

# 高輝度プロジェクターを支える要素技術とプロジェクションマッピングの最新事例

Core Technology for High-Brightness Projectors, and Newest Case of Projection Mapping

山 岸 成 多  
Shigekazu Yamagishi

藤 畝 健 司  
Kenji Fujiune

山 本 淳  
Atsushi Yamamoto

## 要 旨

近年、CG（Computer Graphics）を、建物や床面に対し投写し、対象と映像とを合わせて演出効果を高める手法が開発され、プロジェクションマッピングと総称されている。ロンドン2012オリンピック競技大会以降、当社の高輝度プロジェクターが各種イベントでのさまざまな演出に貢献している。さらなる高輝度化を求められる一方で、連続使用する用途では従来のランプ光源では頻繁な光源交換が必要となり改善が求められてきた。これを受けて、半導体レーザーと無機蛍光体による大光出力化技術、前記光源および蛍光体の長寿命化を実現する冷却技術を開発した。さらに、1920 Hzの高速トラッキング技術による移動物体に対するマッピング技術などへの進化を図るとともに、厳しい温度環境でも多数台でのマッピングを安定的に運用するための技術を実現した。

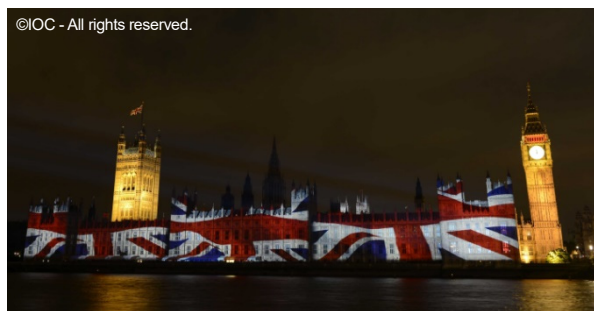
## Abstract

Recently, the projection mapping technique that projects Computer Graphics (CG) onto buildings or floors, and enhances the stage effects by uniting the objects and the images has been developed. Our high brightness projector has contributed to a lot of performances in various events after the Olympic Games London 2012. On the other hand, continuous use has required frequent light source exchange for the conventional lamp light source, and this should be improved. We developed optical power improvement technology with a semiconductor laser, inorganic phosphor, and cooling technology that extends the lifetime of the light source and phosphor. Furthermore, evolution of real time mapping technology to moving objects with 1920-Hz high speed tracking technology is achieved. In addition, we succeeded in creating technology for the stable mapping by many projectors in a severe temperature environment.

## 1. はじめに

近年、ビル壁面など大型建造物に映像を投写するプロジェクションマッピングや大人数で映像を鑑賞するパブリックビューイングなど超大型映像のニーズが高まっている。しかも投写する面は必ずしもスクリーンのように白色ではないことからプロジェクターの明るさ（光出力）の向上が求められている（第1図）。

1台のプロジェクターでは光出力が不十分な場合、同じ位置に複数台で重ねて投写して明るさを得ることも可能であるが、重ね合わせの調整が必要になる。支持枠体も含めて設置場所が大きくなるなどの課題がある。



第1図 プロジェクションマッピング例（ロンドン ビッグベン）

Fig. 1 Example of projection mapping (Big Ben, London)

さらにマッピングの進化形として投写映像前面の人など動く物体に、その動きに合わせた映像をマッピングする動体マッピングが演出方法として注目されつつある。ただし、従来はあらかじめ決められた投写位置に演者が移動して実現しており、映像と演者の位置ずれや、急な変化に対応できないという課題があった。

上記の状況を鑑み、より少ない台数で明るい大型映像を実現可能な高輝度、長寿命のプロジェクターを開発するとともに、動く投写対象に対して高速に追従可能なマッピングを実現する技術を開発した。

さらに、活用事例についても紹介する。

## 2. レーザー励起型蛍光体光源システムの技術要点と構成

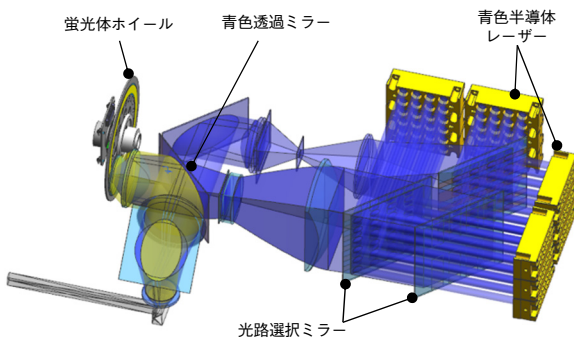
### 2.1 必要性とシステムの概要

プロジェクターの光源は従来、超高圧水銀ランプが主流であったが、ランプの場合、全方向に拡散発光する光を一方方向に光学的にそろえて、対角1インチ程度の小さな画像表示素子に効率よく集光することが必要で、その困難さが明るさの制限となっていた。また、ランプ光出力が半減する時間（寿命）が高出力ランプでは3000時間程度であり、数か月以上の長期にわたって使用されるオリンピックのようなイベントでは光源交換が運用上の課題

となっていた。また、ランプの管球内は点灯中200気圧を超えており、破裂の懸念もある。

これらの課題を解決するためにプロジェクターの光源にレーザーを用いる開発を行った。レーザーは出力光に方向性があり、前記画像表示素子にも比較的効率よく集光できる。また、適切に冷却することで2万時間の寿命を得ることが可能であり、破裂の恐れもない。一方で、1つの光源からの出力が小さいため、多くのレーザー光源をコンパクトに配置しながら効率の劣化なく集光する光学系や、緑色や赤色レーザーは発光効率が低いため実用的な青色レーザー光源から、緑色、赤色を得る波長変換手段が必要になる。

第2図に、レーザー励起型蛍光体光源システムの一例を示す。レーザー光源プロジェクターは、青色半導体レーザー（以下、青色レーザーと略す）を励起光として蛍光体に照射して黄色光（緑色光+赤色光）を生成するレーザー励起型蛍光体方式が主流となっている。蛍光体デバイスは、一般的に蛍光体ホイールと呼ばれ、反射基板上に、バインダ（樹脂材料）を介して、蛍光体層が形成されている。蛍光体層には直径数mmの範囲に励起光が集光され、そのエネルギーのおよそ半分は熱となるため、反射基板ごとモータにより回転、空冷することで、変換効率の低下や焼損を防いでいる。



第2図 レーザー励起型蛍光体光源システム構成図  
Fig. 2 Layout of laser excited phosphor light source system

## 2.2 高出力化への課題と開発のねらい

レーザー励起型蛍光体光源システムプロジェクターにおいて光出力を大きく向上するためには、光源出力増加、蛍光変換効率の向上を同時に満たす必要がある。

しかし蛍光体には、温度上昇によって蛍光変換効率が低下する温度消光、励起光密度の上昇により同じく蛍光変換効率低下を招く光密度消光など、いわゆる「消光特性」がある。

すなわち、さらなる高輝度化のため光学的に合成する青色レーザーの数を増加すればレーザー光源からの総出

力（励起光）は増加するが、励起光の増加は、蛍光体やバインダ温度の上昇を招き、結果、蛍光変換効率が低下し信頼性維持もできないというトレードオフがある。

高輝度を得ながらも長寿命・高信頼を備えた半導体レーザー光源によるプロジェクターを実現するため、以下の開発を行った。

- (1) 無機蛍光体材料とそれを用いた高信頼ホイール
- (2) 蛍光体ホイールの放熱構造

本稿では、これらについて説明する。

## 2.3 開発内容

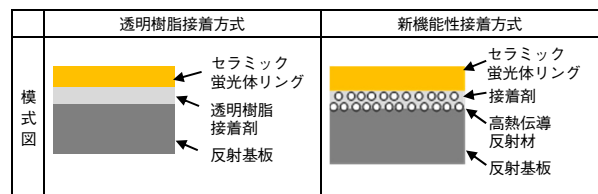
### 〔1〕無機蛍光体材料とそれを用いたホイール構成

本開発においては、消光特性、熱伝導率に優れるセラミック蛍光体に着目し、他社に先駆けセラミック蛍光体ホイールを実用化することとした。セラミック蛍光体の特性は、材料厚みや蛍光体含有比率、付活剤濃度、添加剤量など、さまざまな要因によって決まる。特に、従来課題であった蛍光体の消光特性が付活剤の濃度に依存することを見だし、付活剤濃度の最適化により光密度に対する蛍光体の消光特性の劣化の抑制を図った。

セラミック蛍光体としては、 $Ce^{3+}$ 付活YAG蛍光体を採用し、各サンプルに含まれる $Ce^{3+}$ 濃度条件を、数条件設定し、その関係を解析した。この結果よりセラミック蛍光体の組成、仕様の最適化を行った。

また、セラミック蛍光体リングを反射基板に接着する際の接着剤にも新規な工夫をした。一般的に、セラミックなどの焼結体を用いた蛍光体デバイスでは、透明樹脂接着剤が用いられることが多いが、発光スポットサイズが拡大し、光学系効率の低下を招くという課題があった。これは、蛍光体層から反射基板の反射面までの距離が長くなることに起因する。

この課題を解決するため、熱伝導性に優れ、光を反射する特性を備えた高熱伝導反射材を含む新機能性接着剤を導入した。第3図に、透明樹脂接着剤と新機能性接着剤を用いたセラミック蛍光体ホイール構成図を示す。



第3図 セラミック蛍光体ホイールの構成図  
Fig. 3 Layout of in-organic phosphor wheel

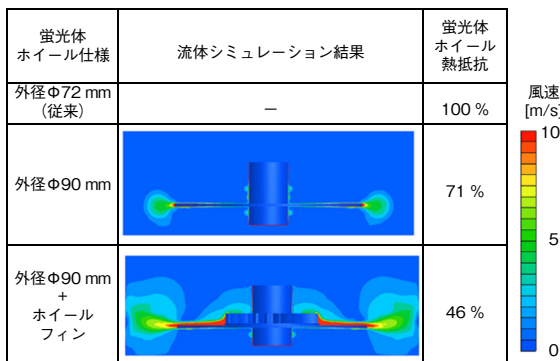
新機能性接着剤を用いた場合、その拡散反射特性のため、蛍光体層裏面に反射層を設けることと同等の効果が

得られることになる。これにより、蛍光光は反射される位置が蛍光体層から反射基板表面までの間の任意の位置で反射されることから、全体として従来の透明樹脂接着剤を使う場合よりも蛍光体層から近い位置で反射されることになる。これらの取り組みにより、発光スポットサイズ拡大を抑制でき、光学系の効率を向上させた。

### [2] 蛍光体ホイールの放熱構造

蛍光体ホイールの反射基板の外径を拡大すると、蛍光体ホイールの周速が上昇して放熱には有利であるが、モータへの負荷重量が増加し、セットサイズの大型化も招く。このため、コンパクトな光学システムで所望の明るさを実現するために新たな放熱特性の向上手法として、ホイールフィンを導入した。このホイールフィンは反射基板とともに前記モータの回転部に固定される。

ホイールフィンの効果を第4図にまとめる。従来のφ72 mmの反射基板を、φ90 mmに大径化した反射基板を用いたホイールでは、反射基板端面にてのみ対流が発生している。これに対し、ホイールフィン付与時には、反射基板面にも対流が生じて、蛍光体で発生した熱を、反射基板面を介して空気に効率よく伝えているのが確認できた。



第4図 蛍光体ホイールのフィン効果

Fig. 4 Effect of using wheel-fin

その後の検討において、さらに反射基板面に貫通穴を追加し、基板径を構成上可能な最大径であるφ95 mmに変更し、基板厚みを0.5 mmから1 mmに増大することも加えて、従来比29 % (71 %減) の熱抵抗改善を実現した。これにより3万ルーメンの光出力を得ながら、従来200℃以上になってしまう蛍光体温度を想定される最も過酷な環境でも180℃以下にすることに成功した。

以上の取り組みによってレーザー励起型蛍光体方式を用い、高信頼性を備えた超高輝度プロジェクターを実現した。

## 3. 高速追従プロジェクションマッピング技術要点と構成

### 3.1 動く物体への追従マッピングの課題

投写対象に対して追従するプロジェクションマッピングを行うためには、人物など対象物体の動きを計測し、その動きに応じて投写を行う必要がある。この計測から投写までにかかる遅延時間が長いと、投写される映像は対象物体の動きに遅れて追従する。例えばボールに追従する場合、ボールからずれた位置に映像が投写されることになる。動き回る対象に映像を投写する場合、対象と映像の投写位置の誤差を抑えるため、遅延時間を最小化する必要がある。

また、投写対象への追従マッピングを行う際には、視聴者は自然と投写対象を目で追うことになる[1]。投写対象に合わせて映像が動くとき、人間はその投写対象に追従し、投写対象の動きを連続的に認識する。しかし、通常60 Hzといった限られたフレーム数で表示された映像は、16.7 msごとしか映像が変化しないため、その動きは間欠的となり、残像感が発生してしまう。追従マッピングを行うためにはフレーム数を大きくする必要がある。

### 3.2 システム構成

対象とする移動物体は多岐にわたるが、本開発では人の歩行速度の4倍で動く想定した。遅延時間の観点では対象物体と映像のずれを1 cmとすることを目指し、目標遅延時間を2 msとした。また、フレーム数の観点では、上記ずれの指標とした1 cm単位の間欠映像の場合に残像感が残るため、2.5 mm単位の間欠映像となることを目指し、目標フレーム数は2000 Hzとした。

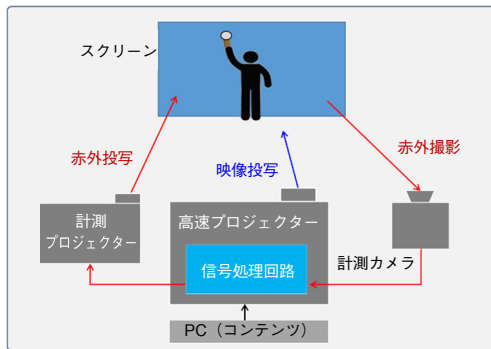
これらの値は実証により妥当性を確認し決定した。

開発したシステムは第5図および第6図に示すように、高速プロジェクター、計測プロジェクター、計測カメラの3つの要素で構成される。



第5図 高速追従マッピングの構成要素

Fig. 5 Component of the system



第6図 高速追従マッピングのシステム図  
Fig. 6 System diagram

計測プロジェクターおよび計測カメラは、PCなどの外部機器を介することなく、直接高速プロジェクターに接続されている。また、高速プロジェクターはPCなどの映像サーバからのFull HD映像のための入力端子を2つ備え、動作設定のための端子を1つ備える。

計測プロジェクターは、赤外光対応のレンズやDMD (Digital Mirror Device) を用いて新規設計されたもので、波長850 nmの赤外光パターンを高速プロジェクターからのタイミング信号に応じて人物およびスクリーンへ投写する。計測カメラはモノクロカメラであり、画素数は2048×1088のうち一部分640×360を用い、960 Hzで撮影する。また可視光除去フィルタ (透過率50%波長770 nm) を用いており、高速プロジェクターからの投写映像の影響を除去して計測プロジェクターによって投写されたパターン像のみを撮像し高速プロジェクターへ送る。計測プロジェクターと計測カメラはハード的に高速プロジェクターと同期して動作する。

高速プロジェクター内のFPGA (Field-Programmable Gate Array) として実装された専用ハードウェアを用いることにより、本システムはこのパターン投影と撮像のサイクルを60 Hzの32倍速である1920 Hzで、また計測から画像処理、投写までの一連の動作を1.6 msの遅延時間で実現でき、ほぼ目標仕様を実現することができた。

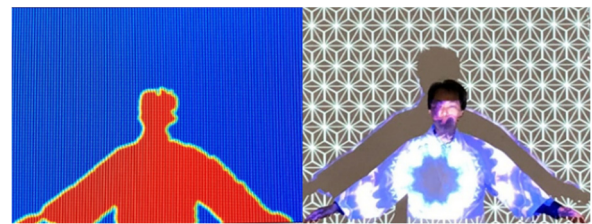
### 3.3 システム動作

本システムでは計測プロジェクターと計測カメラの視差を利用した距離計測を行う。投写対象に計測プロジェクターからの動的なパターンを投写し、撮影した画像からアクティブステレオ法[2]により各点の距離測定を行うことで、第7図の左に示すような距離の違いで切り出した距離画像を得る。この距離画像は各点の距離に応じて色付けされており、近い方から赤橙黄緑青と表示される。これにより距離の違いから追従すべき人物の位置や形状を求めることができる。このとき前述のとおり、計

測プロジェクターからの投写光に人の目に見えない赤外光を用いることで、投写画像自体に影響なく距離計測を行うことが可能になる。

第7図の例では、右図のように白い亀甲文様で示す背景映像と、手前の人物に投写される円状模様が示す追従映像の2つを高速プロジェクターに送っている。

計測された人物の位置に応じてリアルタイムに追従映像を移動し、人物の形状に応じて追従映像をその形状に切り出す (第7図の左)。切り出された追従映像と背景画像を重ね合わせて投写映像を作り出す。これにより第7図の右に示すように人物のみに追従映像を投写し、人物が動いても、残像感も遅れもなく追従マッピングを実現できる。第7図の右の例では人物近くに影が出ているが、実際のプロジェクションマッピングでは異なる角度で映すプロジェクターを複数台用いて影を打ち消すように構成する。



第7図 距離計測  
Fig. 7 Measuring distance

上記の取り組みによって、本システムでは高フレームレートと超低遅延を備え、たとえランダムで複雑な動きであっても常に追従できる高速追従プロジェクションマッピングを実現した。

なお、計測プロジェクターが投射する赤外光のヒトの眼球への影響 (アイセーフ) に関しては、日本や欧州では拡散光になれば、一般照明として扱われ現在の光量で問題なく、米国では法規上、投写レンズの前にフードを装着することで対応可能である。

## 4. オリンピック開会式での活用事例と将来展開

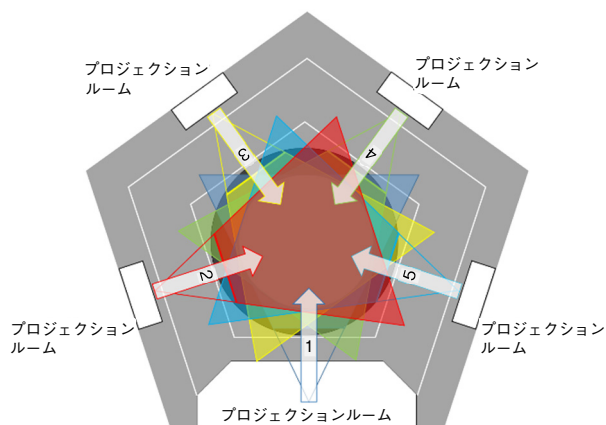
### 4.1 平昌2018冬季オリンピック開会式でのシステム設計

オリンピックの開会式は、全世界で3億人以上の人々がテレビで視聴すると言われており、絶対に失敗が許されないイベントとなっている。近年ではプロジェクションマッピングを使った演出が多用されており、演出中にプロジェクターの映像が途絶えることがないシステムが求められる。

そこで、平昌2018冬季オリンピックの開会式では、60

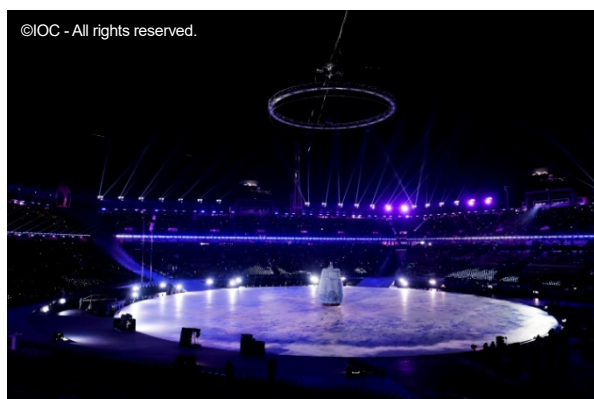
台のプロジェクターの設置位置を5箇所に分散させ、それぞれの位置から中央の円形フィールドに投射する設計を採用した（第8図）。

このレイアウトにより、フィールド内に5重に映像が重なることとなり、それぞれの映像がバックアップを兼ねると同時に、均一な明るさと演者の影を消す効果を果たすことができた（第9図）。



第8図 平昌2018冬季オリンピック開会式でのプロジェクションレイアウト

Fig. 8 Projection layout for Olympic Winter Games PyeongChang 2018 opening ceremony



第9図 平昌2018冬季オリンピック開会式でのプロジェクション（5方向からの投写）

Fig. 9 Projection for Olympic Winter Games PyeongChang 2018

#### 4.2 現場での開発品有用性確認と新たな課題

3万ルーメンのレーザー光源プロジェクター（PT-RZ31K）は、既に試作機をリオデジャネイロ2016オリンピック競技大会に持ち込み、開会式において高光出力化の有用性と、半屋外（屋根ありの屋外）環境で連続使用しても光出力の劣化がほとんどないことを確認できている。さらに平昌2018冬季大会現場テストにおいては、製

品化されたPT-RZ31Kを持ち込み、確認を行った。明るさや寿命面で問題はなかったが、超低温環境となりプロジェクターの各構成部品の性能を保証できる温度範囲外となることが判明した。

そこで、プロジェクターを専用のプロジェクションルームに設置したが、非運用時にはマイナス10°Cを下回り、運用時には30°C以上になるという過酷な環境であった。

#### 4.3 プロジェクターのIoT化

運用時と非運用時の大きな温度差に対し、環境温度を維持するため、プロジェクターの内部温度制御のため給排気部に設けられている温度センサの出力値を管理することで、プロジェクターの温度状態を正確に把握することとした。

具体的には全てのプロジェクターをネットワークで接続し、各プロジェクターに内蔵された温度センサの値をリアルタイムにモニタリングする予兆監視ソフトウェア（ET-SWA100）を導入した。

このソフトウェアにより、温度が設定温度を超える、もしくは下回る予兆があるとアラームが通知され、それに応じてプロジェクターの温度調整を行うシステムを構築することで、安定運用を維持し、平昌2018冬季オリンピック・パラリンピックの開閉会式を無事成功させることができた（第10図）。



第10図 平昌2018冬季パラリンピック開会式でのプロジェクションマッピング

Fig. 10 Projection mapping at Paralympic Winter Games PyeongChang 2018 opening ceremony

## 5. まとめ

他社に先駆けて3万ルーメンのレーザー光源方式のプロジェクターを提供することで、超高輝度、長寿命のプロジェクターの設置台数を抑えた合理的なシステムで明

るいマッピングを実現した。併せて高速追従マッピングにより、より付加価値の高い演出を実現可能とした。

今後はさらなる高輝度化、動体マッピングを進化させるとともに、4K化など高精細化、忠実な色再現のための色再現範囲拡大による高画質化に加えて、カメラを用いる複数映像の自動ブレンド調整、入力信号中断トラブル時のバックアップ信号への瞬時切り替え機能など設置、冗長性の改善にも取り組み、安定運用にも注力していく。

### 参考文献

- [1] 吹抜敬彦, "擬複追従視と仮現運動に関する仮説," 日本視覚学会 VISION vol. 26, no. 2, 90-93, 2014, [http://www.visionsociety.jp/vision/vol26-2/2602\\_90-93.pdf](http://www.visionsociety.jp/vision/vol26-2/2602_90-93.pdf), 参照 Oct. 24, 2019.
- [2] 梅田和昇 他, "アクティブステレオ法による距離画像センサー," 光学, vol. 41, no. 5, pp.275-280, 2012, <https://annex.jsap.or.jp/photonics/kogaku/public/41-05-kaisetsu3.pdf>, 参照 Oct. 24, 2019.

### 執筆者紹介



山岸 成多 Shigekazu Yamagishi  
コネクテッドソリューションズ社  
メディアエンターテインメント事業部  
Media & Entertainment Business Div.,  
Connected Solutions Company



藤畝 健司 Kenji Fujiune  
コネクテッドソリューションズ社  
メディアエンターテインメント事業部  
Media & Entertainment Business Div.,  
Connected Solutions Company



山本 淳 Atsushi Yamamoto  
コネクテッドソリューションズ社  
メディアエンターテインメント事業部  
Media & Entertainment Business Div.,  
Connected Solutions Company