

・『イノベーションのジレンマ』における「技術開発の S カ  
ーブ」という視点の限界について  
ー “技術” の詳細を理解していない者による “技術経営論”  
に対する技術者からのコメントー

寺内 衛\*・寺内かえで<sup>ψ</sup>

【要旨】

C. M. Christensen が用いた「技術開発の S カーブ」という視点は、彼の著書『イノベーションのジレンマ』の根幹である。この「技術開発の S カーブ」がなぜ「S 字」になるのか？を考察し、Christensen には“見えなかった”ものを題材に「技術の詳細を理解しない視点の限界」を議論した。次に、既存技術を敢えて捨てることによってメーカーとして成功を収めた事例を例示し、最後に、持続的イノベーションがなされ得なくなった場合であっても、ひとたび現代社会のインフラ実現に不可欠となった技術は（経営者や投資家にとっては魅力の無いものになっていたとしても）最低限そのまま、可能であれば“その実現に係るコストをより低下させられ得る方法で”継承されていかざるを得ないことを指摘した。

【キーワード】

Disruptive innovation, 物理的限界, 「実現可能な」技術的限界, 技術の継承

---

\* 甲南大学マネジメント創造学部

<sup>ψ</sup> 拓殖大学工学部

## 1. はじめに

Clayton M. Christensen による “The Innovator’s Dilemma -When New Technologies Cause Great Firms to Fail-<sup>1</sup>” (邦題『イノベーションのジレンマ 増補改訂版<sup>2</sup>』) は技術経営に関する著作である<sup>3</sup>。英語版 Wikipedia<sup>4</sup>を引用すれば

It (“The Innovator’s Dilemma”) describes how large incumbent companies lose market share by listening to their customers and providing what appears to be the highest-value products, but new companies that serve low-value customers with poorly developed technology can improve that technology incrementally until it is good enough to quickly take market share from established business.

とあるが、本当にそうだろうか？本稿の筆者は兩名とも東芝／日立／日本石油系列の企業（すなわち、上記の言葉を使えば“incumbent companies”）での研究者の経験があるが、Christensen がタイプ分けするところの sustaining (evolutional) technologies<sup>5</sup>に係る研究開発を行なうことは各々の企業にとって（あるいは社会全体にとって）本当に無意味なのだろうか？<sup>6</sup>

本小論は、技術者（最先端技術の研究開発者）を実際に経験した筆者による、“技術の詳細をわからずに技術経営ができるのだろうか？”という素朴な疑問に対する現時点の筆者なりの回答である。

## 2. Christensen が “見た” もの

---

<sup>1</sup> Reprint 版, ISBN-13:978-1422196021 ©1997, 2000. 初版の全図面に関しては、<https://www.semanticscholar.org/paper/The-Innovator's-Dilemma-Christensen/ca3698315441292596205d44d1a775d9cfc3fe37> で入手可能である（24.01.31 現在）－Internet Archive にも保存されている：<https://web.archive.org/web/20230113084317/https://www.semanticscholar.org/paper/The-Innovator's-Dilemma-Christensen/ca3698315441292596205d44d1a775d9cfc3fe37>。なお、以下の脚注の URL は24.01.31 現在でアクセス可能であることを確認した。

<sup>2</sup> ISBN-13:978-4798100234

<sup>3</sup> 日本語訳<sup>2</sup>の根来龍之氏による紹介記事が以下の URL より入手可能である：

<https://bookplus.nikkei.com/atcl/column/070600096/> (Internet Archive にも保存されている)

<sup>4</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/The\\_Innovator%27s\\_Dilemma](https://en.wikipedia.org/wiki/The_Innovator%27s_Dilemma) なお、下線は筆者による。

<sup>5</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/Disruptive\\_innovation](https://en.wikipedia.org/wiki/Disruptive_innovation) なお、Christensen は、最初は disruptive technology という言葉を使っていた(1995)が、途中から disruptive innovation に拡張した、と上記 Wikipedia<sup>4</sup> の記述にはある。technology (技術)は通常は漸進的・連続的に発展する、と考える筆者兩名にとっては disruptive innovation の方が受け入れやすい。

<sup>6</sup> 筆者は兩名とも「株主利益を短期的に最大化することが企業経営者の職務である」という立場はとらない。

1867年に“Das Kapital”第1巻が出版されている<sup>7</sup>ことから、Karl Marxが“見た”もの(≒それらを基にDas Kapitalを執筆したもの)が石炭の工業的利用(≒蒸気機関の活用)による各種工業の変遷とそれに伴う社会構造の変化であることは明らかである。同様に、Christensenがdisruptive technology<sup>8</sup>(後のdisruptive innovation)という考えに至ったのは、コンピュータシステムにおいて「補助記憶装置」として用いられる“ハードディスク装置”<sup>9</sup>並びにそれに付随する部品を製造している業界の変遷を極めて詳細に調べ上げた結果<sup>10</sup>である(但し、第3章及び第4章では掘削機excavatorsについても自説の検証をしており、米国の鉄鋼業界や自動車業界にも言及している—第4章の“The northeasterly migration of integrated steel”や第10章の“How can we know if a technology is disruptive?”など—)。

ハードディスクドライブ(HDD)に関しては、原著図1.7に示された1980年代後半の3.5インチHDDへの移行までの時系列的データには異論は無いものの、原著図2.8に示された1990年代以降の2.5インチHDD及び1.8インチHDDへの移行予測以降に関しては、残念ながら2024年頭の現実を反映していない。例えばChristensenへの批判として既に英語版Wikipediaに明示されている<sup>11</sup>ように、Seagate社は現在も3.5インチHDDメーカーとして健在であり<sup>12</sup>、25万台強のHDDをデータセンター業務で

<sup>7</sup> [https://de.wikipedia.org/wiki/Das\\_Kapital](https://de.wikipedia.org/wiki/Das_Kapital)

<sup>8</sup> [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Disruptive\\_technologies&redirect=no](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Disruptive_technologies&redirect=no)

<sup>9</sup> コンピュータシステムにおける“記憶装置の階層構造”(←von Neumann型のコンピュータ用プログラムが、本質的に“locality of reference”(短期間で見ると、当該インストラクション(命令コード)がストアされているメモリアドレスと近接したメモリアドレスへのアクセスが多い)を有しているために、超高速だが極めて小容量のCPU内レジスタ—高速なCPU内キャッシュ(主としてSRAMで構成される)—低速だが容量の大きな(←通常は、プログラムコード全てを記憶させておくことができる程度以上の大きさを有する)主記憶(主としてDRAMで構成される)—補助記憶装置(補助的なプログラムコードや処理すべきデータの全てを記憶させておく)、というような階層構造が有効となる)については、例えば、Hennessy and Patterson, “Computer Architecture” 3rd ed. (Morgan Kaufmann, ISBN: 978-1558607248, 2002) Chap. 5 “Memory Hierarchy Design”などを参照。

<sup>10</sup> 1950年代半ばの容量5MBの装置(原著図1.2)からFlashメモリを用いたSSD(solid-state drive;既にハードディスク装置では無いが、コンピュータシステムにおいて「補助記憶装置」の範疇で用いられる記憶装置)まで言及している(例えば、原著図2.8及び原著図8.5を参照)。筆者両名ともコンピュータ業界に近い分野で企業の研究員をし、また、個人的にも(NECのTK-80に代表される)8bit PCの頃から所有して活用してきているが、さすがに原著図1.2のようなものは見たことが無い(固定式のWinchester driveになる前のRemovable disk pack driveの入れ替えを行なったくらいである;原著図1.5)。ちなみに、SSDに用いられるFlashメモリについては、例えばY. Taur and T. H. Ning, “Fundamentals of Modern VLSI Devices” 3rd ed. (Cambridge University Press, 2021, ISBN:9781108480024)第12章(Memory devices)を参照。著者の一人(MT)はTaur & Ningの第1版から日本語訳に携わっており、2024年出版予定の第3版ではちょうどその第12章も訳出を担当している(その他の担当箇所は第7章 Silicon-on-insulator and double-gate MOSFETs)。

<sup>11</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/Disruptive\\_innovation#Critics](https://en.wikipedia.org/wiki/Disruptive_innovation#Critics)

<sup>12</sup> 前掲の英語版Wikipedia<sup>4</sup>では、“Christensen demonstrates how successful, outstanding companies can do everything “right” and still lose their market leadership – or even fail – as new, unexpected competitors rise and take over the market.”と言われているが、少なくともSeagateはmarket leadershipを失ってはいない(2023年末時点)。さらに、筆者両名には、IBM(International Business Machines)が、単に事務機器→コンピュータシステム製造メーカーという範疇を超えて「Solution Business Provider」として2024年においてもなお存在しており、最先端半導体に関する研究開発を続けているWatson Research Centerや1原子の

使用している Backblaze 社が採用している 4 つの HDD ブランド (HGST-IBM+日立 (WD 傘下) -/Seagate/Toshiba-東芝+富士通 (WD 傘下) -/WDC-Western Digital Corporation-) のうちのひとつである<sup>13</sup>。また、この Backblaze 社の公表している型番からは、Backblaze 社が使用している HDD はほとんどが 3.5 インチ HDD であって 2.5 インチ HDD 及びそれ以下のサイズの HDD (1.8 インチ HDD を含む) ではないことがわかる。すなわち、単に“過去のトレンド” (≡Christensen が low-end disruptive technologies による innovation と見なしたもの) に従った 3.5 インチ HDD→2.5 インチ HDD といった世代交代は事実として起きなかった。さらに、現行のノート PC あるいはスマホの補助記憶装置は、既にほとんどが SSD (solid-state drive) になっている。これは、日々持ち歩くものから (衝撃で破損してしまうような) 可動部品を無くしたい、という基本的な欲求に従ったものであり、また、ノート PC の大きさ/重さを小さく/軽くしたい、という要求 (コモディティユーザのニーズ) にも従ったものである。また、SSD を使用することで、モーターでディスクを常時回転させておく必要から開放されるため、バッテリーでの稼働時間を伸ばすことにも役立っている (HDD と比較して本質的に SSD の方が劣る特性については後述する)。Christensen が HDD 業界及びその世代移行予測に関して見逃したものは何だろうか?<sup>14</sup>

### 3. Christensen に “見えなかった” もの

Christensen は、ある技術の開発に投入する費用とその技術から得られる利益との間  
の関係を表わす「技術開発の S カーブ」<sup>15</sup>を基に“The Innovator’s Dilemma -When New

---

可視化や操作を実現してみせた IBM Research Zurich など非常に幅広い分野に亘る最先端科学・技術の研究  
所を保持し続けていることが驚異並びに (後に詳述する) 「技術的に生き残り続ける理由」のように思える。

<sup>13</sup>

<https://web.archive.org/web/20231114140913/https://www.backblaze.com/blog/backblaze-drive-stats-for-q3-2023/>

<sup>14</sup> 3.5 インチ HDD が残り続けているのは「同一メーカーの製品同士での product cannibalization を当該メーカーが避けている」という理由による (“Theories predict that cannibalization between existing and new products delays incumbents’ innovation, whereas preemptive motives accelerate it.”) という主張もある (例えば、M. Igami, “Estimating the Innovator’s Dilemma: Structural Analysis of Creative Destruction in the Hard Disk Drive Industry, 1981–1998” Journal of Political Economy Vol.125(2017)) が、筆者両名は与しない。

<sup>15</sup> C. M. Christensen, “Exploring the Limits of the Technology S-Curve. PART I: Component Technologies” (PRODUCTION AND OPERATIONS MANAGEMENT Vol. I (1992) 334-357) より、「技術開発の S カーブ」に関する記述を以下に引用する:

The technology S-curve has become a centerpiece in thinking about technology strategy. It represents an inductively derived theory of the potential for technological improvement, which suggests that the magnitude of improvement in the performance of a product or process occurring in a given period of time or resulting from a given amount of engineering effort

Technologies Cause Great Firms to Fail”での議論を組み立てている。それによれば技術が成熟してきてからは、投入した費用に対する得られる利益の割合は（例えば、競合他社との価格競争なども起こってしまうことから）小さくなり、最終的に飽和する。但し、その飽和する理由に関する彼の指摘は、「自然の、すなわち物理的限界に漸近すると、性能向上にはそれまで以上に費用を投入しなければならない」であり、「考慮している技術がその「物理的限界」に漸近してしまっているのか否か？についての判断を下すための基準を全く示していない<sup>16</sup>（それらが単にその当時の「技術的」限界なのかはたまた本質的な「物理的」限界なのかについての分類分けも行っていない）。特に、原著図 1.7 を用いて詳述されているハードディスク装置の世代交代の理由についても特段の言及は無い<sup>17</sup>。

---

differs as technologies become more mature. The theory, depicted in Figure 1, states that in a technology's early stages, the rate of progress in performance is relatively slow. As the technology becomes better understood, controlled, and diffused, the rate of technological improvement increases (Sahal 1981). But the theory posits that in its mature stages, the technology will asymptotically approach a natural or physical limit, which requires that ever greater periods of time or inputs of engineering effort be expended to achieve increments of performance improvement.（下線は筆者による）

reprint 版の“The Innovator's Dilemma -When New Technologies Cause Great Firms to Fail-”における議論も同様である (p.39 より引用) :

The technology S-curve forms the centerpiece of thinking about technology strategy. It suggests that the magnitude of a product's performance improvement in a given time period or due to a given amount of engineering effort is likely to differ as technologies mature. The theory posits that in the early stages of a technology, the rate of progress in performance will be relatively slow. As the technology becomes better understood, controlled, and diffused, the rate of technological improvement will accelerate. But in its mature stages, the technology will asymptotically approach a natural or physical limit such that ever greater periods of time or inputs of engineering effort will be required to achieve improvements.（下線は筆者による）

<sup>16</sup> C. M. Christensen, “Exploring the Limits of the Technology S-Curve. PART I: Component Technologies” (PRODUCTION AND OPERATIONS MANAGEMENT Vol. I (1992) 334-357) の p.344 には以下のような記述すらある:

- ... nobody knows what the natural, physical performance limit is in complex engineered products, such as disk drives and their components.
- ... Even when designers confront an apparently immutable natural limit in a component within a product system as complex as that of a disk drive, there may be several engineering avenues for resolving the system-level performance problem there is often more than one way to skin the cat. Although one component's performance may be on a plateau-an actual or perceived physical limit-engineers can continue to improve system performance by applying effort to less mature elements of the system design.（いずれも下線は筆者による）

後者の引用文を読むと「構成部品が物理的限界に到達したらいったいどうすべきなのか？」という極めて素朴な疑問が生じるはずであるが、解決策への言及は（少なくとも著者には）当該論文に記載されているようには思われない。

<sup>17</sup> “low-end disruption” ([https://en.wikipedia.org/wiki/Disruptive\\_innovation#Low-end\\_disruption](https://en.wikipedia.org/wiki/Disruptive_innovation#Low-end_disruption)) の一例としか考えていないように筆者には思われる。

ハードディスク装置の“読み取り性能”は、技術者にとっては独立行政法人情報処理推進機構が実施している「基本情報処理技術者試験」<sup>18</sup>の午前問題としても出題される程度の基本的な考え方<sup>19</sup>であるが、

- ・情報 1 ビットの記憶に必要な最小面積は 1 原子間隔（すなわち 1 nm 未満）、
- ・磁気記憶ヘッドの機械的移動に係る位置決め精度も 1 原子間隔、
- ・ヘッド位置決めに係るセトリング時間は無視できるほど短い、

という「仮想的な超高密度記憶」が可能な磁気ヘッド材料／磁気ディスク材料／モーター材料／アクチュエータ材料などが全て存在している、と仮定した場合、

- ・磁気ディスクの半径が小さければ小さいほど、また、
- ・磁気ディスクの回転数が早ければ早いほど、  
データの読み出し速度が速くなる

という「小型化の利点（ユーザメリット）」が存在している（特に、「ヘッドシーク時間」（＝待避位置から所定のシリンダへの物理的な移動距離）がプラッタの小径化によって必ず短くなるので、小型化に伴ってランダムアクセス時間は（前記仮定の下で）必ず短くなる）。すなわち、HDD の累積的な小型化は単に low-end disruption による世代交代が毎回起こっていたのではなく（少なくとも）「ランダムアクセス性能の向上」を伴っており、従って各回の世代交代は前世代製品に対するユーザメリット（性能向上）を必ず伴っているのである。このような事情は、MOSFET の研究開発初期に Dennard らが提唱したスケーリング則<sup>20</sup>の場合と同様である。つまり、後に“Moore’s law<sup>21</sup>”として人口に膾炙するようになるように、LSI における MOSFET を（特段の「限界」<sup>22</sup>を考慮する必要なく）比例縮小することができるのであれば、単に単位面積当たりに搭載できる MOSFET 数を増大することができてより高機能化できるだけでなく、処理速度が向上し、処理（スイッチング）に必要な電力が減少する、という MOSFET デバイス

<sup>18</sup> <https://www.ipa.go.jp/shiken/kubun/list.html> 及び <https://www.ipa.go.jp/shiken/syllabus/gaiyou.html>（コンピュータ構成要素のうちの「補助記憶装置」にハードディスク装置は相当する）

<sup>19</sup> 例えば、[https://www.seplus.jp/dokushuzemi/ec/fe/fenavi/easy\\_calc/disc/](https://www.seplus.jp/dokushuzemi/ec/fe/fenavi/easy_calc/disc/)などを参照。

<sup>20</sup> R. H. Dennard, F. H. Gaensslen, H. -N. Yu, V. L. Rideout, E. Bassous and A. R. LeBlanc, "Design of ion-implanted MOSFET's with very small physical dimensions," in IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 9, no. 5, pp. 256-268, Oct. 1974, doi: 10.1109/JSSC.1974.1050511

<sup>21</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/Moore%27s\\_law](https://en.wikipedia.org/wiki/Moore%27s_law)

<sup>22</sup> ここでの「限界」という言葉には、製造装置の加工精度に代表される「技術的限界」と、微細化に伴う（各種）漏れ電流の増大による性能メリットの低減（相殺）に代表される「物理的限界」の双方が含まれている。

の比例縮小を行なうことによるユーザメリット<sup>23</sup>と同様のものが（少なくとも 3.5 インチ HDD までの）ハードディスク装置の世代交代の裏にも実は厳然として存在していたのである。この点が、少なくとも技術者では無い Christensen には“見えていなかった”と筆者は考える<sup>24</sup>（←見えていたとすれば、少なくとも “The innovator’s dilemma” で言及するはずであるから）。

例えば英語版 Wikipedia<sup>25</sup>にもまとめられているように、HDD は何度も「面記録密度」に関する「技術的」限界をいろいろなブレークスルーによってクリアしてきた。ここで、それらを「技術的」限界と言い切れるのは、それら「限界」と思われてきたもの大きさが前記「仮想的な超高密度記憶」が可能な場合として掲げた条件よりもはるかに「緩い」（各サイズが数桁以上大きい）からである<sup>26</sup>。両名共が自然科学分野で博士号を授与されている（KT：理学部化学科→農学生命科学研究科，MT：理学部物理学科→理学系研究科）著者には、例えば

材料物性の物理的限界⇐材料原子（あるいは分子）の大きさ<sup>27</sup>

つまり 1 nm ( $1 \times 10^{-9}$  m) オーダーである、ということは極めて自明<sup>28</sup>であり、この基準を適用すれば「ある技術が真の意味での物理的限界に既に漸近してしまっているのか

<sup>23</sup> もちろん比例縮小のメーカーメリットは、1 枚のシリコン基板(ウエハ)から取得できる LSI 数が格段に増加して、LSI 1 個当たりの製造コストを大幅に下げられることであり、このメーカーメリットが各 LSI メーカーがこぞって比例縮小を進めた(=微細加工技術を自主的に向上させていった)インセンティブである。HDD メーカーにおいても、小型化によって筐体やモーターなどを含む各種機械部品それら自体も小型化されるため、少なくとも筐体の製造に必要な材料の量が減少するはずであり、製造コスト(の少なくとも一部)が小型化によって低減されることは明らかであろう。なお、LSI における MOSFET 比例縮小の影響に関しては、前掲の Y. Taur and T. H. Ning, “Fundamentals of Modern VLSI Devices” 3rd ed. (Cambridge University Press, 2021, ISBN:9781108480024)の第 8 章を参照。比例縮小を行なうと、単位体積当たりの消費電力量が増加してしまう、ということが上記 1974 年に公表された Dennard の原論文に掲載されていることに注目する必要がある(←Dennard は技術者なので、自説の有効性だけではなく、その限界もわかまえることができた、と考えたい)。

<sup>24</sup> より説明を付け加えれば、磁気記憶の面密度の問題やヘッド/プラッタ(磁気ディスク)の加工精度、アクチュエータの位置決め精度などの物理的限界あるいは加工精度などに起因する技術的問題が全く無い、と仮定した上で、あるプラッタ径を用いたハードディスク装置と、それより小さいプラッタを用い、同数のプラッタ枚数とヘッド数で同一容量のハードディスク装置を実現することができたとすれば、プラッタ回転速度とアクチュエータ移動速度が同一であるならば、より小さいプラッタを用いたハードディスク装置の方がプラッタの回転に必要な電力は必ず小さくなり、かつ、ランダムアクセス性能は高くなる(∵ アクチュエータの移動距離が短いから)、という意味である。3.5 インチ HDD→2.5 インチ HDD への完全移行が行なわれていないのは、前記下線部の仮定が成り立たず、消費電力削減というメリットを考えても、アクセス性能が劣る 2.5 インチ HDD に移行するユーザメリットが少なすぎるからである。

<sup>25</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/Disk\\_read-and-write\\_head](https://en.wikipedia.org/wiki/Disk_read-and-write_head)

<sup>26</sup> 現在も主要な HDD メーカーであり続けている Western Digital による面記録密度の簡潔な解説は以下の URL にある：<https://www.westerndigital.co.jp/blog/column65>

<sup>27</sup> もちろん、例えばシリコン結晶の場合の“面方位”などの議論には、複数個の(それぞれ mesoscopic な個数以上の)原子が存在しないと無意味であることは理解している(実際には、“面方位”は macroscopic な視点からの指標であろう)。

<sup>28</sup> この意味で、脚注 12 で言及した IBM が、最小構造サイズが 1 nm に迫ろうかという大きさのコンピュータの基本構成要素の最先端研究を継続しながら(IBM Watson Research)、その一方で原子/分子 1 個を見る手法(例え

否か？」はほとんど直感的に理解できる<sup>29</sup>。文理別学では無いはずの米国で、『技術』経営論を掲げる著名な研究者が『技術』の「物理的限界」への言及を取って行なわない、という事実は、筆者両名がかつて指摘した『知の分断』<sup>30</sup>の一具体例なのかもしれない。

#### 4. 既存技術で実現可能なものを取って捨てることの難しさ

Walkman<sup>31</sup> (SONY が 1979 年に発売した携帯型カセットテーププレーヤー), VHS<sup>32</sup> (Video Home System – 日本ビクターが 1976 年に発売したビデオレコーダーシステム), iMac G3<sup>33</sup> (Apple Computer が 1998 年に発売したディスプレイ一体型コンピュータ), これらに共通するものは何だろうか？

Walkman はカセットテープレコーダーから録音機能を取って外し、カセットテープの再生に特化して現在に続く「携帯型音楽プレーヤー」という新たな市場を確立した。VHS は、SONY が主導するベータマックス規格が実現していた画質を捨てて「3 倍モード」を採り入れることでビデオカセット 1 本に録画できる時間数を最大限に延ばし、結果として (ベータマックスと比較すると低画質ではあったが) 家庭用ビデオレコーダ

---

ば Atomic Force Microscopy) の研究も並行して継続している (IBM Research Zurich) という事実は、最先端科学の地平を拓くことは人類にとって意味がある、という単純な“科学信仰”の視点からのみならず、各種技術の限界を他者よりも先に知ることで、その回避手段あるいは代替手段を他者よりも先に開発し、先行者利益を得る、という実利的な意味があることを IBM (の歴代の経営陣) が熟知していることを明確に表わしていると筆者は考えている。<sup>29</sup> このような「有限の原子サイズ」に起因する「物理的限界」以外にも、材料の比抵抗率のために例えば電気自動車用誘導モーターは 600 V を下回る電圧で駆動しない (←もちろん金や銀の方が比抵抗率は小さいが、材料単価が違いすぎるので、電気配線 (誘導モーター用巻線) としては銅を用いるしか現実的な方法が無く、電圧を下げるのができない (∵ モーターの駆動力を同じにするためには、電圧を下げるのであれば電流を増加させる必要があるが、電流を増加させると電気抵抗による損失が大きくなる←オームの法則 – 『学習指導要領』では中学生が全員学ぶ項目になっている)) とか、SiO<sub>2</sub> を主材料とする光ファイバーを用いた長距離通信では伝送損失の一番少ない 1.55 μm の波長を使用する (一方で、高速通信の場合は分散の小さい 1.3 μm を使用する) (←例えば、[https://tmi.yokogawa.com/jp/library/resources/measurement-tips/mechanism\\_of\\_optical\\_fiber\\_communication\\_and\\_optical\\_spectrum\\_measurement/](https://tmi.yokogawa.com/jp/library/resources/measurement-tips/mechanism_of_optical_fiber_communication_and_optical_spectrum_measurement/)を参照) など、個別の材料に起因する「物理的限界」はそれぞれ限りなく存在するが、それらは個々の物性を知らないとわからない。

<sup>30</sup> 寺内衛・寺内かえで (2022) 『サイエンス・ギルドー知の分断についての一考察 –』 Hirao School of Management Review, Vol.12, pp.1-19.

<sup>31</sup> <https://en.wikipedia.org/wiki/Walkman>

<sup>32</sup> <https://en.wikipedia.org/wiki/VHS>

<sup>33</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/iMac\\_G3](https://en.wikipedia.org/wiki/iMac_G3) それ以前の Macintosh では標準であった各種の外部インターフェースを全て廃止して USB を採用したのみならず、10/100 Base-T イーサネット (ネットワークインターフェース) を標準装備していることに注意。ネットワーク (イーサネット) 越しに各コンピュータを認識して、ユーザの行動を“監視”するためには不可欠の装備である (“監視”できなければ、個々のコンピュータにそのコンピュータ用の updater の配信ができるはずがない)。なお、Microsoft も (特に Windows8 以降の) Windows OS で個人情報収集し、個別の PC に対して更新プログラムを配信するのみならず、その PC を使うユーザが興味を持ちそうな広告を配信したりしている (例えば、<https://faq.nec-lavie.jp/qasearch/1007/doc/answer/image/021/021722/021722w.png> にある「広告識別子」という設定項目; 英語では「Advertising ID」となっている – <https://filestore.community.support.microsoft.com/api/images/164c1edb-59f9-42a8-838f-0035b8d2ef90> –)。

一の標準規格になった。iMac G3は、同年発売のMicrosoftのWindows98が標榜していた拡張性や過去のプログラムとの連続性などを全く無視して（≒捨てて）「**Apple Computerが考える使い方だけでiMacを使う人**」を激増させた<sup>34</sup>。いずれも筆者両名のような技術者（経験者）にとっては“非常に難しい選択（できることを敢えてやらない）”をしたことで、全く新しい市場を開拓したり、業界標準となったり、Apple Computerが“プラットフォーム”<sup>35</sup>（GAFAMのうちの一つ）に成長していくきっかけを作ったものである。それぞれのケースについてChristensenの言説を当てはめようとするならば、Walkmanはまさしく「新市場型破壊（New market disruption）」、VHSは「ローエンド型破壊（Low-end disruption）」である。iMac G3は、コンピュータとしての性能や拡張性という意味では「ローエンド型破壊」に見えるが、それまでコンピュータに見向きもしなかった層にアピールして新規顧客からなる新規市場を立ち上げた<sup>36</sup>という意味では「新市場型破壊」であろう<sup>37</sup>。「新市場型破壊」の実現のためにこそ「単一技術に関与し続けた技術者上がりではない（≒数多くの現場を実際に経験し、複数の技術的視点を持つことができる）経営者」が必要とされる、と筆者は考える。

なお、現在ノートPCを始めとする携帯型（≒電池駆動の）情報処理機器ではSSDが補助記憶装置として主流であるが、SSDは「データ書き換え回数」という指標においてHDDと比較にならないほど劣っている<sup>38</sup>。これは、HDDの場合はプラッタ（磁

<sup>34</sup> 1998年8月の発売以来、2年半ほどで500万台を出荷している

(<https://web.archive.org/web/20010428082358/http://www.apple.com/pr/library/2001/apr/19imac.html>)

<sup>35</sup> 筆者自身も、IT用語辞典(<https://www.sophia-it.com/content/プラットフォーム>)の記述と同様に、プラットフォームの本質は個々のユーザの個人情報収集とその収益源としての活用だと考えている(例えば、個人情報の提供の対価としてGoogleの各種サービスを利用することができる—Google検索が1回の検索ごとに料金を請求するような有料のサービスであったなら、本小論のような文章は執筆できない—)。

<sup>36</sup> Apple Computerを追われたSteve Jobsが創り出した(当時としては最高性能の)high-end workstationであるNeXTcubeやNeXTstationが総計5万台ほどしか出荷されなかった(<https://en.wikipedia.org/wiki/NeXT>)  
ことは上記iMac G3が2年半ほどで500万台出荷されたことと併せて銘記されるべきである。この『NeXTでの失敗(=最高性能を追いかけてもほとんどのユーザはついてこれられない)』が無ければ、iMac G3の成功以降のApple Computerの商品戦略(例えば、iPod shuffleと“Enjoy uncertainty.”というキャッチコピー(<https://www.itmedia.co.jp/lifestyle/articles/0501/21/news104.html>)や、電話には不可欠と思われていた数字キーを含めて全ての物理キーを廃したiPhone(<https://en.wikipedia.org/wiki/IPhone>)などは発想できなかったのではないかと筆者は考えている。ユーザに製品とその『使い方』を提示して、その『使い方』の通りに製品をユーザに使わせる=ユーザが勝手に使用法を創出することは許容しない(←そのため、iOS搭載機種でApple社の意図通りの使い方から外れた使い方をする方法は“jail break”(脱獄)と俗称される—[https://en.wikipedia.org/wiki/IOS\\_jailbreaking](https://en.wikipedia.org/wiki/IOS_jailbreaking))、というようなメーカーは以前には無かったと思われる。

<sup>37</sup> Christensenの主張の正否を確認することがここでの主旨では無い。

<sup>38</sup> SSDの場合には“TBW”(total byte write)という数字を表示している製品があるが、例えば

[https://kakaku.com/pc/ssd/itemlist.aspx?pdf\\_Spec301=960-2000](https://kakaku.com/pc/ssd/itemlist.aspx?pdf_Spec301=960-2000)を見ればわかるように、容量1TBの製品で600TBWであったりする(WDC製WD\_Black SN770 NVMe WDS100T3X0Eなど)。この数字は、1TBのSSD全域での書き換え回数として600回しか保証していない(より極端な表現をすれば、チップ内の書き換え回数が最も多い単位記憶素子での書き換え回数が600回を超えたら、それ以上はデータの完全性を保証しない—実際には、wear leveling技術によって、特定の単位記憶素子だけが他の単位記憶素子より書き換え回数が(例えば)10倍以上多くなってしまふ、という事態は回避するようにはしている—)ことを表わしている。

気記憶媒体)への磁気記憶の書き換え回数に本質的な限界は無く、HDDの寿命が主として機械的な部品(モーターやアクチュエータ)によって決定されるのに対し、SSDの場合はSSDに用いられる不揮発性メモリデバイスそのものが有限のデータ書き換え回数しか保証していない<sup>39</sup>ことに依る。但し、このことは亀甲文字やRosetta Stoneなどの石版、古代のパピルスなどを想起すればすぐに理解できるように「記憶媒体の本来の目的は、刻み込まれた記録を保持し続けること」であって、その「記憶媒体を消去して再利用する」ことが必要な用途は実はあまり多くないので、少なくともSSDの実現並びにその普及を妨げる要因にはなっていない<sup>40</sup>。

## 5. 既存技術に関するもう一つの課題(技術の継承)

<sup>39</sup> 例えば、データ書き換えの際には本来電流が流れないはずの絶縁体に無理矢理高電圧を印加して電子を通過させてそれを蓄積する、というようなことを行なっているため、材料の“疲労”が起こり、あるとき突然“壊れてしまう”(=電子を蓄積しおけなくなる)。清涼飲料などの容器として使われているアルミ缶のプルタブは、飲み口を開けるために引き起こすときに(普通は)缶に付着しているが、引き起こす→戻すという操作を反復すると金属疲労の蓄積で固着部の金属が破壊され、外れてしまう。引き起こす→戻すという操作を何回か反復しないと外れないが、何回反復すれば外れるか(=破壊されるか)?は正確に「○×回」と予測することはできない。但し、1000回反復しても壊れないとは思われないが、2回の反復で壊れるとも思われない。このような「材料(アルミ缶のプルタブの場合はアルミ)の“疲労”による破壊」を想像していただければ、不揮発性メモリデバイスの書き換え回数が本質的に有限であることは理解していただけるものと思う(但し、どのような機構でその回数が決めているのか?は全て理解されているわけでは無い—プルタブでも同様—)。メーカー側では(製品として市販する前に)試作品の読み書き・書き換えを反復して何回の書き換えで“破壊”されるか?についてのデータを多数取得し、ユーザによる通常の使用の範囲では十分に保証できる回数を「データ書き換え可能回数」の仕様(specification)として公表している。

<sup>40</sup> 電氣的に消去可能な不揮発性メモリ(electrically-erasable read-only memory; EEPROM)デバイスは基本的にデータ保持時間も有限であり(詳細は、前掲のY. Taur and T. H. Ning, “Fundamentals of Modern VLSI Devices” 3rd ed. (Cambridge University Press, 2021, ISBN:9781108480024)第12章(Memory devices)を参照)、市販されているものは10年保証であることが多いが、そのEEPROMデバイスが使用される情報処理機器の機器寿命の方が通常は短いので問題にはならない(携帯やスマホの買い換え頻度を想起して欲しい)。実は、書き換え(というより書き込み)回数が1回しか無いのが通常の印刷物すなわち紙の本や新聞・雑誌であるが、2024年の段階では、紙の本の出版業が全て廃れてしまった、という状況には至っていない(日本だけではなく、全世界規模で)。より敷衍すれば、「要求される書き換え回数が少なければ少ないほど、その情報記憶媒体に対する総ニーズは大きい/多数回の書き換えが要求されるデバイスに対する総ニーズ(総情報ビット量)は小さい」という関係が実際に存在するのである(筆者(MT)は、東芝研究開発センターで不揮発性メモリ開発を行っていたチームの隣にあったDRAM開発部隊に在籍していた1990年代始めからこのことを主張し続けてきた)。任天堂の「ファミリーコンピュータ(ファミコン)」のゲーム販売に用いられていた「カセット」内にはハードウェアで情報を固定したROMデバイス(one-time programmable read-only memory)が用いられていて、これは配線層間を繋ぐコンタクトという電氣的な経路をハードウェアとして作るか作らないかで情報を記憶しているので、EEPROMの場合のようにデータが失われることは基本的には起こらないはずであるが、半導体デバイスが実用化されて以来まだ100年を経過していないため、本当に紙の本(特に保存性の高い中性紙を用いたもの)と同等のデータ保持が可能かどうかはわからない(加速試験はしているはずであるが)。市販のCD(compact disc)やDVDなどのプレス工程で作ったものも記憶層が失われる場合があり(実際、個人で購入したクラシック音楽のCDが何枚も読めなくなってしまった—透明になって向こう側が見える状態になっており、どんなCDプレーヤーでも再生できない状態—)、CD-RやDVD-Rなどの追記型光学ディスクはさらに短寿命と言われている。これらも発売から50年程度しか経過していないので、紙の本のデータ保持特性に比肩し得るものなのかは全く未知数である。

これまで筆者は「技術の継続性」についての考察を続けている<sup>41</sup>。前節では既存技術で実現可能なものを敢えて捨てることの（技術者視点から見た）難しさを指摘したが、本節では既存技術についてのもう一つの重要な課題についても言及したい。すなわち、インフラに採用されている既存技術を如何に継承していくか？というものである。

「技術」は文字通り「人」に付いており（属人特性）、新規技術開発はもちろんのこと、その「維持」であったとしてもその維持すべき「技術」を継承する人材育成のために「コスト」が発生する。「新規」技術開発の場合は（破壊的）イノベーションに繋がる可能性が常にある（はず）なので、そこに資本を投入することはまさしく「投資」であり、そのリスクも含めて社会的に受け入れられ易い。一方で、既存技術の「維持」の場合はどうだろうか？

物理的限界あるいは「実現可能な」技術的限界（←例えば、材料の生産能力とその価格との関係で、身の回りの電気配線材料としては（より比抵抗率の低い金ではなくて）銅を使わざるを得ない、といったことも「実現可能な」という視点からは「技術的限界」になっていると考えるべきである）に近接し過ぎたなどの理由によって当該技術の持続的イノベーションがなされ得なくなった場合であっても、ひとたび現代社会のインフラ実現に不可欠となった技術は、たとえ経営者目線／投資家目線からは利を生まないものになってしまったとしても、最低限そのまま（as is で）、可能であれば“その実現に係るコストをより低下させられ得る方法で”継承されていかざるを得ない。高度成長期に大量に作られた橋梁などの老朽化が進み、それらの保守管理が問題になっている今がまさにその「技術継承」を国家政策として行なわなければならないときである<sup>42</sup>。伊勢神宮の式年遷宮<sup>43</sup>のような仕組みを採り入れなければさまざまな技術が失われ、いざ必要となった場合に多大なコストをかけて復活させることが要求されるようになってしまう、と筆者には思われる（しかも、必ずしも全ての技術が復活できることが保証されているわけではない）。

---

<sup>41</sup> 例えば、寺内衛・寺内かえで『教養としての科学—Newton 力学/古典電磁気学/量子力学と「技術」との関係について—』Hirao School of Management Review, Vol.5, pp.25-36 や寺内衛・寺内かえで『“コミュニケートされる情報”という視点から見た「芸術」について』Hirao School of Management Review, Vol.13, pp.35-51 を参照されたい。

<sup>42</sup> 外国人技能実習生の受け入れ拡大などでお茶を濁している場合では全く無い、と強く思う。

<sup>43</sup> <https://ja.wikipedia.org/wiki/神宮式年遷宮> (20年ごとの造営なので、1回目に“見習い”(技術を受け継ぐ側)として参加した職人が、2回目に技術を後進に授与する側として参画できる)

### 参考文献

- 寺内衛・寺内かえで(2009)『“科学”“リテラシー”に関する一考察』「政経研究」No.93 71-78.
- 寺内衛・寺内かえで(2012)『今、知らなければならないこと－被曝の被害と防護をめぐる“科学リテラシー”について－』「政経研究」No.98 78-92.
- 寺内衛・寺内かえで(2015)『教養としての科学－Newton 力学/古典電磁気学/量子力学と「技術」との関連について－』Hirao School of Management Review, Vol.5, pp.25-36.
- 寺内衛・寺内かえで(2021)『今、知らなければならないこと－SARS-CoV-2 感染症(COVID-19 パンデミック)についての基礎知識－』Hirao School of Management Review, Vol.11, pp.101-122.
- 寺内衛・寺内かえで(2022)『サイエンス・ギルド－知の分断についての一考察－』Hirao School of Management Review, Vol.12, pp.1-19.
- 寺内衛・寺内かえで(2023)『“コミュニケーションされる情報”という視点から見た「芸術」について』Hirao School of Management Review, Vol.13, pp.35-51.