天然ゴム産生植物の新たな可能性について（前編）

こうじや信三

On the Renewed Possibility of Natural Rubber Yielding Plants (Part I)

Shinzo KOHJIYA (7-506, Ohnawaba-cho 6, Umezu, Ukyo-ku, Kyoto 615-0925, Japan)

It has been known that lots of plants are rubber yielding besides *Hevea brasiliensis*. However, only *Hevea brasiliensis* has been actively cultivated to produce rubber. Recently, studies on rubber yielding plants have been resumed by some reasons; biodiversity, biosecurity and the increasing demand for natural rubber, to name a few. This recent trend is reviewed and discussed from the sustainability viewpoint in this report. In the first part, biodiversity is developed in relation with sustainable development thesis, and general features of rubber yielding plants are described with their historical backgrounds.

(Received on August 19, 2014)

Key Words : Biodiversity, Goldenrods, Guayule, *Hevea brasiliensis*, Kok-saghyz, South American Leaf Blight, Strain-induced Crystallization, Sustainable Development

1. ま え が き

天然ゴム（NR）は、南・北アメリカ大陸において人類が古くから利用してきた材料であり移植によってアジアで栽培され、そのユニークな弾性が空気圧入タイヤとして実用化されて後、現代社会にとって世界中の交通網を支える必須の材料となっている^{1, 2)}。米国の著名な植物学者がヘベア樹の論文³⁾の冒頭に記載した次の文章は、この事情を簡潔かつ的確に伝えている：

“Few economic plants have been more deeply affected civilization than Para rubber tree, *Hevea brasiliensis*, the product of which has made possible present-day transportation and much of modern industry and technology. Furthermore, this tropical tree represents one of the man's most recently domesticated plants.”

歴史的およびヘベア樹の病理学的事情から^{1, 4)}、現在使用されているNRの98%以上はアジアで採培されているヘベア樹（*Hevea brasiliensis*）から採取されたものであり、主に野生のゴム産生樹（*Hevea* 属の *brasiliensis* を含む各種の他に、Castilloa, Ceara, Guayule, *Landorpha* など）由来の、南・北アメリカ、アフリカなどからのNRは1%程

度と推定されている。しかも栽培ヘベア樹はそのほぼすべてが、ウィッカムがアマゾンのタパジヨス河左岸で採取したものの（ウィッカム樹）の子孫であり^{1, 4)}、遺伝子の多様性から見て大きな問題点と指摘されてきた^{4, 5)}。ウィッカム樹は雑種に過ぎないとの議論もあったが、野生ヘベア樹は数十～百メートルごとに孤立して育っており、種の特性からも交雑の可能性は小さいとされる^{3, 6)}。したがって生物多様性（biodiversity）の観点から、*Hevea brasiliensis* 以外のNR産出植物の検討はいまも重要課題の一つとして残されている。

この観点はさらに、生物多様性を含むより一般的な持続的発展（Sustainable Development, SD）の立場からも支持される。SDについては既によく知られているが⁷⁾、この概念の実際的な適用に当たって相対的なインパクト因子

こうじや信三；京都大学名誉教授，〒615-0925 京都市右京区梅津大縄場町6ARH7-506。1969年（昭和44年）京都大学大学院博士課程中退，同年京都工芸繊維大学工学部助手，同助教授を経て1991年同教授。1993年京都大学化学研究所へ転任，2006年京都大学名誉教授。2006年マプア工科大学（フィリピン），2006年～9年マヒドン大学理学部（タイ王国）客員教授。専門はゴム材料科学。日本ゴム協会元会長。

(S_i)^{4, 8)}によって理解を深めておくことが大切である。すなわち、 S_i は環境への負荷を評価するパラメータであり、人口(P)と総エネルギー消費(E)に比例(P, E が大きいと S_i も大きい)すると考えられる。したがって、

$$S_i = P \times (GDP/P) \times (E/GDP) \quad (1)$$

が成立する。ここでGDPは総生産量(gross domestic product)であり、 GDP/P と E/GDP はそれぞれ一人当たりの生産量とGDP当たりのエネルギー消費である。前者は生活水準、後者はエネルギー効率の逆数に関係する。炭酸ガスが環境負荷を増大させることは、今では広く認められている。その濃度(CO_2)を考慮すると茅の式として知られている式(2)が導入される。

$$S_i = P \times (GDP/P) \times (E/GDP) \times (CO_2/E) \quad (2)$$

定性的にこれらの式が意味するところは明らかであろう。さらに、負荷となる因子すべてを同様に考慮すると、一般式として

$$S_i = [P \times (GDP/P) \times (E/GDP)] [\sum W_i(t) (A_i(E)/E)] \quad (3)$$

が導出される。 $W_i(t)$ はある時間 t における i 番目の負荷因子の重みであり、 $A_i(E)$ はエネルギーを消費する i 番目の因子である。ここで i は1から n (負荷因子の総数)で、 Σ はその総和である。SDを議論する際には式(3)において設定される項が、人口、エネルギー消費あるいは CO_2 濃度などどう関係するのかを示さなければならない。例えば、日常的に実践可能なSDにフードマイレージ⁹⁾がある。これは食生活において日常的に出会う因子で、できるだけ地元産の食材を地元で利用すること(地産地消)は、食材の運送に要するエネルギーを減少させる効果があり $W_i(t)$ を考慮した(経済学におけるこの点のアプローチは、まだ十分に定量的ではない)うえで、 S_i を可能な限り低くするSDの主旨にかなっている。生物の多様性を維持し発展させることは、長期的にはSDの重要な一構成部分でもある。

ヘベア(*Hevea brasiliensis*)に特異的な第二の理由は、南アメリカ枯葉病(South American Leaf Blight, SALB)に対する病理学的に有効な対策が未だ無いことである。これはヘベアの実産地アマゾンの風土病であり、アマゾンでのヘベア・プランテーションの経営は成功せず^{1, 4)}、アジアにおけるそれは検疫によりSALBの侵入を阻止する努力に頼っている。筆者はこの問題点をBiosafetyとして提起した^{1, 2)}が、FAO(国連のFood and Agricultural Organization)がBiosecurityとして同様の概念をすでに提案していた¹⁰⁾ことを知り、近著⁴⁾ではBiosecurityとして記述した。航空機によってアマゾンのジャングルからアジアのNR産出国への移動は2日以内で可能となった今も、SALBの病原菌(*Microcyclus ulei*)を検疫に頼って南ア

リカ大陸に閉じ込めており、現在までこの「封じ込め」が成功しているのは奇跡的幸運と言うべきであろう。病原菌のアジアへの侵入阻止対策として検疫体制を維持・強化しつつも、ヘベア以外のNR産生植物の可能性の検討は避けられない課題である。さらに、使用者の側での病理学的問題として、NRラテックス中のタンパク質成分によるとされるアレルギー問題がある²⁾。文献2の第1章の著者Prof. Cornishと京都で行ったこの問題についての討論(2013年3月)は、筆者がこの資料の作成を考えるきっかけを与えてくれた。

第三に、化学者にとって「残念なことに」と言うべきであるが、NRの完全化学合成は未だ達成されていない^{1, 2, 4)}。合成天然ゴム(IR)は、重要な戦略物質であるNRを輸入に頼っているロシアにおいてタイヤ用に量産されているが、NRの代用というべき位置づけである。NRと比較して、後に述べる伸長結晶化能力が劣り、グリーン強度などの物性が不十分とされる。またIRでは将来の石油枯渇の事態を越えることは不可能である。

以上の状況から、「天然ゴム産生植物の新たな可能性」が課題として近い将来に(過去にも同様の動きがあったから、「再び」をつけるべきかもしれない)ゴム関係者にのしかかる可能性は否定できず、そのための調査と対策の検討は急がねばならない。本資料がその再スタートにいささかでも役立つことを願っている。

2. 天然ゴム：ユニークなバイオポリマー

2.1 バイオポリマーとしての天然ゴム

数あるバイオポリマー(生体高分子)の中でNRの最大の特徴は、ゴム分子が炭素と水素以外の元素を含まないこと、すなわちNRは唯一炭化水素の生体高分子である^{註1)}。Table 1に生きている植物の平均元素組成(重量%)を海水のそれと比較して示す。

Table 1は海水中で誕生した生命が、海水の成分を選択的に取り込みながら進化してきたことを示唆している。当然、含有水分を除いたバイオポリマーは通常CとHの他にO, N, P, Sなどの元素、そして微量の金属イオンなどを(不純物による物理的混合ではなく、共有結合あるいは配位結合によって)含んでいる。むしろ、生命の活動(機能の発現)にはそれら少量の多種の元素が中心的役割を担っている。

生体でのCとHのみから成るゴム分子の存在は、「何故、

註1) 植物由来の低分子炭化水素は知られているが、高分子のそれは知られていない。最も近いのは高級炭化水素であろう。*Botryococcus braunii*は微細緑藻類の一種で、C34-C37の高級炭化水素産生藻として古くから知られている¹¹⁾。(文献11はラテン語本でありネット上でアクセスできる。出版社の所在地Lipsiaeは現在のLipzigである。)石油枯渇後のエネルギー及び工業原料の最有力候補として、活発な研究・開発が世界中で行われている。日本では、筑波大の渡邊信先生、東京大の岡田茂先生などが世界的にも評価される研究を推進されており、コロニーを形成するから「植物工場」的な生産が可能とされる。

Table 1 Average elemental composition (in weight %) of living plants. Seawater is included for comparison*

Element	O	H	C	N	P	Si	Mn	Ca	Mg	Cl	Na	Fe	S
Plants	79.0	10.0	3.0	0.3	0.3	0.15	0.12	0.1	0.08	0.07	0.03	0.02	0.01
Seawater	85.8	10.7	0.003	5×10^{-5}	0.04	3×10^{-4}	2×10^{-7}	0.05	0.15	2.07	1.9	1×10^{-6}	0.05

*Adapted from Table 10.2 in Ref. 12.

ある種の植物は炭化水素ポリマーを生合成しているのか？」の疑問を惹起（じゃっき）する。ヘベア樹においてゴム分子が生理学的な機能を発揮していないことは、多くの植物学・生化学・生理学者の認めるところである^{1, 4)}。後述のkok-saghyzについて1930年代初期から研究を行ってきた植物学者も、その根に存在するゴムは何の栄養分にもなっていないと結論している¹³⁾。通俗的な、場合によって目的論的な「回答・説明」の類は多数あるが、科学的と評価できる回答は未だ提案されていない。現時点では、「生体に重要な生理活性をもつ環状イソプレノイドの生合成反応途上で、偶然に起こった非活性直鎖状ポリマーへの反応経路が、いくつかの植物では遺伝子的に固定化されてしまった」と、中立的に生物進化の結果を追認するしかない。

2.2 天然ゴムのユニークさ

合成ゴムが戦略的必要性から第二次世界大戦中に量産され、戦後それらが民生用途に進出しさらに新しい合成ゴムが開発され工業化されるなかで、多くのゴム関係者が「いずれ合成ゴムがNRに全面的にとって代わる」と考えていた時代があった。筆者が山下晋三先生の下で、本格的なゴム研究をスタートしたのは1969年であったが、1960年頃から70年代を通じて多数派の意見であった。2013年12月バンコックで開催されたラバコンで、年配のイギリス人研究者が、未だに「NRは合成ゴムの補完材料だ」と主張するのを聞き、あきれかえって反論する意欲も無くした経験がある。一部ではまだ「亡霊」が健在なのだ。

1および2. 1に述べた以外のNRの特徴を列挙すると、次のようになる^{1, 2, 4)}：

- (1) NRは数あるゴム材料の中で、唯一のバイオマスである。
- (2) バイオマスとして、NRは勿論再生可能（renewable）であり、生合成における炭素源は炭酸ガスであるからカーボン・ニュートラルでもある。したがって、NRは石炭・石油枯渇後も利用可能で、全地球的な温暖化には寄与しない。
- (3) 歴史的に見て、多くの汎用天然材料は化学合成品によって世界市場から駆逐されていった。（化学合成されたインジゴによる、インドの天然染料藍栽培の激減はその始まりであった。）NRはモノカルチャー^{註2)}による農業的量産技術と、当時の合成ゴム（ドイツのメチルゴム）を大きく凌駕する加工性および力学的特性によって化学合成品に圧勝した、歴史上数少ない例である^{1, 4)}。
- (4) NRのみならずゴムの示す弾性は、熱力学的にエント

ロピー起源である¹⁵⁾。エントロピーはボルツマンの式を通じて統計熱力学の理解に必須であり¹⁶⁾、また「生命とは何か？」を考える手がかりを与えてくれる¹⁷⁾。波動方程式の提唱者シュレーディンガーによる文献17は20世紀後半の分子生物学・生物物理学の先導役を果たした書である。彼はウィーン大学でボルツマンの講義を受けた最後の学生であった。さらに驚くべきことに、情報科学・情報工学の理解にもエントロピーは欠かせない^{1, 4, 18, 19)}。エントロピーの学習が、ゴムの理解に必須であることを、再確認しておこう。

(5) NRと気体（ゴムと同じくエントロピー弾性を示す！）の組み合わせはトムソンによるニューマチックタイヤの発明をもたらした（1854年、スコットランド人トムソンのアイデアであった。ダンロップは再発明者である^{1, 4)}）。自動車と路面との界面で支えて安全・快適な運動を可能として、現代の交通化社会を牽引している。交通技術史上、車輪の発明に並ぶ大きな意義をもった発明と評価される。

さらに、NRの伸長結晶化は構造・物性面での最大の特徴であり、それを次節に述べる。

2.3 天然ゴムに最も特徴的な挙動：伸長結晶化

NRが航空機など重量級ゴムタイヤ、あるいはアレルギーの問題がありながら手術用手袋などのラテックス製品の主原料として必須なのは、その優れた諸物性に依る。その背景にあって最も特徴的な性質は、アモルファス材料であるNRの可逆的な伸長結晶化（Strain- Induced Crystallization, SIC）である²⁾。この挙動は古くに報告されたが²⁰⁾、その詳細が時分割X線回折測定によって解明されつつあるので、原報²¹⁻³⁰⁾ および総説^{2, 31, 32)}を参照いただきたい。NRのSICが高分子の結晶化一般と際立って異なる点は、外部場（応力）の印加への極めて迅速な応答（ミリ秒のオーダー）であり、その高速性の故に時分割測定は最新のシンクロト

註2) 単一作物栽培と訳される。経済学分野では「国の経済が単一または少数の種類生産物とその輸出に依存すること」と拡張される場合もあるが、ここでは農業栽培について用いている。植民地において経済的強制により実施され失敗した例も多いが、NRの栽培化は資本主義経済の発展の中でもたらされ、植民地経済の半近代化と世界経済に貢献した。（野生樹からの採取のみでは重商主義レベルに留まり、通例資本主義経済の展開には寄与しない。工業でいえば、いわゆるマニユファクチャー段階であり、本格的な工場の発展の前段階である。）今なお深刻な問題である「豊かな資源をもつ」開発途上国の経済的低迷は¹⁴⁾、原材料の輸出のみに依存する前資本主義的な政治・経済体制がもたらしたものであり、これをモノカルチャーの問題とするのはレッテルの張り間違いであろう。また、先進国の立場から「全世界的必要性に依る」として、例えば広大な砂漠を太陽光パネルで覆って電力を供給しようとするプロジェクトなどが、大真面目に考えられ莫大な資金が投入されようとしている。高度な資本主義の国際化の一例ではあるが、アフリカの貧しい国々の健全な経済発展に寄与するとは思えない。SDの政治経済的定義とその内容について、さらなる深化・進化が求められている。

ロン施設の利用によって初めて可能となった。

NRの他にも、クロロプレン (CR)、ブチルゴム (IIR)、高シスブタジエンゴム (BR)、ニトリルゴム (NBR；高ニトリル) などSIC挙動を示す。これらのゴムのSICについてさらに詳細な研究が望まれる。しかし、NRの大きな伸びを考え合わせると、それらがNRに見られるレベル以上のSIC挙動を示すとは考えられない。むしろ技術面から加工と力学特性に関連して、NR生ゴムのグリーン強度やタックとSICの関係の究明がより緊急な課題であろう。

NR分子 (シス-1,4-ポリイソプレン) の100%とみなせる立体規則性^{註3)} の故に³³⁾、静的条件下でも結晶化が可能である。いわゆるNRの低温結晶化^{34, 35)} がそれであるが、低温結晶化の速度は、最大とされるマイナス20℃³⁶⁾ でもSICと比べて桁違いに小さい (生ゴムで数時間から数か月、加硫NRでは数年にも及ぶ)。核生成による結晶化の一般論によってNRの低温結晶化は解釈できても、SICには必ずしも適さないことに注意を払う必要がある。

2.4 ヘベア由来天然ゴムの問題点

以上の記述から、ヘベア樹からのNRの問題点も明らかであろう。まとめると、

- (1) 広くはSDの、絞れば生物多様性の立場からヘベア樹以外のNR産生植物の再検討が望まれる。
- (2) Biosecurityの観点からより安全なSALB対策として、検疫の強化に留まらず他の植物のNR生産可能性を再検討する必要がある。
- (3) NRラテックスによるアレルギーの根本的な解決法は、活性ポリペプチド組成がヘベアと異なる植物資源を検討することである²⁾。SALBの場合と同じく、ヘベアについて抜本的な対策は困難で、「対症療法」に頼らざるを得ないのが現実である。

世界的な交通化社会の浸透は、軍事用を合わせて (不幸なことだが現実である) NRの需要を増々高め、アジアにおけるヘベア栽培の拡大をもたらしている。中国の雲南省はヘベア栽培の北限に位置するが、国策によって1956年頃からモノカルチャー方式による栽培が漢民族の移住を伴って推進された^{37, 38)}。NR栽培による熱帯林破壊の最近の実例であり、SDの観点から次の課題が浮かび上がる：

- (4) モノカルチャー方式によらずに量産が可能な、ゴム産生植物の新しい栽培方法が求められている⁴⁾。

註3) NR分子 (シス-1,4-ポリイソプレン) の立体規則性は100%とみなせる。生体中での酵素 (ポリメラーゼ) による重縮合反応はシス-1,4付加であり、トランス構造は開始末端の3個 (ここで「個」はモノマー単位を意味する。植物種によって2個の可能性もある) だけである。鎖末端のトランス構造はポリメラーゼの付加反応の始まりを告げるトリガーと考えられ、ゴム分子内部はすべてシス-1,4構造となっている。すなわち、重合度が千であれば、末端の3個を除いて997個のシス-1,4連鎖が存在する。重合触媒による場合、連鎖は統計的に分布するから3個のトランス構造の存在 (0.3%) はシスの連鎖長を $997/4 = 249$ と激減させる。合成天然ゴムとも呼ばれるIRは96%の立体規則性であって、連鎖長は $960/41 = 23.4$ となる。この立体規則性連鎖長の差 (NRの997とIRの23.4) が、SIC能力の低下をもたらすことは自明であろう。

さらに、ヘベアの問題点を克服する当面の立場から：

- (5) 耐SALBクローンの開発 (100年に渡る品種改良の努力は成功していない)、アレルギー問題への組織的社会的対処の世界的な広がり²⁾、組織培養技術の完成、長期的には遺伝子解析に基づく新たなヘベア種の創生などが課題となる^{1, 4)}。また、アメリカ大陸 (特に原産地アマゾン) でのヘベア栽培の可能性の追求、すなわちヘベア樹に (4) を適用することは、アマゾンなど熱帯雨林の乱開発による全地球的な被害への対策として国際的な協力と規制が必要とされる。モノカルチャーに代わる現代農業の新しい発展と位置づけたSDにふさわしい施策 (合理的農業, Rational Agriculture) にしなければならない。(5. の (1) に私案を述べる。)

3. 天然ゴムを産生する植物

3.1 ヘベア樹

ヘベア (*Hevea brasiliensis*) は植物分類学的に詳細な研究がまとめられている^{3, 6)}。初期の植物学者のヘベアについての誤った記述³⁹⁾ については既に議論した^{1, 4)}。新しいクローン^{註4)} の開発⁵⁾ は天然ゴム産出国のゴム研究所で今も続けられている。筆者の著書・編書を含めて、既刊のNRに関する専門書^{1, 2, 4, 5, 34, 35, 40-42)} の記述は圧倒的にヘベア中心であった。2. 4の (5) に記した課題を再確認いただきたい。

3.2 ヘベア以外の天然ゴム産生樹

ゴムを生合成している植物は2,500種を超えるとされている。リンネによる植物学名が記載されている中で、比較的良好に研究された (例えば複数の文献に言及されている等) と考えられるゴム樹をTable 2に示す。(ヘベア属の*brasiliensis* 以外の種もリストにふくまれている。) このリストは決して網羅的なものではなく、また選択には任意性があることを前提に見ていただきたい。

Hevea 属には*brasiliensis* のほか10の種があり、古くから知られているものが多い。しかし*brasiliensis* を越えるものではないことが18世紀半ばには認識されていた^{1, 3, 4, 6)}。初期の文献では属名*Siphonia*がしばしば現れる。これは現在の*Hevea*に相当するが、すべてがヘベアとは見なせないようである^{3, 6)}。リストの中には過去に精力的な研究・開発がなされた樹もある。例えば、*Cryptostegia grandiflora* はマダガスカル原産でインド洋沿いに分布する繁殖力の強い灌木であり、メキシコに移植されて広がり“Mexican Rubber Vine”と呼ばれていた⁵²⁾。しかし、ヘベアと比較して遜色ないゴムが得られたとする報告は見当たらない。

註4) クローンとは1個体から無性生殖により増殖した個体群のことである。ここでは遺伝的に同一な (DNAは同じ) ヘベア樹から性質の優れたものを選んで、芽つぎ、挿し木、接ぎ木などにより増殖された一群の個体をいう。日本では桜のソメイヨシノが最もよく知られたクローンであろう。

Table 2 Rubber yielding trees and shrubs mentioned in the literatures*

Family	Botanical name	Region	Habit	Common name
Apocynaceae	<i>Dyera costulata</i>	Malaya, Borneo	Tree	Jelutong
	<i>Funtumia africana</i>	Tropical Africa	Tree	Lagos rubber
	<i>F. elastica</i>	Tropical Africa	Tree	Lagos silk rubber, Ive rubber
	<i>Hancornia gardencri</i>			
	<i>H. lundii</i>			
	<i>H. speciosa</i>	Brazil, Venezuela	Vine	Palo de Vaca, Mangabeira, Mangaba
	<i>Landolphia florida</i>	West Africa	Vine	Rituti
	<i>L. heudelotii</i>	Africa	Vine	N' dambo
	<i>L. kirkii</i>	Africa	Vine	Matire
	<i>L. madagascariensis</i>	Madagascar	Vine	
	<i>L. owariensis</i>	West Africa	Vine	Red Congo rubber
	<i>L. perrieri</i>			
	<i>L. petersian</i>	West Africa		Mtolia, Matatu-Bousu
	<i>L. thollonii</i>			
	<i>Urceola elastica</i>	Pennang	Vine	
	<i>Vahea gummifer</i>			Hya-Yya
	<i>V. madagascariensis</i>	Madagascar		Voane, Voa Canja
	<i>V. senegalensis</i>	Senegal		Licomgue
Asclepiadaceae	<i>Asclepias sublata</i>	California, Mexico	Shrub	
	<i>Calotropis procera</i>	Venezuela	Shrub	
	<i>C. gigantea</i>	India	Shrub	
	<i>Cryptostegia grandiflora</i>	Madagascar	Vine	Palay rubber, Rubbervine
	<i>C. madagascariensis</i>	Madagascar	Vine	Madagascar rubbervine
	<i>Madagas cariensis</i>	Madagascar	Vine	
	<i>Urceola elastica</i>	Northwest Bengal	Tree	White Assam rubber
Asteraceae (or Compositae)	<i>Chrysanthamnus nauseosus</i>	North America	Shrub	Rubber rabbitbrush
	<i>Hymenoxys odorata</i>	North America	Shrub	Bitter rubberweed
	<i>Parthenium argentatum</i>	North Mexico	Shrub	Guayule
Crassulaceae	<i>Crassula ovata</i>	South Africa		Japanese rubber plant
Euphorbiaceae	<i>Euphorbia intisy</i>	Madagascar	Tree	
	<i>E. resinifera</i>	Morocco	Cactoid	
	<i>E. tirucalli</i>		Cactoid	Rubber euphorbia
	<i>Hevea benthamiana</i>	Amazon, Orinoco	Tree	
	<i>H. brasiliensis</i>	South Amazon	Tree	Para rubber
	<i>H. camargoana</i>	Marajo island	Tree	
	<i>H. camporum</i>	Madeira river	Small tree	
	<i>H. guianensis</i>	Wide in Amazon valley	Tree	Xirringa
	<i>H. microphylla</i>	Venezuela	Small tree	
	<i>H. nitida</i>	Upper Rio Negro	Small tree	
	<i>H. pauciflora</i>	North & west Amazon	Tree	
	<i>H. rigidifolia</i>	Rio Negro	Tree	
	<i>H. spruceana</i>	Banks of Amazon	Tree	
	<i>H. paludosa</i>	Iquitos, Peru	Tree	
	<i>Manihot dichotoma</i>			
	<i>M. glaziovii</i>	Northeast Brazil	Tree	Ceara, Manisoba
	<i>M. heptaphylla</i>			
	<i>Sapium tapuru</i>			
	<i>S. thompsonii</i>	Colombia	Tree	
	<i>S. verum</i>			
Moraceae	<i>Castilla elastica</i>	Central America	Tree	Castilloa, Ule
	<i>C. panamenisis</i>			
	<i>C. ulei</i>	Upper Amazons	Tree	
	<i>Ficus elastica</i>	India, Southeast Asia	Tree	Assam rubber, Rambong tree, (Indian) Rubber tree
Peperomiaceae	<i>F. pumila</i>			Creeping rubber
	<i>Peperomia obtusifolia</i>	Mexico, South America		American rubber plant

*Adapted from Refs. 3, 5, 6, 39-60.

現在も研究が続いているのは、灌木のワユレ (*Guayule*, *Parthenium argentatum*) (「ワユレ」については4.1を参照.) のみであろう。

3.3 天然ゴム産生草

Table 2は樹木・灌木であるが、草木の「草」や、花・

野菜にもNRを生産するものが多数ある。 *Scorzonera tausaghyz*, *Taraxacum kok-saghyz* (ロシアたんぽぽ), *Scorzonera uzbekistanica*はロシア (旧ソ連) 産の草花で、1931年に見いだされた。150種に及ぶ収集植物から、ロシアたんぽぽが選定されて栽培が始まったのは1935年であった。

ロシア南西部を占領したナチスドイツはNRの採取に農民を駆り立てたという⁵⁹⁾。戦後の事情は詳細には知られておらず、現在は米国で試験的な栽培が行われている(後述)。ドイツでもアザミの一種 *Sonchus oleraceus* からゴムが採取されたことがあり、第一次世界大戦中NRの備蓄が底をつき始めて、メチルゴムの製造再開と共にレタス *Lactuca viminea* からのゴム採取も検討された⁶⁰⁾。このレタスはドナウ河およびエルベ河沿いに野生していた雑草である。同じくレタスで *Lactuca sativa* が、草として向日葵(ひまわり)からのゴムなどが、複数の文献に記載されている。

このカテゴリーで過去に最も精力的に研究され記録も残されているのは、エジソンがお気に入りだった Golden-rods (アキノキリンソウ) であろう^{1, 4, 52, 57, 60, 61)}。敗戦後に外来種として瞬く間に広がって、嫌われ者の帰化植物の代表となった背高泡立草(セイトカアワダチソウ)は、北米原産のアキノキリンソウの一種である。一時期のように「ドコへ行っても背高ばかり」という状態は50年を経て一段落し、夏の黄色い花が日本の風景になった感もある。勿論、ゴムの生合成が行われているから、向日葵(*Helianthus annuus*)と合わせて日本でも検討対象とすべきものかもしれない。エジソンは数千に及ぶ植物を試験したと言われていて、彼が残した実験ノートから42種の比較的良好と判断された結果(ゴム含量が3.0%以上の植物)が、文献60のTable 3.1 (pp. 96-98)にまとめられている。最も高いゴム含量率は *Artemisia lindheimeriana* の6.91%であった。

米国ではその他にも、milkweeds (*Asclepias syriaca*), ocotillo (*Fourcraulia splendens*), pinguay (*Applopappus*), rabbitbrush (*Chrysothamnus nauseosus*) などが検討の対象となったが、ゴム含量その他の点で、エジソンの結果を越えるものはなかったようである^{52, 60)}。これら草花・野菜は熱帯だけではなく、亜熱帯、温帯、亜寒帯に広く分布しているものが多く、食糧用、特に穀類の栽培に適した土地との競合を避けて検討を行えば、まだまだ栽培の可能性があると期待される。さらに、野菜・果物については既に「植物工場」が実用化されており、従来の農場ではない工業化の可能性も高い。

3.4 化学合成の可能性は?

本稿の主旨からは外れるが、化学者にとってシス-1,4-ポリイソプレンの完全化学合成は、やはり追求すべき課題である(註3を参照)。従来の重合触媒による立体構造の規制は基本的に確率論的な性格をもっており、ゴム分子鎖中にトランス-1,4, 1,2- 3,4-のミクロ構造がマルコフ連鎖として取り込まれる(ランダムは0次マルコフ鎖)。つまり、生体中での酵素反応の「鍵と鍵穴」の関係に見られる規制は実現されていない。モノマーとしてイソプレンそのままではなく、例えばカサ高い置換基を側鎖に有するイソプレ

ンモノマーの誘導体を合成して、反応末端での遷移状態における構造の規制(いわゆる末端規制)により1,2-重合およびトランス-1,4重合を禁止し、シス-1,4-重合のみを可能としなければならない。この点でD, Lの不整選択重合の今までの成果を含めて立体規則性反応の成果をレビューしたうえで、新たな反応のデザインが求められている。勿論、その際にヘベアにおけるNRの生合成反応(文献34, 35, 41, 42, 62および文献2の第1, 2章など)も参考にしなければならない。

完全化学合成ではないが、in vivo(生体内)は無く in vitro(いわゆる試験管内)の生合成反応により、ヘベア樹から採取されるNRに準じた生成体を与えることが可能となれば、化学工学・反応工学的立場からは化学反応として量産方式、すなわち植物工場の適用も可能となる。工学的には、組織培養技術(ティッシュ・カルチャー)も同じカテゴリーに分類できよう。

References

- 1) Kohjiya, S.: "Tennenn Gomu no Rekishi", Kyoto University Press, Kyoto (2013)
- 2) Kohjiya, S.; Ikeda, Y., eds.: "Chemistry, Manufacture and Applications of Natural Rubber", Woodhead Publishing, Cambridge (2014)
- 3) Schultes, R. E.: *Botanical Review*, **36**, 197 (1970)
- 4) Kohjiya, S.: "Natural Rubber: From the Odyssey of *Hevea* Tree to the Age of Transportation", Smithers Rapra Publications, Shawbury, in press
- 5) George, P. J.; Kuruvilla Jacob, C., eds.: "Natural Rubber: Agro-management and Crop Processing", Rubber Research Institute of India, Kottayam (2000)
- 6) Schultes, R. E.: *Economic Botany*, **41**, 125 (1987)
- 7) World Commission on Environment and Development: "Our Common Future", Oxford University Press, Oxford (1987)
- 8) Tester, J. W.; Drake, E. M.; Golay, M. W.; Driscoll, M. J.; Peters, W. A.: "Sustainable Energy: Choosing among Options", MIT Press, Cambridge, MA (2005)
- 9) Millstone, E.; Lang, T., eds.: "The Atlas of Food: Who Eats, Where, and Why", Myriad Editions, Brighton (2003)
- 10) Cock, M. J. W.; Kenis, M.; Wittenberg, R.: "Biosecurity and Forests: An Introduction -with particular emphasis on forest pests", Food and Agricultural Organization (FAO) of the United Nations, Forestry Department, Rome (2003)
- 11) Kutzin, F. T.: "Species Algarum", F. A. Brockhaus, Lipsiae (1849)
- 12) Williams, R. J. P.; Frausto da Silva, J. J. R.: "The Natural Selection of the Chemical Elements: The Environment and Life's Chemistry", Clarendon Press, Oxford (1996)
- 13) Mashtakov, S. M.: *Doklady Akademii Nauk SSSR*, **59**, 531 (1948)
- 14) Barbier, E. B.: "Natural Resources and Economic Development", Cambridge University Press, Cambridge (2005)
- 15) Treloar, L. R. G.: "The Physics of Rubber Elasticity", 3rd ed., Clarendon Press, Oxford (1975)
- 16) Trevena, D. H.: "Statistical Mechanics: An Introduction", Woodhead Publishing, Oxford (2011)
- 17) Schrödinger, E.: "What Is Life? : The Physical Aspect of the Living Cell", Cambridge University Press, Cambridge (1948)
- 18) Shannon, C. E.: *The Bell System Technical Journal*, **27**, 379 (1948)

- 19) Brillouin, L.: "Science and Information Theory", 2nd ed., Academic Press, New York (1962)
- 20) Katz, J. R.: *Naturwissenschaften*, **13**, 410 (1925)
- 21) Murakami, S.; Senoo, K.; Toki, S.; Kohjiya, S.: *Polymer*, **43**, 2117 (2002)
- 22) Toki, S.; Sics, I.; Ran, S.; Liu, L.; Hsiao, B. S.; Murakami, S.; Senoo, K.; Kohjiya, S.: *Macromolecules*, **35**, 6578 (2002)
- 23) Trabelsi, S.; Albouy, P. A.; Rault, J.: *Macromolecules*, **35**, 10054 (2002)
- 24) Tosaka, M.; Murakami, S.; Poompradub, S.; Kohjiya, S.; Ikeda, Y.; Toki, S.; Sics, I.; Hsiao, B. S.: *Macromolecules*, **37**, 3299 (2004)
- 25) Poompradub, S.; Tosaka, M.; Kohjiya, S.; Ikeda, Y.; Toki, S.; Sics, I.; Hsiao, B. S.: *J. Appl. Phys.*, **97**, 103529 (2005)
- 26) Kohjiya, S.; Tosaka, M.; Furutani, M.; Ikeda, Y.; Toki, S.; Hsiao, B. S.: *Polymer*, **48**, 3801 (2007)
- 27) Ikeda, Y.; Yasuda, Y.; Hijikata, K.; Tosaka, M.; Kohjiya, S.: *Macromolecules*, **41**, 5876 (2008)
- 28) Che, J.; Burger, C.; Toki, S.; Rong, L.; Hsiao, B. S.; Amnuayporn-sri, S.; Nimpaboon, A.; Sakdapipanich, J.: *Macromolecules*, **46**, 4520 (2013)
- 29) Toki, S.; Che, J.; Rong, L.; Hsiao, B. S.; Amnuayporn-sri, S.; Nimpaboon, A.; Sakdapipanich, J.: *Macromolecules*, **46**, 5238 (2013)
- 30) Ikeda, Y.; Tohsan, A.: *Colloid Polym. Sci.*, **292**, 567 (2014)
- 31) Ikeda, Y.; Kohjiya, S.: *Nihon Reorogi Gakkaishi*, **36**, 9 (2008)
- 32) Ikeda, Y.: *Nippon Gomu Kyokaishi*, **84**, 29 (2011)
- 33) Tanaka, Y.: *Rubber Chemistry and Technology*, **74**, 355 (2001)
- 34) Bateman, L., ed.: "The Chemistry and Physics of Rubber-Like Substances", Maclaren & Sons, London (1963)
- 35) Roberts, A. D., ed.: "Natural Rubber Science and Technology", Oxford University Press, Oxford (1988)
- 36) Saito, N.: "Kobunshi Butsurigaku", Shokabo, Tokyo (1958)
- 37) Fukao, Y.: *Tonan Ajia Kenkyu*, **42**, no. 3, 294 (2004)
- 38) Mann, C. C.: *Science*, **325**, 564 (2009)
- 39) Collins, J.: "Report of the Caoutchouc of Commerce", Printed by the order of Her Majesty's Secretary of State for India in Council, London (1872)
- 40) Barlow, C.: "The Natural Rubber Industry: Its Development, Technology, and Economy in Malaysia", Oxford University Press, Kuala Lumpur (1978)
- 41) Webster, C. C.; Baulkwill, W. J., eds.: "Rubber", Longman Science & Technical, Harlow (1989)
- 42) Sethuraj, M. R.; Mathew, N. M., eds.: "Natural Rubber: Biology, Cultivation and Technology", Elsevier, Amsterdam (1992)
- 43) Hancock, T.: "Personal Narrative of the Origin and Progress of the Caoutchouc or India-Rubber Manufacture in England", Longman, Brown, Green, Longmans & Roberts, London (1857)
- 44) Seeligmann, Th.; Lamy-Torrilhon, G.; Falconnet, H.: "Le Caoutchouc et la Gutta-Percha", H. Desforges, Paris (1896)
- 45) Ferguson, J.: All about Rubber: All Varieties in All Countries, with Harvesting and Preparation, 3rd ed., A. M. & J. Ferguson, Colombo (1899)
- 46) Wickham, H. A.: "On the Plantation, Cultivation, and Curing of Para Indian Rubber", Kegan Paul, Trench, Trubner & Co., London (1908)
- 47) Spruce, R., ed. & condensed by Wallace, A. R.: "Notes of a Botanist on the Amazon & Andes", Macmillan and Co., London (1908)
- 48) Wright, H.: "Hevea brasiliensis or Para Rubber: Its Botany, Cultivation, Chemistry and Diseases", 3rd ed., A. M. & J. Ferguson, Colombo (1908)
- 49) Honda, S.: "Zoringaku Kakuron, Dainaka, Gomuju Hen", Miurashoten, Tokyo (1925)
- 50) Sato, S.; Morimoto, K.: "Gomu no Kenkyu", Kouseikaku, Tokyo (1926)
- 51) Barker, P. W.; Holt, E. G.: "Rubber: History, Production and Manufacture", U. S. Department of Commerce, Washington, D. C. (1940)
- 52) Wilson, C. M.: "Trees and Test Tubes: The Story of Rubber", Henry Holt and Company, New York (1943)
- 53) Oomura, K.; Kawano, T.; Takahashi, K.: "Daitoa Shigen Kagaku Dai-issatsu Gomu Kogyo", Heibonsha, Tokyo (1943)
- 54) Oda, O.: "Gomu Saibai", Seibidoshoten, Tokyo (1944)
- 55) Le Bras, J.: "Rubber: Fundamentals of Its Science and Technology", Chemical Publishing, New York (1957)
- 56) Peries, O. S., ed.: "A Handbook of Rubber Culture and Processing", Rubber Research Institute of Ceylon, Agalawatta (1970)
- 57) Vanderbilt, B. M.: "Thomas Edison, Chemist", American Chemical Society, Washington, D. C. (1971)
- 58) Wiersema, J. H.; Leon, B., eds.: "World Economic Plants: A Standard Reference", CRC Press, Boca Raton (1999)
- 59) Clarence-Smith, W. G.: "The Battle for Rubber in the Second World War: Cooperation and Resistance", in "Global Histories, Imperial Commodities, Local Interactions", Curry-Machado, L., ed., Palgrave Macmillan, London (2013), Ch. 10
- 60) Finlay, M. R.: "Growing American Rubber: Strategic Plants and the Politics of National Security", Rutgers University Press, New Brunswick (2009)
- 61) The Southern Regional Research Laboratory of U. S. Department of Agriculture: "Extraction, Characterization, and Utilization of Goldenrod Rubber", New Orleans (1944)
- 62) Okumura, S.; Hayashi, Y.; Kato, N.: *Nippon Gomu Kyokaishi*, **82**, 424 (2009)

日本語表記参考文献

- 1) こうじや信三：天然ゴムの歴史，京都大学学術出版会，京都 (2013)
- 31) 池田裕子，こうじや信三：日本レオロジー学会誌，**36**，9 (2008)
- 32) 池田裕子：日本ゴム協会誌，**84**，29 (2011)
- 36) 斎藤信彦：高分子物理学，裳華房，東京 (1958)
- 37) 深尾葉子：東南アジア研究，**42**，294 (2004)
- 49) 本多静六：“造林学各論第七護謨樹編”，三浦書店，東京 (1925)
- 50) 佐藤定吉，森本衆逸：“護謨の研究”，厚生閣，東京 (1926)
- 53) 大村 清，河野 武，高橋九郎：“大東亜資源化学 第1冊 ゴム工業”，平凡社，東京 (1943)
- 54) 小田 脩：“護謨栽培”，成美堂書店，東京 (1944)
- 62) 奥村暁，林泰行，加藤信子：日本ゴム協会誌，**82**，424 (2009)