

太陽エネルギー活用型ヒートポンプ暖冷房換気給湯システム搭載住宅のエネルギー自給率向上に関する研究

(その2) エネルギー自立率向上に向けた夏期シミュレーション構築とケーススタディ Study on Improving the Energy Independence of House by Using Air-Conditioning and Hot-Water Supplying System Utilizing PVT Air Collector & Heat Pump for Houses Construction of Summer Simulation and Case Studies for Improving the Energy Independence

学生会員 ○天野 智也 (東京大学) 正会員 前 真之 (東京大学)
正会員 高瀬 幸造 (東京理科大学) 正会員 盧 炫佑 (OM ソーラー)

Tomoya AMANO*1 Masayuki MAE*1 Kozo TAKASE*2 Hyunwoo ROH*3

*1 The University of Tokyo *2 Tokyo University of Science *3 OM Solar

This study shows about PVT air collector and heat pump system for domestic air conditioning ventilation and hot water supply in houses. This article shows construction of simulations using CFD and thermal network calculations, and case studies with simulations to improve the energy independence.

1. はじめに

近年、戸建住宅の省エネルギー化が求められており、戸建住宅における省エネルギー基準の引き上げや、省エネルギー基準への適合義務化が進められている。これらの流れを受けて、戸建住宅の高断熱化や設備の高効率化が促進されていることに加え、熱中症やヒートショック等の熱的健康快適性への関心の高まりを背景に、様々な全館空調システムが提案されている。

本研究では全館空調システムの中でも太陽エネルギーを最大限活用しエネルギー自立を目指す「太陽エネルギー活用型ヒートポンプ暖冷房換気給湯システム (以下、本システム)」を研究対象とし、本システム搭載住宅のエネルギー自立率向上と快適な温熱環境の実現に向けて、室温・熱負荷シミュレーションの構築と本システム搭載住宅の運用要素をパラメータとしたケーススタディを行いエネルギー消費やエネルギー自立の傾向を明らかにすることを本研究の目的とする。その1¹⁾では冬期についての検討を行ったが、本報では夏期についての室温・熱負荷シミュレーション構築とケーススタディを行った。

2. システム概要

本システムは (表1、図1) ダクト式全館空調システムの1種である。夏期において図2のように挙動し、屋根面に設置されたPhotovoltaic and Thermal (以下PVT) で太陽光発電および太陽熱集熱・夜間放射冷却を利用することで太陽エネルギー利用の最大化を目指しながら、1 台のヒートポンプ (以下HP) による暖冷房・給湯沸上を行う。これにより、冷房時の排熱を利用した給湯沸上といったエネルギー消費の高効率化やシステムのコンパクト化が

表 1 : 本システム能力概要

冷房	定格能力[kW]	4.0	換気	定格風量[m³/h]	200
	定格消費電力[kW]	1.115		定格消費電力[W]	65
	エネルギー消費効率	3.59		温度交換効率[%](夏期/冬期)	80/90
暖房	定格標準能力[kW]	4.0	給湯	全熱交換効率[%](夏期/冬期)	75/85
	定格標準消費電力[kW]	0.905		タンク容量[L]	370
	定格低温能力[kW]	4.70		冬期高温消費電力[kW]	1.35
	定格低温消費電力[kW]	1.700		中間期標準消費電力[kW]	1.06
	エネルギー消費効率	4.00			

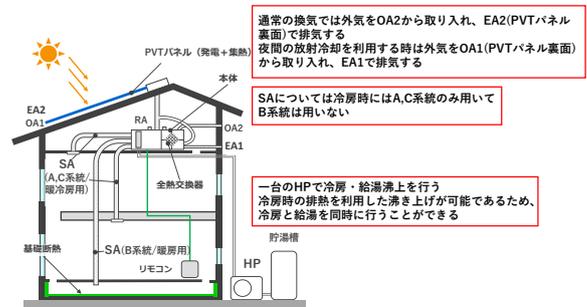


図 1 : 夏期における本システム概要

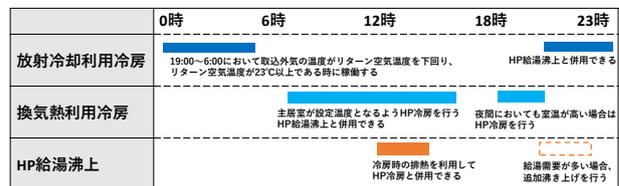


図 2 : 本システム夏期挙動イメージ

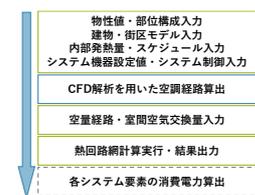


図 3 : シミュレーションフロー

表 2 : 建物モデル概要

建物モデル	バツッパ標準プラン
構造種別	木造2階建て
所在地	東京都23区(6地域)
UA値	0.46W/m²K
ηAC値	1.9
床面積	1F: 63.76㎡ 2F: 60.45㎡
PVT積載量・積載屋根勾配	8.2kW (クワトロDM410W×20)・4寸

可能である。日中の熱負荷はHPにて処理し、全熱交換器で熱回収を行った後、PVTパネル裏面を通して排気する。夜間は冷えた空気を屋根面から取り入れ室温が高い場合はHP冷房を行う。また、本体に第一種全熱交換換気機能を内蔵しており、各居室に換気口を設けず24時間換気が可能である。冷房時において空調空気は本体から給気ダクトを通じて、A,C系統の送風ファンによって各室に供給され、階段室や吹き抜けを通り小屋裏に設置された本体へ戻り住戸全体を循環する全館空調方式をとる。本システムの運転制御について、主居室に設置された本システムのリモコンセンサが感知した温度に応じて、送風温度と合計風量が制御され熱負荷が処理される。また、各居室で送風量や送風温度は制御できないため主居室以外の室温は成り行きで決定される。



図4：建物モデル

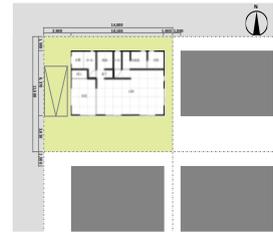


図5：街区モデル

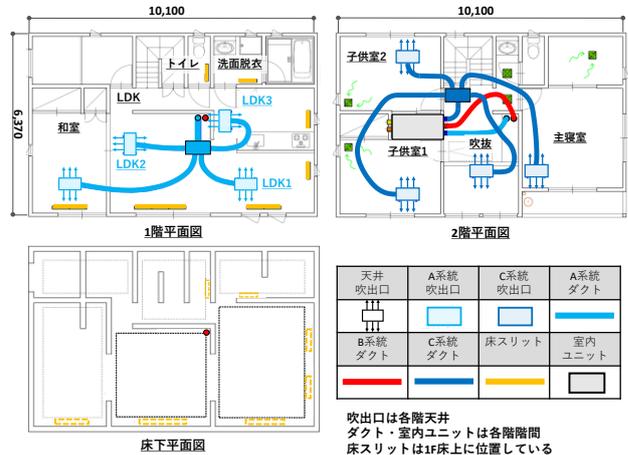


図6：空調計画

3. シミュレーション構築

3.1 シミュレーション全体概要

構築したシミュレーションフローを図3に示す。シミュレーションは主に熱回路網計算を用いて行うが、一部CFDで空間空気循環量・経路を導出し、全館空調システム特有の空調経路を熱回路網計算上で入力する。本研究ではパッシブ標準プラン²⁾をもとに作成した本システム搭載標準住宅モデル・街区モデル、空調計画(表2,図4,5,6)を用いた。各吹出口の風量は本システムに使用されるダクト部材の圧力損失実験値を用いて算出した。

3.2 CFD解析条件

CFDの解析条件を表3に示す。標準年拡張アメダス気象データ(2010年版)の東京(6地域)において最高外気温計測時を解析対象日時として定常解析を行い、解析結果を用いて空調経路を決定する。

3.3 熱回路網計算解析・制御条件/消費電力算出条件

熱回路網計算における計算条件を表4に示す。標準年拡張アメダス気象データ(2010年版)の東京(6地域)を用い、解析期間は5/1~9/30(解析助走期間は1年間)、解析間隔を1時間とした。なお、シミュレーション構築において冷房時の排熱を利用した給湯沸上は再現できておらず、排熱給湯時のCOPで電力に換算している。今後のシミュレーション精緻化における課題とする。本システムの放射冷却利用冷房の制御条件を図7に示す。「①19:00~5:59」、「②外気取込温度<リターン空気温度」、「③リターン空気温度 $\geq 23^{\circ}\text{C}$ 」という3つの条件を満たした時放射冷却利用冷房が稼働するように制御を入力した。本システムの給湯沸上の制御条件を図8に示す。貯湯槽を10ブロック分割し、「12:00~15:59に8番目の貯湯槽ブロックの温度が 65°C 以下または20:00~23:59に2番目の貯湯槽ブロックが 45°C 以下」という条件を満たした時給湯沸上が稼働するように制御を入力した。給湯使用条件は図9に示す通りである。また各システム要素の消費電力算出は表5に示すとおりである。

表3：CFD解析条件

CFD解析ソフト	FlowDesigner2022
建モデル	標準住宅モデル
解析領域	15m \times 15m \times 9m
収束判定条件	(定常)1.0 \times 10 ⁻³
解析対象日時	8/5 15:00
外気温/土壌温度	35.0 $^{\circ}\text{C}$ (標準年拡張アメダス気象データ6月の最高外気温) 18.8 $^{\circ}\text{C}$ (標準年拡張アメダス気象データの年平均外気温)
流入条件	AC系統使用時合計吹出風量: 735.3m ³ /h (圧力損失実験値を用いた風量計算より) AC系統使用時吹出風量: 18.8 $^{\circ}\text{C}$
流出条件	AC系統使用時: ユニット位置から735.3m ³ /h
内部発熱量	住宅専業主の判断基準のもとに作成

表4：熱回路網計算解析条件

熱回路網計算ソフト	ESUSM7.2
気象データ	標準年拡張アメダス気象データ2010年版 東京
解析期間	冷房期間: 5/1~9/30(助走期間: 1年間)
解析間隔	1時間
換気運転	風量: 常時200m ³ /h 温度交換効率: 80% 全熱交換効率: 70%
冷温水コイル	コイル温度効率: 80% コイルエンタルピー効率: 70%
放射冷却利用冷房稼働条件	19:00~5:59 外気取込温度>リターン空気温度 リターン空気温度 $\leq 23^{\circ}\text{C}$
HP給湯沸上稼働条件	貯湯槽を10ブロック分割し 10:00~14:00に8番目が 65°C 以下または 20:00~23:00に2番目が 45°C 以下
給湯使用量・スケジュール	省エネルギー基準M1スタンダード 4人モード平日(中)をもとに作成
内部発熱量・スケジュール	住宅専業主の判断基準のもとに作成

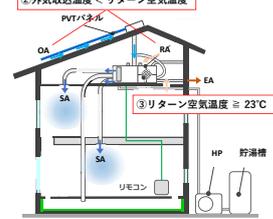


図7：放射冷却利用冷房

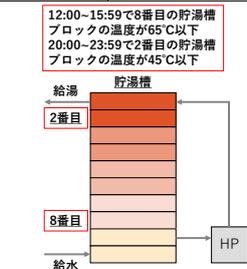


図8：給湯沸上の制御条件

制御条件

合計給湯使用量	450L/日
給湯設定温度	40.5 $^{\circ}\text{C}$

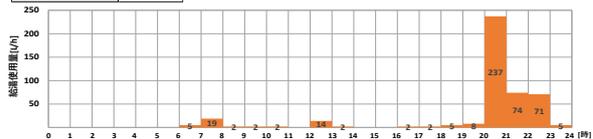


図9：給湯使用条件

表5：各システム要素の消費電力算出

HP冷房	平成28年省エネルギー基準に準拠したエネルギー消費性能の評価に関する技術情報(住宅)現行版におけるダクト式セントラル空調機のエネルギー消費性能算定方法を用いた
HP給湯	冷房負荷なし 全国9地点でシミュレーションを行った結果の平均値である以下の各外気温におけるCOPを線形補正したものをを用いた 7 $^{\circ}\text{C}$: 3.32, 16 $^{\circ}\text{C}$: 3.77, 25 $^{\circ}\text{C}$: 4.70
	冷房負荷あり COP: 8.54
換気送風	各使用ファンごとの消費電力量は以下の通り A,C系統ファン: 65W 排気ファン: 40W

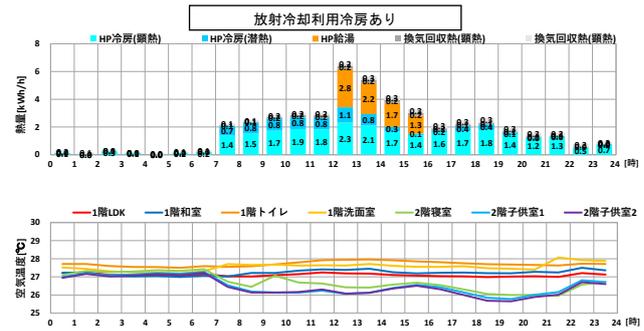
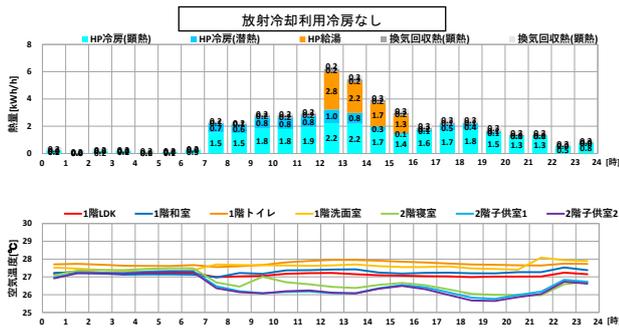


図 10：各ケース期間時刻別平均システム供給熱量・室温推移（8月）

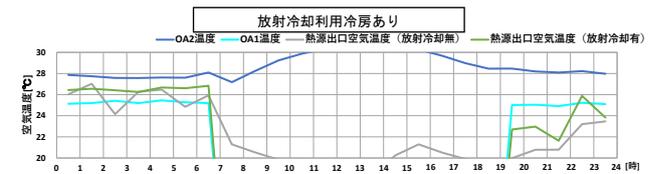
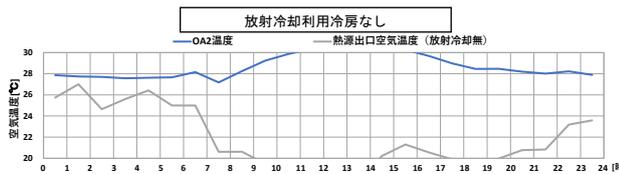


図 11：各ケース期間時刻別平均 OA1, OA2 温度・熱源出口空気温度推移（8月）

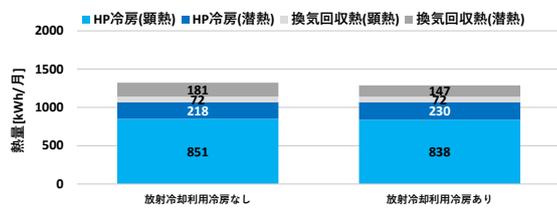


図 12：各ケース期間積算システム供給熱量（8月）

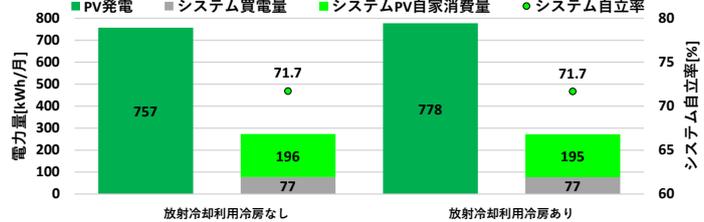


図 13：各ケース期間積算発電量・システム自立率（8月）

4. シミュレーションを用いたケーススタディ

4.1 システム挙動によるケーススタディ

本検討では放射冷却利用冷房の稼働をパラメータとしてケーススタディを行った。HEAT20 G2 レベル (U_A 値 = $0.46\text{W/m}^2\text{K}$) の断熱性能で AC 系統・設定温度 27°C 一定の場合においてシステム挙動が「放射冷却利用冷房が稼働しない（冷房運転は換気熱利用冷房のみ）」と「放射冷却利用冷房が稼働する」の 2 ケースで比較を行った。各ケースの解析期間における時刻別平均システム供給熱量と室温推移の比較を図 10 に示す。各居室の室温についていずれのケースでも大きな差はなく、どの時間帯においてもおおよそ 28°C 以下と快適範囲に維持されていた。また放射冷却利用冷房が稼働するケースは放射冷却利用冷房が稼働する 19 時以降に HP 冷房熱量（顕熱）が小さくなる傾向にあった。各ケースの解析期間における時刻別平均 OA1, OA2 温度・熱源出口空気温度を図 11 に示す。放射冷却利用冷房が稼働するケースでは稼働時間の 19 ～ 6 時において OA1 温度は OA2 温度よりも 3°C 程度低くなっているが、熱源出口空気温度は大きな差はなく、また 19 時以降においては放射冷却利用冷房が稼働していない方が熱源出口空気温度が低い結果になった。これがいずれのケースでも室温差があまりなく、放射冷却利用冷房が稼働する時 19 時以降に HP 冷房熱量（顕熱）が小さくなる要因だと推察される。各ケースの解析期間にお

けるシステム供給熱量（HP 給湯は除く）の積算値の比較を図 12 に示す。放射冷却利用冷房が稼働するケースは HP 冷房熱量（顕熱）と換気回収熱量（潜熱）が小さくなる一方で、HP 冷房熱量（潜熱）が大きくなった。放射冷却利用冷房は熱交換素子を経ずに外気を取り入れるため、稼働条件である夜間の外気温度がリターン空気温度より低い時は HP 冷房熱量（顕熱）を小さくできることがわかる。潜熱については外気が熱交換素子を経ないことで換気回収熱（潜熱）が小さくなるのに対し、その分冷温水コイルが処理する潜熱が大きくなるため HP 冷房熱量（潜熱）が大きくなっている。供給熱量の合計では放射冷却利用冷房が稼働すると 2% の熱量削減につながった。各ケースの PV 発電量とシステム消費電力量・システム自立率の比較を図 13 に示す。なお、本研究ではシステム消費電力量に対して PV 発電量が賄えた割合をシステム自立率とし、家電等の消費電力は除いている。放射冷却利用冷房が稼働するケースは PV 発電量が 3% 増加した。夜間に冷えた空気を屋根面から取り入れることで日中熱くなった PVT パネルを冷やして発電効率を上げることができたことが示唆される。しかし夜間放射冷却により PV 発電量が増えてもシステム自立率は向上せず、発電量の増加分はすべて売電していた。夜間放射冷却は供給熱量・消費電力量の削減、PV 発電量の増加につながるがシステム自立率向上にはつながらなかった。

表 6 : 各ケース概要

Case1	温度	27°C				
	系統	AC				
Case2	温度	29°C	-1°C/h	27°C	+1°C	29°C
	系統	AC				
Case3	温度	27°C	-1°C/h	25°C	27°C	
	系統	AC				
Case4	温度	29°C	-1°C/h	25°C	27°C	+1°C 29°C
	系統	AC				

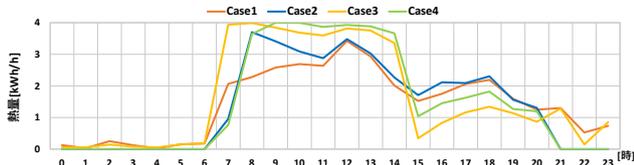


図14 : 各ケースにおける時刻別平均 HP 冷房熱量・消費電力量 (8月)

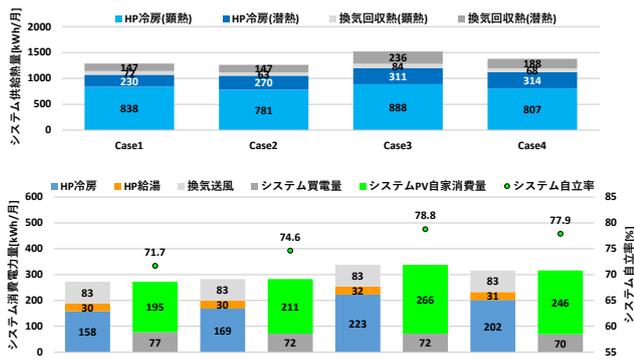


図15:各ケースにおける期間積算システム供給熱量・消費電力量 (8月)

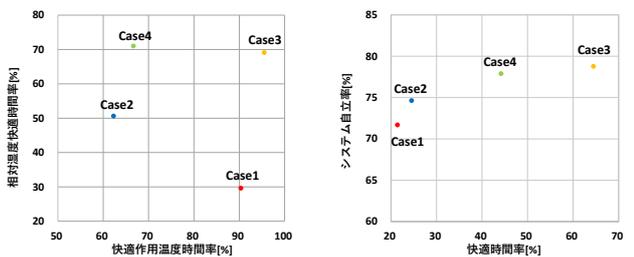


図16 : 各ケースの作用温度と相対湿度の関係

図17 : 各ケースのシステム自立率と温熱環境の関係

4.2 設定温度によるケーススタディ

本検討では HEAT20 G2 レベルの断熱性能で放射利用冷却が稼働する場合において、設定温度によるケーススタディを行った。表 6 に示すように AC 系統・設定温度 27°C 一定の Case1 に対して、夜間の設定温度を上げて夜間 HP 冷房熱量削減を図る Case2、日中の設定温度を下げる Case3、Case2,3 の両立を図る Case4 を比較した。8 月

$$\text{快適作用温度時間率} = \frac{\text{OT}_{24\sim 28}}{d \times 24 \times r} \times 100[\%] \quad (1)$$

d : 対象期間日数 r : 対象室数(居室, トイレ, 洗面脱衣室)
OT_{24~28} : 対象室作用温度が 20~24°C 内の時間数[h]

$$\text{快適相対湿度時間率} = \frac{\text{RH}_{40\sim 60}}{d \times 24 \times r} \times 100[\%] \quad (2)$$

d : 対象期間日数 r : 対象室数(居室, トイレ, 洗面脱衣室)
RH_{40~60} : 対象室相対湿度が 40~60% 内の時間数[h]

$$\text{快適時間率} = \frac{\text{OT}_{24\sim 28} \& \text{RH}_{40\sim 60}}{d \times 24 \times r} \times 100[\%] \quad (3)$$

d : 対象期間日数 r : 対象室数(居室, トイレ, 洗面脱衣室)
OT_{24~28} & RH_{40~60} : 対象室作用温度が 24~28°C 内かつ対象室相対湿度が 40~60% 内の時間数[h]

の時刻別平均 HP 冷房熱量・消費電力量 (図 14) を比較すると、Case2,4 に夜間 HP 冷房熱量削減が見られた一方で、Case3 は夕方以降の HP 冷房熱量削減が見られた。これは日中に建物全体の室温が下がり、設定温度にするための必要熱量が小さくなったためと考えられる。また、Case2~4 共通で設定温度を下げる時間で HP 冷房熱量が増加しており、発電可能時間で設定温度を下げる必要性が推察された。8 月の積算システム供給熱量 (HP 給湯は除く)・消費電力量 (図 15) においても Case1 より Case2,4 が 6~9% のシステム買電量削減、3~6% のシステム自立率向上と夜間設定温度を上げることが効果的である一方で、Case3 にも 6% のシステム買電量削減、7% のシステム自立率向上と効果が得られた。8 月の快適時間率を図 16、システム自立率と温熱環境の関係を図 17 に示す。本検討では温熱環境評価に(1),(2),(3)式で定義した快適時間率を用いている。Case1 と比較して Case2~4 はシステム自立率と快適時間率の向上を図ることができており、中でも Case3 が最も評価が高い結果となった。

5. 総括

本研究では熱回路網計算と CFD を用いて本システム搭載住宅に近い挙動を再現した夏期シミュレーションを構築し、本システム搭載住宅のシステム挙動・運用要素に関するケーススタディを行いエネルギー消費やエネルギー自立の傾向を明らかにした。シミュレーション構築の課題である冷房排熱を給湯沸上の空気熱源として用いることを再現することで更なるエネルギー自立率向上が見込まれるが本研究の検討でも一定の効果が見られた。

参考文献

- 1) 高橋勇斗, 太陽エネルギー活用型ヒートポンプ暖冷房換気給湯システム搭載住宅のエネルギー自給率向上に関する研究 (その 1) エネルギー自給率向上に向けた冬期シミュレーション構築とケーススタディ, 空気調和・衛生工学会大会 2022.
- 2) 谷口景一郎, 新パッシブ標準プランの提案, 自立循環プロジェクトシンポジウム 2020.

謝辞: 本研究は、「国土交通省サステナブル建築物先導事業 (省 CO2 先導型) 採択案件「オールタイム・リアル ZEH の推進 ~太陽熱を活用した『エネルギー自立』に向けた取組み~」に係る技術検証」による成果の一部である。実測にご協力いただいた居住者、工務店をはじめとする関係者の皆様に深く謝意を表します。