

ムーアの法則 (Moore's law)

大阪医科大学放射線医学教室 非常勤講師
(関西福祉科学大学 保健医療学部 教授)

上杉 康夫

ムーアの法則

ムーアの法則 (Moore's law) は、大規模集積回路の製造・生産における長期傾向について論じた1つの指標であり、経験則に類する将来予測です。米Intel創業者の一人であるゴードン・ムーア (Gordon E. Moore) (図1)^{*1}氏がFairchild Semiconductorに在籍していた1965年に出した論文の中で初めて提唱しました^{*2}。当初「ムーアの法則」は半導体業界の技術を観測したムーア氏が経験則に基づく予測として提唱したのですが、その後、半導体の技術革新はほぼムーアの法則通りに進化したことから、半導体産業では「法則」と呼ぶにふさわしい絶対的な指標として取り扱われてきました。なお、トランジスタ数は「性能」に置き換えられ、ムーアの法則は「コンピュータの性能は18カ月で2倍になる」と表現されることもあります^{*3}。

ムーア氏の元々の文章は以下です。

「部品あたりのコストが最小になるような複雑さは、毎年およそ2倍の割合で増大してきた。短期的には、この増加率が上昇しないまでも、現状を維持することは確実である。より長期的には、増加率はやや不確実であるとはいえ、少なくとも今後10年間ほぼ一定の率を保てないと信ずべき理由は無い。すなわち、1975年までには、最小コストで得られる集積回路の部品数は65,000に



図1：魚釣りを楽しむゴードン・ムーア(2005年ごろ)^{*1}
Photo by Steve Jurvetson – from Menlo Park, USA(2004) / CC BY 2.0

達するであろう。私は、それほどにも大規模な回路が1個のウェハー上に構築できるようになると信じている。」 "Cramming more components onto integrated circuits", Electronics Magazine 19 April 1965^{*4}

最も有名な公式は、集積回路上のトランジスタ数は「18か月 (=1.5年) ごとに倍になる」というものです。これを式で表現すると、n年後の倍率pは、指数関数的に $p = 2^{n/1.5}$ と表示されます。したがって、2年後には2.52倍、5年後には10.08倍、7年後には25.4倍、10年後には101.6倍、15年後には1024.0倍、20年後には10 321.3倍ということになります。歴史的に見ても1970年代から2010年代までチップ1個当たりのトランジスタ数について、また2004年までクロックスピード (clock speed) についてはムーアの法則が成立しています (図2)^{*5}。

コンピュータの大きさでは、前述のように集積回路上のトランジスタ数は10年間で101.6倍になるのですから、同一性能であれば、コンピュータの

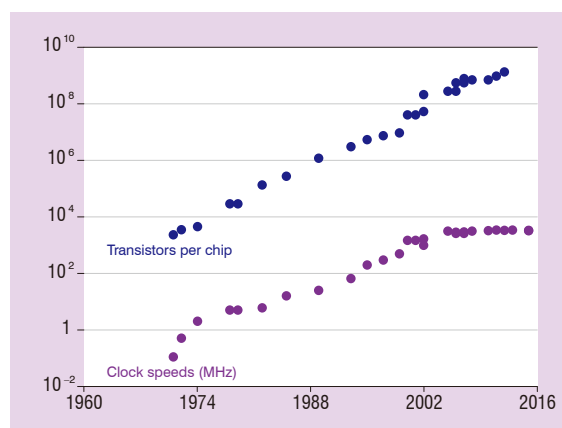


図2：ムーアの法則：縦軸を片対数グラフとして、チップ1個当たりのトランジスタ数とクロックスピード (clock speed) の年次変化を示したグラフ

1970年代から2010年代までチップ1個当たりのトランジスタ数について、また2004年までのクロックスピード (clock speed) については片対数グラフ上で直線関係にあり指数関数的に倍率が変化するというムーアの法則は、成立していると考えられる^{*5}。

大きさは10年間で約100分の1になります。縦軸をコンピュータの大きさ (mm³)、横軸を年とした片対数グラフでは、およそ10年おきに新機種が誕生し、コンピュータの大きさは10年間でほぼ100分の1になっています (図3)*⁵。

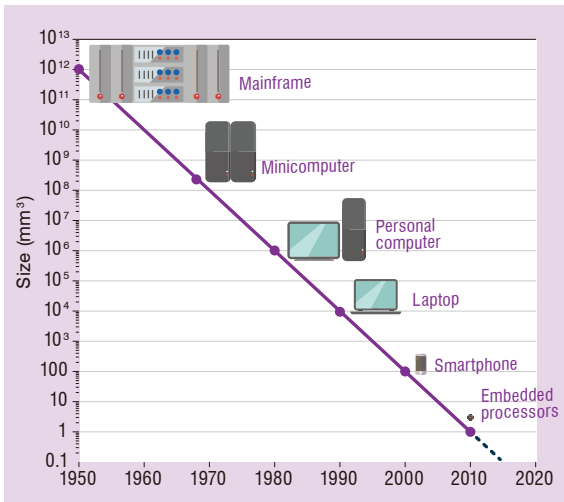


図3: 縦軸をコンピュータの大きさ(mm³)、横軸を年とした片対数グラフでは、およそ10年おきに新機種が誕生し、コンピュータの大きさは10年間でほぼ100分の1になっている*⁵。

ムーアの法則の技術的意味

それでは、集積回路上のトランジスタが指数関数的に増えていくという、ムーアの法則は技術的にどのような意味があるのでしょうか。

設備投資等の要因を除き、あくまで数字上の理論ですが、ひとつには「性能向上」が挙げられます。コンピュータにとって、処理のスイッチとなるトランジスタが2倍になるということは、処理能力が2倍になることを意味しているからです。

もうひとつは「コスト」です。同じ面積の集積回路上に2倍のトランジスタが実装できるということは、性能が同じであれば、同じ面積で2倍の集積回路が作れることになり、コストは半分になります。

このような技術的側面を持つムーアの法則は、一般にも広く認知されるとともに、半導体に関わる製品や部品を生産する企業にとっては、無視す

ることのできないものとなっています。

なぜなら、半導体の性能とコストが指数関数的に変化する将来を正確に予測し、それに基づいた開発を計画的に行うことが、企業存続に直結してくるからです*⁶。

ムーアの法則の現状

ムーアの法則は、1965年にゴードン・ムーアが論文で提唱してから、既に50年以上を経過していますが、その間、半導体の集積率はほぼ法則通りの進化を遂げてきているといえるでしょう。しかし、近年になって半導体の微細化のスピードにも陰りが見られるようになってきており、ムーアの法則のペースが維持できない、物理的な限界が近づいている、などを指摘する人も現れています*⁶。

ムーアの法則の限界

現在の半導体製造プロセスは10nm (1nm=10億分の1メートル) に移行しつつあり、ナノテクノロジーを用いた開発になっています。

これは、トランジスタのサイズが基本的な障壁となる原子サイズまで微細化されることを意味し、物理的な限界が近いと推定されています。

仮にムーアの法則通りに事が運べば、2030年にはプロセスルールは2nmに突入する予定ですが、これは原子10個分というスケールで、量子的な影響がこれまでも増して大きくなるため、電子の安定した挙動は期待できないと考えられています。つまり、もはや微細化すればするほど性能が向上するという単純な世界を描けない領域に到達する時が目前に迫っているのです。

さらに、物理的な限界以前に今後の技術的な障壁となるのは、「現時点でも継続して対応を迫られている問題」「微細化に起因するトランジスタ特性のバラツキ」「リーク電流による電力消費」で、これらを解決する技術の進化速度は、もはやムーアの法則のペースについていけないともいわれています*^{6・7}。

集積回路が発展を続ける可能性

カーツワイル (Ray Kurzweil) は、ムーアの法則による半導体の進化が限界点に近づく中、三次元分子回路という技術革新を迎えることによって、コンピュータの性能としての指数関数的進化は続くと予想しています^{*7}。

また、半導体素材としてシリコンに変わる材料の研究も進んでいます。例えば、カーボンナノチューブやグラフェンなどの炭素で構成される物質がシリコンに取って代わる半導体材料の有力候補として研究されています。一方で、原子1層分の究極の薄さを持つシリコン「Silicene」^{*9}こそが次世代半導体にふさわしいという研究もあります。

今回は、ムーアの法則の概要について記載いたしました。

参考文献

- ※1 : ゴードン・ムーア - Wikipedia
Author : Steve Jurvetson from Menlo Park, USA
https://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B4%E3%83%BC%E3%83%89%E3%83%B3%E3%83%BB%E3%83%A0%E3%83%BC%E3%82%A2#/media/File:Gordon_Moore.jpg
- ※2 : ムーアの法則 - Wikipedia
<https://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%A0%E3%83%BC%E3%82%A2%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87>
- ※3 : 「ムーアの法則」の終焉は何を意味するのか? - GIGAZINE
<https://gigazine.net/news/20160213-post-moores-law/>
- ※4 : "Excerpts from A Conversation with Gordon Moore: Moore's Law (PDF)". Intel Corporation. pp. 1 (2005).
https://web.archive.org/web/20121029060050/ftp://download.intel.com/museum/Moores_Law/Video-Transcripts/Excerpts_A_Conversation_with_Gordon_Moore.pdf
- ※5 : The chips are down for Moore's law : Nature News & Comment
<http://www.nature.com/news/the-chips-are-down-for-moore-s-law-1.19338>
- ※6 : ムーアの法則とは？その現状・限界って？
収穫加速の法則も徹底解説 - 経営企画・マーケティング | ボクシルマガジン
<https://boxil.jp/mag/a2994/>
- ※7 : 「ムーアの法則は終わった」、NVIDIAのCEOが言及
<http://eetimes.jp/ee/articles/1706/05/news053.html>
- ※8 : レイ・カーツワイル：今後現れるシンギュラリティ(技術的特異点)を学ぶ大学
https://www.ted.com/talks/ray_kurzweil_announces_singularity_university/transcript?language=ja
- ※9 : 超高速コンピュータ誕生の可能性を秘めた原子1個分の極薄シリコン系材料「Silicene」 - GIGAZINE
<http://gigazine.net/news/20150206-silicene/>

