

知識ベースに基づく半導体プロセス診断システム

Knowledge-Based Process Diagnosis System for Semiconductor Manufacturing

半導体製品の微細化が急速に進んだ現在、各工程での作業結果の良否を直接調べることは、あるいは素子構成要素パラメータと素子特性との関係を解析することがますます困難となりつつある。そのため、TEGによる素子構造解析や素子特性解析の重要性が増大している。

一方、TEGデータの解析には、数式モデルに代表される理論的知識だけでなく、技術者の経験的知識が必要である。ところが、半導体製品の微細化に伴う製造プロセスの大規模・複雑化は技術者の専門化を招き、知識の統合的活用が困難となってきた。

これら問題の解決を目的に、組織的にTEGを設計し、その測定データを理論的知識で数値処理するとともに、その数値処理結果を複数技術者の経験的知識で解析する診断システムTEGMAPを開発した。

栗原謙三* *Kenzō Kurihara*
 明石吉三** *Kichizō Akashi*
 目黒 怜*** *Satoshi Meguro*
 中込義之*** *Yoshiyuki Nakagomi*
 篠本 学**** *Manabu Shinomoto*

1 緒 言

半導体製品の開発、製造には、技術者の経験に基づくノウハウが多数存在する。そのため、その異常診断には対象の物理に関する理論的知識だけでなく、熟練技術者の経験的知識が不可欠である。これらの経験的知識は技術者個人の私有財産となりがちであり、しかも、プロセスの複雑化によって知識は多数の人に分散してしまう傾向にある。このような背景から、複数技術者の知識の共有、伝承により迅速な診断の実現をねらいとした、診断システムTEGMAP^{*1)}を開発した。

本稿では、実験式や理論式などの数式モデルだけでなく、経験的に得られる現象・原因間の因果関係知識も有機的に組み合わせ活用することを特徴とする半導体プロセス診断方式、及びこれを実現する知識ベースシステムを紹介する。

2 半導体プロセス診断における課題

半導体製品は基本的には多層の積み重ね構造をしている。その製造プロセスは図1¹⁾に示すように、熱処理とエッチングの繰り返しで各層を順に形成するものであり、これは超微細なビルディングをウェーハ上に構築していくことと、とらえることができる。この製造プロセスの異常を診断するには、各工程直後に製品(半製品)の検査を実施して、良否を判定することが理想である。しかし、現実には次の理由からこれを実現することは困難である。

- (1) 新しい層の形成時、下層部は熱変形したり、削られたりする。製品の構造を知るには、完成品を調べる必要がある。
- (2) 多量生産であり、検査対象を少数に限定せざるを得ない。工程直後の検査はプロセス安定性の監視に重点が置かれる。

このような状況の下で、プロセス起因の異常原因を迅速に究明することが、半導体プロセス診断の課題である。

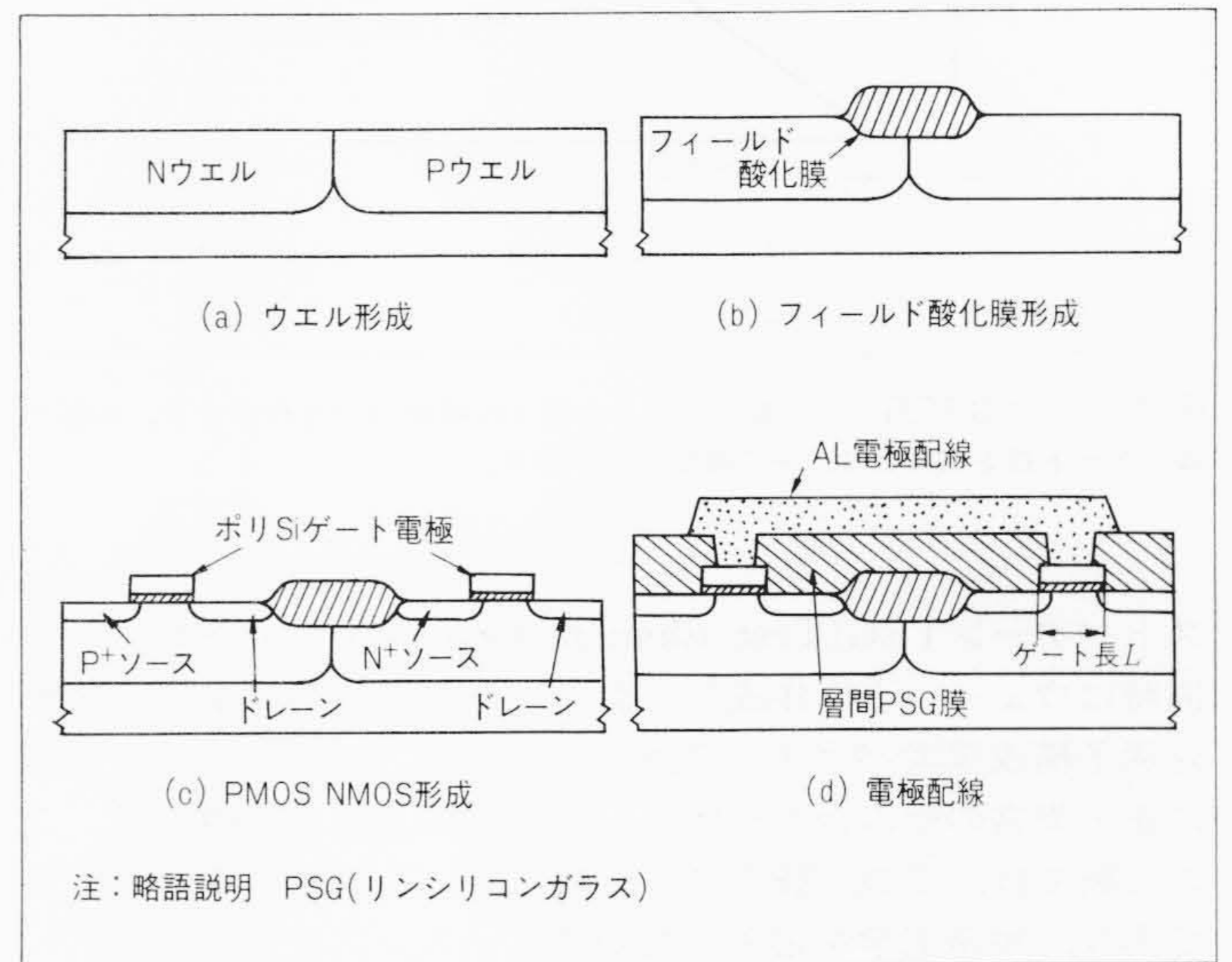


図1 CMOS半導体製造プロセス¹⁾ 熱処理とエッチングの繰り返しで各層を順に形成する。

3 知識工学技術を応用した診断方式

3.1 考え方

完成品の構造上の異常箇所が分かれば、その異常原因はその層の形成に関与する少数の工程に限定できる。したがって、異常原因を究明する方法の一つは、完成品の層を1枚ずつ削り取って検査することである。しかし、この分解検査には高度の熟練技術と膨大な時間を必要とする。

ここで紹介するTEGMAPでは、知識工学技術を活用して、この分解検査をソフトウェア技術で模擬的に実施してしまい、その結果から異常の検知と原因究明を行なう。ところで、最先端製品について、電気特性と素子構成要素パラメータ値(膜厚、寸法など)とに関する、多変数の高度な数式モデルを開発することは容易でない。そこで、図2に示すように診断用テ

* 1) TEGMAP: システムの名称であり、TEG (Test Element Group: 部分試作テストパターン) data based diagnosis for LSI Manufacturing Processの略称である。

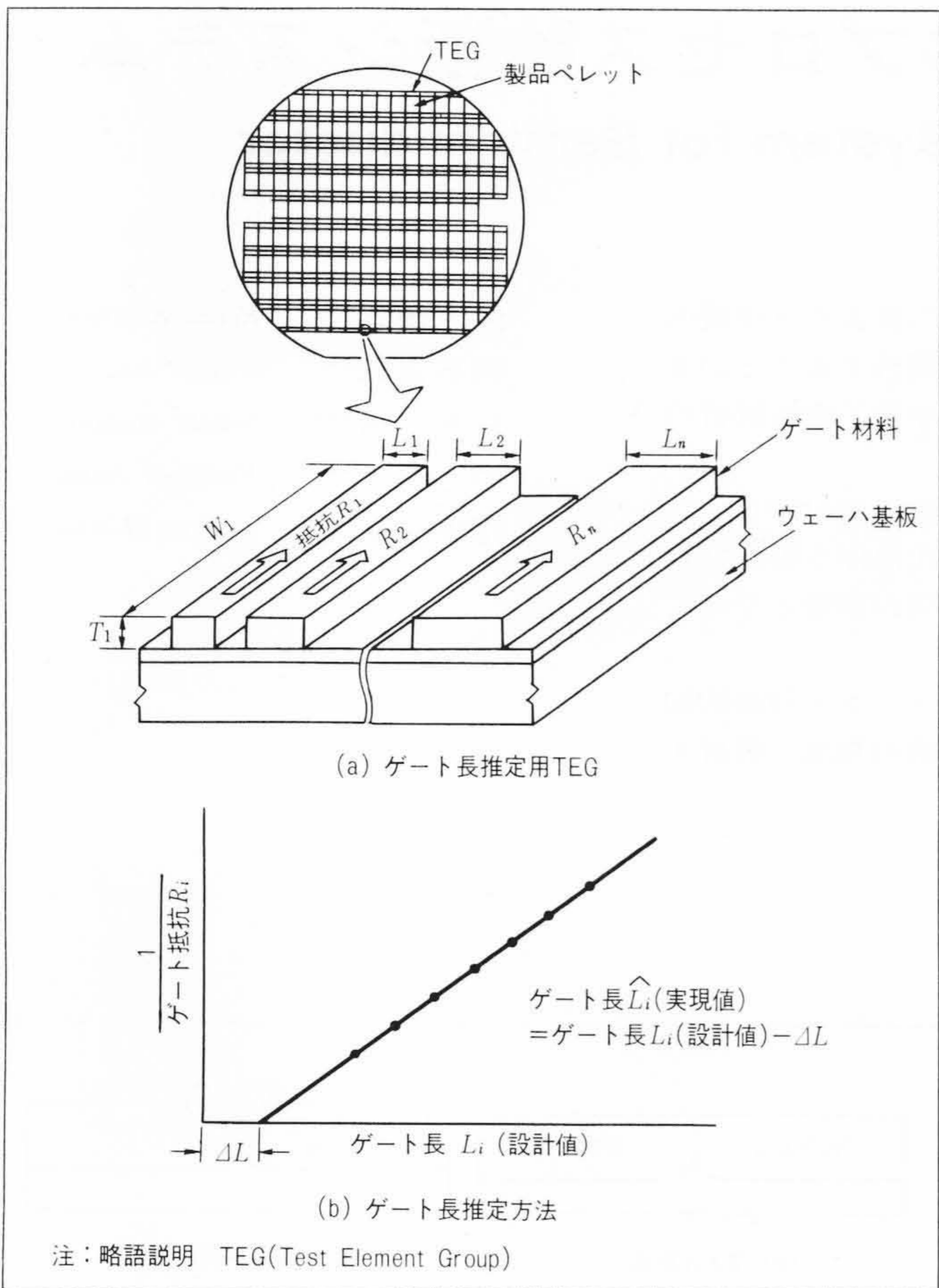


図2 診断用TEG 製品ペレットの横に診断用TEGを作成する。本図では、ゲート長を例にとり、その推定原理を示す。

ストパターンTEG(Test Element Group)を製品ペレットと同時にウェーハ上に作成しておき、その電気的測定データから素子構成要素パラメータ値を推定する。更に、その推定値の正・異常の組み合わせから、その原因工程を究明する。この診断では、多数の技術者に分散している専門知識が不可欠であり、知識工学を応用した知識ベースシステムとした。

3.2 推論方式

半導体プロセス診断は、数式モデルと定性的な因果関係知識を活用して、図3に示す2ステップで実施する。

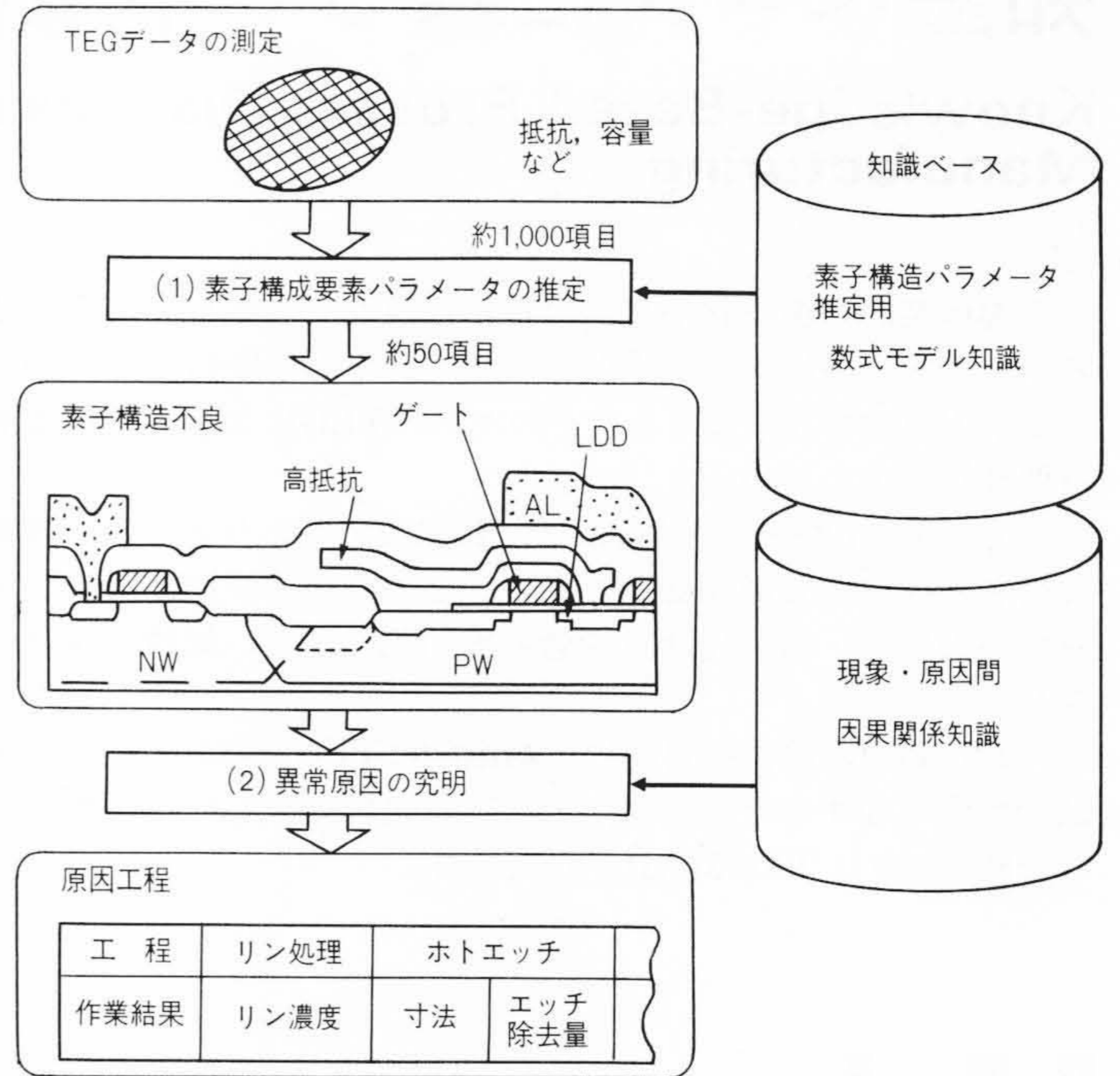
(1) 素子構成要素パラメータ値の推定と異常判定

ゲート長を例にとり、推定方法の一例を図2に説明する。同図に示すようにゲート部分だけを取り出し、ゲート長 L_i の設計値を少しずつ変化させて作ったTEGを利用する。ここで W_i 、 T_i は各TEGで共通とし、各 R_i を測定することによって、各 L_i が設計値に比べてどれだけ変化しているかを回帰分析によって推定する。

これらの推定に使う実験式あるいは理論式は、プロセス変更や解析経験の積み重ねによって改良される。そこで、各推定式を知識としてとらえ、独立に修正できるようにした。推定知識の表現例を表1に示す。同表中の前提条件はTEGが正常であるための条件であり、推論機構では、この前提条件が成立するものを探して次々と推定計算を進める。各推定値はそれぞれの設計規格と比較し、異常の有無を判定する。

(2) 異常原因の究明

素子構成要素パラメータ値は、多種類のプロセス制御パラメータの値によって決まり、装置ごとの癖も影響する。その



注：略語説明 LDD(Lightly Doped Drain), NW(Nウエル), PW(Pウエル)

図3 半導体製造プロセス診断方式 実験式や理論式などの数式モデルと、経験的に得られる現象・原因間の因果関係知識を組み合わせ活用して診断する。

表1 診断知識の表現方式 数式モデルも知識としてとらえ、保守性の向上を図る。因果関係知識はプロダクションルールで表現する。

知識利用目的	表現方式
(1) 素子構成要素パラメータの推定	数式モデル <表現例> $L.G2 = R.FG200 / R.FG2 * 200$ $15 < R.FG200 < 40$ $1500 < R.FG2 < 4500$ $10 < BV.G$ } 前提条件
(2) 異常原因の究明	現象・原因間因果関係 <表現例> IF (T.FOX :VV) (F.ヨコソ:V) THEN (GATE.OX::ジョキョリョウ:A)

ため、これらパラメータ間の数式モデルの開発は容易でない。TEGMAPでは、異常原因工程の究明に、「作業結果の異常と素子構成要素パラメータの異常との間の定性的な因果関係」を利用する。これらの知識の概念的構造を表2に示す。

実際には、作業結果異常は複数段の因果関係を経て素子構成要素パラメータ異常に達し、それらの因果関係はネットワーク状に関連している。しかも、これら知識は実験や経験を通して逐次得られるものが多い。そこで、知識保守の容易化をねらいとして、プロダクションルール^{4),5)}と呼ばれるif then形式で因果関係知識を表現する。if側の異常現象が観測されたとき、then側の原因が発生していることを示す。知識の表現例を表1に示す。

異常現象は、TEG測定値及びそれに基づく推定値の異常として観測できる。この観測結果と上記知識から、異常原因工程を究明する。以下、そのアルゴリズムの考え方を示す。

表2 現象・原因間因果関係知識の構造 縦軸は、各工程での作業結果を、横軸は素子構成要素パラメータを表わす。各行は各作業結果異常が波及する素子構成要素パラメータを表わし、矢印の向きは設計基準からのずれ方向を示す。

作業名	素子構成要素パラメータ 設計規格との比較 作業結果	寸法				膜厚			濃度				
		ゲート長	チャネル長	チャネル幅	拡散層幅	ゲート酸化膜	フィールド酸化膜	層間膜	ウェル濃度				
		N	P	N	P	N	P	N	P	P	W	N	W
インプラ(1)	ドーズ量	↑											↑
		↓											↓
拡散(1)	拡散量												↑
													↓
ホトレジ(1)	寸法			↑	↑	↑	↑						
				↓	↓	↓	↓						
インプラ(2)	ドーズ量												
拡散(2)	拡散量												
除去(1)	除去量												

(a) 仮説設定方式

仮説設定は前向き推論で実現する。すなわち、観測事象をif側にもつルールを探索し、そのif側に否定されている事象がない限り、then側事象は成立する可能性があると考えられる。ここで見いだした事象について同じ操作を繰り返し、根本的原因である可能性をもつ事象、すなわち、仮説を探索する。

(b) 仮説検定方式

仮説検定は後ろ向き推論で実施する。すなわち、設定した仮説をthen側にもつルールを探索し、そのif側事象がすべて成立していれば、仮説は成立する。if側に成否不明の事象があれば、その成否を調べるために、ルール探索を繰り返す。その結果、成否が判定できなければ、解析者にその成否を質問する。

4 プロセス診断システムTEGMAP

4.1 システム構成

プロセス診断は非定型的な仕事である。TEGMAPはこれを対話型で支援するものであり、これを實現するポイントは、イメージ中心の親しみやすいマンマシンインタフェースの開発にある。特に、解析内容の指定方法、解析結果の表示方法、システムの応答性などの面で優れたインタフェースが要求される。また、半導体製品は、生産量の増大に伴って単一ライン生産から複数ライン生産に拡張されるため、システム増設の容易性も要求される。これらの要求を満足させるために、高精細カラーディスプレイ、マウス、マルチウィンドウを備えた、日立製作所のCAEワークステーションES-310にTEGMAPを搭載した。外観を図4に示す。

ソフトウェア構成の概要を図5に示す。ハッチング部分は数値データ及びそれを処理するプログラムであり、他の部分は文字列で表わされる定性的データに関するものである。なお、プロダクションシステムによる推論プログラムの作成には、EUREKA⁶⁾を利用した。



図4 TEGMAPを搭載したCAEワークステーション イメージ中心の親しみやすいマンマシンインタフェースと、システム増設の容易性を実現するために、TEGMAPはワークステーションに搭載した。

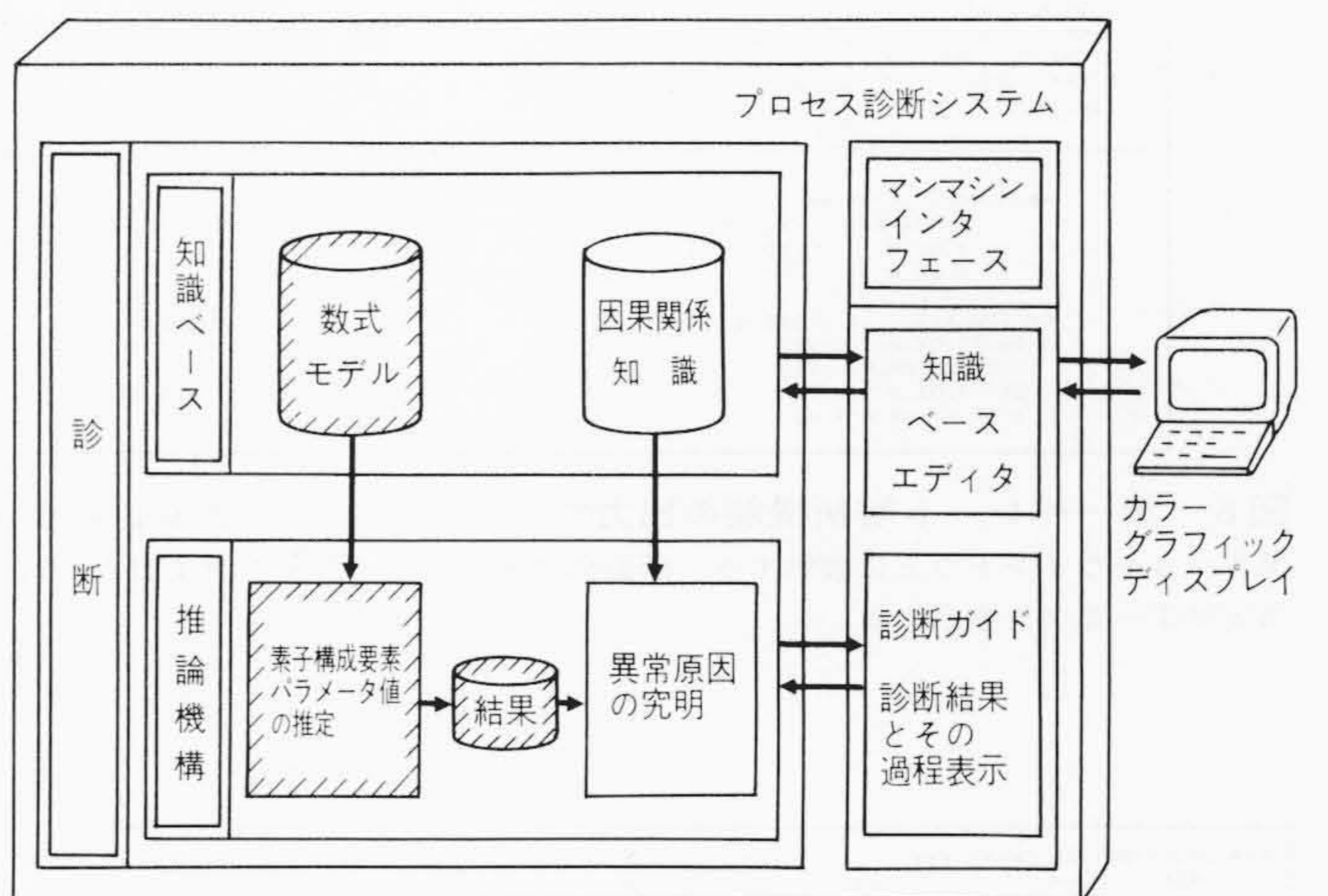


図5 ソフトウェア構成 診断方式と対応づけて、ソフトウェア構成を概念的に示す。実際には、各解析機能に対応して、推論機構を制御する機構が存在する。

4.2 解析機能と解析結果出力形式

TEGMAPはユーザーとの対話によって診断を実施していく。診断に必要な解析機能として、単一ペレット解析、2ペレット比較解析、ウェーハ全面解析などを用意しており、ユーザーはそれら解析機能を任意の順序で実行できる。各解析機能は、前述の診断方式を具現化したものである。ここで、単一ペレット解析が基本であり、これを自動的に繰り返し実行し、集計するのが他の解析機能である。解析内容の指定はすべてマウスで行なう。このとき、解析結果の表示画面をそのまま、次に解析するペレットやデータを指定するためのアイコンとして利用している。以下、主な解析機能とその出力形式を示す。

(1) 単一ペレット解析

ペレットごとの詳細な解析を実行する。出力例を図6に示す。同図の上部は素子構成要素パラメータ値の推定結果例である。下部は、TEG測定値及び素子構成要素パラメータ推定値に基づいて、プロダクションシステムによる原因究明を行なった結果例であり、結論に至るまでの推論過程を説明させることができる。また、既知情報だけでは断定できない原因(仮説)は対話形式で検定する。

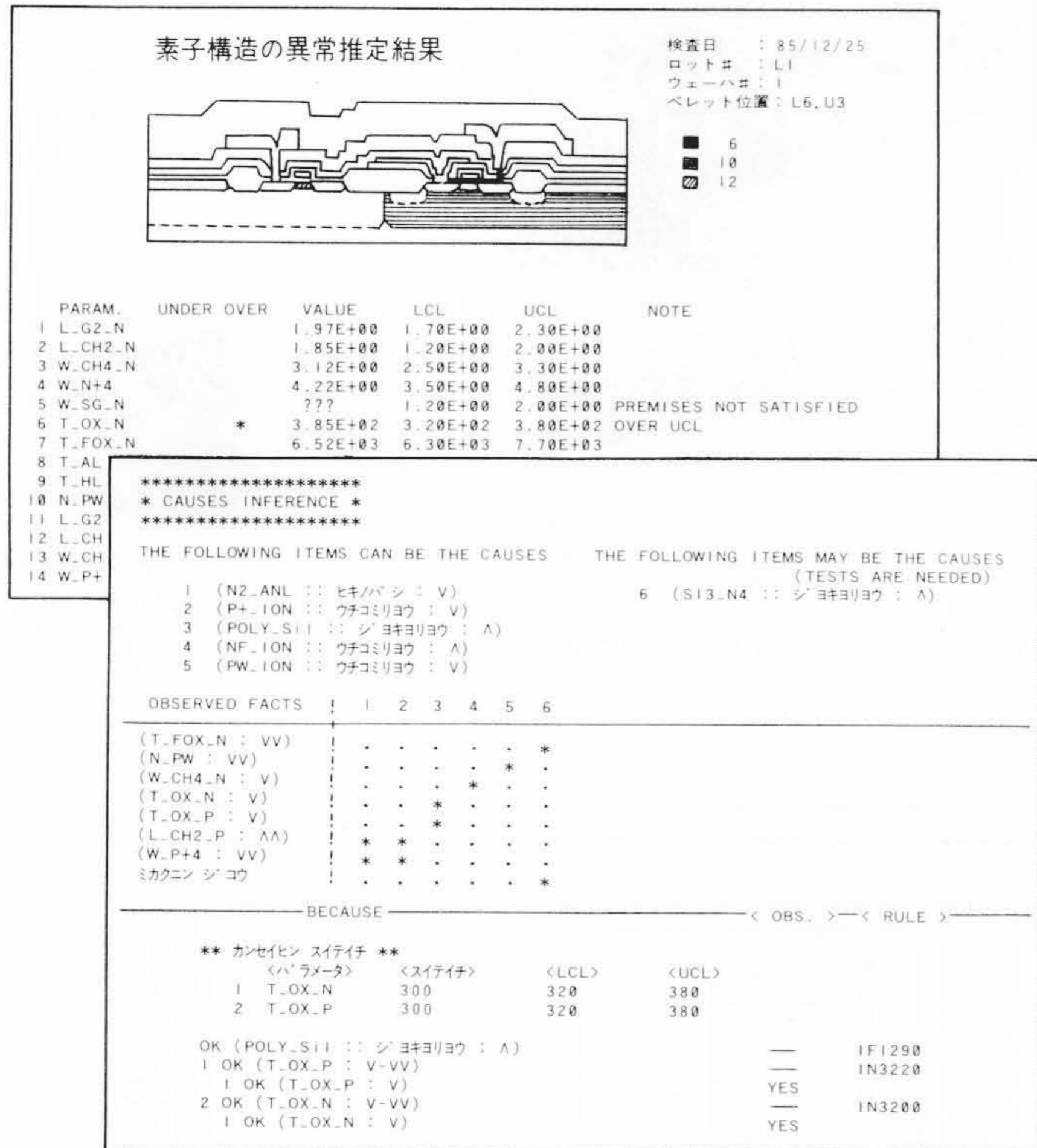


図6 単一ペレット解析機能の出力例 ペレットごとの詳細な解析結果をマルチウィンドウ上に表示する。断面模式図上に異常箇所を示すとともに、推定結果一覧表を表示する。

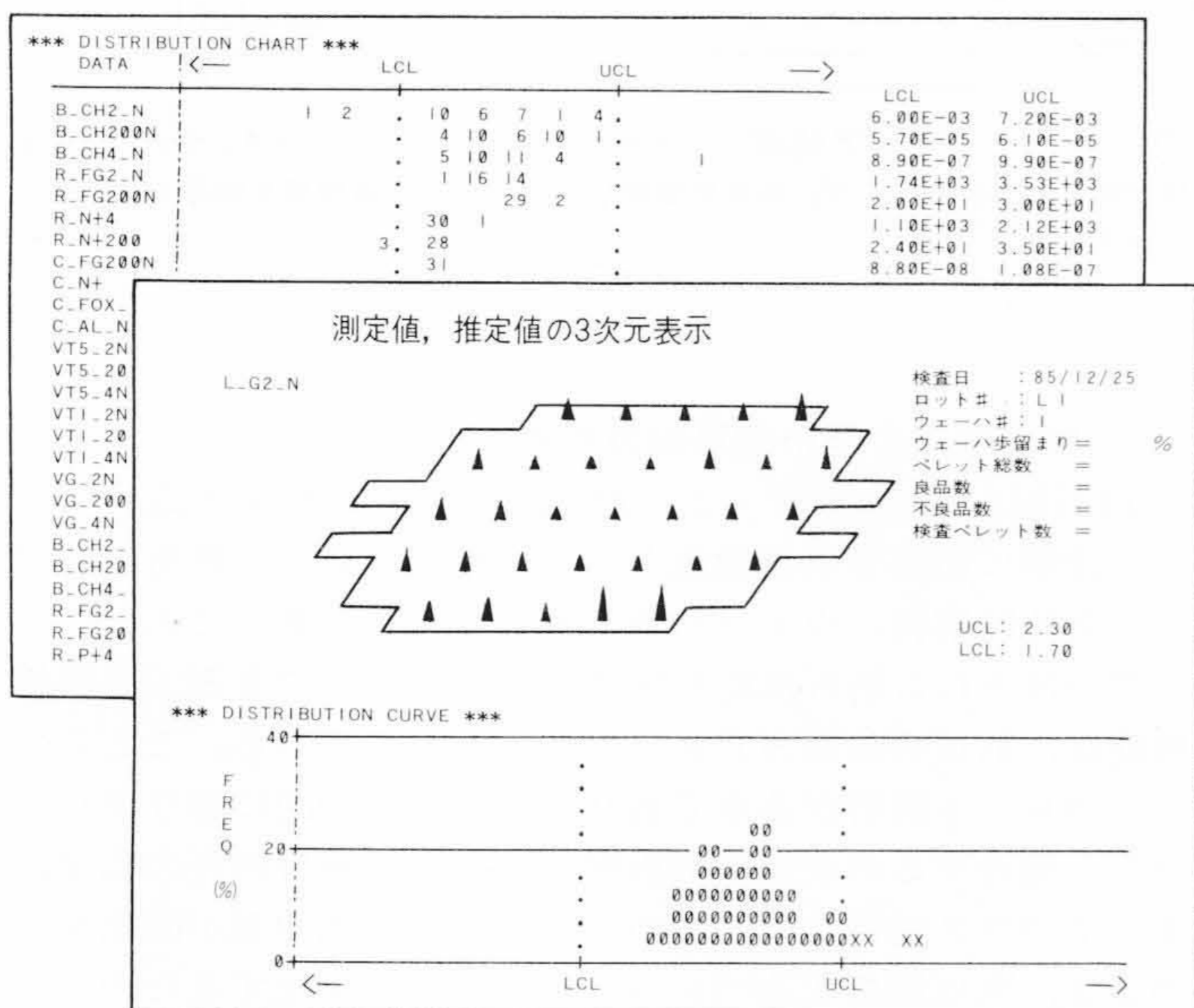


図7 ウェーハ全面解析機能の出力例(その1) 素子構成要素パラメータの推定を、ウェーハ全面について実施する。

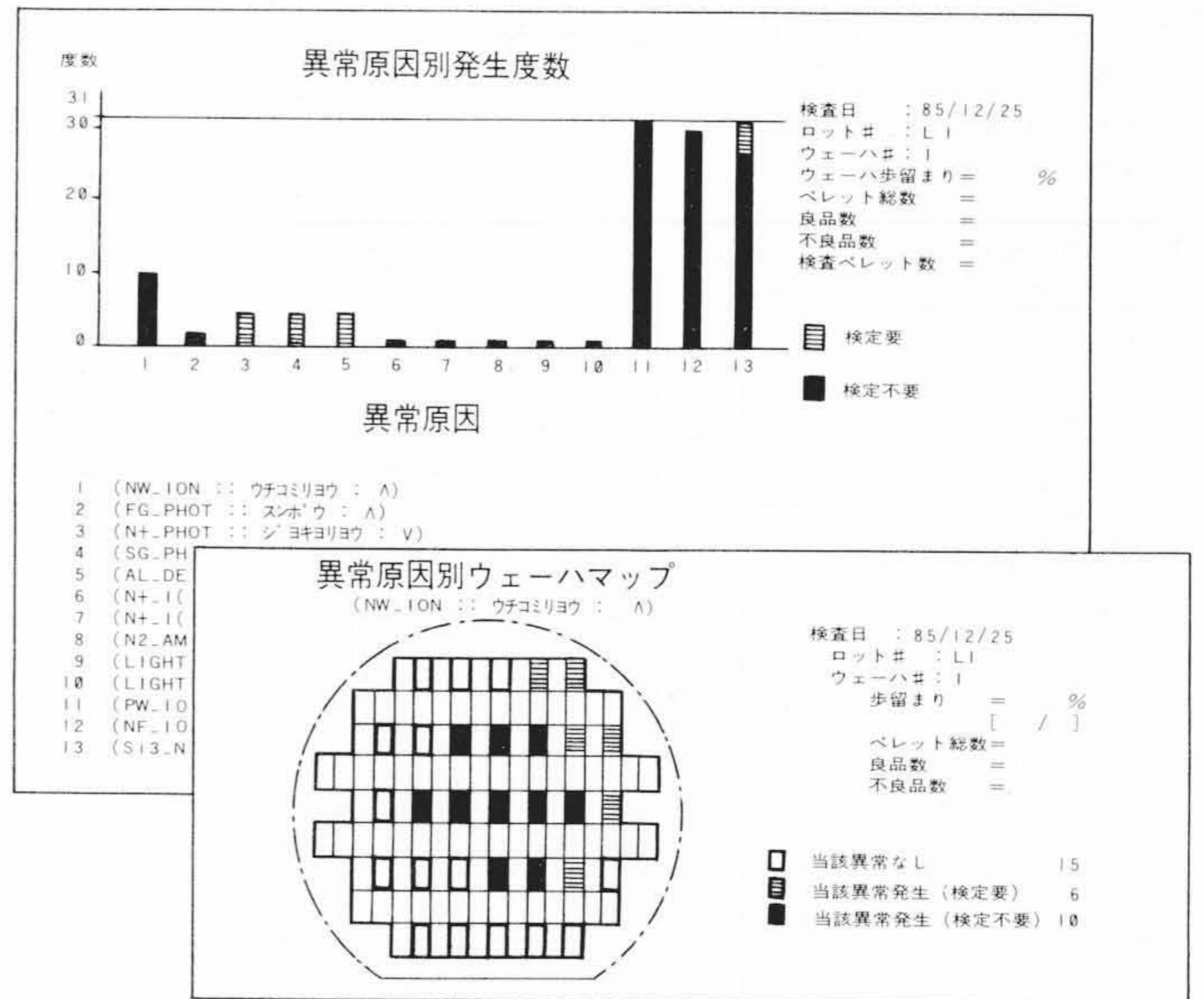


図8 ウェーハ全面解析機能の出力例(その2) 異常原因の究明をウェーハ全面について実施する。本解析は、2ウェーハを同時に解析し、結果を併記することもできる。

(2) 2ペレット比較解析

プロセス条件の異なるウェーハ上の2ペレットあるいは同じウェーハ上の異なる領域からの2ペレットについて、上記単一ペレット解析を実行し、両者の相違を表示する。これによって、最適条件出しやプロセス安定性の確認を支援する。

(3) ウェーハ全面解析

ウェーハ全面のペレットについて解析した結果を集計する。図7の上部はウェーハ全面のTEGデータ及び素子構成要素パラメータ推定値について、設計規格に対する度数分布を示す。また、下部は各データについて、ウェーハ上の分布状況を鳥観図で示す。図8は原因究明結果を示すものである。

5 結 言

半導体プロセスでは、その物理現象に関する理論式や実験式が多数存在する。これら数式モデルを現象・原因間因果関係知識で結合して活用することを特徴とする診断方式を考案し、これに基づく知識ベースシステムTEGMAPを開発した。

TEGMAPでは、プロダクションシステムを適用することにより知識の保守を容易にし、診断精度の向上を図った。また、本システムはスタンドアロン形のCAEワークステーションに搭載してあり、製造ラインの拡張、増設に容易に対応できる。

参考文献

- 1) 富永, 外: CMOS技術動向と応用展開, 日立評論, 66, 7, 476~482(昭59-7)
- 2) 栗原, 外: プロダクション・システム応用のプラント異常診断方式, 電気学会全国大会予稿集(昭58-4)
- 3) 栗原, 外: 数式モデル・ノウハウ知識を融合したプラント異常診断方式, 情報処理学会第29回全国大会予稿集(昭59-10)
- 4) 辻井: プロダクション・システムとその応用, 情報処理, Vol. 20, No. 8, 758~743(1979)
- 5) R. Davis, et al.: Production Rules as a Representation for a Knowledge-Based Consultation Program, AI, No. 8, 15~45(1977)
- 6) 増位, 外: 知識処理のための推論ソフトウェア, 日立評論, 67, 12, 939~944(昭60-12)