

手術室空調システム「クリーンコンポ デュアルエアー」の開発

— 下降流と旋回流の2つの気流で患者の医療環境と医療従事者の快適環境を両立する —

山田 容子 (技術研究所)	今井田 尚文 (北海道支店)	藤田 智治 (技術研究所)	小林 浩司 (技術研究所)	長谷部 弥 (技術研究所)	栗原 隆 (技術研究所)
	辻 裕次 (設計本部)	白谷 毅 (設計本部)	熊野 直人 (設計本部)	村上 宏次 (設計本部)	津坂 剛男 (設計本部)

Air conditioning system “Clean Compo Dual Air” for operating rooms

— This system successfully balances medical-care air environment for the patient and well-being thermal comfort for doctors and nurses with Dual Airflow formed by downflow and spiral flow —

Yoko Yamada, Naofumi Imaida, Tomoharu Fujita, Koji Kobayashi, Hisashi Hasebe,
Takashi Kurihara, Yuji Tsuji, Takeshi Shiratani, Naoto Kumano, Koji Murakami,
and Goo Tsusaka

本報では、手術を受ける患者に必要な医療環境と、手術に携わる医師や看護師などの医療従事者の作業に適した快適環境を両立する手術室空調について述べる。1室に2つの温熱環境形成を実現することを目的に、送風温度制御の垂直下降流と室温制御の水平旋回流の2方向気流の組み合わせた、空調システム「クリーンコンポ デュアルエアー」を開発した。シミュレーションと実物大モックアップ手術室での実験により技術開発を行い、さらに実際の手術室において運用段階の性能検証を行った。その結果、開発空調は、患者だけではなく、医療従事者に対しても快適な温熱環境を提供できることを明らかにした。

This report describes about new air-conditioning system for operating rooms to be able to balances medical-care air environment for the patient and well-being thermal comfort for doctors and nurses. This new system named “Clean compo Dual-air” provides double individual environments in an operating room with dual-airflow (downflow which control supply air temperature and spiral flow which control room air temperature). From the result of CFD simulation, experiment at the real size mockup operating room, and performance verification at the actual operating room in operation, effectiveness of this new system have become clear.

1. はじめに

手術室の空調設備は、手術を行うために必要な温湿度環境と清浄度を確保することを主たる目的としている^{1),2)}。

従来の一般的な空調方式は、手術を受ける患者の状況や手術工程に合わせた空調を行うことを前提に、天井中央部に設けられた一カ所の吹出口から、執刀医や患者のいる術野エリア^{*1}に向けて空調空気を吹くのが主流となっている。この従来の空調方式では室内の空気が一部滞流し、また麻酔科医や外回り看護師などがある周囲エリア^{*2}では上下で温度差が生じ足元が冷えるなど、空調の改善を求める声が上がっていた。

そこで、送風温度制御の垂直下降流と室温制御の水平旋回流の2方向気流の組み合わせることにより、手術室内の空気を空調し循環することで、手術を受ける患者だけではなく、手術室で働くすべての医療スタッフに対しても快適な温熱環境を提供する空調システム「クリーンコンポ デュアルエアー」を開発した(図-1)。また、水平旋回流によって空気の滞流域を解消し、室内の清浄度向上も実現した。

シミュレーションと実物大モックアップ手術室での実験により技術開発を行い^{3),5)}、実際の手術室において運用段階の性能検証を行った^{6),7)}ので、その結果を報告する。

※1 術野エリア：本来術野は手術部位を意味するが、ここでは手術台や器械台をカバーする室中央エリアとする

※2 周囲エリア：手術台から少し離れた麻酔科医や技師、外回り看護師などの作業エリアとする

2. 手術室に在室する3者

手術室には手術を受ける患者と医療スタッフがおり、そのうち医療スタッフは以下の2者に大別される。

- ・ 執刀医や助手、器械出し看護師など手術台に近接したエリアで防水長袖手術ガウンを着用し、術野(手術部位)に直接アプローチする医療スタッフ(以降、術野スタッフとする)
- ・ 麻酔科医や外回り看護師、臨床工学技師など術野スタッフの周囲で半そで術衣を着用し、患者の状態管理や室温調整、手術記録などを行う医療スタッフ(以降、周囲スタッフとする)

このように手術室では着衣量や活動量が様々で温熱環境への要求条件が異なる患者、術野スタッフ、周囲スタッフの3者が1室に長時間滞在している(図-2)。室内の温湿度は患者の容態や術式に応じて決定されるため、医療スタッフはこれまで暑さや寒さを感じながら手術をしていた。

3. 従来システムの概要

一般的な手術室の空調は、手術台上部の天井吹出口から温調された清浄空気的全風量を吹出し、壁面下部に複数設置された吸込口から還気を吸込み循環している(図-3)。

手術室壁面に設置されたサーモセンサの温度が一定になるように、熱負荷の変化や設定温度設定の変更に応じて吹出温度が変動している。これが吹出温度の変動の影響を直接受ける術野スタッフの不快感の一因と考えられる。また吹出気流はそのまま下降し床に沿って吸込口に向かうショートサーキット流れとなり、壁面上部の流れは緩やかで熱や粒子の滞流域となっている。最近は低体温化防止のために温風加温装置によって患者の体表面を直接温め、室温は術野スタッフの作業に適した快適温度(要求温度：低め)に設定することもあるが、この場合、周囲スタッフ(要求温度：高め)が寒さを感じる。周囲は、顔付近は温度が高く気流が緩やかで、足元は温度が低く気流が速いため、この上下の気流差や温度差も周囲スタッフの寒さや不快感の一因と考えられる。

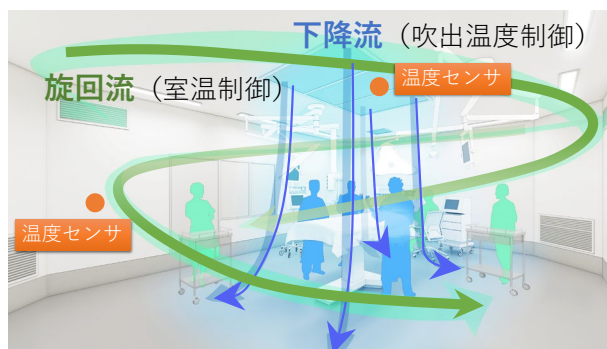


図-1 垂直下降流と水平旋回流によるクリーンコンポ デュアルエア(イメージ)

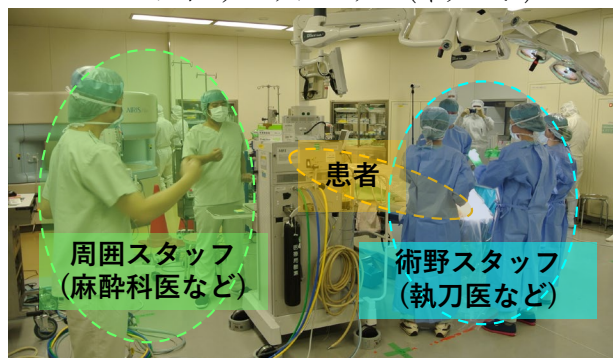


図-2 手術室に在室する3者



図-3 従来システムによる空調気流

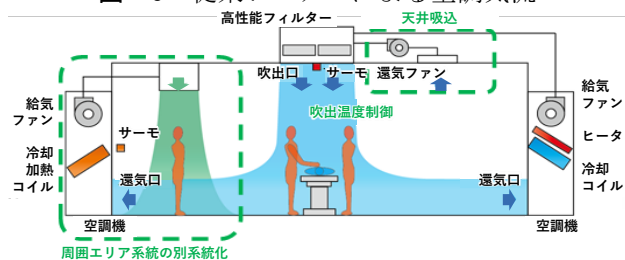


図-4 クリーンコンポ デュアルエアの空調気流

4. クリーンコンポ デュアルエアの概要

空気の流れに着目し、患者や術野スタッフがいる術野エリアを空調する下降流と、周囲スタッフがいる周囲エリアを空調する旋回流の2つの気流を用いた(図-4)。

術野エリアは従来と同じく下降気流によって温度と清浄度を確保し、周囲エリアは術野エリアの環境を乱さず、気流による不快感(ドラフト)を低減させることを目的に、天井付近の隅角部壁面の対角に設けられた吹出口によって水平方向に旋回する空気の流れを形成した。旋回流によって室内空気全体を循環

させて術室全体の清浄度を高めることができ、換気効率も向上した。さらに術野エリアと周囲エリアで異なる快適な温熱環境の要求条件に応えるために、従来1系統で行っていた空調を異なる2系統(術野系統、周囲系統)の気流で行い、1室に2つの温度帯を実現した。空調を別系統にすることでエリアそれぞれの温度設定も可能になった。設定温度変更への追従性も向上したことで手術内容や手術工程に合わせた柔軟な温度管理ができるようになり、手術室環境の高機能化を実現した。

5. 気流解析シミュレーションによるシステム検討

新たな空調システムの構築にあたり、術野系統と周囲系統の吹出口の仕様や配置等を、汎用の熱流体解析ソフトを用いた気流解析シミュレーションにより検討した。

5.1 シミュレーションモデル

クリーンコンポ デュアルエアーのシミュレーションモデルでは、術野上部天井面に術野系統の吹出口を1か所、周囲壁面の対角位置に周囲系統の吹出口を2か所配置した。吸込口は壁面下部と天井面にそれぞれ設置した。

【解析条件】

- ・手術室：8.5m×5.5m(約47m²)
- ・天井高：3.0m
- ・在室人員：6人
- ・内部発熱：7.0kW
(无影灯、天井照明、医療機器)
- ・発塵量(人体)：7,000個/(秒・人)
- ・術野吹出温度：23℃
- ・室内設定温度(周囲)：26℃

5.2 気流分布

各吹出口からの気流の流線図を図-5に示す。対角に配置された周囲吹出口からの気流は、室の外周部を大きく回る旋回気流となっている。また、術野吹出口からの気流は周囲系統の気流に乱さずに下降し、術野に到達していることが確認できる。

5.3 温度分布

従来空調による室内温度分布(図-6)では、周囲エリアは上下に温度層ができ、術野エリアでは縮流が発生していた。クリーンコンポ デュアルエアーによる室内温度分布(図-7)をみると、術野系統の吹出温度23℃に対し、術野エリアは24℃前後と術野スタッ

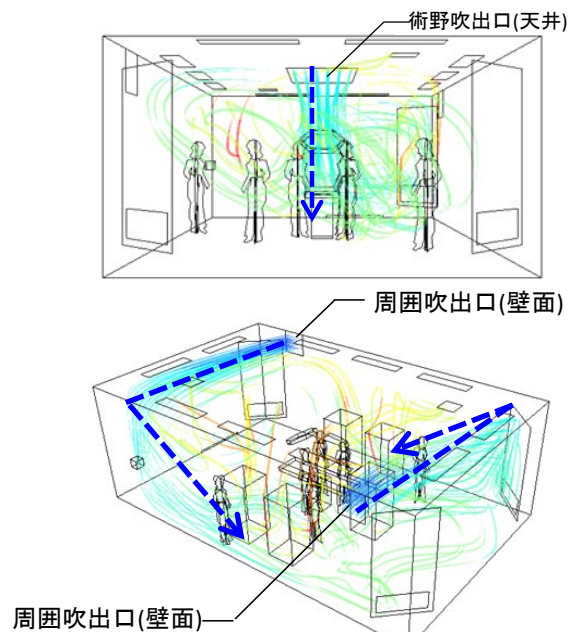


図-5 シミュレーションによる流線図

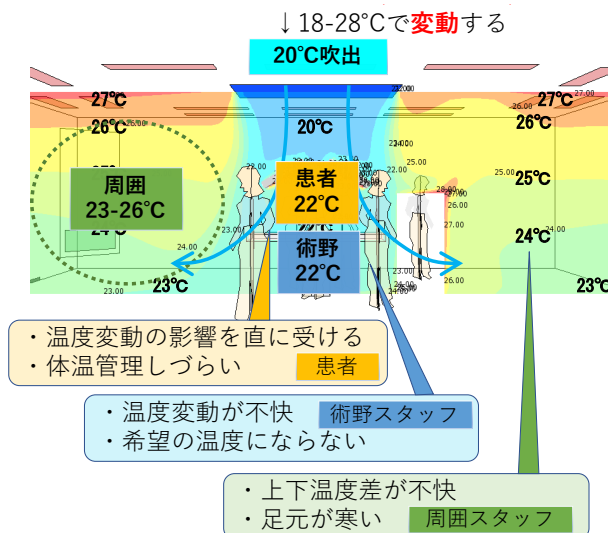


図-6 温度分布シミュレーション結果(従来空調)

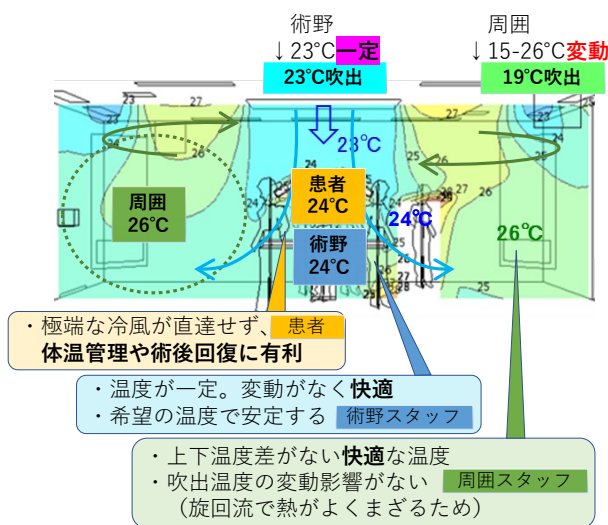


図-7 温度分布シミュレーション結果
(クリーンコンポ デュアルエアー)

フの快適温度領域^{※3}となっている。併せて、縮流も解消されている。周囲エリアは設定温度 26℃に対し、居住域の室温は 24-26℃と周囲スタッフの快適温度領域^{※4}となっており、上下温度差が従来空調と比較して小さくなっている。

※3 室温 24.0℃ 放射温度 23.0℃
湿度 50%RH 風速 0.2m/s
着衣量 clo 0.56(長袖/上着/長ズボン)
活動量 met 1.4 (立位)
⇒術野スタッフの PMV ≒ 0

※4 室温 26.0℃ 放射温度 25.0℃
湿度 50%RH 風速 0.15m/s
着衣量 clo 0.43(半袖/長ズボン)
活動量 met 1.2 (安静立位)
⇒周囲スタッフの PMV ≒ 0

5.4 清浄度分布

従来空調による清浄度分布(図-8)をみると、周囲エリア上部に粒子の滞流域があり、吹出口からの清浄空気は縮流し清浄空気の断面が小さくなっていた。クリーンコンポ デュアルエアによる清浄度分布(図-9)をみると、周囲エリア上部の粒子滞留および術野エリアの縮流が解消されている。

6. 実物大モックアップ手術室実験による検証

シミュレーション結果の確認検証のため、実物大の手術室モックアップを製作し、空調設備を実装して実験を行った。測定対象は、温度、清浄度(Dp ≧ 0.5μm 以上の個数粒子濃度)、気流性状の3項目としている。

6.1 空調システム概要

＜術野系統＞

- ・空冷ヒートポンプパッケージ
床置ダクト吹型(壁面埋込み)+再熱用電気ヒータ
- ・吹出口：SA=3,000CMH (空調空気+循環+外気)
パンチングメタル、HEPA フィルタ付
W1200mm×L2400mm

- ・吹出温度制御

＜周囲系統＞

- ・空冷ヒートポンプパッケージ
床置ダクト吹型(壁面埋込み)
- ・吹出口：SA=1,350CMH ×2台 (空調空気)
VHS 型、HEPA フィルタ付 W610mm×L610mm
- ・壁面サーモによる室内温度制御

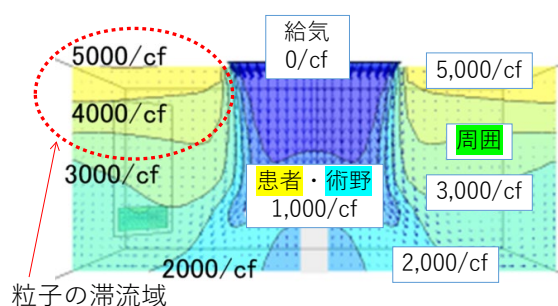


図-8 清浄度分布シミュレーション結果(従来空調)

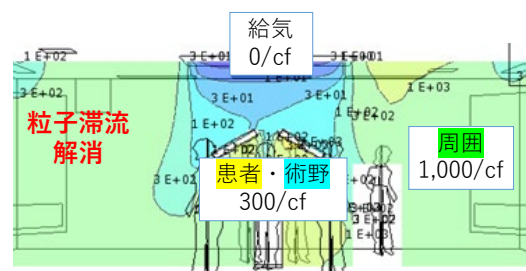


図-9 清浄度分布シミュレーション結果
(クリーンコンポ デュアルエア)



周囲エリアの水平旋回気流



術野エリアの下降気流

図-10 スモークマシンによる気流可視化結果

6.2 気流分布

スモークマシンによる気流可視化(図-10)と3次元風速計による気流測定を行った。シミュレーション結果と同様、術野吹き出し口からの気流は手術台に向かって真っすぐ降下し、周囲吹き出し口からの気流は天井面や壁面を伝って手術室全体を巡回する様子が確認された。周囲吹き出し口からの気流が術野吹き出し口からの気流を乱す様子はなかった。

6.3 温度分布

平面上に11点、高さ方向に8点の計88点の室内温度と、吸込口や吹出口などの温度を、熱電対を用いて連続測定を行った。術野系統の設定温度を22℃、周囲系統の設定温度を25℃としたときの温度分布を図-11に示す。シミュレーション結果と同様の温度環境となり、術野エリアは吹出温度22℃に対して、手術台近傍は23℃、周囲エリアの居住域高さの上下温度差は1℃程度となることが確認された。

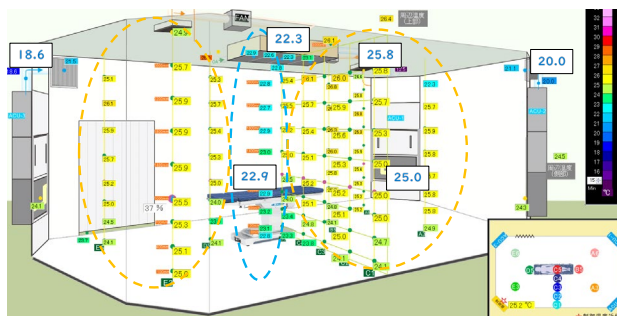


図-11 モックアップ手術室実験での温度測定結果

6.4 清浄度分布

手術台上、周囲系統の気流が直接到達しない周囲エリア、空調機の還気口(吸込口)の3点の粒子濃度を測定した。換気効率の指標となる清浄度回復性能を測定し、室容積と風量から算出した理論上の換気効率(完全混合)と比較を行った。理論上の換気効率を1とした場合の各測定点の清浄度回復性能から求めた換気効率を図-12に示す。すべての測定点で効率向上が確認されている。これは、周囲エリアは旋回流により攪拌で粒子排出が促進され、術野エリアは縮流解消により粒子の巻き込みが減少したためだと考えられる。

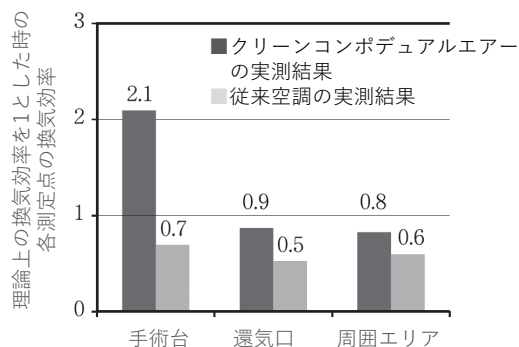


図-12 実測による換気効率の比較

7. 実手術室におけるシステムの性能検証

開発した空調システムを適用した実手術室においてシステムの性能検証を行った。室内各所に温度測定器(ティアンディ製 TR-72U、センサ TR3100、TE-3110)を設置し、実手術中の空気環境を1分ごとに連続測定した。

機器の設置状況を図-13に示す。一例として小児外科と整形外科の手術が行われた日の温度測定の測定点を図-14に、その結果を図-15に示す。なお、図-13に示した手術室と、図-14、15に示した手術室は別室である。

手術前、患者入室時、麻酔導入時、手術中、麻酔からの覚醒時、術後の片づけ、といった手術の工程に応じて設定温度を変更している。術野エリア周囲エリアとも温度変更に従って設定温度通りの温熱環境が形成されており、シミュレーションやモックアップ手術室実験で得られた性能・効果を確認できた。

8. さいごに

垂直下降流と水平旋回流の組み合わせ、1室に2つの温熱環境を形成するクリーンコンポデュアルエ

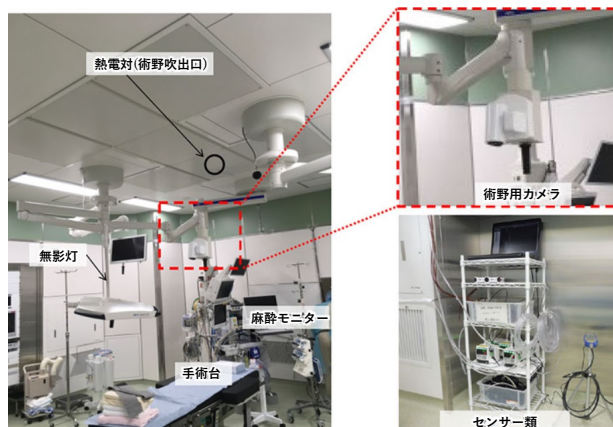


図-13 クリーンコンポデュアルエアを採用した実手術室での測定機器設置状況

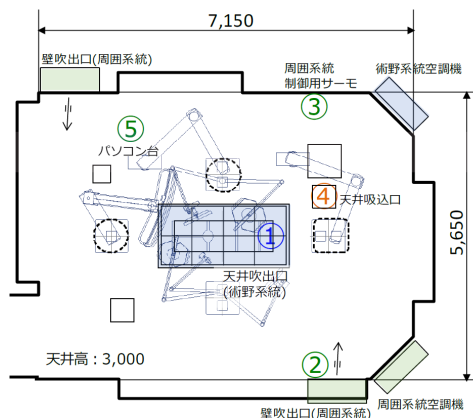


図-14 クリーンコンポデュアルエアを採用した手術室平面図と温度測定点

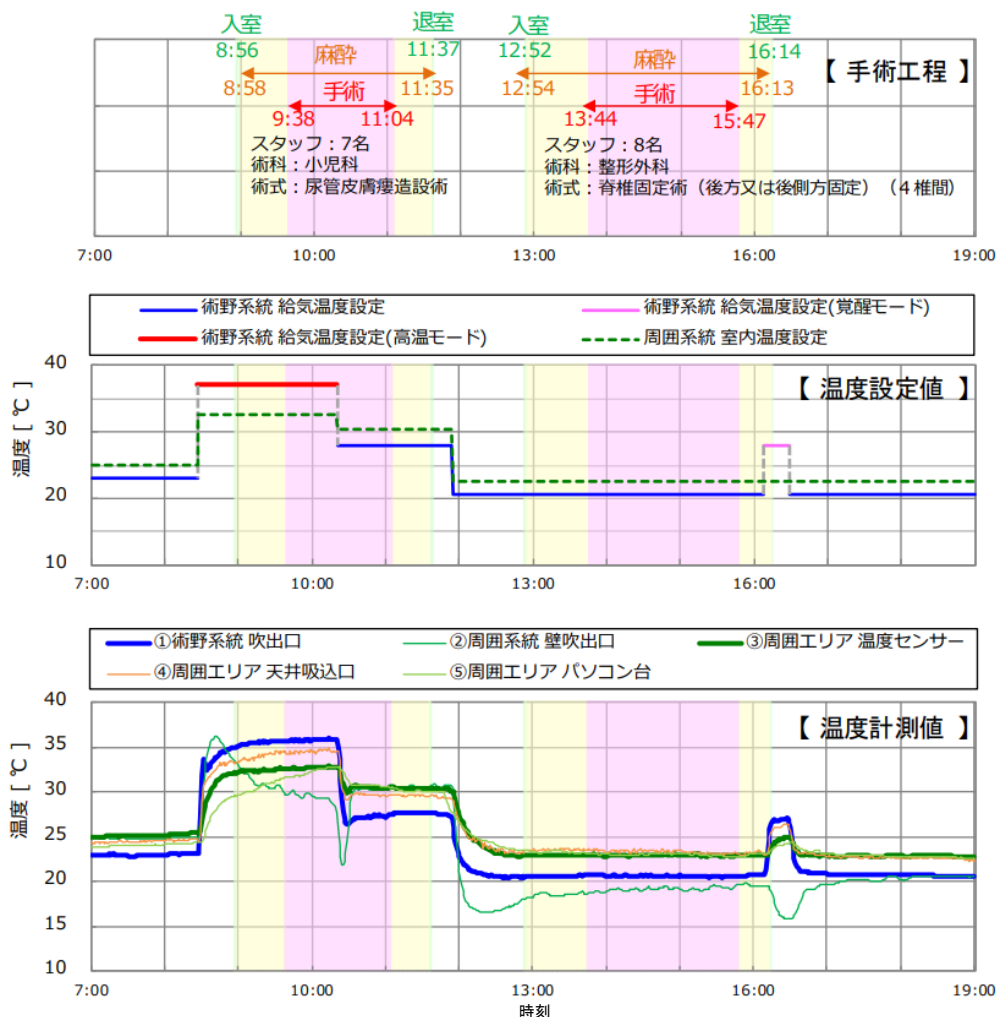


図-15 クリーンコンポ デュアルエアを採用した手術室での温度測定結果

アーは、手術を受ける患者だけではなく、従来システムでは得られなかった医療スタッフに対しても、快適な温熱環境を提供することができることを明らかにした。

ユーザで異なる操作性の要求への改善を始め、術法進歩に伴う要求性能変化も想定されている。今後は術式や手術工程に応じた手術室での性能検証を通して、さらなる改善をする。その結果、手術室環境の改善が、医療スタッフの作業生産性の向上や患者の手術後の容体への寄与をしていきたい。

<参考文献>

- 1) 一般社団法人日本医療福祉設備協会：病院設備設計ガイドライン(空調設備編)病院空調設備の設計・管理指針 HEAS-02-2013, 2013
- 2) 日本手術医学会：手術医療の実践ガイドライン(改訂第三版), 2019
- 3) 今井田尚文, 他：医師,患者や医療スタッフに適した温熱環境に対応できる手術室空調システム(第1報)システム開発と

シミュレーションによる検討, 平成 29 年度空気調和・衛生工学会大会(高知)学術講演論文梗概集, 2017

- 4) 藤田智治, 他：医師,患者や医療スタッフに適した温熱環境に対応できる手術室空調システム(第2報)実物大モックアップ手術室における検証実験, 平成 29 年度空気調和・衛生工学会大会(高知)学術講演論文梗概集, 2017
- 5) 今井田尚文, 他：医師,患者や医療スタッフに適した温熱環境に対応できる手術室空調システム(第3報)モックアップ及び実案件での性能検証, 平成 30 年度空気調和・衛生工学会大会(名古屋)学術講演論文梗概集, 2018
- 6) 今井田尚文, 他：医師,患者や医療スタッフに適した温熱環境に対応できる手術室空調システム(第4報)手術室での実手術時の性能検証, 令和元年度空気調和・衛生工学会大会(札幌)学術講演論文梗概集, 2019
- 7) 今井田尚文, 他：医師,患者や医療スタッフに適した温熱環境に対応できる手術室空調システム(第5報)手術室での実手術時の性能検証(2), 令和2年度空気調和・衛生工学会大会(オンライン)学術講演論文梗概集, 2020