

# グループとしての人間の総合的機能の利用技術の研究

沼野 正義\*、丹羽 康之\*、宮崎 恵子\*、三友 信夫\*、岡崎 忠胤\*\*、  
福戸 淳司\*\*、松倉 洋史\*\*、田中 邦彦\*\*、松岡 猛\*

**A Study of Utilization of Human Native Functions, Recognition and Senses,  
to Group Operation Support**

by

**Masayoshi NUMANO, Yasuyuki NIWA, Keiko MIYAZAKI, Nobuo MITOMO,  
Tadatsugi OKAZAKI, Junji FUKUTO, Hiroshi MATSUKURA,  
Kunihiko TANAKA and Takeshi MATSUOKA**

## Abstract

A large and complex system such as a nuclear power plant or a large ship system is operated by a human group because of the amount and complexity of information related to the operation of the system. To minimize human errors involved in the operations, various automated systems have been installed in those complex systems. But the automated systems can be a black box and once the systems states go beyond the designed categories, human operators can not understand the situations. Therefore it is essential to present the systems states in an easily understood form by the operators. A 3-Dimensional Virtual Reality (3D-VR) technique is one way to express plant state variables as surroundings of the operators without information flood. Then, we propose plant state presentation on a 3D-VR display as an ambient information display and sensory feedback input devices for a plant monitoring and control interface. These functions can be extended to a group operation by sharing 3D-VR presentations and feedback forces. We have constructed prototype interface devices and confirmed effectiveness of our design concept. This concept can be applied to a various interface design for large and complex systems including ship operations. Cooperation among human and machine agents is one of our chief future objectives for realizing an effective interface to those systems.

\* 海上安全研究領域

\*\* 輸送高度化研究領域

## 目 次

1. はじめに .....	2
2. 大規模・複雑系におけるインタフェース技術 .....	3
3. プラント状態の 3D-VR 表現 .....	5
4. 操作におけるフィードバック .....	6
5. 模型プラント運転実験と将来予測表示 .....	8
5.1. 模型プラントの概要 .....	8
5.2. 模型プラント運転実験 .....	11
5.3. 将来予測表示 .....	11
6. 情報の共有と意思決定並びに操作支援 .....	11
7. おわりに .....	13

### 1. はじめに

船舶の運航は、巨大システムを人間がコントロールする術を長い時間をかけ、経験を積み重ねて作り上げたものといえる。海上技術安全研究所においては、船用推進プラントの運転や船橋における操船を対象としたマンマシンインタフェースの研究を続けている。

これらの知見をいかして、大規模かつ複雑な原子力プラントの運転における安全性の向上に資するとともに、その成果を船舶の安全性の向上にフィードバックさせることを目的として、原子力基盤クロスオーバー研究の一分野である、「原子力施設における知的活動の支援方策に関する研究」として、「グループとしての人間の総合的機能の利用技術の研究」を実施した。研究実施期間は、平成 6 年度から平成 10 年度である。本原子力基盤クロスオーバー研究には、海上技術安全研究所（当時船舶技術研究所）、日本原子力研究所、核燃料サイクル機構（当時動力炉核燃料開発事業団）の 3 機関が参加したが、諸事情により、交流研究を行うというクロスオーバー性が発揮されず、海上技術安全研究所単独での研究体制となり、上記「グループとしての人間の総合的機能の利用技術の研究」を実施した。ここで言う人間の総合的機能の利用は、視覚、聴覚、振動の体感及び温度を感じる皮膚感覚を総合的に用いることを意味している。

本研究は、海上技術安全研究所が従来から取り組んできた「船舶の運航」の研究から発して、「原子力プラントの運転」に活用し、成果を再び「船舶の運航」に還元することを目指して実施したものである。

船橋における航海当直作業を支援する技術の研究開発<sup>1)</sup>の中で、レーダーによる他船の動向、電子海図による自船位置等の支援情報の提供、オートパイロットや自動航路保持等の自動制御における、マンマシンインタフェースの要件を洗い出した。最も基本的なものは、見張りの最優先であり、各種の支援情報を船橋から見える航行海域並びに自船の動きの直感的な情報とリンクして理解する必要があることである。研究開発に用いた操船シミュレータは大画面表示に船橋からの海域の景観をコンピュータグラフィックス（CG）によって模擬するものであり、プラント運転においても大画面またはバーチャルリアリティ（VR）により運転対象であるプラントの状態を直感的に提示することが有効な支援であると考え、これを基に研究を進めた。

原子力プラント等の複雑なプラントの運転においては、プラントの状態を表す様々な情報を運転員に与えることが必要である。原子力プラントでは、ヒューマンエラーを回避するために様々な自動化システムが取り入れられている。しかし、自動化システムが適切な制御を行っている間は運転員に明示的にその動作の情報が与えられず、ブラックボックス化しやすくなる。自動化システムの設計範囲外の事象が発生した場合には、運転員が的確な対応を取る必要があり、そのためには、プラントの情報を人間の認識機能に適合した形で提供する必要がある。また、プラントの操作においては、操作結果を運転員に適切にフィードバックすることにより、誤操作を未然に防止することが可能である。さらに、複数の人間のグループによる判断、意思決定及び操作によって、バックアップや協調による誤操作の防止が可能である。

複数の人間が役割を分担して作業を行う場合、視界に入る相互の動作や明示的な会話による共通認識が共同作業の前提となっていることが、実務者等からの聴き取り調査から明らかになっている。共通認識を深めるため

に、個々人の作業に付随したプラントの状態量表示や操作結果のフィードバック等の情報をグループ内で共有することが有効であると考える。

なお、聴き取り調査は、東京電力（株）柏崎刈羽原子力発電所、福島第一原子力発電所並びに（財）電力中央研究所ヒューマンファクター研究センターにて、実務者をはじめ、プラント運転の訓練を行う教官並びに研究者から実施した。

一方、柏崎刈羽での調査時には、原子力プラントにおいて、それまで広く用いられていた大量の計器表示を用いた制御盤ではなく、プラント系統図のミミック表示等を用いた第三世代の制御盤が導入されている時期にあたり、柏崎刈羽原子力発電所 6・7 号機で実際に第三世代の制御盤を調査することができた。この第三世代の制御盤は、マンマシンインタフェースに十分配慮したものであるが、運転員の作業分析を基に構築されたものであり、訓練を行い、これらの制御盤に慣れることによって、運転におけるヒューマンエラーを減らすことが前提となっている。よって、運転員が第三世代の制御盤から得られる情報は、現場感覚そのものではなく、やはり制御盤の情報を、もう一度、現場を想定してから取り入れている。これを改善するためには、現場感覚をそのまま提示する情報提示方法が必要であると考える。

そこで、本研究では、プラントの運転における知的作業に起因する誤操作の防止に着目し、人間の認識機能に適合したプラント状態の表示、人間の認識及び感覚機能に適合したプラント操作結果のフィードバック、人間の認識機能に適合したプラント状態の将来予測表示、及びグループでの意思決定及び操作支援、についての研究を行った。これらの概要を示すと、では、対象プラントの情報を物理的なイメージと共に提供すること、では、操作入力に対して音や反力等により感覚にフィードバックを与えることにより直感的な理解を支援すること、では、プラント状態の画像による表示を利用し、そこに提示する情報としてシミュレーションによる将来値を提示すること、さらにでは、情報の共有により意思決定と操作支援をすること、を実施した。

## 2. 大規模・複雑系におけるインタフェース技術

大規模かつ複雑なシステムを人間が運転する場合、人間の本来の機能からみて、次の 2 つの困難さが生じると考えられる。一つは、システム全体の情報を一時に取り扱うと膨大な情報量となり、人間の処理能力を超えてしまうこと。もう一つは、原子力プラントの場合が典型であるが、直接現場で運転できず、限られた情報を基にしたリモートコントロールとなることである。

一般的に、人間の処理能力や相互補完による誤操作の防止を考慮して、複数の人間のグループが役割を分担したチームとして運転に当たっており、チームとしての機能を発揮するために適正な役割分担や意思の疎通が重要な課題となる。

現在の運転もチームとしての機能を発揮するよう、当直長と複数の運転員という単位でチームを組み、チーム単位で訓練を実施している。しかし、現在のチームでの作業は、共同作業というよりも、予め分担された作業を各運転員が行い、当直長がそれを監督しているという形態である。そして、運転員同士は、視界の中に他の運転員の作業状況を意識しているという状況である。なお、意思の疎通は、言葉によるものである。

そこで、チーム内の他の運転員の行動や情報の中身を、各自のプラント監視の中で併せて的確に知ることのできるよう、他の運転員の注視点を示し、どこに注目しているか（気を取られているか）が共有できたり、着目している機器等を 3D ポインターによって指し示すことで、会話を補佐したり、チームとしての機能をより発揮できることを、本研究では目指した。

このような運転支援技術の開発を目標とし、人間のプラント理解を図 - 1 のように論理的理解と直感的理解が相互に補完するものとしてモデル化した。

運転員の論理的理解を助けるものとしては、既に、マニュアルや知識ベースを利用した、自動マニュアル提示システムや何か事象が起こったときに関連手順書を示すシステム等の支援システムが構築されている。しかし、

これ単独では、現物と直結してプラント状態を認識するのは難しい。よって、視覚的・体感的に現場を把握できる VR 表示システムも、現場感覚を再現し、直感的に現場を理解するために必要となる。

そこで、本モデルでは、両者を重畳表示することで、両者を並行して用いることのできるものになっている。運転員同士は、VR 表示システムにより、物理的並びに

機能的に接続関係を示された仮想プラントを視覚により監視する。監視の中で、遠隔運転支援システムとして備えられた論理的モデルと VR 表示システムによる視覚的モデルの両者を同時並行で見ることができ、現場に即したプラント状態の認識が行える。

この考え方に基づき、通常用いられている論理的な理解に対する支援に加えて、直感的・体感的な理解を支援

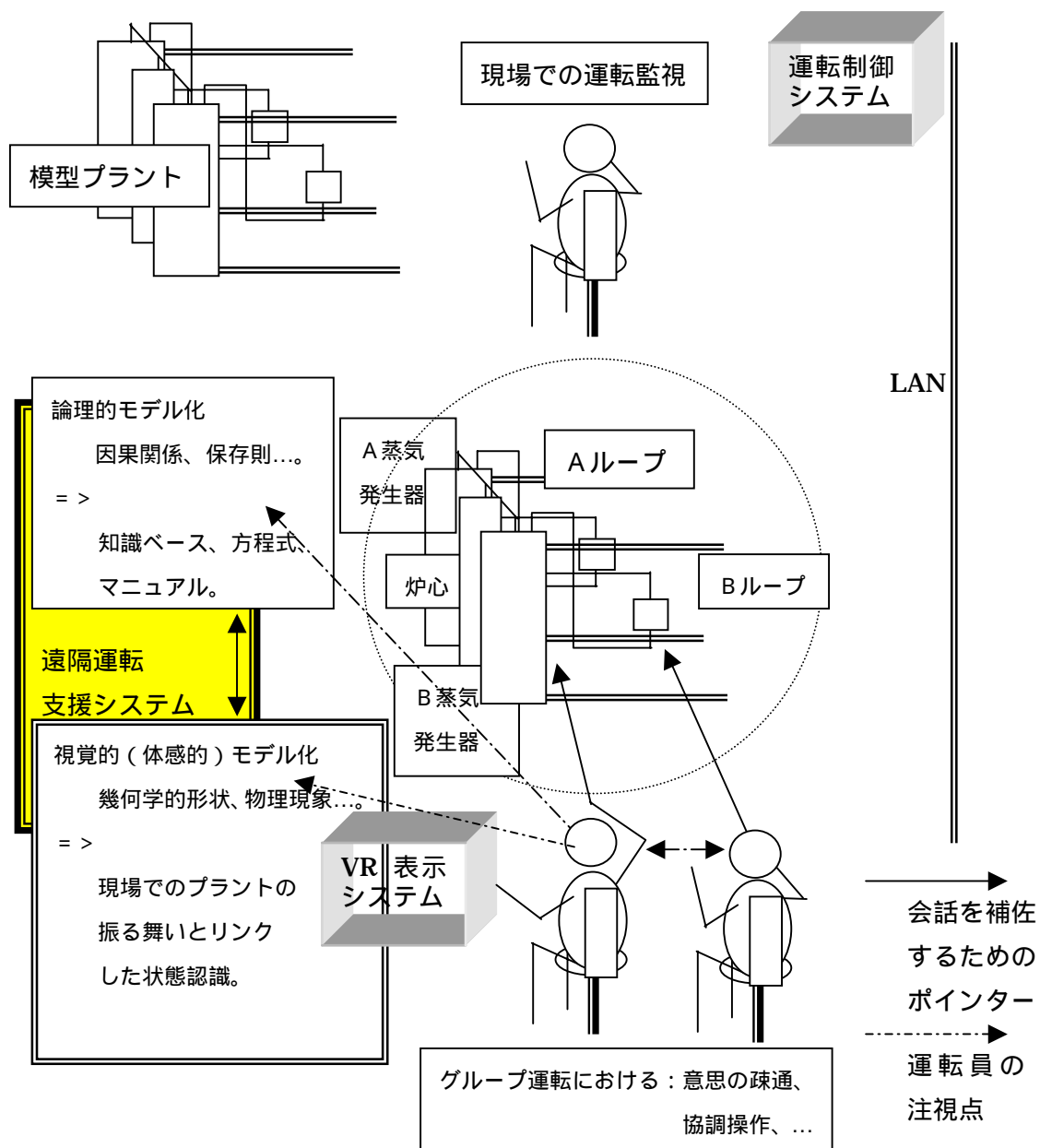


図 - 1 運転における人間のプラント理解 <sup>2),3)</sup>

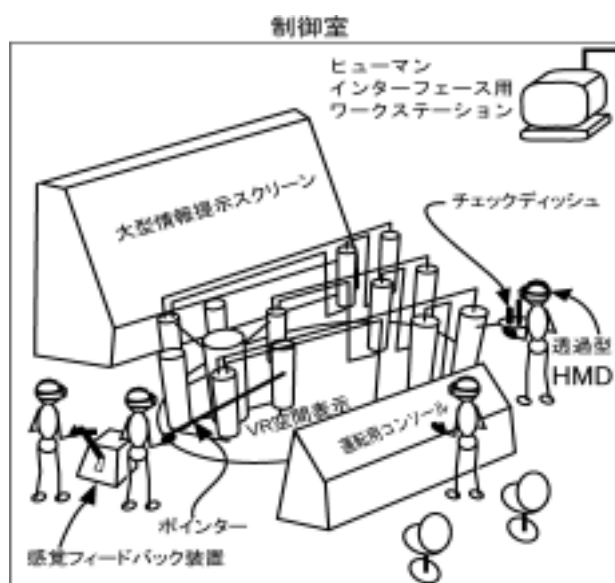


図 - 2 従来のインタフェースと 3D-VR 表示との併用のイメージ<sup>4)</sup>

するものとして、情報の全体像を提供するための、プラントの幾何学形状に温度分布等の状態量を重畳させた 3D-VR 表現、現場での運転感覚を与える感覚フィードバック入力、並びにこれらの情報のグループ内での共有技術について検討を行った<sup>2),3),4)</sup>。

### 3. プラント状態の 3D-VR 表現

運転員に、対象プラントの情報を、物理的なイメージとともに提供することは、情報の意味づけにおける知的活動を補佐するものとして有効であると考える。プラントの幾何学形状にプラントの状態量を重畳させることにより、情報とプラントの直接的な関係を理解することができるため、異常原因の探索や対処方針の決定のための知的な支援システムを利用する際のエラーの防止に有効である。

図 - 2 に従来のインタフェースと 3D-VR 情報表示との併用の概念図を示す。プラントの幾何学的形状に状態量を表面色や流体の流れを模擬したパーティクルの動きとして重畳し、3D-VR 空間表示によって運転員に与える。透過型ヘッドマウントディスプレイ (HMD: 図

- 3 に装着状況を示す)の採用により、VR 空間表示で、運転員は視覚的にモデル化された仮想プラントを監視できる。それと同時に、大型情報提示スクリーンやコンソールを実像として同時に見ることができるため、これらを併用した運転が可能である。

図 - 1 及び図 - 2 で示した機能の内、透過型 HMD 上の 3D-VR 表現で、以下の機能を試作した。プラントの幾何学的形状に状態量を表面色として表示する機能、流体の流れを模擬したパーティクルの動きを表示する機能(図 - 4 左上図)、3D ポインター指示及び表示機能(図 - 4 左下図)、チェックディッシュ機能(図 - 4 右上図並びに右下図)である。

3D-VR 空間表示では、3D ポインターを用いて対象を明確に指し示すことにより、お互いの注目点等を共有することができる。また、チェックディッシュ機能<sup>5)</sup>(後述)を用いることにより、プラント各機器の状態量を詳しく観測することができる。さらに、次の章で述べる感覚フィードバック装置を用いることにより、機器の操作や状態量並びにその変化を手が受ける反力・振動・熱感で体感させることができる。

このように、3D-VR 空間表示は、主として直感的な理解を助ける機能を有しているが、チェックディッシュは、論理的な理解を助ける機能にもなっている。使い方は、3D-VR 空間の中で、状態量を詳しく見たい機器をデータグローブ(図 - 3 で右手に装着しているもの)で特定の指で掴むことにより、対象となる機器の状態量を表示する(図 - 4 右上図 時々刻々の状態量値が棒グラフ状に表示されているところ)。運転員は自分の取り皿を持ち、この状態量の棒グラフをデータグローブで掴むことで選択し、自分の取り皿に置く。比較したい複数の状態量を載せることが可能である。状態量が揃ったところで、取り皿に備えられているトレンドグラフを作成するボタンをデータグローブの指で押すことにより、状態量のトレンドグラフが表示される(図 - 4 右下図)。

一方、大型情報提示スクリーンは、第三世代の制御盤もしくはその発展型であり、運転用コンソールと併せて、論理的な理解を助けるためのマニュアルや知識ベースを



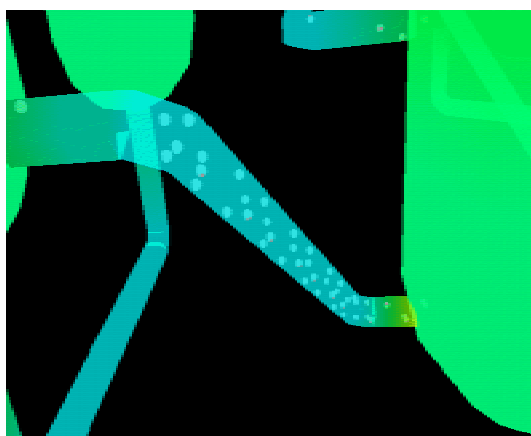
図 - 3 透過型 HMD と 3D-VR 表示の使用状況 <sup>2),3)</sup>

基にした支援システムが表示できるようになっている。

これにより論理的な理解と直感的な理解を同時に支援することができる。

#### 4. 操作におけるフィードバック

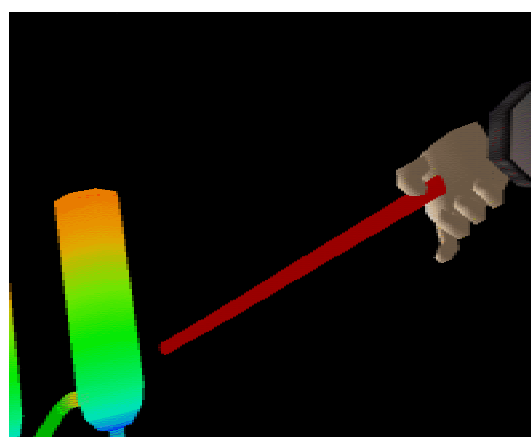
直感的な理解を支援するものとして、操作入力に対して、音や反力等により感覚にフィードバックを与えることを検討した。バルブ等、物理的な位置情報がその状態と結びついている場合、レバーでこれを制御する際に現在の位置情報をレバーからの反力で表現することにより、リモートコントロールでの応答の遅れを実感するこ



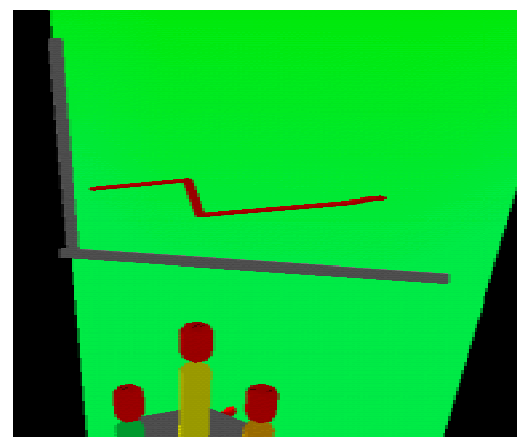
パーティクルによる流れの表現



VR 空間上の状態量表示例



VR 空間上のポインターイメージ



VR 空間上のトレンドグラフ表示例

図 - 4 3D-VR 空間表示の主な機能 <sup>5)</sup>

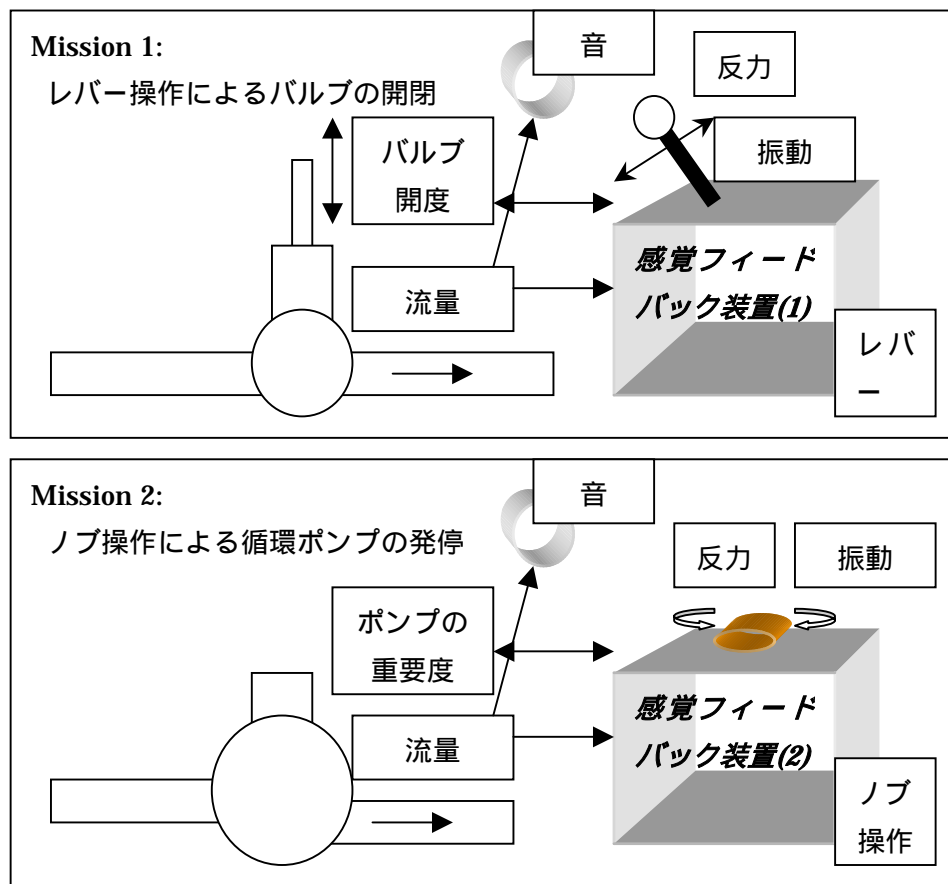


図 - 5 操作入力における感覚フィードバックの例 <sup>2),3)</sup>

とができ、また、論理的な理解との照合によりヒューマンエラーの防止に有効である。ポンプモータの起動・停止の際に、回転数に対応した大きさと高さを持った音を人間に聞かせることにより操作に対する応答を感じることが可能である。同様に、流体の流れを変化させる操作においては、流速または流量に応じた振動をレバーに与えることにより、操作結果を運転員にフィードバックすることが可能である。さらに、制御棒の操作等、重要な作業については、大きな反力を与えることによって、誤って重大な操作を行ってしまうことに警告を与えることができる。

図 - 5 に、その概念図を示す。本図では、まず、上図に、レバー操作によるバルブの開閉の作業を示す。ここでは、バルブの開閉度を反力に、流量を音とレバーの振動としてフィードバックする。また、下図には、ノブ操作による循環ポンプの発停の作業を示す。重要なポンプ

の操作については大きな反力を、重要度の低いポンプについては小さな反力を割り当てることにより、操作の重要さを実感できる。また、流量を音とノブの振動としてフィードバックする。

感覚フィードバック装置の評価を行うため、温熱的に不安定な実験装置 <sup>6)</sup> を製作し、これに対して感覚フィードバック装置を用いて出力を目標値に制御するという実験を実施した <sup>7)</sup>。

本実験装置は、簡易炉心部内にヒータを設け、熱交換器と1次系、2次系からなる。1次系出口温度が60度を超えるとヒータの発熱量を2.1kWに、60度以下では同熱量を1.2kWになるように設定している。2次系流量を入力として、1次系温度を60度に追従させる実験を、フィードバック装置を用いた場合と、入出力値の時系列変化表示だけを用いた場合の2通りを実施した。フィードバック装置では、1次系出口温度を熱感に、

この温度の二次微分値を反力に、2次系流量を振動として、フィードバックした。

その結果を図-6に示す。上がフィードバック装置を用いた場合、下が入出力値の時系列変化表示だけを用いた場合である。フィードバックを行わない時よりも、行った時の方が、目標値近辺で出力を安定させている時間が長くなるという結果が得られ、フィードバックの有効性が確認できた。

従来の論理的な理解を支援する、階層化された電子マニュアルや知識ベースを用いた支援システム等の従来の論理的な理解を支援するインタフェースと、これら3D-VR空間を利用した機能を併用することにより、相互に補完してプラントのより正しい理解を支援することが可能である。

## 5. 模型プラント運転実験と将来予測表示

### 5.1. 模型プラントの概要

さらに、フィードバック装置の有効性を確認するため、模型プラント<sup>8)</sup>を対象とした実験を行った。図-7に模型プラントとそのコントロールパネルを示す。

模型プラントは、2ループ加圧水型(PWR)原子力プラントの運転を模擬するものである。炉心部分(体積： $7 \times 10^{-3} \text{m}^3$ )には加熱器(電気ヒータ：最大出力 4.5kW)を備えている。また左右には蒸気発生器(2次系片側体積： $1 \times 10^{-2} \text{m}^3$ )を備え、1次系と2次系の熱交換は対向流形式で行われている。さらに蒸気発生器で蒸気となった2次冷却水(もしくは高温水の2次冷却水)は、クーリングタワーに流れ込み冷却され、再び蒸気発生器に流れ込む2次冷却水として再利用され

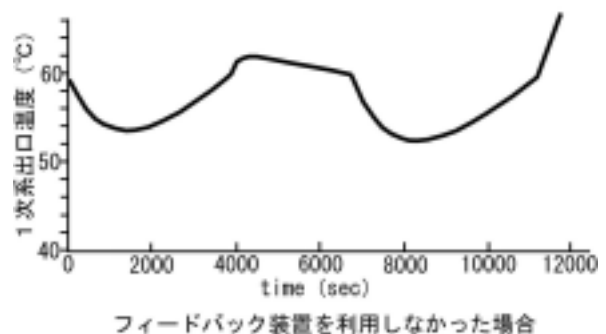
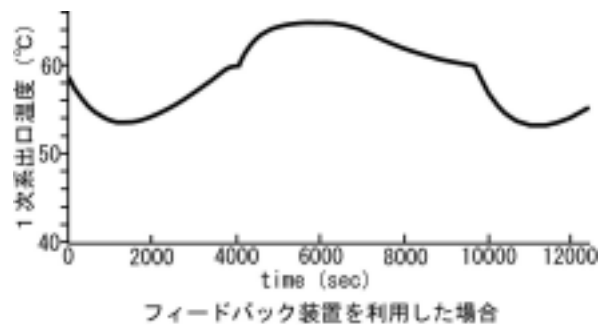


図-6 フィードバック装置を用いた場合と用いなかった場合の制御結果の比較<sup>7)</sup>  
出力(1次系出口温度)の時間応答

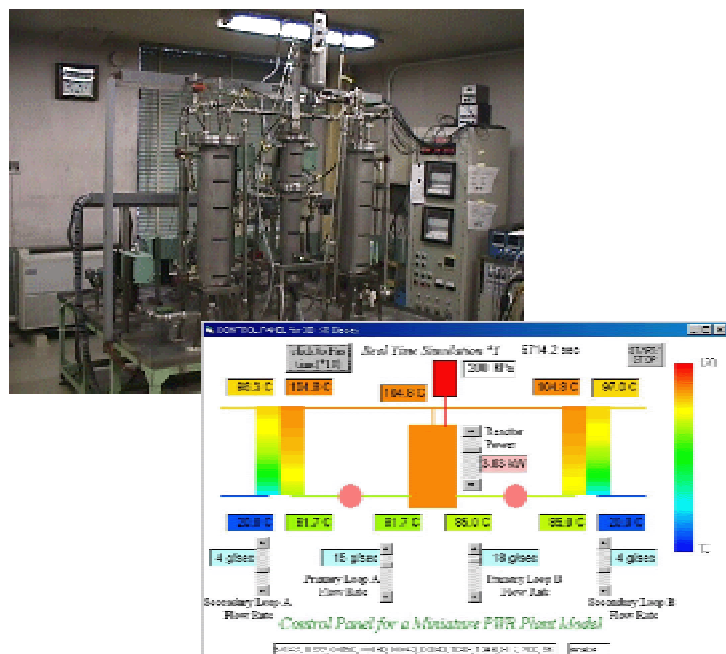
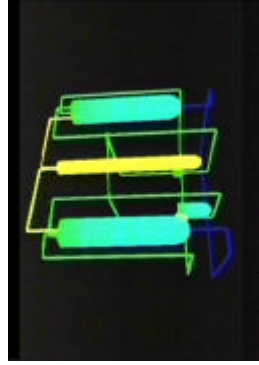


図-7 模型プラントとコントロールパネル

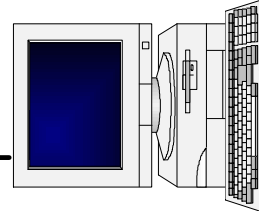


研究棟

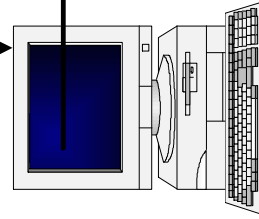


3D-VR画像の  
作成

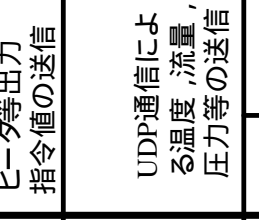
感覚FB装置による指  
令,反力の提示



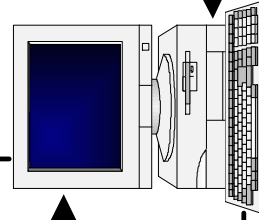
UDP通信による温  
度,流量,圧力等  
の送信



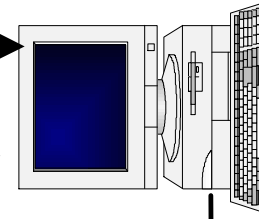
UDP通信による  
ヒータ等出力  
指令値の送信



UDP通信によ  
る温度,流量,  
圧力等の送信



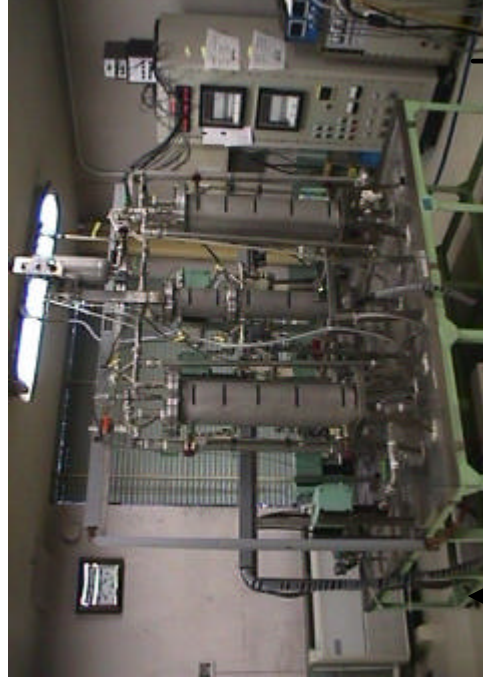
TCP/IP通信に  
よる温度,流  
量,圧力等の  
送信



GP-IB計測  
(温度,流量,  
圧力等)

RS-232C制御  
(ヒータ等)

実験棟



所内LANの任意のPCでモニタリング可能

所内LAN(10Mbps)

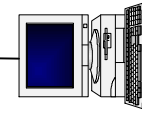


図 - 8 システム構成図

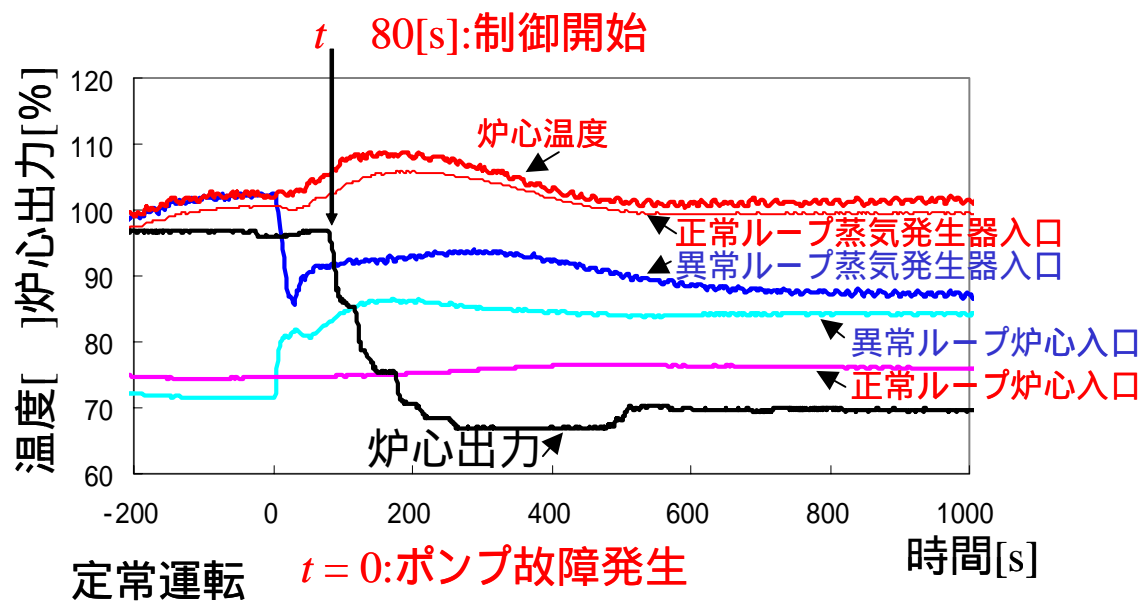


図 - 9 模型プラント運転結果

る循環設計となっている。

加圧器については、コンプレッサを利用し、高压ガスを送り込むことにより1次系の圧力を上げている。定格圧力を2気圧としているため、1次系温度が120℃までは加圧水型として正常の運転が行える。

各所に下記のセンサを取り付けている。

- ・温度計(熱電対): 炉心、1次系蒸気発生器入口(左右)、1次系蒸気発生器出口(左右)、2次系蒸気発生器入口(左右)、2次系蒸気発生器出口(左右)
- ・流量計: 1次系(左右)、2次系(左右)、1次系漏洩部
- ・圧力計: 1次系(炉心)、2次系蒸気発生器出口(左

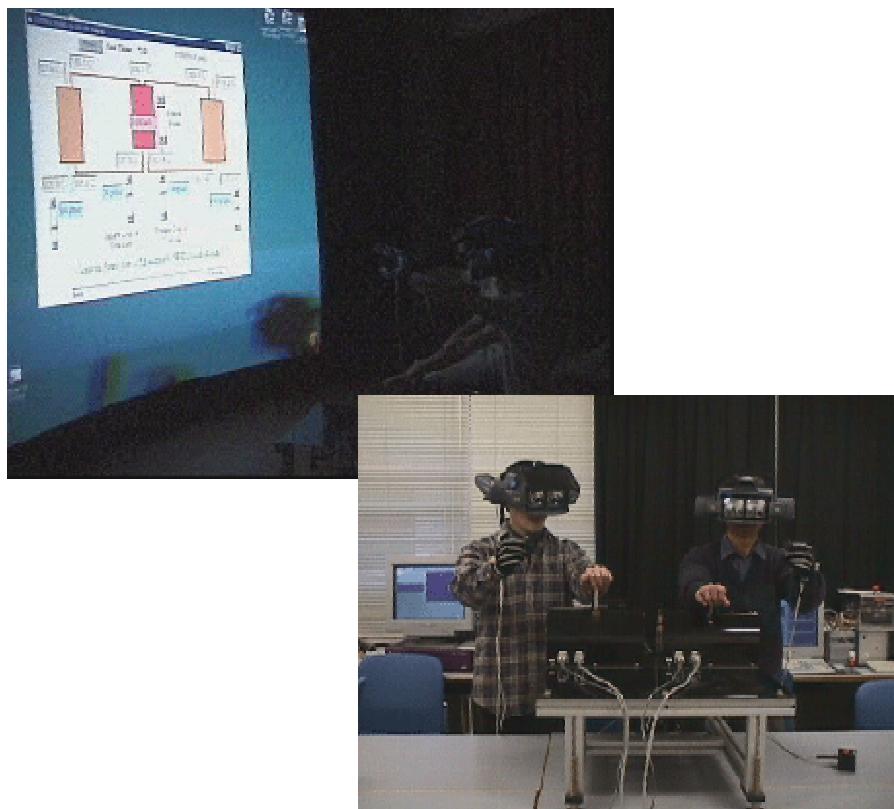


図 - 10 大画面表示されたコントロールパネルの前での反力フィードバック装置を用いた運転実験<sup>10)</sup>

右)

- ・水位計: 加圧器、2次系蒸気発生器(左右)

また遠隔操作が可能なアクチュエータ（ポンプ、電動弁、電磁弁、電気ヒータ）も取り付けられているため、様々な状態模擬及び測定・制御が可能となっている。

本実験に用いたシステム構成図を図 - 8 に示す。模型プラントのセンサ値の取り込みには、GP-IB を用いて、コンピュータに取り込み、その後所内 LAN 利用して、関連コンピュータにデータを送受信するネットワークを組んでいる。模型プラントのある実験室内（ここでは現場と呼ぶ）の観測、制御には TCP/IP、RS-232C を利用しているが、遠隔操作に関しては、UDP 通信で行っている。これにより、所内の任意の複数のコンピュータで、模型プラントの状態を監視することができるシステムとなっている。

## 5.2. 模型プラント運転実験

シナリオは、定常運転時から 1 次系の片側のループのポンプが停止する事故とし、運転員のミッションは 3D-VR 表示とコントロールパネルから模型プラントの状況を把握し、感覚フィードバック装置を用いて、炉心（ヒータ）出力を制御し、炉心温度を定常運転時の温度を維持することとした。炉心の遠隔操作について、感覚フィードバック装置の入力値から実際のヒータ出力値の関係を時定数が 10 秒の 1 次遅れ系とし、運転員のレバーには、現在値と指令値との差に比例した力を与えるようにした。

図 - 9 に実験結果を示す。t=0 に片側ポンプを停止させ、炉心及び片側のループの温度が上昇していく。運転員は、3D-VR 表示とコントロールパネルから異常状態の発生を確認し、異常発生後約 80 秒の時点で、炉心出力を下げる操作を開始した。5.1.節で述べた通り、炉心出力は電気ヒータであり、運転員は数段階に渡り、電気ヒータの出力をレバーでコントロールすることで炉心出力を変化させ、最終的に炉心温度を定常運転時の温度に保つことができた。また運転員の主観的評価においては、感覚フィードバック装置により、炉心出力の応答の遅れが実感できた。

## 5.3. 将来予測表示

図 - 7 の下図に示した模型のコントロールパネルは、模型プラントのシミュレーション機能も有している。本シミュレーションは、熱の発生と冷却水の流れ、熱交換機による熱の移動を差分方程式により記述している。

この機能を用いることにより、現在の模型プラントの状態に対して、運転員が仮想的に操作を行い、その結果、プラント状態がどのようにになっていくかをシミュレーションすることができる。このシミュレーション結果は、前述した 3D-VR 等により、実際の模型プラントの情報に置き換わって提示される。このように、人間の認識機能に適合した形で、プラント状態の将来予測の表示が行える。

将来予測表示による運転員支援として本シミュレーション機能を入れているため、現在、シミュレーションそのものは簡単なものとなっている。必要に応じて精度を向上させればよいと考える。

## 6. 情報の共有と意思決定並びに操作支援

グループ内での意思の疎通を確保して共通認識を確立するために、先に述べた支援についても、グループ内の運転員間で、情報を共有できることが重要な機能要件となる<sup>9),10)</sup>。

グループ内の複数の運転員が同じ 3D-VR 空間表示を見るとともに、その中で、相互に他の運転員の注視点を表す 3D ポインターを表示内に表現することは、情報交換が容易になるとともに運転員間の行動の相互チェックにも有効である。

旅客機の操縦席に採用されている操縦桿の機構が操作に対するフィードバックの共有のよい例であると考えられる。操縦桿の動きが連動することにより、互いに相手の操作を知ることができるとともに、相異なる操作を行った場合の操作結果を適切に設計することにより、誤操作の防止や、協調作業に有効な情報の共有が可能となる。同様に、原子力プラントの運転においても、運転員とス

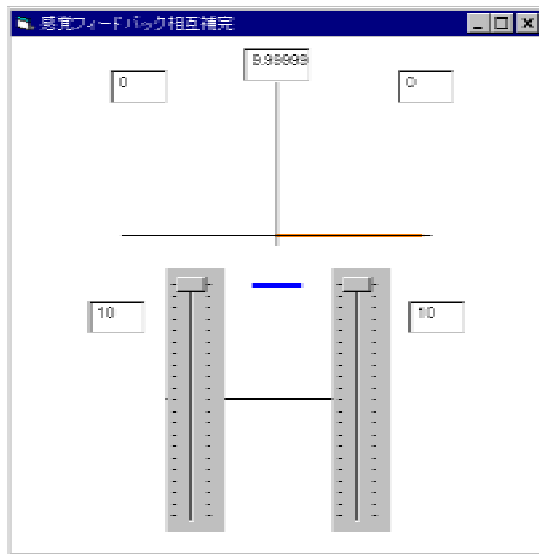


図-11 2人操作パネル

ーパーバイザーが、同じ機器に対してそれぞれの専用の操作装置を備えることとし、その動きが連動して、操作に対するフィードバックが共有することにより、互いに相手の操作を実感でき、抑止にもなりうる。そして、相異なった操作を行った場合の処理を適切に設計することにより、誤操作の防止につながる。会話による確認や、3D-VR 空間表示での注視点の確認も併用されることで、さらに、協調作業に有効な情報の共有が可能となると考える。

このように、情報の共有化及び操作のフィードバックの共有化により、グループでの意思決定及び操作支援が行える。

前章で述べた模型プラントを対象として、系統図表示のコントロールパネル(図 - 10 上図)、2人操作パネル(図 - 11)、並びに2人用の3D-VR 空間表示(図 - 12)及び反力フィードバック装置(図 - 10 下図)を試作し<sup>11),12)</sup>、炉心温度維持制御のミッションを与えて、3D-VR 表示における異常の確認や、レバーへの反力による炉心出力の応答遅れの確認を行い、これらの有効性を明らかにした<sup>10),13)</sup>。

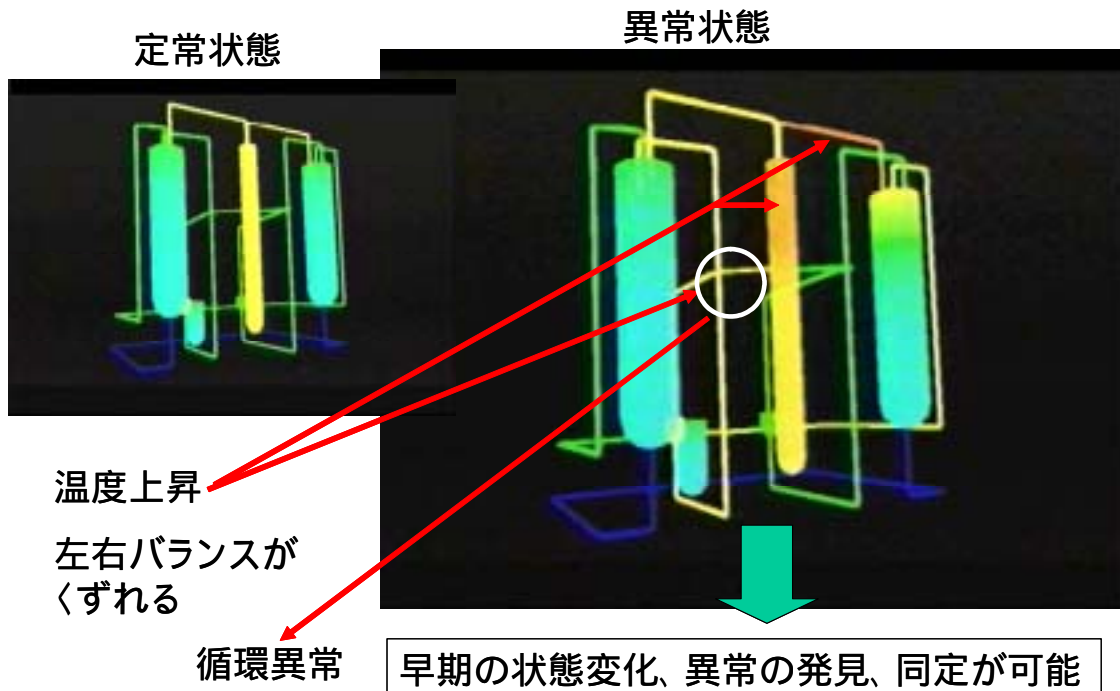


図 - 12 3D-VR 空間表示における状態変化の表示<sup>13)</sup>

まず、2人操作におけるフィードバックの有効性について検討した結果について述べる。図 - 11 には、プラント模型を2人で操作するための2人操作用パネルを示す。この操作パネルでは、中央の青いラインは左右のレバーの指示の平均値を示し、この値が外部へ出力される。また、青いラインと左右の指示値との差に応じて反力が各レバーにフィードバックされる。すなわち、手を離すと、もう一方の指示が反映され、手を離れた方のレバーは指示値の位置まで移動する。指示値が異常だと感じた場合は、引き戻すことができ、これに応じた反力が双方のレバーに発生し、相互の指示内容を直感できる。

図 - 10 には2人用の反力フィードバック入力装置を使用した運転実験の様子を示す。ここでは、一方がレバー指示によりバルブ開度を操作し、模型のバルブ開度を双方のレバー指示値の中間値にするという実験を行ったが、操作した本人がバルブ開度の動作遅れを反力によって確認でき、直接操作を行っていない人間にも、現在の開度の情報が直感的にわかることが明らかになった。また、他方の介入を許す設定を行った場合は、レバーを戻すことにより、バックアップ動作が可能であることがわかった。

3D-VR 表示における異常の例を図 - 12 に示す。ここでは、模型プラントの水の温度を機器に沿ってカラー表示している。左図の定常状態から、右図の異常状態に変化したときには、温度上昇と左右の温度バランスのくずれが見られ、循環異常が起きていることがわかる。これにより、早期に状態変化を知ることができ、異常の発見、同定が可能となった。

## 7. おわりに

大規模かつ複雑なプラントの運転を安全かつ効率的に行うための支援のあり方を、人間本来の総合的な機能を考慮して、検討した。従来の運転支援は人間の論理的な理解を支援するものが主であったが、人間の総合的な機能を利用するためには、現場での運転における直感的な理解との相互補完を可能とする運転支援が必要であ

る。

人間を取り巻く視覚空間に情報を展開するものとして3D-VR 空間表示を提案しその有効性を確認するとともに、操作に対する直感的な情報の提供として操作入力に対して反力、音、振動等のフィードバックを与える手法について検討し、バルブの開閉やポンプモータの起動・停止の操作に有効であること確認した。

大規模かつ複雑なプラントの運転には、人間の限られた能力を生かすとともに相互のエラーチェックを可能とする、複数の運転員のグループによる運転が不可欠である。そのためには、支援情報を共有して意思の疎通を確保することが重要である。3D-VR 空間表示の共有と表示内での注視点情報を表す3D ポインターを提案しその有効性を確認した。また、操作入力に対する反力等のフィードバックを共有できる2人用のレバー操作装置を試作し、バルブの開閉等の操作において、相互の操作のチェックや協調操作に対して有効であることを確認した。

人間の総合的な機能の利用を考慮するとともに、グループないしはチームでの運転を支援することは、大規模かつ複雑なプラントの運転には不可欠であると考え。特に、人間の視覚・聴覚機能の利用と、グループ内に支援システムが導入された時には、この支援システムをパートナーとして協調動作を行えるようにすることが重要であると考え。この考えを、船舶の運航の実用システムとして実現した例を図 - 13 に示す。ここでは、船舶の運航に、操舵・見張り役を行うパートナーとしての支援システムを導入し、かつ、重要な情報の収集に操船者の視覚・聴覚を利用しており、支援システムと操船者が音声による会話によって意思の疎通を図っている。この支援システムは実機として開発され、内航タンカーに装備されて有効に機能している。

図 - 13 に示した例では、水島港離れ直後、操船者の船速設定やコース設定の命令に対して、航海支援システムが復唱し、それに対して操船者が確認の答えを発したのを受けて、船速やコースの設定をしている。また、航海支援システムに予め設定された操船行動に関しては、

操船者:	航海支援システム:
船速	船速
7	7
	船速を7.0ノットに
OK	します。
	船速を7.0ノットに
	設定。
	2分後変針点に
	到着します。
	次の進路は
	44度です。
了解	了解ですか。
コース	コース
65	65
	コース65度
	変針します。
	船首が左に
OK	向きます。
	コース65度
	変針。
	コース65.0度
	変針終了しました。

水島港離棧直後



図 - 13 音声会話による航海支援システムを用いた航海の様子

システム自らがこの例では変針後の角度について、操船者の確認を求めている。このように、このシステムにおいては、支援システムが操船のパートナーとして認識されており、人間と自動化機械の共同作業が可能であることを示している<sup>14)</sup>。今後は、各種の自動化システムをそれぞれが役割を分担するグループの一員としてとらえるマルチエージェントシステムの考えを取り入れ、より安全かつ効率的な運転支援システムの実現に向けて研究を進めていくことが求められよう。また、グループ

での共同作業そのものを監視、支援する手法についても検討を進め、同様な問題を抱える船舶の運航に適用する予定である。

本研究で得られたプラント運転員への支援技術は、今後導入される船舶自動識別装置（AIS）等、多様化する運航関連情報の人間への提示手法並びに多様化する運航形態への対応を検討する際に活用できると考える。



## 謝辞

本研究は、原子力委員会の評価に基づき、文部科学省（当時科学技術庁）原子力試験研究費で実施された。

## 参考文献

- 1) 全国内航タンカー海運組合・運輸省船舶技術研究所；航海支援システム開発に関する共同研究報告書(1998)
- 2) Numano, et al. ; Advanced Support System for Plant Operation - Matching to Human Recognition and Senses and Its Application to Group Operation Support -, AIR & IHAS'97 (1997) , pp.261 ~ 267
- 3) 沼野 他；人間の認識及び感覚に適合した運転支援、第 70 回船舶技術研究所研究発表会講演集 (1997) 、pp.43 ~ 46
- 4) 宮崎 他；グループとしての人間の総合的機能の利用技術の研究、第 70 回船舶技術研究所研究発表会講演集 (1997) 、pp.65 ~ 68
- 5) 田中 他；VR 空間表示を利用したプラント運転支援、第 70 回船舶技術研究所研究発表会講演集 (1997) 、pp.51 ~ 54
- 6) 三友 他；不安的な制御対象のシミュレーション、第 66 回船舶技術研究所研究発表会講演集 (1995)、pp.170 ~ 172
- 7) 平尾；感覚フィードバックによる不安定な対象の制御、第 66 回船舶技術研究所研究発表会講演集 (1995)、pp.173 ~ 176
- 8) 丹羽 他；運転実験対象としてのプラント模型 - プラント動特性および異常状態模擬のための制御 - 、第 70 回船舶技術研究所研究発表会講演集 (1997) 、pp.55 ~ 58
- 9) 福戸 他；グループでのプラント運転のモデル化とその支援方策、第 70 回船舶技術研究所研究発表会講演集 (1997) 、pp.47 ~ 50
- 10) 丹羽 他；グループでの運転を支援するプラント情報の共有、日本原子力学会 2000 年秋の大会 (2000)、F24

- 11) Numano, et al. ; 3D-VR Plant State Expression with See- Through -Type Head Mounted Display for Human Interface in Plant Control Operation, The IEEE International Conference on Systems Man and Cybernetics (1998)
- 12) Numano, et al. ; Reduction of Human Errors in Plant Operation Utilizing Human Error Correction Function as an Individual and Crew, 8th International Conference on Human-Computer Interaction (1999) , pp.1206 ~ 1210
- 13) 丹羽 他；現場感覚を運転員に与えるインタフェースの構築、日本原子力学会 1999 年秋の大会 (1999)、H42
- 14) Fukuto, et al. ; Use of Speech Communication as an Interface of a Navigation Support System for Coastal Ships, The 7th IFAC/IFIP/IFORS/IEA Symposium on Analysis, Design and Evaluation of Man-Machine Systems (1998) , pp.299 ~ 304