天然ゴム産生植物の新たな可能性について（後編）

こうじや信三

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

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*. Among them, only *Hevea brasiliensis* has been actively cultivated to produce rubber. Recently, studies on non-Hevea rubber yielding plants are focused, which seem to become more and more important in this century. In this part, revival of guayule and kok-saghyz is specifically noted together with new biotechnological studies, genome engineering, in particular. Based on the analysis of the scientific and industrial trends, several measures for more natural rubber production are proposed from the sustainability viewpoint.

(Received on August 19, 2014)

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

4. ヘベア樹以外の天然ゴム産生植物のリバイバル

4.1 ワユール

前編の Table 2 に示した *Parthenium argentatum* (Guayule) は、通称を英語読み (?) して日本ではグアユールと呼ばれてきた。原語はスペイン語であり、グアユールでは通用しない。英語読みもゴム・植物専門家の間ではワユール (wy-oo-lee) なので、本稿ではこちらを用いる。ワユールはメソ・アメリカ、特にメキシコ北部の荒れ地やテキサス州南部に繁殖する高さ約 60～70 センチの灌木である。ゴムが得られることは以前から知られていたであろうが、文献上は 1852 年に J. M. Bigelow がテキサス西部の国境近くで採集したものが最初で、ハーバード大学に保存されている¹⁾。文献 1 のタイトルにある the Chihuahuan desert (チワワ砂漠) はメキシコとの国境地帯からテキサス西部に広がる砂漠で、ワユールの自生地である。

20 世紀初頭、自転車の普及と自動車の急増によりタイヤ用天然ゴム (NR) の需要が拡大した。早くもこの時に米国では International Rubber Company (IRC) が設立されて、ワユールからのゴム採集方法、栽培の検討が行われた²⁾。(IRC は文献 3 その他の本文中では Intercontinental

Rubber と記載されている。) 特筆すべきことに、IRC は植物学者・農学者を雇用して、研究・開発を推進した。中でも、カナダ生まれの植物学者・病理学者 Dr. William McCallum は、以後 30 年以上にわたってワユールの栽培と改良に携わった人物である^{3, 4)}。ゴム分は幹、枝の他に約 1/3 は根に含まれること、またゴム分の収穫には 4, 5 年待たねばならないこと等を解明している。そして、1910 年には IRC が米国のゴム需要の 10% を供給するまでになっていた。しかし、メキシコの政情不安とアジアでの栽培ゴムの急増^{5, 6)}によってメキシコからの撤退を余儀なくされた。以後は、国内南西部の 8 千ヘクタールの農地で栽培を行い、カルフォルニア州サリナスに加工工場を設立してワユールゴムの生産を続けた。

1930 年春、米国陸軍少佐 Dwight Eisenhower (1890-

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芸学部助手，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。

1969, 第二次世界大戦中は連合国西ヨーロッパ方面軍最高司令官, 戦後1953-61年合衆国第34代大統領) は同僚と二人でワシントンから離れて, 戦略物資ゴムの調査を行った。IRCの協力を得て作成された彼のレポートは, 40万エーカーの農場を確保しワユレの栽培を5年周期(五圃式農業)で行うことで米国のNR消費量の約20%を供給できると述べていた²⁾。しかし, 提出されたレポートが話題になることはなく^{註5)}, IRCのゴム生産は国防省からの強い要望があった第二次世界大戦中以外は, 日産5トンを超えることはなかった⁴⁾。Dr. McCallumは, 1937年イタリアの独裁者ムッソリーニがNR確保のためエチオピアでのワユレの栽培を計画して, 彼に誘いをかけたが断固拒否したことでも有名になった。文献4ではドイツと日本からも誘いがあったが彼はこれも断ったとの記述がある。こちらの真偽のほどは判らない。日本側にはそのような記録は確認されていないようだ。日本人に関連して確かなことは, 真珠湾攻撃後, カルフォルニア州Manzanar収容所の日系人の多くが, ワユレの栽培に協力しNR生産を行っただけではなく, 機械的収穫法の改良や樹脂分の除去で技術的にもすぐれた成果を挙げた記録がある。スマトラのグッドイヤーのゴム園が日本軍に接収されて日本タイヤ会社が軍政下での運営に当たったことも含めて, 戦略物資としてのNRの重要性を示す歴史的事実は枚挙にいとまがなく⁷⁻¹⁴⁾, 日本人も多かれ少なかれ巻き込み, 巻き込まれてきた歴史がある。

戦後もワユレの研究・開発は中断を含みながらも継続されており¹⁴⁾, 生成ゴムの構造・物性を含めて*Rubber Chemistry and Technology*誌にも優れた論文がいくつか掲載されてきた。また, オハイオ州立大のProf. Cornish(文献15の第1章の著者)は, ワユレからのゴムはヘベアと異なり外科用手術ゴム手袋使用によるアレルギーは見られない¹⁶⁾として, 大規模なプロジェクト研究を推進している。彼女が所属するオハイオ州立大学のOARDC(Ohio Agricultural Research and Development Center)のホームページを参照いただきたい。このセンターのPENRA(Program of Excellence in Natural Rubber Alternatives)グループが中心的な役割を果たしているであろう。同様の動きはヨーロッパでも始まっていて, ロシアたんぽぽとワユレの両方が取り上げられている。ホームページ(EU-PEARLS)をチェックしてほしい。

ワユレはヘベアを除いて最も研究されたNR産出樹で

註5) Dwight Eisenhowerは1919-20年には全国の道路網調査(60日をかけてトラック部隊の大陸横断を行った)を担当し, 自動車王フォード, ファイヤーストーン社長(この2人の関係については文献5を参照)らと会談していた。この全国調査は, 1930年代における高速道路網の建設開始(大恐慌下で, 当然, 失業・景気対策の意味もあった)につながったと評価されている³⁾。この体験が, 1930年の戦略物資ゴムの調査の誘因になっている。「社会的に広く考察すること」を心掛けていた職業軍人であり, 後に大統領に選出されてthe National Defense Highway Systemの確立を指示したのも, これら基盤を築いていたからと言える。(独ナチスのAutobahnのマネに過ぎないとする俗説がある。)

ある。ゴム採取法は, 根を含めたワユレ樹の洗浄後, 粉碎してゴム分を溶剤抽出するプロセスである。ヘベア樹のタッピングと異なり, ラテックスを経ないことから連続プロセス化も可能とされている。しかし, 野生樹に頼ることなく, 栽培となると毎年植え付けをせねばならず(5年後に伐採), 種子の生産と選別(芽接ぎなど無性増殖の実用化が重要), 植え付け方法, 収穫方法など一連の農業生産方式の最適化など, 多くの農学的課題が残されている。ヘベアゴムに全面的に取って代わるとは思えないが, 当面はいくつかの用途で有用性と必要性を発揮できる可能性もっている。しかし, 石油資源の枯渇と南アメリカ枯葉病(South American Leaf Blight, SALB)によるアジアのヘベア農園の激減が現実になった時には, ヘベアに代わる最有力候補であり, 今後も目を離せないゴム産生植物であろう。

4.2 ロシアたんぽぽ

Taraxacum kok-saghyz(ロシアたんぽぽ)はカザフスタン, ウズベキスタンに自生し, 1931年にロシアの科学者がゴムを産出する草花として見出し, 1930-40年代に野生草と栽培されたものからゴム採取が行われた^{註6)}。連合国側の米国でもワユレと共に栽培も試みられた¹⁸⁾。しかし, 戦後における合成ゴムの普及によって, これらは過去の歴史的事実となってしまった。1980年代にNRラテックスのアレルギーが世界的な問題となって, 米国で研究が再開された。CornishによればロシアたんぽぽからのNRは, ヘベア樹からのそれ(現在用いられているNR)と同じくゴム含有タンパク質をアレルゲンとするアレルギー症状を引き起こすという(文献15第1章に記載されたCornishのこの結論は多くのウェブサイトにもまだ反映されていないようだ。検索に当たって注意すべき点である)。しかし, 温帯・亜寒帯での栽培が可能であるからタイヤ用などのNRとして, ヘベアと同様に用いることが可能とされている。前節に紹介したオハイオ州立大学のPENRAは, このロシアたんぽぽをタイヤ用途に的を絞って開発を進めているようで, そのメンバーであるクーパータイヤでタイヤ試作品の性能評価が進行中と伝えられる。

ゴム分は約10%で, 他の植物に比べて高いゴム含有率である。現在米国とヨーロッパで研究・開発の対象となっているのは, この高いゴム含有率に依るものであろう。ゴム

註6) ヘベアからのNRを全面的に輸入に頼らざるを得なかったソ連(USSR; ソ同盟とも)にとって, ロシアたんぽぽは国家的な救世主の位置付けであった。1930年代から1970年前半まで, 活発な研究が行われ数百に及ぶ論文が発表されている。(最近, 中国の論文が目立ちはじめた。)残念なことに, ごく少数の仏語論文を除いてそのすべてがロシア語で書かれ, 世界的には全く引用されていない。ケミカル・アブストラクツの要旨で見ると科学的に妥当, というより当時としてはかなり優れた論文であったと推察されるものが多数ある。ソ連の科学界(特に, 生物学・農学分野)では, 1930-60年代はスターリンの影響下ルイセンコ生物学が猛威を振っていた時期であり, 国際会議での講演はあの「生命の起源」で世界的に有名であったオパーリンですら困難だった¹⁷⁾。同じ科学者として国際的な活動が思うにまかせなかった無念さに, 同情を禁じ得ないものがある。

分は多くが根に蓄えられている。ゴム分の抽出はヘベアのタッピングや、ワユレでの溶剤抽出と比べて容易であろうと考えられているようで、機械的な手法が試みられている。例えば、収穫では根から掘り返して、洗浄後ボール・ミル法によって根の表面層を剥離し、水によりゴムを含む表面層を分離させ、デカンテーション後に精製してゴムを得る方法などがウェブ上で紹介されている。優秀な種子の選択とその増殖方法が検討課題であり、数年後には栽培法の確立が期待されている。カナダなどの亜寒帯地域でも栽培が可能となる可能性があり、ワユレに続く有力候補とされている。

4.3 遺伝子工学の手法による新しい展開は？

前編の2.4の(5)で言及したように、本稿で論じた問題の根本的な解決は、遺伝子解説に基づく遺伝子工学的手法によって可能になると考えられる。ヘベアの遺伝子(ゲノム)解析は既にいくつかのグループで途上にあり、数年後には「全解析の終了」が発表されるかもしれない^{5, 6, 19-21)}。(部分的データではあるが既にウェブで公開されている：<http://www.bridgestone.co.jp/news/2012071002.html>。)

この手法が本稿で論じた問題の解決に留まらない、多様な、そして大きな可能性を秘めていることを誰もが認めざるを得ない。しかし、筆者がバイオミメティクスに関連して指摘したように^{5, 6)}、こうした「ハイテクがらみのバイオテクノロジー」手法についての危うさを、科学者はもっと考察・議論すべきである。ゴム関係者の間ではあまり注意を引かなかったが、筆者のこの危惧は残念なことに日本で、未熟な錬金術「まがい」のSTAP細胞の一つの帰結点として世界的な先端バイオ研究者の自殺という衝撃的な結果(2014年8月5日)をもたらした。ハイテクがマスコミにもてはやされて、(科学的な理解を伴わないまま)社会的な広がりを見せたことに一因があるとはいえ、科学者の側の無責任な行動が主因であることは認めなければならない。一科学者として率直に言って、あのような化学以前の錬金術が一時的にせよ社会的に通用したことは、Nature誌にいったんは掲載されたことを含めて筆者の理解力を越えているが、ミスとして処理できない問題であることは確かである。公開された実験ノートは、中世の錬金術師が見てもお粗末としか言い様のない代物であるからだ。

ルネッサンス期の天才ダ・ヴィンチの次の言葉は、この21世紀の出来事を魔術として予言していたのかと疑いたくもなる事態ではなからうか：

「人間の議論のうちでもっとも愚劣なのは、自然と同じ単純物質を作ろうと企てる錬金術師の姉妹たる魔術の盲信に陥ることだと称していいであろう。しかも魔法は、自分に似たものつまり嘘八百以外には何ものも産出しないだけ、それだけ錬金術より非難に該当する」

(「レオナルド・ダ・ヴィンチの手記」上、杉浦民平訳、岩波文庫、p.65)。

NRに関連してバイオ関係にも関心をもち続けて来た科学者(外野席の一員と言ふべきであろう)として、持続的発展(Sustainable Development, SD)の観点に立ってハイテク全体、当面バイオテクノロジーの見直しを提起したい。

例えば自然科学者が力学運動の計算をする際には、力学の教科書は参照するが、ニュートンの「プリンシピア」を読み返す人は居ない。それどころか、量子力学の計算で波動方程式を解く人ですら(歴史に興味をもつ「変わり者」を除いて!)、1926年のシュレーディンガーの一連の原論文を読み返す必要を感じていない。(勿論、がんばってドイツ語論文を読破すれば、得るところも大きいであろう。)ニュートンは「私がより遠くを見ることができたとすれば、それは巨人の肩に乗っていたから」と言ったそうであり、現代の科学者はさらにその「ニュートンの肩の上に乗かって研究している」とはこの意味である。決してニュートンより偉くなっているのではない。これは科学史・科学論研究者クーン(今では誰もが知る「パラダイム」論の元祖である)の初期における主張²²⁾に従えば、物理学は学問として既に成熟している(matured science)から、評価の定まった教科書を学習・参照すれば古典にまで立ち戻る必要が無い。(逆に言えば、成熟した科学の指標はそうした標準的な教科書が科学者によって書かれ、広く読まれていることである。)この観点に立てば、「バイオテクノロジー」のある分野はi-PS細胞に見られるように着実に成熟の域に達しつつあるにもかかわらず、いくつかは未成熟のレベルにあってimmature scienceに留まっている、と解釈できる。成熟した科学の世界では論文が却下された後に、その真実性の検証を行うことはナンセンス以外の何物でもない。納税者としては、「論文が却下されてもやっぱりあると主張する人がいたら、その人が自分でやること」であって、税金のムダ使いは止めてもらいたいと言ふべき所である。つまり、世間一般と同じく学問の世界でも、成熟しているかどうかは重要である。それではこのSTAPの場合に古典として立ち帰るところはどこか? 門外漢である筆者が蛮勇を奮ってその究極候補の一つを挙げるとすれば、ダーウインの「種の起源」である。「ビーグル号航海記」は一般読者も多いポピュラーな書と言えが、さらに「種の起源」を読めば科学者として得るところ大なるものがあり、「科学革命」以前の自然哲学・博物学(錬金術もその一つ)と近代科学の明確な「差異」を考える手がかりを得ることができる。忙しい時代だからこそ、そうした一歩前進のための二歩後退が、今、科学の世界で必要ではないだろうか?

この原理的考察から導かれる系として、理科教育が自然観察(動植物の観察や星座観測など)から始まるのは自然

哲学からスタートした歴史的経過に沿ったものではあるが、実験を伴った「理論」である科学へのアプローチとして、全く違った現代的入門を検討する必要があるかもしれない。また、20世紀になって実験屋と理論屋の分離が進行して「過ぎたるは及ばざるが如し」の事態になっていることが背景にあって、1990年代から社会的要請の旗印の下で技術的应用が偏重されてきたことも（STAP細胞の発表と同時に、患者からの大きな期待が広く「報道されたこと」は象徴的である）今回の事態の要因であろう。「科学は応用のためにこそあるのではないのか？」とする素朴かつ今の日本社会では一般的な疑問に、明確に回答できない科学者（あるいはそのレベルの科学観しかもたない「科学者」）が増加しているのかもしれない。

幸か不幸かNRのゲノム解析そのものには上記の危惧はあたらない。当面考えなければならないのは、その結果に基づいて科学的な方針をどう立案するかであろう。ここで「科学的」は即応用では無く、人類の幸福と全地球的なSDの観点から長期的なムダの無い方針を策定するための方法論であり、ゴム関連分野での「科学の真価」が問われる事態である。NR関係者の慎重かつ大胆な発想とその具体的展開が期待される。

5. あ と が き

この資料が提起している課題は、高度な交通化社会となった現代社会が増々必要とする材料としてのNRを、安定的に供給することの社会的・歴史的重要性である。つい最近まで「ヘベアに勝るものなし」に安住してきた筆者の調査、特に関連する個々の植物についての原著論文の探索は不十分である。しかし、この資料は問題提起を目的とするものであり、興味をもたれた方々がより緻密で広範囲な調査の結果を本誌に報告していただければと考えている。

現時点で考え得る対策の私案を、早期に実現・実施可能かの観点から順次列挙して、本資料の結論としたい：

(1) 当面はヘベアを対象とし、SALBの検疫体制を維持・強化しつつ、現代的なプランテーションのデザインが、SDとBiosecurity^{6, 23)}の点から重要課題である。すなわち、ヘベア樹が数十から百メートル間隔で植えられ、ヘベアと共生可能な有用樹木・灌木をその間に植林（間作）し、合理的なかつ最大限の利益を上げる植え込みを実現する^{註7)}。さらに、グランドカバーとして数種の有用草花の栽培を行う、等の工夫を最大限に追及して熱帯雨原生林に近いプラン

テーションとする⁶⁾。その試験段階での研究・開発は、現代農業の新しい動向（Rational Agriculture）の試みとして国際的な協力のもとで実施されなければならない。ヘベアのモノカルチャー方式のようにひたすらNRの高収率を追及するのではなく、プランテーション全体としての効率・収益性の確保と評価のために、高度な農学的技術と農業経済学的な管理・運営が必要である。

同時に、これとは異なる技術的アプローチとして、*in vitro*の生合成反応あるいはティッシュ・カルチャー技術の完成をめざすことにより農園ではなく「植物工場」での生産が可能になれば、実効あるSALB対策が世界中で可能になる。長期的視点からは、遺伝子解析の推進とその情報の遺伝子工学的応用が焦点である。今世紀末が一応の期限と考えられるが、ヘベアの研究は既に成熟段階にあると解釈して（この点はさらなる科学論・技術論的な考察が必要だろう）、いずれの試みも（未来予測が通常そうであるように）予想以上の年数が必要なのかもしれない。この可能性を考慮して、以下の方針も重要課題となる。

(2) ワユレー、ロシアたんぽぽ、アキノキリンソウを対象とし、亜熱帯・温帯・亜寒帯域の空き地・荒地を利用した栽培の試みを推進すべきである。それら栽培条件の最適化を目的とした品種改良（新クローンの創生）に際して、生成NRの化学的および物理的特性、例えば、ゴムの分子構造・分子量とその分布、加硫挙動、伸長結晶化（Strain Induced Crystallization, SIC）挙動などの最適化も品種改良の対象項目としなければならない。ヘベアと異なり熱帯植物ではないので、(1)との同時進行が可能かつ必要である。日本と周辺国での栽培の可能性も、勿論、検討すべきであろうし、将来的には植物工場での生産も検討課題であろう。

(3) 対象植物をさらに広げ、視角・視点を変えて可能な植物をピックアップしなければならない。エジソンの先駆的な努力^{2, 4, 26, 27)}に学びながらも、現代科学の到達点からの原理的考察に基づいてRational Agricultureの先駆者としての努力が必要とされる。例えば、前編2.1の末尾に記した生体の環状イソプレノイド（例えばカロチノイド）の生合成経路において、直鎖高分子量のNRのルートとの分岐点が存在するはずで、カロチノイド含量の高い植物²⁸⁾を調査することなどが探索の一つのガイドになるかもしれない。

以上、(1)～(3)ではバイオマスを対象に考えている。それらの可能性を評価すると共に、やはりヘベアを越えない結果となる可能性も高いと考えなければならない。（ヘベアは既に100年を超える品種改良の産物であることを想起せよ！）その場合にはさらに次世代の目標となる2点を追加しておこう：

(4) 石油を原料とせずに（石炭は別に考えるべきか？）、ヘベア樹からのNRにおとらないシス-1,4-ポリイソプレンの完全化学合成を達成し、その工業化を行うことも継続的

註7) セイロンで初期（1904年以前）にはヘベア樹の間作作物（intercrop）として茶の栽培が行われ、茶園が先行していた中でゴム園の確立に貢献した実績がある²⁴⁾。しかし、それ以後は散発的にしか実施されておらず、現在はプランテーション毎にバラバラで、統一的な施策は見られない（1978～2003年の見聞）。植物学・農学的な要因によるものか、経済的な理由なのか不明であるが、有用灌木には日陰を好むものが多いので茶、コーヒーなどを含めてさらに間作植物の検討が（グランドカバーに先だって）なされるべきである。最近の論文に、南インドのケララ州でのバインナップルの検討結果を報告している例がある²⁵⁾。

に努力すべき課題である。ここで、「石油を原料とせずに」の条件付きであることに留意しよう。たとえ化学合成が可能となっても、石油の枯渇でおじゃんになってしまつては合成化学者の努力も報われない可能性があるからだ。バイオアルコール生産などが一般的になりつつある現在、大きな制限では無いだろう。(前編の註1の方法で得られた炭化水素を原料とするゴムの化学合成も、選択肢の一つであろう。)

(5) 最後に、デバイスの観点からニューマチックタイヤに代わる全く新しいタイヤの創製がある。ソリッドタイヤとの中間点とも見なせる発泡タイヤは長く研究されてきたが、現行タイヤとの差は未だ大きいものがあるようだ。2つのエントロピー弾性体、ゴムと気体のこの絶妙な組み合わせで全く別のデバイス設計が可能だろうか？あるいは全くゴムなしでは？も考えなければならないのかもしれない。ここでは「今世紀末までに」の制限を外して21世紀前半期の実現で間に合うものとして、100年後の実用化を目指して、スタートは既に切られている。

以上5点はゴム関連会社、タイヤ会社の努力は勿論のこと²⁹⁾、現代の交通化社会全体にとって長期的に重要な課題であり、多くの人々の知恵とアイデアが生かされるべきであることは言うまでもない。「発見」、「発明」のアイデアは科学研究でも開発においても、ひらめき (inspiration) が重要である。(1)～(3)におけるブレイクスルー、(4)での完全化学合成の達成、(5)の場合のトムソンのひらめきを上回るようなブレイクスルーは、何時、誰の上に輝くだろうか？今世紀の科学と技術におけるゴム分野での一大コンペに注目し、日本の若い研究者・技術者の貢献を願っている。

謝辞：オハイオ州立大学のCornish教授との討論会を設定いただき、有意義な議論を共にしていただいた京都工芸繊維大学池田裕子准教授ならびにアチタヤ・トーサン博士に心から感謝いたします。また、両氏には文献調査でもたいへん協力をいただきました。重ねて御礼申し上げます。

References

- 1) Lloyd, F. E.: "Guayule (*Parthenium argentatum* gray) : A Rubber-Plant of the Chihuahuan Desert", Carnegie Institution of Washington, Washington, D.C. (1911)
- 2) Skrabec, Jr., Q. R.: "Rubber: An American Industrial History", McFarland Publishers, Jefferson (2014)
- 3) Wilson, C. M.: "Trees and Test Tubes: The Story of Rubber", Henry Holt and Company, New York (1943)
- 4) Finlay, M. R.: "Growing American Rubber: Strategic Plants and the Politics of National Security", Rutgers University Press, New Brunswick (2009)
- 5) Kohjiya, S.: "Tennenn Gomu no Rekishi", Kyoto University Press, Kyoto (2013)
- 6) Kohjiya, S.: "Natural Rubber: From the Odyssey of *Hevea* Tree to the Age of Transportation", Smithers Rapra Publications,

Shawbury, 2015

- 7) Morel, E. D.: "Red Rubber: The Story of the Rubber Slave Trade which flourished on the Congo for twenty years, 1890-1910", National Labour Press, Manchester (1919)
- 8) Wolf, H.; Wolf, R.: "Rubber - A Story of Glory and Greed", J. J. Little and Ives, New York (1936)
- 9) Weinstein, B.: "The Amazon Rubber Boom 1850-1920", Stanford University Press, Stanford (1983)
- 10) Bunker, S. G.: "Underdeveloping the Amazon", University of Chicago Press, Chicago (1985)
- 11) Hochschild, A.: "King Leopold's Ghost: A Story of Greed, Terror and Heroism in Colonial Africa", Pan Macmillan, London (1999)
- 12) Loadman, J.: "Tears of the Tree: The Story of Rubber-A Modern Marvel", Oxford University Press, Oxford (2005)
- 13) Tully, J.: "The Devil's Milk: A Social History of Rubber", Monthly Review Press, New York (2011)
- 14) National Academy of Sciences: "Guayule: An Alternative Source of Natural Rubber", Books for Business, New York (1977)
- 15) Kohjiya, S.; Ikeda, Y., eds.: "Chemistry, Manufacture and Applications of Natural Rubber", Woodhead Publishing, Cambridge (2014)
- 16) Mooibroek, H.; Cornish, K.: *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **53**, 355 (2000)
- 17) Egami, F.: "Oparin", Shimizushoin, Tokyo (2008)
- 18) Gordon, W. W.; Stevenson, B. J.: "Russian Dandelion (KOK-SAGHYZ) : An Emergency Source of Natural Rubber", U.S. Department of Agriculture, Washington, D. C. (1947)
- 19) Okumura, S.; Hayashi, Y.; Kato, N.: *Nippon Gomu Kyokaishi*, **82**, 424 (2009)
- 20) Liyanage, K. K.: *Bulletin of the Rubber Research Institute of Sri Lanka*, **48**, 16 (2007)
- 21) Sethuraj, M. R.; Jacob, J.: *Rubber Sci.*, **25**, 123 (2012)
- 22) Kuhn, T. S.: "The Structure of Scientific Revolutions", University of Chicago Press, Chicago (1962)
- 23) 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)
- 24) Akers, C. E.: "Report on the Rubber Industry of the Orient", Waterlow & Sons, London (1912)
- 25) Siju, T.; Tharian George, K.; Lakshmanan, R.: *Rubber Sci.*, **25**, 164 (2012)
- 26) Vanderbilt, B. M.: "Thomas Edison, Chemist", American Chemical Society, Washington, D. C. (1971)
- 27) The Southern Regional Research Laboratory of U. S. Department of Agriculture: "Extraction, Characterization, and Utilization of Goldenrod Rubber", New Orleans (1944)
- 28) Shilov, E. A.; Lushehevskaya, G. M.; Mironova, D. F.; Vyval'ko, I. G.; Yasnikov, A. A.: *Revue Generale de Caoutchouc et Plastiques*, **40**, 1858 (1963)
- 29) Hojo, M.; Fukushima, Y.; Sato, T.; Watanabe, N.; Ozawa, Y.: *Nippon Gomu Kyokaishi*, **86**, 169 (2013)

日本語表記参考文献

- 5) 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)
- 17) 江上生子：「オパーリン」，清水書院，東京 (2008)
- 19) 奥村暁，林泰行，加藤信子：日本ゴム協会誌，**82**，424 (2009)
- 29) 北条将弘，福島靖王，佐藤隆之，渡辺訓江，小澤洋一：日本ゴム協会誌，**86**，169 (2013)