

薄膜材料デバイス研究会第10回研究集会報告

はじめに

設立から10周年を迎えた薄膜材料デバイス研究会は、10回目の研究集会の開催を記念し、開催期間を通常の2日間から3日間に延長し、10月31日、11月1日、11月2日に龍谷大学アバンティ響都ホール（京都市）にて開催された。年1回開催される本研究集会では、全国から研究者や技術者が集い、薄膜材料技術、デバイス作製・評価技術等の多岐にわたる議論を行う。参加者同士は互いの垣根を取り払い、チュートリアル、招待講演、口頭講演、ランプセッション、ポスター講演を通じて活発な議論を展開する。

第10回研究集会では、ここ10年の間に急速な進展を遂げたフラットパネルディスプレイや太陽電池等の薄膜デバイスを振り返るとともに新たな応用展開を議論することを目的とし、「薄膜デバイスの応用展開」を主テーマとしてプログラム編成を行った。招待講演では、第一線で活躍されている大学や企業の研究者を中心に13名の講師をお招きし、新規材料・デバイスについて、ご講演いただいた。チュートリアル講演では、本研究会が主軸としてきたシリコン系、酸化物系、有機材料系の分野から講師をお招きし、各分野の材料・デバイスの基礎から応用展開に関してのご講義をいただいた。一般講演からは19件の口頭講演、36件のポスター講演が行われた。全発表論文数は68件であり、187名の参加を集め、分野横断的に活発な議論が行われた。

本研究会では、招待講演を除く一般講演に対して、参加者全員による投票が行われ、ベストペーパーアワードならびにスチューデントアワードが決定される。第10回研究集会のベストペーパーアワードには奈良先端科学技術大学院大学の大橋賢次氏らの論文が選出され、スチューデントアワードには高知工科大学の竹之内良太氏ら、高知工科大学の介田忠宏氏ら、広島大学の森崎誠司氏ら、奈良先端科学技術大学院大学の伊藤光洋氏らの4件の論文が選出され、閉会式で表彰状と副賞が授与された。

本研究集会の開催に際しては、財団法人関西エネルギー・リサイクル科学研究振興財団からご助成頂いた。また、多くの企業から展示・広告を通じてご支援頂いた。学会からは、応用物理学会、電気学会、電子情報通信学会、日本物理学会、日本真空学会、応用物理学



実行委員長開会挨拶



ベストペーパーアワード表彰式

会 有機分子・バイオエレクトロニクス分科会、応用物理学会 プラズマエレクトロニクス分科会、2013 The Twentieth International Workshop on Active-Matrix Flatpanel Displays and Devices (AM-FPD '13)、Workshop on Active Matrix Displays, The 20th International Display Workshops (AMD, IDW '13) にご協賛頂いた。心より御礼申し上げる次第である。

10周年記念講演

10周年記念講演では、初代組織委員長の東京農工大学の鮫島俊之先生から「薄膜材料デバイス研究会 10周年に寄せて」と題するご講演を頂いた。研究会組織の立ち上げや初回から昨年までに開催された研究集会を振り返って、様々な分析を交えながら思い出を語って頂いた。研究集会開催にあたっては、参加者が深く理解し、活発な議論を行って頂くために、チュートリアルコースや口頭発表を含めた全講演でのポスター発表の提供、参加者アンケートによる意見聴取等の様々な工夫が重ねられた事についてもお聞かせ頂いた。あらためて、この研究集会の重要性を認識するご講演となった。さらに、若い研究者としての心構えについて熱いメッセージを送って頂いた。



鮫島先生（農工大）による記念特別講演

チュートリアル

今回は第10回記念研究集会のために会期が長いということで、例年研究集会初日の午前にとまとめて行っていたチュートリアル講演を、3日間の研究集会の朝一番に3回に分けて開催した。本研究集会のテーマである「薄膜デバイスの応用展開」を受けて、有機半導体薄膜を中心としたプリントドエレクトロニクスの応用研究、酸化半導体薄膜のデバイス研究、シリコン系薄膜太陽電池の現状と研究最新トピックについて、それぞれ分野外の研究者・技術者にも解りやすい講演が行われた。

初日朝には、産業技術総合研究所の鎌田俊英先生から「プリントドエレクトロニクスの基盤技術と産業展開」と題するご講演を頂いた。プリントドエレクトロニクスのプロセスにおける高速であることや低温であることの重要性、各種パターン形成法、次世代プリントドエレクトロニクス技術研究組合における技術開発の現状、などについて解説頂いた。



鎌田先生（産総研）によるチュートリアル

2日目朝には、東京工業大学の雲見日出也先生から「酸化物半導体電子デバイスの進展」と題するご講演を頂いた。同氏はIGZOの技術開発の初期から実用化までの牽引役を果たされおり、その様なバックグラウンドに基づき、酸化物半導体開発の歴史、バンドおよび伝導モデル、ギャップ内欠陥と電気特性、プロセス技術、信頼性、更に実用化に於いて重要な知財戦略に至るまで、広範な知識をち密且つ丁寧に解説いただき、酸化物半導体技術全般に関する俯瞰的知識をご講義いただいた。



雲見先生（東工大）によるチュートリアル

3日目朝には、島根大学の葉文昌先生から「シリコン系太陽電池」と題するご講演を頂いた。シリコン系太陽電池の分類と様々な作成法に始まり、基本原理や効率向上のためのこれまでの取り組み、様々なシリコン薄膜の結晶化法、などについて解りやすく解説頂き、さらに、同氏の最新の研究成果として、スパッタ法による、従来よりも格段に低い温度でのシリコンエピタキシャル成長について紹介があった。



葉先生（島根大）によるチュートリアル

オーラルセッション1

オーラルセッション1「有機トランジスタ」では、有機トランジスタの表示デバイス応用やプロセス開発、特性解析に関して、1件の招待講演、3件の一般講演が行われた。

招待講演として、ソニー株式会社の石井由威氏から「塗布、印刷プロセスを用いて形成した有機 TFT 駆動フレキシブル電子ペーパー」と題したご講演を頂いた。有機 TFT 駆動のフレキシブルディスプレイを大型基板上に形成するプロセス開発を行い、対角 13.3 インチで 150dpi や 200dpi の有機 TFT 駆動のフレキシブル電子ペーパーの開発に成功したことが報告された。プラスチック基板での有機 TFT 回路作製にあたっては、平行平板型反転オフセット印刷を用いることで、従来のフォトリソグラフィと同等のパターン精度が実現され、従来の有機 TFT 駆動フレキシブル電子ペーパーと同等以上の解像



石井氏（SONY）による招待講演

度、表示特性が実現できることが示された。

一般講演では、千葉大学の酒井正俊先生から「ラミネートプロセスによるフレキシブル有機薄膜トランジスタの作製」と題するご講演を頂いた。有機半導体の比較的低い融点に着目したラミネートプロセスを用いた有機 TFT の新規作製法について報告された。フレキシブルフィルム上に市販のラミネート装置を用いた形成された低分子半導体薄膜では融液の流動方向に対応した配向成長が見られ、作製した有機 TFT 素子は比較的良好な特性を示し、曲げ耐性を示すことが報告された。次に、神戸大学の木村由斉氏から「疑似 CMOS 回路への応用に向けた有機薄膜トランジスタの閾値電圧制御」と題するご講演を頂いた。有機 TFT の閾値電圧に対する SiO₂ ゲート絶縁膜への酸素プラズマ処理による影響が検討され、酸素プラズマ処理は有機 TFT の移動度低下を伴わずに、閾値電圧シフト量を処理時間により制御できることが明らかにされた。更に、この閾値電圧制御法を利用した疑似 CMOS 回路に向けてシミュレーションによる検討が報告された。最後に、奈良先端大の中村俊介氏から「新規多結晶モデルによる有機薄膜トランジスタにおける温度依存キャリア移動度の解析」と題するご講演を頂いた。有機 TFT において詳細が解明されていない多結晶有機 TFT のキャリア輸送の温度依存性について、結晶ドメイン内の抵抗を考慮した「直列接続モデル」とソースからドレインに渡ってキャリア輸送障壁が無い電流パスが存在することを考慮した「直列+並列接続モデル」を考案された。その解析から基板種による HOMO バンド端の揺らぎの大きさの違い等のキャリア輸送制限要因についての検討が可能であることが報告された。

オーラルセッション 2

オーラルセッション 2「有機発光素子」では、九州大学の安達千波矢先生より「高効率熱活性化遅延蛍光の登場—有機発光材料の新展開」と題する招待講演を頂いた。

現在の高効率有機 EL 素子では希少金属を含有する有機半導体からのリン光が利用されているが、希少金属を用いずに三重項励起子を熱エネルギーにより一重項励起子にアップコンバージョンさせる熱活性遅延蛍光 (TADF) 材料が有機 EL の新たな高効率発光層として期待されている。同氏らは一重項と三重項の励起エネルギー差が小さく、かつ、高効率発光が可能な有機材料の合成に取り組んでおり、100%に迫る発光効率を有する TADF 材料の開発に成功したことが報告された。その結果、リン光有機 EL 素子に匹敵する外部量子効率約 19%の高効率有機 EL が実現できることが示された。



安達先生 (九大) による招待講演

オーラルセッション3

オーラルセッション3「化合物新規応用」では、化合物材料の太陽電池、および熱電素子への応用を中心に、2件の招待講演と2件の一般講演が行われた。

招待講演では、初めにシャープ株式会社の高本達也氏から「超高効率多接合型太陽電池の開発」と題するご講演を頂いた。InGaAsボトムセルを用いた3接合セルの高出率化を実現するために、InGaAsを最後に成長させる逆積み成長法と太陽電池成長層の転写プロセスが考案された。逆積み成長法を用いて作製されたInGaP/GaAs/InGaAs3接合型太陽電池において、302倍集光下で44.4%の変換効率が達成された。



高本先生（シャープ）による招待講演

次に、九州工業大学の宮崎康次先生から「ナノポーラス熱電特性の生成とその応用」と題する招待講演を頂いた。同氏はナノポーラス体の持つ低い熱伝導率に着目し、陽極酸化アルミナの自己組織化構造を利用し、 Bi_2Te_3 を真空蒸着した薄膜素子で極めて低い熱伝導率が得られることを報告している。また、フレキシブル化に際して、ブロックコポリマー（PMMA-*b*-PMAPOSS）のマイクロ相分離構造を利用することで直径90 nm程度のポーラス構造が形成でき、熱電特性の向上が可能であることを示した。フレキシブル基板上でモジュール化した熱電素子を作製し、ポーラス構造のない Bi_2Te_3 と比較し、150度以上において1.5倍以上の出力向上が可能であることが示された。



宮崎先生（九工大）による招待講演

一般講演では、奈良先端科学技術大学院大学の野々口斐之先生から「 Bi_2Te_3 ナノワイヤ不織布の作製と熱電変換特性」と題するご講演を頂いた。 Bi_2Te_3 ナノワイヤとナノチューブを個別に合成する手法が開発された。両材料から作製した不織布体はn型の熱電特性を示し、前者は後者と比べて3倍の無次元性能指数が与えられることが報告され、無機材料を用いたフレキシブル熱電素子の可能性が示された。次に、奈良先端科学技術大学院大学の土江貴洋氏から「静電噴射法によるZnS量子ドットの作製」と題するご講演を頂いた。発光材料などへの応用を見据えたZnS量子ドットの形成法が提案された。ノズル中の前駆体溶液に高電界を印加することで微小液滴を生成する静電噴霧法により、平均粒径3.4 nmのZnS量子ドットの作製が可能であることが示された。また、ZnS-AcOHを溶液に用いた場合、ドットの粒径が噴霧時のフローレートに依存しないことを見出した。この現象は、レイリー分裂によるものであるとの説明がなされ、応用面では、噴霧の高速化と粒径の微小化を両立できるという見解も示された。

オーラルセッション4

オーラルセッション4「酸化物&化合物トランジスタ」では、1件の招待講演、2件の一般講演が行われた。

招待講演では、福井大学の葛原正明先生より「窒化物半導体トランジスタの現状と展望」と題するご講演を頂いた。Ⅲ族窒化物半導体 HEMT の動作原理に始まり、デバイス特性評価におけるパラメータについて詳しい説明がなされた。特に、破棄耐圧とオン電流の動的な劣化現象である電流コラプスの決定要因と対策に関して詳細な議論についてご説明頂いた。



葛原先生（福井大）による招待講演

一般講演では、高知工科大学の竹之内良太氏から「ZnSnO 薄膜トランジスタにおける MgO ドーピング効果」と題するご講演を頂いた。レアメタルフリーの ZnSnO TFT への MgO ドーピングが特性・信頼性改善に寄与することが報告された。更に MgO ドープ素子に 350 °C のポストアニールを施すことで、IGZO TFT と同等の電界効果移動度 15.8 cm²/Vs、S 値 0.14 V/dec を得ることが可能であることが示された。次に、大阪大学の市村昂士氏から「フェライトエピタキシャル薄膜をチャネルとした電気二重層トランジスタ」と題するご講演を頂いた。強誘電 Zn フェライトチャネルとイオン液体ゲート絶縁膜を用いた電界効果トランジスタに関して、電気二重層ゲーティングによるスピネルフェライトの電気・磁気輸送特性の変化について調べ、電気伝導特性が Zn 置換量に強く依存することが報告された。特に、高置換領域では不揮発性の静電キャリアドーピングが支配的に生じることが明らかにされた。

オーラルセッション5

オーラルセッション5「IGZO」では、1件の招待講演と4件の一般講演から構成された。

招待講演では、ルネサスエレクトロニクス株式会社の林喜宏氏から「薄膜酸化物半導体を用いた LSI 配線トランジスタとその応用」と題するご講演を頂いた。同氏はオンチップ・異電圧ブリッジングインターフェースの実現を目指しており、LSI 多層配線中に高耐圧、高移動度、高オンオフ比等の適した特性を有するアモルファス IGZO TFT を作製することが可能であることが報告された。ポスターセッションでは、実際に LSI 配線トランジスタ回路を用いてモータを駆動させるデモが行われた。

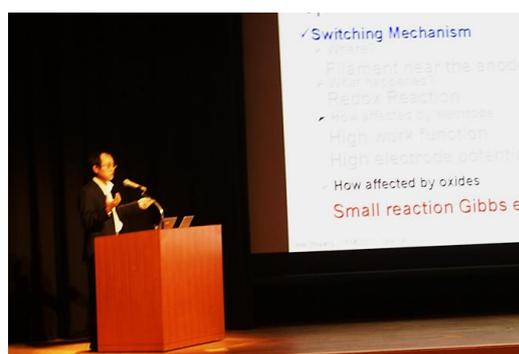


林先生（ルネサス）による招待講演

一般講演では、初めに日本大学の永井将司氏から「非晶質 InGaZnO4 薄膜のギャップ内準位評価」と題するご講演を頂いた。アモルファス IGZO TFT の negative bias illumination stress (NBIS) による閾値電圧シフトについて、CPM 法、変調アドミタンス法を用いたメカニズムの議論がなされた。両法の結果から、NBIS の原因をホール性準位の形成とホールの長寿命化が原因であるとした。次に、高知工科大学の介田忠宏氏から「オゾン支援ミスト CVD 法による高移動度 ($>10 \text{ cm}^2/\text{Vs}$) IGZO TFT~TFT 特性のチャンネル組成依存性」と題するご講演を頂いた。ミスト CVD 法を用いた IGZO 成膜時にオゾン支援を行う事で特性向上が可能であることが報告された。原料組成比と形成された IGZO 膜の組成の関係を明らかにすることで、電界効果移動度 $12.31 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 、S 値 0.44 V/dec を実現した。日本ゼオン株式会社の小尻尚志氏からは、「IGZO 薄膜トランジスタにおける熱活性型しきい値電圧シフト」と題するご講演を頂いた。IGZO TFT における negative bias temperature irradiation stress (NBTS) を調べ、加熱下でのゲートバイアスストレスによる閾値電圧は NBIS と同様に負電圧側にシフトすることが報告された。NBTS による閾値電圧シフトは 0.29 eV 程度の比較的浅い準位が関与していることを明らかにし、深い準位が関与する NBIS との違いを示唆した。最後に、東京工業大学の犬類貴俊氏より「アモルファス In-Ga-Zn-O を用いたショットキーダイオードの製膜室真空度の影響と光応答特性」と題するご講演を頂いた。異なる真空度で IGZO/Pt ショットキーダイオードを作製し、逆方向電流の原因を検討がなされた。低真空度で作製した薄膜には、水素が 10^{22} cm^{-3} 以上も含まれていることがわかり、信頼性に大きく影響を与えている可能性を示した。

オーラルセッション 6

オーラルセッション 6「メモリ」では、パナソニック株式会社の魏志強氏から「Development of High Reliable TaOx ReRAM with Low Operation Current」と題する招待講演を頂いた。導電性フィラメントを用いた抵抗変化型メモリはその高速性、低消費電力特性から不揮発性メモリとして大きな期待があるが、保持時間の確保等の信頼性の改善が求められていた。同社で量産化に成功した酸化 Ta (TaOx) を使ったメモリの電気特性や信頼性に関して、そのメカニズムも含めた詳しい解析結果が報告された。

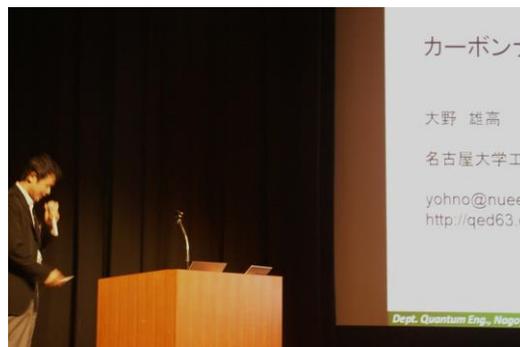


魏先生（パナソニック）による招待講演

オーラルセッション 7

オーラルセッション 7「カーボン」では、カーボンナノチューブ (CNT) のデバイス応用に関する研究を集め、1 件の招待講演と 2 件の一般講演が行われた。

招待講演では、名古屋大学の大野雄高先生より「カーボンナノチューブ薄膜デバイス」と題するご講演を頂いた。CNTの薄膜デバイス応用についての幅広い解説に始まり、転写法によるフレキシブル基板への高品質CNT膜形成法、その透明導電膜としての応用、薄膜トランジスタとしての応用について詳しく紹介された。転写法と浮遊触媒CVD法を用いることで、CNT TFTで $600 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ を超える移動度と 10^6 程度のオンオフ比が実現できることが報告された。



大野先生（名大）による招待講演

一般講演では、初めに奈良先端科学技術大学院大学の伊藤光洋氏より「コアシェル型分子を利用したカーボンナノチューブ接合部の電子準位制御による熱電特性の向上」と題するご講演を頂いた。薄膜中のCNT接合部に無機コアを有する籠状タンパク分子を挿入することにより、熱伝導を押さえた上でゼーベック係数・導電率ともに増加させ、性能指数を2200倍に向上させることに成功したという報告であった。同じく奈良先端科学技術大学院大学の太橋賢次氏より「n型単層カーボンナノチューブ材料の作製と熱電変換モジュールの構築」と題するご講演を頂いた。様々なドーパント分子をCNTに吸着させることによって、p型からn型までCNTのキャリア極性とキャリア濃度を制御することに成功し、それによってこれまで分子系材料では困難であったp、nバランスのとれたπ型フレキシブル熱電変換素子の作製に成功したという報告であった。

オーラルセッション8

オーラルセッション8「Si」では、低温Siプロセスとそれらを用いた低温結晶化Si薄膜のTFT特性に関するものであり、4件の一般講演が行われた。

初めに広島大学の山野真幸氏から「3軸結晶配向巨大線状Si結晶グレインを用いた高性能poly-Si薄膜トランジスタ」と題するご講演を頂いた。ダブルラインビーム連続発振レーザ結晶化法を用いて、3軸配向性の高い多結晶Si薄膜を石英基板上に形成し、その薄膜によるTFT特性で移動度 $560 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ という高移動度が実現できることが報告された。次に東北学院大学の黒須李沙氏から「ガラス基板上の高性能自己整合四端子平面型メタルダブルゲート低温poly-Si TFT」と題するご講演を頂いた。continuous wave laser lateral crystallization (CLC) 法により四端子埋め込み型メタルダブルゲート低温多結晶Si TFTを石英基板上に作製し、高い閾値電圧制御と高い移動度を同時に実現できることが報告された。3番目として、兵庫県立大学の部家彰氏からは、「軟X線照射によるB不純物の低温活性化機構」と題するご講演を頂いた。アンジュレータ光源からの軟X線照射によるSi内のB不純物の低温活性化について検討され、その効果が熱処理に比べて $400 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下で顕著になること、活性化エネルギーが 0.06 eV と熱処理に比べて $1/3$ 程度であるという興味深い報告がされた。最後に、北陸先端大のMaiらから「Irradiation Time Dependence of

Crystallinity of Solid-Phase Crystallized Silicon Thin Films on Crystallization-Induction Layers of Yttria-Stabilized Zirconica by Using Pulse Laser」と題したご講演を頂いた。ガラス基板上に結晶化誘発層として YSZ 薄膜を形成し、その上に堆積した非晶質 Si 膜をパルス YAG レーザ（波長 532 nm）にて微結晶化を行い、ラマン分光法により測定した結晶化率と結晶化ピークの半値幅との関係から、YSZ 薄膜を用いた方が、用いないものに比べて、結晶性が高く、より下地界面からの結晶化が起こっていることが報告された。

ランプセッション

ランプセッションでは、まず、太陽光発電技術研究組合 理事長の桑野幸徳先生より、「薄膜材料デバイスの将来に期待する！ —私が体験した太陽電池、OLED などの研究開発、実用化から—」というタイトルで、1 時間超のご講演を頂いた。特に、集積型アモルファスシリコン太陽電池の開発および世界初の実用化と、やはり世界初のご自宅の太陽光発電所化は、たいへん興味ある内容であった。さらに、薄膜材料デバイスの発展とそれに関わる若い研究者へのエールをいただいたことは、非常にうれしいことであった。



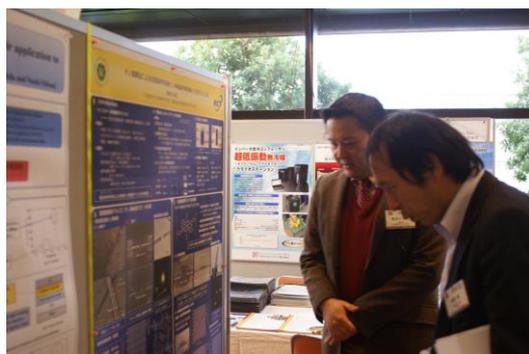
桑野先生（太陽光発電技術研究組合）による特別招待講演

そのあと、投稿論文から選ばれた 2 件のトピックスが発表された。1 件目は、奈良先端科学技術大学院大学の上沼睦典先生の「バイオプロセスによる抵抗変化メモリの微細化」という講演で、2 件目は広島大学の森崎誠司氏の「大気圧マイクロ熱プラズマジェット結晶化 Si 膜を用いた薄膜トランジスタの微細化および CMOS 回路の高速駆動」という講演である。いずれもそれぞれの研究室のオリジナルの研究であるとともに、将来が期待できる内容である。

食事を取りながらのセッションスタイルはすっかり恒例となっているが、リラックスしながらも活発な議論も交わされ、本研究会の特徴ある企画として講演者と参加者ともに有意義なものとなったと思われる。

ポスターセッション

ポスターセッションは、今回の研究集会が例年の2日間とは異なり3日間あることから、研究集会初日の16:20-18:00、2日目の18:20-20:00、最終日の13:00-15:00の3日間で行われた。ポスター講演者以外に招待講演者を含む口頭講演者にもポスター討論を依頼し、合計で64件の発表が行われた。それぞれのポスターセッションの冒頭には、各日にちのテーマ「有機物&太陽電池」、「酸化物&太陽電池」、「Si&Ge&カーボン」ごとに、ポスター講演者による1分間の1ないし2枚のスライドを用いてショートプレゼンテーションが行われた。各発表とも要点が的確にまとめられており、聴講者がポスター討論に参加する上で十分効果的であったと思われる。ポスター配置も、各日にちのテーマごとの3領域に分けられたが、全ポスターの掲示及びポスターの説明はショートプレゼンテーションの有無にかかわらず3日間行われた。各ポスターの前では熱気にあふれた討論が行われ、セッション終了後のアナウンスを行った後でも議論が続けられたポスターも多く見られた。口頭講演者によるポスター発表でも、多くの聴衆が集まり、口頭発表の内容だけでは満足できないより深い議論を行う上で非常に有効であったと思われる。



各会場でのポスターセッション

展示・広告

今年度は、(株)アポロウェーブ、ケニックス(株)、(株)シルバコ・ジャパン、(株)スプリード、中古機械買取販売(株)、(有)デザインシステム、(株)東陽テクニカ、日本カンタムデザイン(株)の8社からのご出展頂き、ポスター会場に併設された展示ブースにて製品の紹介やデモが行われた。また、このほか(株)エリオニクス、(株)システムブレイン、(株)リガク、日本電子(株)より、広告申込があり、アブストラクト集に広告を掲載頂いた。



各企業からの展示ブース

会議開催中は、休憩時間にコマーシャルタイムを 3 分間設け、各社の主力製品や新製品などをご紹介頂いた。休憩時間にもかかわらず、熱心に耳を傾ける参加者が多かったことが印象的であった。また参加企業からは、出店会場が講演会場からたいへん近いことで、時間のある時に何度でも来ていただいた。大きな展示会に比べて一人一人の滞在時間が長く、熱心に話を聞いていただけた。新たな引き合いができてたいへん有意義であったなどの意見が寄せられた。

来年度以降も分析・評価用装置、シミュレーション、プロセス装置、個別ニーズ対応の特注装置など、多種多様な企業の皆様をお招きして、研究者と企業をつなぐ役目を果たせるよう努力したいと考えている。本趣旨にご理解をいただき、協賛いただいた各社に心より御礼を申し上げます。