

情報理工学実験レポート

実験テーマ名：ムーアの法則に関する調査

職員番号 4570

氏名 蚊野 浩

提出日 2019年4月9日

要約

「大規模集積回路のトランジスタ数が、18ヶ月で2倍になる」というムーアの法則を検証した。その結果、Intel社のマイクロプロセッサに関して、1971年から2016年の平均で「26.4ヶ月に2倍」というペースであった。このことからムーアの法則のペースが遅くなっていることがわかった。

ムーアの法則は半導体チップの微細化と大面積化によって実現されてきた。半導体チップの面積に関して、現在では、チップの面積は用途によってさまざまである。スマホのようなモバイル用途のチップは小さく、サーバー用のチップは大きい。半導体チップの微細化は、現在まで順調に進歩してきた。しかし、今後は不透明である。2020年代以降、微細化技術は限界に達する可能性が高いように思われる。これらのことから、今後のコンピュータ技術の進歩は、アーキテクチャやシステムあるいはアルゴリズムによる改善が重要になる。

目次

1. 実験の目的.....	1
2. 実験の方法.....	1
3. 実験結果.....	1
3.1 発表年とトランジスタ数の関係	1
3.2 発表年と線幅・面積の関係	3
4. 考察・検討.....	4
5. 結論.....	4
参考文献.....	5

1. 実験の目的

ムーアの法則を調査することで、大規模集積回路技術のトレンドを理解することが目的である。また、この実験レポートの作成を通じて、グラフ作成のノウハウやレポート作成の基礎を習得する。

2. 実験の方法

あらかじめ配布された「ムーアの法則に関する調査用資料」[1]を用いる。その資料に掲載されている Intel 社の主なプロセッサの名称・発表年・トランジスタ数などの数値を利用する。表に掲載されている数値をグラフ化することで、トレンドを可視化し、傾向を定量的に読み取る。

3. 実験結果

資料[1]のデータを表 1 に再掲する。この表の数値をグラフ化することでムーアの法則など、大規模集積回路の製造に関するトレンドを解析した。

表 1 Intel 社の主な CPU の発表年・トランジスタ数などのデータ

	プロセッサ名	発表年	トランジスタ数	線幅(nm)	面積(mm ²)
	4004	1971	2,300	10,000	12
	8080	1974	4,500	6,000	20
	8086	1978	29,000	3,000	33
	80286	1982	134,000	1,500	49
	80386	1985	275,000	1,500	104
	80486	1989	1,200,000	1,000	173
	Pentium	1993	3,100,000	800	294
	Pentium Pro	1995	5,500,000	500	307
Klamat	Pentium 2	1997	7,500,000	350	195
Katmai	Pentium 3	1999	9,500,000	250	128
Willamette	Pentium 4	2000	42,000,000	180	217
Conroe	Core 2 Duo	2006	291,000,000	65	143
	Core i7	2008	731,000,000	45	263
Ivy Bridge	Core i7	2012	1,400,000,000	22	160
Broadwell-E	Core i7	2016	3,200,000,000	14	246

3.1 発表年とトランジスタ数の関係

表 1 の発表年を横軸に、トランジスタ数を縦軸にとった通常スケールのグラフを図 1 に示す。図において、Pentium 4 のトランジスタ数は 4,200 万個であるが、この程度のトランジスタ数では、0 の軸に貼りついたようになる。トランジスタ数の増加傾向が直線

的ではないため、通常のグラフでは正しく傾向を読み取ることができない。指数関数の性質を持つ変化を、線形のスケールでグラフ化した場合、この例のように、L字型になってしまうことがある。

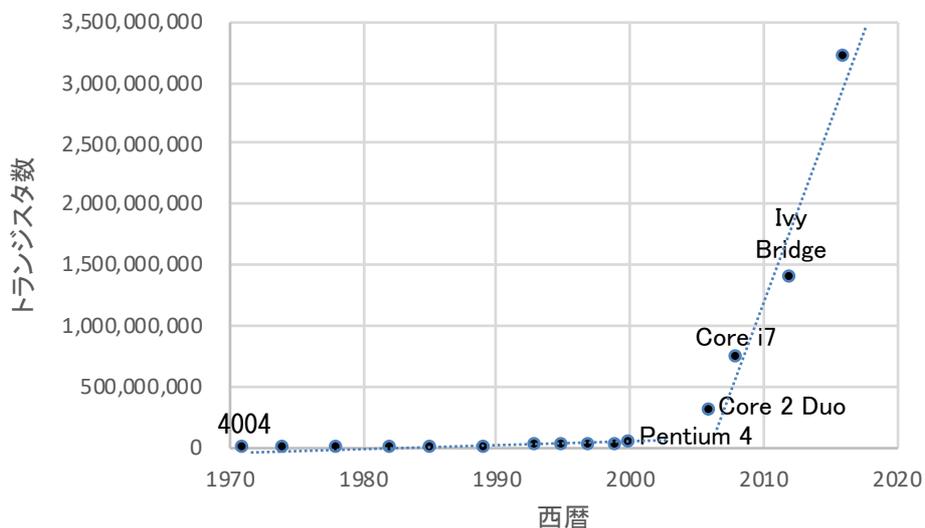


図1 マイクロプロセッサの発表年とトランジスタ数の関係

図1と同じデータを、縦軸を対数化してグラフ化すると図2を得る。このグラフではデータの点列が直線化されている。実際には、縦軸が1000, 10000, 100000...と増加しているので、トランジスタ数の増加傾向は指数のオーダーである。図中の青点線はExcelの機能で作成した指数曲線（グラフ上では直線になる）である。

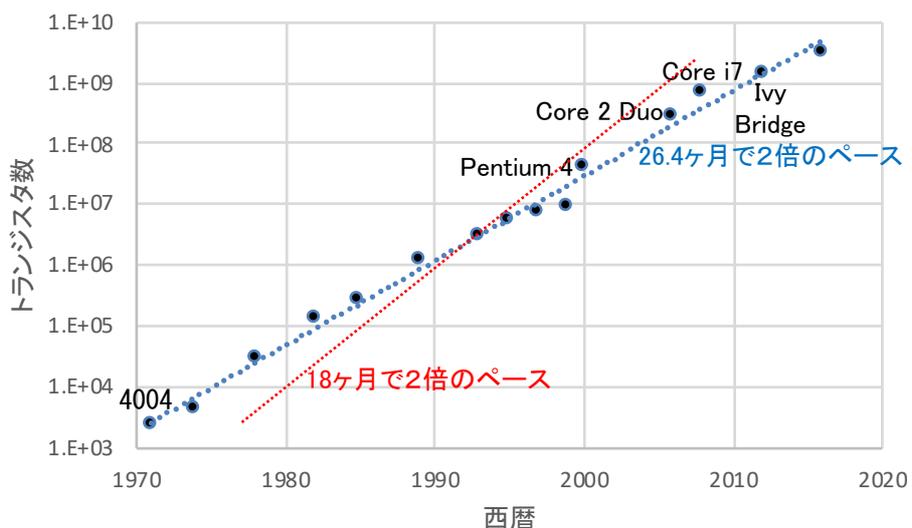


図2 マイクロプロセッサの発表年とトランジスタ数の関係（縦軸を対数化）

ムーアの法則は「集積回路上のトランジスタ数が18ヶ月（1.5年）ごとに倍になる」

ということで、これを式で表現すると n 年後の倍率 p は $p=2^{n/1.5}$ となる[2]。これは 10 年間で約 100 倍のペースである。これを図 2 に重ねると赤点線になる。青と赤の点線を比較すると、今回のデータで検証したトランジスタ数の増加傾向は、確かに指数オーダになっているが、「18 ヶ月で 2 倍」のペースよりは緩やかである。表 1 の 4004 から Core i7 Broadwell-E を比較すると 45 年でトランジスタ数が 1,391,304 倍になっている。これは、概ね、「26.4 ヶ月で 2 倍」のペースである。

3.2 発表年と線幅・面積の関係

表 1 から発表年が進むにつれ、線幅が小さくなっていることがわかる。この関係をグラフ化したものが図 3 である。図 3 左のグラフは縦軸が線形になっている。右のグラフは縦軸が対数になっている。線幅の縮小傾向は、トランジスタ数の増加ほどに劇的ではないので、通常のグラフ表示でも縮小の傾向を読み取ることができる。しかし、片対数のグラフを用いると、傾向がより鮮明になる。

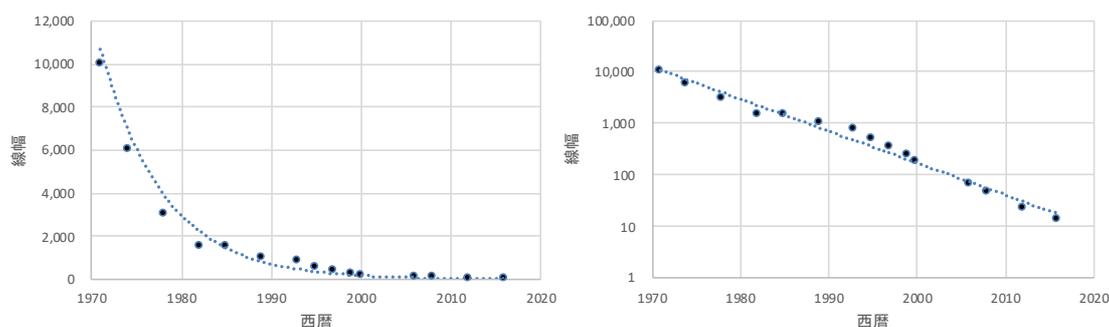


図 3 マイクロプロセッサの発表年と線幅の関係

発表年と面積の関係をグラフ化したものが図 4 である。マイクロプロセッサは 1990 年代までは、単調に大型化していたことが読み取れる。その後は、用途に応じて、いろいろな面積のチップが設計されている。スマホなどモバイル向けは小さく (100mm² 程度)、パソコン向けは中ぐらい (200mm² 程度)。サーバー向けは大きく (400mm² 以上) になっているようである。

マイクロプロセッサに実装できるトランジスタ数は線幅の 2 乗に反比例し、面積に比例すると考えられる。4004 と Core i7 Broadwell-E を比較すると、線幅が 10,000:14、面積が 12:246 である。これから、Core i7 Broadwell-E は 4004 の 10,459,183 倍のトランジスタを実装できると推定できる。これは、実際の数値である 1,391,304 倍に近い数値である。このことから、大規模集積回路の実装密度は、VLSI のデザインルールである線幅によって、ほぼ決まっていることがわかる。

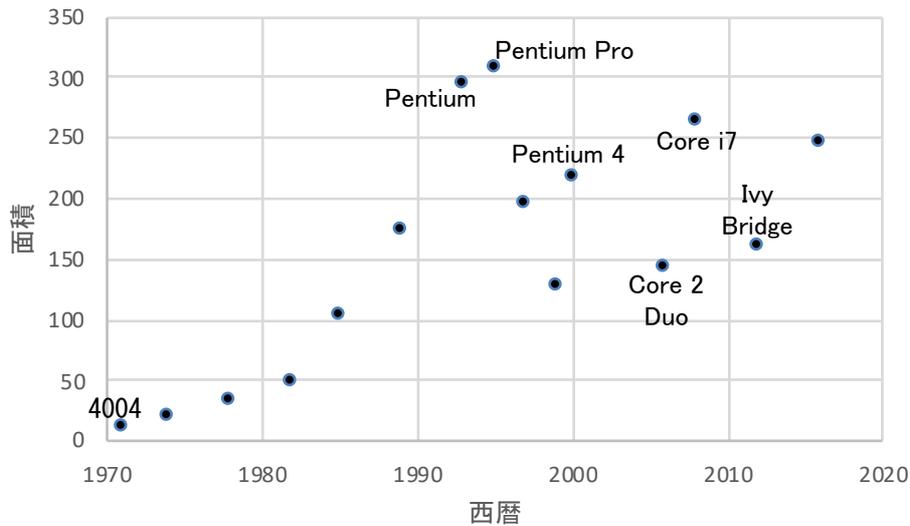


図4 発表年と面積の関係

4. 考察・検討

ムーアの法則は「18ヶ月でトランジスタ数が2倍になる」ということではあるが、「18ヶ月から24ヶ月で2倍になる」という説明もしばしば見かける。今回、文献[3]を使い、1971年から2016年までのIntel社の代表的なマイクロプロセッサについて検証した結果、この期間の平均では、26.4ヶ月で2倍であった。したがって、ムーアの法則を維持することが難しくなっていることがわかる。

ムーアの法則は線幅の微細化とチップ面積の大型化によって支えられていた。モバイルやパソコンの用途では、チップ面積の増加傾向は見られなくなっている。これが「18ヶ月で2倍」を維持できない一つの理由である。

線幅の微細化は、ペースを維持するための製造コストが膨大になっているし、微細化の限界も近い[4]。2020年代には、大規模集積回路の実装密度が飽和していくと考えられる。そのようになれば、コンピュータ技術の進歩は、アーキテクチャ的な工夫、アルゴリズム的な工夫、システム的な工夫、ソフトウェア的な工夫の比重がますます大きくなる。

5. 結論

インターネット上の情報を利用してムーアの法則を検証した。その結果、「大規模集積回路に実装できるトランジスタ数が18ヶ月で2倍になる」というペースを維持できていないことがわかった。インテルCPUに関して、1971年から2016年の平均で、26.4ヶ月で2倍、というペースであった。2020年代になれば、集積回路の密度は飽和傾向になる。このことから、今後のコンピュータ技術の進歩は、アーキテクチャ的な工夫、

アルゴリズム的な工夫、システム的な工夫、ソフトウェア的な発想がより重要になる。

参考文献

- [1] 蚊野 浩, 「ムーアの法則に関する調査用資料」、2019年。
- [2] ムーアの法則、<https://ja.wikipedia.org/wiki/ムーアの法則>
- [3] Transistor count, https://en.wikipedia.org/wiki/Transistor_count
- [4] 岩井洋、「半導体微細化ロードマップの終焉とその後の世界」、
http://semicon.jeita.or.jp/STRJ/STRJ/2015/2015_08_Tokubetsu_v2.pdf