

Vol.5

MITSUBISHI PRECISION CO., LTD.

# 三菱プレジジョン技報 2010



#### 表紙写真

日本自動車研究所・全方位視野ドライビングシミュレータ。  
ドライバーからの全方位視野を実現するために、ドームスクリーンを使用しフルHDプロジェクタ12台で窓外視界を表示している。  
また走行時の動揺感覚を再現するために、電動6軸動揺装置とターンテーブルを装備している。（参照頁：論文・P.1）



写真上部：ドームスクリーン内の運転席。

写真下部：運転席から見た全方位視野窓外視界。

## シミュレータ技術向上へ向けて挑戦

取締役社長  
北山 忠善

平素、三菱プレジジョン株式会社をご愛顧賜り誠に有難うございます。三菱プレジジョン技報第5巻をここに上梓させていただきます。

三菱プレジジョン技報第5巻では、交通安全環境研究所研究コーディネータ谷口哲夫氏に“自動車の予防安全とドライビングシミュレータ”と題して特別寄稿を頂きシミュレータ小特集を企画しました。交通安全環境研究所では自動車の予防安全技術の開発において、ドライバー特性の計測、自動車の安全性能や環境性能に関する基準の整備において基礎資料の策定に御利用頂いています。ドライビングシミュレータの運転再現性能と実走行との差はまだ大きく、用途を限って使用しているのが実情とのことですが、技術の進展に従いバーチャルテストングといった試験が完全にシミュレータで安全に精度良く経済的に実現することが当社の夢です。

ドライビングシミュレータの走行性能ないし操縦性能の再現性を、実際に近づけるには運動模擬性能の精度、表示画像のリアリティ、体感、人が操作するハンドル、操縦桿、ペダル等の操作部のリアリティを更に改善してゆく必要があります。本稿では、周囲360度の視野角を表示し、運転時に左右に目を向ける運転者に対する環境画像のリアリティを向上させた表示装置や、低コストで高い没入感・臨場感を得ることが出来るマルチプルショット・キャリブレーションによる広視野角映像表示システムについて御紹介いたします。次に、シミュレータに用いる最新の要素技術として、潜水艦探索訓練に必要な水中音響の模擬技術の技術動向、記憶装置容量の低減と違和感なく日本全国を連続して飛行できるフライト

シミュレータ用広領域の地形モデルリアルタイム生成技術と表示技術、航空機の操縦桿やペダルの操作感をリアルに再現する小型化反力模擬装置について述べます。また、航空自衛隊殿に納入させて頂いたT-4型フライトシミュレータの整備と学生訓練支援の概要について御紹介いたします。

一般論文では、2010年6月に打ち上げられるSERVIS-IIに搭載される磁気軸受けホイール、電子マネーの普及に対応して市場投入した電子マネー専用の駐車場精算機、スマートインターチェンジ対応のETCゲート、事故予防を目的としたエスカレータ乗りすぎ検知センサといった新製品についても技術的に紹介させていただきます。

日本の自動車メーカーは地球環境保全や省エネルギー対策車として世界でいち早くハイブリッド車を国内市場のみならず海外市場にも投入し急速に市場を拡大しています。また、新しいブレーキシステム、自動車線キープシステムなど運転安全性を向上させる技術を次々に実用化し日本車の先進性をアピールしています。これらの新技術が搭載された自動車の開発において、最新のシミュレーション技術を適用したシミュレータをお使い頂いておりますが、今後更に幅広くお役に立てればと考えております。

お客様におかれましては、本号を御高覧いただきましてと共に、今後とも、三菱プレジジョン株式会社のシステムや製品を御愛顧賜りますよう宜しくお願い申し上げます。

## 自動車の予防安全とドライビングシミュレータ

独立行政法人  
交通安全環境研究所  
研究コーディネータ  
谷口 哲夫



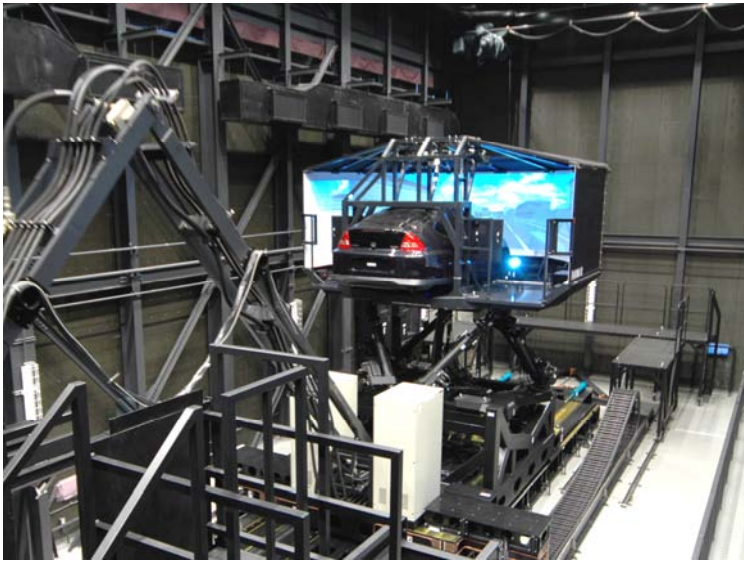
自動車の研究開発にドライビングシミュレータが利用されてきて久しい。ドライビングシミュレータの性能の向上とともに、研究開発においてそれを利用する領域も拡大してきているが、ここでは自動車の安全性能の向上の観点から、私どもの研究所におけるドライビングシミュレータの活用事例とこれからのシミュレータに求められるもの期待されることについて述べたい。

平成 21 年度のが国の自動車交通事故の死者数は 4914 人で、負傷者数は約 91 万人、事故件数は約 74 万件であった。このうち死者数については、平成初めの年間 1 万人を超える状況から、その後これまでの間連続して減少の傾向にある。十数年間でほぼ半減していることになるが、その被害、損失は社会的に見ても依然として甚大と言わざるをえない。一方、これに比して事故件数については、近年若干の減少傾向にあるものの、現在の数字は十数年前とほぼ同等のレベルであり、事故発生自体は必ずしも減少していないとすることができる。これらのことから今後も引き続き事故被害を低減していくためには、これまでの衝突安全等の被害軽減技術に加えて、事故の発生を未然に防止するいわゆる予防安全技術が重要であることが指摘されている。この状況において現在、国では 2018 年までに年間死者数を 2500 人以下にするという新たな目標を設定し、予防安全技術の実用化と普及をはかっているところである。

私どもの研究所は国土交通省所管の独立行政法人であり、自動車の安全や環境に関する研究、型式認証、リコール調査など、国の目標実現のための研究や行政に必要とされる技術的な業務を行うことを主な使命としている。このため当所においても ASV(先進安全自動車)をはじめ予防安全技術

に関する研究に注力しており、平成 18 年に予防安全技術の評価を主な目的とした、緊急ブレーキ、緊急操舵等の高加減速度域の運動まで再現できる現在のドライビングシミュレータを整備した。本シミュレータは、乗用車の実車車体を使用したもので、最大再現加速度：0.6G 以上、加速度の立ち上がり速度：1.0G / s 以上という運動性能を、6 軸モーション装置、専用傾斜装置、行程 8m のリニアモータ式並進装置の 3 つの機構を併用することで達成している。シミュレータの設計仕様を決める過程では、三菱プレジジョン社の設計部門の方と多くの検討を重ねたが、今思えばやはり研究者の発想、立場と製品として責任を持つ立場との差があったように思う。設計上妥協せざるをえなかった所などもあったが、設置後数ヶ月の調整で実験を開始しており、これまでの約 4 年間いくつかのプロジェクトで使用して、大きな実験中断等もなく高い信頼性で運用できていることはすべて製作者のノウハウによるものであり、ここに改めて感謝の意を表したい。

次に当所におけるドライビングシミュレータの使い方について紹介したい。通常は各種予防安全技術、特にドライバーの運転支援システムに関する研究等において、ドライバー特性などを計測することが多いが、ここでは当所での特徴的な使い方として基準策定のためのデータ採取に使用している例を上げる。当所の業務として国の目標に直結した研究を行うと上に書いたが、自動車の安全性能や環境性能に関する基準を整備し施行することは、自動車交通の安全のために国、行政が果たす大きな役割である。自動車の開発や設計に携わる多くの方も、商品性といった問題もさることながら、まずはこれらの基準を達成することを目標



並進機構付きドライビングシミュレータと実車実験

にされていると思う。このため当所においても行政と連携して基準策定に関する技術的検討、調査等を行うことが多い。最近の例で言えば、ブレーキアシストシステムや衝突被害軽減ブレーキといった運転支援システムについて、当所のシミュレータでドライバーのブレーキ操作に関する各種の実験を行っており、これらの実験データが基準策定のための基礎資料として使用されている。通常の運転では障害物のどのくらい手前からブレーキを操作するのか、緊急停止ではどの程度のペダル踏み込みがなされるかなどについて、テストコース実験の他、パラメータの閾値を求める等のシミュレータ実験を行っている。これらはまた、国際会議の場でわが国の交通環境における代表的な運転者特性の資料等としても使用されており、パラメータの設定を変更することにより車両側の各種特性を容易に再現して実験できるドライビングシミュレータの特性を活かした例だと言える。

これまでドライビングシミュレータを使って実験を行ってきた感想を述べれば、当所のシミュレータではやはり並進機構の特性が優れており、この機能を有することの意味が大きいと思う。これは、大きな加速度を発生させることについても言えるが、むしろ細かな制御を要求されるときもその有効性が高いと考えている。今後の予防安全技術の進展に伴って当所でのドライビングシミュレータの使い方についても、支援システムに対するドライバーの依存程度の評価、車両側から支援として行う制動や操舵に対するドライバーからの評価など、より木目の細かな検討が必要とされてくる。また、車両の不具合等についても、実車の特性の微小な変化について被験者による走行実験等を行っても、外乱や設定のばらつきのため正確な評価を得ることは

なかなか難しいが、シミュレータであれば評価できる可能性が高まると考えている。不具合の発生がドライバーに与える影響を評価することや、不具合発生状態で実際にドライバーが運転していた場合にそこで起こりうる現象等についてこれを定量的に評価することなども考えられる。

ドライビングシミュレータの運転再現性能について言えば、実走行との差はまだ大きく、用途を限って使用しているというのが実状だと思うが、ヴァーチャルリアリティ分野での技術の進展は予想以上に速い。私どもが関連する分野においても、自動車の認証試験にコンピュータシミュレーションを取り入れて行くいわゆるバーチャルテストングが既に欧州で検討されているが、将来的には予防安全システム等の認証試験にシミュレータが連携して行くことなども考えられる。また、高齢者の運転能力の評価なども差し迫った問題となってきている。シミュレータ技術のより一層の進化をはかることができれば、ドライビングシミュレータが今後より多くの新たな用途に応えられるようになるものと信じる。

谷口 哲夫(たにぐちてつお)様 プロフィール  
独立行政法人交通安全環境研究所  
研究コーディネータ  
国土交通省航空・鉄道事故調査委員会  
専門委員  
独立行政法人国民生活センター紛争解決委員会  
特別委員  
早稲田大学理工学術院  
非常勤講師

## 目次

### 巻頭言

シミュレータ技術向上へ向けて挑戦	.....i
取締役社長 北山 忠善	

### 特別寄稿

自動車の予防安全とドライビングシミュレータ	.....ii
独立行政法人 交通安全環境研究所 研究コーディネータ 谷口 哲夫	

### 論文

#### シミュレータ小特集

日本自動車研究所殿向け全方位視野ドライビングシミュレータ	.....1
北島 章雄, 戸田 裕毅	
マルチプルショット・キャリブレーションによる広視野角映像表示システム	.....7
和田 博之, 星合 秀樹	
水中音響模擬の技術動向	.....15
布田 浩二	
広領域地形モデルの生成と表示技術	.....25
若林 知行, 川上 隆行	
シミュレータ用電動コントロールローディング装置	.....31
齊藤 邦彦, 齋藤 匡央	
T-4フライト・シミュレータ整備及び学生訓練支援について	.....37
島田 真介, 香川 真治	
人工衛星姿勢制御用磁気軸受フライホイール	.....42
佐藤 典夫, 齋藤 光伯	
電子マネー対応駐車場システム	.....48
長峯 光寛, 清水 孝敏, 稲川 宏朗	
ETC用高速ゲートの開発	.....55
水上 博之	
エスカレーター利用者の乗り過ぎ検知センサ	.....60
関 真規人, 木村 直哉, 市原 淑雄, 佐々木 秀一, 鈴木 暢夫	

### 製品紹介

宇宙ステーション補給機(HTV)技術実証機 HTV 技術実証機与圧補給キャリア搭載 電力分配器 (PDB)	.....65
宇宙ステーション補給機(HTV)技術実証機 曝露パレット搭載 曝露パレット制御装置 (EPC)	.....66
ETC用高速ゲート GT-005A	.....67
ICカード専用駐車場システム	.....68

# 日本自動車研究所殿向け全方位視野ドライビングシミュレータ

北島 章雄, 戸田 裕毅

本論文では、日本自動車研究所殿向け全方位視野ドライビングシミュレータについて、その特徴である全周囲視界表示装置や、ターンテーブル搭載の大型動揺装置、また機能面では実験シナリオと連携し、車両運動、操作反力制御、動揺制御、および映像視点制御までを統合制御可能な自由度の高いユーザーカスタマイズ性などの特徴について述べる。

## 1 まえがき

研究・開発用ドライビングシミュレータ（以下、研究用 DS<sup>\*1</sup>）は、安全上の問題から実車では困難な実験を行なえること、また同一の走行条件を再現できることなどの有用性から、新規ハードウェアや新規ソフトウェアを模擬車体に搭載し、模擬空間をテストドライバーが運転することによりハードウェアやソフトウェアを評価する HHILS<sup>\*2</sup>や SHILS<sup>\*3</sup> 環境として、公的研究機関、自動車メーカー、大学などで広く用いられている [1, 2, 3]。

研究用シミュレータは、模擬運転装置、模擬視界表示装置、模擬視界発生装置及び各種計算処理装置から構成される。模擬運転装置は、模擬運転台が固定されたものと運転時の加速度や各速度感覚を忠実に再現する動揺装置の上に搭載されたものがある。ロール、ピッチ、ヨーの揺れは6軸の動揺装置を用いて再現する。旋回時の角加速度はターンテーブルで再現する。

更に並進装置により加速減速時の加速度をより忠実に再現する研究用 DS もある [4, 5]。並進装置を実装する場合は、並進装置上に6軸の動揺装置やターンテーブル、模擬視界表示装置、音響装置などを搭載する必要があり、装置の重量や装置の大きさに対する制約が生じる。日本自動車研究所殿（以下、JARI<sup>\*4</sup>）では、運転支援技術をはじめとする先進の予防安全技術の有効性評価や HMI<sup>\*5</sup>の改善策検討、社会的問題である交通事故の発生メカニズムの解明などを目的として研究用 DS を計画された。このため、高齢者を含む幅広い年齢・特性の被験者が極力違和感なく走行できることが重視された。違和感のない走行を実現するために、並進装置は用いない代わりに、模擬視界装置を6軸動揺装置及び

にターンテーブルに非搭載とすることにより大型化し、全方位視野を確保した方式の研究用 DS を JARI に納入したので、その技術詳細について述べる。

## 2 システム構成

本装置の概観（ドームスクリーン内部）および運転席を図1、図2に示す。またシステムブロックを図3に、レイアウトを図4に示す。

図より本 DS は実車運転席を使用している。運転席には、システムブロック図に示すように運転席モニター、運転席機



図1 ドームスクリーン内部



図2 運転席

\*1 DS : Driving Simulator 自動車運転模擬装置

\*2 HHILS : Hardware & Human In the Loop Simulator

\*3 SHILS : Software & Human In the Loop Simulator

\*4 JARI : Japan Automobile Research Institute, Inc. 財団法人日本自動車研究所

\*5 HMI : Human Machine Interface ヒューマン・マシン・インターフェイス

器、視線計測装置、モニター機器及び操作反力装置を装備している。運動感覚の模擬装置としては、油圧式に比較して運用性、整備性、環境配慮などの面で優れている電動6軸動揺装置とターンテーブルを装備している。全周囲映像表示装置は、ドライバーからの全方位視野を実現するためにドームスクリーンを使用し、フルHDプロジェクタ12台で構成している。また、車内ルームミラー用映像は、運転席後方のトランク部分にプラズマディスプレイを装備して表示している。また、ドアミラー用映像は、小型プロジェクタをターン

テーブル上に配置しドームスクリーン上に投影している。

本装置の制御は、一括して制御室で行われる。制御室には制御計算機をはじめ、ホスト計算機、模擬視界発生装置（全16台）、映像音声記録装置、同期計測装置、ECU計算機、リアルタイム演算処理装置を配置している。

操作反力装置は、フィーリングが重視されるため、ステアリング、アクセル/ブレーキペダル用にそれぞれ装備している。

また、車両運動模擬と同期した高サンプリングレートでの制御を行うため、専用のリアルタイム演算処理装置を設け、入出力を直接制御する構成としている。

その他、実験時にユーザーのセンサーデータを記録するための低ノイズの汎用アナログ入力や、ドライバー特性の把握などの実験で必要となる視線計測装置の接続機能、シミュレーションデータとカメラ映像を同時に記録するための同期計測装置などを備えている。

### 3 主要構成品の特徴

本節では、本装置の主要構成品の特徴について説明する。

#### 3.1 運転席

運転席は、実車を使用している。運転席の外観を図5に示す。

ステアリング、アクセル/ブレーキペダルには後述の操作反力装置を備えている。メーターパネルは実車品を使用せず、ダッシュボードに埋め込まれた13.3"ワイド液晶にグラフィックス表示する方式を採用しているため、表示内容はユーザー編集が可能であり、実験目的に応じて警報表示などの追加が可能である。また、センターコンソールにはタッチパネル付き小型モニターが装備されており、ユーザー作

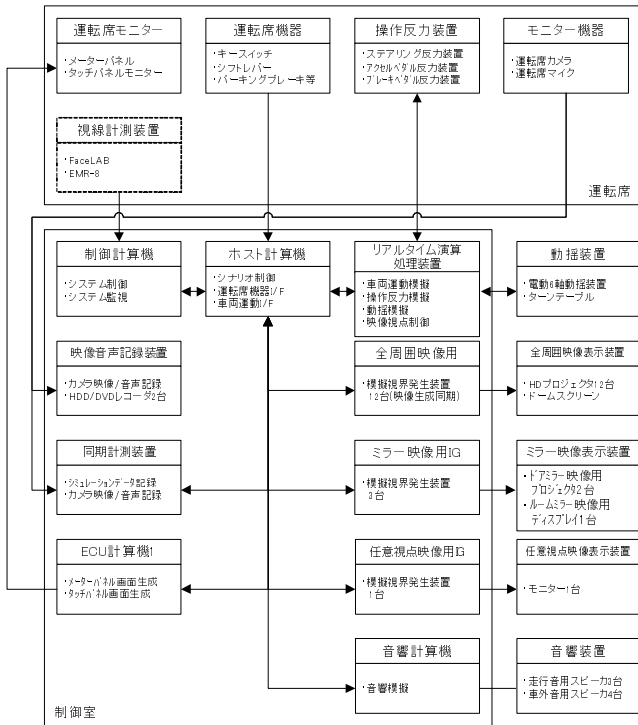


図3 システムブロック図

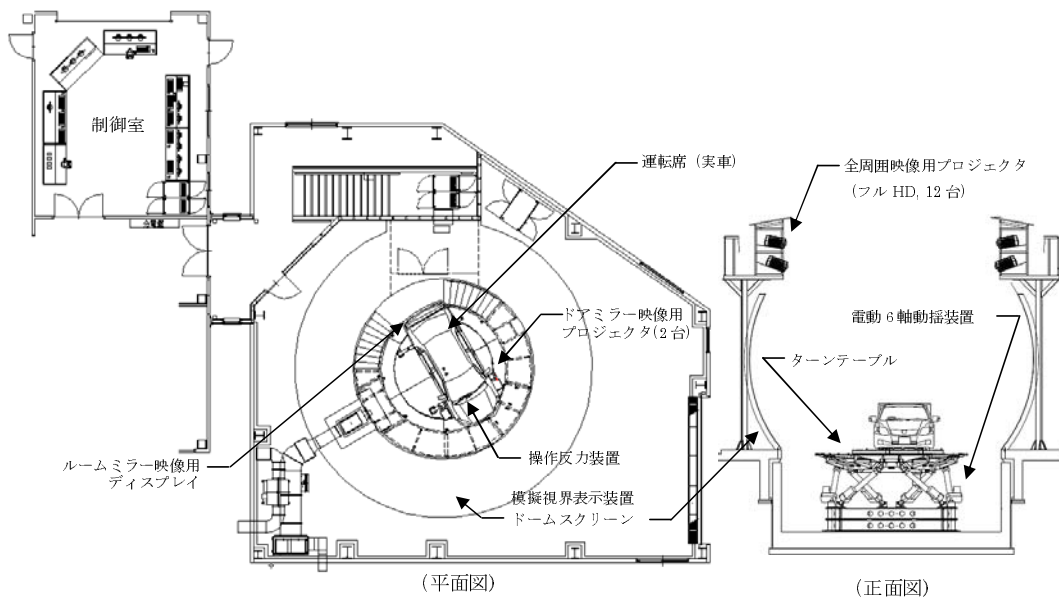


図4 レイアウト図



成の GUI や、専用の模擬視界発生装置による自車俯瞰映像、固定カメラの模擬映像などを表示でき、運転支援システムの評価などに利用できるものとなっている。

### 3.2 操作反力装置

操作反力装置は、ステアリング、アクセル/ブレーキペダル反力装置から構成され、何れも高トルクの AC サーボモータを使用している。反力機構のレイアウトを図 6、反力装置の最大トルク/推力を表 1 に示す。

各反力装置のトルク/踏力はユーザーによる直接制御が可能である。例えば予防安全技術の研究におけるステアリングやペダルへの介入制御や、警報振動を付加するような機能追加が容易に可能となっている。

### 3.3 動揺装置

動揺装置は電動 6 軸動揺装置上に大ストロークのターンテーブルを搭載している。動揺装置の外観を図 7、主な仕様を表 2 に示す。

市街地走行における交差点右左折時などでは、旋回感覚の不足による感覚不一致が酔いの原因の 1 つと言われているが、ターンテーブルによりこれを軽減できることが JARI の研究により明らかとなっている。[6] ± 300° のストロークによりヨー角変化については最大でスケールファクターを 1.0 とすることが可能である。

なお、動揺装置上の車両取り付けは、運転席が表示装置の視点位置となるようにオフセットされている。

### 3.4 模擬視界表示装置

全周囲映像表示装置の外観を図 8 に示す。また、ミラー映像表示装置の外観を図 9 に、表 3 に仕様概要を示す。

全周囲映像表示装置は、床置き式の採用により、水平方向 360°、垂直方向は上方 25°、下方 38° という広視野角を得ている。プロジェクタは、高輝度、高分解能といった高性能タイプの場合、重量や寸法が大きくなるため動揺装置上の映像表示装置として備えることが難しい。本装置は、表示装置を床置き式にすることでプロジェクタに対する重量や寸法への制約事項を緩和し、高性能な機種が採用が可能と

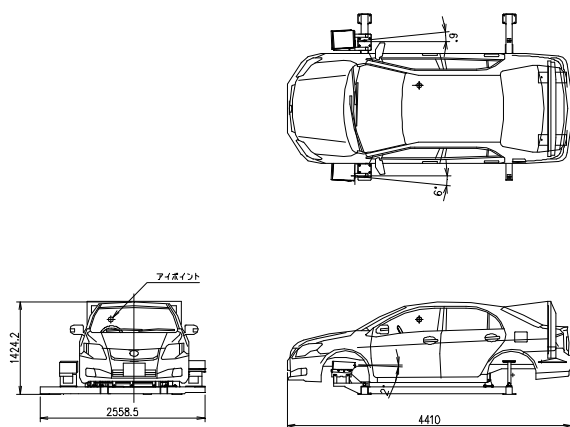


図 5 運転席外観図

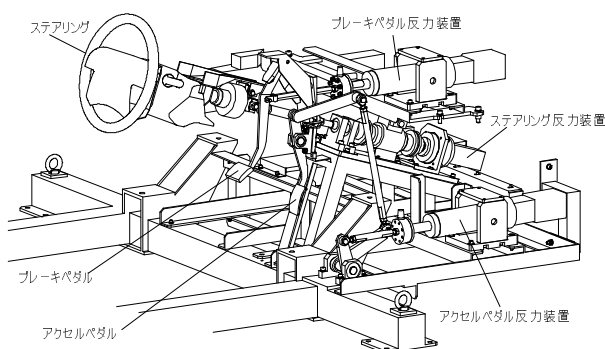


図 6 反力機構レイアウト図

表 1 操作反力装置の最大トルク/推力

番号	構成部品	最大トルク/推力(瞬時)
1	ステアリング反力装置	最大トルク 33.0N・m
2	ブレーキペダル反力装置	最大推力 1450N
3	アクセルペダル反力装置	最大推力 1450N

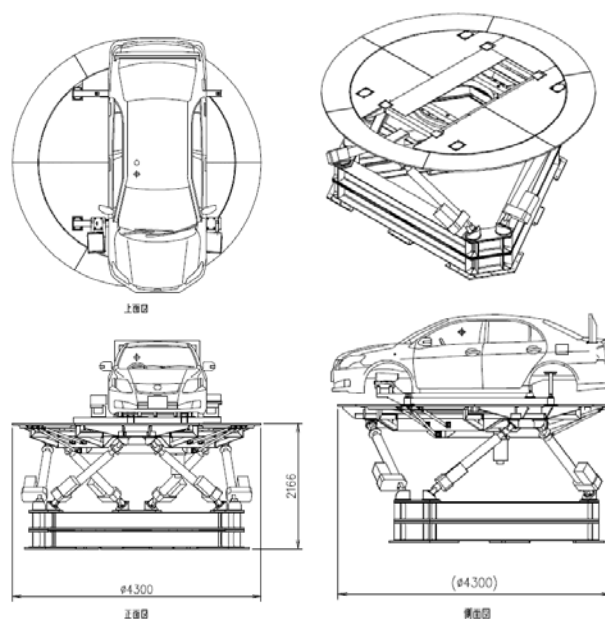


図 7 動揺装置外観図

表 2 動揺装置の仕様概要

番号	構成部品	主な仕様
1	ヨー回転装置	可動範囲：±300° 最大角速度：±60° /sec 最大角加速度：±120° /sec <sup>2</sup>
2	6 軸動揺装置	可動範囲（並進）：±300mm 可動範囲（傾斜）：±12° 最大速度：XY±700/Z±600mm/sec 最大角速度：±20° /sec 最大加速度：±0.4G 最大角加速度：±110° /sec <sup>2</sup>

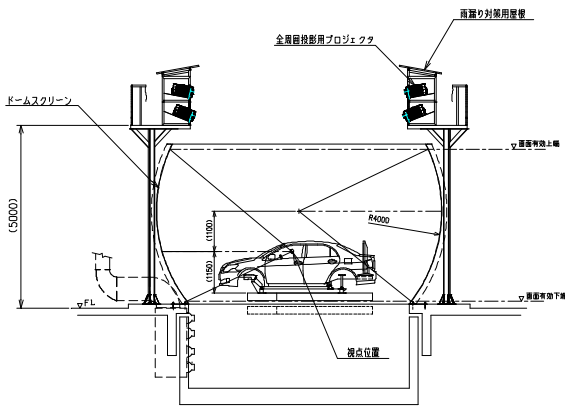


図 8 全方位映像表示装置

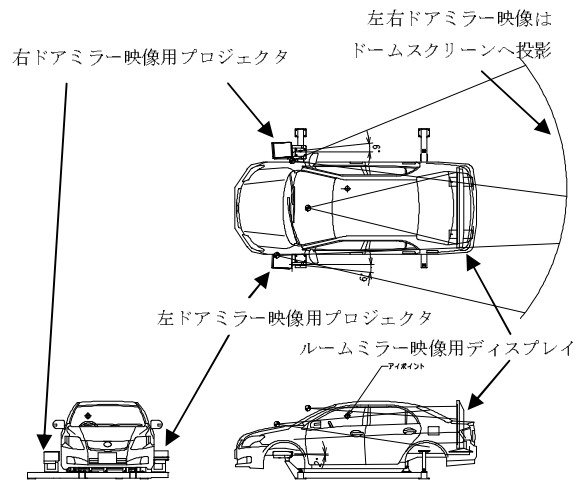


図 9 ミラー映像表示装置

なった。

前述のターンテーブルへの対応のためにも全方位視野の連続表示が必要となることから半径 4m、全周囲 360° のドームスクリーンに対し、12 台の高輝度フル HD<sup>\*6</sup> プロジェクタを使用し水平 6 分割、垂直 (上下)2 分割で投影を行っている。各プロジェクタへの映像を生成する模擬視界発生装置 (以下、IG という) は、全て同期して映像を生成している。

左右ドアミラーおよびルームミラーの映像については、運転席視点の映像をそのままミラーで視認すると仮想視点位置の違いから正しい映像とならない。また、実際のドアミラーで視認する場合、視認対象までの距離が比較的遠いという特徴がある。よって、ドアミラーの模擬映像は、投影面までの距離を極力確保することが望ましくなるため、本装置では、専用 IG の映像をターンテーブル上に配置したプロジェクタでドームスクリーンに投影することで、車両の挙動に追従したドアミラー映像を実現している。

ルームミラー用映像は、車両に搭載されたプラズマディスプレイに専用 IG の映像を表示している [7]。より自然な車外映像とするために、リアウィンドウの外側 (トランク部) にディスプレイを設置し表示している。

#### 4 ソフトウェア

主なプログラムとその関連を図 10 のブロック図に示す。本装置の基本ソフトウェアは、当社製研究用ドライビングシミュレーションシステム (以下、*D<sup>3</sup>sim*<sup>®</sup> Ver.5 という) を使用している。*D<sup>3</sup>sim*<sup>®</sup> Ver.5 の特徴は、GUI によるシナリオシステムを備え、プログラムの共通化により異なる研究用 DS の間でシナリオを共有できること、数値やグラフによるデータモニター制御、データの記録・再生制御などの実験支援機能を備えることである。また、プログラムのモ



図 11 みなと未来 21 地区映像表示例

ジュール化により機能拡張し易い構造となっており、本装置では後述するユーザーカスタマイズ機能などを機能拡張により実現している。

模擬視界データベースは、当社研究用 DS 標準の市街地、みなと未来 21 地区 (図 11)、郊外幹線道路、首都高速 3 号-6 号線の他、JARI 固有の各種データベースが使用可能となっている。

表 3 模擬視界表示装置の仕様概要

番号	構成品	主な仕様
1	全方位投影用プロジェクタ	3chipDLP <sup>**1</sup> 1920x1080×12 台 最大輝度: 8000ANSI ルーメン
2	ドームスクリーン	360° 球面ハード (半径 4m) スクリーングイン: 0.8±20% 視野角: H 360° ×V 65° (上方 25° 以上/下方 38° 以上)
3	ドアミラー用プロジェクタ	LCOS <sup>**2</sup> SXGA1400x1050×2 台 最大輝度: 3500ANSI ルーメン
4	ルームミラー用ディスプレイ	ワイド 60" プラズマ パネル解像度: 1365×768 画素

<sup>\*\*1</sup>DLP: Digital Light Processing (DMD: Digital Micromirror Device を使用した Projector)

<sup>\*\*2</sup>LCOS: Liquid Crystal On Silicon (反射型液晶パネル)

<sup>\*6</sup> HD: High Definition 高精細 (1920x1080 画素) の規格

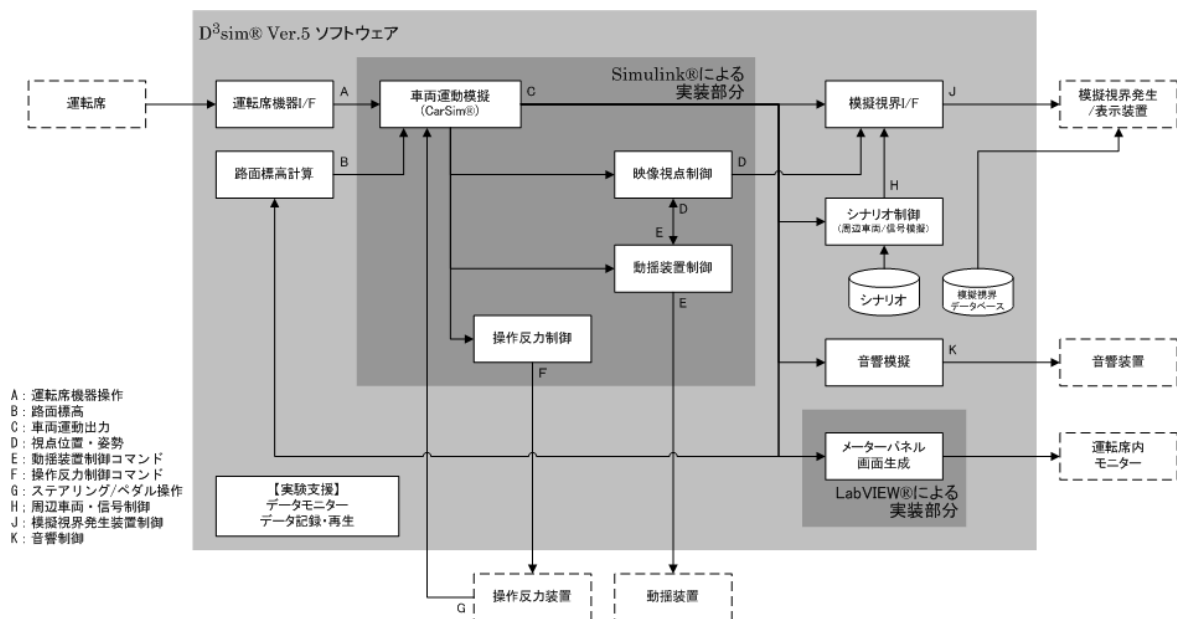


図 10 プログラムブロック図

## 5 ユーザーカスタマイズ機能

本装置は、*D³sim* Ver.5 の基本機能に加え、機能拡張によってユーザーによるカスタマイズの自由度が非常に高いシステムとなっていることが機能面での大きな特徴である。

例えば、予防安全や先進車両技術の有効性評価を行う場合、車両運動模擬への介入制御や、車載機器によるドライバーへの情報提示、また模擬視界上の情報板への情報提示などの機能をシミュレータ上で実現する必要がある。従来のシステムではこれらの機能を実現するにはプログラム改修が必要であったが、本装置では (1) ~ (4) に示す開発環境を備え、それらが相互に連携できる構造となっていることから、ユーザーによる機能追加が可能である。

開発環境の中でも、特に *Simulink* では車両運動シミュレーションの特性を始め、その出力を基点とした操作反力制御、動揺装置制御、全方位映像視点制御を統合的に制御可能となっている。統合制御機能の応用として、JARI では床置き式である表示装置上の映像と、動揺装置挙動の同期を独自の方式で行っている [9]。通常、床置き方式の表示装置と動揺装置との組み合わせでは、加速度模擬のための動揺装置挙動が、固定されているスクリーンとの相対的な動きから被験者に認識されないよう、動揺装置の挙動をキャンセルするように映像視点の位置および姿勢を制御する必要がある。JARI では、この制御において動揺装置の伝達関数を考慮した独自の同期を行うことで、動揺装置の挙動に、過渡応答を含めてほぼ完全に追従する視点制御を実現し、運転時の違和感の軽減を図っている。本装置の開発環境を次に示す。

### (1) MATLAB® / Simulink®\*7

モデル作成研究開発分野で広く使用されているツールである MATLAB® / *Simulink*® を使用し、*CarSim*®\*8 による車両運動模擬、操作反力制御及び動揺装置制御などのモデルを構築しており、モデル作成・編集が可能。

### (2) シナリオ作成

*D³sim* Ver.5 の標準ツールであるシナリオ作成ツールを使用し、主に周辺車両の動作の設定、信号制御の設定、またユーザー処理の組み込みなどが可能。GUI によりマウス/キーボード操作で簡単に設定することができる [8]。

### (3) LabView®\*9

モデル作成計測関連分野で使用例の多い GUI ツールである *LabView*® を使用してコンビネーションメーターパネル、車室内表示画面などの画面生成などを行っており、モデル編集・編集が可能。

### (4) 模擬視界データベース作成

GUI による業界標準ツールでユーザーが作成したデータベースを、本装置用の形式に変換し使用可能。

## 6 むすび

JARI 向けの全方位視野 DS について、その特徴について述べた。本 DS は、全方位視界表示装置、ターンテーブル搭載の大型動揺装置、実験シナリオと連携し、車両運動、操作反力制御、動揺制御、および映像視点制御までを統合制御可能な自由度の高いソフトウェアで構成されており、総合的な

\*7 MATLAB® / *Simulink*® は The MathWorks™ の登録商標

\*8 *CarSim*® は Mechanical Simulation Corporation の登録商標

\*9 *LabView*® は National Instruments Corporation の登録商標

運転状況模擬が可能となっている。予防安全技術の有効性評価や、交通事故の発生メカニズム解明のみならず、その汎用性から様々な研究分野で有効活用され、自動車社会の安全に寄与していくことを期待する。

#### 謝辞

本装置開発において、多大なる御支援・ご協力頂きました JARI 関係者の方々及び関係各位に、深く感謝致します。

#### 参考文献

- [1] 須田義大, 椎葉太一, 荒木厚, 大貫正明, ドライビングシミュレータにおけるバーチャルリアリティ技術, 自動車技術, Vol.56, No.6, pp.36-41 (2002)
- [2] 赤松幹之, 大貫正明, ドライビングシミュレータにおけるリアルワールド再現技術の最新動向, 自動車技術, Vol.61, No.7, pp.78-84 (2007)
- [3] 大貫正明, サステナブル ITS 応用研究, 三菱プレジジョン技報, Vol.4, pp.1-7 (2009)
- [4] 米川隆, 阿賀正巳, 門脇美佐, 名切未晴, 坂口靖雄, 荒木厚, 市街地走行で現実感のあるドライビングシミュレータの開発, 自動車技術会学術講演会前刷集, Vol.36-08, pp.1-8 (2008)
- [5] 廣瀬敏也, 谷口哲夫, 波多野忠, 成波, 緊急時運転操作を模擬できるドライビングシミュレータの開発, 交通安全環境研究所研究発表会講演概要, pp.89-94 (2006)
- [6] 浅野陽一, 内田信行, 運転席部回転の体感と映像の品質がドライビングシミュレータの運転違和感に及ぼす影響, 自動車研究, Vol.29, No.11, pp.3-6 (2007)
- [7] 荒木厚, 伊藤広明, 矢野徹, ドライビングシミュレータにおける後方用映像表示装置の開発, 三菱プレジジョン技報, Vol.4, pp.8-12 (2009)
- [8] 神埜浩, 伊藤広明, 山田大輔, ドライビングシミュレータのシナリオ作成ツールの開発, 三菱プレジジョン技報, Vol.3, pp.8-12 (2008)
- [9] 浅野陽一, 江上嘉典, 藤井健, 佐藤健治, 全方位視野ドライビングシミュレータの開発, JARI 自動車研究, 第 31 巻, 第 11 号 Vol.36-08, pp.55-60 (2009)

#### [執筆者紹介]



北島 章雄 略歴

1989年入社, 各種シミュレータのシステム設計及び VR システム設計に従事。現在, シミュレーション・システム第二部自動車システム課長



戸田 裕毅 略歴

1997年入社, 各種シミュレータの品質管理, ソフトウェア設計, システム設計に従事。現在, シミュレーション・システム第二部自動車システム課

# マルチプルショット・キャリブレーションによる 広視野角映像表示システム

和田 博之, 星合 秀樹

近年, 高い没入感・臨場感を得るための映像表示システムとして, 複数台のプロジェクタと曲面スクリーンを用いた広視野角の映像表示システムが用いられている。しかし, そのようなシステムの多くは, 連続した歪みのない映像をスクリーンに表示するために高価な歪み補正装置や歪み補正機能付きプロジェクタを用いており, 表示システムが高コスト化する一因となっている。そこで, 当社では表示システムを低コスト化するための技術として, 歪み補正機能を持たない汎用プロジェクタと映像発生装置 (IG) に搭載されているグラフィックスボードの機能を用いて, 曲面スクリーンに対し連続した歪みのない映像を表示するための映像補正技術「プロジェクションクラスタ」を開発してきた。本論文では, キャリブレーション手法として「マルチプルショット・キャリブレーション」を用いたプロジェクションクラスタを開発し, 当社のシミュレーション開発評価センターへ適用して, 低コストかつ没入感・臨場感のある映像表示システムを構築したので報告する。

## 1 まえがき

近年, 訓練用や研究用の各種シミュレータにおいて没入感・臨場感の向上を目的として, 180° 以上の広視野な曲面スクリーン上に高い解像度で映像表示を行うシステムが用いられている。この際, 単一のプロジェクタでは解像度が不足するため, 複数台のプロジェクタから映像を投影し, 曲面スクリーン上でこれらの映像を合成することで高解像度を実現する構成がとられている。

複数台のプロジェクタを用いる場合, 個々のプロジェクタから投影されるスクリーン上の映像には歪みが生じ, またプロジェクタ間で映像も連続していないため, 各プロジェクタから投影される映像の歪みを補正し, かつ連続させるための処理が必要となる。このため, 高価な歪み補正装置を付加したり, 歪み補正機能付きプロジェクタを用いており, 表示システムが高コスト化する一因となっている。

そこで当社では, 表示システムを低コスト化するための技術として, 高価な歪み補正装置や歪み補正機能付きプロジェクタを用いず, 汎用のプロジェクタと映像発生装置 (以降 IG (Image Generator) と呼ぶ) による映像補正を組み合わせ, 曲面スクリーンに対し連続した歪みのない映像を表示するための映像調整技術「プロジェクションクラスタ」を開発してきた [1, 2, 3, 4]。

本方式の特徴は以下の 4 点である。

- (1) IG 内で映像の補正を行うため, 歪み補正装置や歪み補正機能付きプロジェクタの代わりに汎用プロジェクタを利用することができ低コストであること。
- (2) IG からの出力画像を歪み補正装置や歪み補正機能付きプロジェクタで補正する方式と異なり, プロジェクタへ出力する前に IG 内で補正を行うため, 補正時の画質の劣化を軽減で

きること。

- (3) プロジェクタへ出力する前に IG 内で補正処理が完了するため, 補正処理による遅れを IG 側で吸収できること。
- (4) カメラを用いて数学的に映像を合致させる方式であるため, キャリブレーションにかかる時間を短縮でき安定した補正品質が維持されること。

本方式を適用した低価格な構成の映像表示システムは, これまで国立障害者リハビリテーションセンター殿向け電動車いすシミュレータを初め, 東京農工大学殿向けドライビングシミュレータなど主に研究用シミュレータの表示システムとして実績を上げている。

本論文では, プロジェクションクラスタの中核である, 補正のためのパラメータを算出する技術 (以降キャリブレーションと呼ぶ) として, これまでのシングルショット・キャリブレーションを更に改良した「マルチプルショット・キャリブレーション」[8, 9] を確立し, 270° の広視野角スクリーンをもつ社内シミュレーション開発評価センターに適用することで, 低コストな広視野角映像表示を実証したので報告する。

## 2 プロジェクションクラスタ

映像表示システムにおける歪み補正の方式は, 図 1 に示す 3 つの方式が主に用いられ, プロジェクションクラスタは (c) の IG を用いた方式に分類される。IG を用いた方式は, 近年のグラフィックスボードの高機能化と低価格に伴い実用化された方式である。プロジェクションクラスタの特徴としては以下の 4 点が挙げられる。

- (1) 低コストであること
  - 高価な歪み補正装置や歪み補正機能付きプロジェク

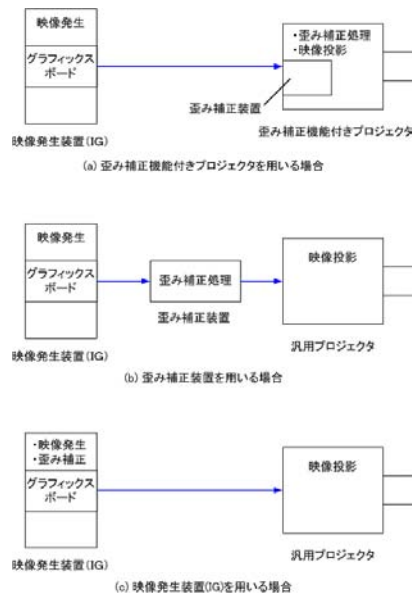


図1 映像の歪み補正に用いられる主な方式

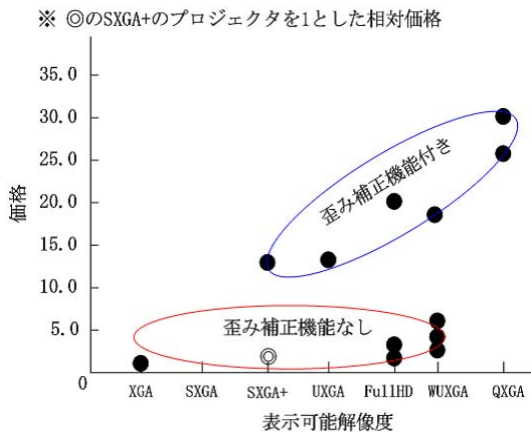


図2 プロジェクタの価格帯

タを用いずに、汎用のプロジェクタとIGに搭載されるグラフィックスボードを用いて、曲面スクリーンに対し連続した歪みのない映像を表示できる利点を有する。また、システムの解像度に応じ低価格帯の汎用プロジェクタを選択でき、低コストな映像表示システムの構築が可能となる。図2にプロジェクタの価格帯を示す。プロジェクションクラスタでは、図2の歪み補正機能なしの価格帯のプロジェクタを用いて映像表示システムを構築することができる。

(2) 補正による画質の劣化を軽減できること

映像に対して歪み補正を行う場合、補正映像はIGで生成された映像をもとに生成される。よって、IGで生成される映像が高解像度であるほど補正後の映像の画質は良い。

歪み補正装置や歪み補正機能付きプロジェクタを用

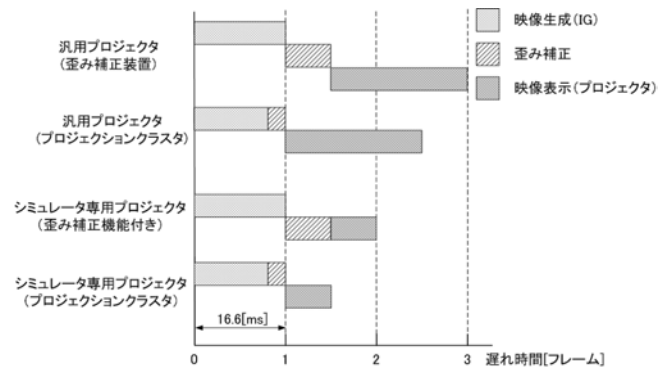


図4 補正処理による遅れ時間の比較

いた場合、図3(a)に示すように、補正映像はプロジェクタと同じ解像度で描画された映像からしか生成できないため、プロジェクタの解像度以上にIGで描画する映像の解像度を高くすることはできない。一方、プロジェクションクラスタを用いた場合、図3(b)に示すように、グラフィックスボードのメモリ上に描画したプロジェクタの解像度よりも高い解像度の映像から補正映像を生成できるため、補正による画質の劣化を軽減することができる。

(3) 補正による遅れを吸収できること

映像に対して補正処理を行う場合、IGで映像が生成されてプロジェクタで表示されるまでの間に補正処理による遅れが生じる。図4に各方式で補正を行う場合の遅れ時間の比較を示す。歪み補正装置やプロジェクタの歪み補正機能を用いる場合、IGからの映像信号が歪み補正装置もしくはプロジェクタの歪み補正処理部に入力されてから補正処理が行われるため処理による遅れが生じる。一方、プロジェクションクラスタを用いる場合、IGで映像を生成した後に同じフレーム内で補正処理を行うため、補正による遅れをIG側で吸収することができる。

(4) 安定した補正品質が維持されること

スクリーン上の補正映像を全視野に渡って歪みなく視認できる位置は原理上1点のみ(スイートスポット)であり、通常、この位置に運転席など操作者の視点位置が設定される。従って、従来の歪み補正装置や歪み補正機能付きプロジェクタを用いた補正方法では、シミュレーションの対象機種の変更等で運転席の位置を変更するたびに、再度補正をやり直す必要がある。一方、プロジェクションクラスタでは、数式に基づいて映像に逆歪みをかけているだけであるので、任意の視点位置に対応して補正パラメータを再計算し、移動後の視点から全視野に渡って歪みなく視認できるように、視点位置の補正を容易に実施することができる。また、

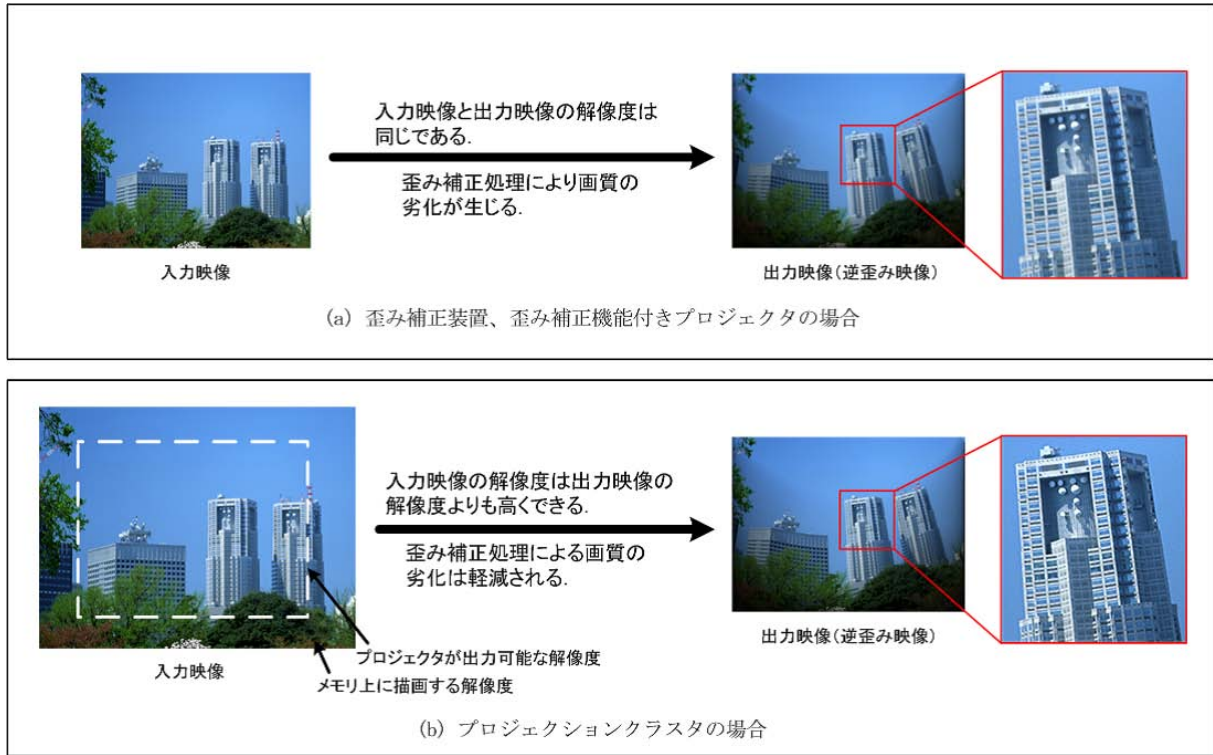


図3 プロジェクションクラスタにおける画質劣化軽減手法のメカニズム

この際の補正品質は移動前のものと同じである．よって，本方式では従来のように人の技能に依存する部分が少なく，誰が実施しても同様の補正品質を達成することができる．

また，プロジェクションクラスタの特徴としてステレオカメラを用いたキャリブレーションがある．キャリブレーションでは，スクリーン上で歪んだ基準パターンをステレオカメラで撮影し，得られた画像情報に基づいてスクリーン形状，プロジェクタ/スクリーン/カメラ間の相対位置をコンピュータビジョン技術を用いて推定することにより，プロジェクタから投影される映像がスクリーン上でどのように歪むかを計算し，IGを用いた補正に必要なパラメータを算出することができる [1, 2, 3, 4]．次章以降に，歪み補正の原理を含めたシングルショットキャリブレーションと新たに開発したマルチプルショット・キャリブレーションについて述べる．

### 3 歪み補正の原理

投影による歪みを補正するには，予め投影する映像に逆歪みをかけておけば，投影時の歪みで逆歪みが相殺されて歪みの無い映像となる．

図5にカメラ位置を基準座標として，2次曲面スクリーン，プロジェクタ ( $p_i$ )，カメラ ( $c$ )，基準点 ( $r$ ) および視点 ( $v$ ) の相対位置関係を示す．上記の逆歪みによる相殺の基本概念を実現する手法は，プロジェクタ  $p_i$  上の各画素位置

$x_{p_i}$  がスクリーンを介してカメラ上の対応する画素位置  $x_c$  とどのように関連付けられるかを表すマッピング関数  $\Psi_{p_i c}$  を見つけることに帰着する．

具体的には，プロジェクタからテストパターンをスクリーンに投影し，これをカメラで撮影することでマッピング関数  $\Psi_{p_i c}$  を算出する [1]．

スクリーンが平面である場合，プロジェクタ  $p_i$  上の画素位置  $x_{p_i}$  とカメラ上の画素位置  $x_c$  は， $\Psi_{p_i c}$  としてホモグラフィマトリクス (Homography Matrix)  $H$  を用いて以下の関係式で表される [6]．

$$x_{p_i} = H x_c \quad (1)$$

$x_{p_i}$  はテストパターンを設定する段階で既知であり， $x_c$  は撮影されたカメラ画像上で計測可能であるため，(1) 式から容易に  $H$  を算出することができる．

スクリーンが2次曲面になると， $x_{p_i}$  と  $x_c$  の相関は以下のように拡張される [1, 4, 5]．

$$x_{p_i} = H x_c - \left( q^T x_c \pm \sqrt{(q^T x_c)^2 - x_c^T Q_{33} x_c} \right) e_{p_i} \quad (2)$$

第1項は平面スクリーンと同様の相関項であり，第2項が2次曲面の補正項である． $e_{p_i}$  はエピポールと呼ばれ，プロジェクタからカメラを見た際に，カメラ位置がプロジェクタの画像上のどこに相対するかを表す． $q, Q_{33}$  はスクリーン形状を表す2次曲面の係数行列  $Q$  の要素であり (3) 式で定義される．

$$Q = \begin{bmatrix} Q_{33} & q \\ q^T & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

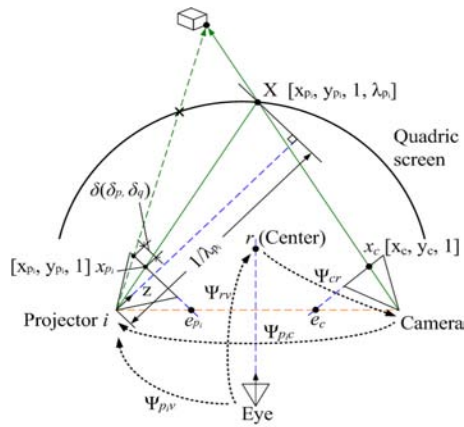


図5 プロジェクタの画素  $x_{p_i}$  とカメラの画素  $x_c$  との対応関係:  $x_c$  から  $x_{p_i}$  へのマッピング関数  $\Psi_{p_i c}$

係数行列  $Q$  は次のようなステップで算出される。まず、ステレオカメラでテストパターン（例えばドットパターン）を撮影することでスクリーン上の各ドットの距離情報が点郡として得られる。これらの点郡を、標準偏差の最も少ない1つの曲面式で近似すると、 $x, y, z$  の各座標軸に対応した係数が定まり、これを行列の要素として定義したものが係数行列  $Q$  となる。

こうして決定される  $H, e_{p_i}, q, Q_{33}$  を(2)式に代入することで、プロジェクタ  $p_i$  上の画素位置  $x_{p_i}$  とカメラ上の画素位置  $x_c$  の相関関係（すなわち、プロジェクタから投影される実映像をカメラで見た際にどのように歪んで見えるか）が明確となる。したがって、映像を出すプロジェクタ側で予め逆歪みをかけておけば、投影時の歪みで逆歪みと相殺することになり、カメラ位置で歪みの無い映像を見ることが出来る。以上に述べた歪み補正の原理を用いて映像調整を行うキャリブレーションを、シングルショット・キャリブレーションと呼んでいる。

#### 4 マルチプルショット・キャリブレーション

シングルショット・キャリブレーションでは、図6(a)に示すように全プロジェクタの投影領域が撮影可能な位置にカメラを設置することが前提であった。しかし、フルドームや  $180^\circ$  以上の視野角を持つ円筒型といった広視野角のスクリーンの場合、通常のカメラで全プロジェクタの投影領域を一度に撮影することは難しい。全方位カメラを用いるなど、全プロジェクタの投影領域を一度に撮影する方法はあるが、撮影画像の解像度不足や画像の歪みにより幾何補正の精度が低下するため、我々の高精度幾何補正には不向きである。

そこで図6(b)に示すように、シングルショット・キャリブレーションの手法をもとに、カメラの撮影範囲を重複さ

せながら、各プロジェクタの投影領域を分割して繰り返し撮影しキャリブレーションを行う手法を開発した。この手法は、分割してスクリーンを撮影し、撮影から得られたデータを統合してキャリブレーションを行うことから「マルチプルショット・キャリブレーション」と称している。以下にマルチプルショット・キャリブレーションの手順を概説する。マルチプルショット・キャリブレーションの手順は大きく次の4つのステップに分けられる。

- (1) テストパターン投影によるスクリーン上の3次元点復元 (4.1節)
- (2) 基準カメラ座標系への3次元点統合とスクリーン形状の推定 (4.2節)
- (3) プロジェクタと基準仮想カメラ間のマッピング関数計算 (4.3節)
- (4) プロジェクタと視点位置間のマッピング関数計算 (4.4節)

以下に各ステップの概要を示す。

##### 4.1 テストパターン投影によるスクリーン上の3次元点復元

シングルショット・キャリブレーションと同様に、対象とするプロジェクタの投影領域が撮影できる位置にステレオカメラを設置し、プロジェクタから投影されるテストパターンを撮影してスクリーン上の3次元点を復元する。この過程を全プロジェクタに対して行いテストパターン投影による3次元点復元を行う。

このとき、カメラの設置位置は撮影対象とするプロジェクタの全投影領域と、それに隣接するプロジェクタの投影領域の一部が重複した部分を撮影できる位置であれば自由に設置できる。図7にステレオカメラによる3次元点の復元の概略図を示す。図7において円周上の点が復元した3次元点を示している。

##### 4.2 基準カメラ座標系への3次元点統合とスクリーン形状の推定

次に、復元した3次元点を基準とする座標系へ統合する。これは、各カメラ位置で復元した3次元点が異なる座標系を持っており、そのままではスクリーンの形状を正しく推定できないためである。つまり、図7に示す  $X_{c_m p_i}^k$  と  $X_{c_m p_j}^k$  は同じ点であるが、異なるカメラ位置で復元されるため値が異なってしまう。

座標系の統合は、(a)一旦統合時の基準とするカメラの座標系へ統合、(b)これを、スクリーンに正対しかつスクリーン全体が画角内に入る位置に設置した仮想的なカメラの座標系へ変換、の2段階で行う<sup>\*1</sup>。図8(a)に基準とするステレオカメラおよび基準仮想カメラの位置関係を示す。

<sup>\*1</sup> これは基準とするカメラの座標系に統合した各プロジェクタの3次元点をもとに仮想的なカメラの座標系を決定しているためである。



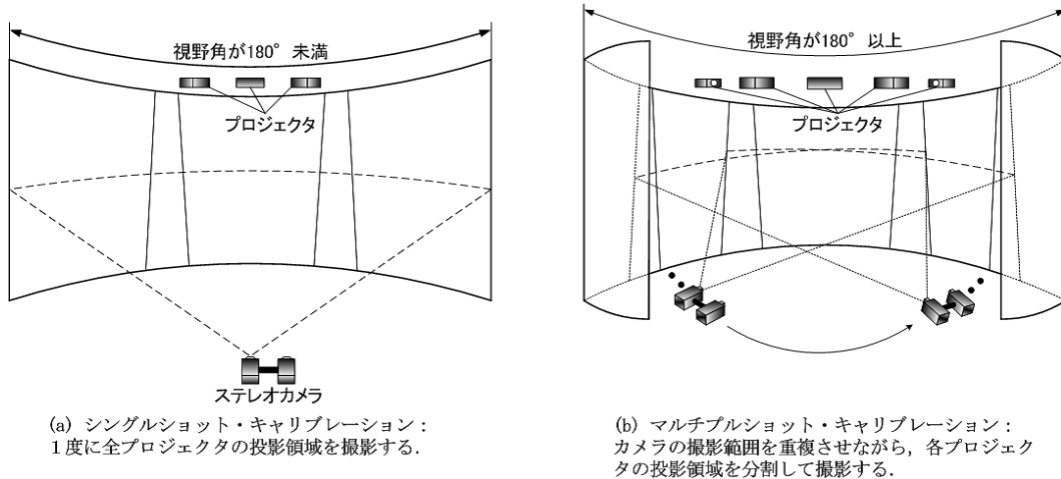


図6 シングルショット・キャリブレーションおよびマルチプルショット・キャリブレーションにおけるステレオカメラの設置方法

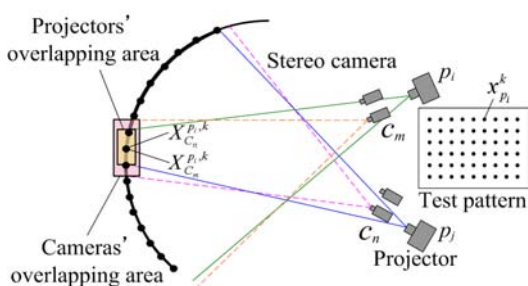


図7 プロジェクタ  $p_i$  および隣接するプロジェクタ  $p_j$  を対象とした場合のテストパターンの撮影：隣接するプロジェクタの重なった投影領域部分が撮像される位置に自由にカメラ  $c_m$  を設置する。

また、3次元点を基準カメラの座標系へ統合するためには、各カメラ位置間の相対関係（回転，並進）が必要となる。この空間的な相対関係は、テストパターン上の2次元点  $x_{p_i}^k$  に対応した異なるステレオカメラ位置で復元された3次元点  $X_{c_m p_i}^k$  と  $X_{c_n p_j}^k$  が実は同じ点であることを利用して、片方からもう一方へどのような回転，平行移動，拡大縮小を行えば一致するかから求められる。

スクリーン形状は、2次曲面を表す係数行列  $Q$  で表すことができ、復元された3次元点  $X_{c_m p_i}^k$  を、標準偏差の最も少ない1つの曲面式で近似することで推定できる。

#### 4.3 プロジェクタと基準仮想カメラ間のマッピング関数計算

補正に必要なプロジェクタと基準仮想カメラ間のマッピング関数を  $\Psi_{v_m p_i}$  ( $m = 1 \dots M, i = 1 \dots N$ ) とすると、 $\Psi_{v_m p_i}$  は基準仮想カメラの位置姿勢，プロジェクタの位置姿勢，スクリーン形状を表す2次曲面係数行列を用いて，式(4)のように求まる[4]。

$$\begin{aligned} x_{v_m}^k &\equiv \Psi_{v_m p_i} (A_{v_m p_i}, E_{v_m p_i}, e_{v_m}, x_{p_i}^k) \\ &\equiv A_{v_m p_i} x_{p_i}^k \pm \left( \sqrt{x_{p_i}^k T E_{v_m p_i} x_{p_i}^k} \right) e_{v_m} \quad (4) \end{aligned}$$

ここで  $A_{v_m p_i}$  および  $e_{v_m}$  は、基準仮想カメラの位置姿勢とプロジェクタの位置姿勢から求まる既知の行列であり、 $E_{v_m p_i}$  は2次曲面係数行列  $Q$  から求まる既知の行列である。

#### 4.4 プロジェクタと視点位置間のマッピング関数計算

求めたマッピング関数  $\Psi_{v_m p_i}$  ( $m = 1 \dots M$ ) は、各プロジェクタと基準仮想カメラ間のマッピングであるため、 $\Psi_{v_m p_i}$  を最終的に必要な各プロジェクタ  $p_i$  ( $i = 1 \dots I$ ) と視点  $e$  ( $v_0$  と同じ) 間のマッピングに変換する必要がある。各プロジェクタと視点間のマッピング関数を  $\Psi_{e p_i}$  とすると、 $\Psi_{e p_i}$  は式(5)のように、 $\Psi_{v_m p_i}$  を基準仮想カメラと視点間のマッピング関数  $\Psi_{e v_m}$  を用いて変換することで求められる。

$$\Psi_{e p_i} = \Psi_{e v_m} \Psi_{v_m p_i} \quad (m = 1 \dots M, i = 1 \dots I) \quad (5)$$

マッピング関数  $\Psi_{e v_m}$  は、視点  $e$  を視点と同じ位置姿勢の仮想カメラとみなし、仮想カメラ法[4]により基準仮想カメラからみた視点  $e$  の位置姿勢を計算して得られる。図8(b)に各マッピング関数の関係を示す。

### 5 システム構築と評価

#### 5.1 映像表示システム

図9に開発したマルチプルショット・キャリブレーションを適用した広視野角円筒型映像表示システムを示す。図9(a)は映像表示システムの全体構成，(b)はキャリブレーション用ステレオカメラユニット，(c)は円筒型スクリーンである。また，表1にシステムの性能諸元を示す。補正映像の生成は図9(a)に示すIGで行われ，実時間での映像の歪み補正および統合処理はIG内の表示プログラム内にシェーダ言語で実装されている。

#### 5.2 評価

図10は映像表示システムを用いたマルチプルショット・キャリブレーションの映像による評価結果である。図

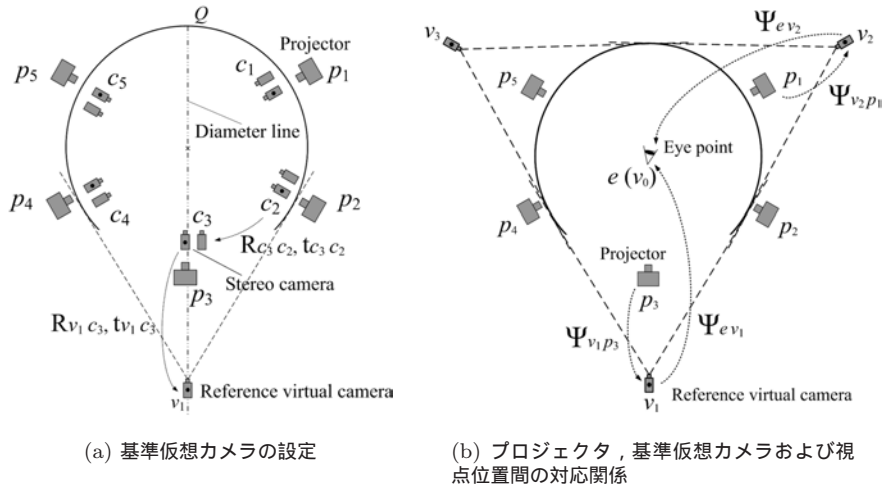


図 8 マルチプルショット・キャリブレーションにおける仮想カメラと視点位置の設定

表 1 映像表示システムの性能諸元

No.	構成部品	性能
(1)	IG	Intel Core2Duo E8400 3.0GHz, 4GB WindowsXP SP2
(2)	ネットワーク	Gigabit Ethernet
(3)	計測用カメラ	XGA (1024x768 画素)
(4)	プロジェクタ	5 セット: SXGA (1280x1024 画素) ピクチャー DLA-M2000SC, 2000lm
(5)	グラフィックス	NVIDIA QuadroFX5600 1536MB
(6)	円筒型スクリーン	直径 6m 高さ 3m

表 2 補正方式, プロジェクタ 1 台あたりのコストと調整時間に関する比較

項目	他社		
	当社	H/W (専用 H/W)	H/W (Projector)
補正方式 (補正装置)	S/W (IG)	H/W (専用 H/W)	H/W (Projector)
コスト (プロジェクタ 1 台あたり)	1.0	2.5	4.0
調整時間 (Hr) (プロジェクタ 1 台あたり)	約 0.9	約 2.0	0.1 ~ 2.0

10(a) はキャリブレーション前の表示状態, (b) および (c) はテストパターンの表示によるキャリブレーション後の結果である. また, 図 10(d) ~ (f) は航空機シミュレータ用のデータベースを表示した結果である. オーバーラップ部についてはブレンディングによる輝度補正を行っている [7].

### (1) コスト

表 2 に補正方式, コスト, 調整時間に関する他社との比較結果を示す. ただし, 調整時間に関しては初期設定にかかる時間は含まれていない. 表 2 に示すように, 汎用プロジェクタを用いてプロジェクションクラスタによる映像表示を行う場合, 歪み補正装置や歪み補正機能付きプロジェクタを用いる場合と比べ, 映像投影および歪み補正に要するコストを 1/4 程度に抑えることができる.

### (2) 映像の画質軽減

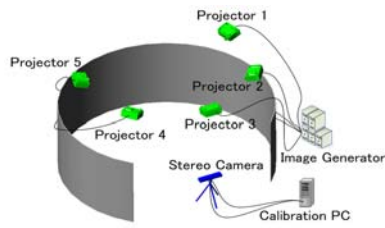
構築したシステムでは, 図 3 に示したプロジェクションクラスタの画質劣化軽減手法を用いてプロジェクタが出力可能な解像度よりも高い解像度の映像 (今回構築したシステムでは 1280x1024 画素の出力解像度に対し 1400x1200 画素の解像度で描画) から補正映像を生成しており, 画質の劣化が軽減できていることを確認

した.

### (3) 連続性の精度

連続性の精度を定量的に評価するため, 国際基準である ICAO(国際民間航空機関) が定める FSTD(Flight Simulation Training Devices) のジオメトリ基準 [10] を用いた. この基準は, 視点からスクリーン上の点を見た際に正しい位置からの角度のずれが所定値内になければならない事を定義したものである. 表 3 に, 今回構築したシステムのスクリーンに補正したテストパターンを表示させ, プロジェクタの投影領域が重複している箇所の最大の画素ずれと, これを角度のずれに換算した数値 (今回構築したシステムでは 1 画素が 2.8' に相当する) を示した. 図 10 の (b), (c), 表 3 の結果から, ICAO のジオメトリ基準に対し十分な連続性が得られており, 映像がマルチプルショット・キャリブレーションによる自動補正により幾何学的に正しく統合されていることがわかる.

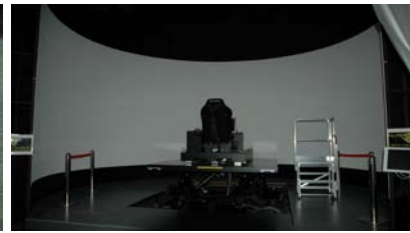
以上に述べた評価結果から, 没入感・臨場感の高い広視野角映像表示システムに対してもプロジェクションクラスタを適用できる見通しが得られた. また, 調整時間に関してはまだ改善の余地があり, 今後調整時間の短縮に向けた



(a) 映像表示システムの構成：5 プロジェクタ



(b) ステレオカメラユニット：基線長 75cm



(c) 円筒型スクリーン (直径 6m, 高さ 3m, 視野角:270°)

図 9 広視野角円筒型映像表示システムへの応用例： 5 プロジェクタを用いて、視野角 270°を実現した例。スクリーンが 2 次曲面 (ドーム, パラボラ等) であれば同一手法でキャリブレーション可能。

表 3 各プロジェクタ間の連続性に関する補正精度

Proj No.	実測最大誤差 [°] (不連続位置)	ICAO ジオメトリ基準 [°]
1-2	1.88	12.0 以内 (Zone 3)
2-3	3.72	9.0 以内 (Zone 2)
3-4	5.60	12.0 以内 (Zone 3)
4-5	1.40	12.0 以内 (Zone 3)

改善に取り組んでいきたい。

## 6 むすび

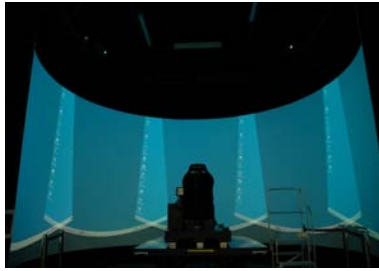
本論文では、プロジェクションクラスタを用いて広視野角の映像表示を行うためのキャリブレーション手法であるマルチプルショット・キャリブレーションと、当社のシミュレーション開発評価センターを用いて構築した、低コストな没入感・臨場感の高い映像表示システムについて述べた。

本開発の成果は、高価な歪み補正装置や歪み補正機能付きプロジェクタの代わりに汎用プロジェクタと IG に搭載されているグラフィックスボードの機能を用いて、低コストな没入感・臨場感の高い映像表示システムを構築したことである。

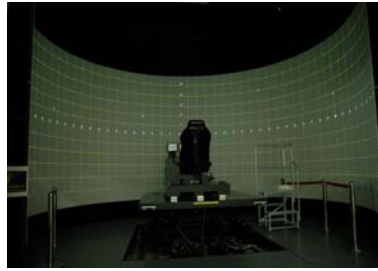
今後は、更なる調整時間の短縮や補正精度の向上を図ると共に、大型広視野角スクリーンやドーム型スクリーンなどの市場ニーズにも対応していきたい。

## 参考文献

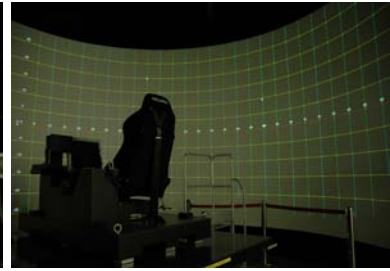
- [1] R. Raskar, J. van Baar, P. Beardsley, T. Willwacher, S. Rao and C. Forlines: iLamps: Geometrically aware and self-configuring projectors, *ACM Transaction on Graphics*, ACM Press, vol. 22, no.3, pp. 809–818, 2003.
- [2] J. van Baar, T. Willwacher, S. Rao and R. Raskar: Seamless multi-projector display on curved screens, *Proceedings of Eurographics Workshop on Virtual Environments(EGVE)2003*, ACM Press, pp. 281–286 2003.
- [3] 和田博之, 緒方正人, J. van Baar, R. Raskar ”ビジュアルシステムのためのプロジェクタ複合表示システムの研究試作”, 第 2 回情報科学技術フォーラム一般講演論文集, pp. 401–403 2003.
- [4] M. Ogata, H. Wada, K. Kajihara and J. van Baar: A multi-projector display system with virtual camera method for distortion correction on quadric surface screens, *IEICE Transactions*, IEICE Transactions on Information and Systems, vol. E89-D, no.2, pp. 814–824 2006.
- [5] A. Shashua and S. Toelg: The quadric reference surface: Theory and applications, *Proceedings of IJCV*, vol.23(2), pp. 185–189 1997.
- [6] R. Hartley and A. Zisserman: *Multiple View Geometry in Computer Vision*, Cambridge University Press, June 2000.
- [7] R. Raskar, J. van Baar, T. Willwacher and S. Rao: Quadric transfer for immersive curved screen displays, *Eurographics 2004*, Proc. Eurographics, pp. 451–460 2004.
- [8] 緒方正人, 和田博之, 梶原景範, J. van Baar, R. Raskar ”Parametric Approach for Wide Field of View Multi-Projector Displays”, 情報処理学会研究報告 グラフィクスと CAD 研究会報告, pp. 127–132 2008.
- [9] M. Ogata, H. Wada, J. van Baar, R. Raskar: A Unified Calibration Method with a Parametric Approach for Wide-Field-of-View Multiprojector Displays, *IEEE Virtual Reality 2009*, IEEE Virtual Reality Conference, pp. 235–236 2009.
- [10] ”Manual of Criteria for the Qualification of Flight Simulators”, ICAO 9625 3rd Edition, Appendix B, Section 3.6.



(a) 標準画面の表示結果：中央は操縦席である。(キャリブレーション前)



(b) 評価用パターンの表示結果 (キャリブレーション後：スクリーン全体)



(c) 評価用パターンの表示結果 (キャリブレーション後：拡大)



(d) シミュレータ用映像 (海面と空) の表示結果 (スクリーン左側部)



(e) シミュレータ用映像 (海面と空) の表示結果 (スクリーン中央部)



(f) シミュレータ用映像 (海面と空) の表示結果 (スクリーン右側部)

図 10 広視野角円筒型映像表示システムへの応用：2次曲面に対応可能であるので、フルドーム等への適用も可能である。また、この例では5台のプロジェクタを用いているが使用個数も分解能に応じて任意である。

#### [執筆者紹介]



##### 和田 博之 略歴

2002年入社，主にマルチプロジェクタ表示技術およびコンピュータビジョン関連技術の研究開発に従事。現在，技術開発部 映像自動合成システムグループ



##### 星合 秀樹 略歴

2002年入社，主に表示装置設計および機構設計に従事。現在，画像システム技術部 画像システム1課

# 水中音響模擬の技術動向

布田 浩二

水中音響の模擬の中でも海洋における音波伝搬にフォーカスして、その模擬技術を紹介する。水中音として観測されるものには、船舶の航行音、海中雑音、降水雑音、ソーナーや魚群探知機などによる人工的な音がある。これらは、音源で発生・放射され、水中を伝搬して、受波器（ハイドロフォン）で電気信号に変換される。その後、解析のための信号処理が行われ表示器等に表示される。音波が海洋を伝搬する場合、空中や電波では見られない特徴的な現象が発生する。これは反射、屈折によるものであり、サーフェス・ダクト、シャドウゾーン、サウンドチャンネル、コンバージェンスゾーン、マルチパスなどがある。これらを模擬するために利用される音波伝搬モデルとして、音線追跡法、ノーマルモード法、放物型方程式法等がある。訓練装置における水中音響模擬では、リアルタイム性、結果予測性、リアリティ等を重視する必要がある。

## 1 はじめに

海中（水中）においては電波や光は減衰が大きく遠方まで伝わらないため、空気中のように通信や捜索にこれらを利用することができない。これに代わり水中では音波が利用され、ソーナーや魚群探知機として一般に知られている。

計算機能力（特に PC）の向上に伴い、以前は現実的な時間では解けなかった問題が解けるようになったり（演算性能の向上）、広大な領域を対象とした問題が扱えるようになったり（メモリ容量の増大）、水中音響模擬技術も大きく変化してきている。本稿では、水中音響模擬技術の基礎的事項を述べた後、最近の技術動向を俯瞰する。また、訓練装置という観点での考慮事項について記載する。

## 2 水中音響とは

### 2.1 水中音の種類

水中における音波の伝搬は、空気中における電波や光の伝搬に比べ複雑なものとなる。これは水中を音波が複雑に反射・屈折しながら伝搬することによる。波動の屈折は、媒質の伝搬速度の変化が原因であるが、水中では空間スケールに対する音速の変化が大きく、音波は複雑に屈折をしながら伝搬する。また、上下を海底と海面という境界で挟まれた閉ざされた空間であり、この境界による反射の影響も大きい。

「水中音響」とは、水中、特に海中において聴取される音のことを言い、船舶の航行音、海中雑音、海洋生物の鳴き声、ソーナーや魚群探知機の発する音、降水雑音などがある。

#### (1) 船舶の航行音

海洋では多数の船舶が航行している。これらの船舶には海洋を航行するための機関などの各種機械装置、乗員が生活するために必要となるエアコンや冷蔵庫などの様々な

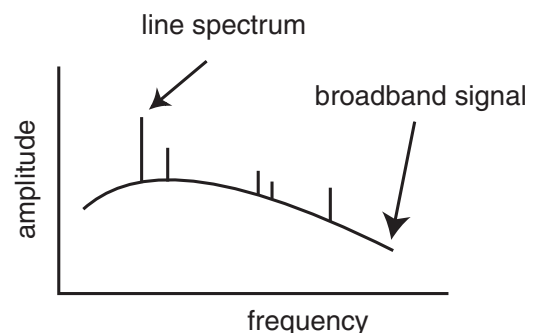


図1 船舶の航行音のスペクトラム：航行音は単一周波数の線スペクトラムと広帯域雑音の合成音である。

設備が稼働しており、これらから様々な音が発せられている [1, 23.3 項]。

船舶から発生する音は、そのスペクトラムから大きく 2 つの形態に分類される。ひとつは広い周波数帯域に分布する連続スペクトルを有する音（「ざあ」とか「ごう」という擬音語で表される音）、もうひとつは特定の周波数成分のみからなる線スペクトラムを有する音（「ピー」とか「プー」という音）である（図 1）。

船舶のエンジンやギアなどの回転運動や往復運動をする機構から発生する音は線スペクトラム状であり、船体の水切り音やプロペラブレードによるキャビテーションは連続スペクトルである。船舶の音はこの 2 種類の音が合成されたものとなる。

#### (2) 海中雑音

海中雑音は広帯域に亘るが、その発生源により周波数帯が異なっている。これは低域から、潮汐と波浪に伴う流体力学的効果及び地震による擾乱によるもの (I)、海洋そのものの擾乱によるもの (II)、船舶航行雑音 (III)、波浪によるもの (IV)、熱雑音 (V) と分類されている (図 2)。 [2, 3]

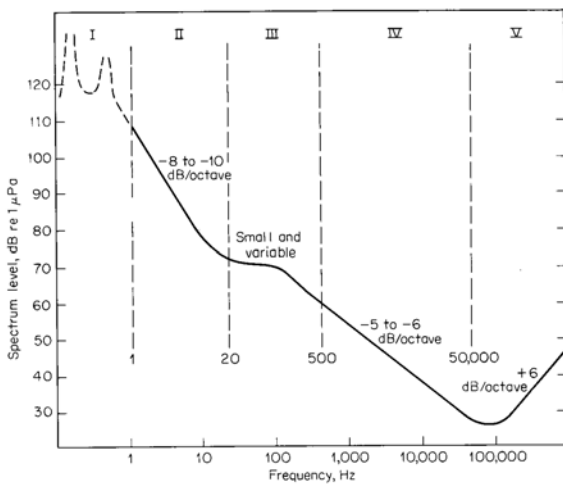


図2 海中雑音の周波数スペクトル例(文献 [3] より)

### ① 潮汐と波浪に起因する音

海洋の潮汐(流れ)や波浪(波)により海中の圧力が変化するので、圧力型ハイドロフォンはこの変化を音として検出する。これは水中音響として取り扱う周波数よりもはるかに低く、1 Hz 以下の帯域である。現在のところでは不明確な部分が多い。地震の擾乱による音もこの帯域となる。

### ② 海洋擾乱に起因する音

海洋擾乱に起因する音は、およそ 1 Hz から 20 Hz の帯域であり、 $-8 \sim -10$  dB/oct のスペクトル勾配を示す。

### ③ 船舶航行雑音

船舶航行雑音は 20 ~ 500 Hz の帯域で、前項の船舶の航行音とは異なり、音源を明確に定められない遠方を航行する船舶によるものを指す。この帯域はほぼ平坦な台形状のスペクトルを示す。

### ④ 波浪に起因する音

波浪に起因する音は 500 Hz ~ 50 kHz 付近の帯域で、波浪により海面で発生する音である。

### ⑤ 熱雑音

50 kHz 付近以上の帯域では、海水の分子運動により発生する熱雑音が支配的であり、スペクトラムレベルは 6 dB/oct の正勾配となる。

## (3) 海洋生物の鳴音

海中では、海洋生物の鳴音(鳴き声)を聴取できることがある。クジラやイルカなどの海洋性ほ乳類、エビなどの甲殻類、ある種の魚類が音を発生することが知られている。

クジラやイルカはコミュニケーションの手段、捕食の手段として周波数変調のかかった音(声)を使っている。鯨の種類によっては、深度 1000 メートル付近にできるサウンドチャンネルと呼ばれる音の回廊を使って、1000 キロメートルも離れた場所間でコミュニケーションをするとも言われている。

エビなどの甲殻類はそのハサミから音を発生する。このスペクトル分布は 500 ~ 20 kHz である [1, 10.2.4 項]。また、間欠的な鳴音を出す魚もいる。

### (4) ソナーや魚群探知機の発する音

ソナーや魚群探知機は自然界の音ではなく人間の活動に起因して発生する音である。船舶の航行、捜索、調査のために幅広く利用されている。

### (5) 降水雑音

日常でも経験するように、海洋でも降雨があると雨粒が海面を叩く雑音が発生する。大雨の場合、5 ~ 10 kHz の帯域ではスペクトラムレベルが 30 dB 程度増大する。

## 2.2 水中音の発生から受波まで

魚群探知機やソナー等を模擬するにあたっては、水中における音波伝搬についての知識が必要となる。音源から受波器を經由し、表示装置やヘッドフォンに至る、音響信号の流れについて考えてみる。水中音の一生として、音源での発生、水中への放射、受波器までの水中伝搬、受波、受波後の信号処理に分類して考える。

### ① 発生

音源から発生する音は、音源の状態によってその周波数特性や強度、時間変化が決定される。

### ② 放射

水中へ放射された音は、音源とその周辺の構造によって水中への放射の強度や周波数特性が変化する。点音源でない場合、これらの放射特性は放射方向によって変化する。音源と受波器の位置関係が変われば受波する音響信号も変化する。これをアスペクト特性と呼び、放射方向と周波数の関数として表される。一例を図 3 に示す。

### ③ 伝搬

水中へ放射された音波は、水(海水)を媒質として縦波(粗密波)として伝搬する。このとき、媒質中の音速の変化や海底・海面などの境界、海中の物体などのために屈折や反射、散乱が起こる。

訓練装置で着目するのは、音源から出て、屈折や反射・散乱をして受波器に到達する音波である。伝搬の計算では、受波器に到達する音波を特定する必要がある。この音波は屈折、反射・散乱の影響により、波形の変化、周波数特性の変化、レベルの変化を伴う。伝搬における各種現象については次項で述べる。

### ④ 受波

水中を伝搬した音波は受波器(空中ではマイクロフォンと呼ばれるが、水中ではハイドロフォンと呼ばれる)に到達し、受波器で圧力変化が電気信号に変換される。受波器は単一のハイドロフォンから成るものと複数のハイドロフォンから成るハイドロフォン・アレイとがある。ハイド

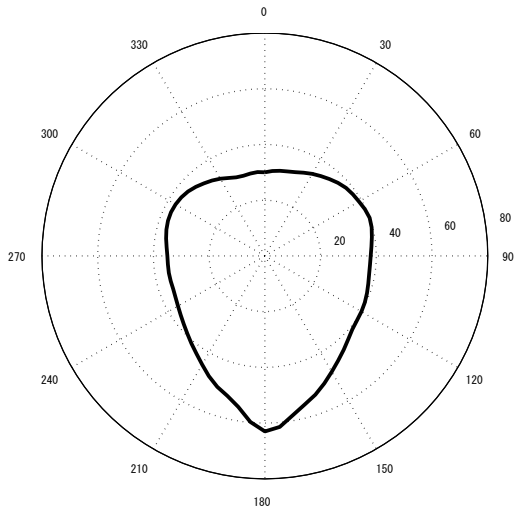


図3 水中の音源からの放射特性の一例：レベルの単位は dB。ある速力におけるある周波数の音の放射パターンであり、音源からの放射方向（音源正面を  $0^\circ$  とし、右回り）と放射音のレベルを示したものである。速力や着目する周波数が変わるとレベル、形状ともに変化する。この例では、左右ほぼ対称、正面への放射が最も弱く、後方への放射が最も強いことを示している。

ロフォン・アレイでは、後述の信号処理と組み合わせることにより、ゲインを稼いだり、特定の方向に指向性を持たせたりすることができる。

### ⑤ 信号処理

コンピュータや半導体素子が発達した現在、信号対雑音比 (S/N 比) 改善や信号検知、情報取得のための様々な信号処理が行われている。訓練装置やシミュレータでは、この部分は実機に搭載されている処理器、所謂「本物」を使って実現することも多く、この場合、信号処理の内容に立ち入ることはなかった。しかし、経済性や COTS (Commercial Off-The-Shelf, 商用品 / 既製品の利用) 活用の考え方が普及してきた近年では、フロントエンド・ステミュレーション (Front-end Stimulation)<sup>\*1</sup> を要求されることも多く、この場合、処理器の内部信号処理アルゴリズムを模擬することとなる。

信号処理技術への入門としては 2 つの側面を学ぶ必要がある。ひとつはごく一般的な音響信号処理 (デジタル信号処理) であり、参考文献も入門書から専門書まで多数の文献が刊行されている。もうひとつは、これらのデジタル信号処理を組み合わせたソーナール信号処理技術である。これについては詳細を説明した国内文献が少ないため、海外の文献 [4, 5] から情報を得る必要がある。

<sup>\*1</sup> 装置のヒューマン・マシン・インタフェース側を「フロント」側、センサ機器側を「バック」側と称し、オペレータが目にする表示や音響を直接的に作り出すこと。

## 3 海洋における音波伝搬現象

本項では、水中音響の中でも音波の伝搬に焦点を当てて、様々な音波伝搬現象について記述する。先に述べたように、音波伝搬は波動現象であるので、その伝搬は媒質である海水の状態と、境界条件となる海面及び海底の条件に支配される。日本近海での一般的な音波伝搬の様子を図 4 に示す。

海洋観測で行われる海洋音響トモグラフィ [6] の場合には、図の深海サウンドチャンネルでの伝搬が利用されるが、訓練装置では音源がそれほど深くなることなく、サーフェス・ダクトやコンバージェンスゾーンの影響を受けることが多い。

### 3.1 反射, 屈折, 吸収

音波は水中を波動として伝搬するが、この振動エネルギーが熱に変わることによるエネルギーの減少があり、これを吸収損失と呼んでいる。海水の吸収損失を図 5 に示す [1]。グラフから分かるように、海中には大きく 3 つの吸収が存在する。1 kHz 以下のホウ酸による吸収、100 kHz 程度までの炭酸マグネシウム及び硫酸マグネシウムによる吸収、100 kHz 以上では真水による吸収である。水温  $4^\circ\text{C}$ 、塩分濃度 35 ‰、pH 8.0、水深 1000 m という環境で利用可能な海水中の減衰量  $\alpha$  [dB/km] の簡便な近似式として次の式がある [7, chap. 1.5.2]。

$$\alpha \simeq 3.3 \times 10^{-3} + \frac{0.11f^2}{1+f^2} + \frac{44f^2}{4100+f^2} + 3.0 \times 10^{-4}f^2. \quad (1)$$

また、水中では媒質の音速に変化があるために、音波はスネルの法則に従って音速が遅い方へと屈折しながら伝搬する。加えて、海面と海底は伝搬媒質の境界となり、ここで反射と減衰が発生する。これらの変化がたとえ局所的なものであっても、そこから離れた音場に影響を与える場合がある [8, 9]。

以降では音波伝搬の様子を音線図と音圧分布図で示す。音線図は音線追跡法によって、音圧分布図はノーマルモード法によって計算したものである。音線追跡法では音源からの放射角 (音線の出発角、図 13 の  $\theta$ ) を水平方向を中心とした一定範囲に限定している。また、ノーマルモード法では考慮するモード (式 (10) の変数  $j$ ) を限定して音線図とほぼ同様の計算条件となるようにしている。

### 3.2 サーフェス・ダクト

風のある日などは海面付近の海水が風により混合され、海面付近に等温層が形成される。この等温層内では音速は圧力の影響によって水深とともに増大し、音波は海面へ向かって屈折する。このため、音響エネルギーが海面付近の等温層内にトラップされ、拡散が少なく遠距離まで伝搬する。これがサーフェス・ダクト (海面ダクト) と呼ばれる。

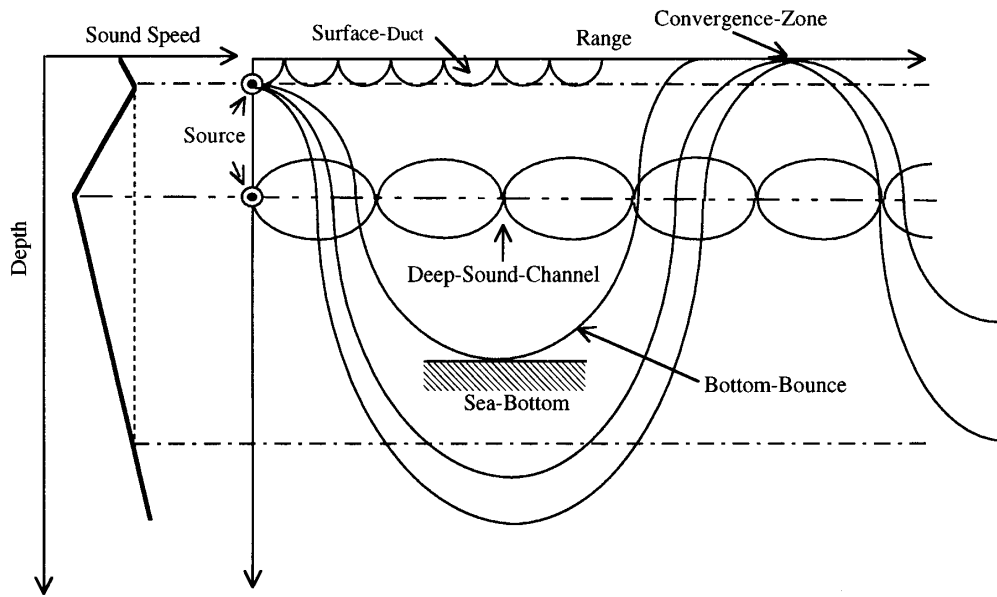


図4 海洋における音波伝搬：図は音源から受波器までの鉛直断面を表している。

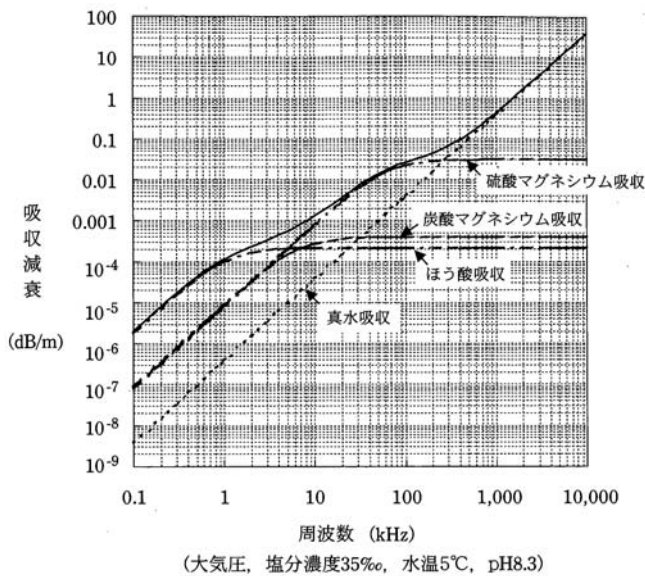


図5 海水の吸収損失 (文献 [1] より)

現象である (図6)。

サーフェス・ダクトの影響はダクト内にとどまらず、音場全体に影響を与える [10, 11, 12, 13, 14]。

### 3.3 サウンド・チャンネル (深海サウンド・チャンネル)

深海サウンドチャンネルは中緯度地方の典型的な音速プロファイルで見られる現象である。中緯度地方の音速プロファイルには、深度700~1300メートル付近に音速極小層が形成される。音速の極小深度をサウンドチャンネルの軸ま

たはSOFAR軸と呼ぶ<sup>\*2</sup>。SOFAR軸付近に置かれた音源から出た音波はSOFAR軸に向かうように繰り返し屈折を繰り返すために拡散によるレベルの低下が少なく、遠距離まで伝搬する (図7) [15]。訓練装置ではこの伝搬が発生するようところに音源が位置することはまれである。

### 3.4 コンバージェンス・ゾーン

コンバージェンスゾーンとは、典型的な中緯度プロファイルにおいて、SOFAR軸より浅い位置にある音源から出た音波が、いったん深いところまで達した後、屈折して海面付近に戻るときに、エネルギーが収束する領域である (図8)。音速プロファイルにもよるが、概ね30NM程度の間隔で現れる。上から見ると、半径30マイル間隔のドーナツ状の領域となる。ここでは、浅いところに設置した受波器で30NM, 60NMといった遠方の音源からの音波を捉えることができる。

### 3.5 シャドウ・ゾーン

音源と受波器が近距離 (数マイル) にある場合、音速プロファイルに極大点がある場合、音波はその深度から離れる方向へ屈折するため、音波が到達しない領域が発生する。また、コンバージェンス・ゾーンの間SOFAR軸より浅い領域も同様に音波が到達しない影領域となる。

この領域をシャドウ・ゾーンと呼ぶ。ここに設置された受波器には音源からの音波が到達しないため、音源の近傍にありながら音響信号が受波できないという状況が生まれ

<sup>\*2</sup> SOFAR: SOUNd Fixing And RANGing の頭文字で、海上で撃墜された航空機の位置を計測するための音波伝搬経路としてこのチャンネルが利用されたことに由来している [1, p. 80], [2, p. 155]。



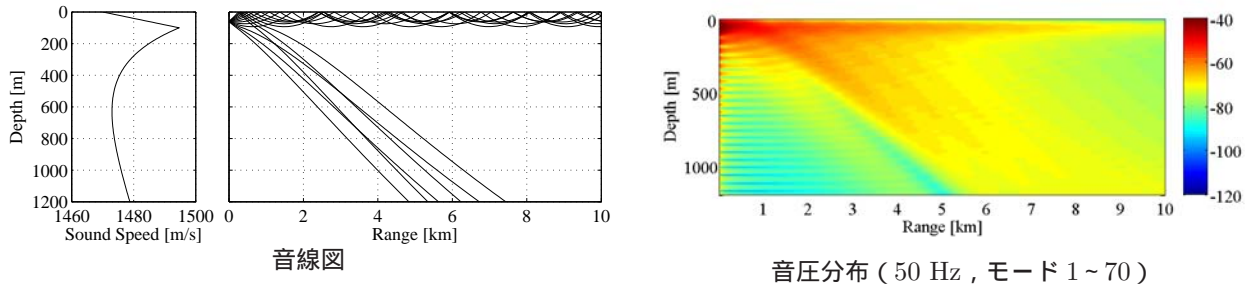


図6 サーフェス・ダクトでの伝搬：音源深度 60 m

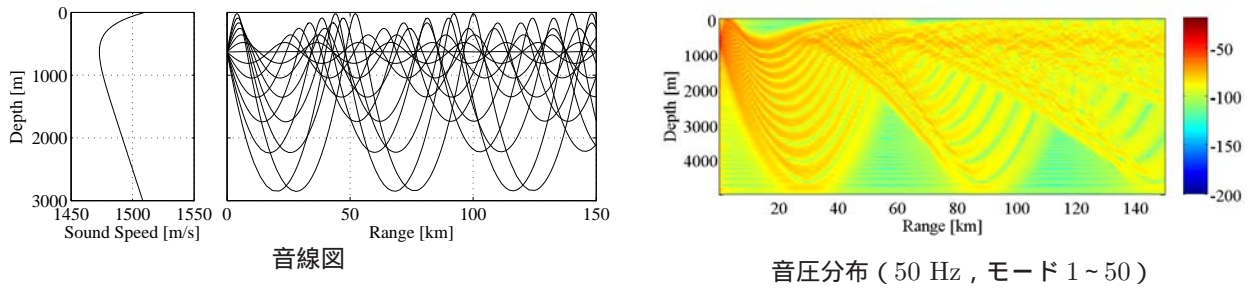


図7 サウンドチャンネルの伝搬：音源深度 630 m

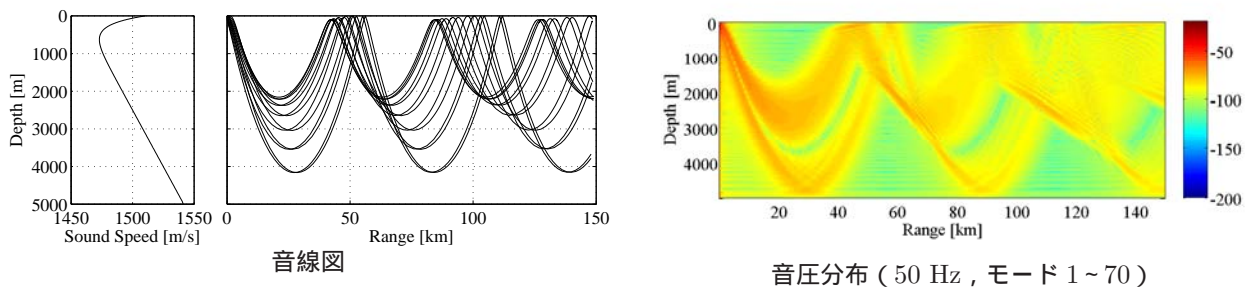


図8 コンバージェンスゾーン：音源深度 100 m

る(図9)。

### 3.6 浅海域における音波伝搬

浅海では、海底と海面の影響が顕著に現れ、深海域とは異なる伝搬となる。日本列島の周辺には、東シナ海のような水深が100~200 m程度の比較的浅い海域が存在している。このような浅い海洋では、数十~数百ヘルツの音波に対して海底や海面の相互作用が強く現れ、海洋は音波に対してウェーブガイド(導波管)となり、音場は深海でそのように単純ではなくなる[16, 17, 18]。

図10に、音源から出た各音線が海面及び海底で反射されながら十分な距離を進んだ場合の音線図及び音圧分布を示す。海底で反射する度にかなりの減衰を受けるので、長距離に及ぶ音波伝搬では大きな音響エネルギーの損失を伴う。

### 3.7 マルチパス(ロイドミラー効果)

広帯域の音源で、音源、受波器ともに境界(海面、海底)に近いところに位置する場合に、音源の近傍では図11に示すような干渉が発生する。これは、音源から受波器に直接

届く音波と境界から反射してくる音波の干渉により、空間的あるいは周波数領域上において信号の強弱が発生するためである。このような伝搬をマルチパス伝搬と呼んでいる。この干渉の状況をスペクトログラムで観測すると、図12のような模様が表示され、音源を特定するための情報として重視されている。

## 4 音波伝搬の模擬技術

ここでは、一般によく用いられている音波伝搬モデルの概要と得失について述べる。

音波伝搬モデルは距離依存モデルと距離非依存モデルとに分類される。距離依存モデルとは、距離(=場所)によって異なる環境条件を模擬できるモデルのことを言う[19]。

海洋の構造から、海洋は深度方向(鉛直方向)には環境条件(音速や境界条件)が変化するが、距離方向(水平方向)への変化は少ないと仮定できる場合が多く、この仮定

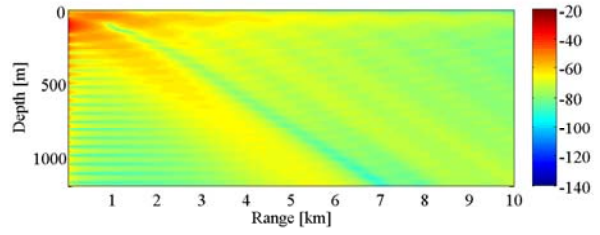
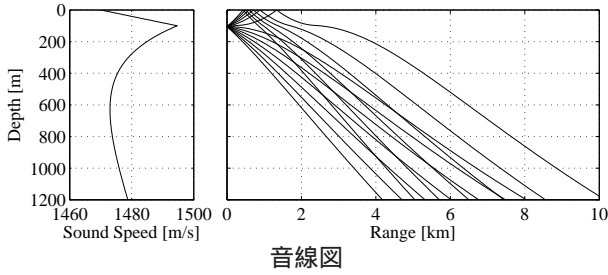


図9 シャドウゾーンの形成：音源深度 100 m，プロットの右上の領域がシャドウ・ゾーンである．

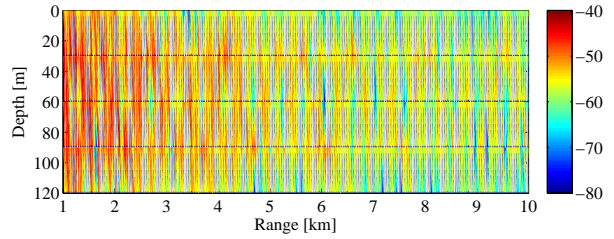
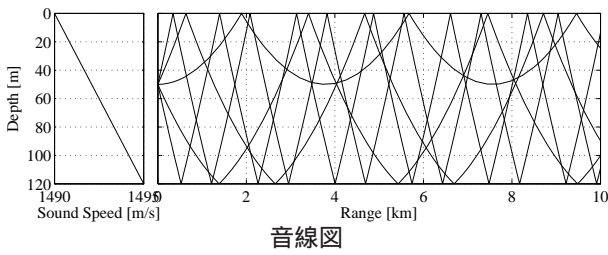


図10 浅海域での伝搬：音源深度 50 m

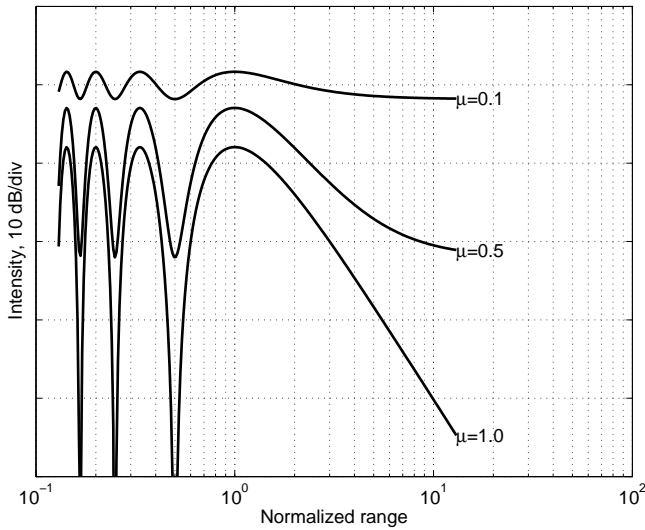


図11 ロイドミラー効果発生時の音圧分布：距離は  $\lambda r / (4d_1 d_2)$  として正規化している。(  $\lambda$  : 音波の波長,  $r$  : 距離,  $d_1, d_2$  : 音源及び受波器の反射面からの距離 (海面反射の場合は深度),  $\mu$  は振幅反射係数)

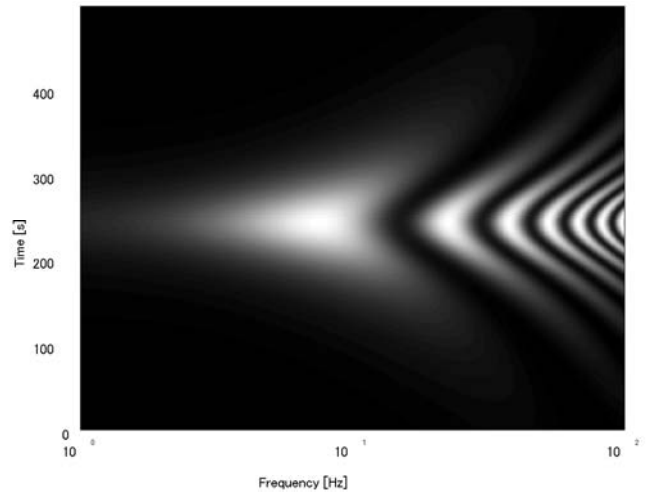


図12 ロイドミラー効果発生時の周波数スペクトラムの時間変化：音源が受波器の近傍 (最近点距離 200 m) を速さ 8 kn で直進, 音源深度 100 m, 受波器深度 100 m, 水中音速 1500 m/s

が成立する場合には距離方向の伝搬を関数で表現することができる。この場合、深度方向の音圧分布を数値計算等で解き、距離方向は高速に演算することが可能となる。しかしながら最近では、現場の要求から、距離方向にも環境条件が変化すると考えなければならない浅海域の音波伝搬模擬の重要性が高まっている。

音波伝搬は波動現象であるので、数学モデルは波動方程

式を出発点とする。波動方程式は次に示す連続方程式 (質量保存則)、運動方程式 (オイラーの運動方程式、ニュートンの第二法則) 及び状態方程式の 3 つの基礎方程式から導出される。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla \cdot \rho \mathbf{v}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p(\rho), \quad (3)$$

$$p = p_0 + \rho' \left[ \frac{\partial p}{\partial \rho} \right]_s + \frac{1}{2} (\rho')^2 \left[ \frac{\partial^2 p}{\partial \rho^2} \right]_s + \dots \quad (4)$$

ここで、 $\rho$  は密度、 $v$  は粒子速度、 $p$  は圧力であり、添え字  $S$  はエントロピー変化がないこと、すなわち外部との熱エネルギーのやり取りのない断熱変化であることを示している。また、

$$c^2 \equiv \left[ \frac{\partial p}{\partial \rho} \right]_S, \quad (5)$$

と置くと、 $c$  は音速を表す。以下に代表的なモデルについて述べる。理論的導出の詳細は文献 [1, 7] 等を参照されたい。

#### 4.1 音線追跡法

音の伝搬をエネルギーの流れの経路（音線）として、幾何学的に表現するのが音線理論である [1]。音線は波面に対して垂直であり、海水が音速、組成、圧力等に関して一定であれば直線となるが、一定でない場合屈折し直線でなくなる。音線理論では、その音速分布をいかに正確に近似できるかが重要である。

SOFAR 内伝搬等の音線を追跡するにあたっては、深度方向の音速分布を線形関数や双曲線余弦関数や屈折率の二乗が放物線となる関数等で近似したものが用いられることもある。このような関数近似を行うと、音線の経路そのものが解析的に表現できるように計算時間の短縮を図ることが可能となる。

一方、任意の音速分布について音線追跡を行う場合、音線の経路を逐次計算する必要がある。円筒座標系  $(r, z)$  では、音線を表す方程式は次のような 1 次微分方程式の形に書ける。

$$\frac{dr}{ds} = c\xi(s), \quad \frac{d\xi}{ds} = -\frac{1}{c^2} \frac{dc}{dr}, \quad (6)$$

$$\frac{dz}{ds} = c\zeta(s), \quad \frac{d\zeta}{ds} = -\frac{1}{c^2} \frac{dc}{dz}, \quad (7)$$

ここで、 $[r(s), z(s)]$  は距離 - 深度平面内の音線の軌跡である。ここで 1 次の微分方程式の形にするために補助変数  $\xi(s)$  と  $\zeta(s)$  を用いた。このとき、曲線  $[r(s), z(s)]$  の接線ベクトルは  $[dr/ds, dz/ds]$  で与えられ、前述の式から、音線の接線ベクトルは  $c[\xi(s), \zeta(s)]$  となる。

この全微分方程式のセットは、数値計算によって解くことができる。図 13 に示すように、初期条件は、音線が音源位置  $(r_s, z_s)$  から、指定された出発角  $\theta$  でスタートすることである。したがって、初期条件は次の式で表すことができる。

$$r = r_s, \quad \xi = \frac{\cos \theta}{c(0)}, \quad (8)$$

$$z = z_s, \quad \zeta = \frac{\sin \theta}{c(0)}. \quad (9)$$

ここで、音源の位置（座標）は与えられる。

屈折率が周波数に無関係と考えれば、音線経路は周波数には無関係となる。現実には、周波数に依存した損失があ

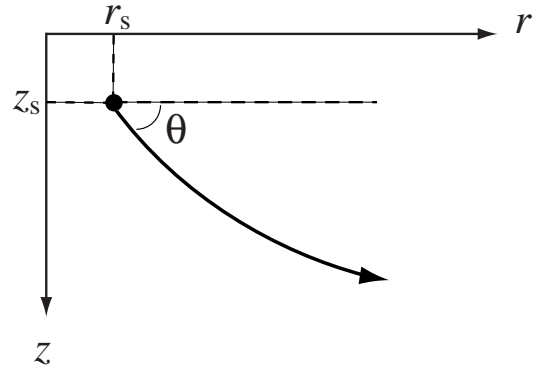


図 13 Schematic of 2-D ray geometry.

り、それは屈折率に虚数項を加えることで考慮することができる。

#### 4.2 ノーマルモード法

ノーマルモード法は、波動方程式の深度  $z$  と距離  $r$  を変数分離して解くもので、距離  $r$ 、深度  $z$  における音圧  $p(r, z)$  は次のように表される。

$$p(r, z) = \frac{i}{4} \sum_{j=1}^{\infty} Z_j(z_s) Z_j(z) H_0^{(1)}(k_j r), \quad (10)$$

$$\approx \frac{ie^{-i\pi/4}}{\sqrt{8\pi r}} \sum_{j=1}^{\infty} Z_j(z_s) Z_j(z) \frac{e^{ik_j r}}{\sqrt{k_j}}. \quad (11)$$

ここで、 $Z_j(z)$  は深度関数と呼ばれ次式を満足する：

$$\frac{d^2 Z_j}{dz^2} + \left( \frac{\omega^2}{c^2(z)} - k_j^2 \right) Z_j = 0, \quad (12)$$

$$Z_j(0) = 0, \quad (13)$$

$$\frac{dZ_j(D)}{dz} = 0. \quad (14)$$

ここで、 $D$  は海底深度、 $j$  はモード番号である。

ノーマルモード法の数値計算には、有限差分法と層分割法等がある。有限差分法は、波動方程式を代数固有値問題として解くものである。その差分方程式を導出するために海洋を深さ方向に  $N$  個の等間隔層に分割するが、その分割幅は、少なくとも音波の波長の 1/10 程度が必要とされる。例えば、200 Hz の音波（音速 1500 m/s）を用いた場合、水深 5000 m の深海域においては約 7000 層程度の多くの層に分割する必要がある。したがって、高周波領域や深海域における解析では、膨大な分割数及び行列計算量となり、かなりの計算時間を要する。さらに、有限差分法の大部分は海底を自由壁として扱い、海底下の影響を考慮できないため、その影響を考慮するには固有値を複素数として扱う必要がある。そうなれば、さらに計算が複雑化し、要する計算時間も長くなる。

一方、層分割法は、海洋の音速を深さ方向に簡単な関数によって近似できる層に分割し、各境界面で音圧、粒子速度連続の境界条件を適用し、固有値問題として解くものである。この手法の最大の利点は、音速近似に関数を用いているため、有限差分法に比べ、分割数が少なくよく、計算時間の短縮が図られるという点である。これらのモデルについては、古くから Pedersen and Gordon [20]、Stickler [21]、Tolstoy [22] などによって研究がなされている。しかし、Pedersen and Gordon の解析モデルでは、海底下の影響を容易に考慮できないため、一般に音速を各層内の屈折率の2乗が直線になると仮定し Airy 関数 [23] を用いて音場を表現する Stickler や Tolstoy のモデルが使われる。これは、海底堆積層内における屈折現象についても容易に加味できるという利点を持つが、計算に非常に高い精度が要求されるため数値計算問題としては扱いにくいものとなる。現在は前者の有限差分法を用いたノーマルモード法が主流として利用されているようである。

#### 4.3 放物型方程式 (PE) 法

放物型方程式法では、波動方程式を進行波と後退波を表す式に分解し、進行波のみを考慮した解法である [24]。反射波は考慮できないが進行波に関する計算精度は高く、計算量は比較的少なく波動モデルとしては高速な部類に分類され、伝搬解析に広く利用されている。また最近では、弾性体中を伝搬する横波を考慮したモデルが開発され、北極海など氷に覆われた海域における音波伝搬が計算されている [25]。

#### 4.4 時間領域差分 (FDTD) 法

空間を波長の数分の一のメッシュに分割し、メッシュの格子点とその間について粒子速度と圧力を逐次計算する方式で、連続の式と運動方程式を差分化している [26]。

物理現象を直接的にモデル化し、それを時々刻々と解いていくもので、計算量、必要メモリ量ともに莫大である。安定条件を満足するためにメッシュの大きさの上限があるため、現状では劇的な高速化は望めず、また、狭い領域（浅海域で伝搬距離が数キロメートル程度）を対象としたものとならざるを得ない。一方、対象空間の全領域について時間領域での計算を行うため、物理現象の時間変化や帯域を有する信号の伝搬（パルスの伝搬の様子）を解析するのに適している [27]。

最近では、スーパーコンピュータや PC クラスタを利用して規模の大きな問題を解く取り組みが行われているが [28]、計算機の規模が大きくなることから、コスト、ハードウェアの信頼性、消費電力等の観点から、訓練装置での利用には解決すべき課題は多い。

## 5 訓練装置における水中音響の模擬

弊社は長年に亘り水中音響に関わる訓練装置を製造してきた [29]。弊社の訓練装置における水中音響模擬技術の利用例を図 14 に示す。本装置は搭乗員訓練に活用されているものである。

訓練装置で水中音響を模擬する場合に留意すべき点は以下のとおりである。

- リアルタイム性
- 結果予測性（シナリオの組み立て易さ、評価し易さ）
- リアリティ（現実らしさ）
- 操作性（制御性、入力パラメータと出力の因果関係の分かり易さ）
- アベイラビリティ（可用性）

### 5.1 リアルタイム性

リアルタイムの訓練環境や反応を提供しなければならない訓練装置において、リアルタイム性の確保が必要であることは言うまでもない。音波伝搬や反射・散乱については大学や研究機関において多くの研究がなされているが、訓練装置等に利用可能なリアルタイムに結果を出すようなモデルに関する研究については発表の例があまり見られない。

訓練装置では、複数の目標と多数の受波器の組み合わせから成る膨大な量の計算を、限られた時間の中で行う必要がある。このために、数学モデルの近似やパラメータの端折りと計算精度のトレードオフを行って処理を実装する。訓練装置の設計にあたっては、装置の目的に応じて精度と計算時間/速度のバランスを取ることが必要である。

### 5.2 結果予測性

訓練装置はクルーの訓練に利用されるわけであるが、ここでは、教官による結果予測性が必要である。音源と受波器が一定の位置関係になったら信号が受波できるようになること/受波できなくなることがわかることで、訓練シナリオが組み立てやすくなり、訓練生の評価もやり易くなる。

### 5.3 リアリティ

訓練装置（シミュレータ）としては当たり前のことであるが、実場面を模擬したシナリオを設定した場合に、その実場面によく似た受波状況を提供できることが、訓練効果を高めることにつながる。

### 5.4 操作性

ここでいう操作性とは機器操作性のことではなく、入力パラメータの変更による結果の変化の分かり易さ — 入出力の因果関係の分かり易さである。訓練装置では、これこれこういう状況を作り出したいという要求がよくあるが、これに答えられる装置である必要がある。A という結果を

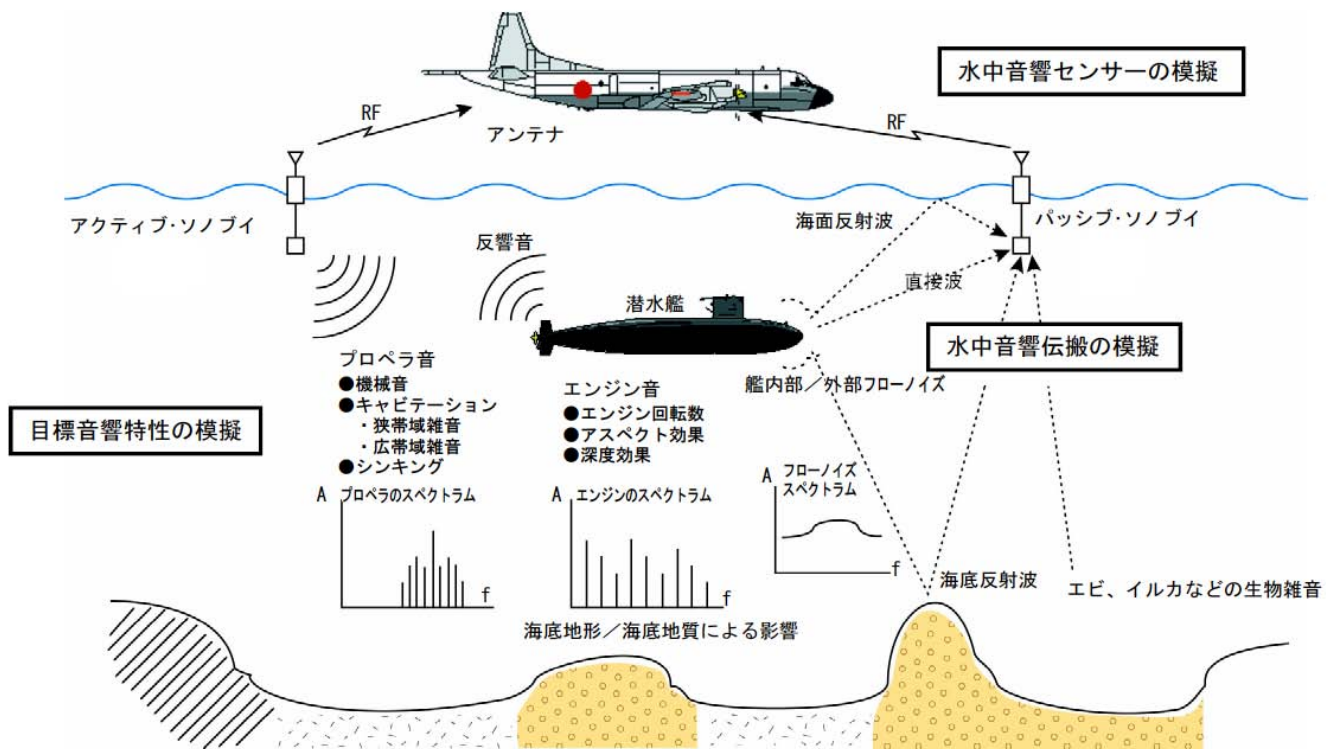


図 14 訓練装置における水中音響模擬技術の利用例

出したいときには、パラメータ B をどちらへ振ればよいのか、モデルの詳細さと相反する命題となりがちであるが、現場で必要とされる事項である。

### 5.5 アベイラビリティ (可用性)

訓練装置では、必要な訓練所要を満たすためには相応の可用性 (信頼性、障害が発生しにくく復旧しやすい) が必要となる。一般に、装置の規模が大きくなると信頼性は低下する傾向となるので、水中音響模擬には大きな計算機リソース (演算能力、記憶容量等) が必要となることから、性能実現のために大規模なハードウェアを利用する場合には注意が必要である。

## 6 最後に

水中音響模擬技術、特に音波伝搬の技術動向について概観を示した。今後、計算機の性能向上と小型化に伴い、よりいっそう精度が高く、対象領域の制約のない模擬が可能となり、近似や端折り無しで、ほぼ厳密解に近い結果が得られる訓練装置の登場が期待される。

### 参考文献

[1] 海洋音響の基礎と応用, 海洋音響学会編, 成山道書店, 東京, 2004  
 [2] Robert J. Urick, 土屋 明 訳, 水中音響の原理, 共立出

版, 東京, 1978

[3] Robert J. Urick, Principles of Underwater Sound, 3rd Edition, McGraw-Hill Book Company, New York, 1967  
 [4] Richard O. Nielsen, Sonar Signal Processing, Artech House, Boston, 1990  
 [5] Xavier Lurton, An Introduction to Underwater Coustics: Principles and Application, Praxis Publishing, Chichester, UK, 2002  
 [6] Walter Munk, Peter Worcester and Carl Wunsch, Ocean Acoustic Tomography, Cambridge University Press, New York, 1995,  
 [7] F. B. Jensen, W. A. Kuperman, M. B. Porter and H. Schmidt, Computational Ocean Acoustics, AIP, 1994.  
 [8] K. Futa, N. Takahashi, T. Tsuchiya, and T. Kikuchi, Normal mode analysis of effect of sound speed microstructure on sound propagation in the ocean, Proc. Fifth European Conf. on Underwater Acoust. (ECUA2000), pp.1353-1358 (2000.7)  
 [9] K. Futa, N. Takahashi, T. Kikuchi and T. Tsuchiya, "The effect of layered sound speed microstructure on received pulses in ocean acoustic tomography," Proc.

- Seventh Western Pacific Regional Acoust. Conf. (WESTPRAC VII)* pp.1223-1226 (2000.10).
- [10] K. Futa, K. Ando, T. Kikuchi and T. Tsuchiya, "Effect of Surface Duct on Pulses Propagating in a Sound Channel in the Ocean," *Jpn. J. Appl. Phys.*, 40 (5B) pp.3807-3810 (2001).
- [11] 布田, 菊池, 土屋, SOFAR 伝搬パルスに対する海面ダクトの影響のノーマルモード解析, 日本音響学会 2001 年春季研究発表会 講演論文集, pp.1063-1064 (2001.3).
- [12] 布田, 菊池, 土屋, サーフェスダクトによるノーマルモード深度関数の変化について, 海洋音響学会 2001 年度研究発表会 講演論文集, pp.87-90 (2001.5).
- [13] K. Futa, T. Tsuchiya, and T. Kikuchi, Effect of sound speed structure near ocean surface on pulses propagating in deep sound channel in the ocean, *Proc. Sixth European Conf. on Underwater Acoust. (ECUA'2002)*, pp.375-380 (2002.7).
- [14] K. Futa, T. Tsuchiya and T. Kikuchi, "Relationship between Sound Speed Structure near Ocean Surface and Pulses Propagating in Deep Sound Channel in the Ocean," *Jpn. J. Appl. Phys.* 41 (5B) pp.3519-3524 (2002).
- [15] K. Futa, T. Tsuchiya and T. Kikuchi, "The effect of the axial sound speed structure on late pulses in ocean acoustic tomography," In *Proc. The Eighth Western Pacific Acoustics Conference (WESPAC8)* (2003.4).
- [16] K. Futa and T. Kikuchi, "Finite difference time domain analysis of bottom effect on sound propagation in shallow water," *Acoust. Sci. Tech.* 22 (4) pp.303-305 (2001).
- [17] 飯島, 土屋, 遠藤, 土屋, "FDTD 法による海洋内音波伝搬の数値解析", 平成 11 年度海洋音響学会研究発表会 講演論文集, pp.107-110 (1999).
- [18] 飯島, 土屋, 遠藤, "FDTD 法による海洋内音波伝搬の数値解析 (1)", 日本音響学会 平成 11 年 講演論文集, pp.1155-1156 (1999).
- [19] 安藤, 菊池, 布田, "音速プロファイルが水平方向に変動する海域の固有音線について", 海洋音響学会誌 28 (2), pp.101-108 (2001).
- [20] M. A. Pedersen and D. F. Gordon, "Normal-mode theory applied to short-range propagation in an underwater acoustic surface duct," *J. Acoust. Soc. Am.*, 37 (1), pp.101-118, 1965.
- [21] D. C. Stickler, "Normal-mode program with both the discrete and branch line contributions," *J. Acoust. Soc. Am.*, 57 (4), pp.856-861, 1975.
- [22] I. Tolstoy and C. S. Clay, *Ocean Acoustics – Theory and Experiment in Underwater Sound*, Chap. 3, pp.85-93, American Institute of Physics Inc., New York, 2nd edition, 1987.
- [23] M. Abramowitz and I. A. Stegun, *Handbook of Mathematical Functions*, Chap. 10, pp.446-454, Dover publications Inc., New York, 1970.
- [24] 土屋, 松本, 高橋, 穴田, 遠藤, "放物型方程式法に基づく海洋音波伝搬解析手法の開発", 海洋音響学会誌, 35 (4), pp.255-267 (2008).
- [25] 土屋, 松本, 穴田, 遠藤, "北極海での音波伝搬特性に氷の横波が与える影響", 海洋音響学会誌, 34 (3), pp.157-166 (2007).
- [26] 橋本, 阿部, FDTD 時間領域差分法入門, 森北出版, 東京, 1996.
- [27] 佐藤, 宮崎, 森, 中村, 水谷, "アプラナート音響レンズの集束特性", 海洋音響学会誌, 35 (3), pp.157-165 (2008).
- [28] 小川, 山田, 高橋, 土屋, 遠藤, "スーパーコンピュータを用いた時間領域差分法音波伝搬解析プログラムの高速化", 海洋音響学会誌, 35 (3), pp.147-156 (2008).
- [29] 布田, "模擬水中音発生技術を用いたアクティブソーナー訓練装置", 海洋音響学会誌 23 (1), pp.36-39 (1996).

#### [執筆者紹介]



布田浩二 略歴

1986 年入社, 主に海上自衛隊向け訓練装置の開発に従事, 現在, シミュレーションシステム第一部防衛システム課

# 広領域地形モデルの生成と表示技術

若林 知行, 川上 隆行

近年, 航空機関連の訓練シミュレータや研究開発用シミュレータは, 離着陸の操縦訓練のみでなく探索等の任務遂行訓練を行うミッションリハーサルの需要も高まっており, 航行範囲に比例して模擬領域の広域化が求められている. 模擬領域の広域化に比例して地形モデルのデータ容量が膨大となるため, 国土数値情報等のデジタルデータに基づいて地形標高データや詳細度の異なる地形モデルを自動的かつリアルタイムに生成し表示してゆく必要がある. 今回, 地形モデルの生成時に発生する不連続面及びポッピングの問題を解決した効率の良い広領域地形モデルの生成と表示技術を開発したので以下に報告する.

## 1 まえがき

航空機シミュレータの有用性が認識されるにつれ, より現実に即した訓練が要求されるようになり, 映像に関しても実景に近い模擬が求められるようになってきている. また, 離着陸の操縦訓練のみでなく探索等の任務遂行訓練をおこなうミッションリハーサルの需要も高まっており, この場合は航行範囲に比例して模擬領域の広域化が求められる. 初期には, 東西約 100Km, 南北約 100Km の模擬領域 (1つの県相当) が標準であったが, 最近では東西約 1000Km, 南北約 500Km (西日本全土) へと広域化が進んでいる. 当社は, これらの要求に対し, 高性能グラフィックボードを搭載した汎用 PC に自社開発のソフトウェアをインストールした模擬視界発生装置 DiaSceneIG-95 を製品化することで応えてきた. 近年, 輸送機や哨戒機の航行範囲はさらに遠方へと伸び, シミュレータデータベースの広域化要求は, 日本全土ないしは世界レベルへとますます高まりつつある.

従来の地形モデルの生成及び表示方法は, オフラインで事前に凸多面体の集合で構成する詳細度 (LOD:Level of Detail) の異なる複数のモデルデータベースを用意し, メインメモリに格納した上で, これらを視点との距離に応じて, 近距離では詳細度の高いモデルを, 遠距離では詳細度の低いモデルを表示するように制御していた.

広領域模擬視界発生装置では, 模擬領域の広域化に比例して地形モデルのデータ容量が膨大となるため, メインメモリへのモデルデータの事前格納が困難となり, 国土数値情報等のデジタルデータにもとづいて地形標高データや詳細度の異なる地形モデルを自動的かつリアルタイムに生成し表示してゆく必要がある. この際, 三角形の集合体として地形モデルを生成する詳細度の異なるモデル領域同士の間において不連続面が発生する問題や, 詳細度の異なるモデルへ切り替わる際にステップ的に形状が変化する

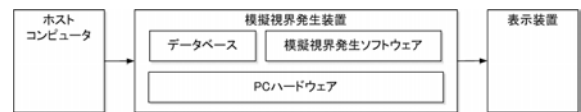


図1 模擬視界発生装置構成

ポッピングが発生する問題があり, 広領域模擬視界を実現するためにはこれらの問題を解決する必要があった. 今回三角形への分割プロセスにおいてその影響が及ぶ範囲を考慮した独自の三角形分割アルゴリズム [1,2] を使用し, 不連続面及びポッピングの発生が無い効率の良い地形モデルの生成と表示技術を開発した. その結果, 実時間で東西約 3000Km, 南北約 3000Km(日本全国) を連続飛行することが可能となった. 本論文では, その地形モデルの生成と表示技術について報告する.

## 2 DiaSceneIG-95 の地形モデル生成及び表示方法

DiaSceneIG-95 は図 1 に示すように, 地形データ, 建物データや移動物体データを格納したデータベースと模擬視界発生用ソフトウェアが PC ハードウェア上に実装された構成となっている. DiaSceneIG-95 の地形モデルは, 図 2 に示すように地形データベース作成ツールを使用し, 国土数値情報等のデジタルデータから凸多面体の集合で構成する LOD の異なる複数の地形モデルをオフラインで生成する. その地形モデルデータベースをメインメモリに格納し, これらを視点との距離に応じて, 近距離では詳細度の高いモデルを, 遠距離では詳細度の低いモデルを表示するように制御していた. オンラインでの処理は効率的であるが, 模擬領域が広領域になるに従い地形モデルのメモリ容量が膨大となる欠点がある.

## 3 広領域模擬視界発生装置の構成

広領域模擬視界発生装置も DiaSceneIG-95 と同様図 1 に示すように, データベースと模擬視界発生用ソフトウェア

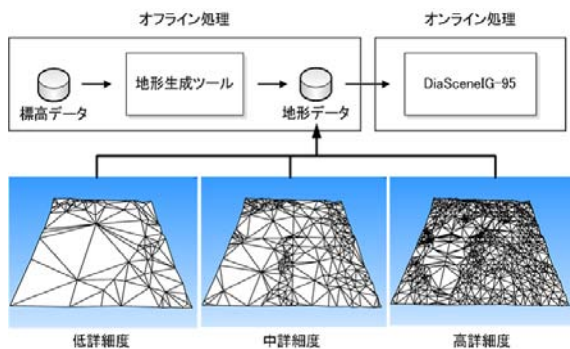


図 2 DiaSceneIG-95 の地形生成処理:オフラインで地形生成ツールを使用してい LOD の異なる複数の地形モデルを生成する。

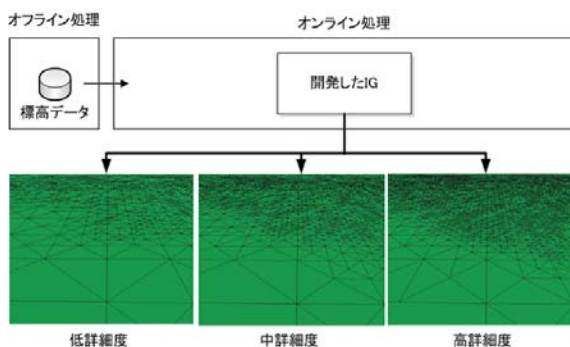


図 3 開発した PCIG の地形生成処理:リアルタイムで標高データから詳細度の異なる地形モデルを自動的に生成する。

が PC ハードウェア上に実装された構成となっている。地形モデルの生成と表示は、図 3 に示すように国土数値情報等のデジタルデータにもとづく地形標高データから詳細度の異なる地形モデルを自動的にかつリアルタイムに生成し表示する。模擬視界発生ソフトウェアは、ホストから送信されてくる視点位置に基づいて、対応する視野内の地形モデル、移動物体モデルを選択し、これらをデータベースから読み出し、所定の処理を施した上で表示装置へ送信する働きをする。この中で、地形モデル表示は視点移動に追従して連続的に変化していくため最も容量が大きく、リアルタイム性を確保する観点から図 4 に示した工程を通して処理される。

- (1) 次のシーンで視野内に入ってくる地形部分をメモリ上に読み込み、次段で視野から消えていく地形部分を消去する置換プロセスをリアルタイムにバックグラウンドで実行するリトリブ処理
- (2) 視点位置と視野角に基づき地形モデル内における表示領域を設定するクリッピング処理
- (3) 表示領域の中を視点位置からの距離に基づき、詳細度の異なるポリゴン群で自動的に分割表示するレベリング

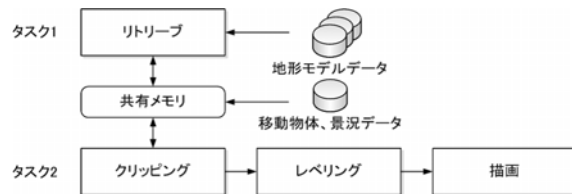


図 4 模擬視界発生装置の処理:2つのタスクから構成され、並列処理を行う。データの受け渡しは共有メモリを介して行う。

## グ処理

- (4) 地球の丸みを考慮した地形表示を行うための座標変換処理

先述の 2 つの問題点は、これらの工程の内レベリング処理に係わるものである。

## 4 レベリング処理による地形の表示

画面全域に渡って高精細な映像をリアルタイムに発生させることは模擬視界発生装置の負荷を著しく高くすることになり実現が難しい。そこでオーバーロードを防ぐ手法として、物体や地形に関し、視点からの距離や起伏の変化率に応じて、距離の近い部分や起伏の激しい部分は LOD の高いモデル(小さなポリゴン)で、遠い部分や起伏のなだらかな部分は LOD の低いモデル(大きなポリゴン)で表示するようにし、視点の移動に伴って、LOD を切り替えていく手法がとられる。しかし、この手法については以下の課題がある。

1. 地形のように連続した領域を LOD の高いモデル領域と LOD の低いモデル領域とで表示した際、詳細度の異なるモデル領域同士の境界面において図 5 に示すような不連続面が発生する場合がある(場所的不連続性)
2. 詳細度の異なるモデルへ切り替える際にステップ的に形状が変化するため映像が不連続に変化するポッピングが発生する(時間的不連続性)。

課題 1 と 2 を同時に解決する手法として開発した当社のアルゴリズムを従来法と比較して以下に報告する。

## 5 基本的なポリゴン分割アルゴリズム

地形データを例として従来のアプローチを詳述する。図 6 に示すように模擬領域を経度方向と緯度方向で所定単位ピッチに分割し、単位ブロックの配列として定義する。各ブロックの中は  $n \times n$  のグリッドで構成される碁盤目の座標を付与されており、各グリッドは地図データに従って、それぞれ標高値を持っている。上記のブロックを三角形ポリゴンで分割していく事で、大きな三角形で表示する部分



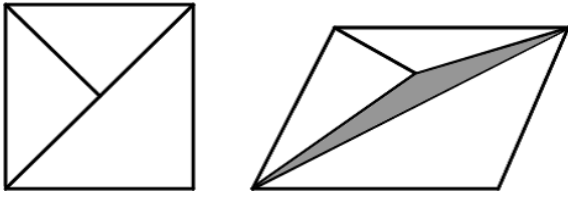


図5 不連続面の発生：詳細度の異なるモデル領域同士の境界面において不連続面が発生する。

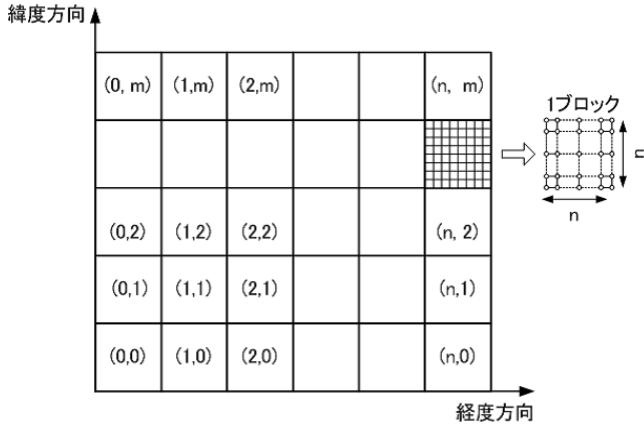


図6 模擬領域のブロック配列：模擬領域を緯度，経度方向の配列に分割し，その配列の一要素が1ブロックとなる。

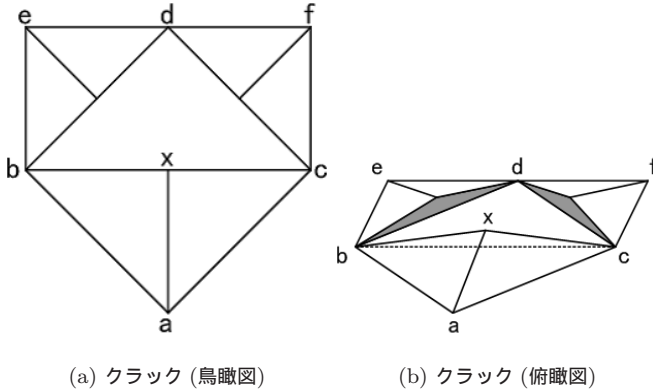


図7 三角形化によるクラック：隣接する三角形の誤差判定に無関係のため，境界部分にクラックを生じる場合がある。

(地形起伏の変化が少なく標高値の類似したグリッドが連なる部分)や細かな三角形で表示する部分(地形起伏の変化が激しく，グリッドの標高値変化が大きな部分)を自動的に仕分けしていく。仕分けの判定基準として，視点からの距離に比例した比較値(遠方ほど大)が設定される。図7(a)は，自動分割の途中を示したものである。三角形 abc で囲まれる領域内の標高値は a,b,c 各点の標高値を頂点に持つ三角形の平面上の点として一次近似できる。この一次近似の値と実際の標高値との差を誤差と定義したとき，この誤

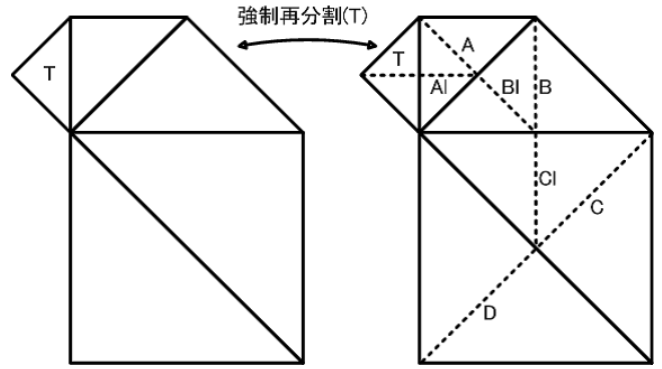


図8 三角形の強制再分割：三角形 T の分割に際し斜辺を共有する三角形が未分割の場合，クラックを生じないように強制的に分割する。この操作 A-B-C-D-CI-BI-AI の順に分割処理を行う。

差の最大値が比較値以上である場合は，三角形 abc が作る平面で対象領域を表すことは不適切と判断し，三角形 axb と三角形 axc とにさらに分割される。上記誤差の最大値が比較値以下になった時に，対象領域内は一つの平面で近似しても良いと判断し，分割が終了する。こうして起伏の単調な地形は大きな三角形で，起伏の激しい地形は小さい三角形で模擬することができる。また，距離に比例した比較値との対比で分割判定されるため，視点から遠方は大きな三角形で，視点の近くは小さな三角形で詳細に模擬されることとなる。しかし，上記の再帰的分割法では，図7(b)に示すような不連続面(クラック)が発生する場合がある。図において三角形 abc では，誤差最大値が比較値以上であった(起伏の激しい部分が含まれていた)ため三角形 axb と三角形 axc に分割されたが，三角形 dbc では誤差最大値が比較値以下であった(起伏が単調であった)ため，さらなる分割はされず，結果として直線 bc と折れ線 bxc (直線 bx と直線 xc とから構成)との間に不連続が生じている。

この欠点を補う方法として提案されたのが ROAM 法 (Realtime Optimally-Adapting Meshes)[3,4] である。この方法は上記の再帰的分割法で，三角形の一边が分割された場合，同辺を共有する三角形は強制的に分割するという条件をアルゴリズムに付与するものである。この方法によれば一方の三角形で分割された辺が他方の三角形で分割されないという不具合は解決されるが，図8に示すように，強制的な分割が周辺の三角形まで影響を及ぼすため，模擬領域全域の分割処理が終了するまで，最終的な分割形態が定まらないという問題がある。三角形の分割度合が視点移動に伴って切り替わる際の映像の不連続性(ポッピング)を解決する手段として，メタモルフォーミングプロセスについて後述するが，同プロセスは，リアルタイム性を確保するため，上記のブロック分割プロセスと平行に動作

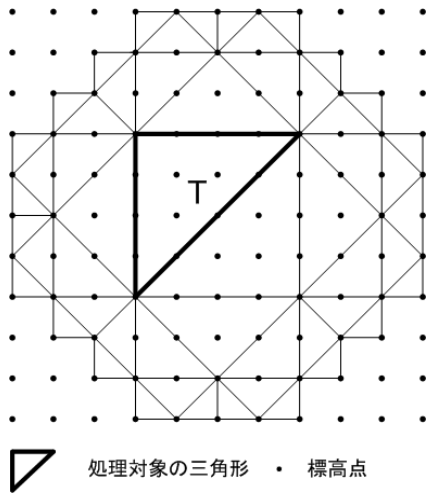


図9 地形三角形化誤差の評価範囲：図10の評価方法を分割できなくなるまで再帰的に適用することで、クラックを生じないための評価範囲が求まる。

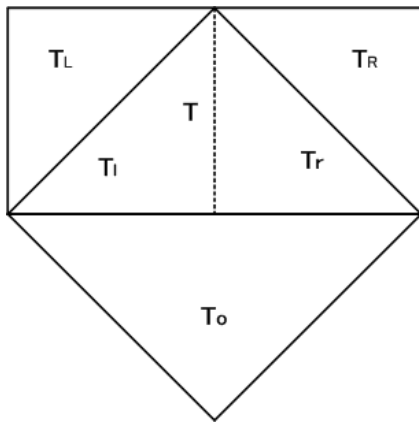


図10 三角形の定義：三角形Tにクラックを生じないためには、内部の三角形 $T_r, T_l$ のみではなく、周囲の三角形 $T_o, T_R, T_L$ を評価する必要がある。

させる必要がある。しかし、模擬領域全域の分割処理の終了を待たねばならないROAM法においてはパラレル動作は不可能である。

## 6 開発したポリゴン分割アルゴリズム

### 6.1 最大誤差に基づくエリア限定型分割

当社のポリゴン分割アルゴリズムの特徴は、三角形ポリゴンの再帰的分割プロセスの前段に、対象とする三角形が分割されたと仮定した際に、その影響が及ぶ範囲を算出するプロセスを組み込んだ点にある。

図9に示した三角形Tの分割を考える。まず三角形Tが分割されたと仮定すると、ROAM法と同様のアルゴリズムに従って隣接三角形の強制分割を行った際にその影響がどこまで及ぶかは、幾何学的に簡単に把握することができる。図中Tの周りの三角形群で記載した部分はその影響下にある領域である。プログラム上で同様の操作を記述する

と次のようになる[1,2]。図10のようにいま分割を考えている三角形をTとし、その三角形に外接する三角形で斜辺を共有するものを $T_o$ 、直角をはさむ辺を斜辺とする三角形を $T_R, T_L$ とする。Tを直角から斜辺に下ろした垂線で二等分してできる三角形を $T_r, T_l$ とする。 $error(T)$ をT内の格子点における標高とT平面との差の最大値とする。三角形Tの地形三角形化誤差 $e(T)$ を次式で定義する。

$$e(T) = MAX\{er(T_o), er(T)\} \quad (1)$$

$$er(T) = MAX\{er(T_R), er(T_L), err(T)\} \quad (2)$$

$$err(T) = MAX\{err(T_r), err(T_l), error(T)\} \quad (3)$$

MAXは{ }の数値の内、大きい数値を選択する関数

$er(T)=err(T)=0$ となる最小三角形に至るまで上記計算を再帰的に繰り返すことで分割の影響が及ぶ範囲を算出できる。加えて、この影響範囲内での最大誤差および三角形Tが分割された際のクラックの発生しない分割パターンも同時に決定されることとなる。こうして、影響の及ぶ範囲が決定されたことを受けて、三角形Tを実際に分割すべきか否かの判定を行うステップへと移る。ROAM法では個々の三角形について逐次誤差と比較値とを比べて判定を進めていくが、当社アルゴリズム[1,2]においては、上記の分割ルーチンの逆問題として、影響範囲下にある三角形のいずれかが分割されると、その影響はかならず三角形Tの分割に繋がることが容易にわかっているため、影響範囲内での最大誤差を代表値として比較値と比べる事で三角形Tの分割、非分割を決定でき、計算済みの分割パターンから影響範囲内におけるクラックの無い三角形分割形態を即時決定できる事となる。結果として従来アプローチより極めて効率的に、ブロックの三角形分割を実行することが可能となる。また、分割の影響範囲が決定されているため、影響を受けないことが判明した領域に関しては、メタモルフォーミングプロセスをパラレルに走らせることが可能となる。

### 6.2 見込み角誤差によるメタモルフォーミング

上記のアルゴリズムに従って、視点の移動にともなってLODを切り替える際、図11に示すように、分割度合いのことなる三角形が瞬時に入れ替わるため、映像が不連続に変化してしまう。これを防ぐ目的で2つの分割形態の間に遷移状態を設け、補間処理による中間的な形状を生成することで滑らかな変化を実現するメタモルフォーミング処理を行っている。ここで視点からの距離を基準に補間を行うと、図13に示すように視点の移動に伴って、標高差の大きな変化をとともなう補間と標高差の小さな変化をとともなう補



図 11 地形分割のポッピング：モデル切り替え境界にて形状が突然変化する。

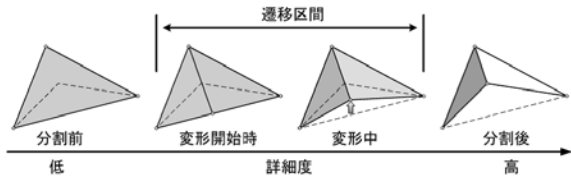


図 12 地形分割時のメタモルフォーミング：遷移区間で形状が滑らかに変化する。

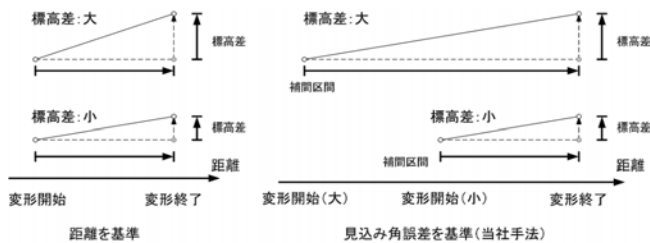


図 13 メタモルフォーミング補間方法による違い：

間とが同時に起こるため（変化ステップが場所により異なるため）地形の変化に違和感を生じてしまう．これを防ぐ観点から，見込み角誤差を基準に補間を行うアルゴリズムとした．このアルゴリズムでは，標高差の大きな変化の補間は標高差の小さな変化を伴う補間より手前の時点から補間がスタートし，より時間をかけて変化していくため標高差の小さな変化を伴う補間と違和感なく進行し，より自然な変形を実現できる．

## 7 PCIG での地形モデルの生成と表示

地形モデルの生成，表示アルゴリズムで生成した地形モデルの映像例を図 14 及び図 15 に示す．この映像は，阿蘇山近辺と富士山近辺を約 200m ピッチの標高データで表示した映像である．遠方または起伏の少ない地形を大きな三角形の集合体で模擬し，視点の近くまたは起伏の激しい地形を小さな三角形の集合体で模擬できる．

## 8 むすび

今回，広領域の模擬視界発生装置に要求される地形モデルの生成及び表示方法について報告した．PCIG 上での広領域の地形モデルの効率的な発生方法に関して基本的なアルゴリズムと実時間での表示を確認することができた．地形モデルの生成及び表示方法について従来の模擬視界発生

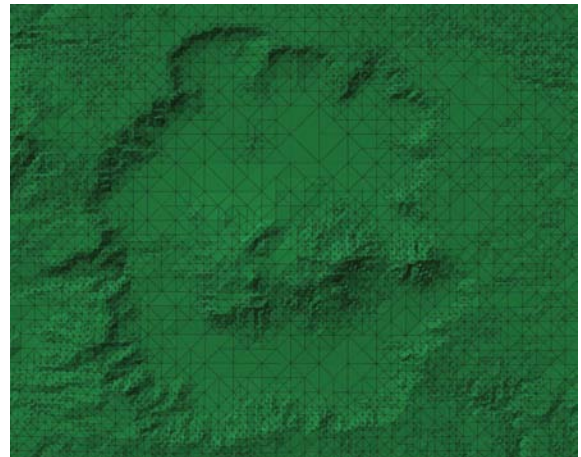


図 14 地形模擬（俯瞰図）：高度約 30000m から阿蘇山を俯瞰．約 19000 ポリゴン表示．

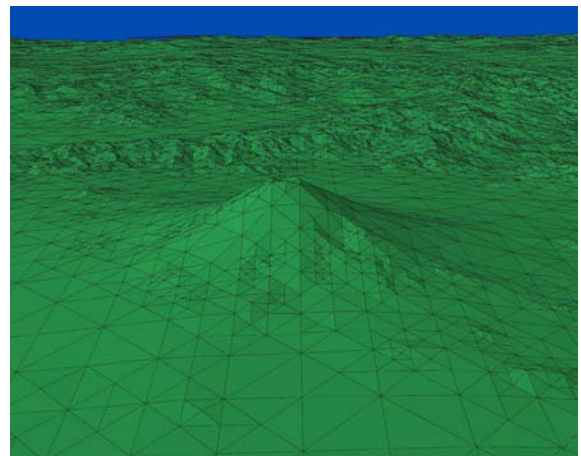


図 15 地形模擬（鳥瞰図）：高度約 9000m から富士山を鳥瞰．約 24000 ポリゴン表示．

装置 (DiaSceneIG-95) との比較を表 1 に示す．この技術は，航続距離が長く航空救難などに対処する救難ヘリコプターや潜水艦の探知と周辺海域の警戒監視・哨戒，遭難船舶の搜索等の多様な任務を行う哨戒機の模擬視界発生装置に適用する予定である．今後，以下の項目について開発を行い，本装置の機能の拡張を図る予定である．

- 広領域のテクスチャ
- 地形と地物の自動合成
- 3次元海面波
- 赤外線模擬
- データベースの作成効率化

また，近年 CPU 及び GPU の性能向上にはめざましいものがあり，特に GPU では H/W に次々と新しい技術が実装され，これに伴い新しい模擬手法が考案されている．今後これらの技術を活用し，より訓練効果の高い，より実環境に近い模擬が可能な模擬視界発生装置の開発を行っていく．

表 1 地形モデルの生成と表示比較表

項目	DiaSceneIG-95	開発した PCIG
訓練目的	操縦	救難，輸送，哨戒
模擬範囲	日本の一部地方 例:約 700Km 四方	日本全国 約 3000Km 四方
データベース容量	日本全国 約 920Mb	日本全国 約 220Mb
地形モデル生成	事前生成	リアルタイム生成
地球の丸み模擬	無	有
リトリーブ機能	無	有
更新レート	60Hz	60Hz
使用 CPU(コア数)	1	4

## 参考文献

- [1] 梶原，緒方，藤野：“次世代ビジュアル・システムのアルゴリズム，アーキテクチャ”三菱プレジジョン技報 Vol.1 pp.70-77(May.1992)
- [2] 梶原：“実時間シミュレータ用地形モデルの生成と表示の方法”第 14 回シミュレーション・テクノロジー・コンファレンス Sess. 7-13(1995)
- [3] Duchaineau, Wolinsky, Sigeti, Miller, Aldrich, Mineev-Weinstein：“ROAMing Terrain: Real-time Optimally Adapting Meshes, <https://graphics.llnl.gov/ROAM/roam.pdf>”，1997
- [4] Turner：“Real-Time Dynamic Level of Detail Terrain Rendering with ROAM, [http://www.gamasutra.com/view/feature/3188/realtime\\_dynamic\\_level\\_of\\_detail\\_.php](http://www.gamasutra.com/view/feature/3188/realtime_dynamic_level_of_detail_.php)”，2000

## [執筆者紹介]



### 若林 知行 略歴

1989 年入社，主に実時間コンピュータグラフィックスの関連の製品開発に従事，現在，技術開発部映像自動合成システムグループ所属



### 川上 隆行 略歴

2001 年入社，主に実時間コンピュータグラフィックスのソフトウェア開発に従事．現在，技術開発部映像自動合成システムグループ所属

# シミュレータ用電動コントロールローディング装置

齊藤 邦彦, 齋藤 匡央

航空機操縦訓練用シミュレータには、パイロットが操縦装置を操作したときに手や足に伝わる反力を模擬する反力模擬装置（コントロールローディング装置）が必要である。訓練用シミュレータの操縦席は動揺装置上に組み込まれることもありコントロールローディング装置は、小型軽量化が望まれる。ここでは、減速機付きモータを使用し、当社従来製品比、体積 36 %、重量 53 % の小型、軽量の電動コントロールローディング装置を開発し、訓練用シミュレータに適用したので、その概要について述べる。

## 1 まえがき

航空機操縦訓練用シミュレータは、基本的な操縦訓練のほか機体の故障等非常時や緊急時の訓練、各種研究等様々な用途に用いられる。このため、実機と同様の操縦感覚が求められる。この操縦感覚を模擬する装置をコントロールローディング装置という。動力源は従来の油圧に代わり現在では電気が主流になっており、電動コントロールローディング装置（以下、電動 C/L<sup>\*1</sup>）と呼ばれる。当社はこれまで、航空機の操縦桿やペダル等の操縦装置や自動車のステアリングやブレーキ、アクセルといった運転装置の電動 C/L を製造し、各種シミュレータに適用してきた。この中で航空機用 C/L は、ボールねじによる直線駆動アクチュエータ（リニア方式）であるため装置の構造、重量とも大きく、部品点数も多く改善が必要であった。近年、制御用計算機の処理速度、サーボモータの性能、減速機の精度の向上により、これまで模擬精度に課題のあった遊星ギア減速機が適用可能となり、今回、遊星ギア減速機を用いた回転駆動アクチュエータ（ロータリ方式）を採用し、部品点数の少ない小型の電動 C/L を開発した。本装置を用いることにより設置スペースの少ない小型の汎用シミュレータにも適用可能となったので、この内容について報告する。

## 2 電動 C/L の概要と方式

電動 C/L は、制御装置、擬似反力を発生するローディングユニット（以下、L/U<sup>\*2</sup>）及び接続ケーブルから構成される。リニア方式電動 C/L の、シミュレータへの組み込み例を図 1 に示す。

制御装置は、擬似反力演算処理、電源制御、動作状態のモニタ等の機能を持ち、制御計算機、パワーコントロールユニット、ロードセル用アンプ、モータ用アンプから構成される。訓練パイロットが操縦操作を行う操縦装置と L/U

間はリンク機構により接続され、L/U で発生した擬似反力が伝わる仕組みである。電動 C/L の制御ブロック図を図 2 に示す。

訓練パイロットが操縦操作を行うと操縦装置からリンク機構を介して L/U のロードセルに操作力が入力され、ロードセル用アンプで増幅された操作信号が制御装置に入力される。

制御装置は操作信号と外部計算機からの設定条件、サーボモータの回転位置情報から反力演算を行いモータ用アンプを介して L/U に駆動信号を出力する。L/U が駆動することで操縦装置に反力が出力される。

電動 C/L の方式にはリニア方式とロータリ方式があり、従来の電動 C/L は、模擬操縦感覚に優れる理由でリニア方式が用いられた。近年、モータ、減速機、制御計算機等の

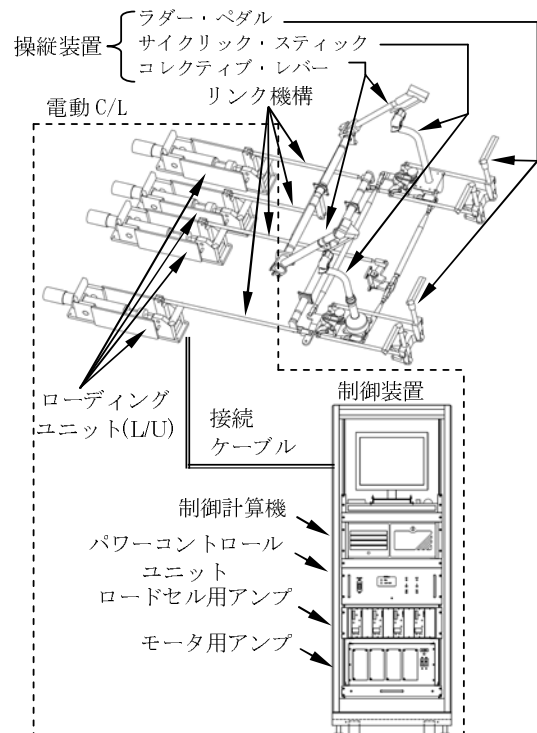


図 1 電動 C/L の組み込み例 (リニア方式)

\*1 C/L : Control Loading

\*2 L/U : Loading Unit

表 1 L/U の方式による比較

項目	方式	リニア方式	ロータリ方式
減速機		ボールねじ	遊星ギア
バックラッシュ		ボールねじ部分はほぼ0. リンク機構の軸受け部分に存在する. 0.08deg 以下	遊星ギアの値に等しい. 0.05~0.10deg 以下
大きさ		ボールねじの直線運動を回転運動に変換するリンク機構を持ち、小型化が難しい	モータと減速機及び、減速機と出力アームを直接接続できるため小型化が容易
重量/部品点数		ボールねじの小型化が難しく、強度を得るために構成部品が大きく軽量化が難しい、部品点数も多くなる。	構成部品が少なく軽量化が容易

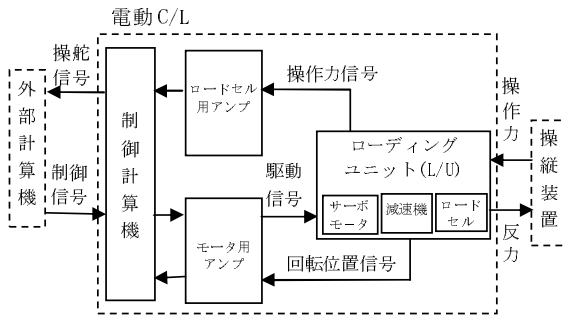


図 2 電動 C/L の制御ブロック図

し、リンク機構を介して出力アームに駆動力を出力する仕組みである。このため、装置の構成、重量とも大きく、部品点数も多かった。これに対して、ロータリ方式は、モータと減速機及び出力アームという簡単な構成であり、装置の構成、重量とも小さく、部品点数も削減される。表 1 に L/U の方式による比較を示す。

### 3 電動 C/L の設計方針

電動 C/L の開発目標として次の 3 点を重要視した。

- ① 出力トルクの標準化
- ② 出力精度の評価方法の確立
- ③ L/U の寸法、重量の軽減

出力トルクは実機の模擬に必要な反力を基準に決定した。この値は FAA<sup>\*3</sup> 及び MIL 規格 [1, 2] を満足するものであ

\*3 FAA : Federal Aviation Administration

構成部品の性能が向上しており、ロータリ方式の性能向上が期待できる。また、市場要求は小型、軽量化へと変化しており、小型、軽量化の実現に向け、ロータリ方式で検討を進めることとした。

図 3 に L/U の方式と外観の比較について示す。リニア方式はモータの駆動力をボールねじにより直線運動に変換

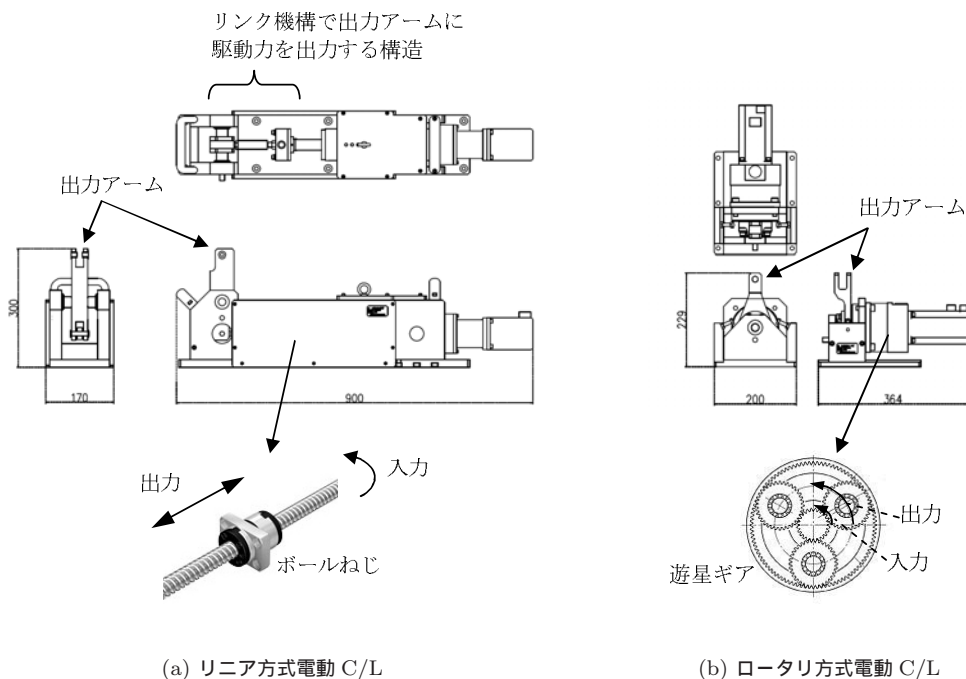


図 3 L/U の方式と外観

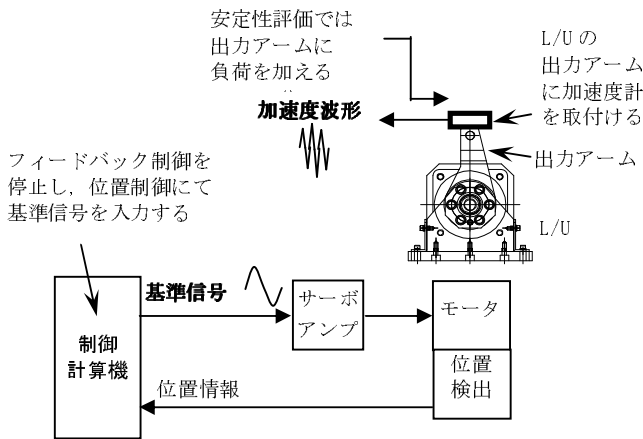


図4 性能評価の試験ブロック図

る．出力の精度は，L/U の出力アームにおける，スムーズ性と安定性の2種類で目標仕様の数値を設定した．スムーズ性は基準信号（0.5Hz，振幅±10degの正弦波）で動作させた場合のモータ回転の反転時における追従性を評価するもので，安定性と同様に出力アームに取付けた加速度計により回転方向の反転時に発生する加速度を計測し，計測結果の最大振幅と評価基準を比較する．安定性は基準信号（0.125Hz，振幅±10degの三角波）で動作させた場合の一定速度区間における追従性を評価するもので，出力アームに取付けた加速度計により目標追従時に発生する加速度を計測し，計測結果と評価基準を実効値で比較する．また，同様に定格トルクに相当する負荷を与えた場合について，安定性の評価を実施する．「図説エルゴノミクス」[3]の「振動の感知と影響」の中で全身振動を人間が感知するレベルと許容限界を示した振動耐容度合いから，振動を不快に感ずる平均ピーク加速度の最低レベル（0.05G）を評価基準とした．

#### 4 性能評価

試作機を製作し操縦感覚に重要な要素である安定性とスムーズ性の2種類についての性能評価を行った．性能評価の試験ブロック図を図4に示す．スムーズ性は，L/Uを基準信号（0.5Hz，振幅±10degの正弦波）で動作させた場合のモータ回転の反転時における追従性を評価するもので，出力アームに取付けた加速度計により水平方向運動の加速度を計測し，モータの回転方向の反転時に発生する加速度変動を評価するものである（図5）．加速度変動の最大振幅（p-p）を基準値と比較評価する．安定性は，L/Uを基準信号（0.125Hz，振幅±10degの三角波）で動作させた場合の一定速度区間における追従性を評価するもので，出力アームに取付けた加速度計により水平方向運動の加速度を計測し，理論的に加速度が発生しない区間において発生する加

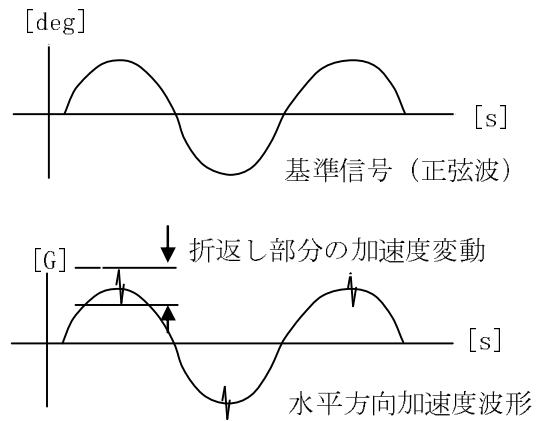


図5 スムース性

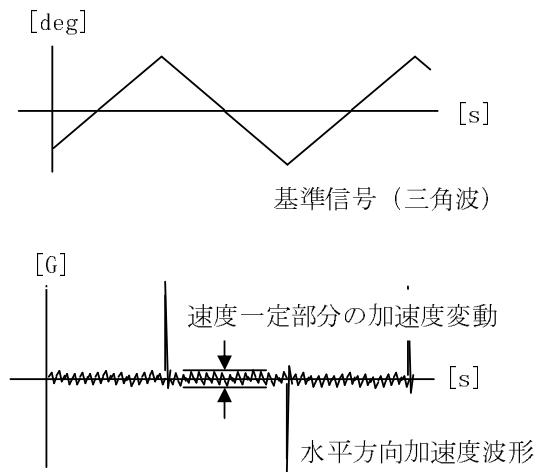


図6 安定性

速度変動を評価するものである（図6）．加速度変動の計測値と評価基準を実効値（rms）で比較する．安定性に関しては，無負荷の場合と，反力の常用域である，定格トルクの50%に相当する負荷を与えた場合の2種類について評価を実施する．

##### 4.1 スムース性の評価

リニア方式とロータリ方式の電動C/Lについて，スムーズ性の評価を実施した．ここで，加速度の計測結果は正弦波状になるが，L/Uの出力アームは回転運動するため，水平方向の加速度成分と垂直方向の加速度成分の和が計測される．評価では，水平方向の加速度と垂直方向の加速度を，計測結果から減じ，その差分を求め評価を行った（図7）．

評価結果を図8及び表2に示す．この結果，ロータリ方式に比べリニア方式の方が，全体に加速度の変動が大きい結果が得られた．しかし，どちらの方式もスムーズ性の基準値を満たす結果であり，スムーズ性に関しては良好であった．

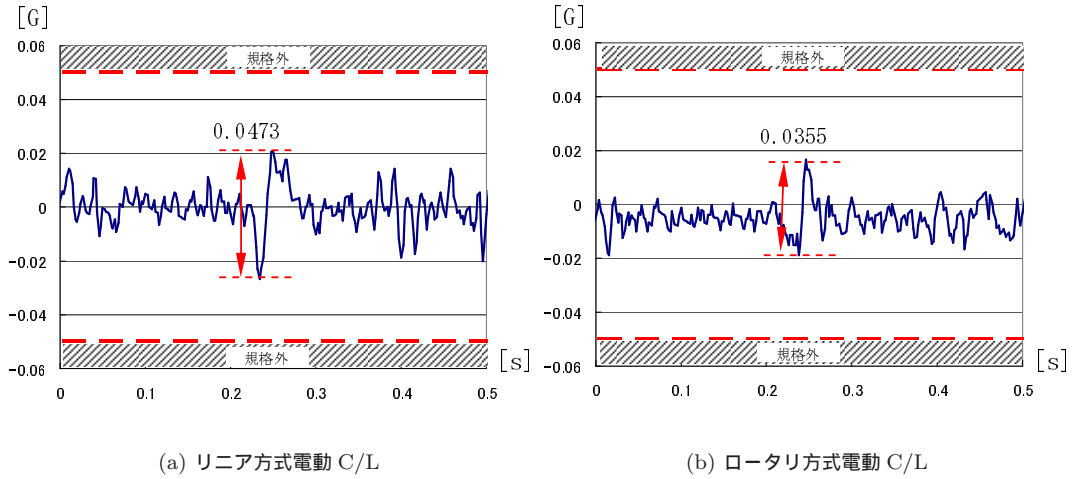


図 8 スムース性の計測結果

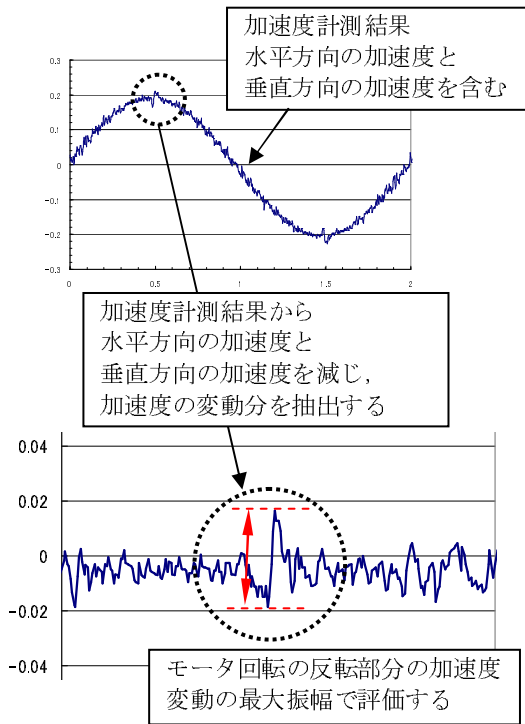


図 7 スムース性の評価方法

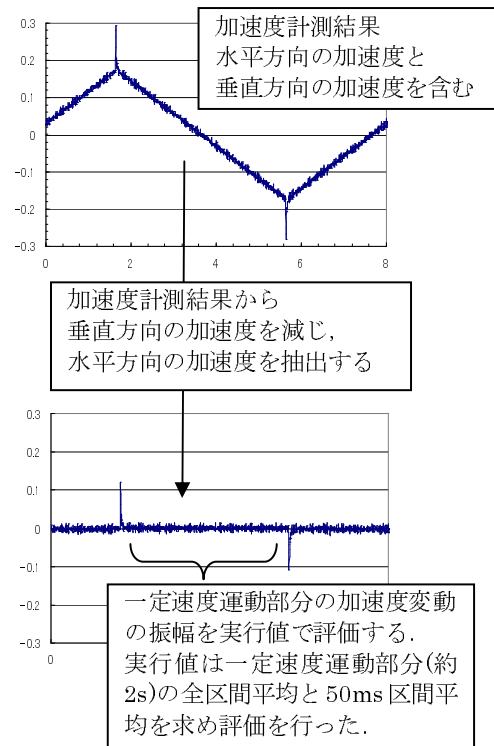


図 9 安定性の評価方法

表 2 スムース性の評価結果

性基準	方式	評価結果
0.05 G <sub>p-p</sub> 以下	リニア方式	0.0473G <sub>p-p</sub>
	ロータリ方式	0.0355G <sub>p-p</sub>

#### 4.2 安定性の評価

リニア方式とロータリ方式の電動 C/L について、安定性の評価を実施した。ここで、L/U の出力アームは回転運動するため、加速度の計測結果には、水平方向の加速度成分以外に垂直方向の加速度成分が加わり三角波状の波形が計

測される。計測結果から垂直方向の加速度を減じ、水平方向の加速度を求め、その一定速度運動部分の加速度変動について実行値で評価を行った (図 9)。

無負荷時のリニア方式とロータリ方式の電動 C/L の評価結果を図 10 に示す。無負荷ではリニア方式とロータリ方式でほぼ同等の結果であり、どちらも基準値を満足する。

同様に L/U 出力アーム部に常用出力トルク相当の負荷 (定格トルクの 50%) を加えた場合の評価結果を図 11 に示す。負荷を加えた場合には、ロータリ方式で加速度変動が悪化する傾向が見られた。これは、遊星減速機の歯車の、



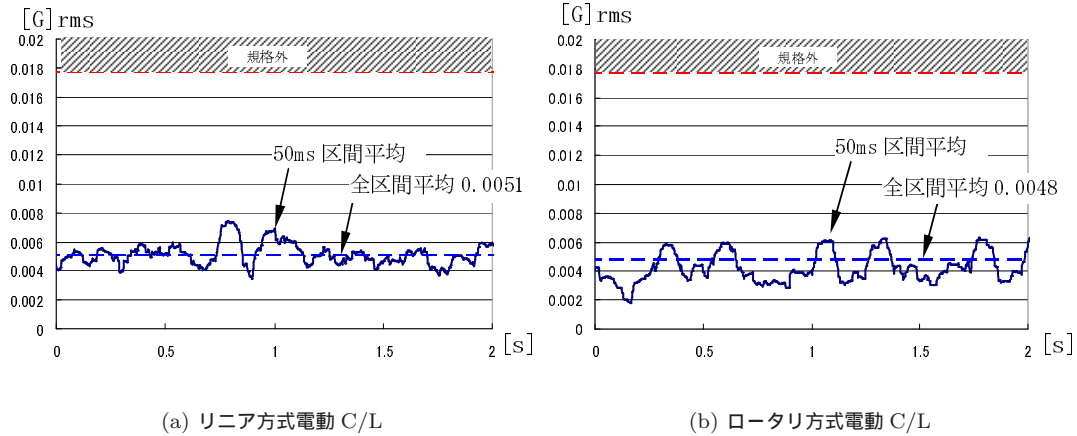


図 10 安定性の計測結果（無負荷）

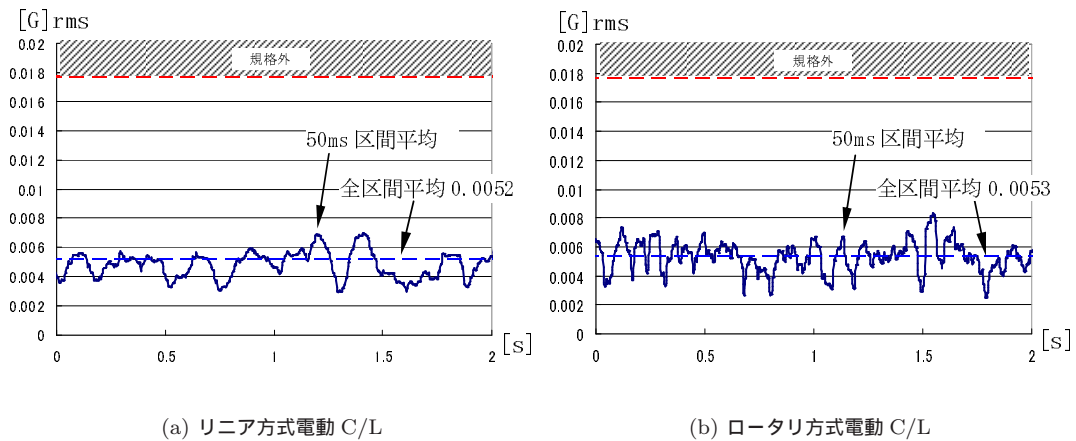


図 11 安定性の計測結果（負荷 49[Nm]）

表 3 安定性の評価結果

安定性基準	方式	無負荷	負荷 49NM
0.0177	方式	0.0051Grms	0.0052Grms
Grms 以下	方式	0.0048Grms	0.0053Grms

歯部の弾性変形による誤差（ピッチ誤差）が増大したためと考えられる。安定性の評価結果を表 3 にまとめる。

この結果、どちらの方式も常用出力トルク相当の負荷範囲では十分に安定性の基準値を満たす結果となった。ロータリ方式は負荷の増加に伴い安定性が劣化する傾向にあるが、常用域ではリニア方式と同等以上の安定性を確認することができた。

## 5 設計結果

今回開発したロータリ式電動 C/L の設計結果を表 4 に示す。結果としてリニア方式とほぼ同等のスムーズ性、安定性を有する電動コントロールローディング装置を、体積比

36%、重量比 53% で実現することができた。また、部品点数を 27% 削減することができ、組立時間を 50% 短縮することができた。

## 6 むすび

今回開発した電動 C/L は、小型、軽量化と部品点数の削減を実現し、新しい汎用シミュレータ（回転翼機用）へ適用することができた（図 12）。回転翼機では、サイクリック・スティックが前後・左右の 2 軸、コレクティブ・レバーとラダー・ペダルがそれぞれ 1 軸の動作を行うため、合計 4 つの L/U が必要となり、結果として、体積 0.117m<sup>3</sup>、重量 70kg を削減することができた。性能面ではロータリ方式は、安定性において常用域以上の負荷特性がリニア方式に比べ劣ることがわかった。今後、この点について引続き改善を行う。リニア方式については、より高出力が必要な用途に適しており、必要に応じて適用して行く。今後も引き続き、様々な要求に対応すべく改善を続けていきたい。

表 4 ロータリ式電動 C/L の設計結果

項目	目標仕様	ロータリ方式電動 C/L	リニア方式電動 C/L
定格出力トルク	90 [Nm] 以上	95 [Nm]	120 [Nm]
出力精度	安定性	0.0177[G]rms 以下	0.0048~0.0053[G]rms
	スムーズ性	0.0500[G]p-p 以下	0.0355[G]p-p
L/U の寸法 HxWxD	300x300x400 [mm] 以下	229x200x364 [mm] (体積比 36%)	300x170x900 [mm]
L/U の重量	20 [kg] 以下	19.5 [kg] (重量比 53%)	37 [kg]
L/U の部品点数	20%削減	88 点(27%削減)	122 点
L/U の組立時間	20%削減	4hr (50%削減)	8hr

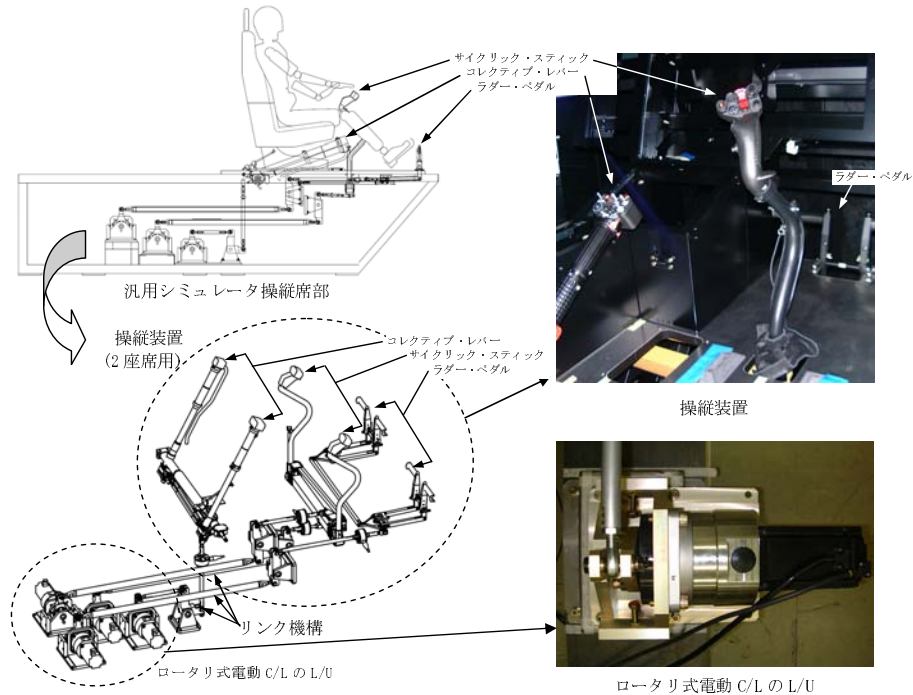


図 12 ロータリ式電動 C/L の適用例

謝 辞

本装置の開発にあたり、ご協力頂きました関係者の方々に深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] Flight Training Device Qualification FAA AC120-45A/40B
- [2] Helicopter Flying and Ground Handling Qualities; General Requirements for MIL-H-8501A
- [3] 野呂影勇編集 図説エルゴノミクス 日本規格協会 1990

[執筆者紹介]



齊藤 邦彦 略歴

1990 年入社，各種シミュレータの電気設計に従事．現在，シミュレーション技術部技術 1 課副課長



齋藤 匡央 略歴

1990 年入社，各種シミュレータの電気設計，制御システム設計に従事．現在，シミュレーション技術部技術 1 課

## T-4 フライト・シミュレータ整備及び学生訓練支援について 訓練機材の役割

島田 真介, 香川 真治

航空自衛隊芦屋基地(以下「芦屋基地」)に所在する第13飛行教育団は、航空自衛隊の戦闘機操縦者を育成する飛行教育部隊(基本操縦(T-4)前期課程)で、毎年75名ほどの学生が定期的に入校してくる。防府北及び静浜基地のプロペラ機(T-7初等練習機)での訓練を終えた飛行学生たちは、初めてのジェット機での訓練を行うため、T-4型フライト・シミュレータ3号機、4号機(以下「シミュレータ」)にて操縦法、緊急時の対処方法等を学ぶ。尚、1号機、2号機は第1航空団浜松基地に納入されている。本論文では、芦屋基地に学生の教育訓練目的で納入されたシミュレータの役割及び駐在技術員による委託整備と学生訓練支援について紹介する。

### 1 まえがき

T-4型フライト・シミュレータ3号機、4号機(以下「シミュレータ」)は、三菱プレジジョン株式会社(以下当社)が設計・製造して3号機を1998年6月に、4号機を2000年2月にそれぞれ納入し、今日まで地上訓練装置としてパイロット育成にご活用頂いている。芦屋基地に限らず教育部隊は確実に基礎課程を習得させた学生を上級課程へ送り出すことが使命であり、訓練カリキュラムの忠実な実施がその後のパイロット配備計画にも影響するため、教育課程に空白が生じることは許されない。したがってシミュレータ訓練も計画を阻害することの無い様、機材の高稼働率を維持するべく委託整備契約により整備員の常駐体制をとって訓練支援、定期整備、計画外整備を行い、効率的な訓練環境を提供し、教育計画の安定的な遂行に寄与している。

### 2 シミュレータについて

シミュレータは油圧式6軸動揺装置及び投影式視界装置を有したフルフライト・シミュレータである。図1にシミュレータの構成、表1に各装置機能概要を述べる。T-4中等練習機(以下「実機」)の飛行及びエンジン性能・特性並びに航空機各系統及び搭載機器の機能・性能(操舵・操縦感覚、飛行感覚、飛行環境、窓外視界、音響等)を忠実に模擬し、操縦席内部の座席、操縦装置、計器、補機類等は実機と同様の外観、配置がなされている。またその機能も実機と同様な動作を模擬しており、飛行訓練に必要な地上操作、離着陸、空中操作、計器飛行、編隊飛行、緊急時対処操作等の教育訓練を安全かつ効率的に行うことができる。

### 3 委託整備について

当社が行っているシミュレータの整備には、以下に示す3つの方式がある。

- ① 顧客が対応できない故障が発生し、顧客からの要請があった時のみ人員を派遣するオンコール方式。
- ② 定期的に人員を派遣して整備を行う巡回方式。(日常的な整備は顧客が行い、突発的な故障等に対しては①に準じる)
- ③ 当社社員を常駐させ、保守全般を請け負う委託整備方式。

これらの整備方式は、システムの構成規模、運用形態、使用頻度等の違いにより、採用する整備方式が異なってくる。芦屋基地のシミュレータはコックピット周辺に大型のドームスクリーン方式の模擬視界装置、加減速感や機体変位が体感できる油圧式6軸モーション(模擬操縦席動揺装置)等を有した大きなシステム構成であることと、年間を通じて多くの学生が緻密な訓練スケジュールに沿って使用し、稼働率も極めて高いことから、③の委託整備の方式を採用している。

委託整備の中で実施している定期検査は、日々点検、毎週検査、毎月検査、3ヶ月検査、6ヶ月検査、1年検査があり、それぞれの経過時間による磨耗や変動部位の測定/調整を、決められた手順/内容に沿って実施している。これらの検査を行うことで磨耗の度合いや劣化の兆候を把握でき、事故(災害)や機器の故障による運用制限を未然に防止し、性能維持と安定運用の提供が可能となるので、非常に有効である。仮に定期検査で予防できなかった突発的な故障が発生した場合、計画外整備として故障部品の特定や、部品交換までの仮処置を整備員が迅速に行うことができるので、運用の中断、停止を最小限にとどめることが可能である。図2に定期検査風景を示す。

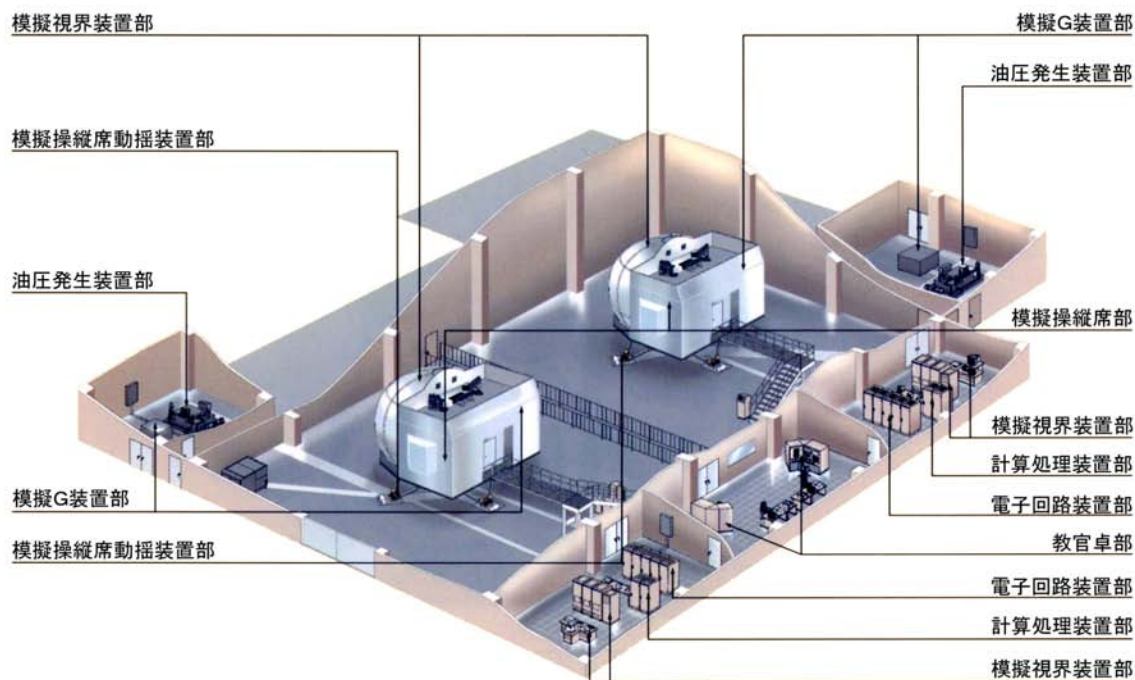


図1 シミュレータの構成

表1 各装置の機能概要

装置名	機能説明
模擬視界装置部	コンピュータ・グラフィックの模擬視界映像を、模擬操縦席周辺に配置されたドームスクリーン及びプロジェクタにより操縦者に模擬視界として提供する。
模擬操縦席動揺装置部	模擬操縦席部を動揺させることにより、操縦士に体感を与え、飛行感覚及び振動感覚を模擬する。
油圧発生装置部	模擬操縦席動揺装置部等に必要の高圧作動油を提供する。
模擬G装置部	模擬操縦席内の耐Gスーツに対し、実機の運動中に発生する加速度の変化に応じる空気圧の変化を模擬する装置。
模擬操縦席部	T-4型航空機の前部操縦席を忠実に模擬している。
計算処理装置部	運用、管理支援、自己診断及び支援の各プログラムの実行とこれらのプログラムに必要なデータの入出力を行う。
電子回路装置部	信号変換装置及び電源制御装置で構成される。
教官卓部	シミュレータの操作、監視等を行う。



図2 定期整備風景

#### 4 訓練支援

委託整備契約により基地に常駐している駐在員が、運用時の便宜を図るために訓練支援を行っている。ここでは芦屋基地で行われている具体的な訓練支援について述べる。

通常、訓練を行う学生は模擬操縦席に乗り込み、教官は教官卓部で訓練内容に応じた指導・機材操作を行い、駐在員はその支援を行っている。駐在員は、学生がその日実施するカリキュラムに応じた初期設定、環境設定、教官の要求に応じた模擬故障の導入等を、的確かつ迅速に行わなければならない。教官卓の操作以外にも、訓練カリキュラム、実機の飛行特性、故障した際の対応などを十分に理解した上で、教官及び学生との連携を取りながら操作を行っている。



図3 訓練風景

これにより教官及び学生は、教官卓の操作に気を取られずに訓練に集中することができ、効率的に訓練を進めている。また、シミュレータ訓練のメリットとして天候に左右されず、全てのユーザーに対して同一条件の下で訓練することができるので公平な技量評価が可能となる。図3に訓練風景（教官卓部）を示す。

芦屋基地のシミュレータは、学生による操縦課程訓練が主体であるが、実機整備員のエンジン始動訓練、新任教官の操縦訓練等にも使用されている。以下に各訓練におけるシミュレータの位置づけ・役割を述べる。

#### 4.1 学生による操縦課程訓練

##### (1) 実機操縦前の訓練

芦屋基地に入校する学生は初めてジェット機を操縦するので、まず基礎知識（機体の構造、エンジン始動までの手順、操縦法、故障時の対処法など）を学び、実機を操縦する前に以下に示す訓練をシミュレータで行う。

##### ① コックピット着座の訓練

学生は実機訓練時と同じ装具を身につけシミュレータの操縦席に乗り込み、装具の操縦席への取り付け方、シート及びラダーペダル位置の調整法などを訓練する。シミュレータの構造上、コックピット周辺に広い空間と搭乗用のステップ、補助教官席が設置されている

ので、教官が学生に直接指導し易く、他の学生も間近で装着の訓練を見学することができる。

##### ② エンジン始動及び地上滑走前点検の訓練

コックピットに乗り込んだ学生は、実機と同じ手順でエンジン始動及び地上滑走前点検を行う。シミュレータの場合、手順を間違えても機体の破損、火災等の危機的状況を伴わないので、実機経験の無い学生も安全に訓練を行うことができる。

##### ③ 離陸前点検の訓練

地上滑走中に離陸前点検を実施する。シミュレータの場合、風向きによる使用滑走路（離陸方向）の制約を受けないので、風向き（風上風下）に応じた滑走路進出経路を均等に体験することで、バランス良く訓練することができる。

##### ④ 離陸・巡航・着陸の訓練

離陸訓練の際、実機操縦経験のない学生は、ジェット機の色感に慣れていないこともあって、離陸操作が遅れてしまうことがある。しかし、シミュレータでは反復訓練することができるので、速度に対する感覚をスムーズに習得することができる。

巡航・着陸訓練では、視野角の広い模擬視界により地上の目標物を確認しながら行う。コンピュータ・グラフィックにより実視界と同等の景色を窓外視界として見るため、学生は実機操縦前に操縦者

負担度の大きい着陸操作を安全に且つ繰り返し訓練できる。

⑤ 着陸後点検及びエンジン停止の訓練

滑走路に着陸後、駐機場まで地上滑走しながら着陸後点検を実施する。駐機場に移動した後、エンジン停止を行う。

⑥ 緊急手順の訓練

シミュレータには、実機で起こり得る緊急事態をプログラムさせており、任意に導入することができる。学生は、安全に緊急事態を体験し、対処要領を繰り返し訓練することができる。

この訓練は、シミュレータの最も優れた機能の1つであり、重要な役割を担っている。例を挙げると、実機訓練ではエンジンの故障を想定し1発のエンジン出力を抑えて行う離着陸訓練、フラップ（高揚力装置）の故障を想定し、フラップを使用せずに行われる着陸訓練等を体験的に実施するが、あくまで想定上の擬似体験であり、実際の緊急事態を体験することはきわめて危険である。しかし、学生はいかなる緊急事態にも的確かつ冷静に対応することが求められるため、シミュレータでこれらの訓練を繰り返し行うことにより、安全に緊急手順を習得することができる。

更にここでは緊急脱出の訓練も行う。これは最高レベルの緊急事態で、座席ごと機外へ射出して脱出するものであるが、実機での訓練は、人体への影響と機体の損壊を伴うので事実上不可能である。シミュレータでの射出手順/操作訓練では、教官卓で射出時の機体の姿勢、パイロットの着座姿勢等の指導や評価を繰り返し行うことができる。

⑦ 空中操作の訓練

航空機の基本的な操縦法、緊急手順を修得した学生は、航空機の操縦方法及び操舵感覚を習得するための空中操作訓練を行う。空中操作は、機外の目標物により自機の飛行状態を把握することを主とし、併せて計器類を参照することで所望の飛行姿勢を確立させる。

これらの空中操作の訓練においても目標物を模擬視界で確認しながら行う。学生は、機体性能及び運用限界付近の難度の高い空中操作もシミュレータで安全に訓練することが可能である。

(2) 各カリキュラムの訓練

学生はシミュレータで所定の訓練を行った後、実機にて各カリキュラムの訓練を行う。実機訓練が開始された後も、以下に示すカリキュラムの内容に応じてシミュレータ訓練を行う。

① 編隊飛行の訓練

空中戦闘は一般に編隊をもって行われるため、編隊長機を中心とした各機の強固な信頼関係、相互支援、優れた操縦技量と状況判断が欠かせない。学生はシミュレータで編隊離陸、空中集合、基本隊形訓練を行い実機訓練に備える。

編隊長機との距離を一定にするためのエンジン出力操作、コックピットからの長機の見え方など、シミュレータを用いて確認する。

② 計器飛行の訓練

計器飛行は、景色を目視せずに計器を頼りに飛行することであり、雲中や霧等により視界が悪く地平線や地上目標を基準とした飛行姿勢の維持が困難になった場合を想定し、装備された計器だけで飛行する重要な訓練である。

シミュレータでこの訓練を行う場合、離陸してすぐに雲中に入るように設定する。計器だけを頼りに航空機の出力と姿勢を確立させ、上昇・下降、旋回等の訓練を行う。ここで重要なことは、シミュレータの計器の動きや操舵感覚が、実機のそれを忠実に模擬していることである。実機の飛行特性と外気温度等をもとにエンジン出力と姿勢を確立して、理論通りの速度、旋回率を得ることができないと、シミュレータで訓練したことが実機訓練に反映できなくなる恐れが生じる。また、他にも雲中での異常姿勢からの回復訓練や、計器のみで着陸位置まで飛行する TACAN (Tactical Air Navigation) アプローチ訓練と GCA (Ground Control Approach) 訓練が行われる。特に GCA 訓練では、管制官による誘導をコンピュータで作られた人工音声で行っている。これにより専門の管制官役の教官が居ない状態でも訓練を行うことができる。

(3) その他の訓練

学生は、今自分たちが行っているカリキュラムを習得するために、実機訓練へ移行してからも度々シミュレータで自習を行っている。学生が一人の場合でも駐在員が教官卓の操作を代行し、自習/復習を行うことが可能である。また、操縦訓練の他にも、机上で導き出した飛行理論の確認、検証も行うことがある。

4.2 実機整備員のエンジン始動訓練

実機整備員のエンジン始動訓練においてもシミュレータが活用されている。パイロットと同じようにエンジン始動を行うので、シミュレータで操作手順の練習及び動作の確認等に使われることもある。

#### 4.3 新任教官の操縦訓練

シミュレータは新任教官の操縦訓練にも使用される。他の基地から赴任してきた教官は、改めて T-4 の操縦手順や芦屋基地周辺の飛行経路の確認のためシミュレータを使用することがある。ここで教官はシミュレータの操縦感覚を把握し、教官卓の操作法を習得する。

#### 5 むすび

近年、計算機及びコンピュータ・グラフィック（CG）性能の飛躍的な向上により、シミュレータで体験できる仮想空間がより現実になんて近くなってきた。特に CG による模擬映像が、実映像と同じレベルにまで向上している。これらの機能を持ったシミュレータは車輜、鉄道、船舶、航空機の様々な状況に応じた運転や操作等、社会のニーズに合わせて幅広く活用されており、当社が製造・納入したシミュレータも、芦屋基地の飛行訓練を一例に大いにご活用頂いていることが分かる。また故障や緊急時の処置の訓練が災害を伴うことなく体験できることから、シミュレータを用いた教育・訓練の必要性や依存度が高まってきている。これらより、我々駐在員も、今後一層のシミュレータへの関心が広がることを期待すると共に、お客様がご満足頂ける教育・訓練環境の整備に貢献する所存である。

最後に、芦屋基地で所定のカリキュラムを修了した学生たちは次の赴任先である浜松基地（基本操縦（T-4）後期課程）へ赴くことになる。そこでの操縦課程教育の一部にも当社が製造・納入したシミュレータが使われており、パイロット育成に必要不可欠な存在となっている。浜松基地での所定の課程を修了した飛行学生たちは、航空き章が与えられ、戦闘機パイロットとして多岐に及ぶ防空最前線の任務に就くことになる。それぞれの道で大いにご活躍されることを祈念してむすびとする。

#### 謝 辞

本論文執筆にあたり、ご協力頂いた「第 13 飛行教育団」の方々には、深く感謝申し上げます。

#### [執筆者紹介]



香川 真治 略歴

1997 年入社、各種シミュレータ表示装置設計を経て、防衛省向けシミュレータの保守整備に従事。現在航空自衛隊 T-4 訓練シミュレータの保守整備を担当。芦屋基地 駐在員



島田 真介 略歴

1990 年入社、民航向けシミュレータの保守整備を経て、防衛省向けシミュレータの保守整備に従事。現在航空自衛隊 T-4 訓練シミュレータの保守整備を担当。芦屋基地 駐在員

# 人工衛星姿勢制御用磁気軸受フライホイール

佐藤 典夫, 齊藤 光伯\*

フライホイールは衛星の姿勢制御に欠くことのできない機器である。衛星の姿勢制御能力の喪失は電力の喪失, ひいてはミッションの喪失に直結することから, フライホイールには非常に高い信頼性が要求されている。磁気軸受は非接触で機械的摩耗のない軸受システムであり, 玉軸受では必要になる長期の寿命試験評価を必要としないシステムである。さらにこの軸受システムの制御回路をデジタル制御化することで, 回転するロータの軸振れを抑える高度な制御により低擾乱化を実現した磁気軸受フライホイールを開発した。

## 1 まえがき

玉軸受を用いたフライホイールは, 古くから人工衛星の姿勢を安定化する有効な手段として, 多くの衛星システムに利用されている。軸受の寿命がフライホイールの寿命を決め, 人工衛星全体の信頼性に大きく影響を及ぼすことになるので, 軸受の信頼性を確保することが重要な課題となっている。

宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 宇宙科学研究所と三菱電機 (株) 先端技術総合研究所は, 玉軸受を使わない方式として, 人工衛星姿勢制御用磁気軸受フライホイールの試作研究 [1] および磁気軸受フライホイールを用いた人工衛星の姿勢制御系の研究 [2] について長きにわたり研究開発を継続してきた。三菱プレジジョンもこの磁気軸受フライホイールの衛星搭載化を目指し, その開発に参画している [3]。

一方, 近年観測衛星をはじめ, 衛星の姿勢・指向制御要求が高度化し, フライホイールに対して振動擾乱の低減が求められるようになってきた。当初, 磁気軸受フライホイールの制御回路はアナログ回路で構成されていた。その後, 宇宙環境使用に耐える CPU が利用可能になったため, これを用いて制御回路をデジタル制御化することで, 回転するロータの軸振れを抑える高度な制御が実現可能になった。これを応用し, 三菱プレジジョンと三菱電機 (株) 先端技術総合研究所は, 宇宙航空研究開発機構 (JAXA) と協力し, 擾乱発生要因を考慮した制御系を構成した傾斜磁極磁気軸受フライホイールの研究にて, 磁気軸受フライホイールの振動擾乱の低減を図ってきた [4]。また, 宇宙機への搭載に向けて小型軽量化や耐環境性及び高信頼化設計についても検討を実施した [5]。

2002 年度には, 宇宙環境信頼性実証システム実証衛星 2 号機 (SERVIS-2) に搭載し, 軌道上評価を行うことが決まり, 上記研究成果をベースに, 磁気軸受ホイール実験装置

(MBW<sup>\*1</sup>) の宇宙実証モデルの設計・製造・試験評価 [6, 7] を行った。MBW は衛星システムに組み込まれ, すでにシステム試験を完了しており, 2010 年 6 月にロシアのプレセツク射場よりロケット<sup>\*2</sup>で打上げられ, 1 年間の軌道上実験を実施する予定である。

本論文は, この SERVIS-2 磁気軸受ホイール実験装置 (MBW) の開発について報告する。

SERVIS は, 経済産業省の監督のもとに新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) からの委託を受けて (財) 無人宇宙実験システム研究開発機構 (USEF) が開発を進めている宇宙実証システムである。

## 2 MBWの概要

### 2.1 MBWの開発仕様

SERVIS-2 搭載の目的は, 地上では次に示す ①~③ の理由で評価が困難な磁気軸受の特性を軌道上で評価することを目的としている。

- ① 1 G 環境下では, 磁気軸受の上側電磁石に大きなバイアスが加わるため, 無重力状態と軸受制御特性が異なる。(短時間の特性評価は落下試験でも可能だが, 長時間の特性評価は困難である。)
- ② 軸受制御特性が異なると擾乱特性も異なる。
- ③ 磁気軸受制御系と衛星ダイナミクスとの干渉を評価する必要があるが, 地上での磁気軸受浮上動作による衛星構体の姿勢変動は測定困難である。

表 1 に MBW の開発仕様諸元を示す。MBW にて最大回転数を 4000rpm としているのは, 衛星電源電圧の上限から回転数と出力トルクをトレードオフしているためであり, 磁気軸受としてはさらに高速化や高角運動量化も可能である。また, MBW は耐機械環境性が高く, 擾乱性能に優れ, 使用温度範囲の広いシステムである。

\* 三菱電機 (株) 先端技術総合研究所

\*1 MBW : Magnetic Bearing Wheel (磁気軸受ホイール実験装置)

\*2 Rocket : ロシアの衛星打ち上げ用ロケット



表 1 SERVIS-2 磁気軸受ホイール実験装置 (MBW) の開発仕様諸元

	磁気軸受フライホイール	玉軸受フライホイール
	SERVIS-2 MBW (磁気軸受ホイール実験装置)	(参考) 玉軸受フライホイール (Type L トルクアップ型)
製造業者	三菱プレジジョン(株)／三菱電機(株)	三菱プレジジョン(株)
最大角運動量[Nms]	30	80
最大回転数[rpm]	4000	6000
最大出力トルク[Nm]	0.5以上@4000rpm	0.4以上@2000rpm 0.2以上@6000rpm
消費電力[W]	ピーク:400@4000rpm, 0.5Nm(軌道上) (ピーク:400@6000rpm, 0.2Nm)	ピーク:220@2000rpm, 0.4Nm ピーク:220@6000rpm, 0.2Nm
	定常:66以下@4000rpm(軌道上) (定常:81以下@6000rpm)	定常:33以下@6000rpm
電源電圧	30~52V	30~52V
信号インタフェース	アナログ/デジタル	アナログ/デジタル
回路一体/分離	一体	一体
質量[kg]	19	11
寸法[mm]	φ346×164	φ365×145
機械環境(実効値)	面外 193 m/s <sup>2</sup> (19.7Grms) 面内 138 m/s <sup>2</sup> (14.1Grms)	面外 183 m/s <sup>2</sup> (18.7Grms) 面内 110 m/s <sup>2</sup> (11.2Grms)
	並進: 0.1N以下 回転: 0.1Nm以下	並進: 1.0N以下 回転: 0.2Nm以下
使用温度	動作時: -15~+55 非動作時: -30~+60	動作時: -5~+60 非動作時: -30~+70
	寿命	軌道上: 10年
磁気軸受制御型	5軸	N/A



図 1 MBW外観図

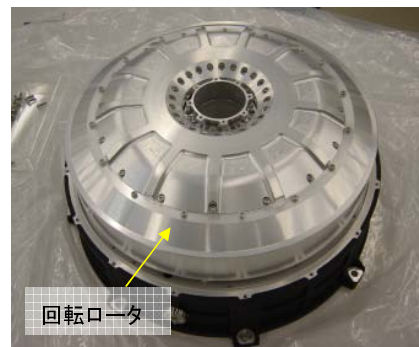


図 3 MBW回転部

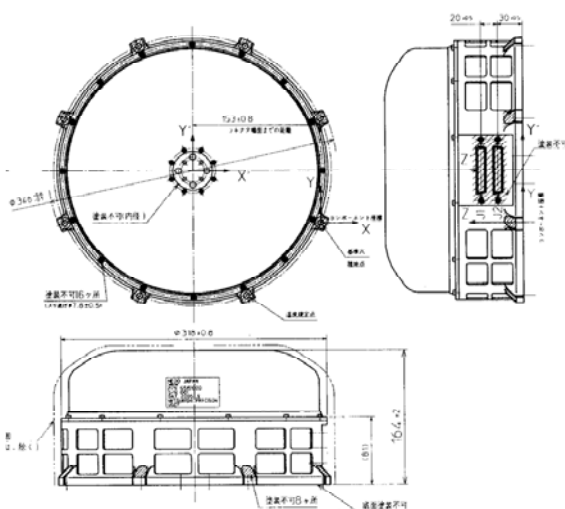


図 2 MBW形状図

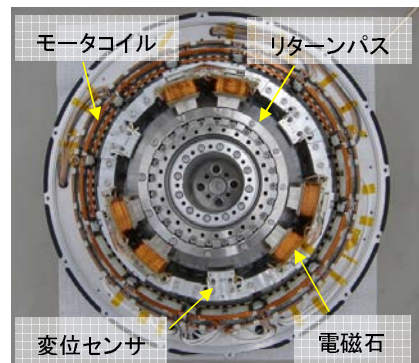


図 4 MBW磁気軸受部

図 1 に開発した MBW の外観図を, 図 2 に形状図を示す .  
また, 図 3 に製造中の MBW の回転部 (回転ロータ) を,  
図 4 に磁気軸受部 (電磁石, 変位センサ等) を示す .

## 2.2 軸受動作原理

磁気軸受の動作原理を以下に述べる．図 5 に磁気軸受部の構成・動作説明図を，図 6 に基本的な軸受制御ブロック図を示す．

磁気軸受の軸受制御は，基本的に回転ロータを常に中心位置（ゼロ変位）になるように制御することを目的としている．

軸受制御器は，ロータ変位指令（ゼロ変位）に対するロータの 3 軸並進変位 ( $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ ) と 2 軸回転変位 ( $\Delta \theta_x, \Delta \theta_y$ ) を引き戻す方向に軸受力指令 ( $F_x, F_y, F_z$ ) および軸受トルク指令 ( $M_x, M_y$ ) を生成する．この制御器は，微分先行型の比例 + 積分の要素からなる．

次に，この 5 軸成分を 6 個の傾斜型電磁石の吸引力に配分する座標変換 (1) を行い，電磁石吸引力指令を生成する．ここで，電磁石吸引力は電流と電磁石ギャップ長に依存する

非線形な特性を持つ．そこで非線形補償器は，ロータ変位から座標変換 (3) によって推定された電磁石ギャップ長を使って電磁石吸引力指令を補正した電磁石電流指令を生成する．この電流指令に基づき，電流アンプにより電磁石を励磁し，電磁石吸引力を発生させる．

これら 6 個の電磁石が発生する吸引力を受けて回転ロータが運動する．この時の回転ロータの変位を 6 個の傾斜配置された変位センサで検出する．6 個の変位センサ出力は，座標変換 (2) により，ロータ変位 ( $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta \theta_x, \Delta \theta_y$ ) に変換され，これをロータ変位指令にフィードバックすることで 5 自由度（並進 3 軸と回転 2 軸，ロータの回転 ( $\theta_z$ ) は除く）に対して中心位置を保持するよう制御される．

また，ロータの回転機構は DC ブラシレスモータ機構である．ロータの回転軸回りの位相角 ( $\theta_z$ ) をエンコーダで

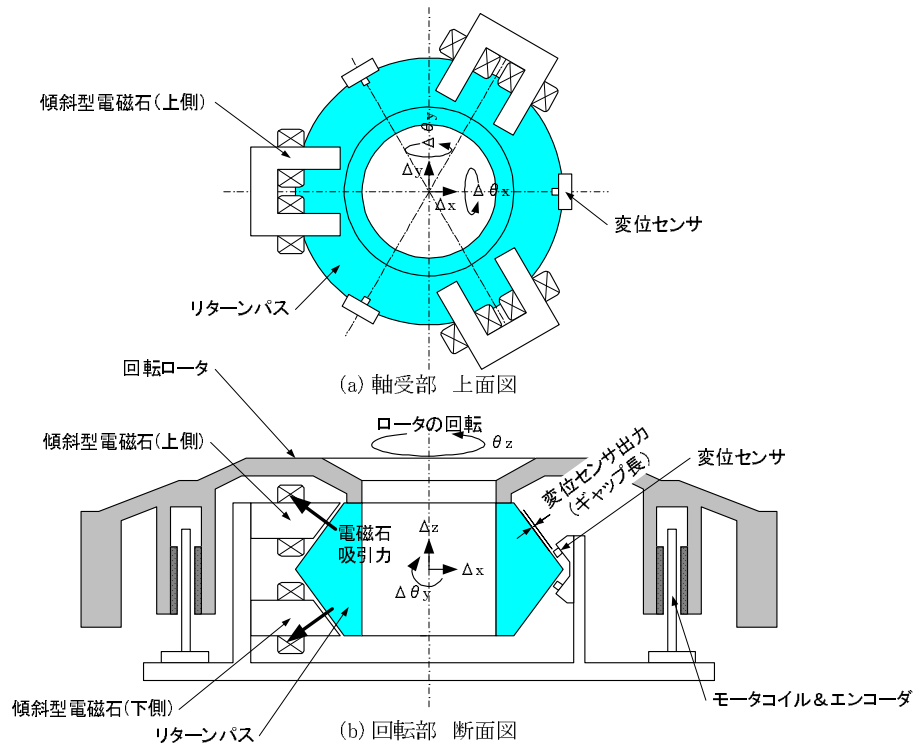


図 5 磁気軸受部の構成・動作説明図

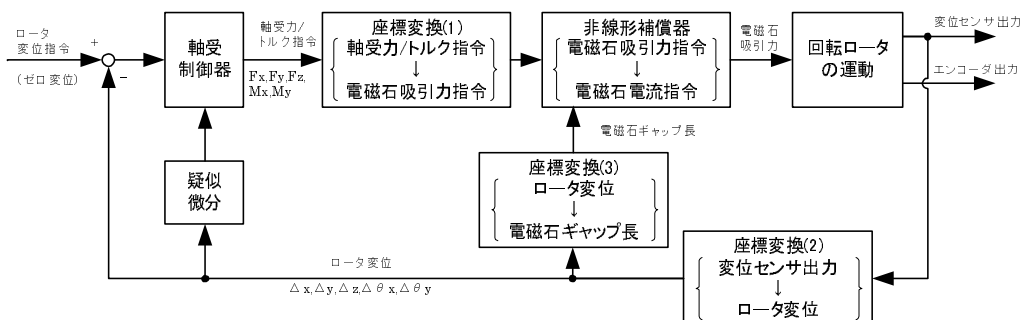


図 6 基本的な軸受制御ブロック図

検出し、位相角に合わせたモータコイルを電流駆動することでトルクを発生させ回転を制御する。

### 3 MBWの設計

#### 3.1 高信頼性化設計

宇宙機搭載アクチュエータとしての信頼性を高めるために、次に示す設計を実施した。

##### (1) 電磁石構成

一般的な5軸制御方式は10個(=2個ペア×5軸)の電磁石およびその駆動電気回路を必要とするため、部品点数が多く、質量増加と信頼性低下を招く。MBWでは、電磁石の配置を工夫し、図5に示すように必要最小限の電磁石6個をスキュー配置した5軸制御方式(並進3軸、回転2軸)とした。

##### (2) 小型軽量化

小型軽量化のため、回転ロータ機構部と駆動制御回路部を一体化した。

また、磁気軸受は構体と回転ロータの間にその非接触浮上に必要なギャップ隙間をもつ。打上環境においては、この隙間の移動を抑えるためにロンチロック機構が必要とされるが、MBWではこのロンチロック機構なしでも機械環境に耐えられる構造とした。ロンチロック機構無しの構造にて、実効値  $193.1m/s^2(19.7Grms)$  を印加して正常に動作することを確認した。

表2 MBW信頼度予測(残存確率)

機種	5年	10年
磁気軸受ホイール実験装置	0.970	0.931
玉軸受フライホイール	0.961	0.924

##### (3) 多数決冗長,2重冗長

CPU回路のSEU<sup>\*3</sup>対策として3-CPUによる多数決冗長方式とした。図7に3重化多数決系の確率モデルを示す。このモデルよりCPU3系のうち1系の故障(2系は正常)でも残存できる構成を採用した。

変位センサ・モータ駆動回路においては、正常/異常の判定は上位の3-CPUにて実施することで、2重冗長構成を採用した。図8に2重化比較系の確率モデルを示す。このモデルより変位センサ、モータ駆動回路は、2系のうち1系の故障でも残存できる構成を採用した。

##### (4) 信頼度予測と寿命

上述の高信頼性化設計に基づいてMBWの信頼度予測を解析した結果を表2に示す。

以上のように、高信頼性化設計を採用することにより、玉軸受フライホイールを上回る信頼度を有していることが確認できた。

\*3 SEU : Single Event Upset

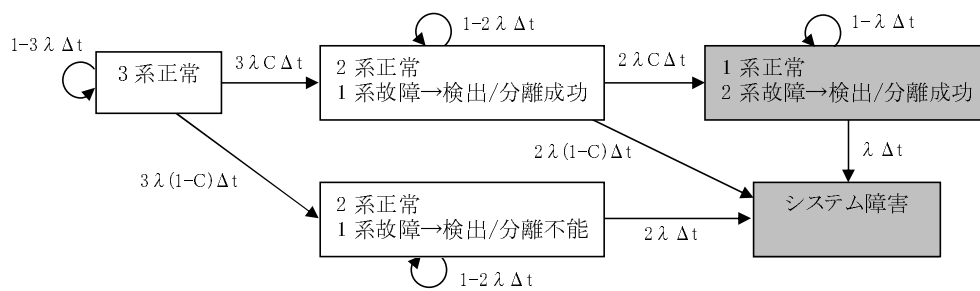


図7 3重化多数決系のマルコフモデル

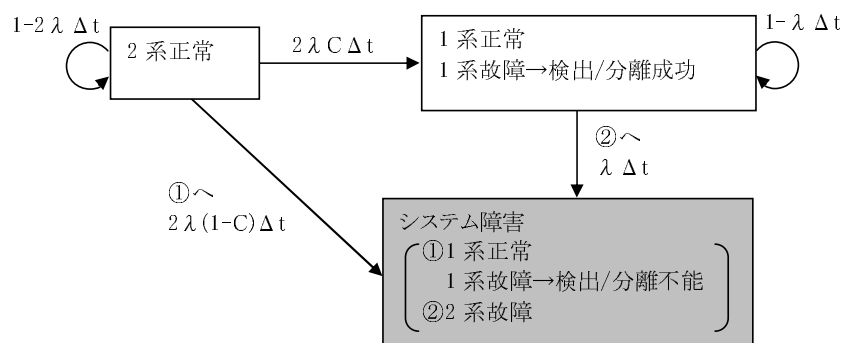


図8 2重化比較系のマルコフモデル

表 3 MBW 擾乱評価 (4000rpm)

軸	擾乱実測値 (地上試験)	擾乱推定値 (軌道上)
X	0.37N	0.097N
Y	0.22N	0.059N
Z	0.48N	0.065N
X 回転	0.050Nm	0.0149Nm
Y 回転	0.097Nm	0.0290Nm

### 3.2 低擾乱化設計

低擾乱化を実現するため、次に示す設計を実施した。

#### (1) 5 軸制御方式

磁気軸受制御により、ロータの静不釣り合い、動不釣り合い等により発生する並進力/トルク擾乱を補正できるようにするため、全方向を能動制御できる 5 軸制御方式の磁気軸受とした。

#### (2) デジタル制御

複雑な制御を小型に実装するため、CPU によるソフトウェア制御を核とした構成とした。CPU は SERVIS-1 に搭載された SIS<sup>\*4</sup> にて軌道上実証されたものを使用した。

#### (3) 低擾乱制御

磁気軸受の回転に起因する擾乱を低減するための低擾乱制御系を組んだ。図 9 にその低擾乱制御系を示す。また、図中 ①～③ の低擾乱化対策について以下に示す。

##### ① ロータの静不釣り合い、動不釣り合いによる擾乱

回転ロータの回転軸と慣性主軸のずれは、回転数に同期した並進力/トルク擾乱として現れる。回転ロータが慣性主軸まわりに回転するように、ロータ変位指令を変化させる(フィードフォワードする)ことで擾乱を下

げる。ここでのフィードフォワード量は、地上での擾乱測定から擾乱量が最小になるよう調整した値をフィードフォワードしている。

将来的には加速度センサ等にてリアルタイムで測定した擾乱をフィードバックすることも可能である。

##### ② 変位センサ検出面のずれ・歪み

回転ロータと変位センサ検出面の機械的なずれは、回転角度に同期した変位センサ出力の変動として現れる。また、検出面の機械的な歪みは回転数の高調波として現れるため、これらを回転角度に同期させて補正する。

##### ③ 電磁石磁極面のずれ・歪み

回転ロータと電磁石磁極面の機械的なずれは、回転角度に同期した電磁石ギャップ長の変動として現れる。また、磁極面の機械的な歪みは回転数の高調波のギャップ長変動として現れる。ここで、回転ロータが慣性主軸回りで安定して回転するためには、このずれ・歪み量をロータ変位より求めた電磁石ギャップ長を回転角度に同期させて補正することで、一定な電磁石吸引力を発生させることができる。

MBW の擾乱評価を表 3 に示す。この結果、地上試験では並進力擾乱 X,Y,Z が仕様値 0.1N をオーバーしている。これは 1G 環境下のため、ロータ自重支持のためのバイアス吸引力を印加していることに起因している。地上試験結果からこのバイアス成分による発生擾乱の影響を除いた場合の解析では、表 3 に示すように仕様値を満足できる予測結果が得られている。最終的には SERVIS-2 の軌道上実験にてその効果を確認する。

軌道上での擾乱値は、すでに地上で測定した擾乱値とその時の変位センサ信号および電磁石電流指令値データを元に、軌道上にて測定した変位センサ信号および電磁石電流指令値から推定して評価する。

\*4 SIS : Satellite Controller Integrated with Star Sensors (スターセンサ統合型衛星制御装置)

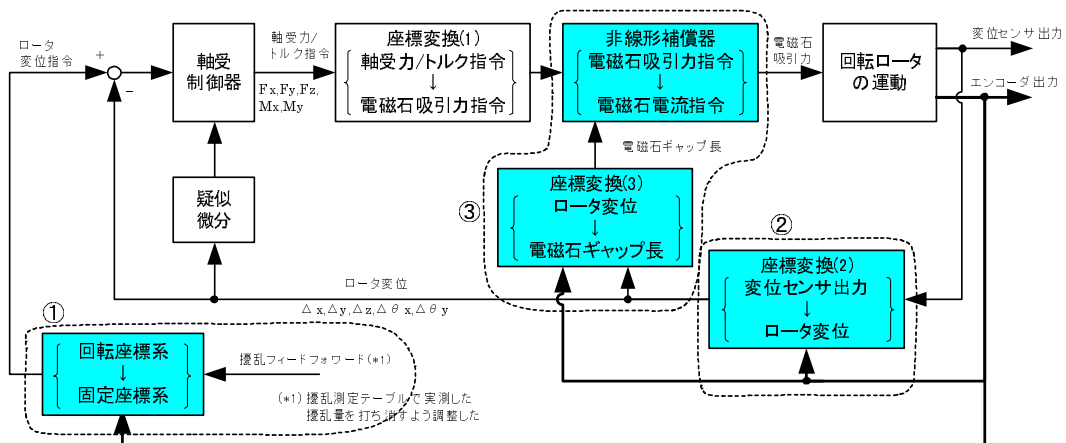


図 9 低擾乱制御系をもつ軸受制御ブロック図

#### 4 むすび

本稿にて SERVIS-2 磁気軸受ホイール実験装置 (MBW) の開発について述べた。磁気軸受という技術は地上では目新しい技術ではないが、軌道上のアクチュエータに応用することで、今後ますます高まる観測衛星の高精度化の為に、低擾乱を実現するための有効な方法であると考え、今後 SERVIS-2 の軌道上実験をとおして、磁気軸受フライホイールとしての総合的な評価を実施し、今後の商品化へと結びつけたいと考える。

#### 謝辞

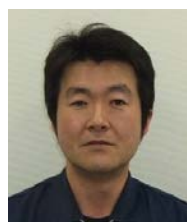
本装置の開発に至るまでに、磁気軸受の基礎研究から高度な制御方式の開発において、多大なご協力を頂いた宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 殿、また、今回の貴重な宇宙実証の機会を与えていただきました (財) 無人宇宙実験システム研究開発機構 (USEF) 殿に、この場を借りて深謝いたします。

#### 参考文献

- [1] 井上「磁気軸受ホイールの回転試験とジャイロ運動の安定性」、計測自動制御学会論文集 Vol.23, No.3, (1987), pp.294-300
- [2] 井上, 二宮「磁気軸受ホイールを搭載した人工衛星の姿勢運動の安定性と制御」、計測自動制御学会論文集 Vol.25, No.10, (1989), pp.698-705
- [3] 佐藤「人工衛星の姿勢制御用磁気軸受フライホイール」、計測と制御, Vol.38, No.2, (1999), pp.119-121
- [4] 齊藤, 堀内, 福島, 井上「傾斜磁極磁気軸受ホイールの開発 (第 1 報, 磁気軸受制御系設計とセンサ・磁極面歪みの補正)」, 日本機械学会論文集 (C 編) Vol.71, No.705, (2005), pp.1429-1437
- [5] 井澤, 鈴木, 二宮, 橋本, 坂井, 中島, 星野, 安斎, 大原, 佐藤, 井上, 堀内「高信頼・低擾乱磁気軸受ホイールの研究開発」, 第 46 回宇宙科学技術連合講演会 (2002) 講演 No.3D9
- [6] 佐藤, 齊藤, 福島, 今村, 浜, 小番「磁気軸受ホイール実験装置 (MBW) の開発」, 第 48 回宇宙科学技術連合講演会 (2004) 講演 No.2A09
- [7] 佐藤, 齊藤, 今村, 浜, 小番「磁気軸受ホイール実験装置 (MBW) の開発」, 第 50 回宇宙科学技術連合講演会 (2006) 講演 No.3C13



佐藤 典夫 略歴  
1987 年入社, 現在, 宇宙機器部  
衛星制御システム課



齊藤 光伯 略歴  
1999 年三菱電機入社現在, 先端技術総合研究所メカトロニクス技術部機械動力学グループ 工学博士

# 電子マネー対応駐車場システム

長峯 光寛, 清水 孝敏, 稲川 宏朗

電子マネーは「一人一枚時代」を迎え、現金に代わる手軽な決済手段として広く普及してきている。駐車場における電子マネーの活用として、キャッシュレス、チケットレスを実現した電子マネー対応駐車場システム及び電子マネー対応専用の電子マネー専用駐車場システムについて、そのメリットなどを事例を交えながら報告する。

## 1 まえがき

近年駐車場システムは無人化が進み駐車料金の精算が自動化されている。この自動精算には硬貨や紙幣の他、クレジットカード、サービス券などによる決済方法が広く使われてきている。一方、電子マネーは以下の通り普及してきている。

- ① 2001年のSuicaによるIC乗車券、「Edy」電子マネーサービス開始、2004年のSuica電子マネーサービスへの用途拡大から鉄道やバスなどの公共交通機関でのICカード乗車券と電子マネー対応が普及している。
- ② 上記に合わせて駅中、駅周辺の店舗、自動販売機での電子マネーの導入及び普及が進んでいる。
- ③ 電子マネーカード（携帯電話対応を含む）の発行枚数は2008年度に1億枚を突破し、文字通り「一人一枚時代」を迎え、現金に代わる手軽な決済手段として広く普及してきている。

- ④ 駐車場における電子マネーの導入は、利用者の利便性向上、決済時間の短縮による混雑緩和や回転率の向上、機器の保守費用の軽減等が見込まれる。

従って、今後の駐車場でのサービス向上には電子マネーの対応が不可欠なものになってくると考えられており、本論文では電子マネー対応駐車場システムのキャッシュレス、チケットレス及び電子マネー対応専用の電子マネー専用駐車場システムについて、そのメリットなどを事例を交えながら報告する。

## 2 駐車場システムの概要

駐車場システムの方式には大別してロック板式とゲート式の2つの方式があり、ロック板式は車両の下でフラップ状の板（ロック板）を上昇させて車両の出場を阻止して駐車場料金を課金する方式、ゲート式は駐車場の入口出口でゲートバーを上げ下げすることで車両の入出場を制限し課金する方式である。

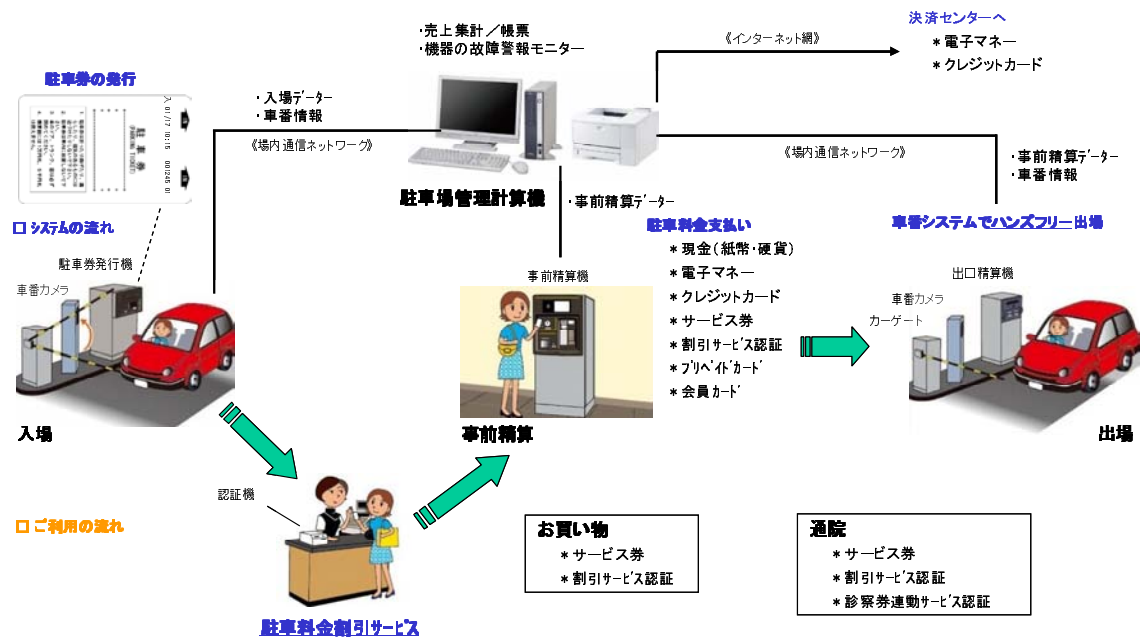


図1 ゲート式駐車場システム例

方式	キャッシュレス	チケットレス	自動出場※1	利用者コスト	駐車場インフラコスト	割引サービス	備考
電子マネー	○	○	△ 車番認識システム導入で対応は○	電子マネーカード費用	決済代行費用 回線費用	△	割引サービスはカードへの書込みが課題。または中央管理しネットワークで割引サービスする仕組み作りにより対応可能
DSRC (クレジットカード)	○	○	○	クレジットカード費用・車載器	DSRC リーダライタ 決済代行費用 回線費用	△	駐車券との併用等により割引サービスが対応可能
RFID	△ クレジットカード等とひと付けにより可能	○	△ 車番認識システム導入で対応は○	カード費用	RFID リーダライタ	△	中央管理しネットワークで割引サービスする仕組み作りにより対応可能

※1: 利用者の操作性を通信距離で評価し、近接(10cm程度)、近傍(70cm程度)は利用者の操作が必要のため△、遠隔型(70cm以上)は不要と考えられるため○とした。

表1 電子マネー、DSRC、RFIDの方法比較

以下では導入事例のあるゲート式について述べる。システム例を図1に示す。ゲート式は入口で磁気データを書き込んだ紙製の駐車券を受け取り入場し、出口で現金にて駐車料金支払いして出場するのが主流である。入口には駐車券発行機、出口には出口精算機(全自動精算機)を設置する他、事前精算機を設置して事前に精算することにより出口で駐車券を挿入するだけで出場可能なシステムとすることが可能である。

さらに、車番認識システム(車のナンバーを入場時に車番カメラで読み取り、入場したときの車のナンバーと駐車券とを関連付けする。事前精算機で精算完了した駐車券はナンバーと関連付けされているので出口の車番カメラで車のナンバーを読み取ることで精算済であることが認識できる。)により自動出場が可能となり、混雑緩和と出場時間の短縮による駐車場回転率の向上が可能になる。また、認証器と呼ばれる機器を設置することにより、駐車券を用いて駐車時間の時間割引や駐車料金の金額割引など多様な駐車料金割引サービスが可能である。またサービス券を発行することにより、認証器と同様のサービスを提供することが可能である。

### 3 駐車場における電子マネーの活用

駐車場のサービス向上手段として電子マネーの活用について代表的な3つの利点を述べる。表1に電子マネー、DSRC、RFIDの方式比較を示し、以下に詳細を示す。

#### 3.1 キャッシュレス

駐車場の料金は100円20分、1日最大1,000円など小額であり、出口精算機にて現金で支払うのが通例である。サービス券の投入などにより無料の場合もあるが、料金を支払う場合は車の窓を開けて小銭や紙幣を投入する。電子マネーを活用しキャッシュレス対応とすれば、以下のメリットが考えられる。

- ① 小銭や釣銭の授受がなく利便性が向上する。
- ② 現金収受がなく電子マネーカードのタッチだけで決済

完了するため車を機器へ近接させる度合いが少なく済む。

- ③ 後ろの車への気遣いなどストレスからの開放。
- ④ 収受時間の短縮による駐車場回転率向上と渋滞軽減。
- ⑤ 駐車場運用会社には、現金管理費用の軽減、機器の長寿命化、防犯性向上に繋がるメリットがある。

他のキャッシュレス方式の一例としてはDSRC方式がある。DSRC(Dedicated Short Range Communication)は身近なところでは高速道路等のETCに用いられており、双方向の無線通信を利用している。この方式の駐車場の応用としては車載器固有の識別番号をサービス提供者固有の利用者番号に変換して入場時に記憶し、出場時に利用者番号と照合して駐車時間に相当する料金を計算し、利用者番号に関連づけされたクレジットカードから駐車料金を引取るキャッシュレスを実現している。

#### 3.2 チケットレス

従来より駐車券、定期券は紙やPET(ポリエチレンテレフタレート)材等に磁性体を塗布したものを使用しており、駐車券は1精算ごとに廃却、定期券は期限まで使用した後に廃却としているものが多い。チケットレスは文字通り駐車券や定期券を使用しないもので、すでに所有している電子マネーカードを活用し、入口で電子マネーカードのID番号を読み取り、出口でID番号を照合することで実現する。利用顧客が入口で電子マネーカードをタッチして入場、ID番号を記録、出場の際に出口でタッチした電子マネーカードのID番号を読み取り、入場時に記録されたID番号リストを検索し、駐車時間を求めて料金を計算し、電子マネーまたは現金で精算する。定期券運用は定期番号としてID番号を登録しておけば入場時と出場時にチェックすることで対応が可能である。チケットレスでは以下のメリットが考えられる。

- ① 駐車券等がないため省資源効果がある。
- ② 磁気式駐車券リーダーのリードライト可動回数減により駐車券によるトラブル減が見込める。

③ 保守費用の軽減や機器の長寿命化に寄与できる。

チケットレスの駐車場として他の実現方式の一例として UHF 帯の RFID (Radio Frequency IDentification) を活用した方法がある。通信距離は 70cm 以下が主流でカードをかざす操作が必要であった。最近では 3m 前後のものも実用化されており、かざす操作が不要となり幅広い車種への対応が可能となる。業務車両専用駐車場や工場入退場システムなどへの応用が考えられる。

3.3 自動出場

駐車場出口での出場の際は操作不要で自動出場できることが望まれる。電子マネーでは出口での決済(カードをリーダにかざす)が必要である。車番認識システムを導入し連動させることにより、自動出場は電子マネー利用においても対応可能となる。入場したときに電子マネーカードの ID 番号を読み取り、車のナンバーと関連付けする。事前精算機で ID 番号から料金を計算、駐車料金を精算後、精算完了した ID 番号とナンバーを関連付けする。出口では車のナンバーから精算済が確認できるので出場 OK とする。利用者の操作は不要で自動出場が可能となる。

駐車場システムへの電子マネーの活用には上記のとおり  
の利点がある。利用者コストとしては電子マネーと RFID  
ではカード費用負担があり、DSRC はカード費用に加え  
てクレジットカード費用が必要となる。また運用する駐車  
場インフラコストとしては機器ハードウェアの導入費用の  
他、維持費用として電子マネーの場合は決済代行費用、決  
済サーバーへの通信回線費用、DSRC の場合はクレジット  
カードの決済代行費用と通信回線費用が必要となる。

4 電子マネー対応駐車場システムの導入事例

PASMO, P-PASS(「Edy」)でのキャッシュレス、チ  
ケットレス対応駐車場

財団法人東京都道路整備保全公社は、PASMO カード、  
P-PASS カード(財)東京都道路整備保全公社が発行す  
る「Edy」付き会員カード)を使用したキャッシュレス、チ  
ケットレス対応の公共駐車場 IC サービスを実現した。図  
2, 図 3 に外観を示す。PASMO カードは鉄道駅とのシーム  
レスな利用、電子マネーによるキャッシュレスとチケット  
レスを実現し、図 4 に示す P-PASS カードはポイントサー  
ビス、電子マネー「Edy」によるキャッシュレスとチケット  
レスのサービスが利用可能である。

駐車場入口では図 5 に示す駐車券発行機に PASMO カ  
ードをかざすことにより、駐車券を発行することなく車両  
の入場を可能とし、駐車場出口では図 6 に示す全自動精算  
機に駐車場入口で使用した PASMO カードをかざすことによ  
り、駐車料金の計算、PASMO の電子マネーから駐車料金の



図 2 錦糸町パークタワー外観



図 3 錦糸町パークタワー入口  
(チケットレス対応駐車券発行機)



図 4 P-PASS カードイメージ

「(財)東京都道路整備保全公社ホームページ」より引用



図 5 駐車券発行機

精算が行われ車両の出場を可能としている。また、P-PASS  
カードでも同様の操作により駐車場の入出場、駐車料金の  
精算を可能としている。

4.1 入場装置でのチケットレス対応

駐車場入口に設置される駐車券発行機には図 5 に示す  
とおり、それぞれのリーダライト選択ボタンと PASMO  
用リーダライト及び P-PASS 用リーダライトを実装して  
いる。





図6 電子マネー対応全自動精算機

(1) PASMO での利用方法

- ① 入場時の電子マネーカード選択をするため選択ボタンを押し、PASMO 用リーダライタを活性化させ、電子マネーの選択を明示的に行なう。
- ② 駐車券発行機のリーダライタに PASMO カードをかざす。
- ③ 駐車券発行機は、PASMO カードから PASMO の ID 番号を読み取り、入車日時と共に入車情報として管理計算機に通知する。
- ④ 入車可としてゲートを開く。

P-PASS カード使用時は、選択ボタンにより、P-PASS 用リーダライタを活性化させてから同様の操作により入場可能となる。また PASMO、P-PASS カードを持たない利用者は駐車券発行ボタンにより駐車券を発行し入場する。

4.2 出口装置でのキャッシュレス対応

駐車場出口に設置される全自動精算機には PASMO 用リーダライタ、及び P-PASS、「Edy」用リーダライタを実装しており、図6に示す電子マネー対応全自動精算機で現金、クレジット決済に加え、キャッシュレスとチケットレスを実現している。

(1) PASMO での利用方法

- ① 選択ボタンにより、PASMO 用リーダライタを活性化させる。(入口装置に同じ)
- ② 駐車場利用者は、出口精算機のリーダライタに PASMO カードをかざす。
- ③ 出口精算機は、PASMO カードから PASMO の ID 番号を読み取り、管理計算機に在車照会を送る。
- ④ 管理計算機より在車情報の通知を受け、入車日時から駐車料金を計算する。
- ⑤ PASMO の電子マネーより駐車料金を引去り、出車可としてゲートを開く。
- ⑥ PASMO の ID 番号と共に出車日時を、出車情報として管理計算機に送る。
- ⑦ PASMO の電子マネーで料金精算が行われた場合、精算内容を PASMO 精算情報として管理計算機に送る。

PASMO カードで入車しなかった駐車場利用者は、駐車券を挿入して精算処理を行うことになるが、駐車料金の計算後 PASMO カードをリーダライタにかざすことにより、PASMO の電子マネーでの精算を可能としている。P-PASS カード使用時は、選択ボタンにより、「Edy」用リーダライタを活性化させてから同様の操作により出場、料金精算可能となる。なお P-PASS カードで入場し PASMO カードの決済またはその逆は、利用者の意図しない決済の可能性や操作の煩雑性があり不可としている。入場及び出場のデータの流れを図7に示す。

4.3 事前精算装置でのキャッシュレス対応

図1の駐車場システム例に示す事前精算機を活用することによって、利便性と回転率向上等が実現できる。事前精算時に駐車場管理計算機に精算済のカード ID 番号や駐車券番号を記録し、出口精算機でカード ID、駐車券を読み取ったときに管理計算機に在車照会することで精算済の利用者

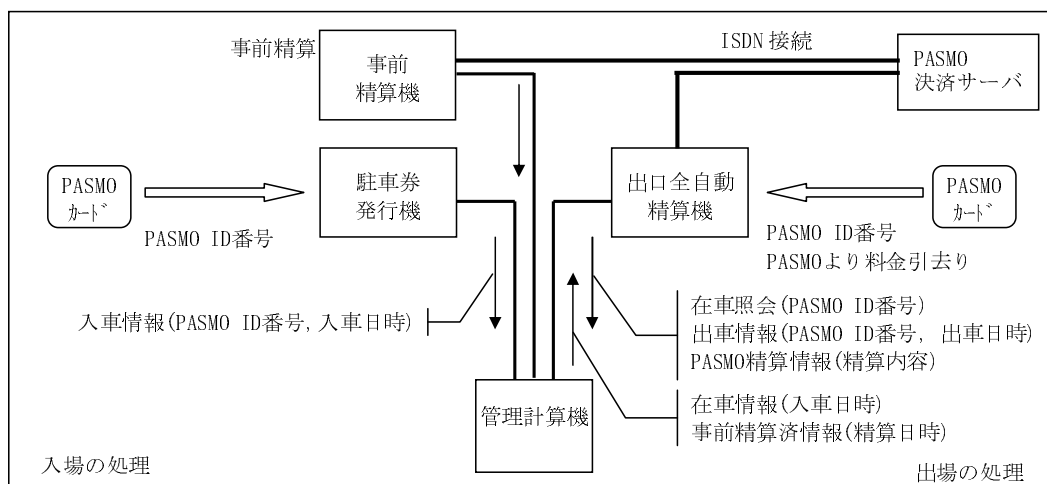


図7 データの流れ



図 8 電子マネー対応事前精算機

のゲートを開ることができ出口での出場時間の短縮が可能である。図 8 に示す電子マネー対応事前精算機で現金、クレジット決済に加え、キャッシュレスとチケットレスを実現している。

#### (1) PASMO での利用方法

- ① 選択ボタンにより、PASMO 用リーダーライタを活性化させる。(入口装置に同じ)
- ② 駐車場利用者は、出口精算機のリーダーライタに PASMO カードをかざす。
- ③ 事前精算機は、PASMO カードから PASMO の ID 番号を読み取り、管理計算機に在車照会を送る。
- ④ 管理計算機より在車情報の通知を受け、入車日時から駐車料金を計算する。
- ⑤ PASMO の電子マネーより駐車料金を引去る。
- ⑥ PASMO の ID 番号と共に精算日時を、情報として管理計算機に送る。
- ⑦ PASMO の電子マネーで料金精算が行われた場合、精算内容を PASMO 精算情報として管理計算機に送る。
- ⑧ 図 6 に示す出口精算機では、精算時に管理計算機に在車情報に加え精算済である情報を受取り、ゲートを開く。追加料金が必要であれば料金表示する。

なお事前精算機には P-PASS (「Edy」) にチャージする機能が搭載されている。

#### 4.4 管理装置 (PASMO 入出場の例)

駐車場管理室に設置される駐車場管理計算機は、通信回線により駐車券発行機と出口全自動精算機とを接続する。

##### (1) 入場時

- ① 駐車券発行機より入車情報の通知を受け、PASMO の ID 番号、入車日時を在車情報として記録する。

##### (2) 出場時

- ① 出口全自動精算機から在車照会の通知を受け、通知された PASMO の ID 番号から在車情報を検索する。検索結果を在車情報として出口全自動精算機に通知する。

- ② 出口全自動精算機から出場情報を受け、在車情報から該当の記録を削除する。
- ③ 出口全自動精算機から PASMO 精算情報を受けた場合、精算内容を PASMO 利用履歴として記録する。

#### 5 電子マネー専用駐車場システムと導入事例

電子マネー専用駐車場システムは、電子マネーカードで入場し、電子マネーカードで決済し出場する、キャッシュレス、チケットレスのシステムである。現金決済はなく、駐車券も不要である。4 項までに電子マネー対応駐車場システムのキャッシュレス、チケットレスのメリット、効果及び導入事例について報告した。電子マネー専用駐車場システムは電子マネー対応駐車場システムに加えて現金決済がなく、駐車券も不要であるため以下のメリットがある。

##### (1) 運営者のメリット

- ① 機器費用の低減 (現金系、駐車券発行部品の削除)
- ② 維持・管理費の軽減 (集金、現金管理、駐車券費用が不要)
- ③ 保守費用の軽減 (可動部がないため故障が少ない)
- ④ 信頼性と防犯性の向上 (現金収受がない)
- ⑤ 上記メリットにより駐車場料金を低価格化することが可能となり周辺駐車場との差別化が可能
- ⑥ 利用客の回転率向上とリピート率向上

##### (2) 利用者のメリット

- ① 利便性の向上 (現金不要、タッチで決済)
- ② シームレスな利用 (駐車場から公共交通機関まで 1 枚のカードで対応可能)
- ③ 低価格な駐車料金の利用
- ④ リピート利用によるサービスの享受

次に示す JR 恵比寿ビルは Suica カードによる電子マネー専用駐車場システムを実現した。駐車場は 2 場所あり、1F の平面駐車場と 2F のアトレ恵比寿駐車場がある。2F では現金の決済が可能な前述の電子マネー対応駐車場システムで、1F の平面駐車場は車番システムに連動した契約車 (月極定期) 用の駐車場である。定期登録時に車のナンバーと Suica の ID 番号を登録し、車番システムを活用して入出場時に登録された車のナンバーを読み取ることでゲートが開閉しハンズフリーの自動入出場が可能である。ナンバーを読み取れなかった場合は、Suica カードをタッチすることで入出場が可能である。将来対応として一般車での電子マネー専用入出場に対応しており、入口で Suica カードをタッチして入場、出口で Suica カードをタッチして精算し出場するチケットレス、キャッシュレス対応となっている。2 場所とも駅至近の駐車場であるがチケットレス、キャッシュレ



図9 JR恵比寿ビル1F平面駐車場入口 外観



図11 JR恵比寿ビル1F平面駐車場出口 外観



図10 電子マネー専用入場機



図12 電子マネー専用精算機

ス、また車番認識システムが導入されており利便性、シームレスな利用、回転率向上等のメリットがあると考えます。

### 5.1 入場方法

- ① 図9に示す駐車場入口で車番認識システムにより車のナンバーを認識する。
- ② 管理計算機に認識したナンバー情報を送り、定期登録されているか照会する。
- ③ 管理計算機からの定期登録情報の通知を受け、定期登録車であればゲートを開し入場する。一般車の場合はSuicaカードをタッチする。(将来対応)
- ④ 車のナンバーが認識できずにゲートが開しない場合は図10に示す電子マネー専用入場機にSuicaカード(PASMOカード等の交通系ICカード使用可能)をタッチする。一般車の場合はカード残額が設定額より少ない場合は警告ランプを点灯する。
- ⑤ 管理計算機にSuicaのID番号を送り、管理計算機からの定期登録情報の通知によりゲートを開する。一般車はタッチされたSuicaカードのID番号を管理計算機が記録する。

### 5.2 出場方法

- ① 図11に示す駐車場出口で車番認識システムにより車のナンバーを認識する。
- ② 管理計算機にナンバーの定期登録情報、在車情報を照会する。
- ③ 管理計算機より定期登録情報と在車情報の通知を受け

ゲートを開する。

- ④ 車のナンバーが認識できずにゲートが開しない場合は登録しているSuicaカードをタッチする。
- ⑤ 管理計算機に②項と同様にSuicaのID番号を照会し、定期登録情報等の通知によりゲートを開する。
- ⑥ 一般車の場合は入場したときに使用したSuicaカードを図12に示す電子マネー専用精算機にタッチし、管理計算機に照会し記憶されたID番号の在車情報を受ける。
- ⑦ 精算機は入場時刻から駐車料金を計算し表示する。
- ⑧ Suicaカードから料金を引取り、ゲートを開し出場する。

なお、オプションでクレジットカード決済用リーダーの搭載も可能である。

## 6 むすび


本論文では駐車場における電子マネー対応駐車場システム及び電子マネー専用駐車場システムのメリット、導入事例について述べた。今後も駐車場における電子マネー駐車

場機器を提供（販売）する側のみの満足ではなく、それを導入（購入）する駐車場運営者、使用する利用者全てが満足する顧客満足度の高い製品、システムを提供していきたいと考えている。


#### 謝辞

本論文の電子マネー対応駐車場システム及び電子マネー専用駐車場システムの導入及び論文作成に際しては、財団法人東京都道路整備保全公社様、株式会社ジェイアール東日本ビルディング様、株式会社アトレ（アトレ恵比寿）様のご指導、ご支援、ご協力を頂き実現できたものであり、深く感謝いたします。また、駐車場システムへの電子マネー導入にあたり、ご尽力いただいている関係各社に厚く御礼申し上げますとともに、今後とも電子マネーを活用した駐車場システムのさらなる展開と普及のため、ご協力、ご指導いただければ幸いです。

なお、掲載機器の電子マネーに関する商標等については以下の通りである。

※ 商標利用承諾済 第45号

※PASMO マーク  及び **PASMO** は が本商品・サービスの内容・品質を保証するものではありません。

※ の都合により予告なくPASMOカードが交換されることがあります。

※「Edy」はビットワレット(株)が管理運営するプリペイド型電子マネーサービスのブランドです。

※「Edy」はビットワレット(株)が提供する電子マネーサービスの名称です。

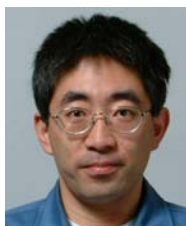
※JR 東日本 Suica 利用承認第39号

※Suica は東日本旅客鉄道株式会社の登録商標です。

※当該承認は、東日本旅客鉄道株式会社が本商品・サービスの内容・品質を保証するものではありません。

※東日本旅客鉄道株式会社の都合により、予告なく Suica カードが交換されることがあります。

#### 【執筆者紹介】



長峯 光寛 略歴

1986年入社。画像処理装置ハードウェア開発、交通管制諸機器の設計・開発に従事。現在社会・交通システム部、技術一課



清水 孝敏 略歴

1989年入社。画像処理装置、ビジュアル装置のソフトウェア設計、その後交通管制機器のシステム設計、ソフトウェア開発に従事。現在社会・交通システム部、ソフトウェア課



稲川 宏朗 略歴

1989年入社。海外（中国）駐在を含む交通管制機器営業に従事。現在社会・交通システム営業本部、駐車場システム営業統括部、駐車場システム販売推進グループ

# ETC用高速ゲートの開発

水上 博之

当社高速ゲートは1999年以降、各高速道路会社様のETCレーンにご採用いただいている。レーン上のシステムの一部として、ドライバに対し通行の可否を直接的に指示する機器である。このため、車両の接触など想定が難しい状況下での使用となるが、機能・性能・安全性・保守性等の向上を目的とした新機種の開発を行い2009年11月から納入を開始した。本論文では同機器の開発について報告する。

## 1 まえがき

ETC搭載車は年々増加しており、これに伴い高速道路でのETCレーン利用車両も増加している。当社高速ゲートは1999年以降九州から北海道まで広い地域で採用され全出荷台数は3,300台を超えている。このため使用環境は様々で、風雨や排気ガス、海からの塩分、高温、積雪などの自然環境の影響を受ける。またETCカードの挿入忘れ等に起因する開閉バーへの車両衝突への対策、さらに異常発生時の対応のし易さなど様々な機能が機器に求められている。これらを向上させるため、本開発では所定の基本性能、品質確保に加え安全性、保守性にも重点を置いた機器とすべく設計しており、これらについて報告する。

## 2 高速ゲートの概要

高速ゲートの外観を図1に示す。本装置はETCレーンに設置され、1つのレーンに対し左右両側に2台設置される場合が多い。主な機能は以下のとおり。

- ① 上位システムからの「開」、「閉」等の信号を受信し、開閉動作を行う。
- ② 開閉バーを0.5秒以内に開または閉動作する。(高速道路上での動作であるため高速での動作が要求されている。)
- ③ 自身の異常等の情報を上位システムに通知する。
- ④ 閉動作時に開閉バーの下に車両等が存在しないことを光透過型のセンサで確認し、センサが感知した状態では上位からの閉の信号があっても受け付けず、一旦開閉バーを開く。
- ⑤ 車両衝突時の安全性を確保する為、開閉バーに一定以上の力を加えると、進行方向に約90度折れ曲がり戻らないようロックがかかる。これを開閉バーのリリースと呼んでいる。開閉バーがリリースした場合、上位システムにリリース信号を出力する。リリース状態になった後復旧するには、手でリリースした開閉バーのロッ

表1 主な高速ゲートの仕様

No.	項目	仕様
1	形状	本体 屋外自立型 阻止棒 スレート
	2	外形寸法
3		表面処理
4	質量	本体 90kg以下(1台)
		チャンネルベース 10kg以下(1台)
5	電源	AC200V±10%,単相50/60Hz±5%
6	使用条件	温度 -20℃~50℃
		湿度 85%RH以下(結露なし)
		高度 1000m以下
7	絶縁耐圧	AC1500VA 1分間
8	絶縁抵抗	DC500V、10MΩ以上
9	接地基準	D種接地
10	耐雷	電源部 JIS C 5381-1 クラスII
		回路保護 JIS C 5381-21 劣化C2
11	阻止棒リリース力	10±3kgf・m
12	阻止棒リリース角度	90±4°
13	開閉動作寿命	300万回
14	操作パネルからの開閉操作	自機、相手機、両方に対し可能

クを解除し、通常的位置に戻し開閉動作、異常の有無の確認などを行う。

### 2.1 仕様

今回の開発では動作の信頼性、構造の簡略化、機能の向上を行った。表1に主な高速ゲートの仕様を示す。

### 2.2 特徴

今回開発した高速ゲートの主な特徴を表2に示す。当社従来品または他社品に対し差異となる主な特徴を記入している。

今回の開発では特に構造が複雑であったバーホルダの大幅な見直しを行った。バーホルダの外観を図2に示す。バーホルダの主な機能は以下のとおりである

- ① 開閉バーを保持する。バーの脱着は工具不要とする。
- ② 駆動部の力により開閉バーを開閉させる。
- ③ 開閉バーに車両が衝突した場合、リリースしロックを

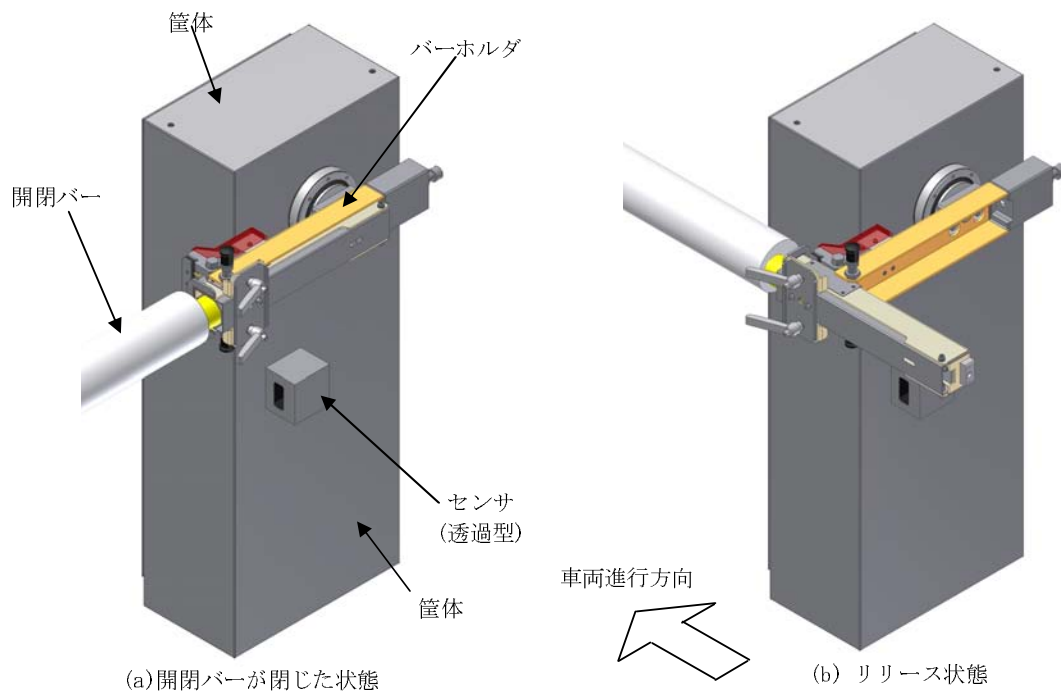


図1 高速ゲートの外観

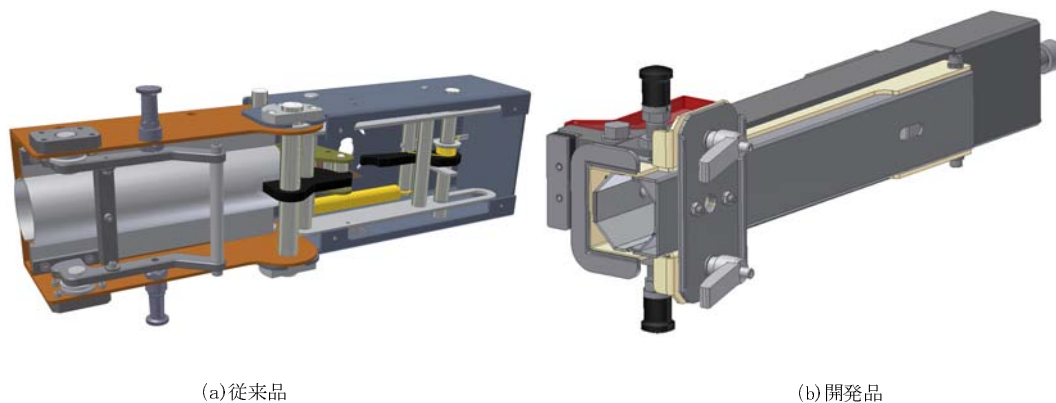


図2 バーホルダの外観

掛ける（車両、開閉バーへのダメージ軽減）。

④ リリースした場合、リリース信号を出力する。

これらの機能を持たせるため、バーホルダの構造は複雑となる。このため本開発では構造の簡略化を行った。従来品および開発品を図2に示す。構造が複雑になる一番の要因であるリリース動作に関連する部品の点数は従来品 55 点 開発品 17 点と約 69% 削減することができた。その他リリース時に受ける衝撃は従来部材の強度そのもので受け止めていたが、開発品では専用の緩衝材を設けることで積極的に衝撃力を吸収する構造とした。

また操作面では手動操作の機能向上を図った。復旧後の動作確認等で手動スイッチでバーの開閉を行うが、1 台ずつ動作させ確認を行う場合、従来は左右それぞれの高速ゲート機器の内部にある操作パネルによる操作が必要であった。開発機では左右どちらからでも、自機、相手機、両方につい

て開閉バーを操作することを可能にした。これによりレーンを横断する回数を減らすことが出来た。高速道路のレーン上の移動は命に関わる危険な作業であり、この機能により作業者の安全性向上が図られた。

### 3 評価

高速ゲートの開発の評価においては、一般的な性能試験に加え、300 万回の開閉動作、車両衝突に対する耐久性の確認を行うため、構造解析による設計評価に加え実機による評価を実施することで品質を確保した。

車両衝突は避けられない問題であり、繰り返し発生する衝突により開閉バーの破損、ゲート装置へのダメージの蓄積による故障が発生する可能性がある。車両衝突時の衝撃は、衝突速度、衝突位置、車体形状などにより大きく異なり、一律に定義することが難しい。このため、本開発時は衝突の条

表 2 今回開発した高速ゲートの主な特徴

部位	項目	当社従来品の方式	開発品の方式	特徴
駆動部	駆動方式	リンク式	リンク式	・当社にて従来から実績のある方式 ・車両衝突時の衝撃等がモータに伝わり難い ・開閉バーの速度が連続的に変化するため動作がスムーズ
	駆動力軽減方式	スプリング式	カウンタウェイト式	・スプリング式に比べ構造がシンプルとなり、部品点数削減 (8点→1点)
	モータ	DC ブラシレスモータ	DC ブラシレスモータ	・当社にて従来から実績のある方式 ・サーボモータに比べ廉価
ハーホルダ部	リール機構	カム式	プランジヤ方式	・構造簡略化部品点数削減 (55点→17点) ・リール力調整機構の簡略化 ・衝撃緩衝材の使用により単に部品の強度を上げるのではなく、積極的に衝撃を吸収することで安定した性能を維持
	固定方式	ボルト式	ナット式 (緩み止め機能付)	・固定に使用するネジのサイズアップ、素材強度アップ、緩み止め機能付ナットの採用によりネジロック剤不要とし整備性を向上させた。
	バー脱着方式	ボルト式	レバー式	・締付けネジ部は緩み止め構造とすることで、締付力のバラツキによる緩みの進行を抑制。
制御部	構成	シーケンサ	基板	・機器の異常、各種センサの状態の確認は、従来シーケンサ上の LED の点灯によるものであり、マニュアルを参照する必要があったが、開発品では専用パネルに直接的に表示されるため直ぐに状態を把握することが出来る。
	制御方式	独立制御	独立制御	・機器1台毎に独立した制御部を持つため、車両衝突等により左右に設置した片側の機器が故障しても基本的に継続して運用可能。 ※1 (制御部を片側にしか持たない他社製親子制御の場合、親側が故障するとレール閉鎖となる)
	開閉バー操作	自機のみ可	自機/相手機/両方可	・自機のみ開閉、相手機のみ開閉、両方開閉を左右どちらからでも操作可能。これによりレールを行き来する回数を減らすことが出来るため、点検等を安全かつ効率的に実施することが出来る

※1 車両を検知するセンサが使用できない場合は安全上の注意が必要。

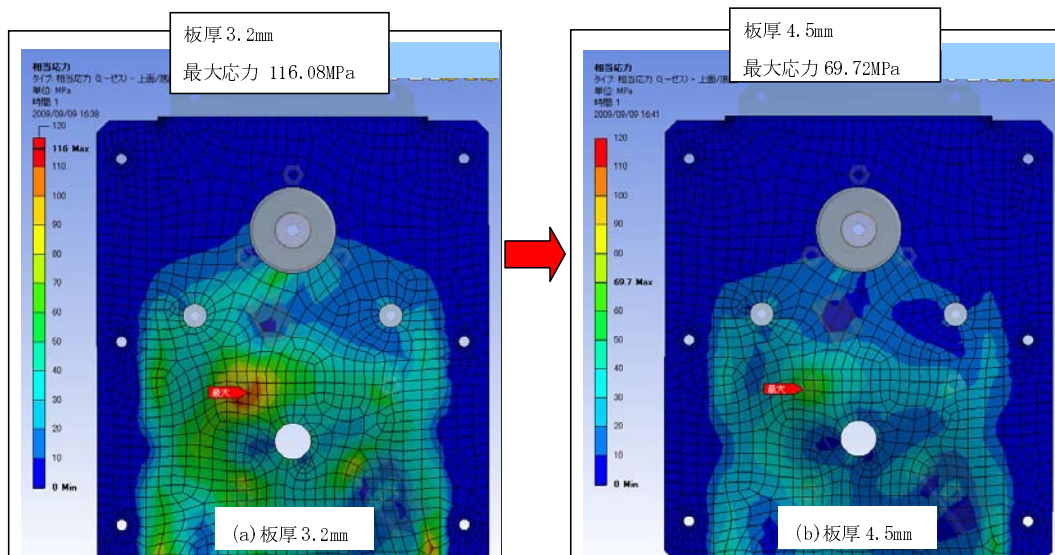


図 3 ベースでの開閉バー動作時発生応力

件をあらかじめ設定し、設計段階での机上評価及び実際の車両を用いた衝突試験による評価を実施した。車両による衝突試験では時速 20km, 1,000 回等の衝突にて問題ないことを確認した。

### 3.1 構造解析による評価

#### (1) 駆動部の解析

- ① 駆動部のベースの素材である鋼板の 300 万回信頼度 99.9% を保証する許容応力値は、高サイクル疲労曲線図データベースより 62.25MPa である。
- ② 板厚 3.2mm での開閉バー動作時最大発生応力は解析の結果から 116.08MPa であることが分かった。板厚 3.2mm におけるベースでの開閉バー動作時発生応力を

図 3(a) に示す。

- ③ 板厚を 4.5mm に変更した場合の開閉バー動作時最大発生応力は解析の結果から 69.72MPa であることが分かった。板厚 4.5mm におけるベースでの開閉バー動作時発生応力を図 3(b) に示す。
- ④ ベースに発生する応力は、図 4 に示す開閉バー動作時のひずみ量履歴の波形より片振りであるため換算後の応力値は 69.72MPa に対し 34.85MPa となる。この結果は ① の 62.25MPa より小さく、問題ない。

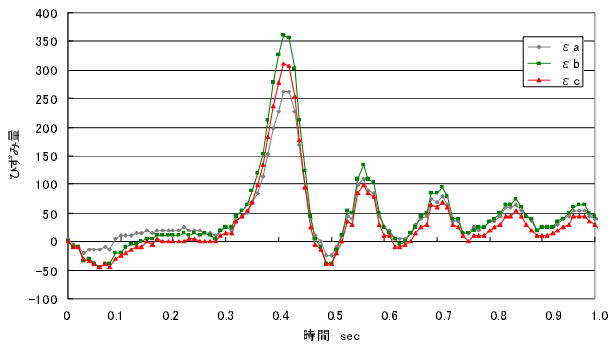


図4 開閉バー動作時のひずみ量履歴

(2) バーホルダの解析

バーホルダについても駆動部と同様に解析を行い最大応力発生が発生していた部分にリブを追加することで最大応力 209.4MPa を 111.7MPa に低減した．これは片振りの応力振幅値に変換すると 55.87MPa であり，開閉動作 300 万回を保証する 62.25MPa より小さくに対し問題ない．バー

ホルダケースでの開閉バー動作時発生応力を図 5 に示す．またリリース時の衝撃を吸収するストッパ形状の変更よりリリースヒンジ穴への応力を低減した．リリースヒンジ穴の動作時発生応力を図 6 に示す．

3.2 実機による確認試験

解析により問題が無いことを確認した試作機に対し，実際の車両衝突および連続開閉動作を行った．主な内容を以下に示す．

(1) 衝突試験

時速 20km にて閉状態の開閉バーに車両を 1,000 回衝突させた．衝突後の確認項目を表 3 に示す．全項目問題ないことを確認した．

(2) 連続開閉動作試験

開閉動作 300 万回を連続して実施した．試験期間は約 100 日を要したが，問題なく完了した．連続開閉動作 300 万回後の確認項目を表 4 に示す．

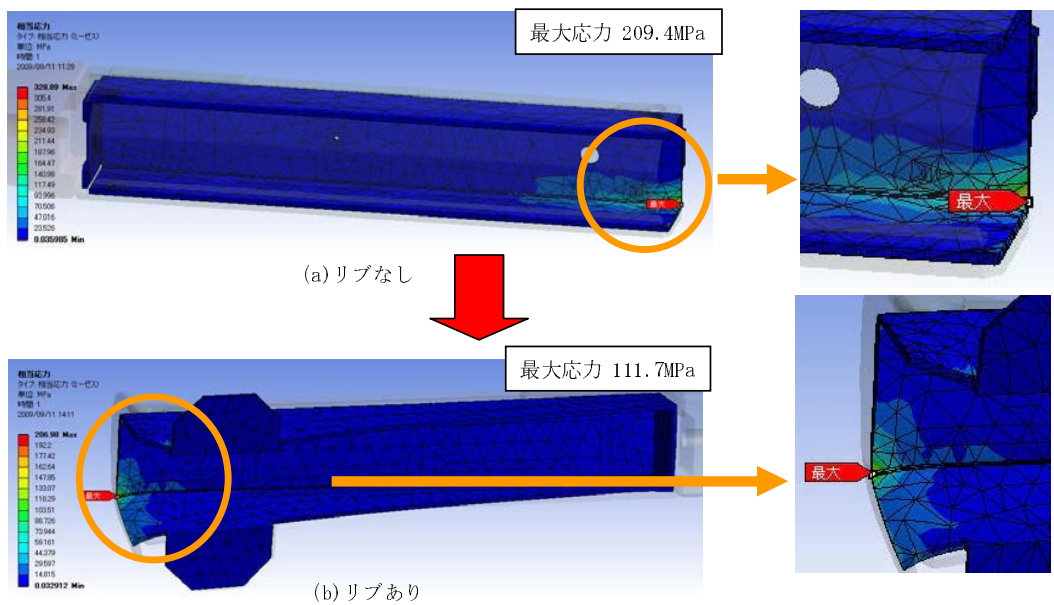


図5 バーホルダケースでの開閉バー動作時発生応力

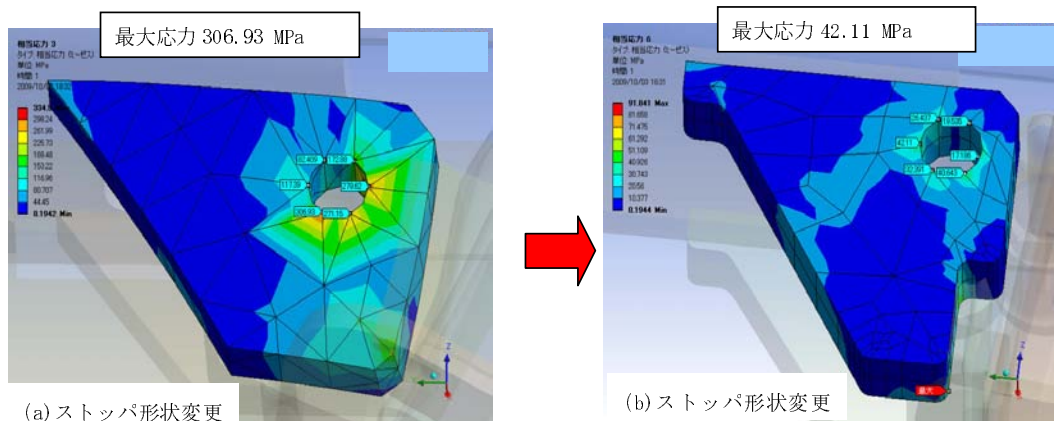


図6 リリースヒンジ穴の動作時発生応力



表 3 衝突後の確認項目

NO	主な確認項目
1	開閉機能
2	リリースロック機能
3	リリース検知機能
4	リリース角度
5	リリース軸ねじ緩み
6	レバー緩み
7	バーホルダ固定ねじ緩み
8	リリース力変化
9	クッション厚さの変化
10	クッションの変形
11	各構成部品の変形
12	各構成部品の亀裂
13	ストッパ当たり面の変形
14	阻止棒の歪み
15	ボールの変形
16	ボール受けの変形

表 4 連続開閉動作 300 万回後の確認項目

NO	主な確認項目
1	軸受けの磨耗
2	軸受けのガタ遊び
3	部品の変形
4	異音
5	各構成部本の変形
6	各構成部品の亀裂
7	リリース力変化
8	錆の発生

#### 4 むすび

今回の開発の成果として、信頼性の確保、手動操作の機能向上による安全性向上および構造の簡略化を達成することができた。2009 年 11 月以降製品の出荷、運用を開始した本高速ゲートは今後更に採用されていくものとする。

#### 謝 辞

今回の開発において、三菱電機株式会社 設計システム技術センターの方々の多大な協力を頂き、品質確保を達成することができた。この場を借りて感謝いたします。

#### [執筆者紹介]



#### 水上 博之 略歴

1990 年入社。交通管制諸機器の設計・開発に従事。現在社会・交通システム部、技術二課

# エスカレーター利用者の乗り過ぎ検知センサ

関 真規人\*, 木村 直哉, 市原 淑雄, 佐々木 秀一, 鈴木 暢夫

エスカレーターでの事故を防止するための画像センサについて述べる。本センサはステレオカメラにて撮影された映像をリアルタイムに解析し、エスカレーターへの乗り過ぎ状態を検知する。ステレオカメラを使用することにより、人の眼と同じ原理で三次元空間情報を知覚し、エスカレーターに搭乗した人数を正確に検出することができる。本センサは三菱電機ビルテクノサービス(株)との共同開発品であり、音声アナウンス装置などと組み合わされて同社からシステム販売されている。

## 1 まえがき

エスカレーターは非常に便利な移動手段である。しかし、乗り方を誤ると大きな事故につながる可能性がある。例えば、イベント会場に詰め寄せた群衆が先を急いで乗り込んだことにより、定員オーバになってステップが逆走してしまい、大事故に至ったことは記憶に新しい。

こうした事故を防止するためには、事前の周到的対策が必要である。ただし、それには限界があるため、加えて、事故発生前の危険因子をリアルタイムに捉え、周囲への注意喚起やエスカレーターの運転制御など積極的な軽減措置を行うことが重要となる。

当社はステレオカメラを用い、画像解析によって視野内を通過する人物を検知するセンサを開発してきた。本センサの特徴は、画像から得た距離情報を基に検知処理を行うため、カメラからの距離に依存せず人の移動速度を精度よく測定できる事や密集した状況での人と人の分離能力が高いことである。昨年度は移動速度を精度良く測定できる点を活かし、視野範囲における人(集団)の占有率と同集団の群速度をパラメータとして混雑検知センサを実現した。本年度は人と人の分離能力が高い点を活かし、エスカレーターステップへの異常な乗り込みを検知する乗り過ぎ検知センサを開発した。これらのセンサは三菱電機ビルテクノサービスをエスカレーターの乗り口に設置し、エスカレーター事故要因を未然に検出する「パスサーチ」として販売している。

本論文では、エスカレーターステップへの異常な乗り込みを検知する乗り過ぎ検知センサについて報告する。本稿で述べる画像センサは、危険因子のひとつとして異常な乗り込み状態をリアルタイムに検知するためのものである。センサはステレオカメラを内蔵しており、画像解析によって視野内を通過する人物を個別に検出する。そして、1 ステッ

プあたりの搭乗人数とその継続時間によって定義される「異常な乗り込み状態」を検知する。これをトリガとすれば音声アナウンス装置による注意喚起などが行える。

## 2 人物検知関連技術

人物を検出するセンサは、すでにさまざまな方式で実用化されている。例えば、1台のカメラによる画像式センサ[1]は、小型で取り付けも比較的容易であるという点で優れる。既存の監視カメラを流用できる場合もある。また、学術的にも新しい検出方法が日々研究されており、進歩している。特に昨今では統計的学習による手法が多く提案されている。しかし、1台のカメラ画像だけでは限界があり、複雑な背景や人物の重なりが多い場合には人物の分離が難しく、検出精度が低下することがある。

他の方式として、スキャン型レーザ測距センサを用いたタイプもある[2]。照明条件に左右されないというメリットがあるが、原理上、スキャンする1つのライン上でしか距離情報が得られないため、やはり人物同士の重なりには弱い。混雑した環境下で使用する場合には、複数台のセンサを組み合わせるなどの工夫が必要となり、大掛かりなシステムとなってしまうことが問題である[3]。

TOF(Time of Flight)センサにより得られる三次元空間情報(エリアの距離情報)を用いて高精度に人物を検出する製品もある[4]。TOFセンサは、前述のレーザ測距センサと同様に、自らが発した光が対象に当たって戻ってくるまでの時間によって距離を計測する。光源にLEDを用いることが多いが、光の強度を確保するため広範囲に照射することはできず、計測する範囲が限られてしまうという問題がある。

これらの問題に対し、ステレオカメラを採用した当社方式によれば、人の眼と同じ原理で三次元空間情報を知覚することができるため、図1に示すような複雑な背景や混雑した状態でも高精度に人物を分離・検出することができる[5]。照明変化等にも頑健である。また、カメラであるため、

\* 三菱電機株式会社先端技術総合研究所センサ情報処理システム技術部

ある程度の視野を持つこともできる。

以下では、まず、本センサの概要を紹介する。そして、センサに搭載している検知アルゴリズムについて述べる。最後に、実フィールドや社内での試験結果を示してセンサの有効性を明らかにする。

### 3 センサ概要

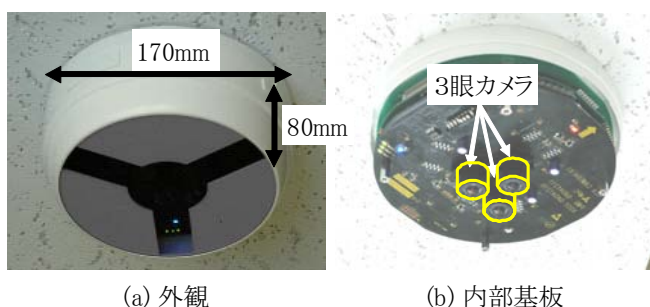
図2(a)にセンサの外観を示す。本センサは、3つのCCDカメラを搭載した画像撮影部と汎用マイコンによる画像解析部を一体化したコンパクトな構造となっている。同図(b)を見て分かるように、3つのCCDカメラは1枚の基板上に少し離れて配置されており、視点の異なる3枚の画像が同時に撮影できるようになっている。また、汎用マイコンを搭載していることから、アプリケーションプログラムを変更することで他の用途にも流用可能である。実際に、当社では今回のセンサ以外にも同一のH/Wを用いてセキュリティ施設への不正侵入を防止するための共連れ検知センサや一方通行ゲートからの逆流を検知するセンサ、群集の滞留を検知するセンサを実用化している[6, 7]。

本センサは、天井やポールなどに取付けられ、人物を見下ろすように撮影することを前提としている。これは、人同士による隠蔽を少なくし、より高い検知精度を得ることを期待しているためである(図3)。

図4は、本センサをエスカレーター乗り口に設置した適用例である。このシステムでは、異常な乗り込み状態を検知したときに、これから乗ろうとする群集に対して注意を



図1 エスカレーターに押し寄せた群集(危険な状態)



(a) 外観

(b) 内部基板

図2 3眼ステレオカメラを搭載したコンパクトなセンサ

促すアナウンスを行う。また、エスカレーター管理者に対して報知することもできる。

## 4 検知アルゴリズム

### 4.1 三次元空間情報の抽出

前述の通り、本センサでは視点の異なる3枚の画像が同時に撮影される。この3枚の画像から視野内における三次元空間情報を抽出する[6, 7]。

複数のカメラ画像から三次元空間情報を抽出する手法としては、古くより「ステレオ視」が知られている。これは三角測量の原理に基づいている。以下では説明を簡単にするために、焦点距離の等しいカメラ2台が光軸を平行にして水平に設置されている場合について述べる。ここで、空間中の点 $P(X, Y, Z)$ が各画像においてそれぞれ $p_l(x_l, y_l), p_r(x_r, y_r)$ として観測されたとすると、以下の関係式が成り立つ(図5)。

$$X = \frac{b(x_l + x_r)}{2d} \quad (1)$$

$$Y = \frac{b(y_l + y_r)}{2d} \quad (2)$$

$$Z = \frac{bf}{d} \quad (3)$$

ただし、 $f$ は焦点距離、 $b$ は基線長、 $d$ は視差( $x_l - x_r$ )で

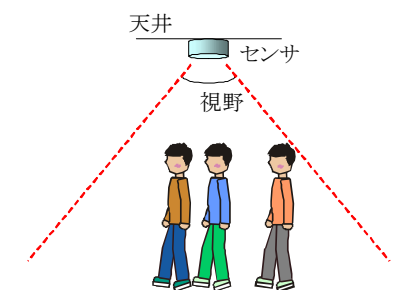


図3 センサの設置条件(天井・ポール据付, 下向き設置)

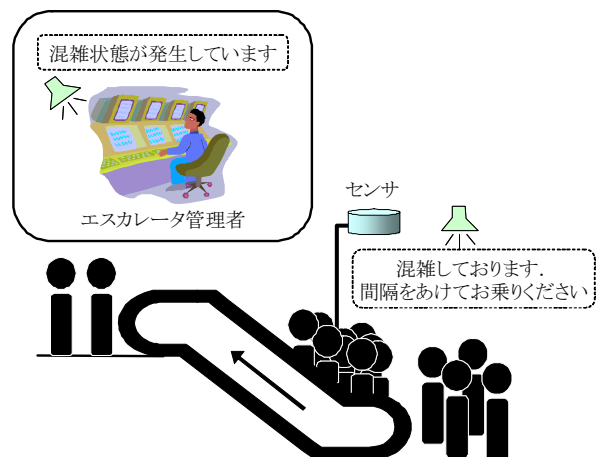


図4 エスカレーター乗り口への適用例(音声アナウンスと管理者への報知システム)

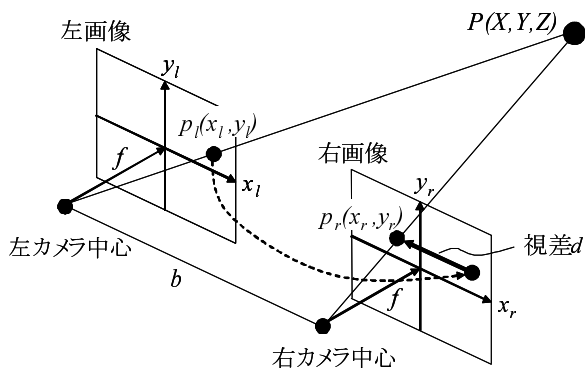


図5 ステレオ視(三角測量に基づいた距離計測)の原理

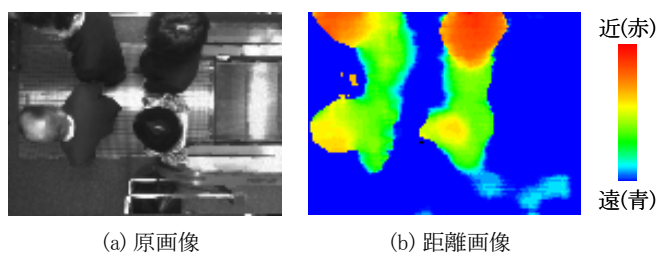


図6 ステレオ視による三次元空間情報(距離画像)の抽出例

ある．したがって， $f, b$  を既知とすると，点  $P(X, Y, Z)$  の画像間での対応点  $p_l(x_l, y_l), p_r(x_r, y_r)$  から，点  $P(X, Y, Z)$  の三次元位置が算出される．ここで対応点とは，左右のカメラから物体上の同一点  $P(X, Y, Z)$  を見たときの，各カメラ上の位置  $p_l(x_l, y_l), p_r(x_r, y_r)$  のことである．2点  $p_l(x_l, y_l), p_r(x_r, y_r)$  の対応は事前にはわからないため，一方の点の周辺の画像上のパターン等の特徴量を手掛かりに他方の点の位置を探索することになる．換言すれば2点の対応を求めることで点  $P(X, Y, Z)$  の三次元位置が分かる．2点は図5上に示す視差  $d$  だけ離れている．三次元空間中の奥行が変化すると，それに伴い視差  $d$  も変化する．

ここでは，ブロックマッチング手法を用いて対応点を探索する．ブロックマッチング手法では，一方の画像中の各画素ごとに，その周辺を囲う局所的な矩形領域(ブロック)を設定し，その矩形領域内の明暗やエッジの配置パターンを用いて，他方の画像から類似するパターンのブロック位置を求めることで対応点の位置を検出する．

対応点探索による三次元位置の算出をすべての画素に対して行うことで三次元空間情報をあらかず距離画像が生成される．図6に距離画像の例を示す．図6(a)は原画像のひとつであり，同図(b)はそれに対する距離画像である．距離画像は，カメラから物体までの距離に応じた色で表示されている．

一般に，画像上のすべての画素で対応点を正しく求めることは非常に難しい．シーンによっては似たようなパターンが複数存在したり，正しい位置であっても視点の違いに

よる見え方やランダムノイズの影響により画像間で完全に一致することがないためである．

本センサでは，カメラを3台に増やすことで，シーンに関しての情報を十分に収集し，対応点の信頼度を向上させている．この3眼ステレオ視では，ひとつの基準カメラに対して，2組のステレオ画像対を形成し，それぞれのステレオ画像対から得られる結果を統合することで，対応誤りを軽減させることができる．

また，3眼ステレオ視は，対応点の信頼度が向上するだけでなく，システムの信頼度も向上させることが可能である．3眼ステレオの場合，仮に1台のカメラが故障した場合でも暫定的に残りの2台で三次元情報が得られるため，最低限の機能を維持することができるという利点がある．

#### 4.2 人物の検出

得られた距離画像をもとにして，カメラの視野内を通過する人物を検出する．以下にその手順を示す．

##### (1) 背景分離

センサが固定されている限り，新たに出現する人物以外の背景物体は画像中において不動である．したがって，背景物体に対応する距離データを画像として予め学習しておけば，余計な背景物体をまず分離することができる．具体的には，新たに得られた距離画像から背景の距離画像の値を差し引くことによって背景分離(背景差分)を行う．これにより，差分後の距離画像には人物に対応する距離データのみが残っていることになる．

##### (2) 人物領域の検出

次に，残った距離データに対してクラスタリングを行い，個々の人物領域を特定する．図6(b)を見て分かるように，距離画像において，人物の距離データは頭頂部付近において極大値を形成する．そのため，極大値に基づいたクラスタリングを行えば，個々の人物領域を特定できるはずである．極大値に基づくクラスタリングには，Mean-Shift クラスタリング [8] がある．ある初期位置から開始し，その位置を中心とする円形の小領域内の距離の平均(Mean)を計算し，その小領域を探索空間内で微小に動かした場合の平均とを比較して，平均がより大きな方に位置を移動させる(Shift)．これを平均値が変わらなくなるまで繰り返せば，その位置に極大値が存在する．Mean-Shift クラスタリングは，クラスタ(ここでは人物)数が未知であっても分割できるといった特長があるが，反復計算を要するため処理コストが高いという問題がある．そこで，ここではMean-Shift クラスタリングの簡易的な方法として以下の手順で処理を行っている．

- i) 距離画像をもとに，距離別にスライスした  $N$  枚のレイヤ画像を生成する(図7)．

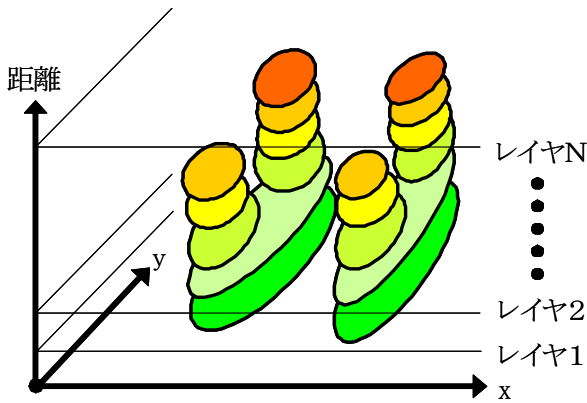


図7 図6(b)の距離画像を距離別にスライス表現したレイヤ画像

- ii) 床面側の下位レイヤから上位レイヤに向かって、背景分離で残った距離データ(領域)の連結関係にしたがって、複数の頭頂部を探索する。連結関係は木構造として記述する。
- iii) 出来上がった木構造の各枝に対する領域を個々の人物とみなす。ただし、末端の枝に属する領域が小さい場合はノイズとみなして排除する。また、頭頂部が所定レイヤに達していない場合も排除する。

### (3) 人物領域の追跡

さらに、個々の人物領域を時系列画像間で追跡し、移動方向、移動速度を算出する。その際、安定に追跡できないものはノイズとみなし排除する。追跡は画像間での最近傍探索によって行う。

### 4.3 乗り過ぎ状態の判定

移動方向をもとに通過した人物をカウントし、1ステップあたりの搭乗人数とその継続時間によってエスカレーターへの異常な乗り込み状態を判定する。例えばステップ速度が0.4m/sのエスカレーターの場合、ステップ奥行きが40cmであるため、1秒毎に1ステップ分走行することになる。ここで毎秒3人が通過しているとすると、各ステップ上に3人が搭乗していることになり、この場合は乗りすぎである。さらにこの状態が一定時間以上継続すると、異常な乗り込み状態であると判定する。

表1は判定条件の設定例である。ただしこの条件は全員がステップ上で静止していると仮定した場合であり、ステップ上を歩行する人物を考慮に入れていない。製品では通過時の移動速度からステップ上を歩行している人物を検出し、判定対象から除去する条件を実装している。

## 5 試験結果

エスカレーターへの乗り過ぎ検知に対する試験結果を示す。試験では、上りと下りのエスカレーターのそれぞれに

表1 エスカレーターへの異常な乗り込み状態の判定条件例

項目	条件
判定条件の設定例1	1ステップに3人搭乗した状態が1ステップでもあった場合
判定条件の設定例2	1ステップに2人搭乗した状態が5ステップ継続した場合

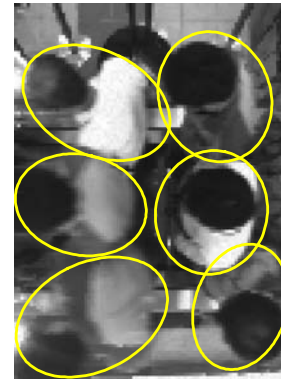


図8 模擬試験における異常な乗り込み状態の再現(センサから見た画像。黄色は人物)

表2 模擬試験における異常な乗り込み状態の検知結果

項目	シーン数	検知率(%)
判定条件1	10	100
判定条件2	14	100

において、連続した2名搭乗、3名搭乗、2名と3名が交互に搭乗した状態などを模擬し、乗り過ぎが判定できるか検証を行った(図8)。試験結果を表2に示す。判定条件は表1に従っている。また、通常のランダムな搭乗において誤検知が起こりにくいことも確認した。

## 6 むすび

本稿では、エスカレーターでの事故を防止するための画像センサについて述べた。本センサはステレオカメラにて撮影された映像をリアルタイムに解析し、乗り過ぎを検知することができる。実フィールドや社内で行った試験では、エスカレーターに搭乗した人数を正確に計測することが確認できた。また、乗り過ぎを模擬したシミュレーション試験でも、精度よく検知することができた。

乗り口に本センサを、降り口に滞留検知センサを設置し、音声アナウンス装置などと組み合わせられたシステムが「パスサーチ」の名称で、三菱電機ビルテクノサービス(株)から販売されている[9]。人が多く集まる駅や大型イベント施設に本センサが設置され、エスカレーター事故を効果的に

防ぐシステムとして、乗客の安全に寄与できることを期待している。

## 謝辞

多大なるご協力を頂きました関係者各位，日頃より貴重なご意見を頂きましたお客様各位に深く感謝致します。

## 参考文献

- [1] 技研トラステム, ”パロッシー客数情報システム”, <http://www.trastem.co.jp/p-palossie.01.html>.
- [2] 北陽電機, ”入退室・人数カウントシステム”, [http://www.hokuyo-aut.co.jp/14system/02retail/counting\\_sys.html](http://www.hokuyo-aut.co.jp/14system/02retail/counting_sys.html).
- [3] 帷子京市郎, 鈴木智之, 中村克行, 趙卉菁, 柴崎亮介, 仲川ゆり, ”レーザスキャナを用いた群集の追跡および流動の可視化”, コンピュータビジョンとイメージメディア研究会, 2007-CVIM-158, pp.229-236, 2007.
- [4] 萩尾健一, 藤井裕之, 河原英喜, 阪本健二, ”TOF型距離画像センサを用いた高精度「共連れ検知センサ」”, 松下電工技報, Vol.55, No.1, pp.43-48, 2007.
- [5] A. Ess, B. Leibe and L. V. Gool, ”Depth and Appearance for Mobile Scene Analysis”, IEEE International Conference on Computer Vision, pp.1-8, 2007.
- [6] ”人物検知センサ”, 三菱プレシジョン技報, Vol.3, pp.19, 2008.
- [7] 関真規人, 野口真身, 木村直哉, 市原淑雄, 佐々木秀一, 鈴木暢夫, 伊藤啓二, ”群集の三次元行動に基づく滞留検知センサ”, 三菱プレシジョン技報, Vol.4, pp.37-41, 2009.
- [8] D. Comaniciu and P. Meer, ”Mean Shift Analysis and Applications”, IEEE International Conference on Computer Vision, pp.1197-1203, 1999.
- [9] 三菱電機ビルテクノサービス, ”エスカレーター混雑検知システム「パスサーチ」”, [http://www.meltec.co.jp/press/pass\\_search.html](http://www.meltec.co.jp/press/pass_search.html).

## [執筆者紹介]



### 関 真規人 略歴

2008年入社。画像認識技術とその応用センサの開発に従事。技術開発部画像センサグループ。現在、三菱電機株式会社先端技術総合研究所センサ情報処理システム技術部



### 木村 直哉 略歴

1990年入社。低価格ビジュアル、パッシブレンジセンサ、戦術用画像処理装置の開発に従事。現在、技術開発部画像センサグループ



### 市原 淑雄 略歴

1988年入社。画像発生装置ハードウェア開発および画像処理装置ハードウェア開発に従事。現在、技術開発部画像センサグループ



### 佐々木 秀一 略歴

1985年入社。航空機搭載電子機器、レーダ信号処理装置、障害者支援機器、トーキングサイン等の設計・開発に従事。現在、技術開発部画像センサグループ

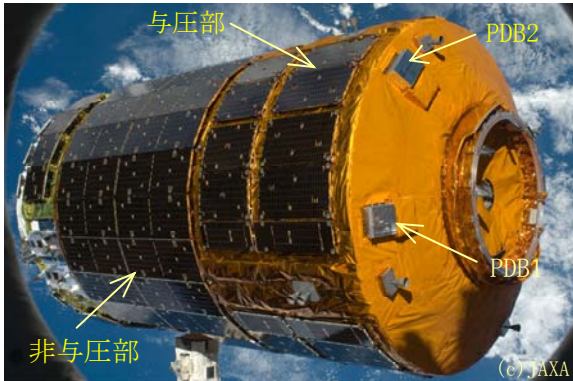


### 鈴木 暢夫 略歴

1977年入社。交通管制諸機器の設計を経て、超音波式、ループコイル式の車両感知器の開発に従事。現在、社会・交通システム部

# 宇宙ステーション補給機 (HTV) 技術実証機 与圧補給キャリア搭載 電力分配器 (PDB)

HTV 技術実証機ミッション完遂に貢献 現在運用機用搭載機器生産中



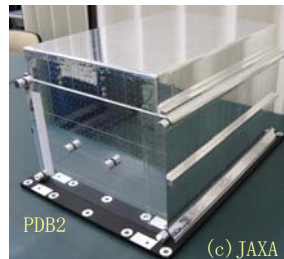
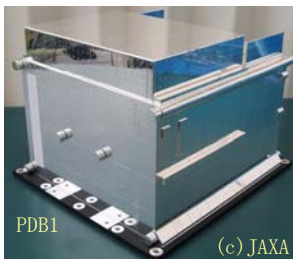
[ISSのロボットアームに把持されたHTV実証機]

HTV(H-II Transfer Vehicle)は、国際宇宙ステーション(ISS)に長期滞在している宇宙飛行士の食糧や衣類、各種実験装置など最大6トンの物資を運ぶことができる無人の軌道間輸送機です。技術実証機がH-II B ロケットにより2009年9月11日に打上げられ、10月31日のISS離脱、11月2日の大気圏再突入までの52日間で全ミッションを終えました。

PDB(\*1)はHTVの補給キャリア与圧部に搭載され、運用に不可欠な与圧部機器への電力供給、及び温度制御を行う重要な任務を果たしました。

現在、継続して運用機用搭載機器を生産中です。

\*1: Power Distribution Box



## ■特徴

PDBは各機能に対応したスライスモジュールを組合せたPDB1、PDB2各1台から構成され、飛行中及びISS係留中に次の運用を行います。

PDB1: 8枚スライス構造

与圧部内の各機器(圧力センサ、ベントリリーフバルブ、循環ファン、一般照明、煙センサ)へ電力を供給

PDB2: 18枚スライス構造

与圧部内のヒータ(120V系、50V系)へ電力を供給し、外部温度センサ信号入力と制御温度を比較して各機器の温度を制御

また、PDBは写真のとおり与圧部外装面のレール上に艀装され、3kW級の電力を扱う機器の放熱対策として、表面を全面的にシルバーテフロン(銀色アルミ

材料)で覆い輻射を利用した放熱設計としています。

## ■主要性能諸元

### ●外形寸法

PDB1: 373(W)×338(D)×262(H) (突起部除く)

PDB2: 473(W)×338(D)×262(H) (突起部除く)

### ●質量

PDB1: 19.6kg以下, PDB2: 24.4kg以下

### ●入力電圧

120V系電源: 118~126V

50V系電源: 30~52V

### ●消費電力

PDB1: 73W以下, PDB2: 80W以下

## ■主要機能

### <PDB1>

#### ●電源インタフェース機能

系統数: 4系統 (50V A/B, 120V A/B)

#### ●圧力センサ電力供給機能

出力電圧: 28±1V

#### ●ベントリリーフバルブ電力供給機能

内部電圧降下: 1.35V以下 (30V入力時)

出力電流: 0.50~0.85A (15V入力時)

#### ●ISS-DC/DC電力供給機能 (2系統)

電圧降下: 1.5V以下, 出力電流: 25A以下

#### ●循環ファン電力供給機能 (2系統)

電圧降下: 3.0V以下, 出力電流: 5.5A以下

#### ●一般照明電力供給機能 (2系統)

電圧降下: 2.0V以下, 出力電流: 0.6A以下

#### ●煙センサ電力供給機能 (1系統)

電圧降下: 2.0V以下, 出力電流: 0.02A以下

#### ●ディスクリート入力機能 (Dコマンド: 32ch)

#### ●ディスクリート入力機能 (DO-Aコマンド: 6ch)

#### ●アクティブバイレベル出力機能

(ABテレメトリ: 29ch)

#### ●パッシブアナログ出力機能 (PAテレメトリ: 1ch)

### <PDB2>

#### ●シリアル通信機能

信号形態: RS-422

#### ●電源インタフェース機能

系統数: 4系統 (50V A/B, 120V A/B)

#### ●ヒータ電力供給機能 (59ch)

電圧降下: 2V以下, 出力電流: 3.3A以下

#### ●アナログ処理機能

信号形態: パッシブアナログ入力

入力ch数: 109ch

#### ●ディスクリート入力機能 (DO-Aコマンド: 1ch)

#### ●パッシブアナログ出力機能 (PAテレメトリ: 1ch)

(写真提供: 宇宙航空研究開発機構構)

# 宇宙ステーション補給機 (HTV) 技術実証機

## 曝露パレット搭載 曝露パレット制御装置 (EPC)

HTV 技術実証機ミッション完遂に貢献 現在運用機用搭載機器生産中



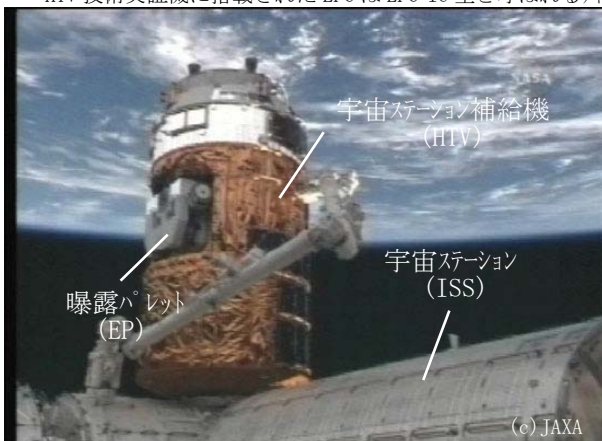
EPC(\*1)は、IHI エアロスペース殿が開発した、曝露ペイロード等を輸送する曝露パレット (EP, HTV 補給キャリア非与圧部に搭載) に艀装され、HTV 飛行中は、EP 及び EP に搭載されたカーゴ (曝露実験装置等) 内の温度センサからのデータ収集、ヒータへの電力供給を行います。また、宇宙ステーション (ISS) 「きぼう」係留中は上記機能の他、EP 搭載のカーゴを「きぼう」船外プラットホームへ移設するための着脱用パラフィンアクチュエータを駆動します。

宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 殿が開発し、2009 年 9 月 11 日に打上げられた技術実証機では、9 月 25 日、EP 搭載の 2 台の実験装置が「きぼう」船外プラットホームへ問題なく移設され、EPC として重要な任務を果たしました。

現在、継続して運用機用搭載機器を生産中です。

\*1: Exposed Pallet Controller

HTV 技術実証機に搭載された EPC は EPC Ic 型と呼ばれるタイプ



[写真は 2009 年 9 月 18 日 HTV が ISS に結合したところ]

### ■特徴

EPC は、HTV と ISS という 2 つの異なったシステムとのインタフェースを有しています。ロケット打上げから EP を ISS に結合するまでは HTV とインタフェースして機能し、EP が ISS 結合中は ISS とインタフェースして機能します。

また、構造は PDB 同様、各種要求に対応してモジュールの増減でフレキシブルに対応できるようスライス構造を採用しています。(13 枚スライス構造)

### ■主要性能諸元 (EPC Ic 型)

#### ●外形寸法

348 (W) × 332 (D) × 256 (H) (突起部除く)

#### ●質量

21kg 以下

#### ●入力電圧

HTV50V A 電源 : 29.5V ~ 52.0V

HTV50V B 電源 : 29.5V ~ 52.0V

ISS120V A 電源 : 104.0V ~ 127.5V

#### ●消費電力 (ヒータ出力電力は除く)

HTV50V A 電源使用時 : 39.5W 以下

HTV50V B 電源使用時 : 16.2W 以下

ISS120V A 電源使用時 : 40W 以下

[PAD (パラフィンアクチュエータドライブ) 駆動は除く]

### ■主要機能 (EPC Ic 型)

#### ●HTV 通信インタフェース機能

信号形態 : RS-422

#### ●ISS 通信インタフェース機能

信号形態 : MIL-STD-1553B

#### ●電源インタフェース機能

系統数 : 3 系統 (HTV50V A/B, ISS120V A)

#### ●アナログ処理機能

信号形態 : パッシブアナログ入力

センサ種別 : 白金センサ

測定温度範囲 : 0°C ~ +100°C (12ch)

-40°C ~ +60°C (9ch)

分解能 : 8bit

精度 : ±3°C

入力 ch 数 : 21ch

#### ●ディスクリット入力信号処理機能

信号形態 : 接点信号

入力 ch 数 : 48ch

#### ●50V A 系 / 50V B 系ヒータドライブ機能

内部電圧降下 : 2.5V 以下

出力電流 : 1.35A/ch 以下

出力 ch 数 : 各 6ch

#### ●120V A 系ヒータドライブ機能

内部電圧降下 : 1.0V 以下

出力電流 : 1.43A/ch 以下

出力 ch 数 : 8ch

#### ●パラフィンアクチュエータドライブ (PAD) 機能

出力電圧 : 25.5V ~ 28.5V

出力電流 : 0.61A/ch 以下

出力 ch 数 : 32ch (16ch × 2 冗長)

(写真提供: 宇宙航空研究開発機構殿)



# ETC 用高速ゲート GT-005A

高速ゲートは、有料道路料金所の ETC\*1システムで、車両の通過可否を制御する発進制御機として使用されています。1999年以降3,300台以上を納入しています。このたび、ETC 用高速ゲート GT-005A を開発し、09年11月より出荷を開始しました。

## ■特徴

### ●高速のゲート開閉

開閉バーを車両停止指示（開閉バーが閉じた状態）から通行指示（開閉バーが開いた状態）まで0.5秒\*2で動作させます。開から閉でも同様です。

### ●車両衝突時ダメージ軽減機構

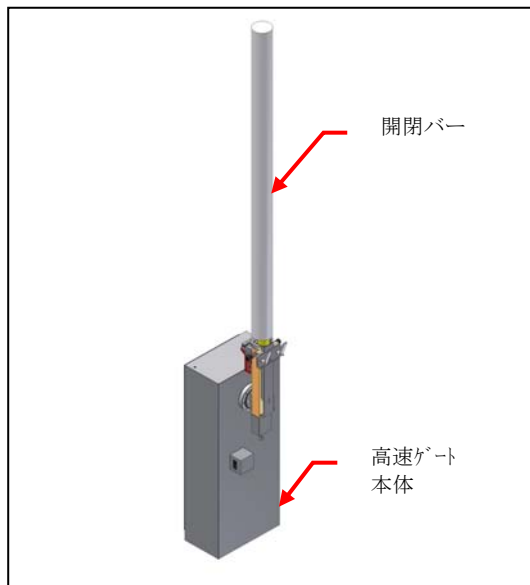
開閉バーに車両が接触した場合、車両へのダメージを軽減するため、開閉バーに緩衝材を付けるとともに車両進行方向に開閉バーが回転（リリース）する構造としています。

### ●開閉バー芯材はCFRP材

開閉バーの芯材には、軽量かつ高強度のCFRP\*3を使用。開閉バー自体が軽量で車両へのダメージを軽減できる効果があります。また、車両接触部の芯材形状は丸型であり、角型のものに比べ力の集中が少なく素材特性と合わせて破損し難い設計です\*4。

\*1：ノンストップ料金収受（ETC：Electronic Toll Collection）システムは、料金所における料金収受業務を無線通信により行うもので、料金所での一時停止の必要がなくなるため、料金所での渋滞緩和や走行時間の短縮のほか、排気ガスの低減や燃料節約が期待されます。

\*2：開閉時の開閉バー回転中心から開閉バー先端まで2,250mm以下の当社製開閉バーを使用した場合です。



開閉バー開状態

### ●いろいろな開閉バーを選択可能

積雪地域では積雪による影響を軽減するため楕円形の開閉バーを、車両衝突の多い場所には衝突する面の緩衝材を増したものを、ドライバーへの夜間視認性向上には反射シートの貼り付けなどニーズに合わせた様々な開閉バーを用意しています\*5。

### ●簡単な開閉バー交換

車両の接触などにより開閉バーを交換する場合に、運用に支障がないように工具不要で簡単、迅速に対応できる構造です。

### ●高耐久性

高耐久性モータの採用や構造強度評価の実施により、開閉バー開閉動作に対する耐久性300万回\*6を実現しています。

### ●保守性向上（新機能）

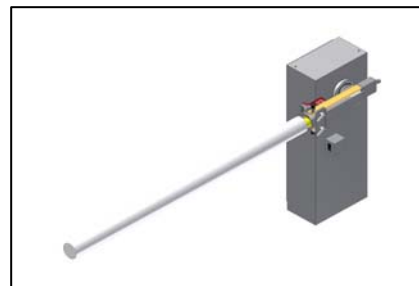
車路の左右両側に設置するタイプでは、保守時にゲート開閉動作を点検し易いよう手動開閉操作時に、自機のみ／相手機のみ／両方一括の3通りからひとつを、スイッチで選択可能にしました。

\*3：炭素繊維強化プラスチック（CFRP：Carbon Fiber Reinforced Plastic）

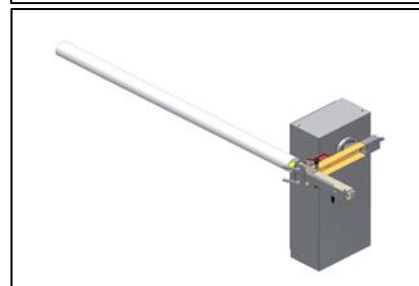
\*4：構造解析結果による。

\*5：長さを指定する場合など、特殊仕様については別途費用が必要です。

\*6：正常な開閉動作の場合。



正常な閉状態  
（開閉バーのリリースなし）



車両が衝突した状態  
（開閉バーリリース状態）

ETC 用高速ゲート GT-005A  
(400mmW×1,015mmH×250mmD, 100kg以下)

## ICカード専用駐車場システム

ICカード専用で電子マネー\*<sup>1</sup> (Suica\*<sup>2</sup>, PASMO\*<sup>3</sup>等) 利用の入退場に特化したシステムです。チケットレス、キャッシュレスのシステムで、駐車券不要、保守、維持費の低減が可能です。車番システムと連携可能で、事前精算、クレジットカードなどのニーズに対応できるICカード専用駐車場システムです。

電子マネーをタッチして入場し、出場時にタッチして駐車料金を支払い出場できます。

### ■特徴

#### ●チケットレス

ICカードが駐車券、定期券の代わりになります。①駐車券を使わないため省資源、②駐車券のコストがかからない、③カードは水に濡れても読め、読取信頼性が高い、④非接触式なのでメカ部がなく保守費用が低減できる、というメリットがあります。

#### ●キャッシュレス

硬貨・紙幣などの現金を扱わないため、①つり銭不要、②タッチで決済が完了するのでスムーズな入退場可能、③精算時間の短縮で回転率が向上、④現金管理不要、⑤保守費用低減、⑥現金を収納せず防犯性向上、というメリットがあります。

入場機ではチャージ金額が千円未満の場合、LEDと音声で残額不足の注意を促します。(設定金額は変更可能)

#### ●電子ジャーナル対応

今まで記録用紙に印字していた精算情報等のデータを、大容量のメモリー(SDカード)に保存します。書き込んだ情報は、管理計算機などに保存可能なため、精算記録の保管に場所を取らず、またジャーナル用紙を使用しないので、紙資源の削減も可能にしました。

※ジャーナルプリンタはオプションで搭載可能

#### ●豊富なオプション

##### ・車番認識システム

車番認識カメラ+事前精算システムで、よりスムーズなハンズフリー自動出場が実現できます。

##### ・クレジットカード対応

クレジットカードリーダーを追加することで、ICカードの残額不足の際、クレジットカードでの精算が可能となります。

##### ・ジャーナルプリンタ

ジャーナルプリンタを搭載できます。従来通りジャーナル用紙に印字記録を残すことができます。

\*1:各決済事業者との加盟店契約が別途必要です。

\*2:Suicaは東日本旅客鉄道株式会社の登録商標です。

JR東日本 Suica利用承認第39号

※当該承認は、東日本旅客鉄道株式会社が本商品・サービスの内容・品質を保証するものではありません。

※東日本旅客鉄道株式会社の都合により、予告なくSuicaカードが交換されることがあります。

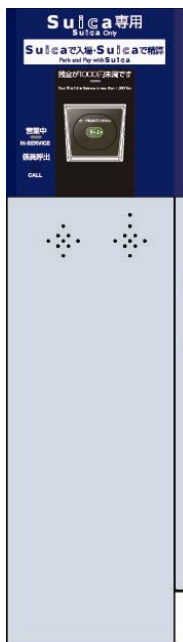
\*3: PASMOは、株式会社バスモの登録商標です。

(株)バスモ商標利用許諾済 第45号

※PASMOマーク  及び  は(株)バスモが本商品・

サービスの内容・品質を保証するものではありません。

※(株)バスモの都合により予告なくPASMOカードが交換されることがあります。



ICI-100  
ICカード入場機  
(360W×1,290H×540D,  
70kg以下)



ICA-100  
ICカード精算機  
(340W×1,410H×440D,  
85kg以下)



CT-600  
アームキャッチャー  
(349W×1,156H×200D,  
20kg以下)

GT-651  
カーゲート  
(400W×1,100H×230D,  
70kg以下)

## 編集後記

三菱プレジジョン技報第5号をお届けいたします。本報では、特別寄稿として、交通安全環境研究所の谷口研究コーディネータに、安全性能や環境性能に関する基準策定の観点からシミュレータを有効活用して頂いている事例を御紹介いただきました。

寄稿にも述べられておられますように、様々な現象を仮想的に再現することによりシステム性能やドライバー特性を効率的に、多角的に評価したり予測したりする目的に対し、シミュレータの役割は今後、益々高まっていくものと考えております。

当社では、これに応えるべく製品開発を進めており、その成果をシミュレータ小特集として紹介させていただきました。加えて、一般論文として掲載いたしましたように、人工衛星の姿勢制御や駐車場システム、エスカレータの安全運行など社会システムの向上におきましても、その一端を担えますよう努力を重ねております。

今後も、より良い製品の提供に向けて「ものづくり」を進めてまいりまるとともに、三菱プレジジョン技報を通して、その活動を皆様にお伝えしていきたいと思っております。引き続き、当社を御愛顧いただきますとともにご指導、ご鞭撻を賜りますよう、よろしくお願い申し上げます。

三菱プレジジョン技報編集委員会  
技術開発部長 春田健雄 記

## 三菱プレジジョン技報 Vol.5

©無断転載を禁ず

発行日：2010年5月11日

発行元：三菱プレジジョン株式会社

URL：<http://www.mpcnet.co.jp/>

本社／〒135-0063 東京都江東区有明 3-5-7

TOC 有明 イーストタワー13階

TEL (03)5531-8060

鎌倉事業所／〒247-8505 神奈川県鎌倉市上町屋 345

TEL (0467)42-5555

発行責任者：富山 和雄

編集責任者：春田 健雄

印刷所：株式会社三菱電機ドキュメンテクス

〒272-0127 千葉県市川市塩浜 3-12

(非売品)

