

寒地農業用水路におけるFRPM板
ライニング工法の耐久性に関する研究

共同研究報告書

平成24年7月

独立行政法人土木研究所寒地土木研究所
株式会社栗本鐵工所

Copyright © (2012) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、独立行政法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、独立行政法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

寒地農業用水路における FRPM 板 ライニング工法の耐久性に関する研究 共同研究報告書

(独) 土木研究所 寒地土木研究所

寒地農業基盤研究グループ 水利基盤チーム

上席研究員	中村 和正
総括主任研究員	小野寺康浩
主任研究員	佐藤 智
主任研究員	田頭 秀和 ^{※1}
研究員	金田 敏和
研究員	佐藤 大輔 ^{※2}
研究員	横木 淳一 ^{※3}

(株) 栗本鐵工所 産業建設資材事業本部 化成品事業部

生産本部 製造部

技術開発部 設計グループ

技術開発部 設計グループ

部長	安松 徹
グループ長	藤本 光伸
	片平 和司

※ 1 : 現 (独) 農業・食品産業技術総合研究機構農村工学研究所施設資源部構造研究室主任研究員

※ 2 : 現 北海道開発局札幌開発建設部樺戸農業開発事業所開発専門職

※ 3 : 現 北海道開発局網走開発建設部農業整備課開発専門職

要旨

寒冷な条件下でのコンクリート開水路の補修工法の耐久性を検証する目的で、FRPM 板を用いた表面被覆工法の現地試験施工と室内試験を行った。試験施工では補修部分の目視調査、緩衝材の含水比の測定等を、また、室内試験では寒冷地の供用後の条件を想定した環境における緩衝材の性能の変化に関する検証試験を実施した。これらの試験の結果、補修後約 3 年経過の時点では、本研究において対象とした FRPM 板を用いた表面被覆材による補修工法は、寒冷地の秋から冬の寒冷条件下の施工に対応できることが確認された。また、水路としての供用性に問題はなく、補修施工部にも特段の変状はなく良好な状態を維持している。

キーワード：コンクリート開水路、補修、FRPM 板、緩衝材、表面被覆工法、寒冷地、試験施工

まえがき

社会資本として整備されてきた農業水利施設は、高度経済成長期に集中的に整備されたものが多く、今後更新時期を迎える施設の増加が予想される。一方、昨今の厳しい予算条件によって、施設のライフサイクルコストの低減が求められており、効率的なストックマネジメント技術の開発ニーズが高まっている。このため、老朽化により施設が更新時期を迎える前に、経済的かつ合理的な補修工法を早急に確立することが望まれている。

このような状況を踏まえて、独立行政法人土木研究所寒地土木研究所と株式会社栗本鐵工所は、2006年度から2009年度まで積雪寒冷地におけるコンクリート農業用開水路の補修技術の耐久性に関する検証を目的とした共同研究を行った。

コンクリート開水路は、他のコンクリート構造物と比べて、部材厚が薄いことや湿潤な環境におかれるといった特徴がある。さらに、積雪寒冷地においては、冬期には過酷な温度環境に曝されるために、凍結融解作用などにより劣化の進行が速いと考えられる。このような劣化に対して、維持管理費を抑制しながら施設を長期にわたって供用するためには、寒冷地で適用可能な補修工法の開発が必要となる。コンクリート開水路の主な補修工法として表面被覆工法があるが、現状では積雪寒冷地への適用技術が十分に確立されているとはいえない。

このため、寒冷な条件下での表面被覆工法の適用性および耐久性の検証を行うことを目的とし、北海道北部の老朽コンクリート開水路において、強化プラスチック複合板（FRPM板）を用いた補修工法の試験施工を行った。この試験施工では、落水後の秋から冬にかけての寒冷気象条件下における施工性の確認および供用開始後のモニタリングにより補修後の初期段階での変状の有無の検証などを行った。また、本工法の長期的な耐久性を推察するために、供用開始後の条件を想定した室内試験を行った。

これらの研究成果として、「寒地農業用水路におけるFRPM板ライニング工法の耐久性に関する研究」の共同研究報告書を取りまとめた。

目次

第1章	研究目的	1
第2章	FRPM板表面被覆工法の特徴	1
2.1	補修工法の特徴	1
2.2	補修材料の特徴	2
2.3	補修材料の性能	3
第3章	研究方法	6
3.1	水路補修の試験施工	6
3.1.1	施工箇所	6
3.1.2	施工手順	6
3.1.3	施工後の観測	9
3.2	FRPM板補修材料で被覆された水路躯体コンクリートの温度解析	9
3.3	凍結融解を受けた緩衝材の圧縮残留ひずみ	11
第4章	研究結果	12
4.1	水路補修の試験施工	12
4.1.1	試験施工区間近傍の気象概要	12
4.1.2	観測結果	12
4.2	FRPM板補修材料で被覆された水路躯体コンクリートの温度解析	15
4.3	凍結融解を受けた緩衝材の圧縮残留ひずみ	17
第5章	結論	19
第6章	今後の問題点等	19
巻末資料		

第1章 研究目的

北海道のような寒冷地でコンクリート開水路を補修する際には、施工時に低温であることや供用開始後に凍結融解作用を受けることなどの寒冷地特有の課題に対応できる技術が求められる。しかし、これまでに寒冷な条件下での補修工法の耐久性を検証した事例はほとんどみられない。

このため、本研究では現場における水路補修に資することを目的として、寒冷地の水路補修の試験施工および寒冷条件下での供用時の条件を想定した室内試験を行うことにより、寒冷地における補修工法の耐久性を評価する。

本研究で用いた補修工法は、水路特有の劣化である磨耗に対する抵抗性が高い工法を選ぶ必要があることから表面被覆工法とした。使用した素材は、温暖な府県で施工実績のあるFRPM板とした。なお、無機系および有機系材料を用いた表面被覆工法については、別の共同研究で扱った。

本研究は、独立行政法人土木研究所、株式会社栗本鐵工所による共同研究であり、実施期間は2006年6月1日から2010年3月31日までである。共同研究では、独立行政法人土木研究所が施工材料の室内凍結融解試験と現地施工区間での観測による適用性評価を、株式会社栗本鐵工所が現地試験施工と供試体製作を担当した。

第2章 FRPM板表面被覆工法の特徴

この章では、本研究で対象としたFRPM板による表面被覆工法の特徴を、この研究以前に得られている試験値などを用いて説明する。

2.1 補修工法の特徴

本工法は老朽化したコンクリート水路を取り壊すことなく、水路の内面に緩衝材を挟みこみFRPM板をアンカーボルトで固定して、板同士の継ぎ目部に目地材をシーリングする工法である。

温暖な府県では、既設水路とFRPM板との間に所定のすき間を設けて、無収縮モルタルを充填して施工している。なお、このモルタルには、凍結融解抵抗性のあるものを採用しているものの、既設水路の背面から伝わった水が既設水路とモルタルの間に滞留して凍結融解が起こるため、優れたモルタルを使用しても耐久性に問題が生じる。本共同研究では、モルタルの代替として緩衝材を使用して凍結融解に柔軟に対応した工法を採用した。本工法の模式図を図-1に示す。

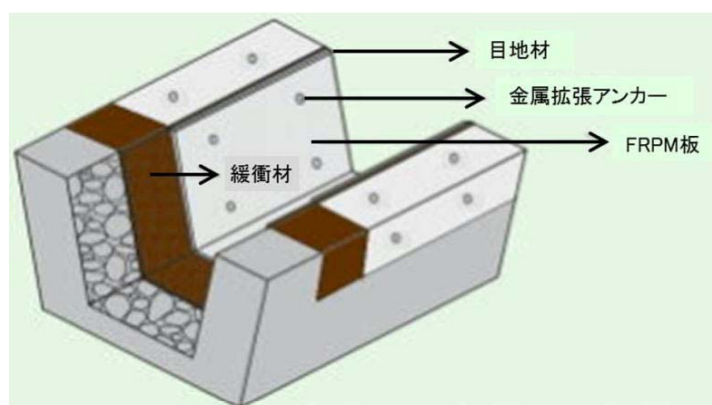


図-1 工法模式図

なお、FRPM板の突き合わせ部および板の頂部は目地材を使用した（写真-1）。本工法は、湿潤状況下での施工も可能で、天候や現場の状況にも左右されにくい工法である。FRPM板および緩衝材の現場での切断、穴開け加工等も、特殊な工具や技量を必要とせず、市販の工具で容易に施工することができる。また、簡便な工法なので、作業スピードが早く、工期短縮、コスト縮減にもつながる。本工法では既設水路を壊さず、材料も軽量のため重機を必要としないため騒音や震動の抑制などが期待できる。



写真-1 目地材によるシーリング箇所

2.2 補修材料の特徴

本工法の基本仕様および適用範囲を、表-1に示す。アンカーが施工可能であれば、どのような水路形状でも対応できる工法である。また、施工時間は、100㎡あたり3日間程度で施工できる。本工法で使用する材料を表-2に示す。使用したFRPM板は板厚10mm(20kg/㎡)で、原板のサイズは1m×2mを最大のサイズとし、プレス成形している。

金属拡張式アンカーは、芯棒を打ち込むだけの簡単な構造で施工性にも優れており、また、材質は芯棒も含めてSUS304相当であるため高い耐食性を有する。

目地材は1成分湿気硬化型ウレタン系を採用している。これは耐候性、接着性、耐久性というあらゆる面で高い性能を有した材料である。

緩衝材は既設水路とFRPM板の隙間に進入する水分が凍結することで生じる膨張圧を緩和するためのものである。

表-1 基本仕様および適用範囲

項目	基本仕様	適用範囲・備考
対象水路	現場打ち開水路, 排水路	S-2・S-3・S-4 [※]
	ベンチフリューム	S-2・S-3・S-4 [※]
	矩形水路	S-2・S-3・S-4 [※]
施工延長	特に制限無し	
施工時間	100㎡あたり(w1000×h1000×33m)	3日間程度

※S-2・S-3・S-4は農業水利施設の機能保全の手引き「開水路」に示す健全度ランク

表-2 使用材料

材料名称	材質又は形状
強化プラスチック複合板 (FRPM板)	板厚 : 10mm 材質 : FRPM 質量 : 20kg/m ² 最大成形寸法 : 1m×2m
金属拡張式アンカー (オールアンカーSCタイプ) (パッキンt2)	材質 : SUS304相当 寸法 : M8×90L ナット : M8用特殊ナット
目地材 (プライマー含) -(Sikaflex-PRO2UV)	材質 : 1成分湿気硬化型ウレタン系
緩衝材 (t=10mm)	①EPT (エチレンプロピレンゴム) ②PE (発泡ポリエチレン, 15倍発泡) ③EPS (ビーズ法ポリスチレンフォーム, 50倍発泡)

2.3 補修材料の性能

(1) FRPM板の一般的性能

FRPM板の構造を図-2に示す。FRPM板は表面にFRP層、中間層に樹脂モルタル層を有するサンドイッチ構造である。FRPは強化プラスチックと呼ばれ、熱硬化性樹脂を高強度のガラス繊維で強化したものである。樹脂モルタルは、厳選した骨材を熱硬化性樹脂で硬化させたポリエステルコンクリートで、圧縮強度はセメントコンクリートよりも高い。FRPM板の板厚は10mm、曲げ強度は100MPa、曲げ弾性率は13.7GPaである。重量は20kg/m²と軽量なため人力による運搬も容易であり、狭い箇所や山間部の施工も可能である。

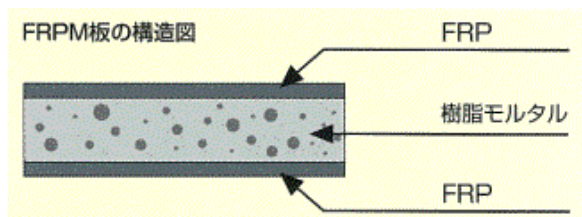


図-2 FRPM板の構造

(2) FRPM板の耐摩耗性

各試験機関におけるFRPM管の耐摩耗性の試験結果¹⁾²⁾³⁾を表-3に示す。この結果からFRPM管は、コンクリート管よりも耐摩耗性は優れているという結果が確認されている。

このことから、FRPM管と同一の材質であるFRPM板は、高い耐摩耗性を有するといえる。

表-3 FRPM管の耐摩耗性

試験場所	建設省	農林省農業土木試験場	新エネルギー財団
試験年度	昭和46年	昭和48年	昭和57年
試験方法	羽車回転式	管回転式	管路による実証
試験速度	6m/s	0.72m/s	10m/s
試験時間	3時間	6ヶ月	50サイクル
粒 径	1.2~5mm	1.2~5mm	平均2.6mm
摩耗量	FRPM管の摩耗量は 鋼管の1/4コンクリート管の1/12	FRPM管の摩耗量は 鋼管の1/10コンクリート管の1/50	FRPM管の摩耗量は 鋼管の1/30

(3) 耐候性

①FRPM板の耐候性

財団法人新エネルギー財団の水圧鉄管代替製品のFRP板およびFRPM管の技術検討結果報告書³⁾によると、サンシャインウェザーメーターでカーボンアークランプを6,000時間照射した場合の曲げ強度の強度低下はないとされている。したがって、FRPM管と同一な材料であるFRPM板も同様の耐候性を有するといえる。

②目地材の耐候性

JIS A 1415に準拠して、促進暴露試験装置（WS型サンシャインカーボンアークウェザーメーター）を用いて最大6,000時間までの耐候性試験を行った。試験後の目地材の状況を写真-2に示す。左が本工法で使用しているウレタン系、右が変成シリコン系の目地材である。変成シリコン系は2,000時間経過後から形状が崩れる。一方、ウレタン系は、6,000時間経過後でも形状が保たれており、耐候性に優れた目地材である。



写真-2 促進暴露試験を行った目地材試料

(4) FRPM板の凍結融解抵抗性

FRPM板の凍結融解抵抗性に関する検証結果を表-4に示す。これは北海道立寒地住宅都市研究所の試験結果⁴⁾である。-20℃～+60℃の凍結融解を300サイクル実施し、重量の変化率および曲げ強度を測定したところ、凍結融解試験実施前と実施後で、重量変化率および曲げ強度の差異はほとんど見られなかった。この結果から、FRPM板は凍結融解抵抗性に優れているといえる。

表-4 FRPM板の凍結融解抵抗性

番号	試験前重量(g)	各試験サイクル時の重量変化率 (%)									
		0	20	43	81	122	160	201	240	283	300
1	2293	100	100	100	100	100	100.1	100.1	100.1	100.1	100.1
2	2310	100	100	100	100	100	100.1	100.1	100.2	100.2	100.2
3	2323	100	100	100	100	100	100.1	100.1	100.1	100.1	100.1
平均	2309	100	100	100	100	100	100.1	100.1	100.1	100.1	100.1

番号	凍結融解前の曲げ強度 (kgf/cm ²)	凍結融解300サイクル後の曲げ強度
1	2107	2033
2	2040	1840
3	2107	2040
平均	2085	1971

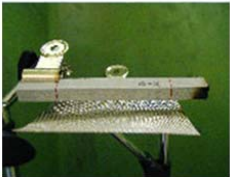


(5) FRPの環境性能

FRP中の環境ホルモンと呼ばれる物質の含有量について、財団法人日本食品分析センターで確認を行っている⁵⁾。確認の結果、環境ホルモンと呼ばれる物質は検出されなかった。

(6) FRPM板の耐燃性

表-5は、JIS K 6911に準じてFRPM板の耐燃性試験を実施した結果である。表に示すように、火は燃え広がらず自消性がある材料であることが確認できた。

表-5 FRPM板の耐燃性試験結果

		消火時間	燃焼距離	判 定	消火後写真	特記事項
結 果	①	3.0秒	9 mm	不燃性		特になし
	②	4.0 秒	5 mm	不燃性		特になし
	③	5.0 秒	7 mm	不燃性		特になし

第3章 研究方法

3.1 水路補修の試験施工

試験施工は、2006年11月19日から25日にかけて行った。

3.1.1 施工箇所

試験施工箇所は、北海道上川郡剣淵町に位置し、国営事業で昭和47年度に造成された剣和幹線用水路の一部区間である。当該区間は掘り込み形式のコンクリート製現場打ちフルーム水路で、側壁の高さは2.0m、水路の幅は6.0m、側壁の厚さは20cmである（図-3）。当該区間は、長年にわたる流水による磨耗で骨材が露出し、一部区間ではコンクリートの剥落や鉄筋の露出がみられた（写真-3）。試験施工は、表面被覆材へ与える日射の影響を考慮し、両側の側壁が南向きと北向きになる区間を選定した。なお、この地域は、和寒観測所のアメダス（試験施工区間から約8km南）観測データから日平均気温の1月の平年値が-8.8℃、年最深積雪は104cmであり、北海道内でも比較的寒冷で多雪な条件下にある。

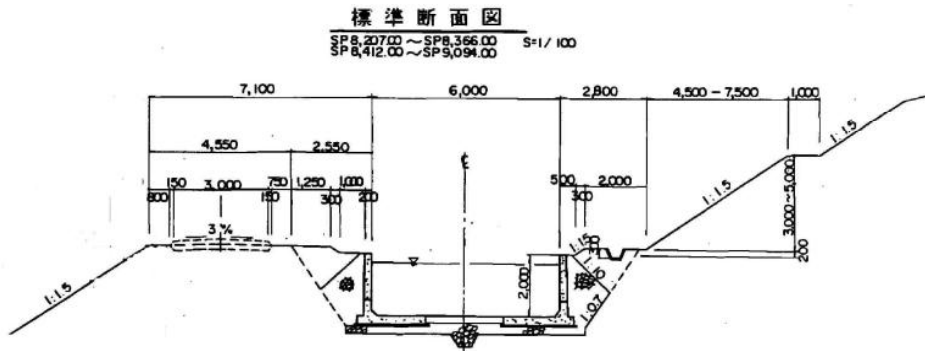


図-3 施工箇所の標準断面図



写真-3 コンクリートの剥落、鉄筋露出状況

3.1.2 施工手順

表-6に試験施工の工程表を示す。各工程の作業は次のとおりである。

表-6 施工工程表

工種 \ 日程	11/19	11/20	11/21	11/22	11/23	11/24	11/25
準備工	■						
水替工				■			
水路洗浄(清掃)工		■					
緩衝材設置工			■				
FRPM板取付工			■	■			
目地材シーリング工					■		
上部仕上げ工						■	
小口仕上げ工							■
片付け							■

(1) 準備工・水替工

準備工では、ブルーシートで養生囲いを行い、底版の上下流部に土嚢を設置して水替を行った。また、既設水路躯体の健全度を確認するために、アンカーの引抜き強度試験を行った。金属拡張式アンカーはφ8mm、長さ60mm、埋め込み長さは40mmとした。試験では、アンカー引抜き強度の設計値である1本あたり7.6kNの引抜き強度があるか検証を行った。

(2) 水路洗浄（清掃）工

既設水路の内壁は長年の供用による汚れや藻の付着がみられ、また、風化現象等によってコンクリート表層が劣化していたため、高圧ジェット式洗浄機により壁面の清掃および劣化部の除去作業を行った。なお、水路底版に土砂等が堆積していた箇所は、あらかじめスコップ等で堆積物を取り除いた。

(3) FRPM板取付工および緩衝材設置工（写真-5）

FRPM板（厚さ：10mm、最大成型寸法：1m×2m）の裏面に緩衝材（厚さ：10mm）をブチルゴムテープで貼り付けた。次に緩衝材を貼り付けたFRPM板を既設水路に設置し、FRPM板にあらかじめ開けた穴に、ロータリーハンマードリルを挿入し、水路躯体に穿孔後、アンカーで固定した。FRPM板の継目部は、スペーサーを用いて5mm程度で一定間隔になるように隙間をあけた。FRPM板の固定は、側面、ハンチ、底版の順で行った。

緩衝材は寒冷地における適用性を検証するため、**写真-4**に示すEPS（ビーズ法ポリスチレンフォーム）、PE（発泡ポリエチレン）、EPT（エチレンプロピレンゴム）の3種類を用いた。3種類の緩衝材の配置は、上流から下流に向かって、EPT、PE、EPSの順にそれぞれ3mずつとした。

なお、本試験施工では、緩衝材をあらかじめFRPM板の裏面に貼り付けたが、先に既設水路に緩衝材を貼り付けた方が施工が早く、また、緩衝材がFRPM板の継目部に使用する目地材のバックアップ材代わりにもなるため、バックアップ材の施工の手間が省けることがわかった。このため、以後の施工では先に緩衝材を既設水路に貼り付ける工法を採用した。なお、その際、緩衝材はコンクリートビスや粘着テープ等で固定した。



写真-4 試験施工で使用した緩衝材（t=10mm）

(4) 目地材シーリング工

目地材シーリング工は、FRPM板の継目部に施工するもので、マスキングテープを貼付後、プライマーを塗布し、専用ガンを用いて目地材を充填した。目地材充填後は速やかにヘラで平滑に仕上げ、マスキングテー

ブをはがした。

(5) 上部仕上げ工および小口仕上げ工（写真-6）

側壁の上部(端部)は目地材で仕上げた。また、小口部は早強セメントで平滑にした後に、上流側は光硬化シートで、下流側は目地材で仕上げた。



FRPM板の設置



アンカー打込み

写真-5 FRPM板設置工



写真-6 小口部の処理（下流側）

(6) 完成

試験施工完了後の状況を、写真-7に、また、施工断面を図-4に示す。なお、寒冷な条件での施工であったが、施工上の問題点は特になかった。



写真-7 施工完了後の状況

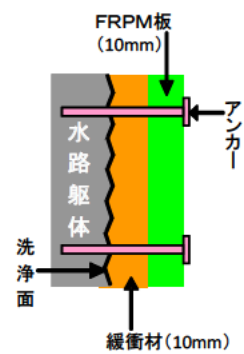


図-4 補修工法の施工断面

3.1.3 施工後の観測

試験施工区間における観測項目を表-7に示す。

表-7 施工区間における観測項目

(1) 目視調査

目視調査は融雪後の通水前と落水後の年2回、側壁および底版におけるFRPM板の損傷、アンカーの抜け落ち等の変状の有無に着目して行った。

観測項目	測定箇所	測定頻度	備考
目視調査	補修区間	2回/年 (融雪後、落水後)	
温度	側壁表面 側壁FRPM板と緩衝材の間 側壁緩衝材と水路躯体の間 側壁背面	1回/2時間 (自動観測)	
ひずみ	側壁表面	1回/2時間 (自動観測)	側壁鉛直方向を測定

(2) 温度およびひずみ

側壁表面等の温度、ひずみの観測位置を図-5に、また、側壁表面の温度センサー、ひずみゲージの設置状況を写真-8に示す。側壁表面での温度、ひずみ(鉛直方向)は、左右岸の灌漑期水位の上部(天端から20cm下、以降、側壁上部と称する。)、下部(天端から100cm下、以降、側壁下部と称する。)で、また、側壁背面温度は天端から20cm下で2時間間隔の自動観測を行った。温度は熱電対(T型)、ひずみはひずみゲージ(ゲージ長30mm)を用いて測定した。

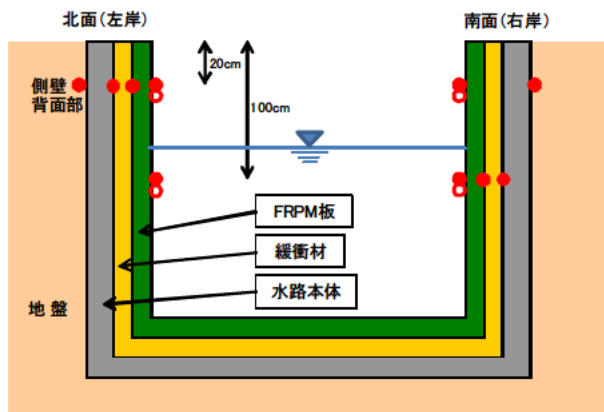


図-5 側壁表面等の温度、ひずみの観測位置

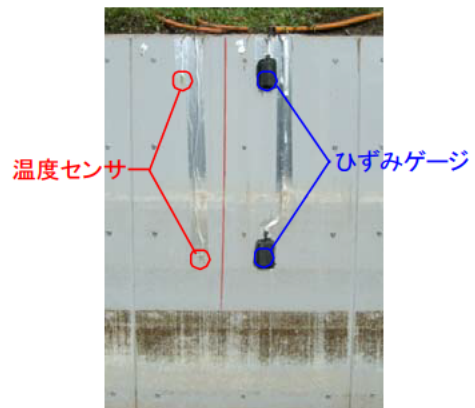


写真-8 補修材表面への温度センサーの設置状況

(3) 緩衝材の含水比

FRPM板補修工法はアンカーを躯体コンクリートに打ち込むことで固定する方式であることから、緩衝材内部の水分の凍結による膨張圧がアンカーの引き抜き耐荷重を超えて、補修部が破壊する危険性がある。このため、冬期間を2回、通水期間を2回経過した2008年11月に、試験施工区間の南面側壁から取り出した3種類の緩衝材を用いて含水比の測定を行った。緩衝材はそれぞれFRPM板1枚分(縦176mm×横100mm)を取り出し、縦方向に8等分、横方向に4等分して22cm×25cmの試験片を切り出し、最も下流側の部分を含水比の測定に用いた。

3.2 FRPM板補修材料で被覆された水路躯体コンクリートの温度解析⁶⁾

寒冷地のコンクリート水路ではコンクリート中の飽水度が高い場合には、表面補修後に躯体コンクリートが凍結融解作用を受ける可能性があることから、試験施工区間で観測した温度測定データ等を基に無補修の躯体側壁コンクリートおよびFRPM板で補修を行った水路の側壁コンクリートの温度解析を行い、温度変化の

比較により、表面補修後の凍結融解作用の緩和効果について検討した。

解析には有限要素法(FEM)による2次元熱伝導解析ソフトウェア(G-HEAT/2D:(株)地層科学研究所製)を使用した。解析モデルは現地測量および図-3に示した標準断面図を参考に設定した(図-6)。解析に使用した物性値は実測値および資材メーカーによる試験資料の他、文献7)~12)を参考に表-8のとおり設定し、解析期間は2009年1月30日~2月5日とし、解析結果に対する初期値の影響が無視できる2月1日~5日の計算結果を検証に用いた。

表-8 解析に用いた物性値

要素 物性値	躯体コンクリート (鉄筋コンクリート)	裏込砂利	現地盤	FRPMパネル	緩衝材 (発泡ポリエチレン)
熱伝導率 (W/m・°C)	1.5 ※2	0.08 ※4	0.47 ※5	0.6 ※7	0.045 ※7
密度 (kg/m ³)	2300 ※1	1900 ※6	1400 ※1	2000 ※7	64 ※7
比熱 (J/kg・°C)	920 ※2	837 ※3	837 ※3	837 ※7	2300 ※8

※1:実測値 ※2:文献 7) ※3:文献 8) ※4:文献 9) ※5:文献 10) ※6:文献 11)
 ※7:メーカー試験資料から ※8:文献 12)

① 無補修区間の解析

解析モデルは、図-6の左図のとおりであり、解析にあたっては、図-7の左図に示す境界条件を初期温度条件として与えた。なお、今回の解析期間における近傍のアメダスと寒観測所の積雪深が35cm~37cmであったため、積雪による断熱効果を考慮し地表面は断熱条件として設定した。また、モデルの右面と下面は熱流量の出入りがないものとして断熱境界とした。側壁表面は温度実測値を境界条件として無補修区間(図-6の左図)の側壁表面に与え、躯体コンクリートの天端から20cm下の水路表面から5cm、10cmおよび水路背面の温度解析を行った。

② FRPM板補修区間の解析

FRPM板補修区間の解析モデルは、図-6の右図のとおりである。解析では、躯体コンクリートの天端から20cm下の水路表面から5cm、10cm、および水路背面における温度を計算した。地表面およびモデルの右面と下面は無補修区間と同様に断熱境界とした。また、図-7の右図に示す境界条件を初期温度条件として与えた。解析途中の境界条件としては、FRPM板表面温度に、天端から20cmの位置で実測した温度を与えた。

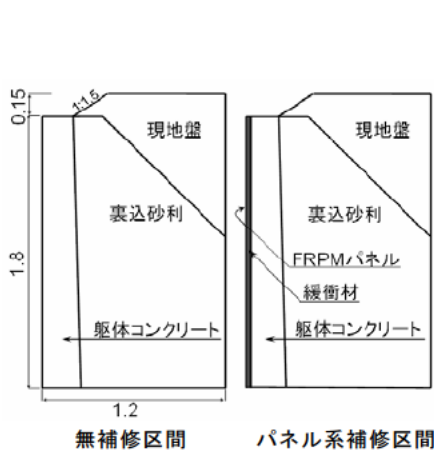


図-6 解析モデル

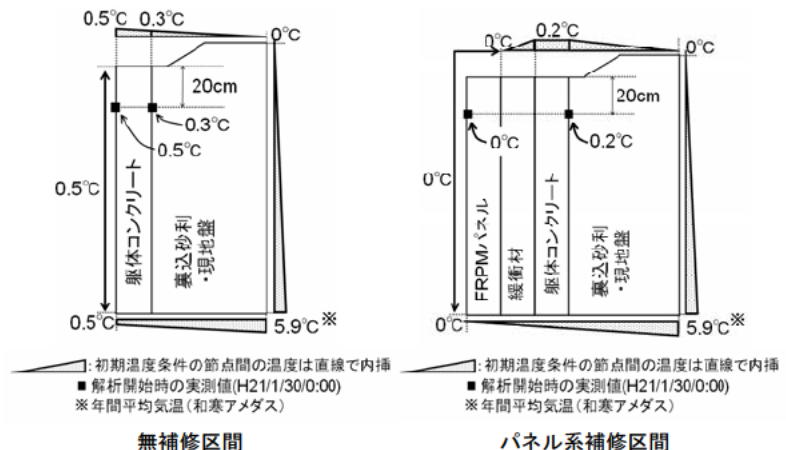


図-7 解析モデルの初期温度条件

3.3 凍結融解を受けた緩衝材の圧縮残留ひずみ

FRPM板補修材料のうち、FRPM板については、2.3(4)で述べたとおり、北海道立寒地住宅都市研究所において凍結融解抵抗性に関する試験が行われているが、緩衝材については凍結融解抵抗性の検証は行われていない。緩衝材は既設水路とFRPM板の隙間に進入する水分が凍結することで起こる膨張圧を緩和するために用いていることから、凍結融解を受けた時の緩衝材の性能変化を確認するため、凍結融解前後の圧縮残留ひずみを測定した。

(1) 試験材料

試験材料は、試験施工で使用したものと同一、EPS（ビーズ法ポリスチレンフォーム）、PE（発泡ポリエチレン）、EPT（エチレンプロピレンゴム）の3種類（写真-4参照）を使用し、それぞれの試験片は長さ50mm×50mm、厚さ10mmとした。

(2) 試験方法

① 試験片の前処理

試験片の前処理模式図を図-8に示す。試験片（緩衝材）は、スチール製の容器の中に水が浸るように設置し、実施工を模擬し、緩衝材の上にFRPM板（ $t=10\text{mm}$ ）を載せた。

試験片は 20°C の水中に24時間浸漬したものを凍結融解0サイクルとした。凍結融解処理は、試験槽内の温度を -20°C から $+20^{\circ}\text{C}$ になるように設定し、温度保持時間は30分として、1サイクルに要する時間は3時間として行った。なお、凍結融解温度は、試験施工区間での冬期間のFRPM板表面温度の実測値を参考に設定した。1サイクル当たりの時間は、予備試験で緩衝材が確実に凍結融解することを確認した上で決定した。

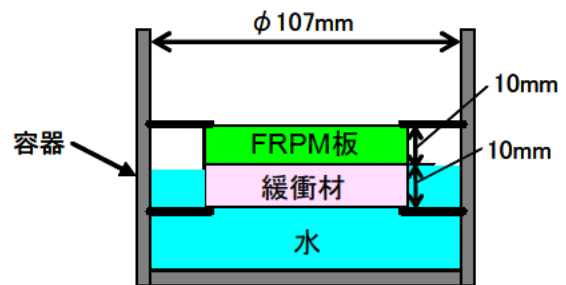


図-8 試験片の前処理模式図

② 圧縮残留ひずみ試験

JIS K 6400-4:2004「4.圧縮残留ひずみ試験」（B法）に準拠して行った。試験片は前処理をした後に厚さを測定してから、平板の上に載せ、一軸圧縮試験機にて試験片の厚さの50%に圧縮した。圧縮は室温（ $+20^{\circ}\text{C}$ 程度）で72時間行った。

圧縮残留ひずみ（ C_s ）は、圧縮終了後同じ環境で30分間回復させた後、次の式によって算出した。

$$C_s = \frac{d_0 - d_r}{d_0} \times 100$$

ここに、 C_s : 圧縮残留ひずみ
 d_0 : 始めの試験片の厚さ (mm)
 d_r : 試験後の試験片の厚さ (mm)

圧縮残留ひずみの測定は、凍結融解0サイクルおよび50、100、300、500サイクル後に、それぞれ試験片5個ずつを使用して行った。測定値は試験片5個の平均値とした。

第4章 研究結果

4.1 水路補修の試験施工

4.1.1 試験施工区間近傍の気象概要

試験開始後の2006年度から2009年度までの12月から3月における気象データを表-9に示す。このデータは、和寒観測所のアメダスのものである。この期間において、1月、2月の日平均気温は -6°C ～ -9°C 程度であり、平年値よりも高い傾向であり、最深積雪は、各年ともに90cm程度で、平年よりもやや少雪傾向であった。写真-9は冬期間の試験施工区間の状況である。南面は雪庇があまり発達していないのに比べ、北面では雪庇が大きく発達している。

表-9 気象の概要

	単位: $^{\circ}\text{C}$				単位: cm					
	12月	1月	2月	3月	12月	1月	2月	3月		
日平均気温	2006年度	-4.0	-6.9	-6.2	-2.5	2006年度	27	77	82	97
	2007年度	-4.5	-9.4	-8.3	-0.5	2007年度	59	69	86	84
	2008年度	-1.9	-6.1	-6.9	-1.3	2008年度	39	58	91	80
	2009年度	-6.2	-6.1	-6.9	-3.3	2009年度	64	83	94	83
	平年値	-4.6	-8.8	-8.5	-3.4	平年値	67	90	97	95
最深積雪	2006年度					2006年度	27	77	82	97
	2007年度					2007年度	59	69	86	84
	2008年度					2008年度	39	58	91	80
	2009年度					2009年度	64	83	94	83
	平年値					平年値	67	90	97	95



写真-9 冬期の試験施工区間の状況

4.1.2 観測結果

(1) FRPM板補修区間の温度環境

FRPM板補修区間において、年間を通じて表面温度が最も高くなるのは、落水後の9月上旬であり、表面温度は約 $+55^{\circ}\text{C}$ まで上昇する。一方、最低温度は年によって異なるが、 -14°C ～ -20°C 程度であった（巻末資料参照）。冬期間の側壁南面のFRPM板補修区間等の温度の推移を図-9に示す。図に示した期間は観測期間中の最低気温を記録した日を含む7日間である。南面では冬期間でも表面は 0°C をはさむ温度変化を生じる日が多い。また、FRPM板と緩衝材の間の温度変化は表面部とほぼ同じであるが、緩衝材と水路本体との間は温度変化が小さく、側壁背面の温度はさらに日変動が小さい。

日平均気温が最低となる1月における、2006年度から2009年度までの側壁表面等での日最低温度と日最高温度の平均値を表-10に示す。FRPM板表面の日最低温度の平均値は -6°C ～ -8°C 程度であり、日最高温度の平均値は南面で 10°C ～ $+11^{\circ}\text{C}$ 、北面で 0 ～ $+1^{\circ}\text{C}$ 程度である。日中の気温がマイナスでも、南面の補修表面温度

は日射の影響でプラスとなることが多く、1日の中で0℃をはさむ温度変化を繰り返す。一方、北面では南面より温度変化は小さい。緩衝材が受ける温度変化は、FRPM板に接する面と水路躯体に接する面で大きく異なる。すなわち、前者は-8℃程度まで下がる一方、日中は10℃以上まで上がる。後者は-2℃～+2℃で温度変化が小さい。これは緩衝材に断熱性があるためと考えられる。

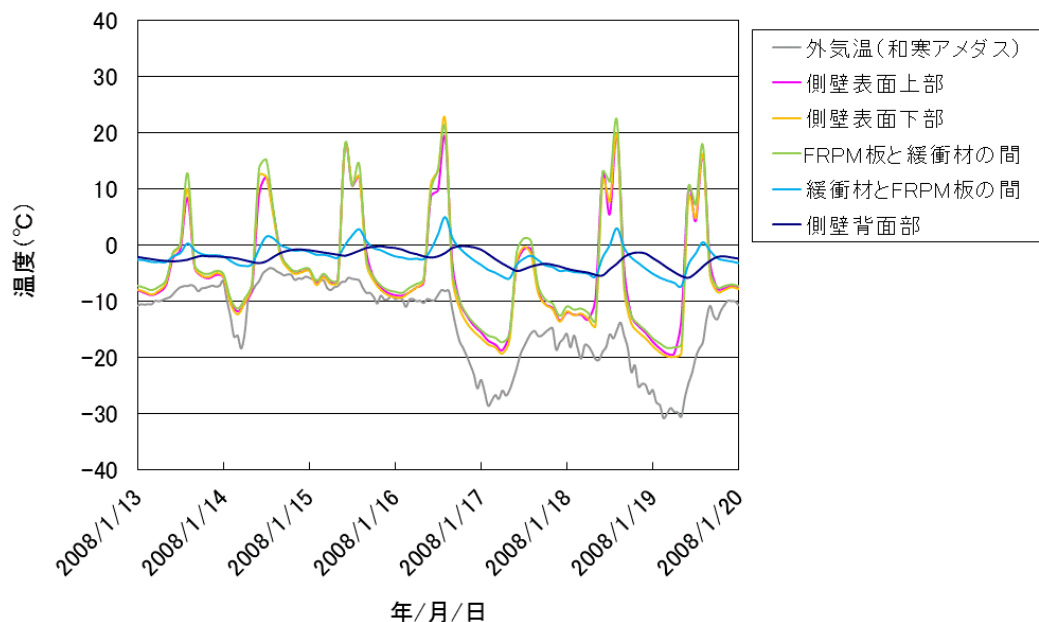


図-9 冬期間のFRPM板補修区間等の温度の推移（側壁南面）

表-10 2006年度から2009年度までの1月における補修表面温度等の平均値

項目	側壁の向き	単位:℃					
		FRPM板表面		FRPM板と緩衝材の間		緩衝材と水路躯体の間	
		側壁上部	側壁下部	側壁上部	側壁下部	側壁上部	側壁下部
日最低温度	南面	-7.9	-8.3	—	-7.5	—	-2.0
日最高温度		9.9	11.2	—	12.1	—	2.0
日最低温度	北面	-6.4	-7.8	-6.1	—	-3.0	—
日最高温度		0.1	1.0	0.4	—	-1.3	—

次に、現地で観測した温度データを用いて、表面被覆された水路躯体コンクリートの凍結融解回数を推定する。既往の文献¹³⁾では、コンクリート供試体の凍結融解試験において、最低温度の設定を-5℃以下としたときに凍害劣化が進行すると報告されている。このため、-5℃で凍結、0℃で融解が生じるものとして凍結融解回数を求めた。2008年度と2009年度の緩衝材と水路躯体の間における凍結融解回数（南面は側壁下部、北面は側壁上部）を図-10に示す。

FRPM板で被覆されたコンクリートの一冬の凍結融解回数は0～2回であり、緩衝材の断熱効果によってほとんど凍結融解作用の影響を受けないことがわかった。

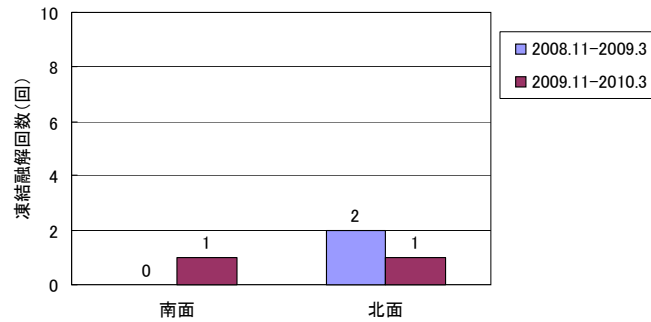


図-10 緩衝材と水路躯体コンクリート間の凍結融解回数

(2) FRPM板補修区間の発生ひずみ

発生ひずみは表面被覆材の性能に初期欠陥があった場合の原因を検証することを目的に測定を行ったが、後述のとおり、2010年3月末現在まで表面被覆材に目立った変状は発生していないため、各年度ごとの発生ひずみを巻末資料に掲載するにとどめる。

(3) 目視調査

試験施工から約3年経過後における外観（写真-10）は、FRPM板には変状が見られず、アンカーも抜け落ち等は無く、良好な状態を保っていた。



写真-10 FRPM板の施工3年後の状況

(4) 緩衝材の含水比

含水比測定時に取り外した緩衝材の状況を写真-11に、天端から下へ一定間隔毎に測定した緩衝材の含水比を図-11に示す。含水比測定の結果、EPSは灌漑期（普通期）水位より下の部位で含水比が高くなっており、PEとEPTは全体的に含水比が小さいことがわかった。EPSは水分を多く含むようになったことから、他の材料に比べて凍結によりFRPM板に作用する膨張圧が発生しやすいことが示唆された。



写真-11 施工から約2年後の緩衝材（176mm×100mm）の状況

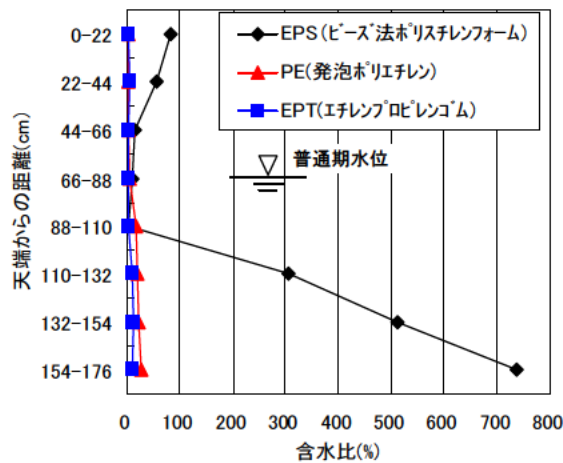


図-11 試験施工区間での各緩衝材の含水比

(5) 試験施工区間の評価

FRPM板表面被覆工法については、目視観察では変状は無く、補修後3年の段階では適用性に問題はないといえる。

4.2 FRPM板補修材料で被覆された水路躯体コンクリートの温度解析

(1) 無補修区間の解析

側壁表面温度の実測値と水路側壁表面から5cm、10cm、15cmの深さおよび水路背面におけるFEMの解析による温度の変化を図-12に示す。この図から、温度の経時的変化の幅は水路側壁表面から内部へ向かうに従い小さくなることから、表面から10cmの深さでは、既往の文献¹³⁾で凍結融解作用を受ける凍結温度とされている -5°C 以下になるが、15cmの深さでは -5°C 以下に達していないことから、今回の解析期間においては凍害劣化を受ける可能性のある最大深さは、10～15cmであると考えられる。

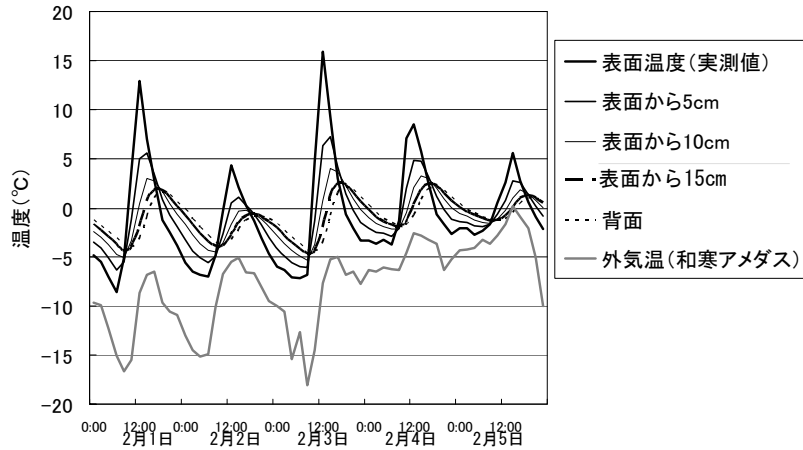


図-12 FEM解析による無補修区間の躯体コンクリート温度（水路天端から20cm下）

(2) 無補修区間とFRPM板補修区間の比較

FRPM板補修区間の天端から20cm下の躯体コンクリート表面（緩衝材と躯体コンクリートの境界）、表面から5cm、10cmの深さおよび、背面におけるFEM解析による温度の変化を図-13に示す。この図のように、FRPM板補修区間の躯体コンクリート表面では温度変化は解析期間を通じて $+0.6^{\circ}\text{C}$ ～ -4.5°C の範囲で推移した。

図-14に無補修区間の躯体コンクリート表面温度の実測値とFRPM板補修区間の躯体コンクリート表面温度の解析値を示す。この図のように無補修区間では凍結融解作用を受ける凍結温度として設定した -5°C 凍結、 0°C 融解が5日間のうち3回起こるのに対して、FRPM板補修区間では0回となっている。すなわち、FRPM板補修区間ではFRPM板と緩衝材で躯体コンクリートを被覆することにより側壁コンクリートの凍結融解作用が緩和されると推察される。

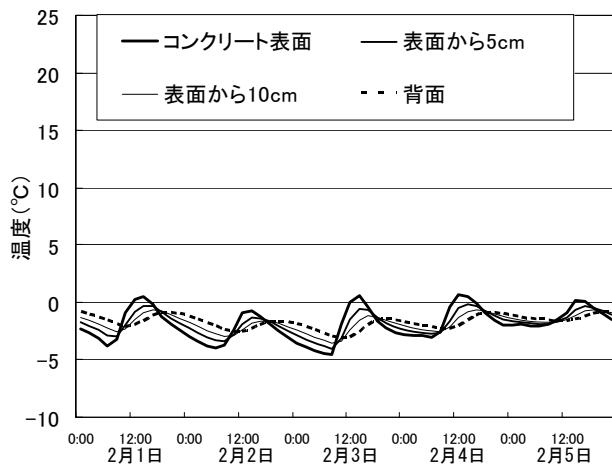


図-13 FEM解析による無補修区間の躯体コンクリート温度（水路天端から20cm下）

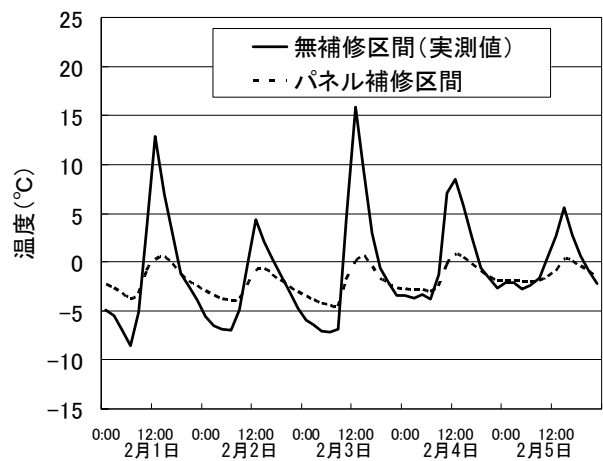


図-14 無補修区間とFRPM板補修区間の躯体コンクリート側壁の表面温度（水路天端から20cm下）

解析を行った2009年2月1日～5日の中で、無補修区間の躯体コンクリート表面温度が最も下がった2月1日の0:00から6:00までの6時間について、無補修区間とFRPM板補修区間の躯体コンクリート内部の温度分布を比較した。無補修区間の温度分布を図-15に、FRPM板補修区間の温度分布を図-16に示す。6:00の時点の天端から20cm下の中心温度で比べると、無補修区間では-4.7℃まで低下しているが、FRPM板補修区間では-2.2℃までしか低下しなかった。無補修区間とFRPM板補修区間の温度分布に大きな違いがみられる理由としては、FRPM板補修区間における緩衝材の効果が挙げられる。

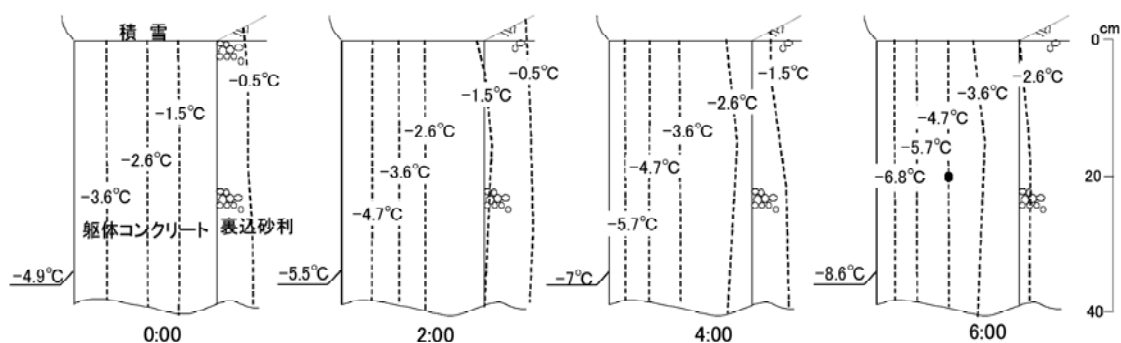


図-15 無補修区間における温度分布 (2009/2/1/0:00~6:00)

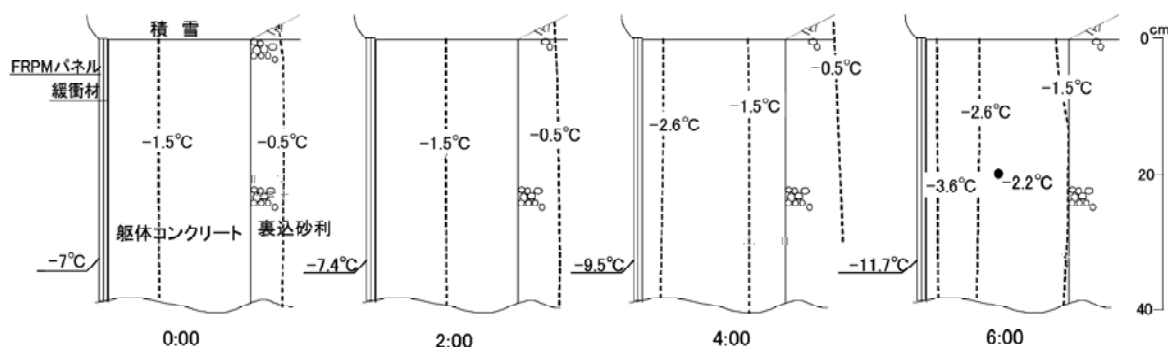


図-16 FRPM板補修区間における温度分布 (2009/2/1/0:00~6:00)

4.3 凍結融解を受けた緩衝材の圧縮残留ひずみ

(1) 凍結融解作用と緩衝材の圧縮残留ひずみの関係

図-17に凍結融解500サイクルまでの3種類の緩衝材の圧縮残留ひずみを示す。圧縮残留ひずみは値が大きい程、元の厚さに対する減少率が高いことを意味する。試験の結果、EPSの圧縮残留ひずみが最も大きく、圧縮後に復元しづらいことが示されたが、凍結融解による圧縮残留ひずみの値の変化は明確ではなかった。

図-18に凍結融解を500サイクルおよび水中浸漬のみ（凍結融解処理500サイクルと同じ期間で20℃水中浸漬）を与えた後における3種類の緩衝材の圧縮残留ひずみを示す。この図からEPSとPEは凍結融解による圧縮残留ひずみの増加率が5%程度であるのに対し、EPTは増加率が約25%となっており、EPTが他の材料に比べて、凍結融解作用により圧縮残留ひずみの増加量が多いことがわかる。この結果はEPTが凍結融解作用の影響で圧縮後の復元力が低下しやすいことを示唆している。

(2) 緩衝材の圧縮応力の最大値および含水比

3種類の緩衝材について、凍結融解500サイクルおよび水中浸漬のみ（凍結融解処理500サイクルと同じ期間で20℃水中浸漬）を与えた後における、厚さ50%に圧縮した時の圧縮応力の最大値を図-19に、また、この時の含水比を図-20に示す。

図-19から、圧縮応力の最大値はEPTが最も小さく、EPSの7割程度、PEの6割程度であった。このことから、EPTは他の緩衝材に比べて変形しやすい材料であるといえる。なお、凍結融解の有無による圧縮応力の最大値の差は小さく、凍結融解作用が圧縮応力に及ぼす影響は小さいと考えられる。

含水比は、凍結融解500サイクル後のEPSが他の材料に比べて極端に大きかった。これは試験施工区間での傾向と一致する。しかし、水中浸漬のみの場合ではEPSの含水比は、PEおよびEPTより高いものの、凍結融解作用を受けたときよりもかなり小さい結果となった。このことから、EPSの含水比は凍結融解作用を受けることで高くなることが示された。

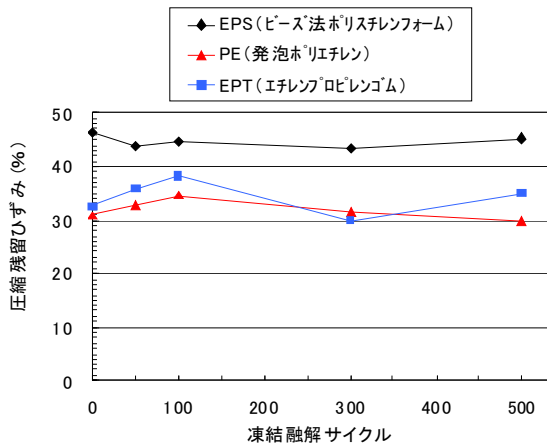


図-17 凍結融解サイクルと緩衝材の圧縮残留ひずみ

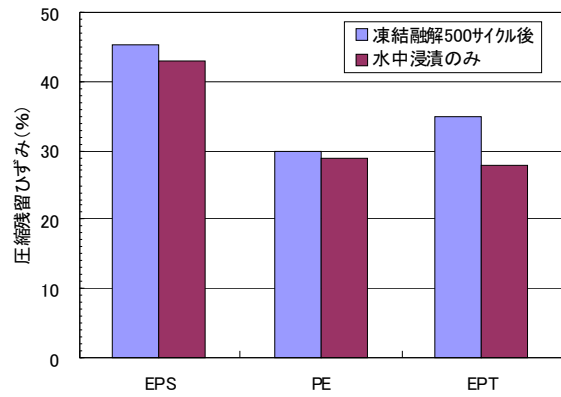


図-18 凍結融解の有無による緩衝材の圧縮残留ひずみ

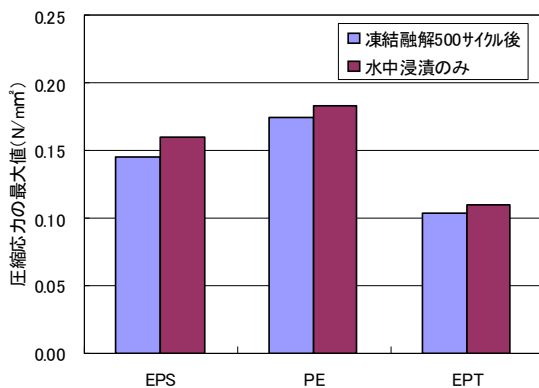


図-19 凍結融解の有無による緩衝材の圧縮応力の最大値

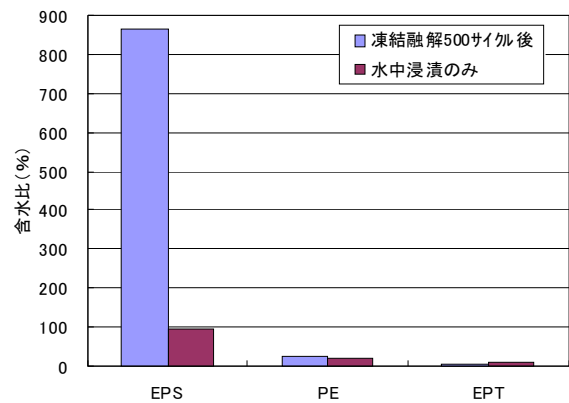


図-20 凍結融解の有無による緩衝材の含水比

(3) 試験のまとめ

緩衝材の圧縮残留ひずみ試験の結果から、EPSがPEやEPTよりも圧縮後の復元力が小さかった。しかし、凍結融解作用が圧縮残留ひずみに及ぼす影響は、500サイクル後まででは明確ではなかった。

EPSは凍結融解サイクル数の増加に伴い含水比が大きく上昇することから、凍結による膨張圧が高くなることが想定され、将来的には緩衝材としての機能が失われる可能性がある。また、EPTは凍結融解作用の有無による圧縮残留ひずみの差が最も大きく、EPSやPEよりも変形しやすいことから、凍結融解作用の影響で、将来的には緩衝材としての機能が失われる可能性がある。PEは凍結融解作用の影響による復元力の低下が小さく変形しづらいことおよび、含水比も低いことから、緩衝材として最も適していると考えられる。

第5章 結論

本報告書で述べた農業用水路の補修工法の試験施工は、2006年11月下旬の寒冷な気象条件の中で、供用中の老朽コンクリート開水路を対象に行ったものであり、2010年3月末時点で3回の通水期間と4回目の冬期を経験している。

農業用水路の補修工事は、通水期間を終えた秋から冬の施工に限定され、北海道のような積雪寒冷地では、低温下での施工を余儀なくされることになる。

今回、寒冷地のコンクリート開水路の補修工法として研究対象としたFRPM板の表面被覆材を用いた補修工法は、秋から冬の寒冷条件下の施工に対応できることが確認された。また、2010年3月までに水路としての供用性に問題は発生しておらず、補修施工部にも特段の変状は見られず良好な状態を維持している。

第6章 今後の問題点等

本研究は2009年度で終了したが、今後は寒冷地の水路における長期耐久性に注目して、現地調査や室内試験による検証を継続していくことが必要と考えられる。

取得した特許

本研究で用いた工法は、特許第4576636号を取得している。

謝辞

表面被覆工法の試験施工箇所を選定にあたり、国土交通省北海道開発局、水土里ネットてしおがわのご協力を頂いた。末筆ながら、関係各位に深甚なる謝意を表す。

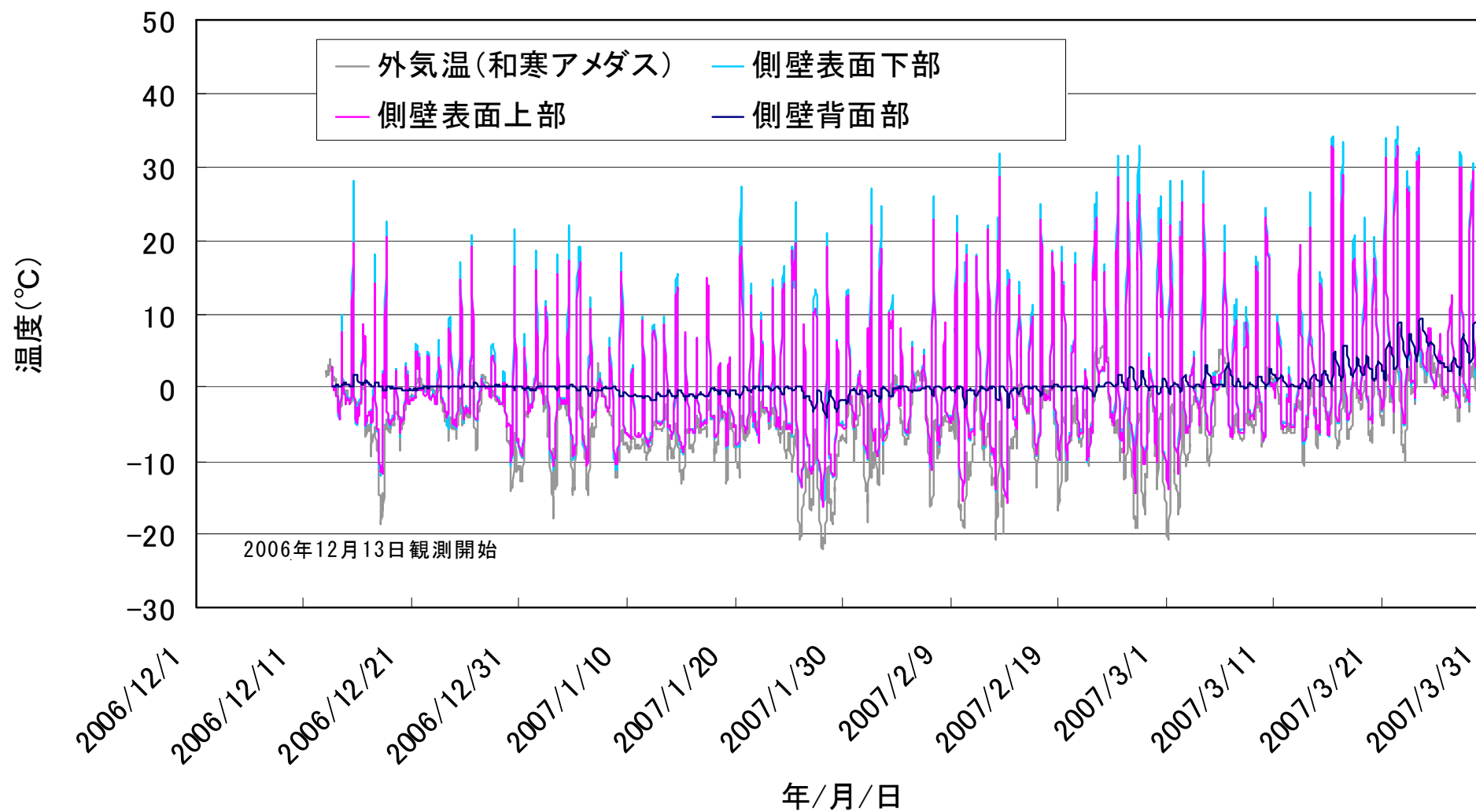
参考文献

- 1) 建設省：建設工業技術研究「FW管実用化に関する研究」研究報告書抄録、1971
- 2) 農林省農業土木試験場：テカイトパイプ（FRPM管）の特性に関する研究、1973
- 3) (財)新エネルギー財団：水圧鉄管代替製品FRPM管(強化プラスチック複合管)等技術検討結果報告書、1985
- 4) 北海道立寒地住宅都市研究所：寒研第7-449 FRPM板の凍結融解試験成績書、1989
- 5) (財)日本食品分析センター：第203010819-001号 試験報告書 浸出試験、2003
- 6) 金田敏和・佐藤智・小野寺康浩・中村和正：寒冷地における冬期間のコンクリート開水路側壁の温度解析－無補修およびパネル工法による表面補修の事例－、第58回農業農村工学会北海道支部研究発表会講演集、pp. 36-41、2009
- 7) 日本コンクリート工学協会：コンクリート技術の要点 ’99、p. 68、1999
- 8) 土壌物理研究会：土の物理学－土質工学の基礎－ 森北出版、p. 286、1979
- 9) 畢 春蓄・鈴木輝之・澤田正剛・山下 聡：凍上対策に用いる粒状材料の熱伝導率、土木学会論文集No. 785 /Ⅲ-70、pp. 83-92、2005.
- 10) 北野雅治・仁平勝行：土の熱伝導について、土木試験所月報、No. 333、pp. 1-10、1981
- 11) 日本道路協会：道路土工指針、p. 103、1967
- 12) 日本規格協会：JISの使い方シリーズ プラスチック材料選択のポイント、p. 314、1979
- 13) 鎌田英治：凍結融解抵抗性（耐凍害性）、コンクリート工学、Vol. 22、No. 3、pp. 38-46、1984

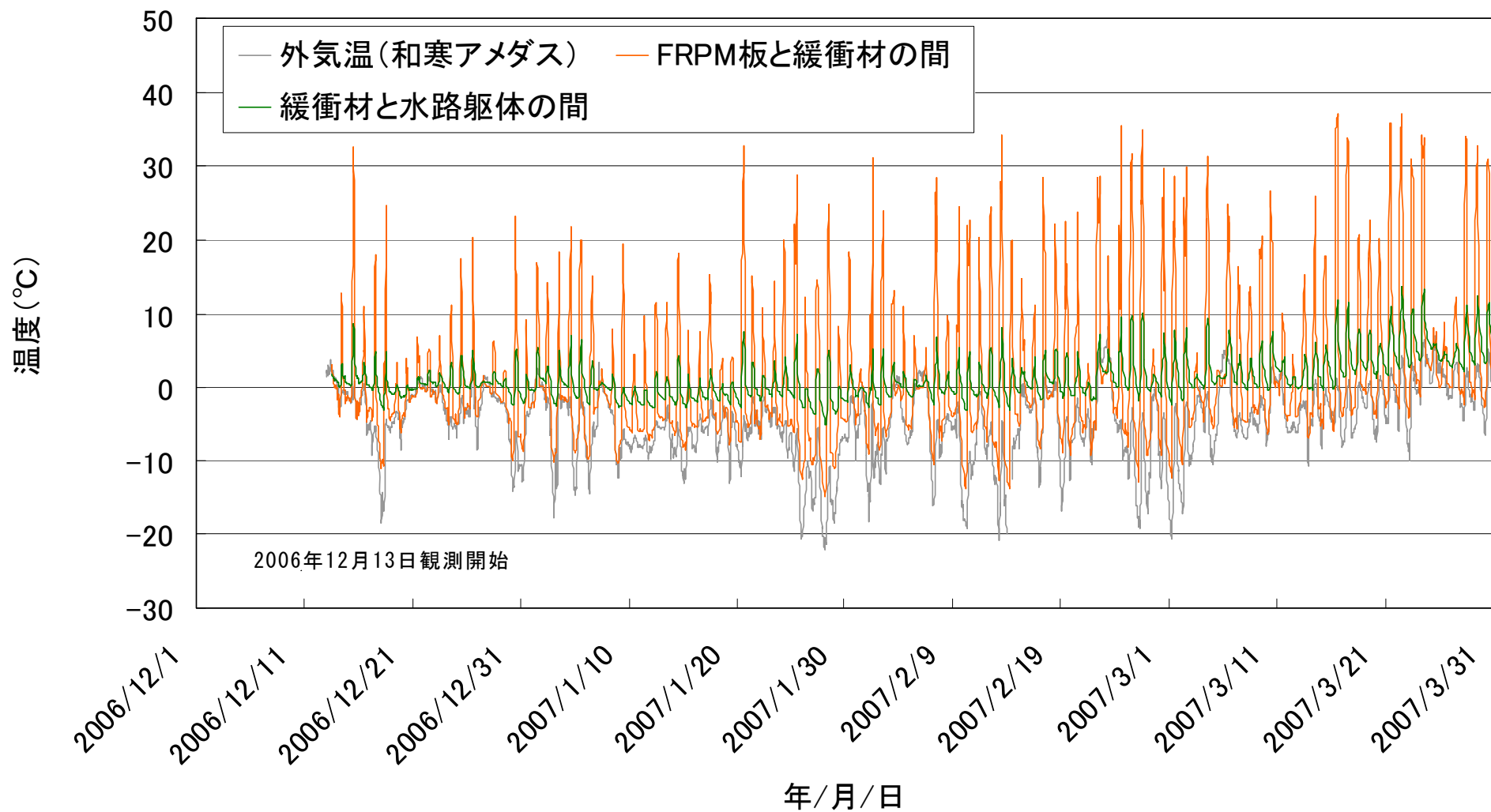
卷末資料

- 1．FRPM板補修区間の温度環境（22ページ～37ページ）
- 2．FRPM板補修区間の発生ひずみ（38ページ）

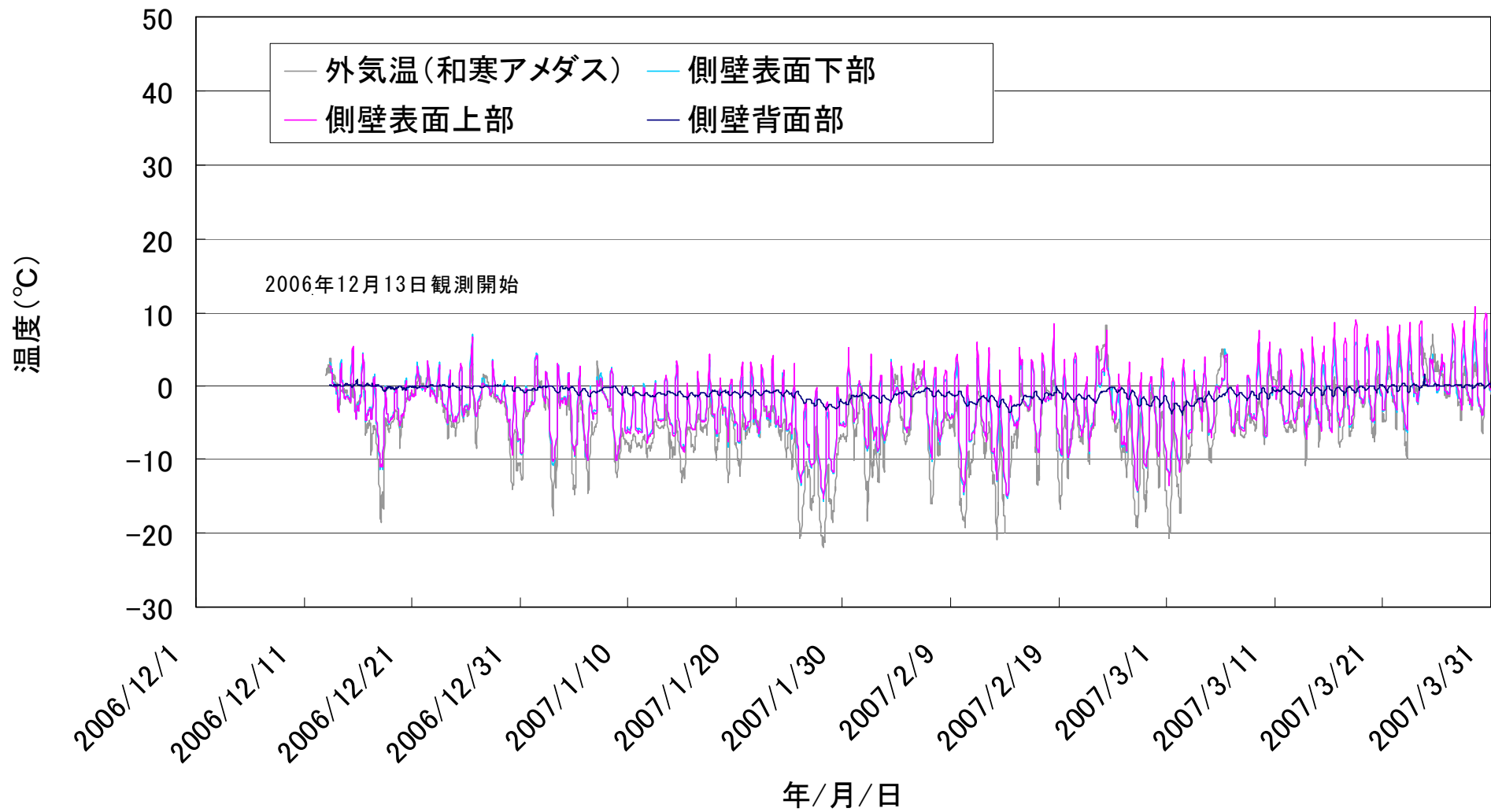
1. FRPM板補修区間の温度環境



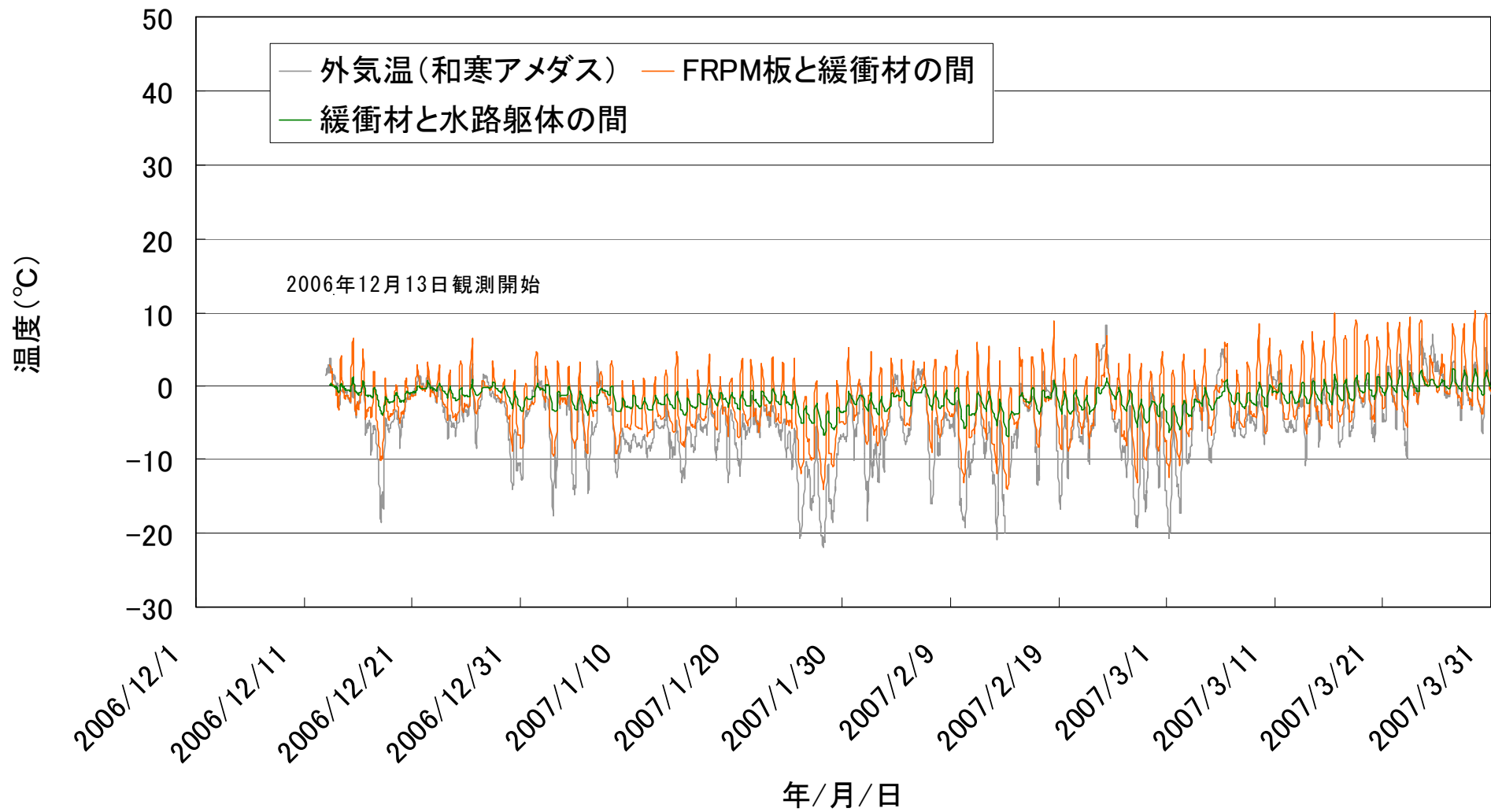
2006年度(12月～3月)のFRPM板補修区間における側壁表面および側壁背面の温度変化【南面】



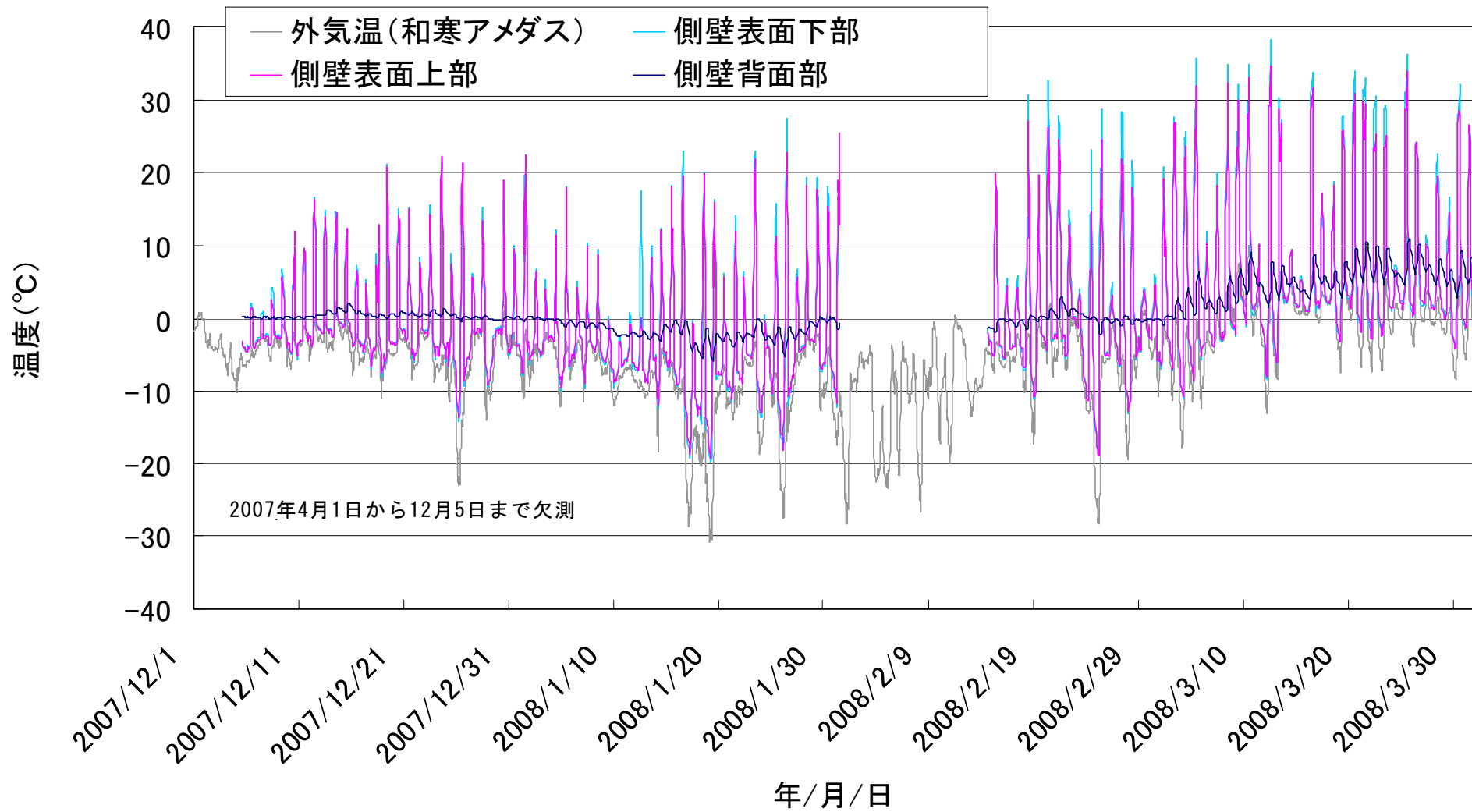
2006年度(12月～3月)のFRPM板補修区間における緩衝材のFRPM板側と水路躯体側の温度変化【南面】



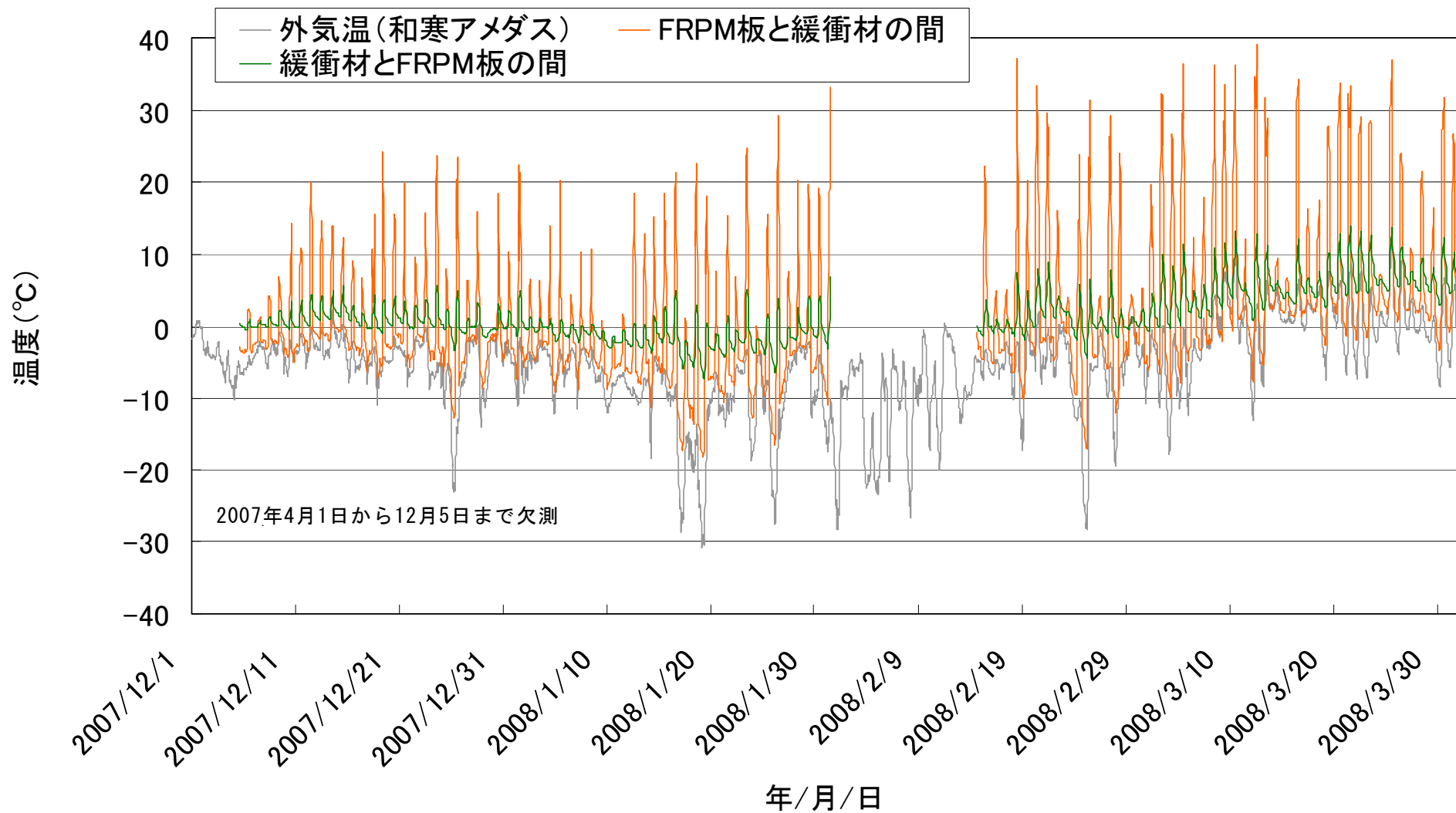
2006年度(12月～3月)のFRPM板補修区間における側壁表面および側壁背面の温度変化【北面】



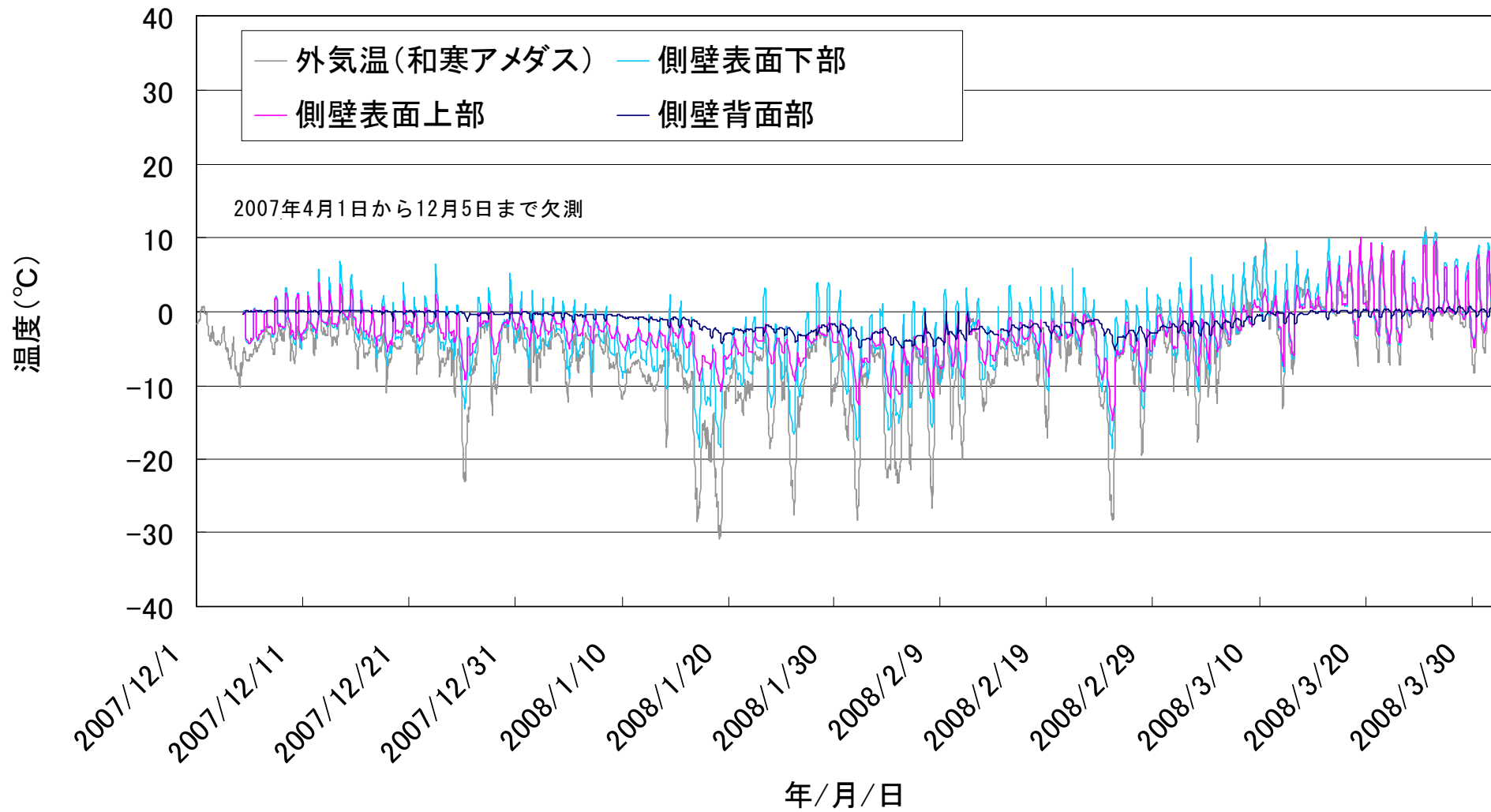
2006年度(12月～3月)のFRPM板補修区間における緩衝材のFRPM板側と水路躯体側の温度変化【北面】



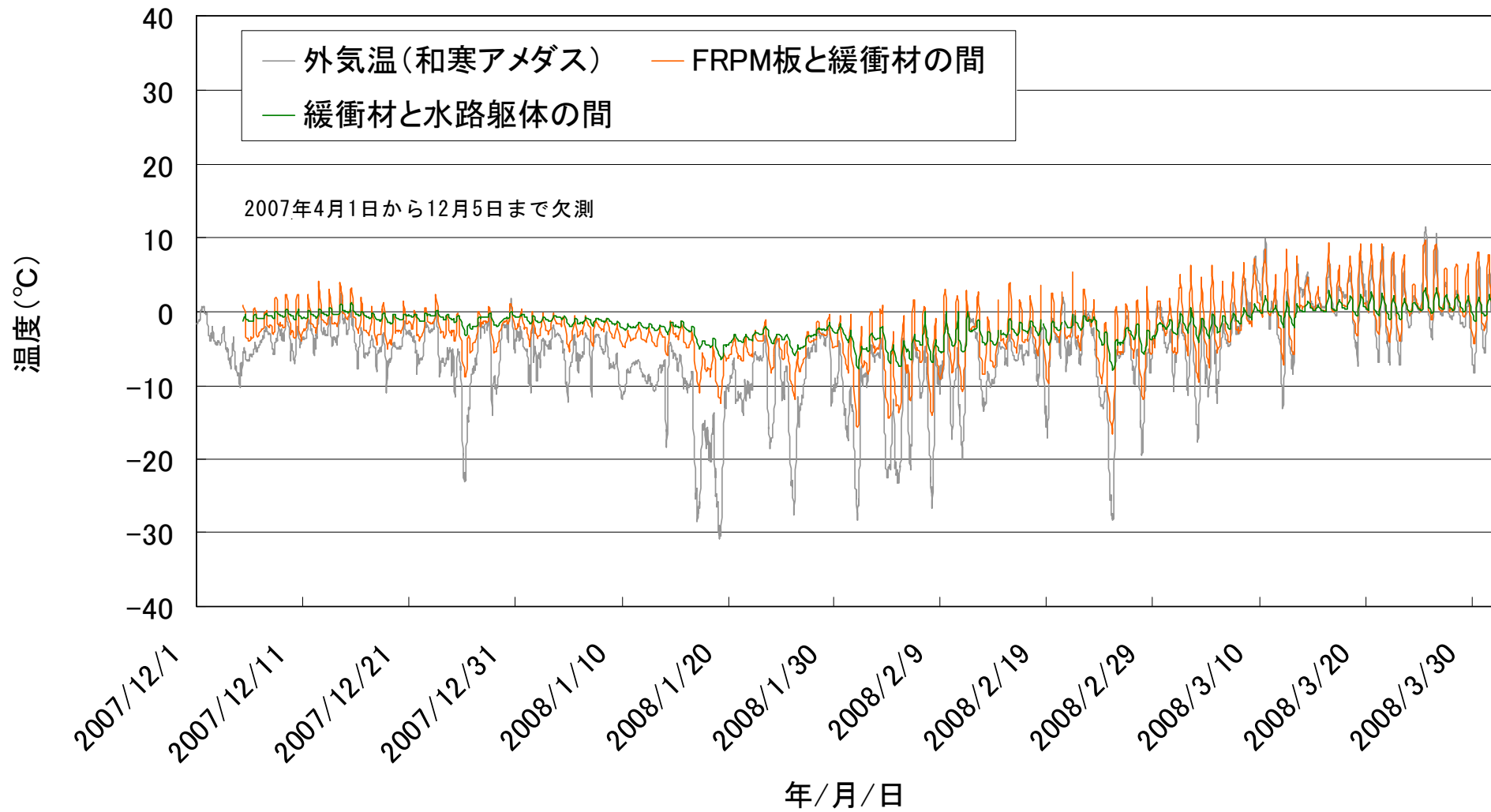
2007年度(12月～3月)のFRPM板補修区間における側壁表面および側壁背面の温度変化【南面】



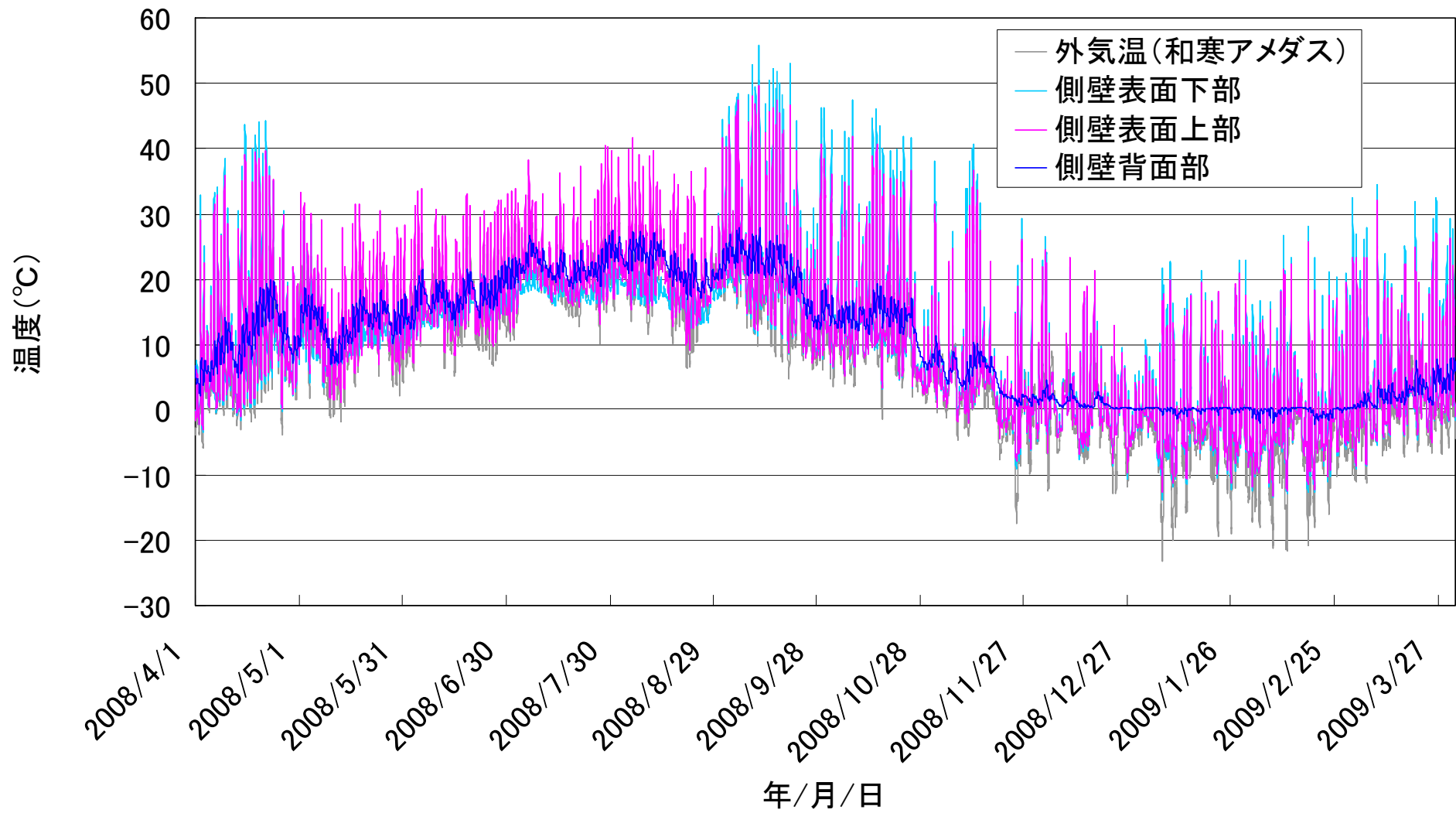
2007年度(12月～3月)のFRPM板補修区間における緩衝材のFRPM板側と水路躯体側の温度変化【南面】



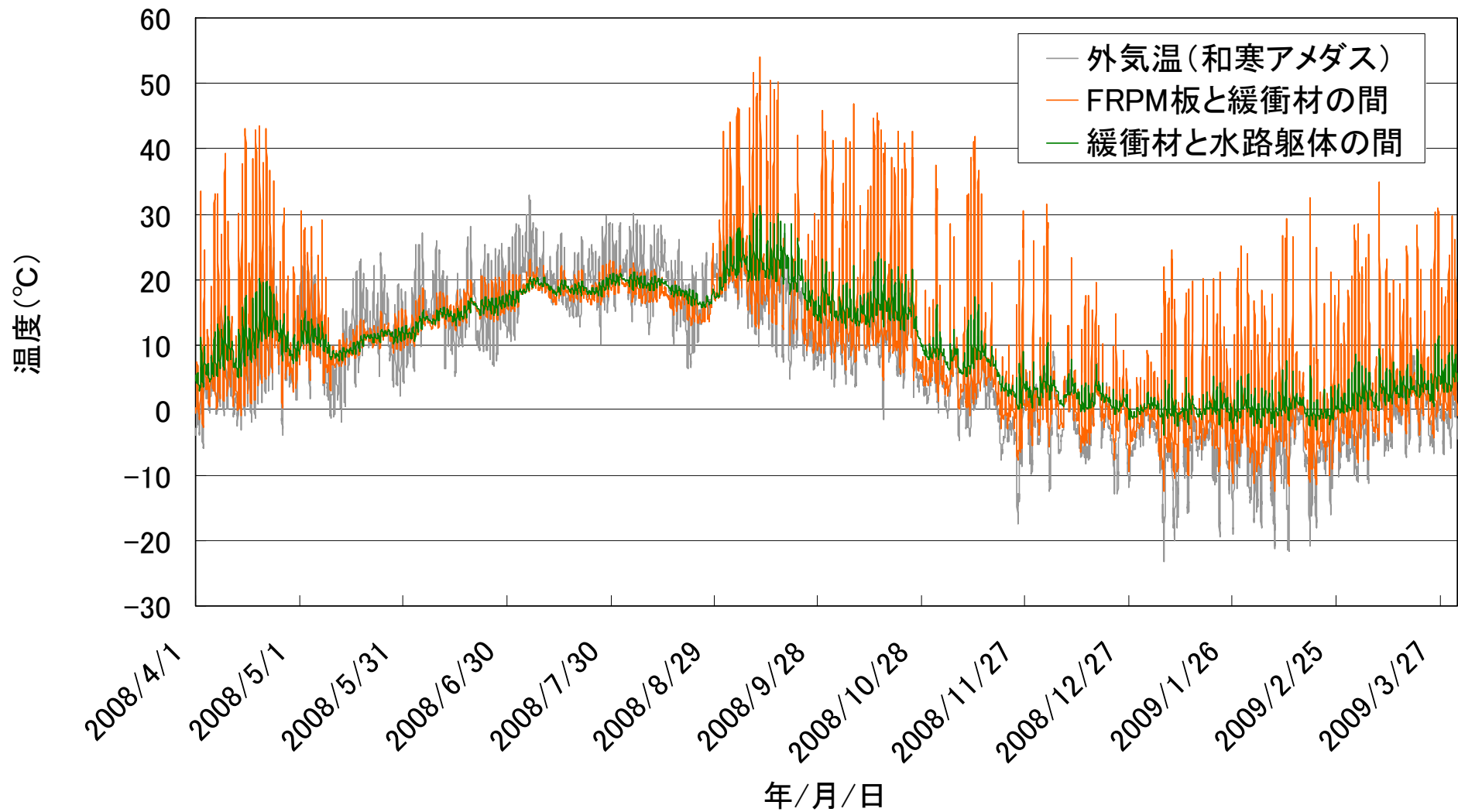
2007年度(12月～3月)のFRPM板補修区間における側壁表面および側壁背面の温度変化【北面】



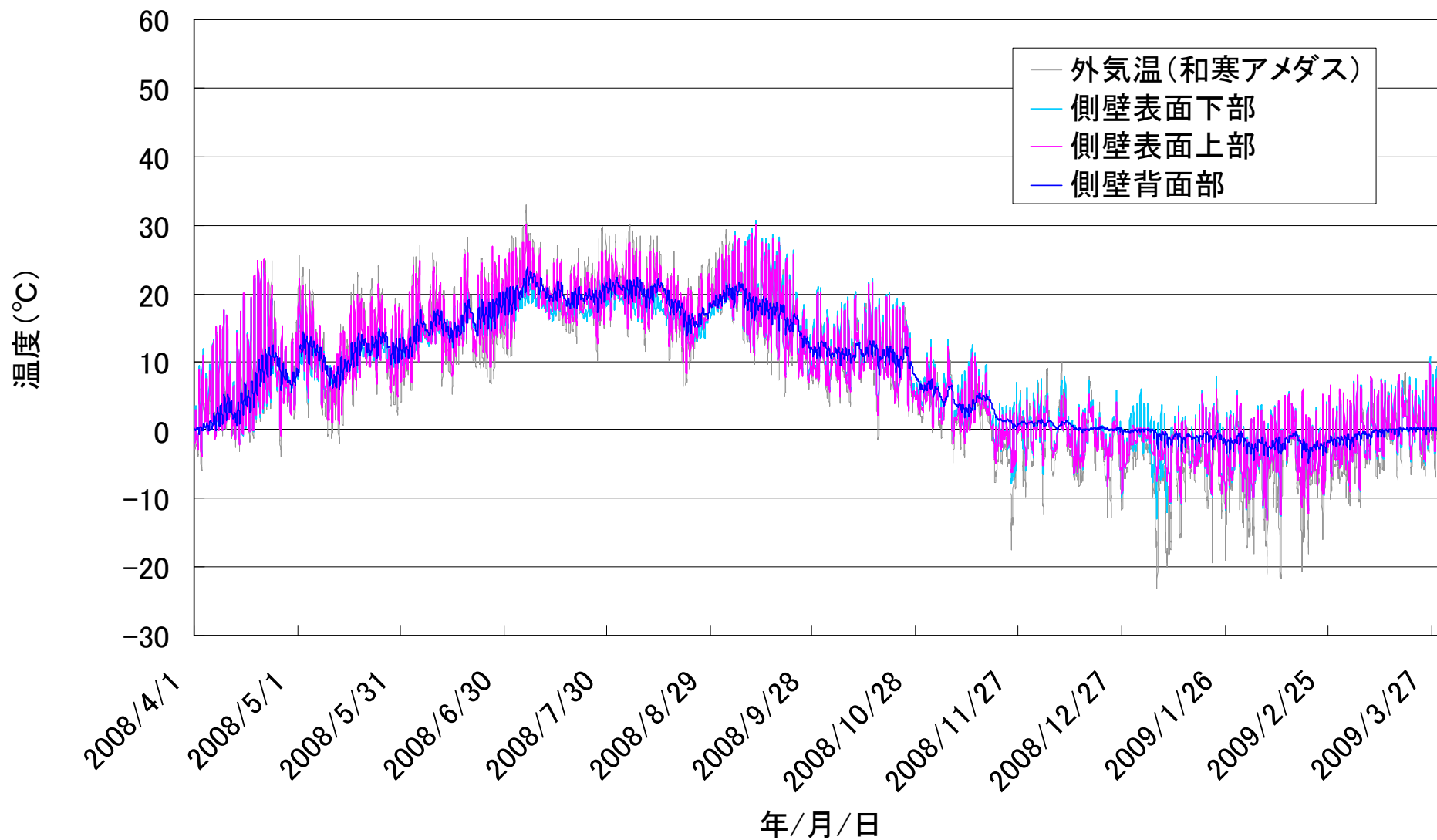
2007年度(12月～3月)のFRPM板補修区間における緩衝材のFRPM板側と水路躯体側の温度変化【北面】



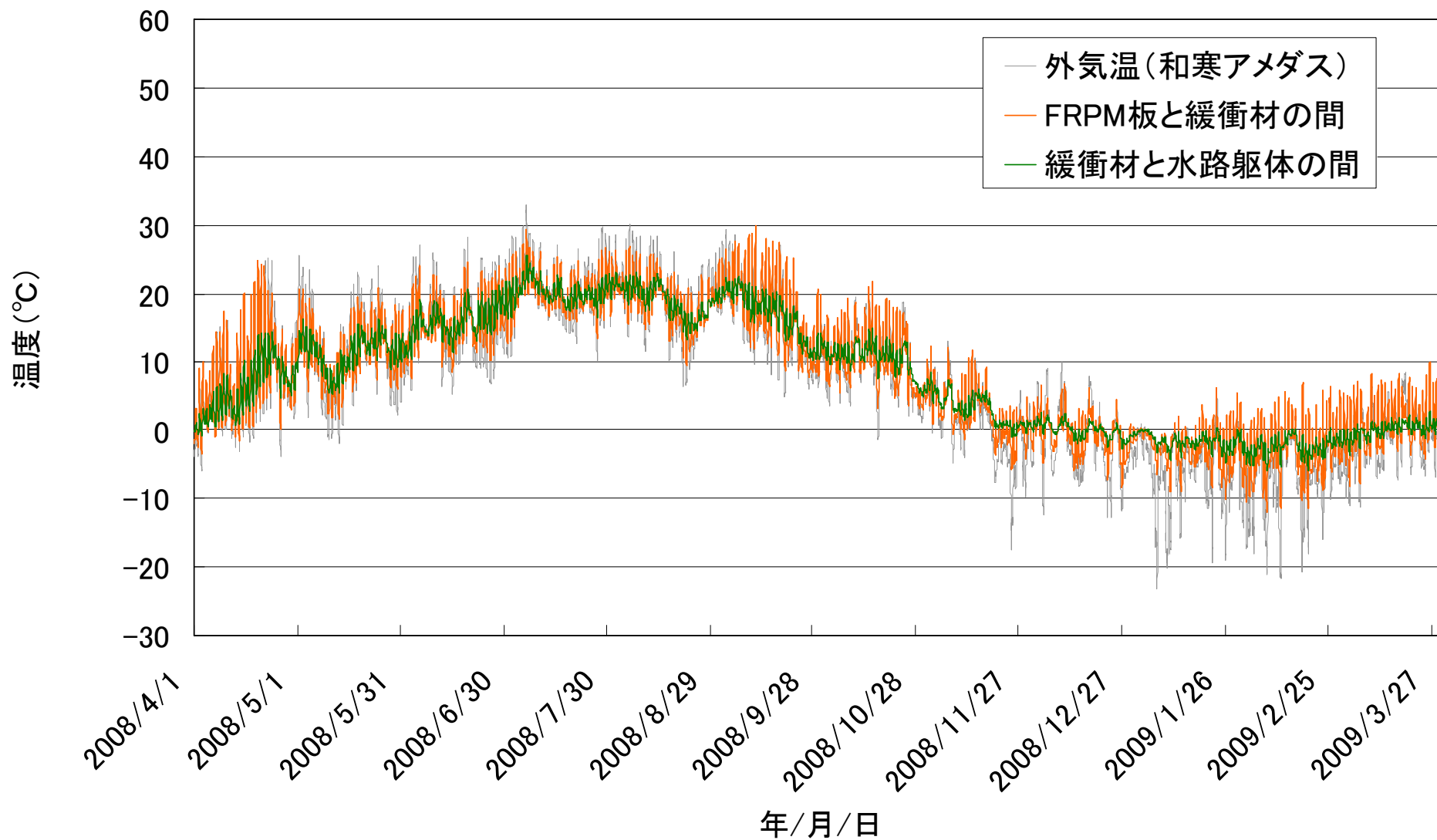
2008年度のFRPM板補修区間における側壁表面および側壁背面の温度変化【南面】



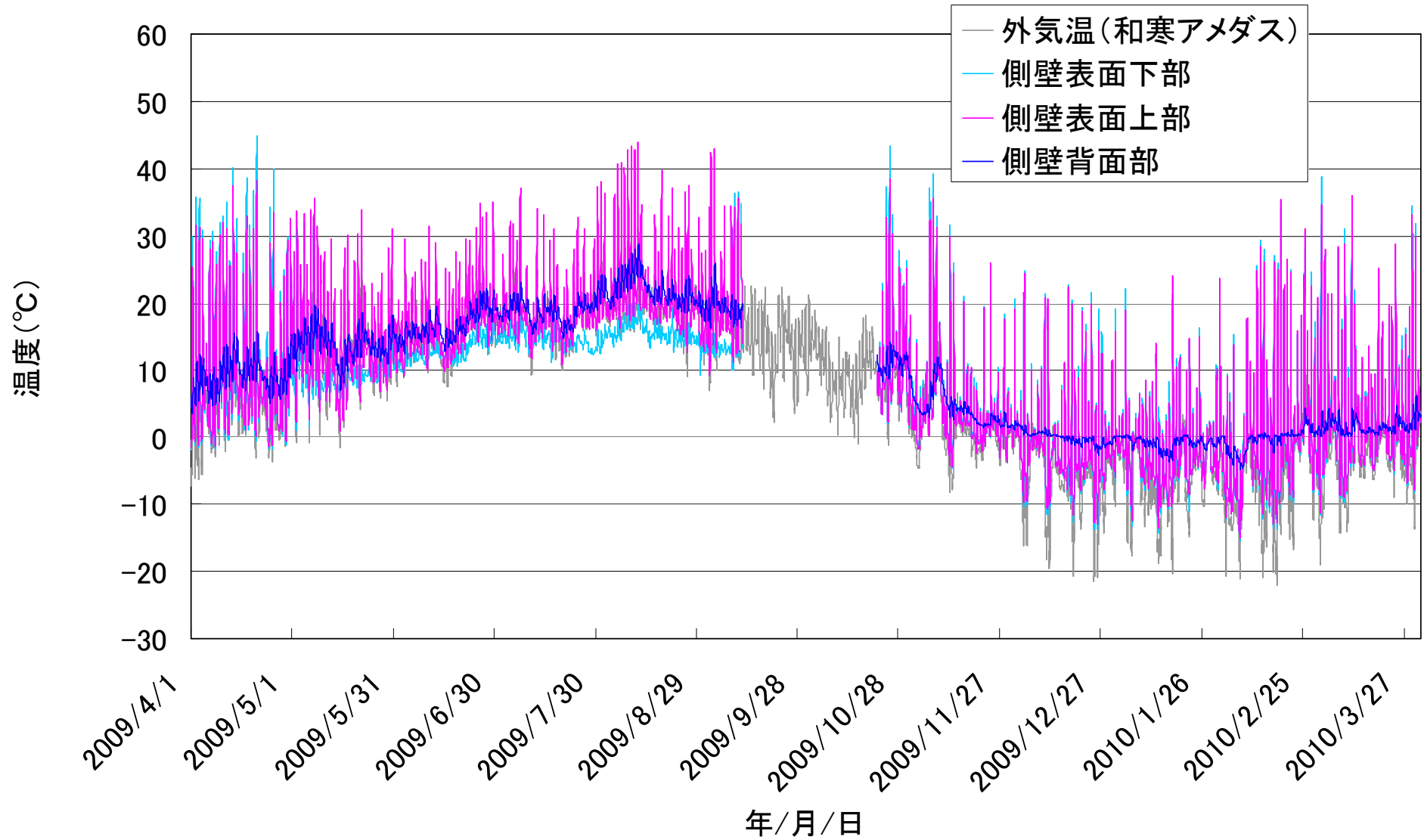
2008年度のFRPM板補修区間における緩衝材のFRPM板側と水路躯体側の温度変化【南面】



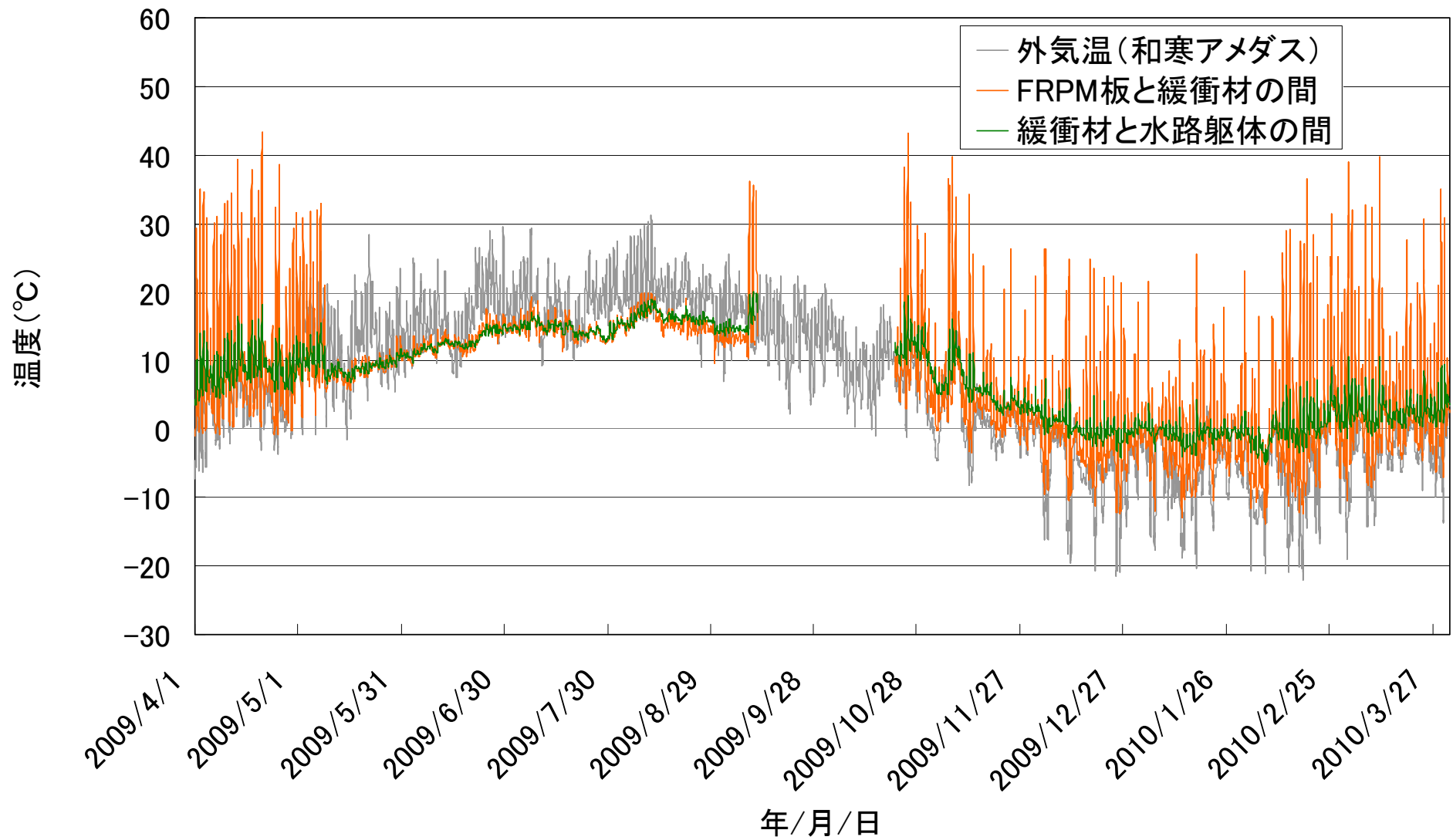
2008年度のFRPM板補修区間における側壁表面および側壁背面の温度変化【北面】



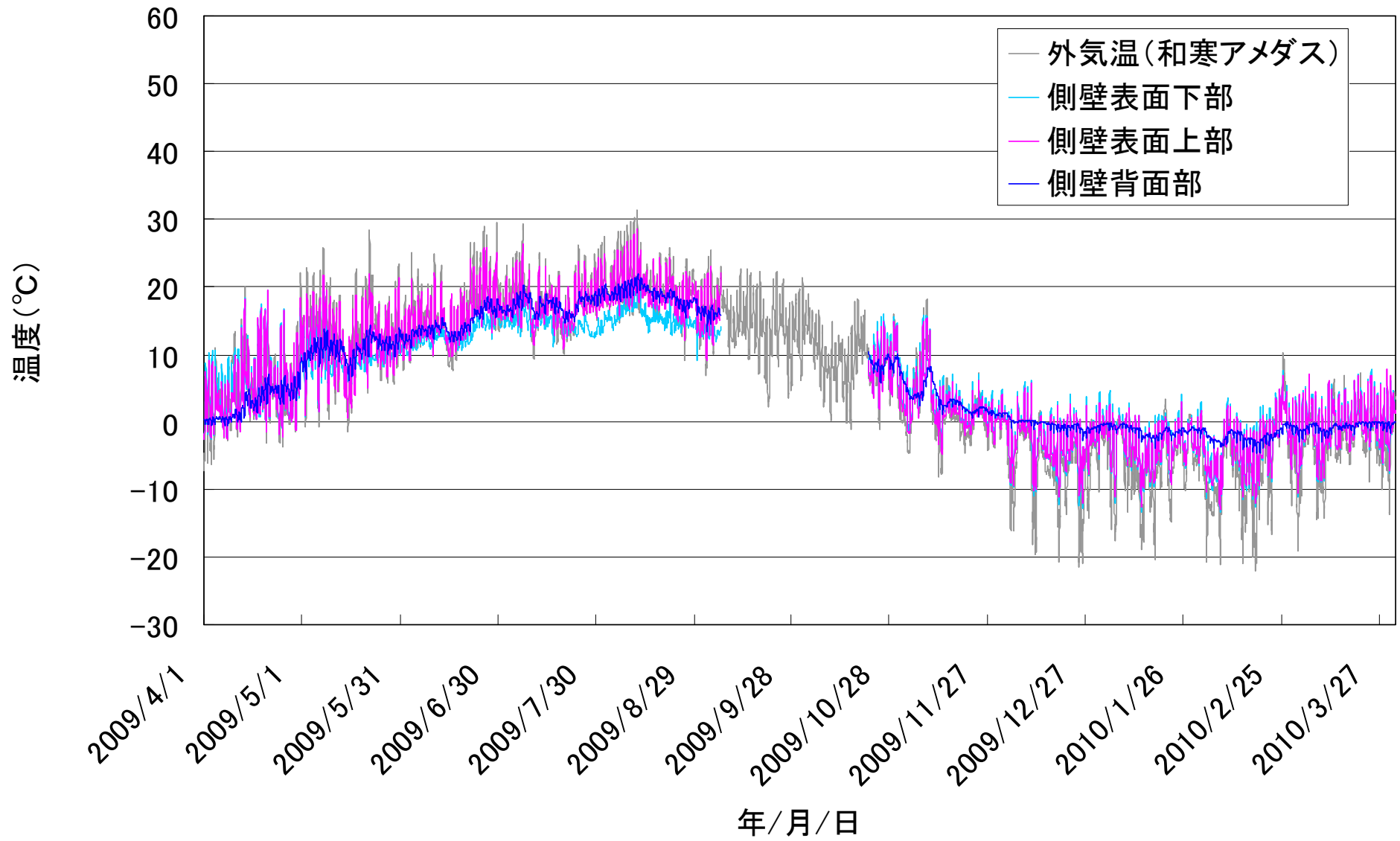
2008年度のFRPM板補修区間における緩衝材のFRPM板側と水路躯体側の温度変化【北面】



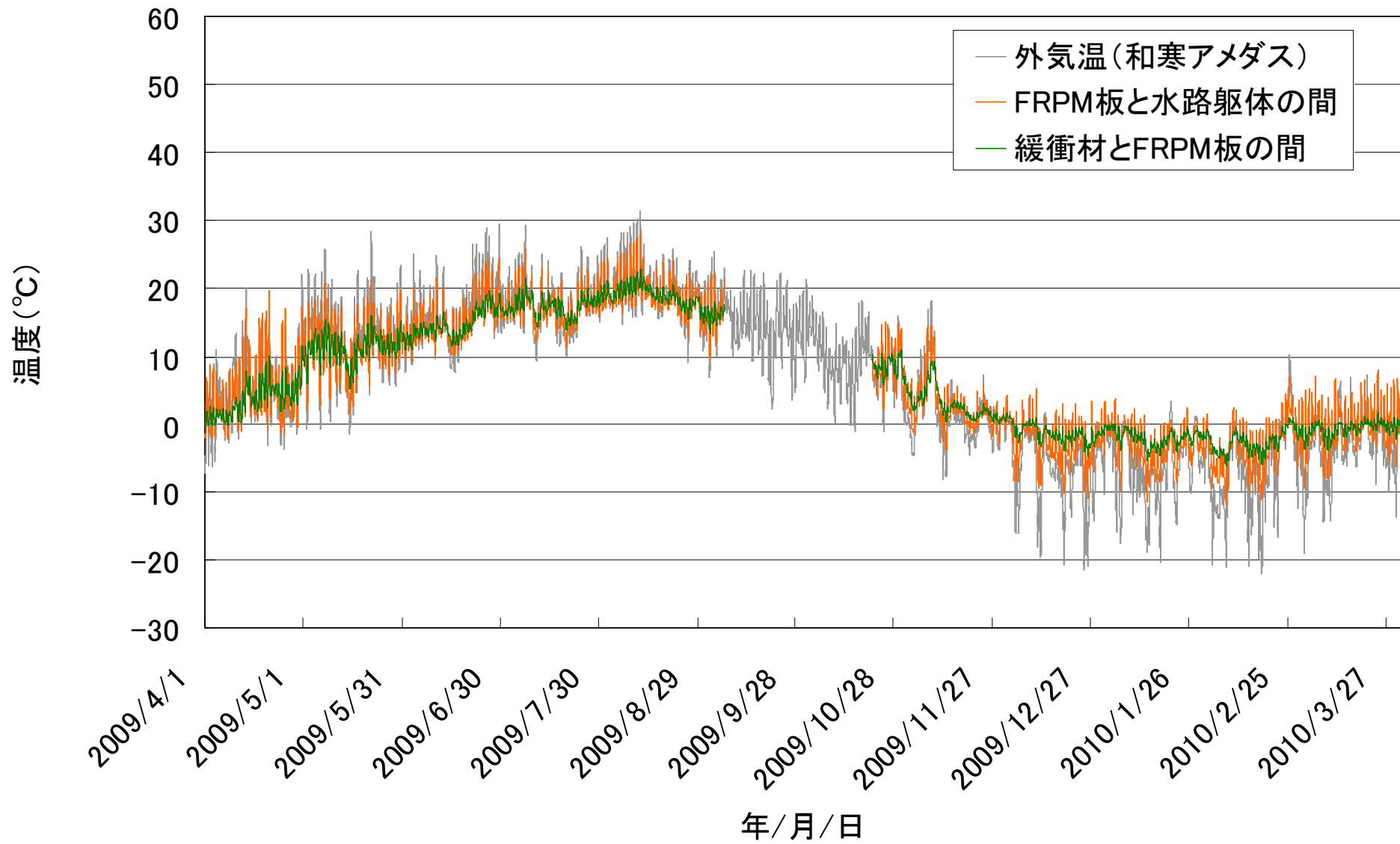
2009年度のFRPM板補修区間における側壁表面および側壁背面の温度変化【南面】



2009年度のFRPM板補修区間における緩衝材のFRPM板側と水路躯体側の温度変化【南面】

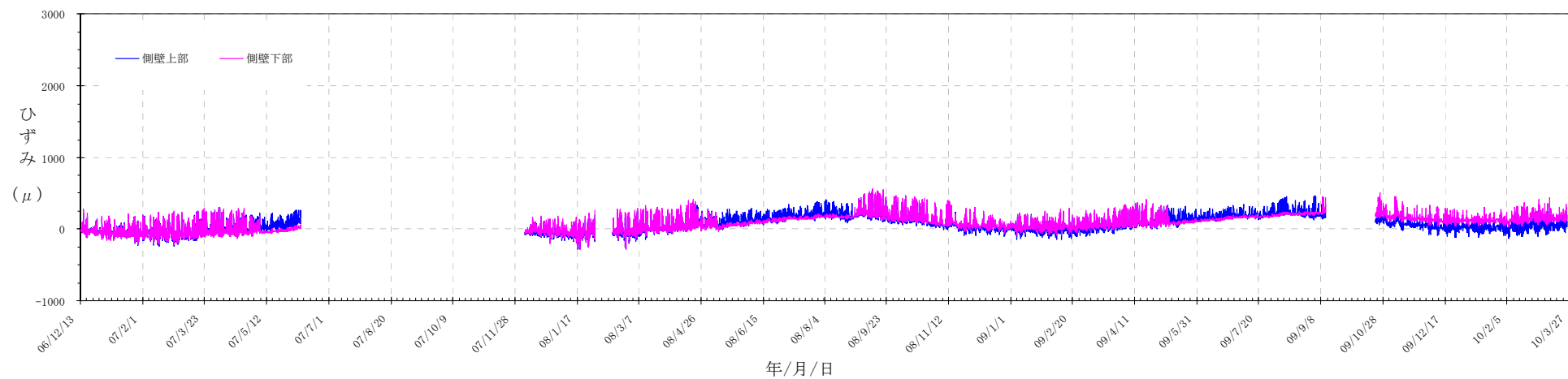


2009年度のFRPM板補修区間における側壁表面および側壁背面の温度変化【北面】

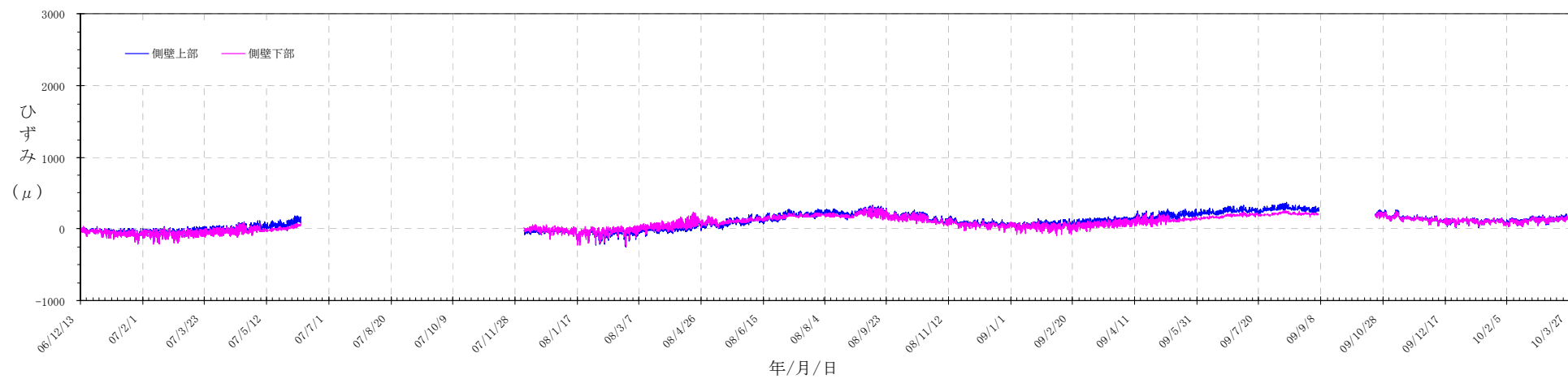


2009年度のFRPM板補修区間における緩衝材のFRPM板側と水路躯体側の温度変化【北面】

2. FRPM板補修区間の発生ひずみ



2006年度から2009年度までのFRPM板補修区間における側壁表面のひずみ【南面】



2006年度から2009年度までのFRPM板補修区間における側壁表面のひずみ【北面】

共同研究報告書
COOPERATIVE RESEARCH REPORT of P.W.R.I.
No.441 July 2012

編集・発行 ©独立行政法人土木研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは

独立行政法人土木研究所
寒地土木研究所 寒地技術推進室

〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目1番34号 電話 011-590-4046