

デジタルLSI用高級テスト言語に関する基本的考察

柴田 弘之
(岡山大学工学部)岡本 卓爾
(岡山大学工学部)樹下 行三
(広島大学総合科学部)

1 まえがき

汎用デジタルLSI(以下、単にLSIと略記)の価格は、製造技術の進歩に伴って益々低下してきたが、反面、チップ当りの集積度は増加の一途をたどり、これを検査するために要する時間が急激に増加してきた。このため、最近では、検査費用の最終価格に占める割合が無視できなくなっている。

検査費用を支配する大きな要素の一つは、LSIを検査する試験機の機能であるが、この機能については、研究開発用(詳細な解析を目標とする)および生産ライン用(GO/NOGO試験を目標とする)の双方の試験機において種々の改良がなされており、高速化、高精度化、高性能化などの面である程度目的が達成されているようである。^{(1)~(5)}しかし、これらの試験機で利用されるテスト言語については、試験機間での統一がほとんどなされておらず、これが、検査費用の軽減に対する大きな障害の一つとなっている。アセンブリ言語や中間言語を用いた試験機では、検査内容(LSIに対する検査条件とその設定)を詳細かつ柔軟に記述できるが、機種毎に言語の仕様が異なるため、通常ある一つの試験機上で作成したテストプログラムはそのまま他の機種に試験機に適用できない。

Mahoneyは、この問題を解決する一方法として、異なる機種に試験機に対して共通に利用可能なテスト言語の実現可能性を検討した。⁽⁶⁾この言語はPASCALを基本とするもので、検査内容についても、極力本来PASCALのキツ文で記述しようとしている。

これに対して筆者らは、異なる機種に試験機に適用できる点では同じであるが、LSIの検査に適した文を他の言語を意

識しないで構成する立場から、高級テスト言語について考察した。このテスト言語は、LSIの直流特性試験と論理機能およびタイミング試験(以下、論理・タイミング試験と略記)とを対象としている。また、この言語を利用する試験機としては、汎用且つ生産ライン用を想定している。

ここでは、まず、LSIを検査するために必要な試験機の機能を、ハードウェアに無関係な形で表現する。次に、LSIの試験法と既存の試験機のハードウェア構成を意識しつつ、これらの機能を指定できる文の種類と文の指定内容の記述形式を決定する。最後に、これらの文による(LSIの)テストプログラムの記述可能性とこれらに適したコンパイラの構成とについて検討する。上述した文に、演算・代入指定、制御指定などの文を加えれば、実用的なテスト言語が得られると思われる。

2 試験機の機能

既に述べたように、本論文では、LSIの検査に必要な試験機の機能を、ハードウェアに無関係な形で表現した。これらの機能は、LSIの試験法を分析した結果に基づいて得られたもので、いづれも、LSIの検査に要する基本的な機能である。以下、本章では、これを直流特性試験と論理・タイミング試験との二つに分けて要約する。

2.1 直流特性試験に必要な機能

LSIの直流特性試験は、主として、入力特性試験と出力特性試験との二つに分けられる。入力特性試験および出力特性試験は、それぞれ、被試験LSI(以下、DUTと略記)の入力端子および出力端子の一つに、規定の直流電

圧を印加したときの電流または規定の直流電流を印加したときの電圧が、規格を満たすか否かを判定する試験である。^{5), 7), 8)} いずれの場合にも、直接測定に関与しない入力端子には、検査条件として定められた直流電圧があらかじめ印加され、また、直接測定に関与しない出力端子には、検査条件として定められた負荷があらかじめ接続される。以下、一つの端子に対する入力特性試験または出力特性試験のことを単一検査という。単一検査は、DUTに対する検査条件の設定、電圧または電流の測定および測定結果の評価の順に実行される。

従来、この種の検査のために利用されている試験機の主な機能は、以下のように要約できる。

- (1) 入力端子または出力端子に電圧または電流を印加する機能
 - (2) 出力端子に負荷を接続する機能
 - (3) 入力端子または出力端子の電圧または電流を測定する機能
 - (4) (3)で測定した電圧または電流が規格を満たすか否かを判定し、記憶する機能
- ただし、これらの各機能が動作するためには、さらに、端子の番号、負荷の種類とその大きさ、電圧または電流の選択、電圧または電流の値、次に他の機能が動作するまでの時間遅延、測定精度および測定値の規格範囲を指定できる付加的な機能が必要である。特に、上述した時間遅延は、負荷の接続および電圧または電流の印加に順序付けが必要となる時に利用される。

2.2 論理タイミング試験に必要な機能

論理タイミング試験は、LSIの論理機能とその動作タイミングとの良否を調べるための試験である。この試験は、DUTの内部にある既知の状態に初期設定した後、入力端子に一定の時間間隔ごとに論理値を与えながら、出力端子の論理値を測定し、これらの値が規格を満たすか否かを判定するという手順で実行さ

る。^{5), 7), 8)} 以下、上述した時間間隔を検査周期といい、一検査周期内の試験のことを単周期検査という。

単周期検査において、論理値を印加する入力端子数と論理値を測定する出力端子数は、一般に、それぞれ複数となるが、これらの入力端子に与えられる論理値およびこれらの出力端子で測定される論理値を、それぞれ、検査入力および検査出力という。また、検査入力に対して、LSIの規格から求められる検査出力を特に期待値という。

種々のLSIに対して論理タイミング試験をおこなうためには、特に、検査入力を与えるときの波形の形状とタイミング(以下、印加タイミングという)および検査出力を測定するときのタイミング(以下、測定タイミングという)を自由に選べる機能が必要である。また、この試験に先立って、出力端子に負荷を接続したり電源電圧を供給したりすることが必要なことは明らかである。

従来、単周期検査で用いられている機能(単一検査に要求される(1)および(2)の機能以外)は、以下のように要約できる。

- (5) 入力端子に検査入力を印加する機能
 - (6) 出力端子の検査出力を測定する機能
 - (7) (6)で測定した検査出力が期待値と一致するか否かを判定し、記憶する機能
- ただし、これらの各機能が動作するためには、さらに、検査周期、端子の番号、検査入力、検査入力の波形の形状(RZ、NRZなど)、印加および測定タイミング、電圧の値および期待値を指定できる付加的な機能が必要である。

3 試験機の機能指定法

3.1 機能を指定する文の種類

前章で述べたすべての機能は、すべ

に試験機のハードウェアに無関係な形で表現されている。従って、テスト言語の設計問題は、これらの機能を指定できる文集合の構成問題に帰着するが、この言語によって記述されるテストプログラムの記述性、解釈性を向上させるためには、文集合を実行文と非実行文とに分離することが望ましい。そこで、本章では、まず、前章で述べた7個の機能と付加的な機能とを含めて分析し、これらの指定内容を宣言文に適した検査条件と実行文に適した実行指令とに分けた。ただし、これらの検査条件および実行指令の表現形式については、コンパイラの作成を容易にする目的から、既存の試験機のハードウェア構成を十分配慮した上で決定した。表1および表2は、それぞれ、単一検査の場合の検査条件および実行指令を示し、表3および表4は、それぞれ、単周期検査の場合の検査条件および実行指令を示す。特に、表1 (iii) の測定レンジは、試験機のハードウェア構成を意識した測定精度の別表現である。以下、各検査条件および各実行指令をそれぞれ項目という。

次に、上述したすべての項目の内容を記述するために必要な文の種類および各文における記述内容の範囲について検討

表1 直流特性試験の検査条件

項目番号	項 目
(i)	電圧または電流を印加する端子の番号、電圧または電流の値、電圧または電流の選択、次に他の機能が動作するまでの時間遅れ
(ii)	負荷を接続する端子の番号、負荷の種類とその大きさ、次に他の機能が動作するまでの時間遅れ
(iii)	電圧または電流を測定する端子の番号、電圧または電流の選択、電圧または電流の測定レンジ
(iv)	電圧または電流の規格範囲、電圧または電流の選択

する。表1および表3の項目のうち、項目群(i)~(ii)は、単一検査と単周期検査の双方で必要であるが、項目群(iii)~(iv)および(ix)~(xii)は、それぞれ、いずれか一方のみが必要である。従って、宣言文については、高々3種類あれば十分であるが、文の種類を統一する意味から、ここでは、項目群(iii)~(iv)および(ix)~(xii)の内容を同一の文で記述し、記述形式を変えらることにより両者を区別する方針とした。以下、項目群(i)~(ii)の内容を記述する文を

表2 直流特性試験の実行指令

項目番号	項 目
(v)	項目(i)の設定指令
(vi)	項目(ii)の設定指令
(vii)	項目(iii)の設定および測定指令
(viii)	項目(iv)の設定、評価および記憶指令

表3 論理タイミング試験の検査条件

項目番号	項 目
(ix)	検査周期
(x)	検査入力(論理値)を印加する端子の番号、検査入力、検査入力の波形の形状、論理0の電圧、論理1の電圧、印加タイミング
(xi)	検査出力(論理値)を測定する端子の番号、論理値の比較基準電圧、測定タイミング
(xii)	期待値(論理値)

表4 論理タイミング試験の実行指令

項目番号	項 目
(xiii)	項目(ix)の設定指令
(xiv)	項目(x)の設定指令
(xv)	項目(xi)の設定および測定指令
(xvi)	項目(xii)の設定、評価および記憶指令

S-CONDITION 文（以下、SC文と略記）、項目群(iii)~(iv)および(ix)~(xii)の内容を記述する文をM-CONDITION 文（以下、MC文と略記）という。

表2および表4の項目のうち、項目群(V)~(vi)は、単一検査と単周期検査の双方で利用され、SC文で記述された内容に従って検査の実行を指示する項目である。また、項目群(vii)~(viii)および(xiii)~(xvi)は、それぞれ、単一検査および単周期検査のみで利用され、MC文で記述された内容に従って検査の実行を指示する項目である。従って、ここでは、実行文についても、宣言文に対応して二つに分けた。以下、項目群(V)~(vi)の内容を記述する文をSET文、項目群(vii)~(viii)および(xiii)~(xvi)の内容を記述する文をMEASURE文（以下、MS文と略記）という。

以上の各文は、いずれも、単一検査および単周期検査を対象として得られたものであるが、本論文では、さらに、一部の検査条件のみが異なる検査の記述を単純にするために、各文の記述形式を次のように拡張した。SC文および単一検査に対するMC文については、代入文によるパラメータの変更を許し、単周期検査に対するMC文については、連続した複数個の単周期検査の検査条件を一つの文に列記することを許した。

このように文を構成するとき、MC文については、論理タイミング試験に対する記述内容が複雑で、特にその記述形式が問題となる。そこで、この文については、次節でさらに詳しく述べる。

3.2 MC文の項目内容記述法

論理タイミング試験に対するMC文では、既に述べたように、連続した複数個の単周期検査の検査条件が列記できるが、これらの検査条件は、11種類の小項目に細分され（表5参照）、しかも、通常、これらの記述内容は、一つの論理タイミング試験の途中で、頻繁に変更される。

このため、言語の記述性、解釈性を高めるためには、性質の似かよった小項目の記述内容を極力まとめ、記述形式を統一することが望ましい。このような理由から、これらの小項目を表5のように三つの群I、IIおよびIIIに区分した。

表5 論理タイミング試験に関する検査条件の性質による分類

小項目群番号	小項目
I	検査周期
II	論理Lの電圧 論理Dの電圧 検査入力の波形の形状 印加タイミング 論理値の比較基準電圧 測定タイミング
III	検査入力 検査入力を印加するか否か 期待値 検査出力を測定するか否か

Iに属する小項目の記述内容は、単周期検査番号（一つの論理タイミング試験における単周期検査の実行順序を示す番号）のみに依存し、IIに属する各小項目の記述内容は、検査周期が一定である限り、端子番号のみに依存する。また、IIIに属する各小項目の記述内容は、単周期検査番号と端子番号との双方に依存する。

以上から、ここでは、一定の検査周期内における小項目群の内容を次のようにして記述する方法をとった。Iに属する小項目の内容については、単に数値で記述し、IIに属する各小項目の内容については、各端子ごとに数値または名前で記述する。ただし、検査入力の波形の形状については、あらかじめ用意した中から名前により選定する。また、IIIに属する各小項目の内容については、単周期検査番号と端子番号とを、それぞれ、行および列に対応

させた0,1の2次元配列で記述する。このように記述したI、IIおよびIIIの小項目群の内容を、それぞれ、クラスA(以下、CLと略記)1、2および3という。

このような記述形式をとれば、検査周期が変わるときの検査条件も、一つのMC文の中で、上述した3種のCLの組を検査周期が変わる数だけ列記することによって、容易に記述できる。

3.3 文の構文

各文の構文を決定する場合、コンパイラをコンパクトにするためには、冗長な

記述を極力排除する方が有利であるが、反面、できあがったプログラムは解読しにくいものとなる。そこで、SC文およびMC文については、検査条件に関する各記述内容の前にキーワードを付けた。図1に、SC文の簡略化した構文図を示す。SCおよびは、それぞれ、文の始まりおよび終りを示し、この間には、項目群(i)~(ii)の内容(SC本体)と二つに付けられた名前が記述される。この名前は、SET文で参照するためのものである。SC本体において、PINに続く整数は端子番号を示し、V-SUPPLYおよびI-SUPPLYに続く定数または変数は、それぞれ、その端子に印加する電圧および電流の値を示す。また、LOADに続く名前およびDELAYに続く定数または変数は、それぞれ、接続する負荷の種類につけられた名前および次の電圧または電流の印加あるいは負荷の接続までの時間遅延を示す。

次に、MC文の簡略化した構文図を図2に示す。SC文と同様に、名前の後に検査条件の内容が記述される。CD本体には、項目群(iii)~(iv)の内容が記述されるが、PINに続く整数または整数は被測定端子の番号を示し、V-RANGEおよびI-RANGEに続く定数または変数は、それぞれ、電圧測定および電流測定の場合の測定レンジを示す。また、EVおよびEIに続く定数または変数は、それぞれ、電圧および電流の規格範囲を示す。他方、CF本体には、項目群(ix)~(xii)の内容が記述される。これらの記述内容は、前節で述べたように、CL1、2および3に分けて、それぞれ、CL1本体、CL2本体およびCL3本体で記述される。CL1本体において、PERIODに続く定数は検査周期の値を示す。次に、CL2本体において、V-HIGH、V-LOWおよびV-LTHに続く定数は、それぞれ、論理

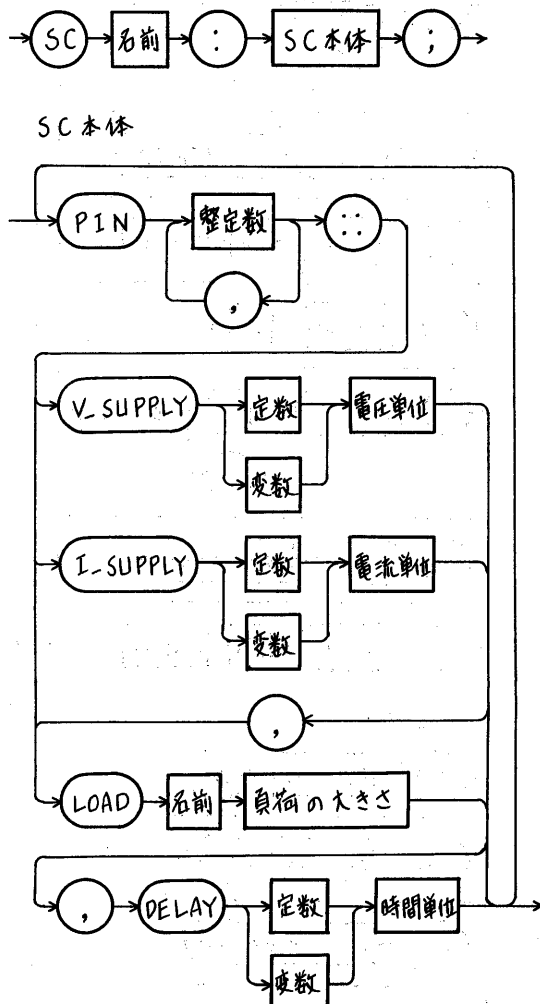


図1 SC文の構文図

1の電圧の値、論理0の電圧の値および論理値の比較基準電圧の値を示し、W-FORMに続く名前、検査入力の波形の形状に付けられた名前を示す。また、TIMINGに続く定数は、印加または割定タイムインタ（単周期検査開始時刻からの遅

延時間）を示す。最後に、CL3本体のPATi（ $i=1\sim4$ ）本体には、表3-Ⅲにおける各小項目の内容が、それぞれ0、1の2次元配列で記述される。

尚、SET文およびMS文については、それぞれ、図3および図4に示す

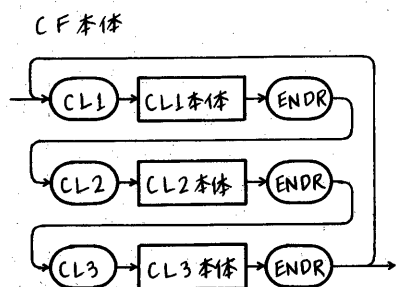
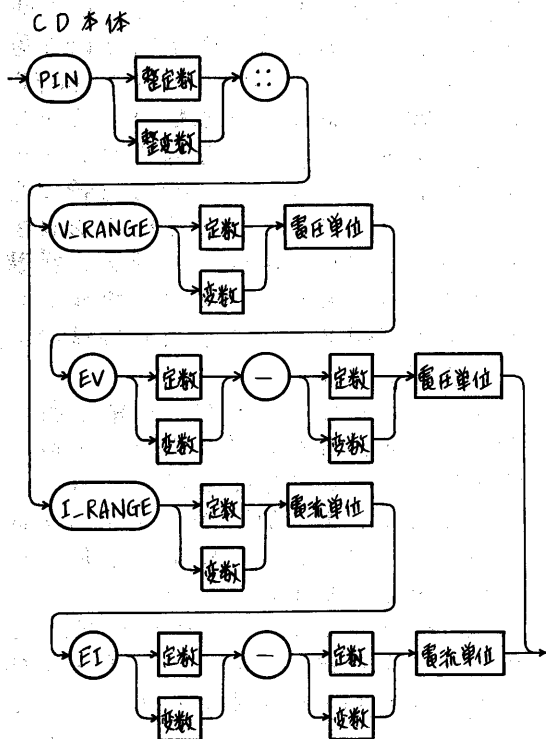
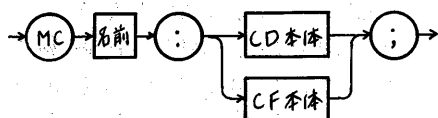
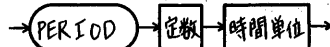
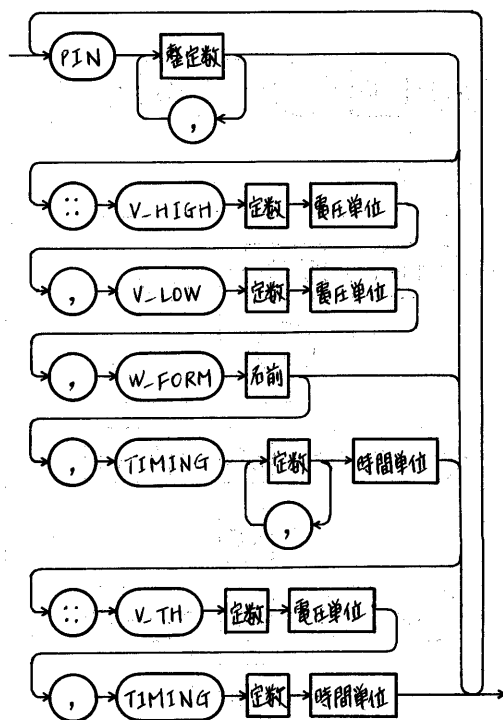


図2 MC文の構文図

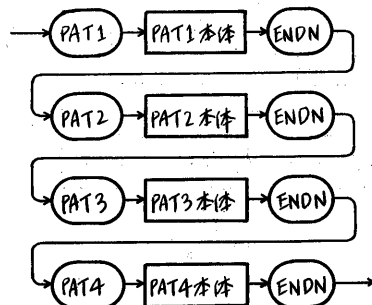
CL1本体



CL2本体



CL3本体



ような構文図となる。特に、評価結果の処理については、特定の記憶場所に記憶されることを前提としているので、構文図にはあらわれない。

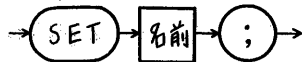


図3 SET文の構文図



図4 MS文の構文図

4 検討

前章では、試験機の機能を指定するための文について述べたが、テストプログラムを能率よく記述できる言語を構成するためには、さらに、演算・代入指定、制御指定などの文も必要である。この種の文は、通常、既存のどの高級言語にも含まれており、たとえば、PASCALにおける代入文、if文、for文、goto文などをほとんどそのまま用いることもできる。従って、これらの文で指定できる機能の範囲やコンパイラの構造などについては、あらかじめ議論する必要もほからう。そこで、本章では、前章で述べた四つの文に焦点を絞り、標準的なLSIの基本的なテストプログラムがこれらの文で記述できることを確かめ、さらに、これらの文に関するコンパイラの構造について検討する。

4.1 テストプログラムの記述例

一般に、新たに考察した言語が現実的なものであるためには、まず、所望のプログラムが記述できなければならない。そこで筆者らは、コンパイラの作成にとりかかる前に、数種の標準的なLSIを選び、これらに対する直流特性試験および論理・タイミング試験のプログラムを本論文の言語で記述してみた。

対象とした検査の内容は、いずれも基本的かつ標準的なもので、演算・代入指定、制御指定などは必要としないものばかりである。

このテストプログラムの一例を図5に示す。これは、MOSTEK MK50992 (SHARP LR40992) に対する論理・タイミング試験のテストプログラムの一部である。1行目は頭書き、2行目から32行目までは宣言部、残りは実行部である。

宣言部のうち、2行目から6行目まではSC文で、端子1、6に対する電圧源と、端子8、9、12 および18に対する負荷の条件を指定している。特に、6行目のL1は負荷の種類を示すが、この負荷は抵抗の一端に電圧源を付加したもので、その抵抗値と電圧の値は()内で指定されている。また、7行目から32行目まではMC文である。

CL1では、検査周期が100μsであることを指定している。また、CL2では、入/出力端子3~5および13~16に対する入力印加条件と出力判定条件、入力端子7、10、11および17に対する入力印加条件ならびに出力端子8、9、12および18に対する出力判定条件を指定している。さらに、CL3では、PAT1、2、3および4に続く部分で、それぞれ検査入力、検査入力を印加するか否か、期待値および検査出力を判定するか否かを指定している。

34行目のSET文および35行目のMS文は、それぞれ、上述したSC文およびMC文に対応する実行指令である。特に、S1およびM1は、それぞれ、SC文およびMC文における検査条件の記述内容につけられた名前である。

以上の結果からもわかるように、既存の試験機で検査するときに必要なLSIのすべての検査内容を、検査の手順に沿って、順番で、しかも、容易に記

述する事ができる。

PROGRAM LR40992;

SC S1:

```
PIN 1 :: V_SUPPLY -2.2(V)
PIN 6 :: V_SUPPLY 0.0(V)
PIN 8, 9, 12, 18
      :: LOAD L1 ( 100(K), 0.7(V) )
      , DELAY 10(MS);
```

MC M1:

CL1

PERIOD 100(US)

ENDR

CL2

```
PIN 3, 4, 5, 13, 14, 15, 16
  :: V_HIGH -0.4(V), V_LOW -1.8(V)
  , W_FORM NRZ
  :: V_TH -1.1(V), TIMING 94(US)
PIN 7
  :: V_HIGH -0.3(V), V_LOW -1.9(V)
  , W_FORM RZINV, TIMING 45, 95(US)
```

PIN 10, 11, 17

```
  :: V_HIGH -0.4(V), V_LOW -1.8(V)
  , W_FORM NRZ
```

PIN 8, 9, 12, 18

```
  :: V_TH -1.1(V), TIMING 94(US)
```

ENDR

CL3

```
PAT1 (0001100010000110)
      :
      (0001100010000110) ENDN
```

```
PAT2 (0111100110111110)
      :
      (0111100110111110) ENDN
```

```
PAT3 (0000011000000001)
      :
      (0000010001000000) ENDN
```

```
PAT4 (0000011001000001)
      :
      (0000011001000001) ENDN
```

ENDR;

BEGIN

SET S1;

MS M1;

END.

図5 テストプログラム記述例

4.2 コンパイラの構成について

本論文のテスト言語は、すでに述べたように、異なる機種、試験機上で用いることを前提としている。従って、コンパイラの構成についても、他の高級言語と同様に、すべての試験機に共通な部分と試験機の機種によって異なる部分とに分けるのが自然であろう。そこで筆者らは、前者の部分をパス1、後者の部分をパス2とした2パス方式のコンパイラを検討した。

パス1においては、主として、構文を解析するとともに、各種のテーブルを作成する。これらのテーブルのうち、このテスト言語に特有なものは、名前属性テーブルとその付属テーブルである。名前属性テーブルには、宣言文で記述された検査条件の名前、これらの検査条件の属性およびこれらの検査条件に対応する付属テーブルへのポインタが登録される。属性とは、SC文で記述される検査条件、直流特性試験に対するMC文で記述される検査条件および論理タイミング試験に対するML文で記述される検査条件の3種類である。また、付属テーブルは、これらの属性に対応して3種類あり、各テーブルには、対応する文で記述された検査条件のすべての内容が登録される。他方、パス2においては、パス1で作成したテーブルを利用してオブジェクトコードを発生する。すなわち、実行文中に書かれた名前によって対応するテーブルを参照し、このテーブルの内容から、ターゲット試験機用のオブジェクトコードを生成する。

このようにコンパイラを構成すれば、パス2を書き換えるだけで、異なる機種
の試験機に適用することが出来る。

5 あとがき

本論文では、LSIの直流特性試験および論理・タイミング試験を対象とした高級テスト言語について考察した。すなわち、(1) LSIの検査に必要な試験機の機能をハードウェアに無関係な形で表現し、(2) これらの機能を指定するために必要な文の種類と各文の記述形式を決定し、(3) これらの文によるテストプログラムの記述可能性とコンパイラの構成について検討した。この結果、本論文のテスト言語は、LSIの検査を記述するための基本的性能を十分備えていることが示された。

実際の検査では、検査工程を短縮するために、hold機能(一つの検査における検査条件の一部または全部を次の検査終了後も保持する機能)やmatch機能(検査出力が期待値と一致するまで、いくつかの単周期検査をくり返す機能)がしばしば利用されるが、SC文やMC文の構文は、これらの機能も容易に付加できる構造となっている。また、本論文のテスト言語では、検査入力、検査入力を印加するか否か、期待値および検査出力を判定するか否かの情報が、MC文中に記述されるが、これらをテストプログラムから分離し、別途に入力する形式に変更することもできる。

残された課題は、実際にコンパイラを作成し、LSIの検査をおこなってみることであるが、4章で述べた部分のコンパイラ(ある既存の試験機を対象として)はすでに作成を完了している。

謝辞 本研究を遂行するにあたり、種々御討論いただいたシャープ株式会社増井捷宏氏に深謝いたします。

参考文献

- (1) "第3.5世代LSIテストシステムへのアプローチ", 77物理研技術レポート, 通巻 No. 12, P. 1-8 (1977)
- (2) "新しいLSIの新しい試験方法", 77物理研技術レポート, 通巻 No. 12, P. 9-27 (1977)
- (3) "LSIテストシステムとその周辺機器", 77物理研技術レポート, 通巻 No. 12, P. 28-50 (1977)
- (4) 一宮, 石川 "超LSIのための試験機と試験技術", 電子通信学会誌 vol. 64, No. 2, P. 615-621 (1981)
- (5) 樹下行三編 "テストと信頼性", オーム社 (1982)
- (6) Richard C. Mahoney; "A COMMON PASCAL TEST LANGUAGE REALITY OR PIPEDREAM", 1982 IEEE Test Conference (Paper 17.4) pp 509-513
- (7) LSI技術編集委員会監修 "LSI技術", 電子通信学会 (1980)
- (8) 垂井康夫編 "超LSI技術", オーム社 (1981)