

実装が拓く新しいもの作りの世界

東京大学 大学院工学系研究科

教授 須賀 唯知



1 はじめに

平成23年5月現在、東日本大震災が今後、産業界の行く末にどのような影響を及ぼすのか予断できない事態となっている。特に、サプライチェーンの寸断による各種産業へのダメージは大きく、国内製造業の重要性を改めて認識させた一面はあったものの、結果的には、日本の製造業の海外シフトがさらに進み、空洞化の新たな要因となることが懸念されている。しかし、このような時期であるからこそ、ものづくりに不可欠な実装技術の醸成を止めてはならない。

2 実装の定義

20年前、「実装」は一部の技術者しか知らない用語であった。1960年前後の基板への部品実装あたりから使われた言葉と思われるが、そのルーツは定かではない。1980年代以降の表面実装技術の急速な進展に伴い、技術者の間では普及したが、それでも、1994年の広辞苑第4版[1]には「実装」の単語はなかった。1998年、改訂第5版目で初めて掲載され、ようやく日本語として認知された言葉となった。そこには（2008年改訂の現行の第6版でも同様に）、『パソコンに「実装」された部品』という用例とともに、『装置や機器の構成部品を実際に取りつけること』と定義されている。エレクトロニクスの分野では、実装はさらに広く、接続interconnection、パッケージングpackaging、搭載/マウントmounting、組立/アセンブリassemblyなどの個別の用語とも同義に使われてきたが、一方で、ソフトウェアの分野では、システム設計段階で決定された仕様を元にソフトウェアに新しい機能を組み込む作業やその手法として、implementationに対応する用語として広く使われるに至っている。自動車では、駆動系や操作系、居住空間などの構成要素を最終的なシステム機能を満たすべくレイアウトすることを「パッケージング（実装）」といい、また、インテリジェントビルへ情報機器やデジタルPBX（Private Branch

eXchange)を「実装」するともいう。最近では、ゲームキャラクタにどのような武器が「実装」されているかを問題にする子もいる。

これらの一見分散した用例で使われている実装の意味は、実はその本質的な点で共通である。すなわち、最終的な目的は、設計された必要機能をシステムとして実体化することであり、その具現化のために、構成要素（部品）をシステムの実空間内あるいは機能空間内に最適に配置し、空間的・機能的に接続する、という点に実装の合目的な定義がある。これらの点を明示し、実装を再定義すると、『設計された必要機能を具現化するため、ハード・ソフト両者を含む構成要素を、空間的・機能的に最適配置・接続することにより、システムを実体化する操作』ということができるであろう。システムを実体化する「実装」は外国語にはない日本独特の用語であり、今や「JISSO / 実装」として海外でも使われ始めている。

実装の将来像とその意味は、以上の用語からおのずと明らかである。すなわち、実装は個々の技術の寄せ集めではなく、緻密な最適化の組合せによるインテグレーションであり、わが国が最も得意とするところである。この強みを生かす製品/システムづくりが今後とも求められる。

3 ものづくりを先導する実装技術

今後の実装技術はどのように生かされるのか？今回の震災で政治社会情勢は混沌としているが、はっきりしているのは、日本の再生のためにはいずれにしても、新しい社会インフラの整備と再生可能エネルギーの開発を加速する必要があるということであろう。

半導体産業を取り巻く環境は厳しさを増しているが、否応なしに向き合わなければならない高齢化社会のなかでは、ユビキタスの中でさらに意識せずに情報を利用できるアンビエント化は究極の安心安全の実現であり、エレクトロニクス製品の新しいアイデアは今後も尽きることなく生まれてくるであろう。それをキャッチアップす

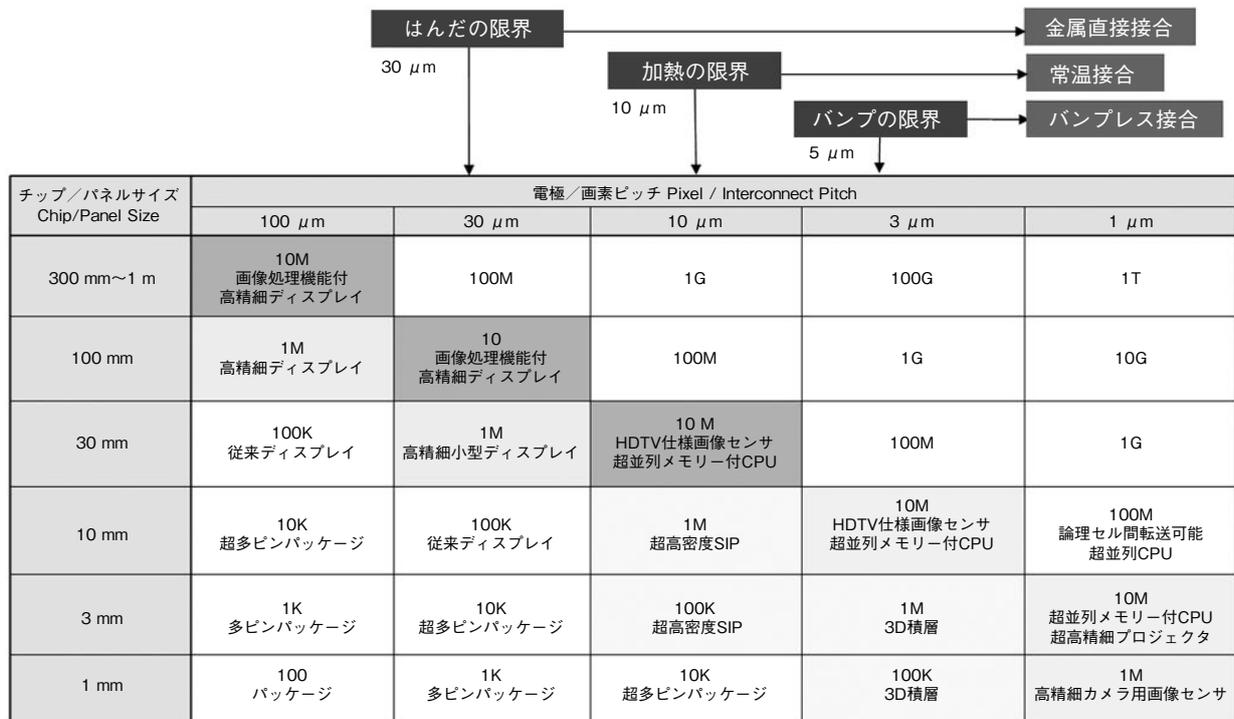
るばかりではなく、逆に先導するような実装技術はぐくんでいく必要がある。

薄型／フレキシブル、ウェアラブルな入出力インターフェース・ディスプレイ・電池・センサなどは実装技術が実現の鍵を握るシステムの代表であり、MEMS（Micro Electro Mechanical Systems）と半導体技術の融合、プリントエレクトロニクスの導入などによる低コスト化も必要となる。また、人間生活に不可欠なヘルスケアシステムでは、さまざまなメディカルエレクトロニクス・医療画像処理システム、ワイヤレス通信システムなどで実装技術の活躍がある。また、太陽光発電に代表される再生可能エネルギー、省エネから加速される蓄電システムやLED照明、さらには、社会インフラとしてのスマートグリッドの実現には、これを支えるパワーエレクトロニクスが必須であり、コンシューマレベルでのスマートセンサや、センシングネットワーク、コミュニケーションデバイスなどにおいても、従来の家電などとは異なる環境での高信頼性や長寿命化が求められ、実装技術がそのかぎを握る場面は多く現れよう。EV（Electric Vehicle）やHEV（Hybrid Electric Vehicle）はすでに激しい競争に突入しているが、蓄電池やパワーデバイスなどとの共通プラットフォームにかかわる実装技術にも期待がもたれる。

4 実装のコアテクノロジー

裾野の広い実装のコアテクノロジーの何が何かと問われると、エレクトロニクスの分野でいえば、やはり、個々の要素部品をいかに接合し組み立てるかという接続技術と、その間の信号処理をいかに高速に行うかという信号伝送技術の2つに原点がある。物理的な接合と物理的な信号伝送に限っても、実装技術がカバーする範囲は非常に広く、テクノロジーとしての発展にもいまだ限界がない。

1993年「実装工学事始め」という小文[2]で幕を開けた実装のための工学は、今日に至るまで未完のままであるが、インテグレーションのための基盤技術としての実装の重要性を明示し、1998年、日本で初めての実装工学に関する産学連携コンソーシアム「電子実装工学研究所 Institute for advanced Micro-System Integration (IMSI)」が日本企業の半導体実装の先駆者たちによって組織された[3]。13年を経た現在、IMSIは第5期を迎え、実装、パッケージ、実装材料、実装装置メーカーの新しい世代の技術者によって運営されている。ちなみにIMSIのロゴは、実は、“I’m System Integration”という当時IMSIを始めた企業実装技術者たちの自負と実装への思いを秘めたものであったことをここに披露しておきたい。



SIP: System In Package

第1図 IMSIロードマップが対象とするマトリクスデバイスの対象ピン数（色のついたコラム、ピン数で10M領域）と接続ピッチにおける接合技術の限界

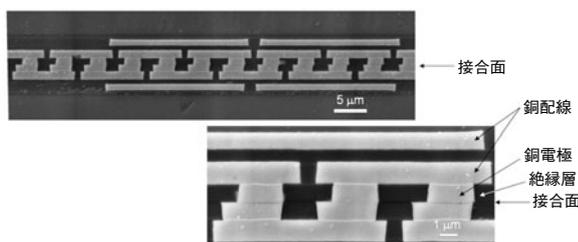
IMSI実装工学コンソーシアムでは、2010年、それまでの検討結果をまとめ、ロボットや同時通訳、リアルタイム危険回避などに必要な超高速画像処理システムを2020年のターゲットとして、「100 Gbit/sレベルの伝送レートを実現する高速信号伝送」と「10Mの超多端子のマトリクスデバイスの物理接合を実現する常温接合」に関する新しい技術ロードマップを提案した[4] (第1図)。

高速信号伝送の提案は、電磁気学の法則とプラズモニクスの考察にのっとったペア線路による配線・接続構造に基づくものであり、周波数を向上させ、基本的な2値伝送を維持することで単純な入出力インターフェースによる高速信号伝送を実現する。また、固体材料の表面活性を利用した常温接合の提案では、接合の低温化を実現し、不必要な界面層のない理想的な直接接合を、高信頼性かつ低コストで実現する。いずれの提案も、自然界の物理法則・物性に素直に従い、したがって本質的に単純な原理・構造に基づくという点で、従来技術の延長線上にはなかった技術である。このコア技術は、IMSI実装工学コンソーシアムの特許として公開され、またIMSIの日常活動を通じてのノウハウとして会員企業に共有されている。

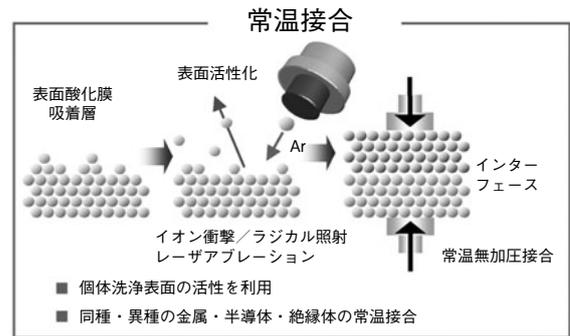
5 常温接合の動向

一方、10年前は夢の技術であった常温接合技術も、従来の真空プロセスから、より汎用性の高いプロセスとして進化しており、MEMSパッケージや異種デバイスのはり合わせ手法として、量産の実績も蓄積され始めている。

IMSIでは、将来の5 μm ピッチを切る時代のバンプレス・インターコネクト構造を提案し、これを実現する3 μm 径、6 μm ピッチ、100万端子レベルのCu-Cu直接接合をチップオンチップで常温で行った[5] (第2図)。このようなバンプレス構造では、アンダーフィルは意味をもたない。そのため、この代替として封止枠を同時に接合する手法を提案し、その有効性の検証を行った。この封止枠と電極を同時に接合する構造は、MEMSのパッ



第2図 Cuバンプレス接合の断面図



第3図 常温接合のコンセプト

ケージングにも有効な方法と考えられる。

この表面活性化による常温接合は、金属や半導体、セラミックスなどの表面の酸化物や吸着層をイオン衝撃によって除去し、活性化状態にしたまま相互に接触させることで、加熱することなく接合を行う手法である[6] (第3図)。固体間の凝着の研究は古く1960年代後半のNASA (National Aeronautics and Space Administration) の宇宙空間を想定した研究にさかのぼるが、この現象を積極的に接合技術に適用する試みは1979年、舟久保・赤池らの超高真空中でのAl単結晶の圧接が実質の始めといえる。その後、1980年後半から本研究提案者をはじめ、三菱電機(株)、(株)日立製作所、工業技術院 機械技術研究所などで超高真空中での常温接合実験が進められた。また1990年代は、マイクロマシンの大型プロジェクトの一環で常温接合が検討されたが実用化には至らなかった。その後、2000年代になり、金属クラッド材の製造が実用化となり、また近年、Siと圧電単結晶ウエハの常温接合によりSAW (Surface Acoustic Wave) フィルタデバイスが量産化となるなど、主にMEMSパッケージでの実用化が加速している[7]。特に、国内4社で、常温ウエハ接合装置の量産機のプロトタイプが市場に投入され、実用化の対象を模索している段階にある。また、IMSI実装工学コンソーシアムでは新しいプロセス提案とそのブラッシュアップを行っている。最近では、50 nmレベルのウエハはり合わせの位置決め計測技術が提案されている。

6 常温/低温接合の展開

表面活性化常温接合の基本コンセプトは非常にシンプルである。前述のように、固体表面の活性を利用して、低温・低荷重で接合する。「接合部分で拡散がおきたり、化合物を形成することが接合の条件である」という接合に関する誤った理解は徐々に解消しつつあり、表面をいかに活性化し、それを維持し、固体間のコンタクトを

実現するかが問題である、という理解をする技術者も増えた。

低温接合の実装における重要性はいうを待たない。従来のはんだや熱圧着の手法では対応できない高密度の接続が可能であること、熱によるひずみや金属間化合物ができないこと、したがって高信頼性が確保できること、金属間直接接合であれば高耐熱性の接続であること、低耐熱性ポリマやデバイス構造に対応できること、過大な加熱を必要としないことから本質的には省エネルギーであること、本質的に長時間の接合プロセスを要しないことからタクトタイムも短いこと、などである。

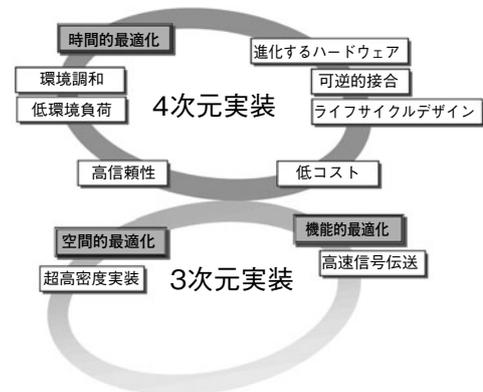
それがなかなか量産に結びついてこなかったのは、やはり、真空プロセスであることと、平坦な表面での接合に限定されることが理由であろう。

しかし、金のように酸化しにくいものであれば、表面粗さや接合チップの平行度の制御によって、大気中でも可能であることがわかってきた。実際、この金の大気中常温接合によって、光マイクロシステムの集積化／パッケージの試みがされている。表面活性化を低真空下あるいは大気圧プラズマを用いて行い、大気中で接合する手法は、従来のプラズマ活性化接合と高真空中での常温接合の接点として展開が期待される。もちろん、真空中での接合であっても、プロセスコントロールは、むしろ大気中より容易であり、用途によっては信頼性の確保や低コスト化への近道と考えられ、前述のように量産化装置開発も急ピッチで進められている。また、活性ガスの選択やそのコントロールによる表面活性化も、これまでにない新しい手法の展開として可能性が期待される。実際、大気圧下でのCu-Cu常温直接接合の研究が進められており[8]、また、フッ素添加プラズマを用いた親水化処理による低温接合[9]や、Feナノ密着層による大気圧下での低温接合が提案されている[10]。

最近では、MEMSやディスプレイ、太陽電池などの封止や、シリコンフォトニクス応用のウエハ接合、BSI-CMOS (Back Side Illumination Complementary Metal Oxide Semiconductor) などMEMS-半導体の融合などの領域で、従来型のウエハ接合の研究開発で先行している欧米系や、先端製造技術の確保のために多額の研究開発費を投入している中国・東南アジア勢がすでに常温接合に多大な興味を示している。これらの領域で、常温接合を含め、わが国が先行している実装技術を生かし、ものづくりの新しい世界を拓いていくことは日本の産業界の喫緊の課題である。

7 まとめ

実は、冒頭の実装の定義で明示しなかった点が1つあった。それは「時間軸での最適化 (4次元実装)」である (第4図)。実のところ、最適化において時間軸を考えると実装技術者の暗黙知であった。例えば、信頼性は時間が陽に現れる評価である。コストもその時々マーケットによって決まるのであって、時間なしでは評価できない。その時間軸の延長には、その製品／システムのライフサイクルがある。ライフサイクルデザインに対応する実装は、環境調和型実装の究極であり、鉛フリーをはじめとする環境負荷の低減技術はもとより、リサイクルなどを想定した分離可能な可逆接合が重要な将来技術となりうる。接合の対極にある分離技術は、パッケージレベルでのウエハハンドリングやチップオンウエハでのテンポラリボンディングなど個別の技術としてはすでにその重要性が認識されている。しかしこれらの個別技術を、さらにフレキシブルな組立分解可能な製品や、自ら変身する高付加価値のハードウェアを実現するための新しい技術として進化させていくのは、これからの、だれも見たことのない実装の新しい世界である。



第4図 4次元実装

参考文献

- [1] 広辞苑 第四版, 新村正(編), 岩波書店, 1991. 同第五版, 1998. 同第六版, 2008.
- [2] 須賀唯知, “実装工学事始め,” 電子材料, 1992.
- [3] 電子実装工学研究所 webサイト, <http://www.imsi.jp/>, 参照 June 5, 2011.
- [4] “2020年のデバイス実装に向けた配線／接合の基盤技術を開発,” 日経マイクロデバイス, no.295, pp.85-89, 2010.
- [5] “ニュース解説: 超高密度・銅常温直接接合の実現,” 電子情報通信学会論文誌, C vol.J90-C, no.5, 2007.
- [6] 須賀唯知, “常温接合とは —その適用と実用化—,” 溶接技術, vol.54, no.7, pp.76-80, 2006.
- [7] “2nd international IEEE workshop on low temperature bonding for 3D integration,” The University of Tokyo, Hongo, Japan, January 19-20, 2010.
- [8] Akitsu Shigetou et al., “Modified diffusion bonding of chemical mechanical polishing Cu at 150 °C at ambient pressure,” Appl. Phys. Express 2, 056501, 2009.
- [9] C. Wang et al., “Room-temperature direct bonding using fluorine containing plasma activation,” Journal of Electrochemical Society, vol.158, no.5, H525-529, 2011.
- [10] R. Kondou et al., “Room temperature SiO₂ wafer bonding by adhesion layer method,” Proceedings IEEE-CPMT, ECTE-2011, 2011. / 東京大学プレスリリース, 平成23年5月25日.

《プロフィール》

須賀 唯知 (すが ただとも)

1977年 東京大学 工学部精密機械工学科 卒業
 1979年 東京大学 大学院工学系研究科
 精密機械工学専門課程 修士課程修了
 マックスプランク金属研究所 研究員
 1983年 シュツツガルト大学 理学博士
 1984年 東京大学 工学部精密機械工学科 助教授
 1993年 同大学 工学部精密機械工学科 教授
 1994年 同大学 先端科学技術研究センター 教授
 2002年-2007年 独立行政法人 物質材料研究機構 特別研究員
 2004年-現在 東京大学 大学院工学系研究科教授,
 精密工学専攻担当

専門技術分野:

界面・接合工学, 実装工学

主な著書:

セラミック接合工学 (共著) (日刊工業新聞社, 1990)

主な編書:

実装の将来—エレクトロニクス・エコデザイン (日刊工業新聞社, 2002)