

Ni基超耐熱合金設計のための広帯域ネットワークを利用した遠隔実験の試み

横川 忠晴*・藤田 充苗*・原田 広史*

Remote Experiment for the Design of Ni-base Superalloys Using Broadband Research Network

Tadaharu YOKOKAWA, Mitsutane FUJITA and Hiroshi HARADA

Synopsis : An integrated materials research information system for Ni-base superalloys design, which consists of a characterization simulator, a data base, and a remote experimental system using MPEG1 tool and TV conference tool, has newly been developed. The goal of this system is to develop new alloys and to elucidate some phenomena occurring in the material field efficiently. In order to test the real performance of the system, the proof examination was carried out among National Research Institute for Metals (NRIM), Japan Science and Technology Corporation (JST) and Michigan State University (MSU) by using an exclusive broadband network of 45 Mbps. As a result, it has been proved that the real-time moving picture transfer system, the basic function of the remote experiment system, is eligible to the practical use for transferring ordinary moving pictures in the material field. It has also been found that the transfer rate has strongly depended on the machine performance of the receiving site rather than the network performance. This system may provide worldwide research environment for the promotion of design, development and evaluation of novel materials by accessing the alloy design program, evaluator and testing devices on the Web.

Key words : Ni-base superalloy; broadband network; alloy design program; remote experiment; multi-media database.

1. はじめに

インターネットなどの急速な普及にともなう、材料分野の研究者や技術者においてもネットワーク利用がより身近なものとなっている。筆者らはネットワークの有効利用を目的として従来より、インターネット上に公開実験室と称する材料情報システム^{1,2)}を構築し、Ni基超耐熱合金を対象とした合金設計プログラム^{3,4)}の公開などを試行してきた。現状より高速・大容量の広帯域ネットワークが利用できれば、より容易に大容量の情報が扱え、迅速かつ効率的な材料開発が期待できる。著者らは高度情報通信社会の実現に向けた情報G7アプリケーション共同プロジェクトの広帯域ネットワーク利用プロジェクト (GIBN: Global Interoperability of Broadband Network Project: 1995年合意)⁵⁾に参加する機会を得た。そこで、広帯域ネットワークの材料分野での有効利用の一例として、動画像伝送による遠隔実験機能を付与したNi基超耐熱合金のための材料情報システムを構築した。さらに、金属材料技術研究所 (つくば市: NRIMと略)、科学技術振興事業団 (東京: JSTと略) およびミシガン州立大 (アメリカ: MSUと略) との間に敷設された45 Mbpsの特定回線を用いた実証実験を行い、システムの性能や操作性などの評価を行った。以下に構築した材料情報システムの概要と実証試験の結果について報

告する。ここで、遠隔実験とは高価なあるいは管理が困難な実験施設をネットワークを介して遠隔地から利用しようとするもので、材料分野では金属組織/電顕像などの静止/動画像が実験結果として得られることが多く、リアルタイム動画像伝送機能が不可欠となる。

2. 材料情報システムの概要と機能

Fig. 1に材料情報システムの概念図を示す。新材料の開発を効率的に行うためには、既存合金に関するデータの検索や未知材料の特性予測を行うシミュレーションなどを有機的・統合的に扱える環境が必要である。また、遠隔地のコンピュータ上から予測結果の実証実験を行えば非常に便利になる。著者らは材料情報データベース、特性予測シミュレータ、遠隔実験機能の3つをネットワーク上に構築することによって、これを具現化できると考えた。今回はNi基超耐熱合金を対象材料として、World Wide Web (WWWと略) サーバー上に特性予測シミュレータやマルチメディア・データベース (MMDBと略)、さらに金属組織動画像リアルタイム伝送ツール (動画像伝送ツールと略) を広帯域ネットワークからWWWブラウザを通じて利用できるシステムを構築した。

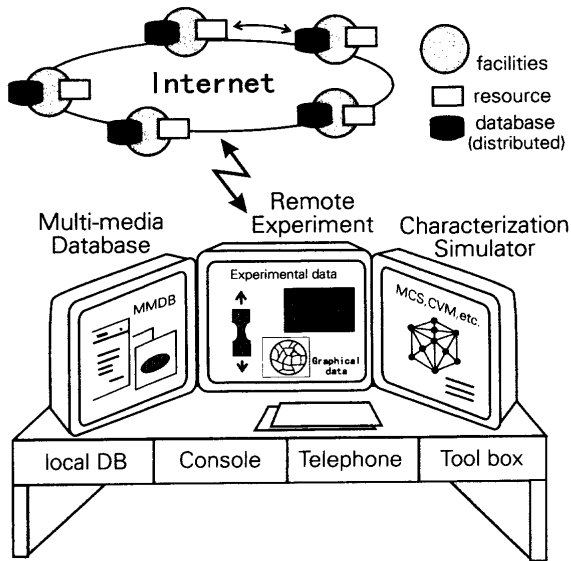


Fig. 1. Schematic diagram of the integrated materials research information system.

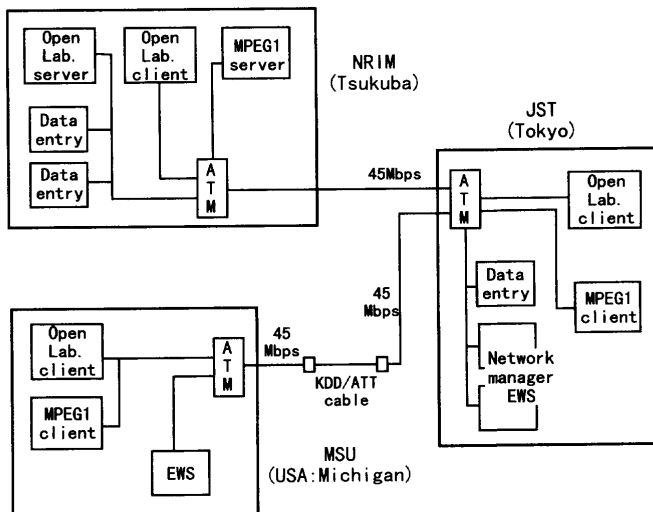


Fig. 2. Hardware configuration of the system.

2・1 ハードウェア構成

Fig. 2にハードウェア構成を示す。NRIM, JSTおよびMSUサイトの各マシンをATM装置(Asynchronous Transfer Mode switching system)を介して45 Mbps広帯域回線で連結した。各サイトには動画像伝送ツール, 特性予測シミュレータ, MMDBおよびテレビ会議用のマシンを配置した。なお, 遠隔地への動画像伝送は通信回線の信号遅延に強く影響されると考え, 予備的に遅延時間測定を行った。その結果, 通常の1 Mbps以下の回線を用いた場合, 国内で10~100 ms, 海外で100~300 msの信号遅延があり, 45 Mbpsの広帯域回線においてもNRIM-JST間で1~4 ms, NRIM-MSU間で200 msの遅延があることが分かった。これより, 本システムの通信手順は送受信が確実なTCP/IP方式を基本とし, 遠隔地であるMSUへの動画像伝送は, 送信エラーチェックを行わないUDP方式を使用することとした。

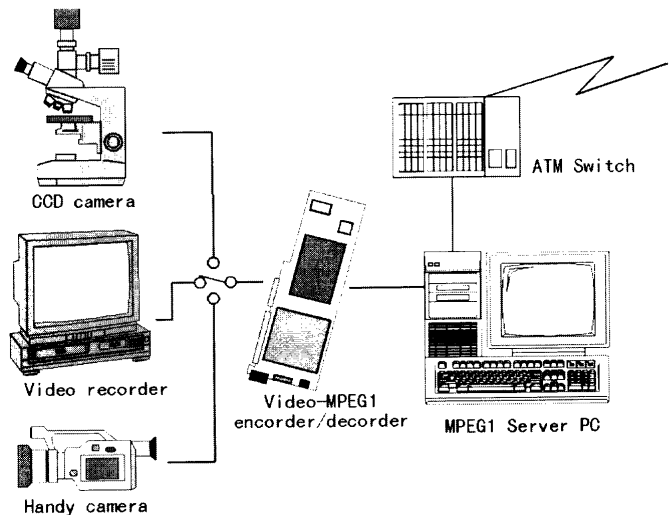


Fig. 3. Schematic diagram of the moving picture transfer tool.

2・2 金属組織動画像リアルタイム伝送ツール⁶⁾

Fig. 3に遠隔実験の基本機能となる動画像伝送ツールを示す。現在, 種々の動画像の圧縮・再生方式が考案されているが, 広帯域ネットワークのATMとの相性が良いことが確認されているISO規格のMPEG1方式を採用した。これは入力映像を1画面(frame)当たり352×240 (pixel/frame)画素に変換し, 最大30 (frames/s)まで伝送可能で, 高速な現象を除いた材料実験の映像を扱える。動画像の入力源としては光学顕微鏡に取付けたCCDカメラ, ビデオレコーダ(VTR)およびハンディカメラとした。出力画像は352×240画素(等倍), 704×480画素(2倍), 1056×720画素(3倍)が表示できる。

2・3 TV会議ツール⁶⁾

TV会議ツールは遠隔実験における連絡とAEなどの音声データの通信に用いた。音声とビデオを実験者間で共有するため, 電話や電子メールより飛躍的に多くの情報の伝達ができる。今回は市販ソフトウェア(Sun ShowMe)を用いた。音声のほか, 160×120画素(小), 320×240画素(中), 640×480画素(大)のビデオ画面, さらにホワイトボードと称する静止画/文字情報メモを共有できる。

2・4 特性予測シミュレータ

WWW上の特性予測シミュレータとしてNi基超耐熱合金の特性予測のための材料設計プログラムを用意した。これは既存合金から得られた組織・特性の経験則モデルに基づくもので, 構成相の組成や量比などの組織予測や高温強度などの機械的特性の予測ができる。Table 1に予測できる項目の概略を示す。本システムでは, 合金組成を入力すると予測結果が表形式で出力されるユーザインターフェイスも整備した。

2・5 マルチメディア・データベース

データ構造をFig. 4に示す。Ni基超耐熱合金のデータを素材, 文献および試験の3グループに大別し, 40テーブル

Table 1. List of parameters for the alloy design program.

Key	Parameter or property (unit)	Condition
GP, G	Chemical composition of γ' and γ phases (at%)	900 °C
F.GP	γ' phase amount (at. Fraction wt%)	900 °C
DENSITY	Density (g/cm ³)	R.T
SI	Solution Index	900 °C
LAT.GP, G	Lattice parameter of γ' and γ phases (Å)	R.T
LM	Lattice misfit(%) = $[(a_{\gamma'} - a_{\gamma})/a_{\gamma}] * 100$	R.T
NV.GP, G	Electron vacancy number of γ' and γ phases	900 °C
NV.G-NVC	Barrow's PHACOMP	900 °C
LIQ	Liquidus temperature (°C)	
SOL1	Solidus temperature (°C)	
RANGE	Melting range (°C)	
SOL2	Incipient melting temperature (°C)	
SOLV	Solvus temperature (°C)	
WDW	Solution treatment window (°C)	
H.COR.C	Metal loss by hot corrosion in crucible test (Ratio to IN738)	900 °C
H.COR.B	Penetration by hot corrosion in burner rig (Ratio to IN738)	850 °C
YS	Yield stress as CC (MPa)	900 °C
UTS	Ultimate tensile strength as CC (MPa)	900 °C
EL	Tensile elongation as CC (%)	900 °C
LIFE.SC, CC	Creep rupture life as SC and CC (h)	1000 °C/118 MPa
SPC.STRGTH	Specific strength as CC (MPa)/(g/cm ³)	980 °C/100 h

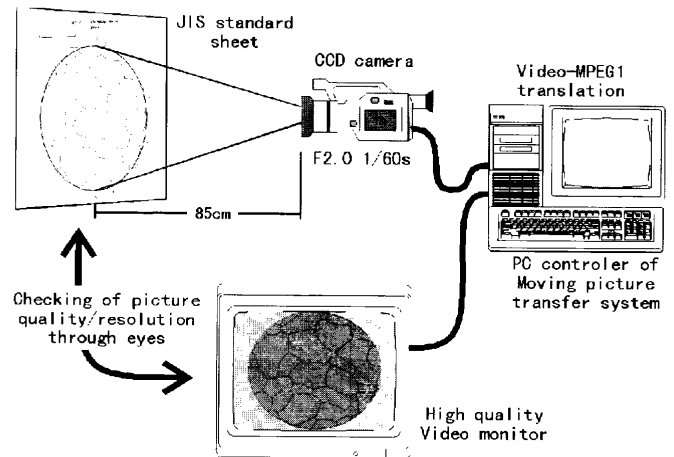


Fig. 5. Schematics of the picture resolution/quality evaluation test of the moving picture transfer tool.

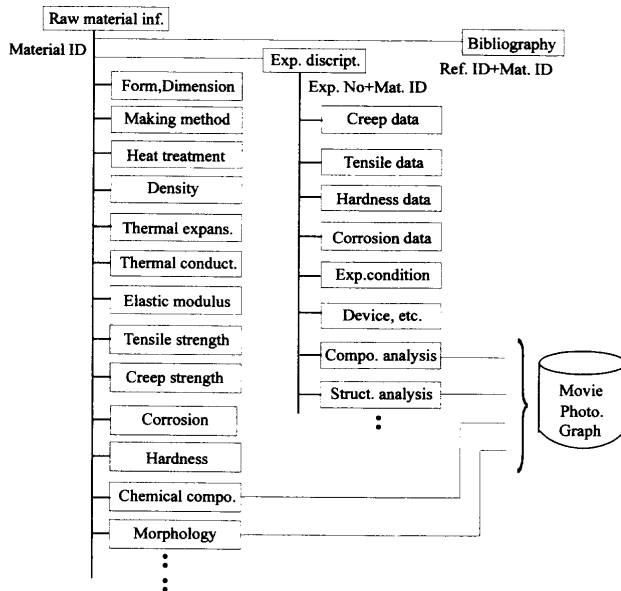


Fig. 4. Data structure of the multi-media database for Ni-base superalloys.

(300項目)に整理した。すなわち、合金素材の組成、機械的性質、物理定数など素材に関する代表値を格納するテーブル群、実験結果や条件、解析法など生データを格納するテーブル群、辞典・関連文献を格納するテーブルを素材ID、文献IDおよび試験IDで関連づけた。静止/動画像情報などの非数値データは、データ名、データ形式、格納場所を関連テーブルに記述して対応した。本データベースはインターネットから利用できるインターフェイスを持ち、約200のNi基超耐熱合金のマルチメディアのデータについて、素材名から組成や物性値、機械的特性、文献などの検索が可能である。また、数値データと画像情報の連携ができ、たとえば、X線アナライザ(EPMA)による分析結果と分析箇所の組織写真を対応づけて表示することも可能となった。

3. 実験と考察

本システムの実効性能を調べるため、TV会議およびWWWの材料設計プログラムを同時に作動させた状態での伝送動画像の分解能、画質、伝送速度を計測した。

以下に実験結果を示す。

3・1 伝送画像の分解能

材料関係の画像が実質的にどの程度の分解能・画質で伝送されるかを調べるため、鋼のフェライト結晶粒度標準図(JIS G0552)を用いた画像伝送・評価実験を行った。実験方法の模式図をFig. 5に示す。まず、粒度1のJIS標準図が撮影範囲全面となる位置にCCDカメラを固定し、そのビデオ出力を動画像伝送ツールに入力した。ついで、粒度1から粒度8までの標準図について、標準図中の最小結晶粒界を出力画像で判別可能か否かを目視により判定した。なお、CCDカメラの有効画素数は38万画素(780×487画素)で、MPEG1の分解能(352×240画素)より良く、本実験には十分である。

Fig. 6に粒度1(実寸145mmφ、線幅約0.4mm)、粒度7および粒度8(ともに実寸72.5mmφ、線幅約0.2mm)の標準図における実験結果を示す。粒度1の標準図は縦横の画素数が240×220の動画像として変換・伝送され、その画質は良好で粒界は明瞭に判別できた。粒度番号が大きくなるに従って伝送画像の画質は低下したが、粒度7までは最小結晶粒界の判別が可能であった。しかし、粒度8では粒と粒界線が同程度の画素数となり判然としなかった。動画像の分解能を標準図中の最小領域を再現・判別できる限界と定義すれば、MPEG1方式の動画像伝送ツールの分解能は粒度7程度であることが分かった。

3・2 動画像の伝送速度

動画像の伝送速度(frames/s)によって、伝送可能な動画像の動きの速さが決まる。すなわち、30 frames/sの伝送速度であれば33msの画像変化を完全に再生できる。そこで、

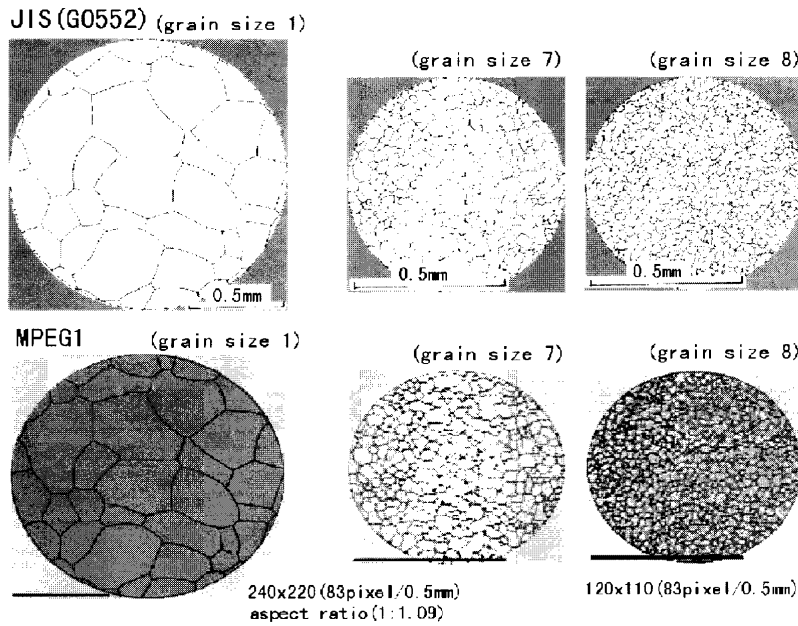


Fig. 6. Picture resolution/quality for the grain class 1, 7 and 8 of JIS standard (JIS G0552).

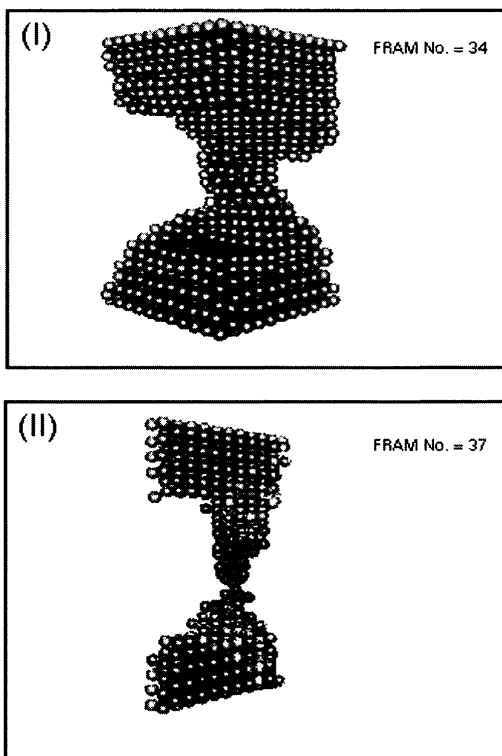


Fig. 7. Test patterns (I) and (II) for the transfer rate measurement of the moving picture transfer tool.

本システムの動画像伝送速度を実験的に計測した。実験はMD法による破壊シミュレーション画像⁷⁾を用い、NRIM-NRIM間およびNRIM-JST間の2つの経路で行った。なお、画像のフレーム間の変化量および受信側マシンの性能が伝送速度に強く影響することを考慮して、フレーム間の画像変化量は現実的な上限と思われる50%固定とした。以下に実験手順と結果を示す。

1. Fig. 7に示す画像(I, II)の2種を用いて、同一画像のみの

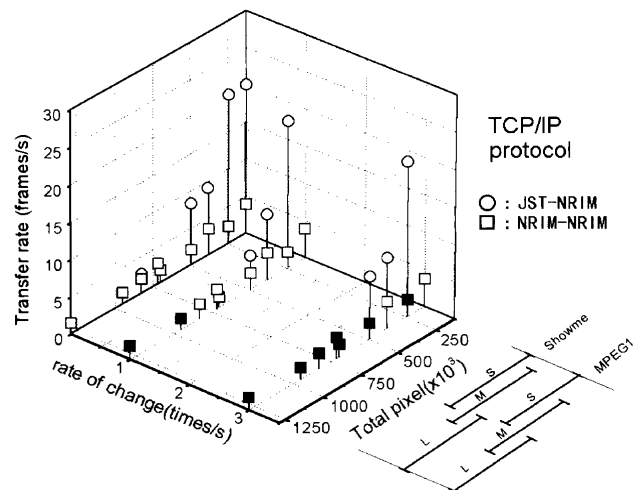


Fig. 8. Transfer rates of moving picture under TCP/IP protocol.

もの、画像を毎秒1回、3回切替えるものの3種類の動画像を作製した。

2. TV会議および動画像伝送ツールを同時に作動させた状態で、受信側にて伝送フレーム数を計数した。

なお、受信側マシンはNRIMではSun/SS20 (性能: 125SPECINT, 121SPECFP), JSTではSun/Ultra Creator 3D (性能: 252SPECINT, 351SPECFP)である。

Fig. 8および9に実験結果を示す (○: NRIM-JST間, □: NRIM-NRIM間)。Z軸に伝送速度(frames/s), X軸に画像の切替え数(times/s), Y軸に受信側のTV会議と動画像伝送ツール(ShowMe, MPEG1)の画素総数と画面サイズを表す。また、図中の黒塗り印は不良再生をした場合を表している。ここで、不良再生とは目視で動画像が一時停止したり、マシン自体が異常動作した場合をいう。

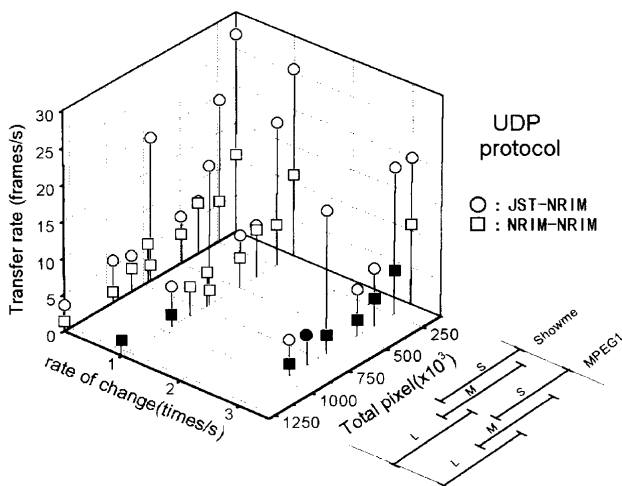


Fig. 9. Transfer rates of moving picture under UDP protocol.

Table 2. The image transfer rate under TCP/IP and UDP protocols. (frame/s)

Site	TCP/IP		UDP	
	Min	Max	Min	Max
NRIM (Sun SS20)	1.35	3.85	1.8	11.1
JST (Sun Ultra 3D)	2.6	20.75	3.6	27.0

Fig. 8に示すTCP/IP方式ではNRIM-JST間にて最小2.6, 最大20.8 frames/s, NRIM-NRIM間では最小1.3, 最大3.9 frames/sの伝送速度が得られた。不良再生に関しては, NRIM-NRIM間で出力サイズを大きくした場合に頻発した。また, 画像切替え数による伝送速度の変化は少なかった。一方, Fig. 9に示すUDP方式ではNRIM-JST間において最小3.6, 最大27 frames/s, NRIM-NRIM間では最小1.3, 最大10.9 frames/sと伝送速度が大きくなった。しかし, TCP/IP方式では良好に再生した4~6 frames/sの伝送速度においても不良再生を起こす場合があった。これはUDP方式では受信側の動作状態に関係なく, 送信側から画像データが送られるためと考えられる。すなわち, 次々に受信される画像データの表示が間に合わずにマシンの異常動作を起こしたためと考える。

Table 2は正常な画像伝送が行われた場合の最小/最大の伝送速度を示す。UDP方式による方が伝送速度が大きくなり, JST側では1.3~1.4倍程度, NRIM側では1.4~2.9倍となった。すなわち, 動画の伝送速度は受信側マシンの再生・表示能力に強く依存し, 処理能力の高いJST側ではUDP方式にするメリットは少ない。一方, NRIM側のように処理能力が低い側に動きの速い動画を伝送したい場合は, システムの安定性を損なうがUDP方式の方が有利である。

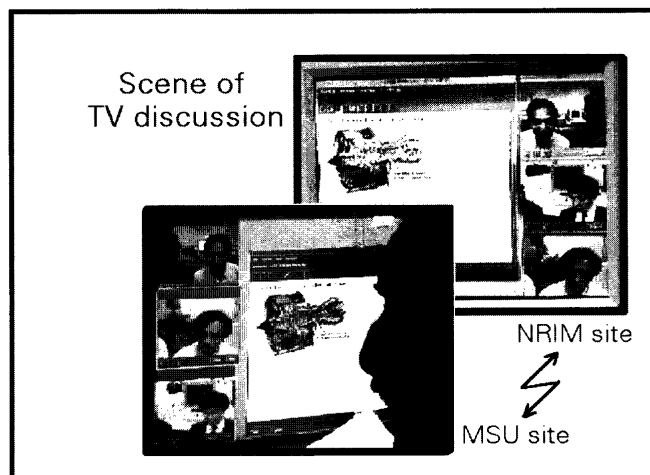


Fig. 10. Scene of TV conference/discussion.

4. 遠隔実験の実証試験

遠隔実験機能の実証のための模擬実験をNRIM-MSU間にて行った。実験は下記の手順に沿って, マクロ・マイクロ組織解析, シミュレーション, 合金設計プログラムに関して行った。

1. 実験開始

実験の開始をTV会議ツールにより確認した後, NRIMからジェットエンジン, タービンプレードおよび試験片形状の画像を伝送した。MSUは対象がNi基単結晶合金であることを確認し, さらにマイクロ組織の提示を要求した(Fig.10)。

2. ミクロ組織の観察

NRIMからNi基超合金の铸造ままおよび時効材の組織像を光顕CCDカメラから伝送し, 観察箇所と倍率をMSUの要求に従って変化させた。これにより, MSUでは自前の試料のように溶解偏析や熱処理による偏析の消失などを観察できた(Fig.11)。

3. ナノ構造解析

NRIMからアトムプローブ電界イオン顕微鏡(APFIM)によるナノ構造解析例として, 試料先端部から原子が蒸発している様子のVTR画像と原子層一層毎の化学組成の変化を解析した結果を示した(Fig.12)。

4. シミュレーション

モンテカルロ法による原子配列および分子動力学法による変形のシミュレーションの動画を伝送した。画像を見ながら, 原子・分子レベルのシミュレーションの有効性と計算手法などを議論した。

5. 合金設計プログラム

MSUから合金設計プログラムを用いてNi基超合金の特性予測を試行してもらい, 予測結果や有用性について議論を行った。

以上の結果, Ni基超耐熱合金設計情報システムの各機

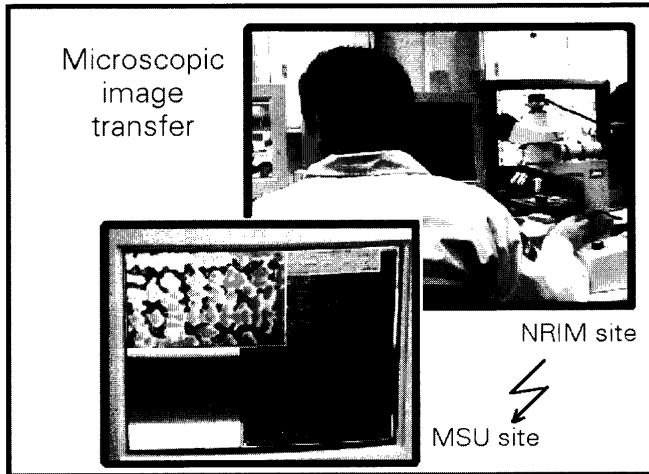


Fig. 11. Scene of the transfer of the optical microscopic image.

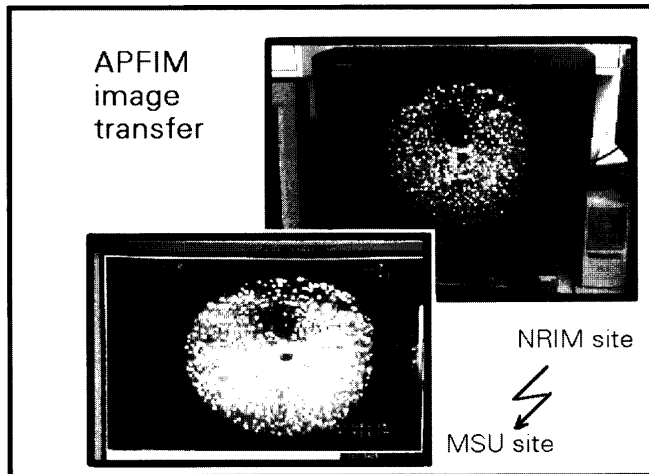


Fig. 12. Scene of the transfer of the atomic scale image obtained from the Atom Probe Field Ion Microscope.

能が正常に動作することが確認できた。また、試験実施時の情報伝送量はTV会議ツールで2~4 Mbps, WWWで0.3~1 Mbps, 動画伝送ツールで常時0.6 Mbpsとなり, MPEG1およびShowmeによる遠隔実験機能は6 Mbps以上の通信回線で実現できることが分かった。さらに, TV会議では音声のハウリングが起り会話が成り立たない場合があり, 音声エコーキャンセル対策が必須であることも分かった。

5. 結論

遠隔実験機能を有した材料情報システムを構築し,

45 Mbpsの広帯域ネットワーク回線での実証試験を行った。その結果, 以下の知見を得た。

1. 遠隔実験の基本機能として構築した金属組織動画リアルタイム伝送ツールによる伝送画像の画質分解能は鋼のフェライト結晶粒度標準図(JIS G0552)の粒度7相当で, 十分, 材料分野で実用できる。また, 遠距離(NRIM-MSU間)と近距離(NRIM-JST間)での差異はなかった。

2. 動画の伝送速度は受信側のハード・ソフト性能に強く依存し, 約2~25 (frames/s)が得られた。過渡現象などの急激な変化がない, たとえば, 引張り試験や電子顕微鏡像など材料関係の通常の動画を遠隔地に伝送が可能であることが分かった。

3. 通信方式に関して, TCP/IP方式の方がシステムの動作が安定であるが, UDP方式の方が画像伝送速度を大きくできた。また, 通信回線による信号遅延は国内で10 ms, 米国で200 ms程度あり, 米国への画像伝送はUDP方式でのみ可能であった。

4. 6 Mbps以上の通信回線を占有できれば, MPEG1 動画伝送や特性予測シミュレータ, マルチメディアデータベース, ShowmeTV会議ツールを同時に稼働でき, 遠隔実験を実現し得ることが分かった。

今後, 本システムの機能充実を図るために, さらに高品位の動画伝送ツールの構築, データベースや各種データ解析ツールの改良などを行う予定である。また, 世界規模での広帯域通信回線の整備や遠隔地への大容量データの高効率伝送, 音声エコーキャンセルなどの要素技術の向上も必要である。

おわりに, 本実験の試行時点では広帯域通信回線に対応した市販のハードウェア・ソフトウェアなどが無く, 材料関係の情報を扱うシステムとしての必要機能や評価方法の検討が十分ではないが, 同種のシステム構築の際の参考になれば幸いである。

文 献

- 1) 横川忠晴, 原田広史, 藤田充苗: 第33回情報科学技術研究集会論文集, (1996), 79.
- 2) T.Yokokawa, H.Harada and M.Fujita: *CAMP-ISIJ*, 9 (1996), 1206.
- 3) H.Harada and M.Yamasaki: *Tetsu-to-Hagané*, 65 (1979), 337.
- 4) 横川忠晴, 原田広史, 藤田充苗: 日本金属学会春期講演大会概要集, (1997), 45.
- 5) K.Chang, S.Konidaris: Progress Report (Pilot Projects; Theme 2) of The G7 Inf. Soc. Conf., European Commission, Brussels, (1995).
- 6) 横川忠晴, 原田広史, 藤田充苗: 第34回情報科学技術研究集会予稿集, (1996), 25.
- 7) M.Fujita and K.Kusunoki: *J. of Surf. Anal.*, 3 (1997), 521.