

## ヒータ埋込型基板を用いた LSI の 3 次元実装

### A 3D-Placement Method of LSI Chips Using Printed Circuit Boards with Built-In Soldering Heater

○藤岡 与周      苫米地 宣裕

○Yoshichika Fujioka and Nobuhiro Tomabechi

八戸工業大学

Hachinohe Institute of Technology

**キーワード** : 知能ロボットシステム (intelligent robot systems), 3次元配置配線 (3D-placement and routing), 並列 VLSI プロセッサ (parallel VLSI processors), FPGA (FPGAs), ラビットプロトタイピング (rapid prototyping)

**連絡先** : 〒 031-8501 青森県八戸市大字妙字大開 88-1 八戸工業大学 工学部 システム情報工学科  
藤岡与周, Tel.: (0178)25-8063, Fax.: (0178)25-1691, E-mail: fujioka@hi-tech.ac.jp

## 1. まえがき

コネクタを用いる手法では差し込む方向や端子数の制約などで実現が困難であった種々の 3次元構造並列プロセッサを構築するため、本稿では、多層基板の内層銅箔パターンをヒータと温度センサとして利用し、銅箔電気抵抗の直線的な温度依存特性と 4 端子低抵抗測定法に基づく温度プロファイル制御機能を有する新しい半田付け手法の有用性を、実験により明らかにしている。多層基板の表面層に他の基板との配線接続パターンを配置するとともに、半田付け領域に該当する領域の内層にヒータ用のパターンを配置することにより、表面実装部品の半田付けのみならず、従来のコネクタを利用することなく多層基板同士を接続可能である。この結果、立方格子状や正 20 面体状など、多角形による立体構成手法に基づく種々の 3次元

構造回路基板を容易に実現可能となるため、膨大な計算量を必要とする知能集積システム用などの階層的かつ高並列な 3次元構造並列プロセッサの開発が可能となることを明らかにしている。

## 2. ヒータ埋込型基板

半田を加熱する新しい方法として、多層基板の内層に銅箔パターンでヒータを備える方法が提案されている<sup>1)</sup>。Fig. 1 に示すように、通常が多層基板における部品実装表面層のすぐ下に新たにヒータ用の層を追加し、銅箔によるヒータのパターンと 4 端子低抵抗測定法のための 4 つの端子が備えられている。また、半田付け部分以外の領域を加熱しないように、ヒータとして利用しない配線部分はヒータ部分のパターン幅に比べて十分に太い配線としている。Fig. 2 と Fig. 3 に、実際の基板の

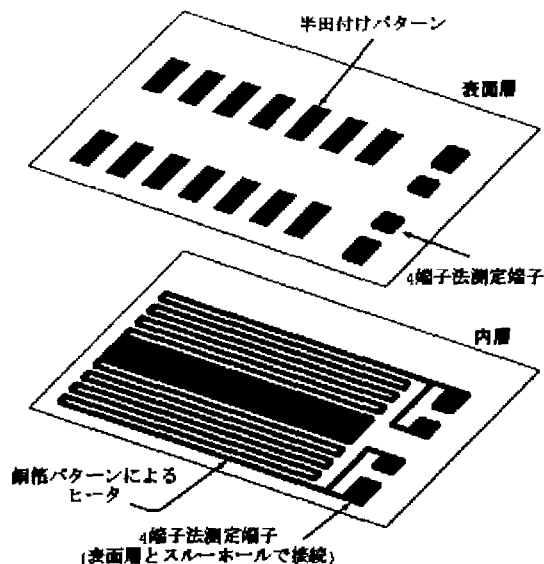


Fig. 1 Basic structure of a built-in heater.

部品面とヒータ面の構造を示す。部品面には、表

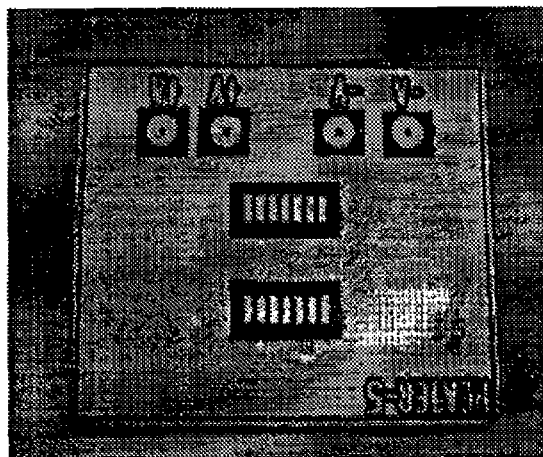


Fig. 2 Parts side of the built-in heater board

面実装用ICやLSIを装着するためのフットプリントが備えられている。また、ヒータ面には、ヒータとして使いやすいようにできるだけ幅が狭く長さが長いパターンによりヒータを構成している。

多層基板の銅箔の一部をヒータとして利用する概念はこれまでにない新しい概念である。さらに、銅箔の電気抵抗が銅箔の温度に対して直線的に変化する特長を利用して、ヒータ自身を温度センサとして利用する概念を新たに提案している。銅は電気抵抗が他の金属と比較して低いことや、空気中では酸化されやすく物性が大きく変化して

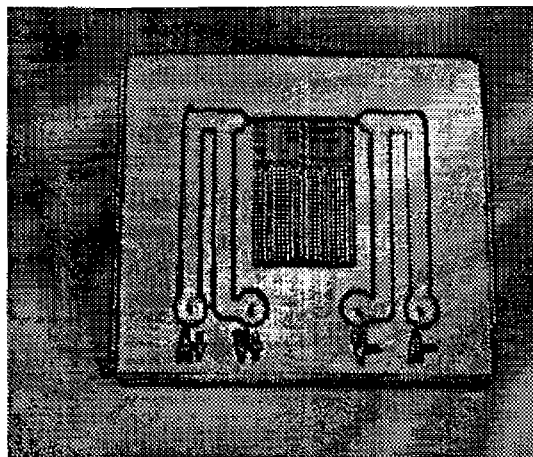


Fig. 3 Heater side of the built-in heater board

しまうため、通常はヒータとして利用されることは少ない。しかし、多層基板のパターンにおいては厚さが  $16\mu\text{m}$  から  $32\mu\text{m}$  程度であり断面積が極めて小さいため、配線パターン幅を十分狭くかつ配線パターン長を十分長くすることによりヒータとして利用可能な数  $\Omega$  程度の抵抗を得ることが可能である。また、銅は高温で酸化されやすく物性が大幅に変化しやすいことに対しては、提案する手法ではヒータを多層基板の内部に埋め込むため外気から遮断されるため酸化されにくく、4層基板以上の多層基板の内層にヒータを備える構成であれば十分にヒータや温度センサとして実用的に利用可能であるという特長を有する。

このように、本来であれば4層基板以上の多層基板において利用すべき技術であるが、その基本的特性を調べるため、本稿では2層(両面)基板による実験を行なっている。まず、Fig. 2とFig. 3に示したヒータ埋込型基板により半田付けが可能であるかについて調べた結果をFig. 4とFig. 5に示す。Fig. 4に示すように予め基板部品面のフットプリント部分を半田揚げしておき、そこにICやLSIをのせて裏面のヒータで加熱すると、Fig. 5に示すように半田付けが1分程度で完了することが確認できた。この場合、ヒータの電力制御は人間が半田の様子を観察してマニュアルで行なう手

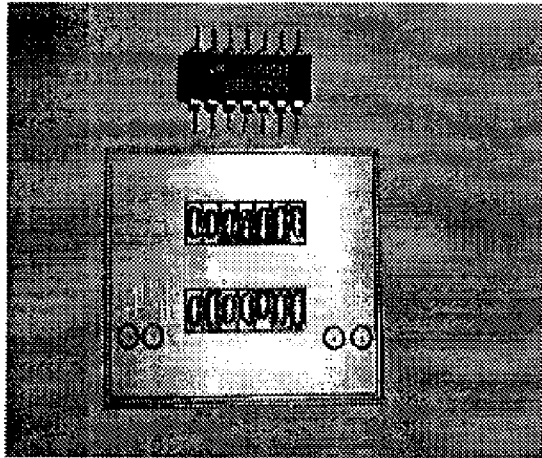


Fig. 4 Pre-soldering of the built-in heater board

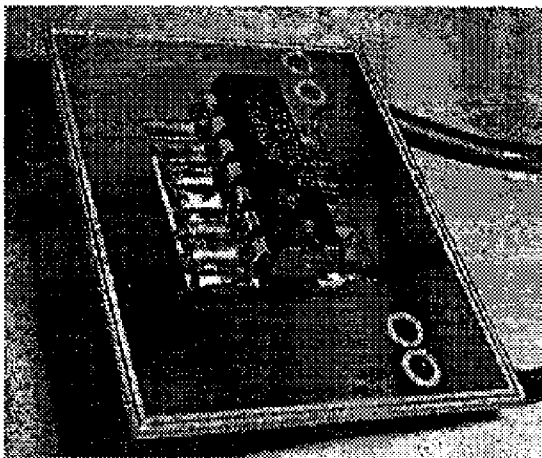


Fig. 5 Soldering result of the built-in heater board

法で行なっている。また、フットプリント部分には、表面実装部品を実装する場合に普通に利用されるクリーム半田を塗布することも可能と考えられる。この結果、ヒータ埋込型基板が原理的に実現可能であること、また、ICやLSIのすべてのピンが同時に加熱され半田付けが完了することが実験により確認できた。

さらに、どのようなヒータ面パターン構造がヒータ埋込型基板として適しているかについて何種類かのパターンで調べた結果を Table 1 に示す。このように、細長いパターンによりヒータ抵抗を数Ωに高めた方が、半田熔融温度に容易に到達することが明らかとなった。ただし、あまり細いパ

Table 1 Width and length of the heater pattern

配線幅	往復数	最高温度	抵抗値
12mil (0.3mm)	28	215°C	1.9Ω
	40	213°C	8.8Ω
25mil (0.625mm)	10	146°C	0.8Ω
	15	149°C	1.3Ω
50mil (1.25mm)	14	125°C	0.9Ω
	28	148°C	1.6Ω

※ 測定時の電圧・電流は15V・3A一定、温度は15分測定時

ターンでは簡単に焼き切れてしまうことや、多層基板には通常ガラスエポキシ複合材料が用いられており不必要に温度を上げるとエポキシ樹脂が炭化して絶縁不良を起こすため、精密な温度制御が必要となる。また、ヒータでの発熱量は数ワット程度であるため、半田熔融温度を効率よく維持するためにはできるだけ放熱しないようにする工夫が必要となる。

### 3. 4端子法に基づく温度計測・制御

埋込ヒータの温度制御は、銅の電気抵抗が直線性のよい温度特性を有することに着目することにより容易に実現可能である。Fig. 6 に埋込ヒータ温度制御の基本回路を示す。直流電源 E からの

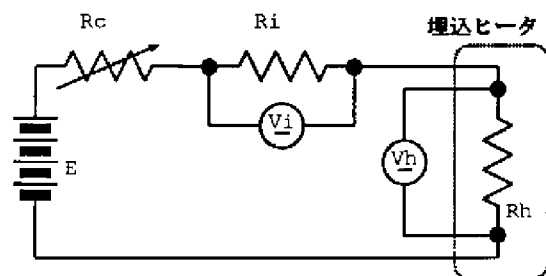


Fig. 6 Basic circuit of the power and temperature control of the built-in heater.

電流は可変抵抗  $R_C$  により制御される。電流値  $I$  は温度補償された電流検出抵抗  $R_i$  の両端電圧  $V_i$

から

$$I = \frac{V_i}{R_i}$$

により得ることができる。また、埋込ヒータの印加電圧  $V_h$  は4端子低抵抗測定法の原理により配線抵抗などに関わらず正確に得ることができるため、埋込ヒータの抵抗値  $R_h$  と消費電力  $P$  は次式により得ることができる。

$$R_h = \frac{V_h}{I} = R_i \frac{V_h}{V_i}$$
$$P = V_h I = V_i V_h \frac{1}{R_i}$$

さらに、100度と0度の時の銅の抵抗値をそれぞれ  $R_{100}$  と  $R_0$  とすると、銅の電気抵抗の温度依存特性は

$$\frac{R_{100}}{R_0} = 1.4250$$

である<sup>2)</sup>。銅は直線性よく温度にほぼ比例して電気抵抗が増加するとみなせるため、常温から200度程度までの範囲における温度が1度上昇する場合の抵抗増加率  $k$  は次式により近似できる。

$$k = \frac{R_{100} - R_0}{R_0} \frac{1}{100 - 0} = 0.00425$$

よって、室温  $T_r$  の場合の埋込ヒータの抵抗値を  $R_{hr}$  とすると、埋込ヒータの温度  $T$  は、

$$k = \frac{R_h - R_{hr}}{R_{hr}} \frac{1}{T - T_r}$$

の関係から

$$T = a \frac{V_h}{V_i} + b, \quad \left( a = \frac{R_i}{k R_{hr}}, \quad b = T_r - \frac{1}{k} \right) \quad (1)$$

により計算できる。銅を測温抵抗体として利用する場合には  $T_r$  と  $R_{hr}$  が規格化されているが、所望とするサイズのヒータを半田付けパターンに合わせて設計する場合にはヒータサイズに応じて種々の  $R_{hr}$  に対する温度測定が必要となる。このため、半田付けの前に微小電流を流して  $R_{hr}$  を求めるとともに、別に用意した温度センサにより  $T_r$  を測定しておくことで、上式の定数項  $a$  と  $b$  を予め求めておく必要がある。

以上の方法でヒータの温度制御を自動的に行うため、Fig. 7に示すようなマイコン方式温度計測・制御システムを構築した。本制御システム

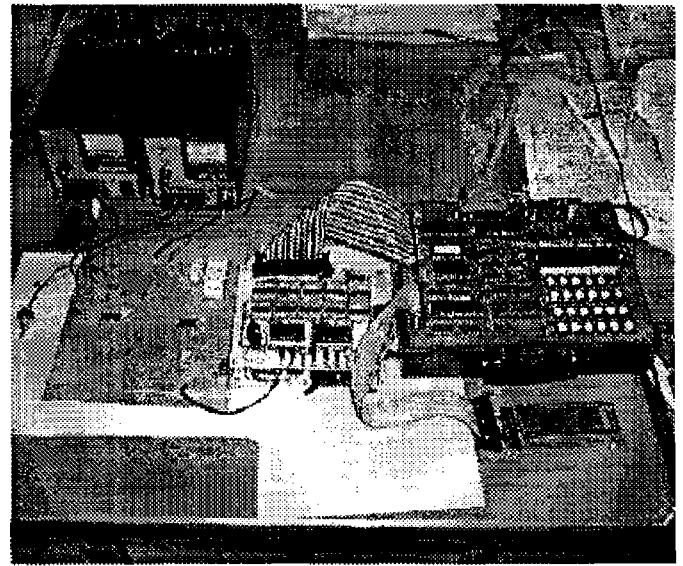


Fig. 7 Temperature measurement and control system

の基本的構成は次の通りである。まず Fig. 6における  $V_i$  と  $V_h$  は8ビット A/D コンバータにより測定される。この測定値は Z80 マイコンボードに入力され、(1)式に基づき8ビット固定小数点演算により温度が計算される。このようにして得られた温度と目標温度を比較し、ヒータをオン/オフするだけの制御を行なっている。

本方式により実際にヒータ温度を制御した結果を Fig. 8~Fig. 10に示す。測定結果はあまり精度が良くないが、その原因として考えられることは、まず温度計算に8ビット固定小数点演算を用いたため有効数字が大幅に減少したことが考えられる。これは、実験段階で浮動小数点演算ライブラリが利用できなかったためであり、単精度あるいは倍精度の浮動小数点演算方式を利用すれば解決可能と考えられる。次に、 $V_i$  を計測するための抵抗  $R_i$  の温度特性が疑われる。実験ではこの抵抗に通常的水泥抵抗を利用しているが、高精度な電流検出が可能な4端子抵抗などを利用する必

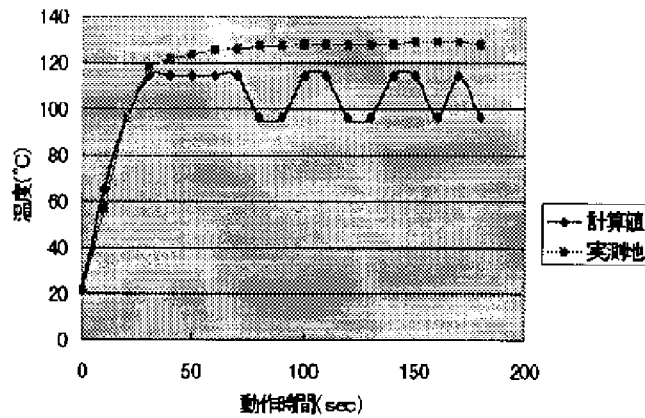


Fig. 8 Temperature control result of the built-in heater board ( $T=100^{\circ}\text{C}$ )

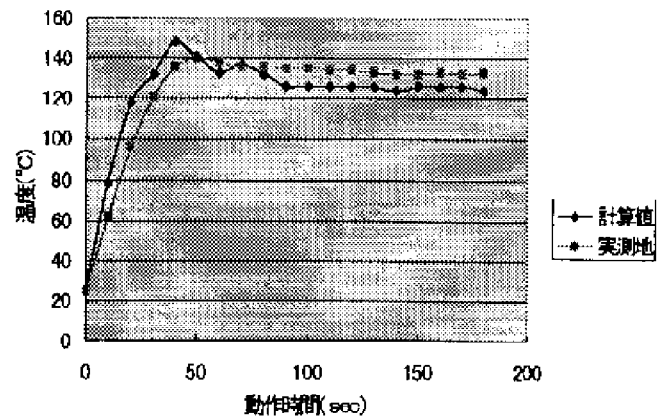


Fig. 10 Temperature control result of the built-in heater board ( $T=200^{\circ}\text{C}$ )

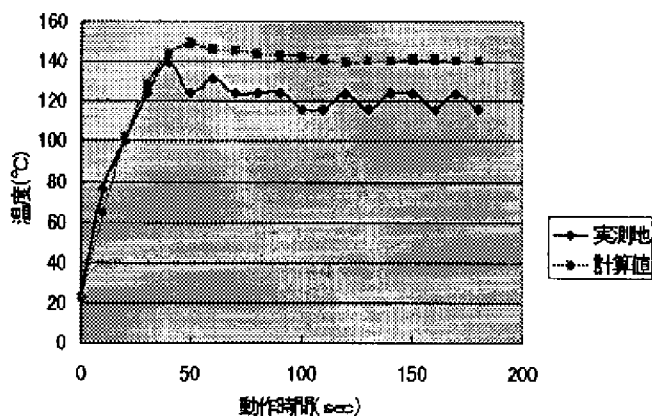


Fig. 9 Temperature control result of the built-in heater board ( $T=150^{\circ}\text{C}$ )

要があると考えられる。さらに、制御方式が単純なオン/オフ制御であったこと、サンプリング時間が10秒と長いことが問題と考えられる。銅箔をヒータとする本手法では、電流量に対するヒータ温度の応答性が極めて早いことが考えられる。通常の温度制御では、温度の時間変化があまり急激ではないため1秒程度のサンプリング時間がしばしば選択されるが、ヒータの温度を直接計測する方式では十分短いサンプリング時間で温度計測とPIDなどの制御を行なうことが必要と考えられる。

以上の知見を裏付けるデータとして、温度計測を通信機能つきテスターで行ない、温度計算をパソコンで行なった場合を Fig. 11 に示す。別に得

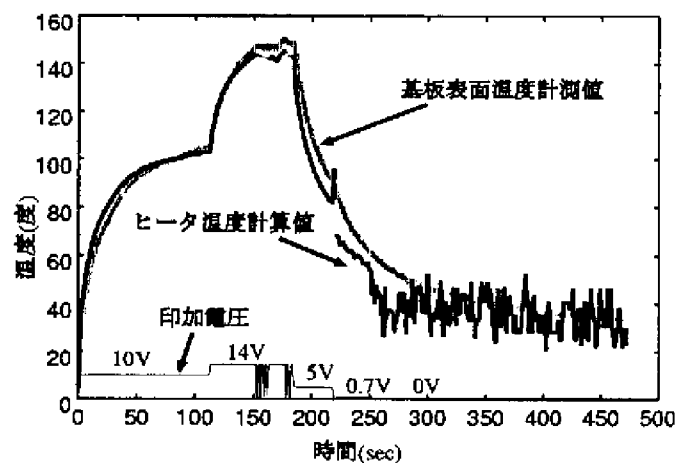


Fig. 11 Temperature profile using a built-in heater ( $3\ \Omega$ ).

た基板表面温度測定値と比較すると、電圧を印加している間は良好な温度測定が可能であることがわかる。また、この実験ではヒータ面から大気中に熱を奪われるため、印加電圧が一定の場合にはヒータから発生する熱量と放熱により失われる熱量とがバランスする温度までしか温度が上昇していない。この結果、放熱量が多い分だけヒータ消費電力も多くする必要があるため、半田付け部分以外にはできるだけ熱を奪われないようにすることが、効率のよい半田付けに必要となることが明らかとなった。放熱量については半田付けする部分の部品配置などにより大きく異なることが予想

されるため、目標温度にたいする負帰還制御が必要と考えられる。さらに、電源電圧  $E$  をほぼ  $0V$  にした  $260$  秒以降では  $I$  および  $V_h$  の測定値の有効桁数が少なくなり、計算に伴う測定誤差が非常に大きくなっている。このため、温度測定の場合には、測定レンジを適切に切替えるなど微小電流での測定誤差が増大しないように適切な有効数字の確保が必要となる。

#### 4. 3次元構造回路基板への応用

提案する埋込ヒータは、半田付けする部分の温度プロファイルを精密に実現することが可能である見通しを得ている。従って、基板内における複数箇所の埋込ヒータについても同じ温度プロファイルに従って制御できるという特長がある。そこで、例えば PLCC タイプの FPGA を、Fig. 12 に示すように複数個縦方向に並べ、横の4面に出てくる各 FPGA チップのピンに対してヒータ埋込型基板により同時にすべてあるいは一部のピンの半田付けを行なうことにより、容易に3次元構造のLSI実装が可能と考えられる。また、このような実装法が実用的になれば、これまで基板に平面に論理回路を展開していたのに対して、データの流れなどがより効率的に実現できるように種々の3次元構造の並列プロセッサなどを開発するための新しいパラダイムを提供できると考えられる。

ヒータ埋込型基板によるICやLSIの3次元実装の可能性を実験的に確かめるため、まず Fig. 13 に示すような構造の実装実験を行なった。このため、複数のICを縦に並べ、その片側のピンだけをまず Fig. 14 に示すようにヒータ埋込型基板により半田付けを行なった。次に、Fig. 15 に示すように残りの側のピンをヒータ埋込型基板により同時に半田付けを行なうことができた。以上の結果、Fig. 12 に示すようなLSIチップの3次元実装が可能であるという見通しを得ることができた。

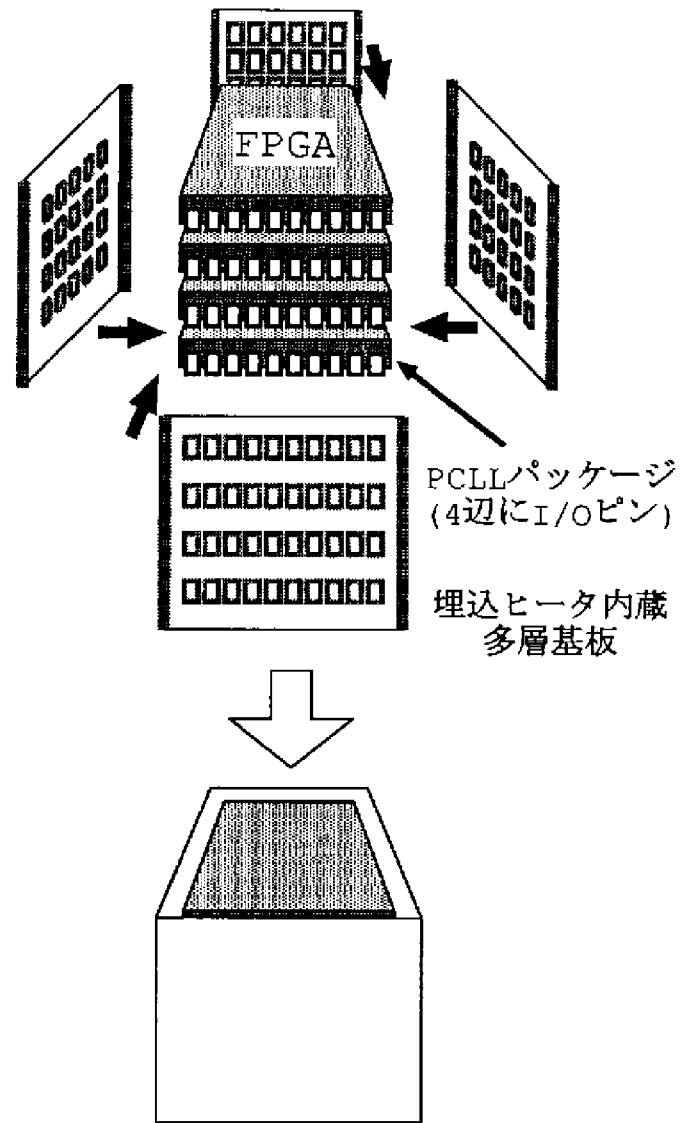


Fig. 12 3D-placement of FPGAs

また、Fig. 16 に示すように多層基板の複数のエッジ部分に半田付け領域を備えて同時に加熱することにより、多角形による3次元構造回路基板を容易に構築することが可能と考えられる。通常、3次元構造の基板を構成する場合にはコネクタが利用されるが、多くの場合コネクタに差し込む方向が固定であることや、基板間の接続角度が並行または垂直でなければならないなどの理由により基板間の接続角度が並行や垂直以外の場合の立体構造の構築は困難であった。これに対して、提案する手法を用いると多層基板のエッジ部分を所望の角度で削ることにより、任意の3次元回路構造を構成する多角形としての回路基板を容易に実現

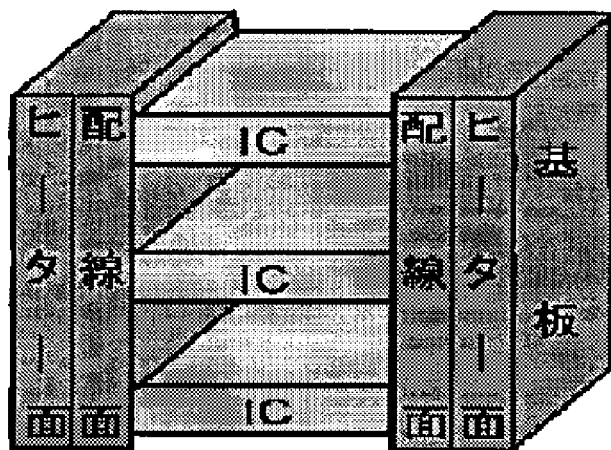


Fig. 13 3D-placement of ICs using 2 sides

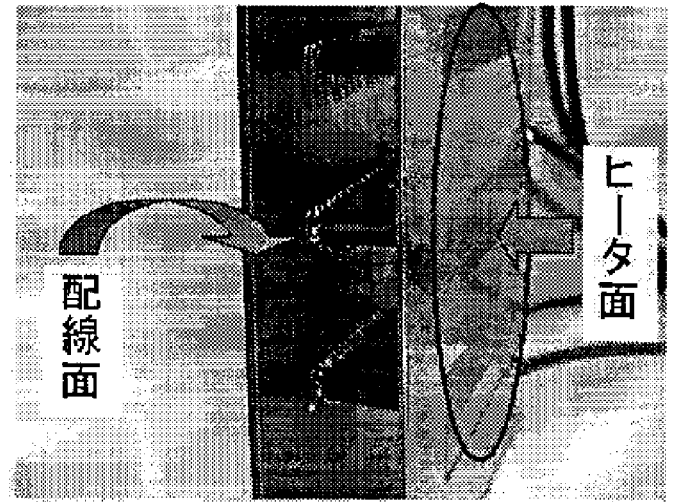


Fig. 15 Both side soldering result of ICs

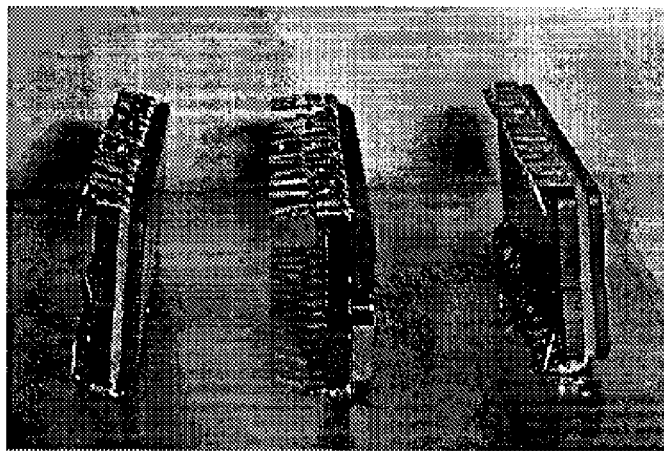


Fig. 14 Single side soldering of ICs

することが可能と考えられる。

## 5. むすび

基板自身が温度センサの機能も兼ねて半田付け温度まで加熱できる新しい手法について、実験的にその有用性を確認した。今後の課題として、多層基板の複数のエッジ部分の埋込ヒータを効率よく制御する手法について、実験的な検討が必要となる。さらに、本手法を応用したFPGAや並列プロセッサなどの3次元実装により、知能ロボットシステムなどの膨大な計算量を瞬時に処理しなければならないようなシステムの実現に関する研究が必要となる。

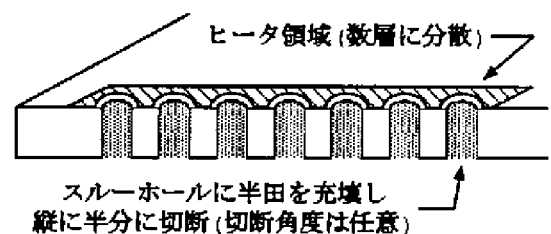


Fig. 16 Structure of the soldering area at the edge of multi-layer printed wiring board.

## 参考文献

- 1) 藤岡与周, 苫米地宜裕: 3次元構造並列プロセッサ開発用埋込ヒータ内蔵型多層基板, 計測自動制御学会東北支部35周年記念学術講演会予稿集, 97/98 (1999)
- 2) 松山: 実用温度測定, 67, 省エネルギーセンター (1998)