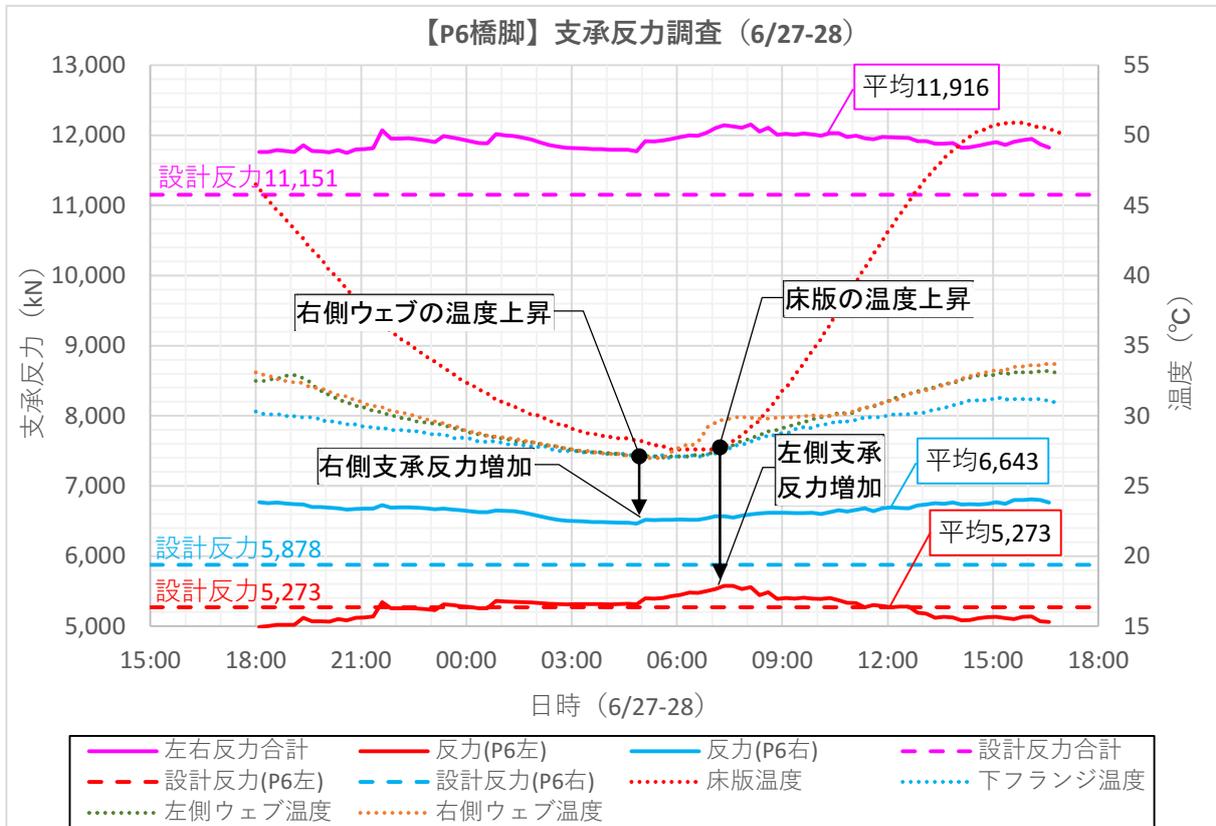


図 2.6-49 P6 支承反力調査結果

反力差と直角方向支承傾斜の時刻歴変化を図 2.6-50 に示す。反力差は、温度変化による反力の増減量を確認するために、最低温度時 6 時の反力を基準 ($R_d=0\text{kN}$) とし、そこからの差を算出したものである。左側支承は温度上昇時に反力が増加する。増加量は、支承反力最低時の 5 時から 16 時で $+300\text{kN}$ 程度である。一方で、右側支承は温度上昇時に反力が減少する。減少量は、支承反力最高時の 7 時 30 分から 16 時で -500kN 程度である。

変動する温度変化に対する反力の感度 (1°C 当たりの反力の変化量) は、以下のとおりとなる。

左側支承の温度変化に対する反力の感度 $-14.4\text{kN}/^\circ\text{C}$

右側支承の温度変化に対する反力の感度 $+13.3\text{kN}/^\circ\text{C}$

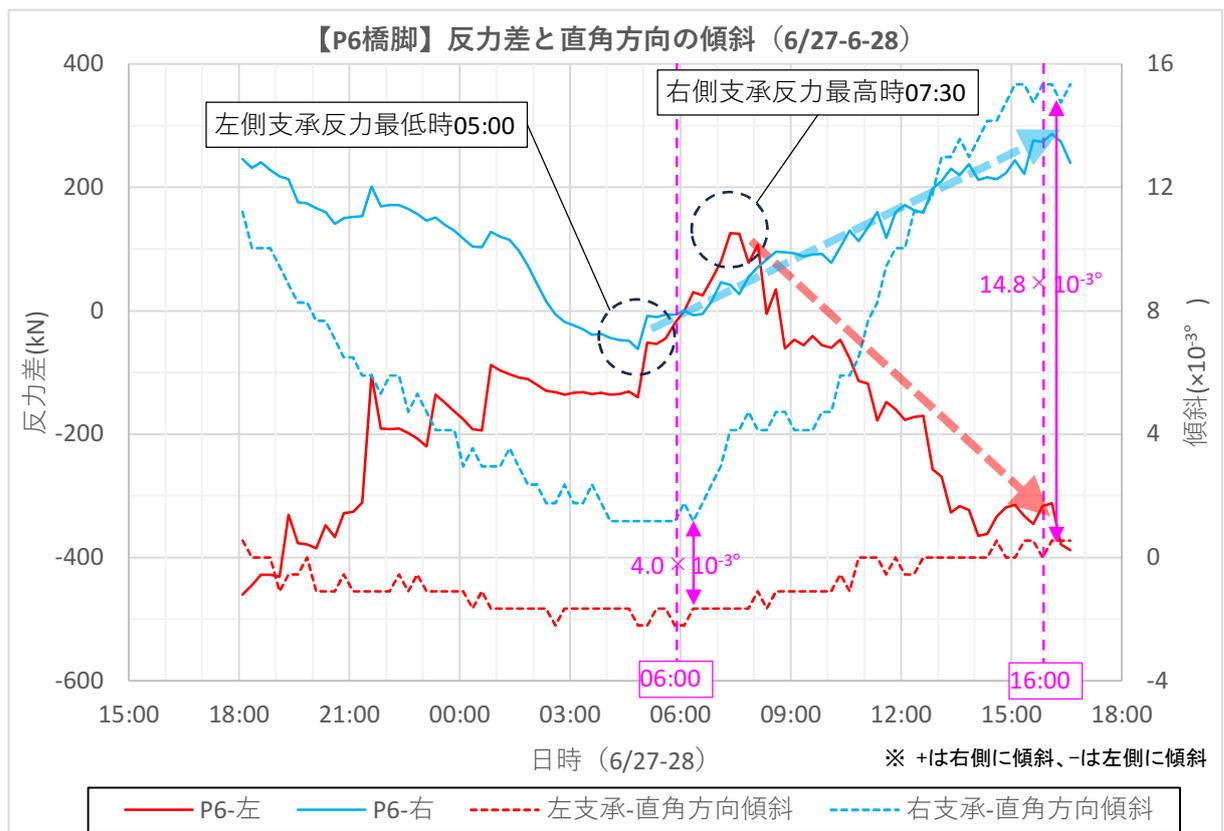


図 2.6-50 P6 支承反力差と直角方向支承傾斜

想定される鉛直反力の増減を図 2.6-51 に示す。鉛直反力は温度変化に伴い変動し、左右の反力の比率に変化が生じる。温度上昇に伴い右側支承の反力が増大するため、曲線の外側に倒れこむような挙動であると考えられる。

直角方向の支承傾斜も温度変化に伴い変動し、左右の支承ともに温度上昇時に傾斜の値は+方向に増えており、右側に傾斜することが分かる。これは鉛直反力の増減から想定される挙動とも一致する。なお、左右支承で温度上昇に伴う橋軸直角方向の傾斜の増加量には差が生じており、曲線の外側に位置する右側の方が大きく傾く。

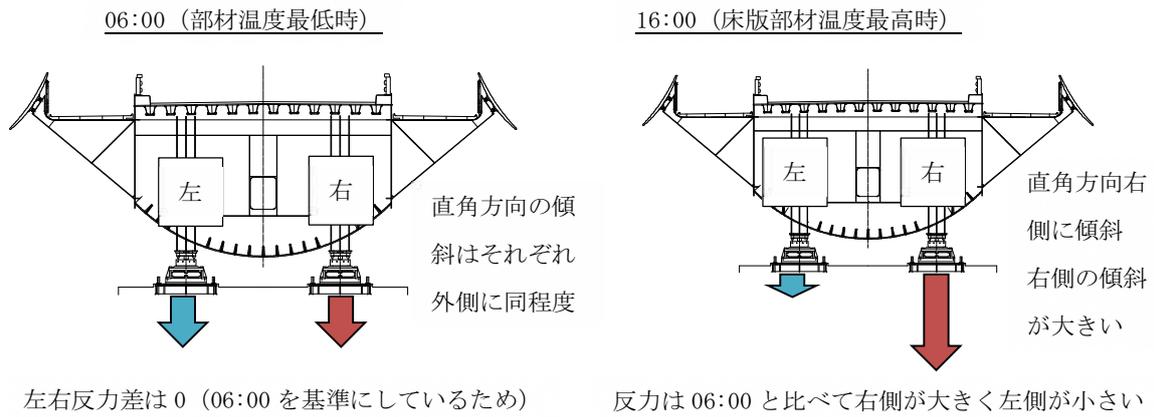


図 2.6-51 想定される鉛直反力の増減

(4) 考察

温度変化に着目した全体挙動調査結果に関するまとめを以下に示す。ただし、P5（左）支承、P6（右）支承、A2（右）支承は応急対策済みであり、損傷前と支承条件は同じではなく、調査結果も損傷前とは同じではないと考えられる。

- ・設計時の上部構造線形図に示される下部構造座標値より算出される支承間距離と下部構造測量より算出される支承間距離はよく一致した。
- ・温度分布調査の結果より、1日の中で全体の温度変化は10～15℃程度、床版と他部材との温度差は最大で20℃となることを確認した。P3-P4径間、P4-P5径間の左側ウェブでは、17時から19時に下フランジや右側ウェブと比べて最大13℃程度の温度差が生じることを確認した。また、1日の中での太陽の位置の軌跡と各径間の方向から、径間毎に各部材への日射の時刻が異なることを確認した。日射の時刻で温度上昇するため、径間毎や部材毎に温度差が生じる。さらに、日射の影響が小さく部材の温度が低くなる冬期にはこの温度差がさらに大きくなると考えられる。
- ・支承移動量調査の結果より、温度変化に伴い、支承変位が生じており、その値は外気温と相関関係にあり、固定支承であるP3橋脚から離れるほど変位量は大きくなることを確認した。
- ・桁伸縮量調査の結果より、床版および下フランジでは、上下の部材間の温度差による変形が連続桁中間支点で拘束されるためひずみが発生し、温度上昇時にP3-P4径間は圧縮、P4-P5径間は引張、P5-P6径間は圧縮、P6-A2径間は引張となることが分かった。左右ウェブでは、温度変化に伴った曲線の外側への桁の変形が支点部で直角方向に拘束されていることからひずみが発生し、温度上昇時に、P3-P4径間およびP4-P5径間は、曲線の外側に膨らむような挙動となり、P5-P6径間は曲線の内側にシフトし、直線区間であるP6-A2径間は左右ウェブのひずみはともに引張となることが分かった。
- ・下部構造移動量調査の結果より、温度変化に伴い、支承条件が可動である橋軸方向に下部構造の変位が生じることが分かった。下部構造で確認された変位は支承部が拘束されることで下部構造に水平力が伝達しているために生じると考えられ、支承はほぼ固定状態にあったと考えられる。
- ・支承反力調査の結果より、当初設計の確認のために実施した数値解析と同様に全体温度変化と部材間温度差の影響により鉛直反力が変動することが分かった。また、温度変化により左右支承の反力比率が変化することを確認した。

以上のことから、上部構造は、橋梁全体の温度変化に加え、1日の中での太陽の位置の軌跡と各径間の方向により径間毎や部材間に生じる温度差の影響を受け複雑な挙動を示し、支承に拘束が生じ、下部構造に力が伝達することを確認した。よって、長大で特殊な断面形状の曲線橋という本橋特有の条件下において、上部構造の規模の大きさより支承部材は常に大きな反力下にある中で、桁の動きが支承部で拘束された状態となり、温度変化および温度差により鉛直反力に変動が生じ、これが繰り返されてきたことにより、支承部が損傷したと考えられる。