

太平洋戦争時登戸研究所の秘密戦兵器開発に対して
製紙業界が行った生産協力
-企画展「戦争と紙」に因んで-

メタデータ	言語: jpn 出版者: 明治大学平和教育登戸研究所資料館 公開日: 2017-02-06 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 小林, 良生 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10291/18436

太平洋戦争時登戸研究所の秘密戦兵器開発に対して製紙業界が行った生産協力 —企画展「紙と戦争」に因んで—

よしなり
小林良生

NPO機能紙研究会顧問

元通商産業省工業技術院四国工業研究所

1. はじめに—風化しつつある太平洋戦争の記憶—

平成26（2014）年8月15日、第69回の終戦の日に、全国戦没者追悼式典が例年の如く天皇・皇后両陛下のご臨席のもとに東京武道館で開催された。その式典につき、翌日の朝日新聞は次のように報じていた。

「遺族は高齢化し、参列者は減少が続き、最も多かった昭和60（1985）年に比べ3割も少なく、戦没者の「父母」は一人もおらず、「妻」は19人（0.9%）のみになった。孫・ひ孫などの戦後生まれ割合は15.3%を占め、過去最高になった」⁽¹⁾ という。これは太平洋戦争の記憶が確実に遠ざかっていることを物語る。

更に、その日の夜、NHKスペシャル番組「どう守る？ 日本の平和」では生放送で我が国の有識者で日本の平和を守る戦略について論じられていた。そして、その後の「大人のドリル・スペシャル」で若い世代の人たち100人に、「今日は何の日ですか」と尋ねた時に、「知らない」と答えた人が半分を越えていたし、更に「どこの国と戦争をしたのか」との問いにも答えられない人が多かった。若者たちの中で太平洋戦争に関しては、関心を持たない人たちが大勢いることをこの番組は明らかにしていた。

明治大学は生田キャンパスをオープンする際、同キャンパス内に旧陸軍登戸研究所があり、そこで生物兵器、電波兵器、偽札発行など秘密兵器の研究をしていたことから、その建物をそのまま活用して、太平洋戦争時何が行われていたかを伝える資料館、正式名「明治大学平和教育登戸研究所資料館」を平成22（2010）年4月に開館された^(2,3)。

それは陸軍科学研究所が謀略戦のために行ってきた研究内容を明らかにして、戦争を体験した世代には、戦争のいまわしい思い出を回顧・反省する機会をつくり、平和な世界の創造へと歩む道筋を示し、他方、戦争を知らない世代には戦争の非人道性を示し、再びその過ちを繰り返さないように語りかける場を大学が提供するためであるとされている^(2,3)。

その場は、「歴史教育、平和教育、科学教育の発信地にするとともに、地域社会との連携の場としていく」と規定されておられる。若い世代の人たちの意識が、冒頭のような社会傾向に

あるとすれば、このような場の提供は時機を得たものと言えるであろう。

旧陸軍は太平洋戦争時には10の技術研究所を有し、登戸研究所は其中で第9番目の研究所に位置付けられ、近代の戦争として特徴をなす「謀略」と呼ばれる「秘密戦」のための兵器の研究開発を目途としたという。

この秘密戦は、科学技術の進歩に従い、本質的には手段を選ばぬものにエスカレートしがちであった。当時同研究所で展開された研究内容は、極秘裏に遂行され、敗戦と決まった時に、すべて職員の手で書類は焼却処分されたので、研究内容の資料の類はほとんど残されていなかったというのが実情であった。そこで、明治大学では登戸研究所を平和教育のための資料館とすることが決まると、資料館館長の山田朗教授らのご指導のもとに大学院生らが総力を挙げて調査^(2,3,4)され、展示室が作成されたということである。

当時、登戸で実際に研究に従事されておられた方々は、高齢化が進み、御存命の方の数はかなり少なくなっていたが、資料館開設の決定時点では、幸いにもキャンパスの周辺にはまだ当時の研究所に勤務された経験をお持ちの在住者も多くおられ、調査にご協力を頂けた。中には若い次世代の人たちのためになるならばといわれ、これまで黙していた、重い口を開いて下さり、後世の子孫のために執筆された本⁽⁵⁾も出版されるなど、復原調査は順調にすすめられた。

冒頭の社会現象に見られるように、日本人の戦争体験が急速に風化しつつある今日、戦争時の国民の受けた体験を再現し、平和思想の涵養に資するという趣旨は筆者も強く共鳴するところである。

この調査で、登戸研究所は4科からなる研究部門を有し、終戦直前の昭和19（1944）年の時点での研究内容が次のように概略が明らかにされ、それに沿って資料館では展示がなされていた⁽⁶⁾。

第1科は科長が草場季喜少将で、特殊兵器・電波兵器の開発で、具体的には風船爆弾（この名称は俗称で軍では「ふ号兵器」と呼んだ）、宣伝用自動車（「せ号兵器」）、特殊無線機・ラジオゾンデ、怪力電波・殺人光線、人工雷などである。

第2科は、山田桜大佐の下に、スパイ器材、毒薬・生物化学兵器の開発で、科学的秘密通信法・防諜機器材、毒物合成・「え号剤（動物の餌）」、対動物謀略兵器（家畜用細菌兵器）、諜者用カメラ、対植物謀略兵器などである。

第3科は山本憲蔵大佐の下で、偽札の製造であり、北方班は用紙、中央班は分析、鑑識・印刷インク、南方班は製版印刷の研究である。

第4科は、畑尾正央大佐の下で、第1～3科の研究品の製造・補給である。

当時の研究所の規模は、敷地面積11万坪、建物100棟余り、技術将校・技師・技手などの幹部所員250人、一般の雇員・工員を合わせると総勢1,000名に達する大規模な研究所であったと

いうことである⁽⁷⁾。

筆者は通産省の研究所に在籍して、製紙技術を研究し、特に和紙、非木材繊維、機能紙の製造の研究開発に関与し、それらの産業界、官の組織と緊密な連携組織をもって業務を遂行してきた関係で、その連携組織の製紙試験場、製紙会社などの先輩諸氏の中に登戸研究所の風船爆弾、偽札の製造に関係を持っておられた方が何人かおられ、時折、雑談でその体験を聞く機会があった。

そこで、上記資料館の開設の書籍発刊^(2,3)を新聞で知り、慶応大学時代の学友、佐々木慶太郎とともに同館を訪れた。生田キャンパスは一時期慶応大学のキャンパスでもあり、同君は歴史に関心が深く、大学時代は紙の研究室、藤井光雄先生の研究室に所属していたからである（藤井光雄先生は慶応大学を退職後、旧特種製紙の研究所長をされた）。平成25（2013）年5月20日のことであった。

その時の見学記⁽⁸⁾は別に記した。この時の見学の印象は、筆者が紙業界の分野で研究開発を行ってきたという我田引水的な面もあるかも知れないが、秘密戦用に開発された兵器は紙素材をベースにしたものが重要な地位を占め、研究の遂行に当たっては製紙業界とも深い関係を持っていたとの心象を深めた。

加えて、登戸研究所の研究に直接あるいは間接的に関係を持たれた恩師や試験場長がおられたことが判り、登戸の研究に対して関心が一段と深まった。そこで、見学記を書くに当たって参照した和紙関係の歴史の文献のコピーなどを、老婆心ながら、資料館に送らせて頂いていた。和紙関係の歴史の文献は一般には入手し難いと思ったからである。

具体的には、風船爆弾に関して言えば、手漉和紙工業組合の紙業史関連の書で、高知県（『私本土佐和紙物語』⁽⁹⁾、『土佐紙業史』⁽¹⁰⁾、『和紙博物誌』⁽¹¹⁾など）、愛媛県（『紙と伊予』⁽¹²⁾、『紙及びパルプ』^(13,14)）、岐阜県（『岐阜県手漉紙沿革史』⁽¹⁵⁾）、静岡県（『風船爆弾と静岡』⁽¹⁶⁾）、茨城県（『西ノ内紙』⁽¹⁷⁾）、福島県（紙もあるが主にコンニャク糊⁽¹⁸⁾）、福井県（越前和紙は、気球紙の協力は免れ、軍用紙全般⁽¹⁹⁾）などで、主要な和紙の産地の紙業史の中の登戸研究掲載記事である。

また、法幣の偽造に関与した企業として挙げられていた製紙関連会社は、巴川製紙所、旧特種製紙（現在は特種東海製紙と称する）、凸版印刷の三社であったが、凸版印刷を除く二社は、筆者らが運営していた機能紙研究会（現在はNPO法人）の主力メンバー会社であり、緊密な関係を持ち、それらの社史なども頂いていたことも連絡をさせて頂いた。そして、凸版印刷は、その歴史から見れば、戦前は巴川製紙所とは資本的に不可分の関係にあったことも連絡させて頂いた。

逆に、大学からも製紙業界の関与の記事を多数お送り下さった。

以上のような相互の情報交換の連絡を続けるうちに、明治大学の同資料館から新たに「紙と

戦争」というテーマで企画展を開催したい旨御連絡頂き、館長の山田先生、渡辺先生をはじめ学芸員の方々が、四国にまで調査の手を伸ばされ、筆者もその調査に協力させて頂けた。

これは筆者にとっては大変うれしいことであった。筆者はこの時の一連の出来事は、当時の製紙業界の方々が、軍の定めた厳しく、早急な協力命令に対して、それこそ寝食を忘れて、働いた姿として製紙技術の歴史に留めて、後世に残して置きたいと思っていたからである。当時、軍からは、「少しはお国のために役に立つような仕事をしなさい」といつも叱り飛ばされていた業界だったといわれている⁽¹³⁾。しかも、風船爆弾に対しては、発案した登戸研究所の開発過程と紙貼り・組立作業に従事した女子挺身隊、女学生学徒動員の記録がインパクトの強いドキュメンタリー^(20, 21, 22)となり、製紙業界の死にもの狂いの協力は、その狭間にあって、影の薄いものとなっていたと思ったからである。

同時に、登戸研究所の研究は、一体後世に何を残したかを、反省を込めて考えてみたいと思ったからである。

筆者は、登戸研究所資料館が、これまで収集され、復原された研究記録を、製紙工業界側に視点を置いて展望すれば、研究内容の見方が変わってくるのではないかと思ったのである。

以上のような背景から、本稿では登戸研究所の秘密戦研究を製紙技術の視点から考察し、登戸の研究は製紙業界に何を残したのかを展望して見たいと考えて、まとめさせて頂いた。

なお、製紙業界の視点に近い立場も視野に入れてまとめられたものに、風船爆弾の分野に限れば、吉野興一の著書『風船爆弾 純国産兵器「ふ号」の記録』⁽²³⁾と桜井誠子の『風船爆弾秘話』⁽²⁴⁾がある。特に、前者は現役世代が御存命の時系列の中でジャーナリストの立場から広く、関係者から聞き取り調査されたので、今となっては大変参考になったことを付言して置きたい。

2. 登戸研究所の研究テーマと製紙産業界の結びつき

明治大学では、資料館の見学の中にキャンパス内に残る遺跡のツアーもあり、登戸研究所での研究内容ばかりでなく、史跡もツアーできるサービスを行っていた。

登戸研究所の研究内容と製紙業界の繋がりを考えるのに当たって、筆者が同所を訪問して見学させて頂いた内容を想起しながら、展示室毎に振り返ることで、順次説明していくことにする。

筆者らが訪問したとき、有難いことに、そのツアーの開催日であった。しかも、小雨が降り、その日のツアー参加は私達2人のみであり、ご案内を渡辺賢二先生と学芸員の塚本百合子さんをガイドとして独占したような形で、ご案内頂いた。

（１）動物慰霊碑にて ～篠田所長の専門分野～

この史跡案内で、出発点である動物慰霊碑の前で、この碑は第２科の伴繁雄班長が当時「青酸ニトリール」と呼んでいたアセトンシアノヒドリンを開発して陸軍技術有功章を頂いた時の賞金で造られたもので、碑の文字は所長の篠田鐐が書かれたと話された。

そのとき、渡辺先生は、篠田所長は紙パルプ研究者ではなかったでしょうか、と同氏の経歴を話された。先生のご説明によると、同氏は東京大学の厚木勝基教授のもとで、陸軍最初の学位号を取られたということであった。

厚木教授と言えば、我が国の初代高分子学会会長をされた方で、大日本セルロイドに籍を置いたこともあることから、篠田所長の研究の一つはニトロセルロースからの紙で、瞬間的に燃えてなくなるような紙の研究などをされておられたのではないかと思った。学位論文の研究には伴繁雄班長もお手伝いされたという。

当時、高分子という考え方が提唱されて、その科学的裏付けがなされつつあった時代で、合成高分子は誕生したばかり、日本にはナイロンのサンプルが入手されたところであった。

従って、天然セルロースの誘導体や再生セルロースが広く研究課題であった時代であったと言える。そういう意味で、登戸の研究に繊維、高分子の素材を利用した秘密兵器の開発が根底にあり、天然セルロースから構成される紙の活用が主体となる基本はここにあったのではないかと思えた。

篠田所長の専門が繊維・紙の分野で、この分野に深い関心を持たれていたことを裏打ちする事実は、敗戦後、登戸研究所が解散した際、同氏は巴川製紙所の第３代社長井上篤の求めに応じて、同社に入社され、研究所を設立して、研究所長として特殊紙の研究開発に従事されたことである。第３代井上篤社長の死去に伴い、第４代社長に就任された。しかも、社長在任中に紙パルプ技術協会の理事長、繊維学会の会長職をなさっておられるのである。登戸の研究テーマが紙パルプに偏りがあったことが直接結び付くわけではないが、当時の最先端の科学技術に繊維・紙の原料の基礎科学となる高分子科学がベースに位置づけられていたということは出来る。

なお、私的なことで申し訳ないが、篠田社長の後任となった巴川製紙所の第５代社長井上貴雄は、筆者と東京都立日比谷高校の14ルーム（１年４組）のクラスメートであったことから、このことに、筆者は関心が深かった。また、筆者がお世話していた機能紙研究会においては、巴川製紙所では武祐一郎、中川三郎などの研究者が電気絶縁紙などの分野で業界を牽引していたことを思い出す。

もう一つ、生田キャンパスは、敗戦後、巴川製紙所の工場になり、その後に慶応、北里大学のキャンパスを経て、明治大学の生田キャンパスとなっている。このような土地の転売過程の中にも、登戸研究所と製紙会社の関わりが見えてくるかもしれないと思えた。

ただ、巴川製紙所の社史には、この辺の事情は明確にされていない。同社の戦後以降の発展を辿ると、トナーの製造、紙加工剤、機能紙分野の展開など電気材料の部材面に発展する。登戸の研究で培われたポテンシャルの痕跡が直接、間接的に見られるように思えるのであるが、穿ち過ぎた見方であろうか。

（２）第一展示室の展示

約１時間のキャンパスツアーから、資料館に戻り、第一展示室を観た。ここは登戸研究所の変遷を描き、研究所の歴史的な歩みを表示する展示であった。従来、登戸研究所の航空写真は、戦後米軍の撮影したものしかないといわれていたが、参謀本部の撮影したものが見出され、展示されていた。

この展示室で改めて、登戸の研究の根底となった、第一次世界大戦以降の「秘密戦」というものへの考え方が解説されていた。

近年の戦争は、軍事力だけでなく、経済力と国民の精神力を総動員する総力戦という概念がつくられたという。それに伴い、秘密戦という考え方が制度化されたのだという。

秘密戦とは、敵国内の国防要素を破壊し、国内に攪乱を醸成する手段で、より速やかに戦争目的を達成する目的のために、後方攪乱戦、情報獲得戦、宣伝戦の必要が生まれた。これらを武力戦に対して秘密戦と呼んだと解説されている。つまり秘密戦は、「武力戦と併用または単独で行われる戦争手段で、軍の諜報、防諜、謀略、宣伝的行為及び措置を総称したものである」⁽²⁵⁾とされている。

この定義に従って、登戸研究所の研究テーマが選定されていたことになる。そして、登戸の組織体制と運営体制の解説へと展開されていた。

（３）第二展示室にて

ここの展示は第１科の展示で、風船爆弾作戦の概要である。ここでの展示は和紙からなる気球の製造とその太平洋横断の飛行航路の追跡の研究であった。この研究は、初期はソ連向けの定高度で100kmほど飛行するものであったが、戦局の悪化とともに、最終的には太平洋を越えてアメリカ本土を直接攻撃する戦略兵器に切り替えられて、軍の期待を一身に集め、その気球の大量生産には全国手漉和紙協同組合連合会や特殊紙をつくられているいくつかの会社並びに学徒動員された多くの高等女学校生徒や女子挺身隊など、国民数万人を巻き込む一大協力作戦へと展開した。

この研究はアメリカの原子爆弾の製造研究「マンハッタン計画」とよく対比されるが、研究に従事された高田貞治⁽²⁶⁾の論説を読むと、次のように、風船爆弾（この言葉は新聞用語で、正確には「ふ号兵器」と呼ばれていた）も、かなり厳密な設計が施されている。単なる風船と

異なり、アメリカ本土に着実に到着できるように、高度維持と航路が設定され、目的地に到着すれば、爆弾を投下後、自動消滅するように設計されていたのである。

- ①球皮製造は水素が3日保持できるように綿密に設計されている。
- ②高度は気圧と気温で10,000mを維持し、日没、日の出による温度変化に伴う水素体積の変化は内圧の調整とバラストの投下で浮力を調整している。
- ③高度10,000mを維持するようにバラストを投下し、4,000mで自爆するような電気回路がつくられていた。
- ④航路はラジオゾンデで追跡し、3点測量で位置決定された。
- ⑤低温で機能する時計で、一定時間後に消滅するなどである。

他に、⑥重量オーバーと材料入手難で実現しなかったが、照準器も発案されていた。これは目標上空に達したとき、レンズが太陽光線を受けて焦点を結び、その熱で可溶合金の剥片を溶解して、電線を接続し、兵器投下系回路に電流を通じて、目的の投下と自己焼却破壊する装置である。

ここで、陸軍において、風船爆弾研究はどのように行われてきたか、その過程を顧みておこう。その経緯については、このプロジェクトリーダーとして担当された草場季喜少将の論説⁽²⁷⁾が最も正確であろう。研究は太平洋戦争以前と以降の2期に分けられ、2期目の後段で、製造の基本的規格書までを陸軍で綿密に用意し、生産段階になってはじめて、手漉き和紙工業組合連合会及び中小企業の製紙会社（紙統制会社）の協力を求めている。

〔1〕第1期（太平洋戦争以前）、宣伝謀略用気球の研究開発

気球を飛行機から放球し、等高飛行させて遠距離を爆撃するというアイデアは、昭和8（1933）年頃からあり、東満州の国境からウラジオストック地区を攻撃するものとして開発され、到達距離は100kmであった。

この兵器の開発は、登戸の前身である陸軍科学研究所時代で、担当したのは小林軍次少将、辻川少佐、宮川技師の三人とされている。この三人の気球の構成材料はコウゾ紙とコンニャク糊の重ね貼りであるとしているが、誰が発案者であるかは判らない、と一條三子⁽²⁸⁾は「小川町の和紙と十五年戦争～風船爆弾の嚆矢～」と題する論説の冒頭で書いている。

この論説の主題となっている小川町とは、埼玉県比企郡小川町で、和紙の産地のことである（拙著、『和紙の里紀行』31～58頁、美巧社、2015年参照）。同地の紙の原料コウゾは「那須コウゾ」と呼ばれ、埼玉・群馬・茨城地区でコンニャクと一緒に栽培されていた^(17,29)。歴史的に見ると、那須コウゾの栽培地はもともとは水戸藩で、その紙は「西ノ内」と呼ばれ、久慈川流域の西野内地区でつくられていた。ここはまた、コンニャクの産地でもあったということは注目される。

論を気球に戻して、一條三子⁽²⁸⁾は、三人の研究を実際的にリードされた中心人物は「近藤技術将校」であったと、小林少将の御長女からの風聞を書いている。

そこで、風船爆弾に関係した近藤技術将校なる人物がキーパーソンであると考えられるので、更にその近藤なる人物を調べると、近藤姓の人物で、風船に関係する人物が二人出てくる。一人は近藤石象といい、関東軍総司令部参謀部作戦班付、もう一人は近藤至誠である。

前者の近藤石象は気球攻撃を提唱し、昭和17（1942）年に関東軍総司令部参謀部作戦班付になり、隠密空輸挺進法のプロジェクトリーダーになったとある⁽³⁰⁾から、登戸の風船爆弾の研究には関係がないが、風船兵器のところでまた出て来る。

後者の近藤至誠は、「陸軍士官学校9期卒で荒木貞夫大将と同期の人物で、陸軍少佐の時、デパートのアドバルンを見て、「風船爆弾」での空挺作戦を提案し採用されなかったため、自ら研究を行うことを決意し、軍籍を離れた」とあった。

従って、小林少将のご息女の示唆された近藤とは、国産科学工業研究所の所長の近藤至誠のことであると思われた。確かに、この近藤至誠と国産科学工業研究所は後段の民間企業との関係で、風船爆弾の製造と密接な関係を持っていた。同研究所は後に国産科学工業株式会社となり、和紙業界の風船製作の指導に当たっている⁽⁹⁾。

さて、このような初期のアイデアの段階の過程で、昭和14（1939）年には関東軍の第2気象連隊内に風船爆弾の研究教育に専念する第7中隊が設置され、実用試験が行われるようになったという⁽²⁸⁾。近藤石象の周辺のことである。以後しばらくは対ソ連戦用兵器として位置付けられていたが、昭和16（1941）年12月に太平洋戦争に突入し、対米戦秘密兵器の役割が与えられた。ただ、この期に至っても関東軍では対ソ戦用兵器として独自の研究がなされた。この時の気球は打ち上げから爆弾投下まで、体積が同じなので、「等球気球」と呼んだと東京陸軍兵器本部造兵部監督官であった高石馨⁽³¹⁾は書いている。

もう少しこの期の研究について、軍ではなく、民間での研究を述べておこう。気球紙の基礎的な研究は軍ではなくむしろ、民間でなされていたからである。

一條三子⁽²⁸⁾は、先に述べたように、和紙の産地、埼玉県の小川町と気球紙の関係を記述するなかで、「コウゾ紙とコンニャク糊からなる風船爆弾を実用化するために、近藤至誠は軍属を離れて、国産科学工業研究所を立ち上げて、民間人の立場から研究をされた」と書いていたからである。

軍属を離れて国産科学工業研究所を立ち上げた近藤至誠に、小川町で造られるコウゾ紙を結びつけたのは、和紙問屋の老舗小津商店であったという。この両者の結びつきは『小津三百三十年の歩み』に詳述されているということである。小津商店は東京の日本橋にあり、我が国で最も古い和紙問屋（文献⁽¹¹⁾，159～164頁参照）で、和紙産地のことは熟知している。そのお陰で、気球原紙に小川産の「細川紙」が使われるようになったと記されている。

比企郡小川町及び秩父郡秩父村で造られる和紙（ここでは小川産和紙と略称）は、通常「細川紙」と呼ばれている。それは同地区が元来紀州国（和歌山県）伊都郡細川村（高野町）の技術を移植したからである。つまり、小川産和紙は眞言宗高野派の僧侶が使った高野紙と同系統の紙なのである。

「細川紙」は、和紙の歴史の中では「石州半紙」、「本美濃紙」とともに国の重要文化財として指定されている。那須コウゾという最良のコウゾを用いて漉き上げた和紙で、強度が均質で強く、軽量の紙である。平成26（2014）年にはユネスコ無形文化財遺産にも登録された。

那須コウゾという和紙原料が風船爆弾に結びついたことは、最も上質なコウゾが球皮原料として選ばれことを意味する。なぜならば、茨城・群馬・埼玉辺りがコウゾ栽培の北限で、育ちがあまり良くなく、そのために丈も小さく、繊維が細いのである。そのパルプ繊維は細く、強く、軽く、均質な紙を与えるのである。風船爆弾には最も適した特性を具備していた紙であった。偶然ではあるが、このように適する紙が東京の近くにあったことが幸いであった。

しかも、那須コウゾとともに接着剤としてのコンニャク糊も栽培地がほぼ同じで、畑作方式と称してコウゾとコンニャクは同時に同じところで栽培されていたのである。それ故、手近なところから、最も適した紙原料も糊原料も手に入ることが出来たのである。

このお陰で、国産科学工業研究所では、昭和11~12（1936~37）年頃までには、同所の和田栄一が球皮に懸垂機器を取りつけるまでに気球爆弾の開発が進んでいたという。いわば、初期の風船爆弾は、ほぼこの民間会社で基本的な製法が完成していたと言える。

先に小川産の和紙、「細川紙」を結びつけたのは小津商店であるを書いたが、それは同社の岡村政三という人物であった。当時の商法に従えば、消費地問屋である小津商店は産地問屋を介して取引しなければならず、そこで、小川町の現地問屋・新井商店の新井郡時を指名し、使用目的を明らかにせぬまま生産者の久保喜八、関口実平に試験漉きを依頼したという。いわば、和紙の自然の商取引の中で、風船爆弾の原料が、その産地と結びついたといえるのである。

風船爆弾用の紙の条件は、原料として、その年の春芽吹いた一年もののコウゾだけを使い、晒す水も特定の場所の清水だけ、あまりに薄くて重ねた紙をはがす時には湿紙がよく壊れ、カンダ（乾燥板のこと）を裏返すなどの工夫も必要だったと書かれている。薄く漉くために工夫が必要であった。

気球造りは、この紙6尺（182cm）×2尺2寸（67cm）に別に漉いた2尺2寸の紙を3枚並べて貼り、2層にした。コンニャク糊は20数回重ねたという。コンニャク糊も伝統的な使い道の中で選ばれているのである。

このようにして、民間ベースで、国産科学工業研究所の特別注文の気球紙（ふ号兵器では「生紙^{きがみ}」と呼んでいる）が埼玉県小川で久保、関口によって造られ、小津商店を介して同研究

所に納入されていた。そして、同研究所で気球に仕立てられ、関東軍に送られ、宣伝用気球として使われた。その時は爆弾ではなく、低空の地上風を利用して、敵の背後に宣伝ビラを散布するものであった。

このように早い時期から気球紙が和紙の中でも細川紙という軽くて強い紙をコンニャク糊で貼り合わせるという基本的な工法が結びついたことは、その後の「ふ号兵器」の開発に効率的な展開を許すことになったのである。

以上の小川町と気球の結びつきの話は、一條三子⁽²⁸⁾の論説から引用したのであるが、時代がいつ頃のことなのかが、明確には読み取れない。筆者は恐らく昭和8（1933）～11（1936）年頃の出来事ではないかと思っている。

因みに、風船爆弾の経緯を話し合った紙及びパルプの座談会⁽³²⁾の中で、登戸研究所の紙の専門家伊藤覚太郎が、風船爆弾の生産に当たって、全国のコウゾ黒皮・白皮の生産量350～400万貫の中で、小川町に配給されたものは32.5万貫であったと発言している⁽³²⁾ところを見ると、軍は埼玉県の手漉和紙工業会に期待することが高かったと思われる。

当時、この分野で、この地域の手漉和紙工業組合をリードしておられたのは、埼玉県製紙工業指導所長の中村和であった。同氏は、文化庁で手漉き和紙部門を統括された柳橋真により、当時鳥取県工業試験場の技師であった小路位三郎とともに、手漉き和紙業界を統括されたリーダーだったと評されている。筆者の現役時代（昭和の後半期）でもそうであったが、埼玉県製紙工業指導所は、埼玉県だけでなく、関東地区全域の和紙産業を統括していた。一條三子⁽²⁸⁾は小川町と風船戦爆弾のかかわりの中で、同氏が『関東特産小川和紙』という小冊子を書き遺されていると文献欄で述べられている。小川和紙に関する文献は少なく、もし残されていれば貴重なものであろう。

しかし、この段階では、まだ登戸研究所とは同氏は登戸の研究とは直接的な関係はなかったと思われる。

〔2〕第2期（太平洋戦争時）、攻撃用気球への変身

太平洋戦争の初戦は奇襲攻撃作戦が功を奏して、戦勝ムードであったが、昭和17（1942）年4月にドーウ・リトル空襲を受けてから、軍の作戦本部は強く衝撃を受け、米国本土攻撃をする作戦を構想した。

最初の反撃作戦においては、海軍の力を借りて、潜水艦で太平洋西岸1,000kmまで近づき、潜水艦から爆弾を積んだ直径6m程度の気球を揚げるという比較的単純な作戦であった。

しかし、ミッドウェー沖海戦で海軍が壊滅的な損害を受け、潜水艦の利用は無理と海軍から断りが入り、太平洋横断型気球の開発作戦へと切り替えられた。

〔2-1〕第2期前期（太平洋戦争中期）、潜水艦利用の中距離風船爆弾の開発

昭和17（1942）年秋ごろからアメリカ本土に艦船で接近し、風船爆弾で攻撃を行うことが考えられ、昭和18（1943）年初頭になって、潜水艦ならば西海岸に1,000kmまで近づいて攻撃出来ると考えて、直径6mの気球を利用することが検討された。それは昭和18（1943）年9月に中央气象台から提案された着想に基づくもので、海軍でも独立に研究が進められていた。そして、陸軍では、米子付近から本州を横断して太平洋上まで飛行させる実験がなされ、可能性が確認された⁽³¹⁾。

このアイデアは陸軍のみならず、海軍自体も持っていて、相模海軍工廠が海軍気象部と協力して、行われていた。研究に当たったのは、相模工廠の田中清少佐、海軍気象部の足立左京中佐などであった^(33,34)。海軍のものはB型気球と呼ばれ、陸軍のものをA型気球と呼んで区別された。

B型気球は羽二重をゴム引きし3枚合わせた球皮である。構成は、気球本体、簡単な投下バラスト及び投下弾投下装置及び投下弾からなっている。この球皮の直径は9.1mで、排気弁を有し、座帯吊索が付いていることは同じであるが、球皮は強靱で、そのために吊索の数は少ない。強度は大きい、重く、高価である。設計は名古屋大学の中村教授や藤倉工業の関根技師が行ったと書かれている⁽²⁷⁾。

陸軍の無圧方式に対して、海軍のものは有圧方式であった。水素ガス漏れは球皮を厳密に検査すれば、2～3日程度の飛行ならばなんとか持ちこたえられるということで、海軍はこの選択を下した。これも「等球気球」である。

深川の元飛行機格納庫で水銀60mmの耐圧試験、ガス漏れ試験が行われた。その後、この技術は、陸軍に移管され、耐圧水銀60mmの排気弁を付し、内圧が過度に上昇した場合の破裂防止対策が施された。そして、昭和19（1944）年11月一宮で行われた飛行実験では87時間の飛行記録が樹立されたという。陸軍は、海軍のメンツを重んじ、海軍の技術も検証したのである。

海軍の有圧方式に対して、陸軍のA型気球は無圧方式で、高度維持は後述するように、バラストの投下で行う。バラスト投下による重量減量で高度を復するもので、高度は気圧で決定している。気球はバラストの重量に見合う平衡高度に達する。朝の日の出の時は、ガスの膨張に従って弁から水素ガスが放射するので、高度は特別な変化は起こらない。1回の夕刻に対して、水素は収縮するので、大体1割余りのバラストを投下して、高度を保持する。このようなことは翌日ももう一度同じ過程を繰り返す。もし太平洋横断に3日以上かかる場合には、目的地到達は不能になるという計算になる。しかし、球皮の機密性は有圧方式に対して極めて緩和になり、和紙/コンニャク糊系で、十分対応できるという計算であった。

どちらが実際に有利か、球皮材料について第8研究所の高田少佐、小日向少佐らが、ゴム引き布、油脂皮膜、合成樹脂、合成ゴム、各種糊料など当時得られるあらゆる材料を涉猟試験し

た。そして、結論的に和紙/コンニャク糊系に勝るものは発見できなかったと草場少将⁽²⁷⁾は書かれておられる。

このように和紙素材とコンニャク糊の選択は極めてすぐれた素材を選択したことになったのであるが、これは章を改めて、天然セルロース繊維の特性とそれから水を媒介で造られる製紙技術を考察することにする。

〔2-2〕第2期後期（太平洋戦争末期）、高層偏西風利用の太平洋横断遠距離風船爆弾の研究

昭和18（1943）年7月、陸軍省軍務局長佐藤賢了が「何か敵をアッとさせる手はないのか」という発想を求めているところ、上空高層の偏西風を利用する風船爆弾の案が急に現実味を帯びてきた。

そこで、中央气象台に勤務されておられた荒川秀俊技師に調査依頼し、太平洋上層気流の基礎的な調査が行われ、風船爆弾の軌跡の推定図がつくられた。それは太平洋上空10,000m及び12,000mの高度における月平均気圧を推算し、等圧線を引いたもので、気球のストリームラインは、この等圧線に沿い、風速はこの等圧線の間隔で表わされることになる。これを基に、放球後の24時間後、48時間後、72時間後の気球位置を推定し、気球の全流軌跡図が作成された。このチャートから気球の航路が推定出来たのである。

気球爆撃について、昭和18（1943）年3月南方作戦が急になって、潜水艦を気球攻撃用に使うことはできなくなったと陸軍に断りが入り、海軍の成果はすべて陸軍に移管され、陸軍では有圧方式にすべきか、無圧方式にすべきか、激しい議論が交わされたことは上述した。

結論は無圧方式を選択するということであった。

理由は、①従来の研究の蓄積から急速に有圧方式に切り替えることは困難である、

②量産は有圧方式では困難である、

③コストは無圧方式で1球2,000円、有圧方式で10,000円以上と見積もられた、

④有圧方式はゴム、ベンゼンなど重要な軍需資材を多量に必要とする、

⑤有圧方式は軍隊で放球することが難しい、など。

かくて最終決定は、球皮に使う材料としてバイオマス由来の天然セルロースからなる和紙とコンニャク糊の貼合せで構成した球皮からなる風船爆弾を放球することに決まった。

昭和18（1943）年8月、兵器行政本部から太平洋横断の「ふ号」作戦の本格的な研究命令が発せられた。これまでの研究を活かして、大量生産が出来るように、設計規格を定めるように準備が始まった。

基本設計は、冒頭で述べた太平洋横断気球の最終設計と重複するが、再度整理し直すと、要点は次のようである。

①和紙ベースの無圧方式気球を利用し、バラスト投下によって飛行高度を保持すること、

- ②気球の直径は約10mとする,
- ③飛行高度は初期10,000m,
- ④全部のバラスト投下した時点での重さは約12kgとした。

それに伴って、気球紙の設計については、昭和15（1940）年に第3科で法幣の偽造プロジェクト「杉工作」を担当していた伊藤覚太郎技師が第1科に転じて、和紙の製造の規格書、紙の貼合わせ加工の規格書など、具体的に和紙業界に業務を委託できるような作業手順の作成に加わった。

同氏は実家が万常紙店であったことから、東北大学で化学工学を専攻し、王子製紙での研究業務従事中に昭和13（1938）年に召集され、幹部候補生として登戸研究所に配属された人物である。終戦後は、実家に帰り、第4代目マンツネ社長となられた^(32,35)。研究所時代には、手漉き和紙の供給量が不足したので、コウゾの機械漉きを手掛けている⁽³⁶⁾。

因みに、登戸研究所で「紙と戦争」展で特筆される研究者は、筆者の私見では三人おられる。一人は所長の篠田籛、二人目は伊藤覚太郎、三人目が偽札プロジェクトを行い、戦後は名古屋で明和グラビア化学を設立した大島康弘⁽³⁵⁾である。

この段階で、伊藤覚太郎は和紙工業組合の専務理事森沢武馬及び埼玉県の製紙指導所長の中村和と密接な連携を取ったものと思われる。

〔2-2-1〕陸軍の手漉和紙工業組合への協力要請

気球の本体の設計は、これまで国産科学工業研究所（近藤至誠の歿後、国産科学工業株式会社となった）と埼玉県小川町の手漉き和紙業者の線で極秘事項として進められてきたが、作戦を実行するためには、気球紙、即ち生紙の大量生産を手漉和紙工業組合連合会に発注の命令を下さねばならなくなった。和紙組合が密かに命令を受けた時期は、ドーウ・リトル空襲のあった昭和17（1942）年の年の暮れだ⁽³⁷⁾という。

当時、手漉和紙工業組合連合会は国家総動員法で統制組合になっていた。産地組合は主たる産地では規約を改定した。岐阜県と福井県の改訂された規約を見ておこう。美濃紙の里で見ると、産地問屋の商業資本の支配を脱し、工業者主体の組織となり、また、親方制度が廃止され、漉き子が親方から分離し、戦時経済、即ち統制経済に順応した組織になっている。越前和紙工業組合⁽¹⁹⁾でもほぼ同様である。その時代の手漉和紙工業組合の組織と理事長名を探したところ、手漉き和紙で人間国宝になられた安部栄四郎の履歴を著した本⁽³⁸⁾に掲載されていた。

軍に呼び出されたのは、紙統制会社の社長（森沢武馬の論説では理事長となっている。これは手漉和紙統制組合の理事長かも知れない）と全国手漉和紙統制組合の専務理事であった⁽³⁷⁾。呼び出し先は陸軍省軍需課であった。後年、風船爆弾に関する座談会⁽³²⁾で、森沢武馬らが軍

との関連性を回顧しているのを見ると、理事長とあるのは紙統制会社社長の信貴英蔵で、その時森沢武馬は日本手漉和紙工業組合連合会専務理事という立場であったのではないかとも思う。紙統制会社とは、洋紙、板紙、手漉き和紙の各連合会を統一した会社であった。

招集において、軍は紙の使用目的も言わず、100%コウゾ紙、特に典具帖紙に似た薄紙を大量にしかも緊急に調達するようにという命令を下した。

軍の調達令は、①当時コウゾ（白皮・黒皮込み）の生産量は350万貫で、民需を圧迫しないように、何期かに分けて集めること、②高知、愛媛、岐阜、福岡、鳥取、埼玉、石川の和紙の産地7県から集めること、③各県の折衝は迅速に円滑にすること、④これらの各県の関係者は軍の囑託とするというものであった。

この命を受けて、森沢らは指定された県の調達指導者を決めた。高知は試験場長の高橋享、愛媛は加藤嘉一場長、福岡は西野弘技師、鳥取は小路位三郎技師、埼玉は中村和指導所長、石川は浜田技手（後年、鹿児島工業試験場に転任された方）などが参集している。これ以外には岐阜県の森技師などがおられる。

当時、手漉き和紙の主要な産地には製紙試験場（時に製紙指導所、工業試験場）があり、各産地の技術、経営の指導を行っていた。試験場の技師は、製紙技術官と称し、場長クラスは県を跨いで人事異動出来た。筆者が製紙分野を担当した時代からの組織構成から考えて、高知、愛媛、埼玉、鳥取、福岡は製紙関係の場長またはそれに準ずる技師、石川には製紙試験場はないが、工芸分野の担当者が集められたのではないかと思う。そこで、コウゾの原料の収集量や製品規格などを調査することが決められたのではないかと思う。森沢は「紙及びパルプ」誌の座談会⁽³²⁾では、コウゾの生産量を聞かれて、白皮と黒皮合わせて350~400万貫と答えている。そして、各産地に帰って、実際に在庫調査をされたと思われる。ただ、その時は、命令の目的は軍から明らかにされなかったが、何回か接触しているうちに、業界では用途は風船爆弾だと推測された。ただ、他言は出来なかった。軍令は厳しいものであったが、生産を担当する和紙組合とは再三再四の打ち合わせがあったと思われる。

〔2-2-2〕太平洋横断気球への設計変更

ところが、森沢を驚かすことが起こった。昭和18（1943）年9月のことである。陸軍の作戦の変更で、気球の基本設計が変わり、太平洋横断の気球をつくることになったという知らせである。井出佐重主計少尉が、軍事課の国武輝人少佐から告げられた命令であった⁽²³⁾。

その作戦によれば、気球の直径が6mから10mになり、従って、気球の表面積はこれまでの3倍になり、気球の生産総量もけた外れに多く、万単位の気球を用意しなければならないというのであった。製造仕様書は伊藤覚太郎によってつくられて、井出経由で森沢に渡された。

これに伴う実際の作業は、①コウゾだけを漉いた紙、接着・湿気防止剤としてのコンニャク

粉を集めること、②紙の張り付け作業は、東京蒲田の工場（国産科学工業株式会社）で行うこと、③満球テストは日劇でおこなう。後に、この作業は国技館でもなされたと森沢⁽³⁷⁾は回想されておられる。

ところで、上記の命令を執行するに当たって問題になったことは、産地によって紙の大きさも厚さも、強さもバラバラであったことであった。

伊藤覚太郎は埼玉の製紙工業指導所の中村和らと協議して、表1のように紙の大きさは5種類、強度はタテとヨコの抗張力の比率に統一して、坪量は2水準にして表2のようにコウゾ紙の製品規格定めた^(13,14)と筆者は推測している。規格書の設定に当たって、相談相手の中心になったのは中村和ではないかと考えている。

同氏は小川町が国産科学工業研究所との付き合いが長く⁽²⁸⁾、気球紙に必要な特性についてはよく心得ているし、いくつかの産地（高知、鳥取、埼玉）を渡り歩いているので、各産地の紙の特性の違いなども把握しておられたと思われるからである。軍は小川町に全国のコウゾ生産量の1/10に相当する32.3万貫を支給し、逆に、小川町は、軍には球皮用紙を納めた。球皮は擬草原紙として自動車用のエンジンパッキングに応用され、また中国戦線の防寒服の芯に応用された実績を持っていた。このような軍用品の納入実績もものを言った。この産地は軍の需要で、他産地とは違って、和紙生産者は不況を知らなかったという。

ところで、球紙の標準の次に、軍と和紙業界が協議したことは産地別の生産量の配分であった。森沢は、コウゾの全国生産量を白皮・黒皮ベースで350~400万貫と見なしていたが、軍の要求も、これまでの需要に支障を与えないように調達しなければならないという理解あるものであった。

考えてみると、和紙のこれまでの最大の需要は大蔵省印刷局の紙幣、証券などで、その原料分の圧迫はないようにという配慮がなされたのであろう。

加えて、和紙の産地は、「軍用紙」⁽³⁹⁾、「軍納紙」⁽¹⁹⁾などの名称で軍から発注された特殊紙、一般紙を納入している。気球紙を追加納入する時、そのような産地に対しては一定の配慮をしていたのである。

ところで、軍用紙（または軍納紙）とはどんな紙かと言えば、高知県では、製紙試験場で開発した紙として、航空用ガソリタンク周壁材料、断熱紙、紙製救命衣、食料保存用防湿紙、弾薬包装耐湿紙、航空機尾翼製作用型紙、典具帖紙を母体とした通気性耐水紙、コンデンサー・ペーパー、紙製薬剤煎出袋、蒸気パイプ保温紙、他には動員女工の綿紙などが挙げられている。

岐阜県的美濃和紙組合では、軍票、国債、公債の用紙としての和紙、気球原紙、軍用テント、爆弾包装紙、上述の航空機のパッキング用擬草原紙、地図、図引紙、作戦命令用複写紙などである。また、銃後と呼ばれた内地では温床紙、米麦防雨用テント、蚕種掃立紙などの農業

用紙、他に社債、株券、証券、複写用紙などの需要があり、和紙産業は立派に戦争に参加していると説かれている。そして、陸海軍当局より、美濃和紙組合には直接発注されて納入したものとして、生紙^{きがみ}、西ノ内、泉貨紙、コウゾ半紙、障子紙、ガンピ紙、謄写版用原紙があり、岐阜県産の紙が約8割を占めていた⁽¹⁵⁾と書かれている。前述のように生紙とは、ここでは球皮用紙（純コウゾ紙）のことである。（もともと和紙業界で「生紙」というのはコウゾまたはガンピだけからなる紙のことで、米粉などの糊を添加していない紙を指す言葉である。）

福井県の越前和紙組合⁽¹⁹⁾でも、軍需品としての和紙を多数納めているので、気球紙の納入先の指定は免れている。

このような配慮の下で、軍から生産命令を受けたのは、高知、埼玉、岐阜、愛媛、鳥取、福岡、そして石川の7県であった。これらの各県の割り当てられた生紙の種類を表3に示す⁽¹³⁾。

この時の指令は、万のオーダーの気球をつくるということで、産地に流れたが、産地の事情は厳しいものであった。漉き手の若い男は徴兵、金属製の生産設備は供出、原料コウゾは配給制で不足しているという状態であった。ただ、高知県だけは原料コウゾの栽培に力を入れていたお陰で、在庫があった。そこで、高知産のコウゾが各産地に配給されたという。この段階では、コウゾの品質についてはあまり問われず、とにかく量を確保しなければならないということではなかったかと思う。端的に言えば、原料づくりのための作業時間と人手が十分になかったのである。白皮作りに遊女までも駆り出された話が『土佐紙業史』⁽¹⁰⁾には載っているが、家族総出は普通で、女、子供までも作業に参加した。

軍も規格に合わないサイズの道具は、すべて新調するように予算を付けたようだ。

では、これでどの程度球皮がつくられたか、参考までに、結果を、吉野興一が、愛媛県の実績を基準にして7県の月生産枚数を出しているので表4に示す⁽²³⁾。ただ、原料のコウゾの提供先について高知県以外に、愛媛県、栃木県、埼玉県などの原料生産地からも出荷されたという説⁽⁴⁰⁾もある。

用紙について、手漉き組合だけでは、生産に間に合わず、登戸研究所では伊藤覚太郎らが機械漉きを研究された⁽⁴⁰⁾といい、数社の機械漉き工場がコウゾ紙の抄紙に成功したと報告されている。その会社は、小田原製紙、日本紙業、三菱製紙、巴川製紙、高知製紙、上田製紙、丸井製紙などである。この中で、小田原製紙と日本紙業が特にいい紙を生産したと西健男⁽⁴⁰⁾は書いている。これらの中小企業は、おそらく紙統制会社に所属する企業であったと思われる。

コウゾの機械漉きは、簡単ではなく、古くから試みられてきたのだが、成功していなかった。これらの会社で成功したというのは、コウゾ繊維を切断したり、一部木材パルプを混ぜたり、円網の流れを変えるなどして規格に合格するようにしたのではなかったかと思う。恐らく地合いは手漉きの細川紙と比べたら格段に落ちるものであったと推定する。

後述するが、球皮は破裂しないで、コンニャク層を均一に保持して水素が漏れなければいい

のである。筆者は、コウゾ紙はコンニャク被膜の支持体で、ある程度の強度（抗張力）があればよく、コウゾ及びコンニャクの被膜の水酸基が水分子とともに水素結合によるクラスター構造を形成して、水素の漏洩を防いでいたとの仮説を考えている。

なお、資料館の展示室には、山梨県の市川三郷町（西八代郡市川大門町）で漉かれたという手漉きの道具が展示してあった⁽⁴¹⁾。市川大門町は風船爆弾の原紙生産地ではない。これは恐らく、当時、愛媛県製紙試験場長であった加藤嘉一が同地の指導者として転任しているので、同氏の指導の下に同所で造られたものであると思う。加藤嘉一は、上述のように戦前は愛媛県の試験場長であったが、戦後、埼玉県小川町の製紙試験場長に転任され、退職後は、更に市川大門町の町立製紙試験場の嘱託技師として、同町の製紙試験場の職員小林弘史を指導された。その指導の一環として造られた道具ではないかと、筆者は推察する。

〔2-2-3〕球皮への加工の女子学生挺身隊の協力

コウゾの生紙が製紙工業界に委託され、次はその紙から球皮を製造する工程が円滑に進むように工程を定めなければならない。策定には、コンニャクの研究で著名なお茶の水女子大学の大槻虎男教授が協力され、詳細な製作作業工程が決められたと思われる。

それは、水素ガスが漏れないように均一に紙を貼り合わせ、そして厚く塗布するという指示からなっている。細かい作業は貼り合わせる紙の枚数にもよるが、5枚貼り合わせ場合は、25工程にも及ぶ⁽⁴²⁾。紙と紙の接着には薄い糊を、水素ガスの遮へい用には濃い糊を中間に挿入している。均一に塗られているかどうか、塗り残しがないかは、青色染料を添加し、目視で判るようにしており、また、コンニャク糊は塗布した後、アルカリ処理で α -グルコマンナンから β -グルコマンナンへ転換⁽⁴³⁾されて、紙と緊密に接着され、最後にグリセリンで軟化处理するというものであった（ここで、 α -グルコマンナンと β -グルコマンナンという言葉が出てくるが、これは結晶形の差異で付けられた名称である。天然セルロースとデンプンに見られるエーテル結合の α -1,4-結合、 β -1,4-結合などの α 、 β とは無関係である）。

この接着・塗布作業は若い女性の手で塗るのが最適として、各地の高女の学徒動員、女子挺身隊が担当した。アルカリで手が荒れ、乾燥器を使うので蒸し暑く、高湿度の中で、神経をとがらせる作業であった。それらが後に苦労話の秘話^(20,21,22)となった。しかも、動員者数も多かった。吉野興一の調査リスト⁽²³⁾でみれば、100校以上の学校から動員に出ている。

また、最後には完成品として水素の漏洩を検査する満球テストが行われた。東京では日本橋の日本劇場、東宝劇場、有楽座、浅草国際劇場、両国国技館、京都では甲部歌舞練場、大阪では道頓堀の映画館など大きな建物が軒並み接収されて、それでも不足して応急で建物もつくられたという。

これらは、まさに戦線厳しいなかでの作業であった。国民は「神風」を信じて、黙々として

作業に従事していた。時期は昭和19（1944）年6月以降である。この部分の作業場は小倉造兵廠、大阪造兵廠、名古屋造兵廠や軍の指定学校工場などであった。

〔3〕太平洋横断風船爆弾としての仕上げ

再び登戸研究所の研究に戻る。太平洋横断の気球を挙げる作戦の前後まで戻ることになる。とりあえず潜水艦から打ち上げる設計に基づく試作品が、昭和19（1944）年1～3月にわたり約200個試作され、千葉県一宮で大規模試験が行われた。テストの目的は、気球の飛行状況と高度保持の確認である。この試験は材料の低温低圧に対する性能不良の改善の効果のチェックでもあった。具体的には、緩燃導火索が導火しなかったための改良試験であった。

この問題解決には陸軍第5及び8技術研究所、東京第二造兵廠、陸軍気象部などの研究部門の研究者、中央气象台、八木秀次博士、藤原咲平博士、眞島正市博士、佐々木達次郎博士などの頭脳の協力を仰いだ。そして、9月ごろまでには、滞空時間70時間以上に及ぶものが数回得られるようになった。この70時間の滞空時間のテストが作戦の転換の論拠となったと言える。何度も造り直された設計であるが、次の要点が最終設計^(26,27)の概要である。

- ①気球は直径約10m、下端に排気弁を有し、気球の赤道の少し下に座帯が付き、そこから吊索が下がる。
- ②高度維持装置はバラスト投下の自動装置で、バラストとして重量2kgの砂袋を32個吊るす。
- ③気球と高度保持装置とには、それぞれ投下弾を投下した後、それらを粉砕するための爆弾が装着される。なお、高度保持装置（飛翔装置）にはバラスト投下機構と砂マグネット系装置の2種類が開発された。
- ④投下弾は、5kgの焼夷弾4個と15kgの焼夷弾もしくは爆弾1個より成り、前者はバラストと同様な状態で懸吊され、最後のバラストの役目をなし、高度保持装置の中央に懸吊する。
- ⑤各部の重量分配は次のようである。

気球	75～80kg
高度保持装置	約25kg
バラスト	約64kg
投下弾	35kg
総重量	199～204kg

高度10,000mの気球の浮力は約196kgで、初期高度は10,000mとなる。ラジオゾンデを付したものは、電池の重さが約60kgであるから、高度は9,500m内外。バラストを投下するに従って、逐次高度は高まり、最終的な高度は12,000m近くになる。

〔4〕太平洋横断風船爆弾の発射

反撃の期待を込めた風船爆弾は、福島県勿来（現いわき市南東部）、茨城県大津（現北茨城市の長浜海岸）、千葉県一宮の三か所から放球された。大本営直属の放球部隊が編成され、連隊長は井上茂大佐で、その下に第1大隊1,500名、第2大隊700名、第3大隊600名という編成であった。

水素は昭和電工をはじめとする京阪地区からボンベで運ばれた。ただ、大津だけは現地で水素を発生させた。水素はフェリシリコンと苛性ソーダから生成した。化学反応式は次の通りである。



つまり、水分子のケイ素による還元反応である。この0（ゼロ）価のケイ素は鉄と炭素（コークス）による還元反応でつくられる。

放球の時期と数は、高田貞治⁽²⁶⁾に従えば、昭和19（1944）年11月から翌20（1945）年4月までであり、放球数は、次のように、全体で9,300発、そのうち海軍のB球が300発であったという⁽²⁶⁾。

昭和19（1944）年11月	700発
12月	1,200発
昭和20（1945）年1月	2,000発
2月	2,500発
3月	2,500発
4月	400発

〔5〕アメリカ本土への到達数

放球した風船は、果たしてどのくらいアメリカ本土に到着していたであろうか。米国は厳密な報道規制を敷き、戦争中は殆ど判らなかった。筆者がスミソニアン博物館から入手したMikeshの報告⁽⁴⁴⁾によると、昭和19（1944）年11月4日から昭和20（1945）年7月28日までの間に発見されたものは、285個であった。そこには、到着した場所と日時が詳細に記入されていた。

吉野興一の本⁽²³⁾には、ウェーバーの戦後の調査などを入れて、全体で361個とし、アメリカの各州で発見された風船の分布数を掲載している。他に、レポートとして山林の火災などの発生、そして「オレゴンの悲劇」と呼ばれている爆弾による殺傷なども報告されている。

ただ、この報告で注意しなければならないことは、風船爆弾は元々時限で消滅するように設計がなされていたということである。残存物としてカウントされていたものは、その装置がうまく作動しなかったものの数である。従って、到達数はもっと多かったと考えねばならないで

あろう。明治大学の資料館の展示では1,000発ほど到達していると推定されておられるのも、この論拠に基づくものであると思われる。さすれば、アメリカ本土に到着したものは、確率的には10%余りと言えようか。

余り基礎データがない中での設計であるが、日本の人智を結集した風船爆弾である。確率的には高いとみなければならないであろう。

さて、長々と「ふ号兵器」について述べてきたが、第1科ではこの他の研究としては、「く号兵器（怪力光線）」、「ち号兵器（超短波レーダー）」、「ね号兵器（熱線利用射撃管制装置）」などがあった。しかし、これらは主題から離れるので割愛する。

（４）第3展示室にて

この展示室は、第2科の研究分野で、化学関係であった対人用毒物兵器、「青酸ニトリール（アセトンシアノヒドリン）」などが開発された。動物慰霊碑はその研究の賞金で造られたもので、伴繁雄技術少佐の賞状などが展示されていた。他に、超縮小写真技術として、スパイ用の小型カメラ、秘密インキ、オブラート紙などの研究があり、紙に関係する分野はこの科にもあった。

ただ、主体は対人用細菌、対植物用細菌、対動物用細菌の研究で、実際には採用されなかったが、牛疫ウィルス（牛痘ウイルス）を風船爆弾に積載することは検討され、実験もされたということであるが、実施はされなかった。

（５）第4展示室にて

ここは第3科の偽札製造作戦の研究の展示室であった。これは外見的には、紙幣の抄造・印刷の研究であり、典型的な紙に関係している技術の開発であった。

研究の対象とした「法幣」の発行元である中国国民政府は、抗日戦争期は「重慶国民政府」と呼ばれ、蒋介石総統の政府で、現在台湾を統治している政府であった。この政府の紙幣は「法幣」と呼ばれていたが、これを偽造して発行するというのが第3科の研究課題であった。目的は、偽札の発行で軍の資材を入手するとともに、中国の経済機構を麻痺させて、中国国民の生活を混乱に至らしめ、戦争を迅速に勝利に導くという戦略であった。

〔１〕偽札作戦の起こり

他国通貨を偽造するというのは、国際法に反する行為であるが、対日戦争が長引き、早く結末をつけるということで、この構想は陸軍の参謀本部からの発案であった。

昭和13（1938）年にはじめて参謀本部第8課で試作品をつくられたが、品質が悪かった。

そこで、同課の山本憲蔵は、当時凸版印刷の社長で、第2代巴川製紙所社長の井上源之丞⁽⁴⁶⁾に密かに相談して協力の内諾を得た。このような背景があつて、軍事課長岩畔豪雄^{いわくろひでお}の推薦で、登戸で本格的な研究をすることになった。偽札の偽造には、基本的にはその分野の専門企業の協力が必要と見なされていたのである。

この研究の過程はリーダーを務めた山本憲蔵ご自身の本⁽⁴⁷⁾があるので、詳細は同書を参照されたい。いずれにしても、登戸の研究と巴川製紙所及び凸版印刷を深く結びつける端緒となった。

昭和14（1939）年8月、山本はこの任務を遂行するために、登戸研究所員と参謀本部付との兼務となり、偽札の研究が本格化することになった。この作戦は、参謀本部直結であるため、研究所内でも切り離され、第3科の所員は、他の研究所員にやっている内容を他言することはなかった。つまり、研究所内でも秘密にされて、研究は遂行された。それ故、第3科の建物は、所長と第3科の職員だけしか入ることができなかったということである。

〔2〕偽札製造技術の研究

紙幣の偽造のためには、紙幣発行技術以上の技術がなければならない。紙幣は偽造されないように色々な対策が施されているが、その対策を超える技術を開発しなければならないのである。

最初の問題は、紙に施されている、黒透かしの問題であつた。我が国では「黒透かし（凸漉き入り）」は、使用を禁止されている技術で、業界でそのような技術を持っているのは、内閣印刷局だけであつた。民間企業ではどこも持っていない。印刷局の技術を持って創設された旧特種製紙（現在の特種東海製紙）でも無理であつた。そこで、井上源之丞のコネで、内閣印刷局の退職者を推薦してもらい、その人の助力で切り抜けたということであつた。

法幣は、中国ではイギリス、アメリカに依頼して造らせていた。そのために製紙技術も印刷技術も高かつた。その技術に対抗するために、設備は我が国でも他にはないというほどのパルプ製造装置、抄紙機、印刷機、検査機器などの設備が用意された。技術員は総勢250名、その中で1/3の80名は日本でも超一流の技術者であつたと、リーダーの山本は書いている。

揃えた設備は、山本の著書⁽⁴⁷⁾に詳細に書かれているので、ここでは記さない。研究組織の構成を次に記す。それは3班からなり、班の名称は、研究グループの研究所における配置から取られた。研究内容があらさまに示されるのを嫌つたのである。それは次のようであつた。

- ①「北方班」と称する抄紙関係研究部門は伊藤覚太郎技術少佐以下50名で、設備は長網・円網兼用抄紙機はじめ8点が紹介されている。
- ②「中央班」と呼ばれる検査部門は、岡田正敬技術少佐のもと、技手1名、助手数名で、顕微鏡、紫外線発生器、赤外線鑑別装置などがあつた。

③「南方班」は印刷部門で、名前はあげられてなかったが、リーダーは技術中尉、技師各1名、エッチング技師8名で、原版の修正には凸版印刷の製版部が協力した。設備はイリス4色凸版輪転機など、実に16点に上っている⁽⁴⁸⁾。

〔3〕民間企業の協力

上述のように登戸研究所の研究者は優秀であったが、偽札の発行は本物の発行より高い技術を要求される。そのためには、紙パルプ、印刷分野の専門技術者の協力は必須であった。官の組織の協力として、先に黒透かしの技術のために、内閣印刷局に求めた例を挙げたが、もっぱら民間企業からの助力も求めている。展示パネルには次の三社の名前が挙げられていた。巴川製紙所、凸版印刷、そして旧特種製紙（現在の特種東海製紙）である。

凸版印刷は、このプロジェクトを起こすに先だって、同社の社長井上源之丞と専務の山田三郎太の協力を約束しているところから見て、印刷分野の協力であることは明らかである。エッチング、製版などの分野を助け、印刷設備の運転を助けたものと推定させる。イリス4色凸版輪転機4台、1色A版凸版印刷4台、ザンメル特殊印刷1台があった。ザンメルはドイツから輸入したもので、内閣印刷局にもない印刷機であると書かれている。

また、リーダーの山本の著書⁽⁴⁷⁾では、黒透かしの不十分な紙の印刷を巴川製紙所が行ったと書かれているので、巴川製紙所は製紙分野で協力したと考えられる。

特種東海製紙である旧特種製紙は印刷局抄紙部長の佐伯勝太郎が退職して創立した会社である^(49,50)。佐伯勝太郎は印刷局で造られた、いわゆる「特種紙」のKnow-Howを同社の製造技術の根幹とすることで設立された会社である。「特種」とは佐伯勝太郎の造語で、特殊紙には特別なタネ（種）が必要であるとの考えから生まれた。紙幣の発行こそできなかったが、外国の紙幣の発行のような特殊紙の抄紙技術や紙幣の印刷の基盤技術は、当然持っていたと考えてもよいであろう。協力企業の選定は、さすがに登戸の登戸研究者だと思った。

余談であるが、筆者は旧通産省四国工業試験所にあつて、産官学の組織で製紙分野の先端課題、「機能紙の研究開発」を昭和の高度成長期から平成バブル崩壊期まで担当した。

登戸の研究時代からすれば、20年ほど後の製紙工業界の活動を体験したわけであるが、その時、この「機能紙研究会」のご指導を頂いたのは、特種製紙を設立された佐伯勝太郎の三男の京都大学の岡村誠三教授と神戸女子大学の稲垣寛教授（いずれも故人）であり、この研究会の強力なメンバー会社に特種製紙、巴川製紙所があった。

京大の岡村誠三先生は、旧特種製紙を創設された佐伯勝太郎の三男で、稲垣教授は岡村門下にあり、筆者は旧特種製紙が研究開発力に秀でていることを感じていた。加えて、大学時代に高分子化学を教えて頂いた藤井光雄教授が慶応大学を退職された後、同社の研究所長に就任されたという、余りにも身近な出来事として驚いたことを思い出す。

また、巴川製紙所の第5代社長井上貴雄とは高校のラスメートであったことは、冒頭に記した。このように、偽札の研究に関与した会社が、筆者と個人的に技術の線上で深い関わりを持つ会社であったことも驚きであった。しかも、この両社はともに、その後の機能紙分野の研究開発に意欲的で、ともに大きく成長した。

また、凸版印刷は元来お雇い外人であるイタリア人エドカルド・キヨソーネ（1882~1898）が教えたエルヘー凸版法を企業化するために木村延吉、降矢根次郎が創立した会社であるが、世界恐慌の際、巴川製紙所の井上源之丞が関与して、近代的な工場に発展させて、証券分野などの新しい分野に進出を図っていた。井上源之丞が登戸研究所のプロジェクトに参加されたのも、そのような将来を見る目を持たれていたためと思われる。

その後、同社は日銀券の図案提案、大蔵省管理下通貨製造、証券用凸版多色細紋印刷など特殊な印刷技術を展開し、今日では印刷分野では大日本印刷とともに日本を代表する印刷会社に成長した。

いずれの会社も登戸の贋幣作戦に参加した史実は、極秘事項として、それらの企業の社史には記載はないが、各企業はこのプロジェクトに参加されたことで、戦後の発展の基盤要素を形付けられたものがあつたと推察される。

〔4〕ヨーロッパにおける偽札造り

日本で対中国用の法幣の偽札をつくっているときに、ヨーロッパでは三国同盟のドイツが、イングランド銀行発行の「ポンド紙幣」を偽造していたという事実があるので、参考までに概説しておく。

首謀者はベルンハルト・クルーガーで、ユダヤ囚人を使って偽札をつくらせているので、「ベルンハルト作戦」と呼ばれている⁽⁵¹⁾。偽札の製法は写真製版で、問題点として次の点を挙げている。①原料が綿、亜麻、カラムシ（ラミー）で入手困難、②水質の違い、③手漉きであったことを挙げている⁽⁵¹⁾。ヨーロッパでは手漉きの技術が珍しいのである。

驚くべきことには、通貨の偽造は欧米では通常化しているとして、次のような偽札の歴史を挙げている。①古代ギリシャの都市国家で、敵対する都市国家の銀貨を卑金で偽装した。②1470年、ミラノとベネチアの戦争のとき、ベネチア銀行界の信用失態ためにフリードリッヒ大王は敵の通貨を偽造した。③イギリスはアメリカ独立戦争のとき、言うことをきかなくなった植民地に偽札をあふれさせた。④アメリカ南北戦争の際、詐欺師が偽の南部札を南部に持っていき、偽の北部紙幣を北部に持っていたなどである。

もう一つ、ハンス・アドラーというユダヤ系の人は、『偽札と偽造』という雑誌の編者出版人だったという記載があつた。そんな雑誌が発刊されていたことも驚きであった。

〔5〕偽札の使用

登戸で造られた偽札は、新品ではばれてしまうので、古ぼけ化作業を施して、陸軍中野学校出身者によって使われた。この作業にも女子学生などが参加した。

陸軍では、登戸での偽札造りを「杉工作」と呼び、中国で使う機関を「松機関」と呼んだ。後者の機関の中心は^{さか たしげもり}阪田誠盛で、上海のマフィア国民政府系の秘密結社「^{ちんぱん}青幫」の首領^{とげつしょう}杜月笙と組んで使ったということであった。

結果的には、中国では極端なインフレを起こしたということであるが、中国での経済的な混乱は予想されたよりも大きくなかったようである。

なお、中国側でも日本の軍票の偽札をつくっていたというし、また、中国側では日本側で偽札をつくっていることを見抜いていた、とプロジェクトリーダーの山本は書いている。

（6）第5展示室にて

ここの展示は、登戸研究所の研究内容ではなく、昭和20（1945）年初めの時点で、戦局の悪化に伴って、軍が本土決戦体制としてどのような備えをしたかを展示していた。

大本営、天皇・軍事施設・政府機関の長野県松代への移転計画、そして、同年3～4月にかけて行われた登戸研究所の長野県上伊那地方、北安曇地方への移転などが紹介されていた。

偽札の製造をやっていた第3科は、越前和紙の里、福井県の武生（現・越前市）に予定されていたことは、なるほど、いい場所を選ばれたなと共感を覚えた所であった。

疑問として残ったことは、登戸研究所の研究書類の処分の一環の中で、偽札の研究に使われた設備などの備品類はどのように処分されたのか、ということである。

恐らくは、研究に従事した会社に適当に配分されて引き取られたということではなかろうか。一時期、生田キャンパスが巴川製紙所の所有地になっていたことと、設備の引き取り先と何らかの関係を持っていたのではないかと推定している。そして、それらは陰ながら、戦後の製紙産業界の発展に寄与しているのではなかろうかと、筆者は推測している。

3. なぜ紙パルプ技術が登戸研究所の課題技術の中心になったのか

以上長々と、登戸研究所の第1科から第4科までの研究課題を俯瞰して、その時代の秘密戦の中で製紙産業との結びつく課題が多く、また、和紙産地では「軍用紙」、「軍納紙」と称する製品を軍に納入しており、製紙産業も多面的に戦争に参画したことが判る。

世界史を調べてみると、紙が原因で戦争になった例がある。それは「セポイの反乱」と呼ばれ、1857年にイギリス統治に対してイスラム教徒が起こしたインドでの戦争である。イギリス人が豚の脂を塗布した薬包紙を使い、それをイスラム教徒に使用することを強要したことで、

起こった紛争である。小銃に弾を込めるときに、その薬包紙を口で破らねばならないことが、イスラム教徒の宗教の禁止事項に抵触することで起こった戦争であった。

このように、当時、紙、特に和紙は、兵器の素材として大量に、安価で、手軽に入手できるシート材料で、性能・機能的にも優れ、多方面に応用されていたことを示していたと、筆者は考えている。

当時の素材産業を振り返ると、合成高分子は黎明期で研究の初歩的な段階にあり、高分子素材はゴム、プラスチック工業はニトロセルースをベースとするセルロイド工業などが主体で、合成樹脂は塩化ビニル、ポリスチレン、ポリエチレンがやっと生まれたばかりであった。繊維はナイロンがアメリカで出来たばかりで、我が国にはビニロンが先行していたが、主体はレーヨン繊維で化繊の時代であった⁽⁵²⁾。

こうした中で、風船爆弾用の球皮の材料探索は、陸軍のコウゾ紙/コンニャク糊対海軍の羽二重（絹）/ゴム系という図式になり、これは基本枠材として天然セルロースと絹のタンパク繊維の材料競争であった。結果的には陸軍の提唱した天然セルロース系の勝利になったのである。これは紙素材、特に和紙素材の特性、の優秀さを示したのもと言ってもいいであろう。小川町ではこの球皮系は擬革紙として、飛行機、自動車のガソリン容器のパッキング材にもなっていた。広い応用性も持っていたというべきであろう。

そこで、最後に紙パルプの技術の本質を考察し、風船爆弾の主体資材となった理由を、考察してみたいと思う。

（１）紙パルプ技術の特徴

〔１〕紙の定義とその特性

まず、紙とは何かを議論したい。ここでは、「陸上の植物繊維を取り出し、水に懸濁させて分散させ、濾過して湿潤繊維を配列して、次に乾燥により繊維間結合をつくり、弾性を復元させた、薄葉状のシート」という「狭義の紙の定義」を採用しておく。この定義は、村井操らの定義⁽⁵³⁾を、少し具体的に抄紙工程に沿って、書き直したものである。

ここで、陸上の植物が造る繊維とは緑色植物の細胞壁という堅い殻を構成している繊維組織で、「天然セルロース」と言われている。細胞はcellと呼ばれているので、細胞を構成している繊維状の物質ということで、「セルロース」という呼称を与えたのである。ただ、セルロースは天然に存在するものの他に、人工的に溶解して再生させたレーヨンなどもあり、そのような再生セルロースと区別するために天然セルロースと、「天然」という接頭辞を付したのである。

この植物細胞壁を壊して、天然セルロースを取り出すことを「パルプ化」と称している。以下、この辺りの話は高分子化学の分野で、少し学問的になることをお許しいただきたい。

細胞壁から取り出されたセルロース繊維は、ブドウ糖（あるいはD-グルコース）という基

本分子を、 β -1,4結合（引用した文献⁽⁵⁴⁾では(1→4)- β -D-グルカンと表示されている）という結合方式で直線状に連結されたポリマー（高分子化合物）である（図1）。つまりブドウ糖が真っ直ぐに手をつないだ化合物である。

そして、この分子鎖は、まず一本の分子鎖の中で、D-グルコースの中の水酸基（OH-基）が水素結合という結合で、隣同士のD-グルコース基の水酸基と結合して強固な線状分子となっているのである（図2、図中、水素結合は●……●で表記されている）。従って、繊維分子の強度が高い。

更に、この分子鎖は平行に並んだ分子鎖とも同じく水素結合でつながり、面状に拡がりを持つことができるのである（図3）。つまり、2次元構造体を取ることができるのである。

加えて、上と下の分子鎖同士とも更に結合出来る（図4）ので、面にある程度の厚みのあるシート状（3次元構造）になるのである。

このように分子鎖内、分子鎖間を水素結合で結合されているので、天然セルロース繊維は、水を介在させて、漉くことで図5のように分子内部の水酸基で結びつけられるシートが形成できる。

このように天然セルロース繊維は、水分子の助けを借りて、シート状にすることができるのである。それを繊維分子間の水酸基同士の水素結合で結合させるためには、余分な水を除かねばならず、そのため、乾燥で水分子を徐々に除き、分子鎖間の水酸基同士を水素結合で結ばれるようにするのである。このように、天然セルロース繊維を分散、濾過、湿紙の乾燥を経て造られたシートが紙である。

言い換えれば、紙というのは、水の媒介で天然セルロース繊維を、その構成するD-グルコースの分子鎖間の水酸基同士を水素結合で結合させて造られた薄葉状のシートなのである⁽⁵⁴⁾。この結合は可逆的で、このシートを水の中に入れれば、分子鎖はバラバラになる。

繰り返すことになるが、水に分散、懸濁し、濾過するという抄紙工程の操作は、セルロース分子鎖を水素結合が形成されやすいように、パルプ繊維を配列させる作業であり、その濡れた状態の湿紙を乾燥させることは、水素結合の間に介在する、余分の水分子を除き、セルロースの構成単位であるD-グルコースの分子鎖間の水酸基同士の間で直接水素結合を形成させて、シート状にする一貫した操作工程なのである。それ故に出来た紙は水素結合の塊のようなシートである。

水の存在だけで、繊維同士が接着され、強固なシート、つまり、紙が出来るということは「天然セルロース」の持つ素晴らしい、優れた特性である。この特性は数多ある化学繊維、合成繊維でも、他には殆ど持ち得ない特異な特性である。このような優れた特性故に、球皮素材として紙が選ばれたのである。

天然セルロースでなく、再生セルロースであるレーヨンでもこの特性は失われてしまうので

ある。筆者らが機能紙研究会をつくって研究を行ってきたのは、水の介在で形成される天然セルロースのような繊維間結合形成性を、一般の繊維にどのように付与させるかということが課題であった。

なお、このようにして2次元シートの形にした紙は、色々な加工手段があり、多方面に応用できる。紙の用途は3Wで現されるといわれている。それは、①Write：情報機能材としての用途で、新聞紙、本など情報の媒体としての機能である。登戸研究所では、偽造紙幣の研究であった。②Wrap：包装材料であり、包装紙、段ボールなどであり、風船爆弾は、風船という水素ガス容器の開発であった。③Wipe & Waste：家庭紙であり、ティッシュ、トイレットペーパーなどの用途である。

〔2〕コウゾ紙の製造と特性

天然セルロースからなる紙は、細胞壁の由来する植物原料の違いで大雑把に言って「洋紙」、「板紙」とその他「特殊紙」などに分類されている。「和紙」は特殊紙の一分野に属し、伝統的に^{じんび}韌皮繊維と呼ばれる灌木の木の皮が原料である。その中の維管束という繊維組織を使っている。代表的な韌皮繊維はコウゾ、ミツマタ、ガンピなどである。

このうち、球皮材料となったコウゾ繊維は長く細いので、漉くのは難しいが、強くて軽い紙を与える。しかも繊維を絡めるように漉けば、薄くもできる。この性質、強く、薄く、均一な地合いというのが風船爆弾用の球皮には最適であった。薄い紙の例は、高知の典具帖紙、奈良の吉野紙などが造られていたことである。登戸近くのと紙の里で造られている紙としては、細川紙と西ノ内紙が知られており、この用途には適性があった。近藤至誠が求めていたのは、このような質の紙であった。

そこで、まず原料であるコウゾとはどういう植物かを見ておこう。

コウゾはクワ科に属するが、いくつかの品種があって、大変複雑である。大別すると、3～4種である⁽⁵⁵⁾。①まず、カジノキ (*Broussonetia papyrifera* (L.) Vent) で雌雄異株である。漢字では楮、構などと書く。②次がヒメコウゾ (*B. kazinoki* Sieb.)。この学名をコウゾだと書いた文献も多い。③コウゾ (*B. kazinoki* × *B. papyrifera*) で、前二つの交配種カナメ、クロカジだと見ている。これは雌雄同株である。④ツルコウゾ (*B. kaempferi* Sieb.) である。これは森本正和⁽⁵⁵⁾の説に従ったものである。風船爆弾の球皮に適しているとみなされているのは、コウゾ系統で、カジノキ系統は繊維が太過ぎで、紙面が荒くなり過ぎて適していないとみられた。

産地ではそれぞれ特有の呼び名がある。埼玉県や茨城県では、栽培されている地域名を取って「那須コウゾ」と呼び、良質のコウゾとして高く評価されている。コウゾはもともと熱帯の植物で、この地域が栽培の北限で、大きく育たず、そのため、細い繊維で均質なシートをつく

り易く、強靱な紙を与える。この地域では、アカソ（赤楮）とかアサカジ（麻楮）などとも呼ばれている品種が最もよい⁽⁵⁶⁾。他にアオソ（青楮）や山楮（山草）^{やまかじ}もあるが、品質は劣るという。

球皮の大量生産の時に業界に配給されたのは、高知産のものであったが、高知ではアカソ、アオソ、タオリなど5～6品種ある⁽⁵⁷⁾。ただ、風船爆弾用ではアカソからタオリぐらいまでの品種がよいとされた。

このような長い靱皮繊維を漉く技術として、伝統的に確立している技法が粘剤（トロロアオイ、ノリウツギの粘質物）を添加して、「流し漉き」という方式である。これらの粘剤はいずれも多糖類の一種で、繊維の表面に付着し、分散を助け、繊維の絡まりを抑制し、濾過に当たって、繊維に整然とした配列をさせるのに役立つ。濾過して、シート形成後は分解してしまうので、出来た紙は地合いの良い紙が得られる。ここに気球の球皮としての要求特性を満足する特性があるのである。

当時、コウゾは機械で漉く技術はなかった。しかし、機械漉きであると紙が長く、紙継ぎの必要がなく、しかも紙の供給量が不足したので、検討された。登戸では伊藤覚太郎は円網の流れを邪魔板で乱し、ヨコ方向にながれる傾向を抑制する方式⁽³⁶⁾を検討した。機械漉きに成功したという会社が2、3社あった⁽⁴⁰⁾が、戦後コウゾの機械漉きが始まるのは、懸垂短網、傾斜ワイヤーが考案された昭和30（1955）年前後からであり、市場価値のあるものにするには、かなり時間を要している。球皮には使えても、やはり手漉きと比較しては見劣りのする地合いであったと思われる。

機械漉きに関しては、紙及びパルプの座談会⁽³²⁾に出てくる、昭和19（1944）年4月に紙統制会社という、中小企業の「洋紙」と「板紙」と「和紙」を統合した株式会社が関与したのではなかろうか。手漉和紙工業組合連合会の専務理事の森沢武馬も、この会社の手漉課長を兼務しておられた。この会社の社長が信貴英蔵であった。

ただ、この統制会社には王子製紙などの大手製紙会社は含まれていないようだ。小田原製紙の西健男⁽⁴⁰⁾が機械漉きをおこなったという会社名を日本紙業、三菱製紙、巴川製紙所、高知製紙株、上田製紙株、丸井製紙株と書かれているが、この紙統制会社に属していた会社であろう。このうち、成功したというのが、小田原製紙と日本紙業であったと報告している。

別に、高知製紙も国産科学工業株式会社で指導を受け、製造し、成功している⁽⁹⁾。この報告では、成功したのは同社だけだと書かれている⁽⁹⁾が、小田原製紙の西健男の報告している上記の2社を含めねばならない。当時、各社とも作業は秘密裏に行われていたので、このような報告になったと解される。

参考までに、王子製紙のような大手では何をやっていたかということ、一部軍需工場になり、残された製紙工場では、苫小牧工場ではテックス、アルコールなどの燃料造り、また、富士第

3工場では擬綿、淀川、熊野工場ではコンデンサー紙、そして岩淵工場では火薬原紙、江戸川工場では地図用紙などいずれも戦争に関係した紙を生産していたことを記しておこう⁽⁵⁸⁾。

〔3〕コンニャク糊の機能とは

天然セルロース紙同士の接着剤としては、通常デンプン糊が使われている。デンプンの主たる構成物であるアミロースは、天然セルロースと同じく構成分子はD-グルコースから構成されていて、ただ、その結合方式が α -1,4-結合と呼ばれていて、円形に輪を描くような形でつながっているポリマーである。似た化合物同士はよく接着するので、天然セルロースからなる紙の接着には、デンプン糊が普通使われている。

しかし、気球紙の接着に選定されず、コンニャク糊が採用された。これには特別の理由があるのではなかろうか。デンプンはアミロースとアミロペクチンの混合物で、原料により特性が変わり、特に安定した結果が出なかったのではなかろうか。

というのは、気球紙の貼り付け作業においては、単に紙同士の接着だけでなく、コウゾ紙の上に保水性の高いポリマーの被膜を形成させ、水分子を保持し、水分子間の水素結合で水素ガスの漏洩を防止する機能を付与することも意図していたと見られるからである。そのためには、グルコマンナン構造を持つコンニャク糊の方が適しているとの実験結果を得て、選択されたのではなかろうか。

その理由は、コンニャク糊の成分、グルコマンナンは、コンニャクの種類などによっても違うであろうが、図6のように β -D-グルコースと β -D-マンノースから成り、それらが β -1,4-結合でかなりつながっているため、天然セルロースからなるコウゾ紙に密着出来る確率は、デンプンのアミロースよりも高いのではないかと考えられる。 β -1,4-結合が長く続いているD-グルコマンナンの分子鎖の方が、セルロース分子と分子鎖との間に水素結合を形成し易いのではないかと思ったのである。

しかも、グルコマンナンは保水性が高く、しなやかで、グリセリンによる軟化処理を施すことにより、その塗膜は水分子とセルロース及びグルコマンナンの水酸基で、水素結合のクラスター構造を形成し、水素ガスの漏洩を防ぐ塗膜をつくっていたのではないかと思う。

このような仮説を頭に入れて、具体的に、コウゾ紙同士の貼り合わせ工程の作業手順書を見てみよう。

手順書では、コンニャク糊溶液は2種類用意される。前松陸郎の報告⁽¹⁴⁾では一つは薄い0.2%溶液（林えいだい⁽²¹⁾の報告では1%溶液）、もう一つの濃い溶液（厚糊）は薄い溶液の4.5倍濃度の0.93%（林えいだいの本⁽²¹⁾には書かれていない）である。塗布した場合に塗布漏れがないように、青色染料を添加している。染料はダイレクト・コンク、またはブルシャン・ブルー、タンプル・ブルーである。着色は塗布にむらのないように肉眼で検査できるように配慮

したのである。

貼り合わせには、2枚合わせから5枚合わせまで色々あったが、林えいだいの文献⁽²¹⁾に従い、入念な作業工程を再現すると、5枚合わせの場合、次のようになっている。

①薄糊を板に塗布、②小判生紙を接着、③厚糊をヨコ塗りとタテ塗り、④同じく厚糊ヨコ塗布、タテ塗布、⑤薄糊塗布、⑥大判生紙接着、⑦厚糊ヨコ塗布、タテ塗布、⑧厚糊ヨコ塗り、タテ塗り、⑨薄糊を塗布、⑩小判生紙を接着、⑪厚糊ヨコ塗り、タテ塗り、⑫厚糊ヨコ塗り、タテ塗り、⑬薄糊を塗布、⑭大判生紙を接着、⑮厚糊ヨコ塗り、タテ塗り、⑯厚糊タテ塗り、ヨコ塗り、⑰厚糊タテ塗り、ヨコ塗り、⑱薄糊を塗布、⑲小判生紙を接着、⑳厚糊をヨコ塗り、タテ塗り、㉑厚糊をタテ塗り、ヨコ塗り、㉒厚糊をタテ塗り、ヨコ塗り、㉓薄糊を塗布、㉔ひっくり返し、㉕厚糊をヨコ塗り、タテ塗り。

この作業手順で見ると、紙の貼り合わせは薄糊で、貼り合せた紙に濃いコンニャク糊でタテヨコ塗布、2回ずつ塗布して、厚い被膜をつくっていることが判る。

これは水素が漏れないように、紙の表面に厚い含水コンニャク塗膜を形成し、水、セルロース、グルコマンナン（コンニャク）の水酸基で水素結合を形成させて、水素結合のクラスターで水素の透過をブロックさせている作業と考えられるのである。

更に、この作業はコンニャクグルコマンナンの変性とグリセリン処理と続く。

グルコマンナンの変性は、次のような操作である。塗布シートを60~70℃の2.5%重曹溶液または苛性ソーダ溶液に1時間浸漬して、 α -グルコマンナンを β -グルコマンナンに変換するのだとされている。化学的にどのように変化したのかははっきりしないが、『こんにゃくの科学』⁽⁴³⁾にはX線での結晶性がよくなると書かれている。これから見て、含まれている水及びグルコマンナンと天然セルロースの、それぞれの水酸基との間に形成される水素結合のクラスターの形成のネットワークが密になり、更に水素ガスの漏洩を防いでいるのではなかろうか。この辺りの理論については、例えば、荒田洋治の『水の書』⁽⁵⁹⁾などが参考になる。

その後、折り曲げなどに耐えられるように16%グリセリンに浸漬して軟化処理をして完成である。

このような繊細な作業は若い女子学生が適しているということで、多くの女子学徒が挺身隊として作業に従事された。アルカリ溶液の作業で手が荒れ、蒸し風呂のような、貼り合わせ作業場で汗を流しながら、指示通り黙々と働いた^(20,21,22)。

グリセリン処理で思い出されることは、最近、高知県から鼻をかんでも柔らかい鼻紙がヒットしたというニュースがあった。通常の鼻紙にこのグリセリン処理を施した商品である。こんな技術も現在世に出ているのである。風船爆弾の要素技術は、現代にも応用できるものが色々あるように思われる。

4. おわりに—製紙業界の足跡として—

第2次世界大戦以降、科学技術の進歩で戦争は一度に多数の人命を奪い、人類に悲劇をもたらすことになった。筆者は、このような戦争の回避のための平和教育の一助として、太平洋戦争時に陸軍が行った秘密戦のために行った研究の過程を、反省の念を持って回顧した。

そして、当時、素材としての紙は先端技術の秘密兵器の研究開発に大きく関与し、「紙と戦争」という視点で俯瞰すると、製紙業界は多面的に軍の研究に協力してきたことが明らかにされた。そして、国民の英知を結集すれば、一見不可能と思えるような太平洋横断の風船爆弾のプロジェクトも短期に貫徹できるということが明らかになった。

しかし、平和になって考えれば、その努力は人類の繁栄と発展には何らの寄与もなく何と無益な血と汗を流したことかと、反省させられる。

製紙業界においては、登戸研究が及ぼした影響は大きかったにもかかわらず、業界の歴史書には、余り多くは書かれていなかった。戦争という「負の遺産」を記録することを忌み嫌ったからであろう。

本稿をまとめて判ったことは、戦争のための科学技術の研究開発の虚しさである。このような努力を人類平和のために向けられれば、素晴らしい進歩をもたらしたであろうに、という深い反省の念を抱かせた。

謝辞

明治大学平和教育登戸研究所資料館では、平成26（2014）年11月19日から平成27（2015）年3月21日の企画展「紙と戦争」開催のために、同館長・文学部教授山田朗先生、同大学文学部非常勤講師渡辺賢二先生、同資料館学芸員塚本百合子様及び椎名真帆様が、調査のために四国までお越し頂いた。それまでに、筆者は大学側と調査資料の相互交換を行い、企画展の内容について議論を深めることができた。拙稿は、その時の議論を軸にまとめたものである。このような論説ができことは、明治大学の上記の方々のおかげであり、この機会に深謝申し上げる次第である。

表1 紙の寸法と重さ

品種	長さ(cm)		重さ(g)
	ヨコ	タテ	
1号	193	67	21.7~25.9
2号	67	67	9.2~10.9
3号	97	67	10.9~13.0
4号	170	61	17.4~20.7
5号	61	56	6.5~ 7.7

文献(13)から尺の単位をcmに換算して引用

表2 球皮紙の改訂規格

試験項目	品種	条件			
坪量 (g/m ²)	1号, 3号 4号	16.2~19.8			
	2号, 5号	19.8~24.2			
抗張力 (15kg/15mm)	1号, 3号 4号	タテ・ヨコ 平均	1.38	$\frac{\text{ヨコ抗張力}}{\text{タテ抗張力}} \times 100$	40%以上
	2号, 5号	タテ・ヨコ 平均	1.69	同上	30%以上

文献(13)から引用

表3 手漉き生紙の県別の生産種類

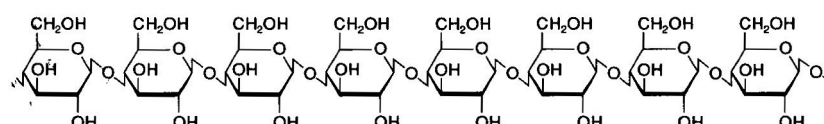
県名	生産種類	
高知県	4号	5号
埼玉県	1号	2号
岐阜県	3号	2号
愛媛県	4号	5号
鳥取県	3号	2号
福岡県	3号	2号
石川県	3号	2号

文献(13)から引用

表4 気球紙の生産総数

県名	指数	推定生産枚数(月単位)
高知県	45	591万余枚
愛媛県	100	407
岐阜県	84	342
福岡県	25	102
埼玉県	19	77
鳥取県	13	53
石川県	6	23
合計		1595

吉野興一、『風船爆弾 純国産「ふ号」の記録』,
141頁 朝日新聞社(2000)より引用



ポリ-1,4-β-D-グルコース

図1 天然セルロースの分子構造

天然セルロースは、D-グリコール基がβ-1,4-結合で縮重合した直線状の多糖である。

デンプンのアミロースはα-1,4-結合でらせん状に結合した多糖である。

文献(54)から引用

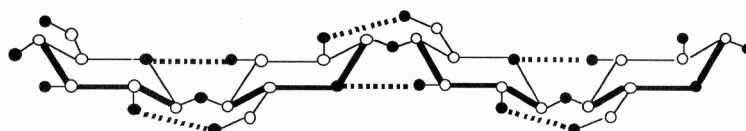


図2 天然セルロース鎖の相隣る構成D-グルコース基同士の水素結合による相互結合

1本の天然セルロース分子鎖内では、すべての炭素についている水酸基と環状の酸素原子が水素結合に携わり、ねじれのないリボンのような構造となる。グルコース分子が裏表の関係で結合されるのが、 β -1,4-結合の特徴でもある。●.....●は-O-H...O-という水素結合の略記、●は酸素原子。

文献(54)から引用

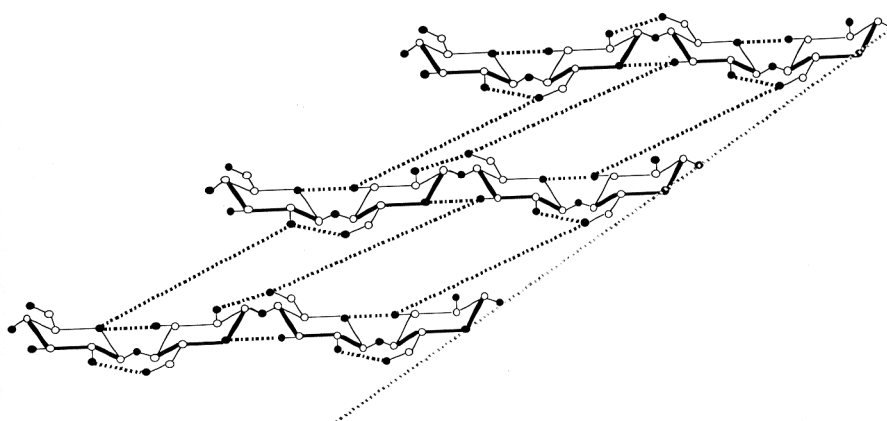


図3 平行した天然セルロース同士の水素結合

平行した天然セルロース分子鎖間の水素結合は、 C_3 と C_4 の間で形成される。

文献(54)から引用

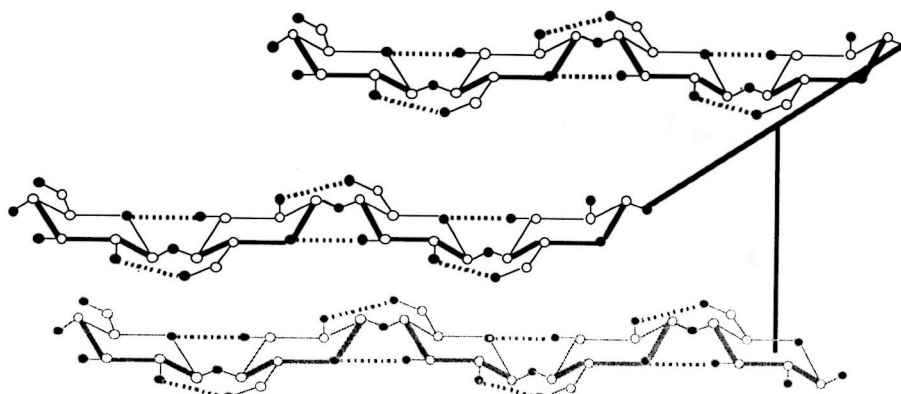


図4 天然セルロース鎖の一段下の分子鎖との水素結合による結合

一段下の天然セルロース分子は、上の分子の間に位置し、向きは同じだが、位置がグルコース1分子の半分ほどずれている。

文献(54)から引用

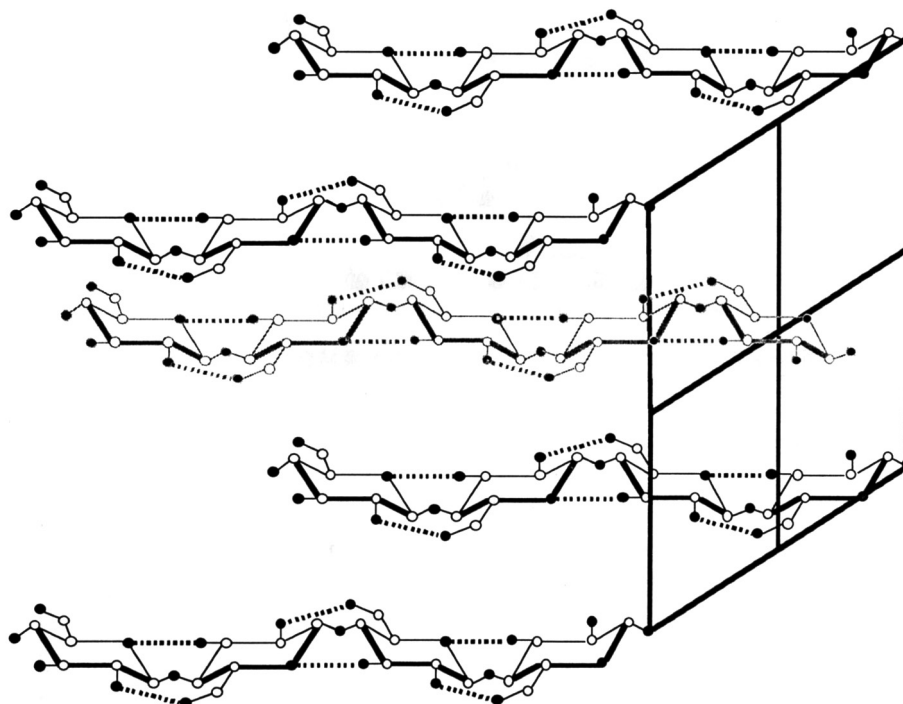


図5 セルロース分子鎖が左右、上下の分子鎖と水素結合する時の配置図
ある4角形の中の4隅と真中に1,4- β -D-グルコースが配置する。
文献(54)から引用

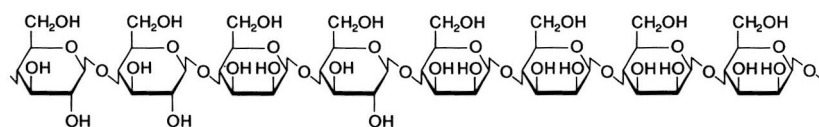


図6 コンニャクグルコマンナンの部分構造
コンニャクの基本構造はD-グルコースとD-マンノースが β -1,4-結合を結合したものとして、D-マンノースの方が多い。枝分かれの構造を取るとした文献もある。
文献(54)から引用

〔参考文献〕

- (1) 朝日新聞「集団的自衛権後 終戦の日」(1面), 2014年8月16日
- (2) 山田朗・明治大学平和教育登戸研究所資料館編, 『陸軍登戸研究所<秘密戦>の世界』, 明治大学出版会(2012)
- (3) 渡辺賢二, 『陸軍登戸研究所と謀略戦』, 吉川弘文館(2012)
- (4) 調査結果は, 資料館の展示順に従って, 次の学会誌にまとめられている。『駿台史学』, 第141号 1~336頁, 駿台史学会(2011.3)
- (5) 伴繁雄, 『陸軍登戸研究所の真実』, 芙蓉書房(2010)
- (6) 文献(2), 6~7頁。
- (7) 『明治大学平和教育登戸研究所資料館ガイドブック』, 3頁。
- (8) 小林良生, 百万塔, 第146号, 40~66頁, 紙の博物館(2013)

- (9) 河野剛久,『私本土佐和紙物語』, (高知製紙株式会社), 138~148頁, 河野製紙(株) (1992)
- (10) 清水泉,『土佐紙業史』 218~220頁, 245~247頁, 高知県和紙協同組合連合会 (1956)
- (11) 小林良生,『和紙博物誌』,「世界最初の大陸間弾道兵器・風船爆弾」, 44~55頁, 淡交社 (1995)
- (12) 森実善四郎,『紙と伊予』,「風船爆弾－気球紙について」, 127~136頁, 伊予三島ロータリークラブ (1964)
- (13) 前松陸郎, 紙及びパルプ, Vol.10 No.2, 102~108頁, (1959)
- (14) 前松陸郎, 紙及びパルプ, Vol.11 No.8, 543~548頁, (1960)
- (15) 森義一,『岐阜県手漉紙沿革史』,「第6章 統制時代の手漉和紙」, 344~440頁, 直接関係するところは第2節 戦争と本県手漉紙, 352~356頁, 岐阜県手漉紙統制組合 (1946)
- (16) 静岡平和資料館をつくる会,『風船爆弾と静岡』 (2007)
- (17) 茨城県那珂郡山方町文化保存研究会編,『西ノ内』,「四 大戦と西ノ打紙」, 69~70頁,「西の内紙の生産工程」, 原料, 79~104頁, 茨城県那珂郡山方町教育委員会 (1976)
- (18) 安斎保夫, 安斎宗司,『ふくしまの和紙』, (2) 和紙が「新兵器」風船爆弾となる, 133~137頁, 歴史春秋社 (1979)
- (19) 福井県和紙工業協同組合編,『福井県和紙工業協同組合五十年史』 (本編), 戦争と統制の強化, 軍納紙の生産など記述。211~231頁 (1982)
- (20) 林えいだい,『女たちの風船爆弾』, 亜紀書房 (1985)
- (21) 林えいだい編集,『写真記録 風船爆弾 乙女たちの青春』, あらき書店 (1985)
- (22) 愛媛県立川之江高等女学校33会期生の会編,『風船爆弾を作った日々』, 鳥影社 (2007)
- (23) 吉野興一,『風船爆弾 純国産兵器「ふ号」の記録』, 朝日新聞社 (2000)
- (24) 桜井誠子,『風船爆弾秘話』, 光人社 (2007)
- (25) 文献 (2), 45~49頁。
- (26) 高田貞治, 自然, (I) Vol.6 No.1, 24~33頁, (1995); (II) Vol.6 No.2, 44~54頁, (1995); (III) Vol.6 No.3, 70~79頁 (1995)
- (27) 草場季喜, 第八部風船爆弾と決戦兵器, 第一章 風船爆弾による米辺土攻撃,『陸軍兵器総覧』 (日本兵器工業会編), 526~548頁 (1977)
- (28) a) .一條三子, 百万塔, 第77号, 56~67頁 (1990); b) .一條三子, 駿台史学, 第141号, 209~232頁 (2011)
- (29) 武内孝夫,『こんにゃくの中の日本史』, 32~36頁, 講談社 (2006)
- (30) 文献 (23), 57頁。
- (31) 東京都紙商組合,『第2次世界大戦後期 風船爆弾関連資料綴 (横書きの部)』「アメリカを奇襲した風船爆弾の顛末」 (高石馨)
- (32) 座談会「風船爆弾の正体」, 紙及びパルプ, Vol.15 No.5, 20~33 (1964); Vol.15 No.6, 20~31 (1964); Vol.15 No.7, 21~31 (1964)
- (33) 足立左京,『風船爆弾大作戦』, 学芸書房 (1976)
- (34) 足立左京, 百万塔, 第46号, 17~20頁 (1978)
- (35) マンツネ,『マンツネ120年のあゆみ』, 183~190頁 (1989)
- (36) 稲葉政満,『和紙から機能紙への技術革新』 (平成20年度~平成21年度科学研究費補助金 (特定研究) 研究成果報告書, 10~11頁 (2010)
- (37) 森沢武馬, 百万塔, Vol.4, 45~46頁 (1956)
- (38) 安部栄四郎,『紙すき五十年』, 143~146頁, 東峰出版社 (1963)
- (39) 土佐市史編集委員会編,『土佐市史』, 821~822頁, 土佐市 (1978)
- (40) 西建男,「ふ号作戦と小田原製紙」, 紙の博物館蔵。同じ文献は (31) の後半にも掲載。
- (41) 文献 (2), 83頁。
- (42) 例えば, 文献 (21), 66頁。
- (43) 沖増哲,『こんにゃくの科学』, 溪水社 (1993)

- (44) Robert C. Mikesh, "Japan's World War II Balloon Bomb Attacks on North America", Smithsonian Institution Press (1973)
- (45) 文献 (23), 247~259頁。
- (46) 長谷川正一, 『続洋紙業を築いた人々』, 「井上源之丞」, 88~105頁, 紙の博物館 (1998)
- (47) 山本憲蔵, 『陸軍贋幣作戦』, 徳間書店 (1984)
- (48) 文献 (47), 99~119頁。
- (49) 成田潔英, 『洋紙業を築いた人々』, 「佐伯勝太郎」, 164~172頁, 紙の博物館 (1952)
- (50) 片倉健四郎編, 『佐伯勝太郎伝記并論文集』, 印刷庁 (1952)
- (51) ローレンス・マルキン著, 徳川家広訳, 『ヒトラー・マネー』, 講談社 (2008)
- (52) 浅井治海, 『激動の高分子産業～歴史と将来展望～』, 「第2章 合成高分子の発展と新しい萌芽」, 11~33頁, シーエムシー (1995)
- (53) 村井操, 中西篤, 『製紙工学』, 1頁, 工学図書株式会社社版 (1975)
- (54) 桜井直樹, 山本良一, 加藤陽治, 『植物細胞壁と多糖類』, 144~154頁, 培風館 (1991)
- (55) 森本正和, 『環境の21世紀に生きる非木材資源』, 108~112頁, ユニ出版 (1999)
- (56) 文献 (17), 79~80頁。
- (57) 柳橋真, 『和紙 風土・歴史・技法』, 246~255頁, 講談社 (1983)
- (58) DNP年史センター企画制作『王子製紙社史 本編 1873~2000』, 70~72頁, 王子製紙 (2001)
- (59) 荒田洋治, 『水の書』, 共立出版 (1998)

〔小林良生氏プロフィール〕

1958年慶応大学工学部卒。東レ株式会社を経て、1975年化学繊維・合成繊維から紙を作る研究のため、旧・通商産業省工業技術院四国研究所（現・産業技術総合研究所四国センター）化繊研究室長に就任（後に同研究所技術交流センター長就任）。

全国の県立製紙試験場長や製紙会社と研究を行う。

機能紙研究会（当初は化繊紙研究会）を運営。

退官後の1997年から2001年まで国際協力事業団（JICA）のプロジェクトチームリーダーとしてタイに赴任。タイ・カセサート大学のタイ未利用農林植物研究計画の中で、楮のアグロフォレストリーの栽培方式を共同研究した。

1974年ナイロン原料の合成の研究で工学博士号取得（慶應大学）。

1990年生物学的な観点から和紙をつくる研究（バイオパルピング法）で農学博士号取得（京都大学）。

1990年科学技術庁長官賞，1993年第3回日本・紙アカデミー賞，2004年瑞宝双光章，2011年機能紙研究会功労賞を受賞。

〔資料館補足〕

2015年3月21日に明治大学生田キャンパス中央校舎6階メディアホールにて開催された，開館5周年記念講演会「～『紙と戦争－登戸研究所と風船爆弾・偽札－』によせて～「秘密戦兵器研究における紙と製紙会社の果たした役割」」は本稿の内容に基づいて構成された。