

研究ノート 技術の生態系から生まれるイノベーション：ハーバー・ボッシュ法の考察

キヤノングローバル戦略研究所 堅田元喜

要旨

地球温暖化問題の解決にはイノベーション（新規の、もしくは既存の知識・資源・設備などの新しい結合；Schumpeter, 1934）が欠かせないとされている。イノベーションを予測することは高度なシミュレーション技術をもってしても不可能に近いが、経験的にはその本質や法則が明らかにされている。このことをわかりやすく解説した書籍（マット・リドレー，2021）が2021年3月に出版された。史上最も重要なイノベーションの候補ともいわれるハーバー・ボッシュ法（窒素化学肥料の合成）はどのような原理で生まれ、人間や生態系にどのような影響を及ぼしたのだろうか。

目次

1. イノベーションの本質と法則	1
2. ハーバー・ボッシュ法を生み出した技術の生態系	5
3. ハーバー・ボッシュ法は食料確保と生態系保全を同時に達成した	7
文献	9

1. イノベーションの本質と法則

イノベーションとは、「エネルギーを利用してありえないものをつくり、つくられたものが広まるのを確かめるための新たな方法を見つけること」を意味する（マット・リドレー，2021「はじめに」）。いわゆる「発明」と異なる点は、そこから一歩進んだ「発明が定着する」ところまでを含む点である。最も影響力の大きい新技術はたいてい地味で安く、人々が当たり前と思っている単純だが必要不可欠なものである（トイレットペーパー原

理：マット・リドレー，2021「286 ページ」)。例えば、1990年代の携帯電話の普及は、物理学やテクノロジーの特定の躍進ではなく、突然の価格下落でもたらされた。この功績は、コストを抑えて製品を簡素化する方法を見つけた人々にある。

携帯電話のような過去のイノベーション事例を集めて分析すると、下記のいくつかの法則を導き出すことができる（マット・リドレー，2021）。その法則の最も根本的な部分は(1)の「生物の進化との類似性」、すなわち「複雑系理論」であり、そこから(2)以降の法則が派生している：

- (1) あらゆるアイデアや技術は、他のアイデアや技術の組み合わせでできる（第8章）。そのプロセスは「テクノロジーの進化」であり、複雑性や多様性を増し、個別化し、相互に結びつきあい、一般化し、遍在化し、感受性を持つ「生物の進化」に似ている（ブライアン・アーサー，2011；ケヴィン・ケリー，2014；杉山，2018）。したがって、新しい技術が生まれるには先行する周辺技術の蓄積が必要不可欠である（隣接可能性；スチュアート・カウフマン，2002）。
- (2) イノベーションは、科学より先に生まれる。世間一般に広く受け入れられている「科学がテクノロジーを生み出し、イノベーションにつながる」という考え方（線形モデル）はほとんどあてはまらない（第9章）。
- (3) イノベーションは突然のひらめきで起こるものではなく、ときには数10年以上の間をかけて緩やかに起こる（第8章）。「ムーアの法則（後のインテル創業者の一人であるゴードン・ムーアによる半導体業界の経験則）」の通り、約50年の間半導体チップ上の部品数は、1年半から2年ごとに2倍の速度でほとんど変わることなく増加し続けた（図1、第6章）。
- (4) イノベーションは、もともと探していなかったものを偶然に深い洞察力によって意図せず発見する「幸運な偶然（セレンディピティ）」によって起こる（第8章）。

- (5) イノベーションは、対象となる物事をとにかく試し、失敗する「試行錯誤」によって起こる（第8章）。
- (6) イノベーションは「協力」と「共有」を必要とし、大勢の当事者がアイデアを自由に共有できる集団的研究開発によって進歩する（第8章）。
- (7) イノベーションは、異なる大陸で別々に、複数の箇所で、しかも同時期に起こる（同時発明・多重発生；Ogburn and Thomas, 1922）。特定の偉大な発明家が存在しなかったとしても、隣接可能性【法則(1)】さえ満たされていれば同時発明は起こりうる（第8章）。
- (8) 人々は、イノベーションの影響を短期的には過大評価し、長期的には過小評価する傾向にある（アマラ・ハイプサイクル：第6章 304 ページ）。イノベーションの価値が人々に正しく理解されるタイミングは、およそ 15 年目であると言われている（第6章）。
- (9) イノベーションは、試行錯誤【法則(5)】を許さない中央集権の政府や帝国では生まれにくい（第8章）。むしろ政府が積極的にテクノロジーの邪魔をすることも多い（第9章）。
- (10) イノベーションは、都市（小国家、特に自治都市）で起こりやすい。
- (11) イノベーションを計画的に起こすのは難しく、「生物の進化」と同じように【法則(1)】、いつどのように起こるかを予測することは不可能に近い（第8章）。
- (12) イノベーションは節約を推進し、生産性を高める。その結果、より少ない資源で同じ量の物を生産し生活水準をさらに高める「持続可能な成長」を実現することができる（脱物質化：第8章 312 ページ）。

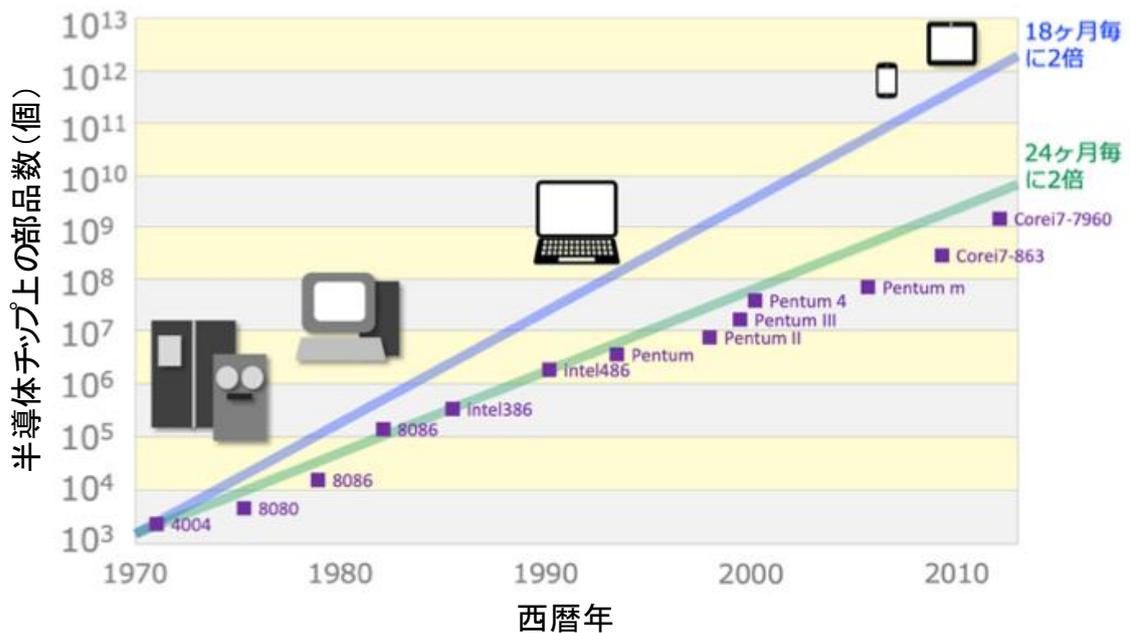


図1 1970年以降の半導体チップ上の部品数の長期変化とムーアの法則で予想された開発の速度（緑線・青線）

(<https://blogs.itmedia.co.jp/itsolutionjuku/7fe6f3327c78ba2a450fb9358dbc469a8c4eabfc.png>)。

以上の法則は、イノベーションが「自由」から生まれるということを示唆している。イノベーションは、アイデアが会って「つがう」ことができるとき、実験が奨励される時、人と物が自由に動ける時、新しい概念に向かってお金が流れていくとき、投資する人たちが自分への見返りを確信できる時などに起こるのである。現在、欧米や日本は期待するほどの経済成長が実現できない「イノベーション欠乏」という問題を抱えているが、その原因は企業や政府による管理主義が蔓延して「自由」が奪われているためである。知的財産権や業務独占資格、政府補助金などによって市場の参入障壁が高まることで新規事業は減少し、トップ企業による利益の独占が進む（マット・リドレー、2021「第11章」）。そうすると、企業の管理主義の圧力は市場で競争するより容易な統制する方向に働く。その結果、欧米や日本ではイノベーションを生み出す能力が衰えており、所得が伸

び悩み、社会的流動性に有利な条件が枯渇してしまっている（マット・リドレー，2021「第12章」）。

2. ハーバー・ボッシュ法を生み出した技術の生態系

イノベーションの本質とは、それ自身が生態系（テクニウム；ケヴィン・ケリー，2014）として創発的に進化するというところにある。例えば、植物の進化の過程に見られる複雑化や多様化は、時間とともに数え切れないほどの携帯電話が生まれたプロセスに類似している（図2）。携帯電話の開発には、携帯電話とは直接関係のない既往の様々な個別技術が不可欠であった。この「テクノロジーの進化」【法則(1)】は、地球環境問題とも関連が深いハーバー・ボッシュ法が生まれる過程にもよく当てはまる（マット・リドレー，2021「第4章」）。

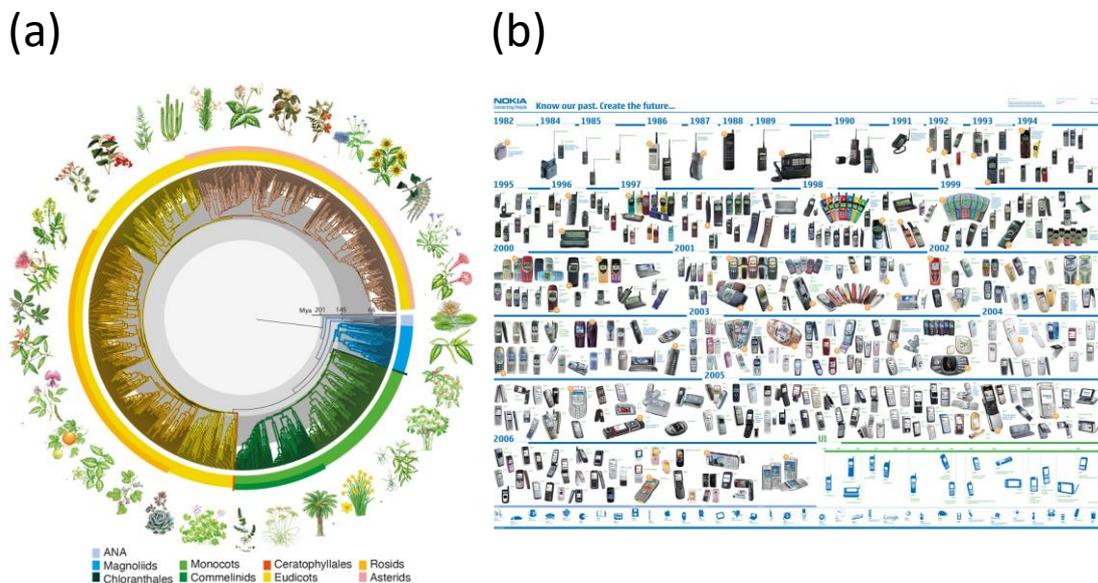
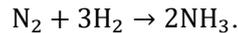


図 2(a)世界の被子植物全 435 科の完全な系統樹（Ramírez-Barahona et al., 2020）と

(b)1982 年以降にフィンランドの Nokia 社が開発した携帯電話の年表

(<http://dotplace.jp/archives/13230>)。

ハーバー・ボッシュ法とは、1908年にドイツ出身の化学者フリッツ・ハーバーが鉄を主体とした触媒上で水素 H_2 と窒素 N_2 を $400\sim 600^\circ C$ 、 $200\sim 1000$ 気圧下の超臨界流体状態で直接反応させてアンモニア (NH_3) を生産する方法である。この反応を化学反応式で表すと、次のようになる：



科学者であるハーバーは、圧力をかけながら触媒存在下で水素 H_2 と反応させる実験を行い、空気中の窒素 N_2 を固定してアンモニアを作る方法を発見した。これは事実上「空気からパンを作る」ことに相当する大変な難題であった（マツ・リドレー，2021「146ページ」）。この「発明」そのものはすばらしいが、これだけではイノベーションには至らない。最終的に社会が許容できる価格でアンモニアの大量生産を可能にしたのは、ハーバーのひらめきを得る期間よりもはるかに長い時間をかけたカール・ボッシュ（実業家）による地道な創意工夫であった。以下では、前章で示したイノベーションの法則と対応づけながら、その歴史を振り返る。

1908年以降、ハーバーの弟子のロバート・ロシニョールと留学生であった田丸節郎は、硬い石英をくり抜いてつくった容器（チャンバー）の中で、高い圧力をかけて材料を結合する方法を段階的に見出した。画期的発明の瞬間があったわけではなく、小さな改良と少しずつの進歩が繰り返し積み重なっただけである【法則(3)，(5)】。そして1909年3月、2年間の実験の末、ハーバーのチームはオスミウム触媒を用いた実験で装置から液体アンモニアがしたたるのを見出した。なぜオスミウムでうまくいくのかはわからなかったが、とにかくうまくいった【法則(2)】。ハーバーは、ドイツの巨大化学薬品会社 BASF に対して自分のアイデアを本格化するように提案し、当時 BASF の窒素研究の責任者になっていたボッシュは、それから数年かけて実用的なイノベーションに変えた。新しい触媒を用いることができるとともに、様々な材料を高圧下で実験することができる装置を用意し、1909年末までに2万種類もの材料を試して、鉄・アルミニウム・カルシウムの混合物が

適切であることを明らかにした【法則(5)】。これは技術的に大変難しい課題であったが、その他にも膨大な数の難題があり、いずれも他の業界で展開中だった新しいアイデアや技術群を利用できなければ克服することは不可能であった【法則(1)】。ボッシュのチームは設計のヒントを求めて、機関車、ガソリンエンジン、ディーゼルエンジンなどを調べ、鉄鋼業界の人たちから製鋼法を学び、大砲の設計や材料工学の最前線の知見を収集した【法則(6)】。この過程で「技術の生態系」が時間をかけて進化していった結果、1911年にはアンモニアを生産する試作機ができあがった。

1914年に勃発した第1次世界大戦の後、ハーバー・ボッシュ法によって合成肥料が生み出され、世界中に普及して農地に栄養分を大規模に供給できるようになった。そして同時期に誕生した別のイノベーション（農業の機械化、新品種、殺虫剤、遺伝子組み換え）とともに、1960年から1970年代にかけての世界での穀物の大量生産（緑の革命）を引き起こした。現在では、ボッシュの時代の3分の1のエネルギーで1トンのアンモニアを作ることができ、世界の人類のエネルギー消費量の約1%が窒素固定に使われ、それが平均的な人間の食料に含まれる固定窒素原子の約半分を提供している。

3. ハーバー・ボッシュ法は食料確保と生態系保全を同時に達成した

「緑の革命」の結果、1960年から2010年の間に一定量の食料を生産するのに必要な農地面積は65%も減少し、地球上から飢饉がほぼ完全に消えて、栄養失調も劇的に減った。しかしながら、これらの改善は自然環境を犠牲にして実現したのではないかと心配する声が多いという。本当にそうなのだろうか？

実際には、ハーバー・ボッシュ法の普及は自然生態系にとっては「恩恵」である。合成肥料が誕生したおかげで作物の生産力が向上し、農業のための土地開発は必要なくなった。世界の人口は20世紀の100年間でほぼ4倍に増えたので、これを合成肥料なしで養うためにあらゆる土地を耕して、あらゆる森林を伐採し、湿地を干拓していた可能性が高

く、それでも飢餓寸前であったと思われる (Crookes, 1898)。すなわち、「緑の革命」によって世界の多くの土地や森が耕起や放牧、伐採を免れた (堅田, 2020 による解説)。イノベーションを進めれば、耕す土地をはるかに少なくし、国立公園や自然保護区を拡大して、土地を森林や手付かずの自然に戻し、花や鳥やチョウのために管理する土地を増やすことができるということである。

その一方で、社会や生態系への悪影響が全くなかったわけではない。「硝石の約束」により工場でアンモニアから爆薬の製造の原料となる大量の硝酸塩をつくり、そうすることでおそらく戦争を長引かせた (マット・リドレー, 2021 「151 ページ」)。別の問題として、肥料散布などで環境中に放出された大量のアンモニアや硝酸塩が作物に吸収されず、地下水の水質汚染や長寿命の温室効果ガスの 1 つである亜酸化窒素 (N_2O) の発生などの「窒素汚染」も起こっている。わが国でも、農業革命以降に環境中の窒素の量がどのように変化してきたかを明らかにする実態調査が進んでいる (Hayashi et al, 2021)。

この新たな問題に対しても、新しいイノベーションが活躍しそうである。窒素汚染は、投入する肥料を適切に制御することで減らすことができる。例えば、人工知能 (Artificial Intelligence : AI) を利用した「精密農業」の普及が進むと、投入する肥料の量を最適化して窒素汚染を防ぎつつ、エネルギーや資源の利用効率も高めることができるであろう (Brown et al., 2016)。また、窒素固定をするサトウキビやサツマイモ内に共生する細菌 (エンドファイト) を採取し、コムギ・トウモロコシ・イネ・ジャガイモ・茶・アブラナ・牧草・トマトなどの多様な作物の細胞内に生息させることで収量が増加することも明らかになりつつある (Dent and Cocking, 2017)。それとは別に、生物的硝化抑制 (BNI) 物質を精製・同定する技術の開発も進んでいる (Subbarao and Searchinger, 2021)。品種改良により BNI が導入された作物が広く栽培されれば N_2O の発生抑制のみならず肥料を節約できる。これらの方法によって窒素汚染の低減と窒素利用効率の向上を同時に達成することができれば、ハーバー・ボッシュ法を超えることもできそうである。

そのためには、政府は規制などでイノベーションの邪魔をすることなく、試行錯誤や失敗を許す政策を推進すべきである【法則(9)】。

ところで、BNI 技術も 1970～1980 年代に観察されていた現象であるが、当時はメカニズムが不明であったものの、国際農研が 1995 年から研究を開始し、2003 年に科学的裏付けが明らかになった（国際農林水産業研究センター，2021）。このように科学的背景が明らかでないまま 30 年かけてゆっくりと普及が進んできたという事実も、やはりイノベーションの法則に当てはまる【法則(2), (3)】。

文献

Brown, R.M., Dillon, C.R., Schieffer, J. and Shockley, J.M. (2016) The carbon footprint and economic impact of precision agriculture technology on a corn and soybean farm, *Journal of Environmental Economics and Policy*, 5, 335-348.

Dent, D. and Cocking, E. (2017) Establishing symbiotic nitrogen fixation in cereals and other non-legume crops: The Greener Nitrogen Revolution, *Agriculture and Food Security*, 6, 7. <https://doi.org/10.1186/s40066-016-0084-2>

Hayashi, K., Shibata, H., Oita, A., Nishina, K., Ito, A., Katagiri, K., Shindo, J., and Winiwarter, W. (2021) Nitrogen budgets in Japan from 2000 to 2015: Decreasing trend of nitrogen loss to the environment and the challenge to further reduce nitrogen waste, *Environmental Pollution*, 286, 10, 117559.

Ogburn, W. F. and Thomas, D. S. (1922) Are Innovations Inevitable?, *Political Science Quarterly*, 37, 83-98.

Ramírez-Barahona, S., Sauquet, H., and Magallón, S. (2020) The delayed and geographically heterogeneous diversification of flowering plant families. *Nature Ecology and Evolution*, 4, 1232–1238.

Subbarao, G. V. and Searchinger, T. D. (2021) Opinion: A "more ammonium solution" to mitigate nitrogen pollution and boost crop yields, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 118, 22, e2107576118.

Schumpeter, J. A. (1934) *The Theory of Economic Development*, Harvard University Press, Cambridge, MA, 255pp.

<https://www.hup.harvard.edu/catalog.php?isbn=9780674879904>

Crookes, W. (1898) Address of the President Before the British Association for the Advancement of Science, *Science*, 8, 200, 561-575

堅田元喜 (2020) 化石燃料は陸上生物の生息域の保全に役立っている, 国際環境経済研究所ホームページ. <https://ieei.or.jp/2020/12/expl201214/>

ケヴィン・ケリー (2014) テクニウム—テクノロジーはどこへ向かうのか?, みすず書房, 456pp.

国際農林水産業研究センター (2021) 窒素汚染と食料増産への解決策「アンモニウムの活用」— 硝化の制御で窒素汚染と食料増産を図る生産システムを —

<https://www.jircas.go.jp/ja/release/2021/press202103>

杉山大志 (2018) 地球温暖化問題の探究, デジタルパブリッシングサービス, 365pp.

スチュアート・カウフマン (2002) カウフマン、生命と宇宙を語る—複雑系からみた進化の仕組み, 日本経済新聞出版, 461pp.

ブライアン・アーサー (2011) テクノロジーとイノベーション— 進化/生成の理論, みすず書房, 312pp.

マット・リドレー (2021) 人類とイノベーション: 世界は「自由」と「失敗」で進化する, NewsPicks パブリッシング, 464pp.