

I S S N 2 4 3 5 - 2 1 3 6

独立行政法人 国立高等専門学校機構

沖縄工業高等専門学校

紀 要

第 16 号

Bulletin
of
National Institute of Technology, Okinawa College
No. 16

August 2022

目 次
C O N T E N T S

校長招待論文		
三宮 一幸 Kazutsuka Sanmiya	第 2 の緑の革命 The 2 nd Green Revolution	1
崎原 正志 Masashi Sakihara	沖縄語の名詞・動詞・形容詞・副詞の「修飾語」と「規定語」—首里・那覇を例にして—	11
渡邊 謙太 Kenta Watanabe	「異型花柱性」を巡る生態学と進化生物学の今 The Ecology and Evolutionary Biology of Heterostyly in Japan	31
論文等		
森澤 征一郎, 他 Seiichiro Morizawa et al.	220 席級新形態旅客機の前進翼平面形状の空力最適化 Aerodynamic Optimization on Planforms of Forward-Swept Wing for a 220-Seat Class Aircraft	47
Seiichiro Morizawa et al. 森澤 征一郎, 他	Investigation of a Planar Wing with Wing Grid using CRM.65.airfoil	61
木村 和雄 Kazuo Kimura	国史『球陽』が示唆する 18 世紀後半の琉球海溝巨大地震 Late 18 th century megaquake cluster along Ryukyu trench, based on decoding “Kyu-yo”, the national history archive of Ryukyu Kingdom	73
松露 真 Shin Shoro	外部の限定少数の人向けに「遠隔授業」を実施する方法の考察 ～Blackboard Learn や Microsoft Teams に頼らない実施方法～ A study of how to do online lecture for the students who want to enroll KOSEN -- without Blackboard Learn and Microsoft Teams --	85
国際会議発表		
中平 勝也, 他 Katuya Nakahira et al.	Automatic Wheelchair Control using Brain Machine Interface	91
業績一覧	93
沖縄工業高等専門学校紀要発行規程	99
沖縄工業高等専門学校紀要投稿編集要領	101

校 長 招 待 論 文

第2の緑の革命

三宮 一幸

生物資源工学科

要旨

我々の食料確保の歴史は、初期 *Homo sapiens* の狩猟採集から始まった。この頃は、現在我々が享受している飽食とはほど遠かったことだろう。その後の我々の食料確保の歴史には、いくつかの大きな節目があった。農業の発明、気候災害、作物病、民主主義、市場経済、産業革命、戦争、いずれも我々の食に非常に大きな影響を与えた。我々は、歴史の中で、何度となく食料不足となり、その度に食料を確保してきた。1960年代の「緑の革命」は、過去最大級の技術革新であった。我々は今でも、この方法で食料を確保している。しかし現在、緑の革命の恩恵は徐々に薄れてきており、今日の世界飢餓人口は8億人を超える。我々は、現代の新しいリスク、人口増加・農地破壊・地球温暖化に直面している。我々にはもう一度、緑の革命が必要なのである。その試みとして、遺伝子組換えによる分子育種が早急に進められている。しかしながら、この方法では人口増加に対して全く間に合わない、と計算されてしまう。筆者は、作物にケイ酸を供給する新しい肥料により、この問題にあたることとした。

キーワード：食料問題 農業 緑の革命 分子育種 ケイ酸

緒言

現代の日本で食料危機を議論しても、全く実感がない。まだ先の話だ、で話が終わってしまうかもしれない。しかし、食料の安全保障という観点から見ると、食料問題は、差し迫っていると言わざるをえない。日本国の食料の供給元は問題なくこのまま生産・供給してくれるのだろうか、ということを検証すると、非常に大きな課題がいくつも浮かび上がる。食料問題は命に直結する。本稿では、今後我々が直面するであろう食料問題について、どのように乗り越えていくべきかを、主に食料確保の歴史から考える。

1 初期 *Homo sapiens* の食料

初期 *Homo sapiens* の食料調達には、狩猟採集であり、農業はなかった、とされている。彼らの食料は十分だったか？については資料はあまりない。彼らと同じ狩猟採集民で我々に最も身近な縄文人については、貝塚がよく知られている他、木の実、果実、魚、鳥、いのししなどの哺乳類を採っていたこと、さらには、定住の跡が知られている¹⁾。定住は、十分な食料を意味する。木の実を保存食とした跡もあり、気候変動にもある程度対応できた

考えられる。以上のことを総合的に考えると、彼ら、初期縄文人は、農業なしで、すでに安定的な食料確保を実現していた可能性がある(図1)。

一方、縄文時代の医学、という資料も見つからない。人道上の食料支援もない。いったん食料不足になると、容易に命を落とすだろう。初期 *Homo sapiens* は、*Homo sapiens* 以外の生物種のように、食物連鎖に組み込まれ、人口調節されていた、と考えられる。現代人のように、他の生物種を差し置いて優先的に食料確保はしていなかったのだろう。これは *Homo sapiens* 以外の生物種と同じ生物学的地位である。さてこの状況は、初期 *Homo sapiens* にとって「食料危機」だったのであろうか。後述するが、現代の食料問題は、むしろ非常に深刻である。

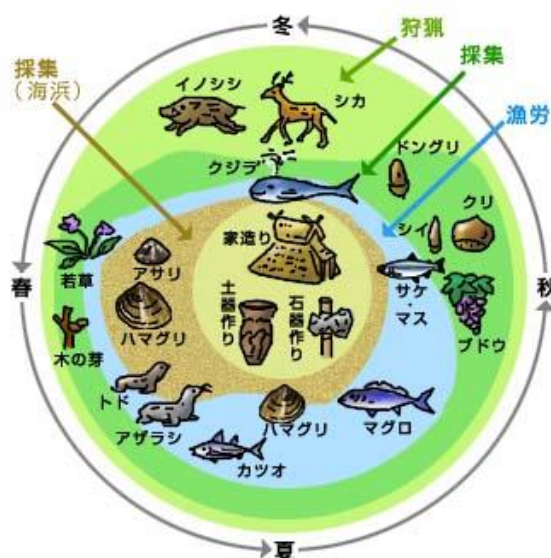


図1 縄文食²⁾

2 農業の発明

その後 *Homo sapiens* は、さらに安定的に食料を得るため、農業を発明した。確保する食料は増えたが、その後の話は単純ではない。①農業生産は、個人、集団、地域によって不均衡となった。②「富」が生じたが、その富も不均衡となった。③人々の間に「階級」が生じた。④農産物は「王」のものとなった。農業の当初の目的、「さらなる安定的食料確保」は、あっさり失われた。図2は中世の農民の食事を描いたものである。縄文人と比べて豊かであるかは疑わしい。食事は主に、ジャガイモ、パン、野菜などだったようである⁴⁾。しかし我々は「作っても取られる」中、品種改良をした。トウモロコシの祖先種は、見るも無残な姿である(図3)。先人たちはこれを今のトウモロコシのようにするまでに、古典的育種による品種改良で2000年の時間を要している⁵⁾。当時の人々が、どのような動機で品種改良に挑んだのかは、非常に興味深い。そして、結局、この「作っても取られる」という食料問題は、近代の民主主義台頭まで続くのである。



図2 中世の食事³⁾



図3 トウモロコシの祖先種⁵⁾

先人たちは農業を発明した。しかしそれで良かったのだろうか?その後の歴史を見てみると、それは「パンドラの箱」そのもののように見える。後述するが、農業の発明はその後、作物病、緑の革命、といった農業に直接か

かわる事柄のみならず、「富」も「階級」も生んだのである。農業は、民主主義や近代文明が生まれた原因の一つ、とも考えられるのではないだろうか。このことを生物学的に評価すると、「我々は食物連鎖から外れた」ことになる。我々 *Homo sapiens* は、*Homo sapiens* 以外の生物種と異なり、個体数(人口)を自然による調節のみに支配されない。我々は、食料を求めてさまようこともなければ、巷でライオンに捕食されることもない。我々は、自然界の調節を超え、多くの個体数(人口)を保持することができるのである。農業の発明は、我々の生物学上の地位をも変える、凄まじい出来事であった。そして、我々に農業があって良かったのか? については、その判断材料を後述する。

3 民主主義・市場経済・産業革命による食料供給

近代、民主主義・市場経済・産業革命が台頭したことは、農業をも大きく改革した。民主主義により、「農作物は王のもの」ではなくなった。市場経済は、農作物を商品化し、農業者と労働者は、賃金で食料を買うようになった。産業革命は、1892年、農業にトラクターをもたらした⁶⁾。以上の農業革命は、産業革命による人口増加を支えた⁷⁾。フィッシュアンドチップスはこのころ生まれた。これで現代の食事に少し近づいた、と言えるかもしれない。この農業革命の最大の成果は、1906年、ハーバー法の発明だろう⁸⁾。ハーバー法は、空中の窒素からアンモニアを作るものである(図4)。アンモニアは窒素肥料に応用できる。現在、ハーバー法による人工窒素固定の量は、自然界のそれに匹敵するものであり、現代農業に最も影響を与えた技術の一つである。この発明は5大化学発明にも数えられ、当時、「空気からパンを作る」と称賛された。これで、人々の食事は、中世のそれよりはるかに豊かになった。それでは、食料問題はなくなったのか? と期待したいところだが、再び、話はそう単純ではない。この頃すでに、王による搾取がなくなっていたので、食料問題は、つきつめると、食料の量/人口、と考えられる。このことについて、重要な予測がある。1776年、アダム・スミスは「市場経済で全人類に富が行きわたる¹⁰⁾」と言ったが、1798年、マルサスは「人口増加に対して科学技術による食料増産は追いつかない¹¹⁾」と反論した。どちらの予測が当たったのかについては後述する。

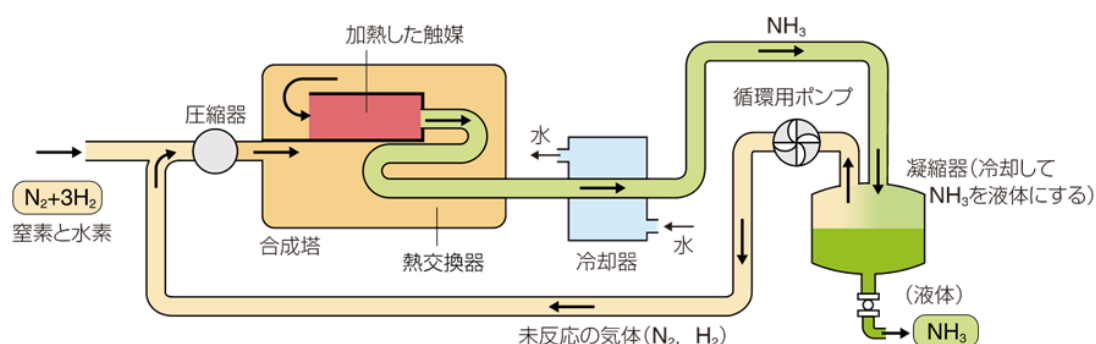


図4 ハーバー法⁹⁾

4 飢饉

飢饉は、食料不足で多くの命が失われることである。直接の死因は栄養不足であり、これに免疫低下による病气も加わる。そのまた原因は、不作である。不作環境としては、干ばつ、日照不足、河川の氾濫などがすぐに思

い起こされる。農業黎明期の飢饉はこれらが主原因だろう。古代 *Homo sapiens* は、毎年の収穫を神に祈った。次に原因に加わったのは、作物の病気である。1845 年アイルランド飢饉では、ジャガイモ病原菌 *Phytophthora infestans* が猛威をふるい、100 万の命が失われた¹²⁾。この「作物の病気」は、農業の近代化とともに勢いを増している。すなわち、作物病蔓延の甚大化は、農業の大規模化が原因である。Covid-19 が、森林を開拓して造られた都市でパンデミックを起こしたように、現代農業に代表される大規模かつ単純な生物相には、その生物を宿主とする病原体が新たに発生しやすく、そして新しく発生した病原体は、一般に毒性が高い¹³⁾。この説明を裏付けるように、実際に、飢饉は歴史が新しくなるほど甚大化している。

それでも、不作と作物の病気だけでは近代までや現代の飢饉は、説明できない。農作物の流通もあれば農薬もある。近代以降もなお飢饉が発生するのは、さらに新しい原因、「政治」が加わったからである。例えば、アイルランド飢饉の原因は、病原菌だけでなく、アイルランドとイギリスの関係性も大きく関わっている¹²⁾。この新しい原因はその後どんどん影響力を増し、20C 初頭から前半ころまで、史上最大規模の飢饉を何度も起こしている¹⁴⁻¹⁶⁾ (図5)。

我々は、どうすれば良いのか？ 第2次大戦以前については、人道的食料支援についての資料は見つからなかった。逆に、戦略的に食料を送らない、という不幸な歴史は何度かあったようである¹⁵⁾。戦国武将の戦術である「兵糧攻め」が地域・国家レベルで行われたようなことであろうか。第2次大戦の世界の死者数は 8000 万人とも言われる。この大戦から我々は学び、食に関しては、人道支援が行われるようになった。世界の流通も巨大化し、飢饉を未然に防ぐ準備は非常に進んだ。それでも、である。おそらく史上最悪であろう飢饉は、1958 年、中国で発生し、5000 万人が命を落とした¹⁷⁾。当時は冷戦の真ただ中であり、西側の支援はなかっただろう。食料が届かないのである。そしてこの「新しい飢饉」は、現代にまで続く。人道意識が非常に進んだ現代においても、今後の飢饉が予測されている¹⁸⁾ (図6)。原因はやはり「不作+食料が届かない」である。毎日の莫大な「生ゴミ」を見ると、輝かしい我々の食料確保の歴史はいったい何だったのか、と呆然自失になる。縄文人は「わが子孫たちよ何をしているんだ」と嘆くに違いない。



図5 ソ連の飢饉 1946¹⁶⁾



図6 イエメンの飢饉 2018¹⁹⁾

5 緑の革命

現代科学の力をもってすれば、食料の量/人口の食料問題は解決するのか、の議論があった、と述べた。政治を原因とする食料不足を考慮しなければ、すなわち、人口当たりの食料生産は、現代科学で解決できる＝市

場に任せれば富は全ての人々に行きわたる、の説は、アダム・スミスによる。他方、経済発展に伴う人口増加に対し、農業生産は、たとえ技術革新したとしても追いつかない、の説は、マルサスによる。18Cのこの議論については、結論が出たようである。未来を言い当てたのは、マルサスの方だった。

先人たちは、農業の発明という大仕事を成し遂げた。農業の発明により我々は、自然界の調節を超え、多くの個体数(人口)を保持することができるようになった。今や我々の個体数(人口)は80億である。しかしそれは、単純に我々の利益、ではなかった。代償として、食料生産して人口を維持する必要が生じた。そして、マルサスの言う通り、食料生産が間に合わないのである。もちろん我々は技術革新した。自然界の植物を改良してトウモロコシを作り、トラクターを作り、窒素肥料を作った。それでも間に合わなかった。

第2次大戦後、我々には、最大の技術革新が必要だった。マルサスは間違っている、と。この時生まれたのは、農業の発明、農業の近代化、と並ぶ農業史上の技術革新「緑の革命」である。1944年、ノーマン・ボーローグ(図7)は研究グループを立ち上げ、当時の農学の最高の頭脳を世界から集結させた。ロックフェラーの莫大な資金も投じられた。成果として、1960年ころまでに、次々と新品種を世に出した。まだ遺伝子を扱う技術がなかったもので、古典的育種による成果ではあったが、高収量となった新品種は「奇跡の種」と称賛された。この品種改良に加え、圃場の大規模化、大型農業機械の導入、農薬・化学肥料の大量投入、により、稲・小麦の収量を一気に2倍以上にした²¹⁾。ボーローグは「歴史上最も多く命を救った」として、1970年ノーベル平和賞を受賞した。緑の革命の恩恵を享受した我々は、食料確保の戦いは終わった、と当時安堵した。しかし、緑の革命には何点か、決定的な問題があったのである。

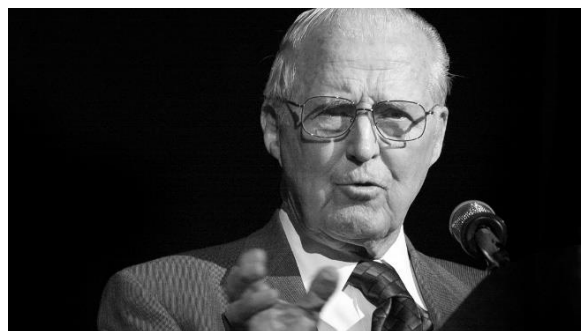


図7 ノーマン・ボーローグ²⁰⁾

6 緑の革命の問題点

緑の革命の直接の成果自体は素晴らしいと言わざるをえない。実際に、何億もの人命が救われた。しかし、当時の経済成長期の哲学が影響したのか、現代の視点で見ると、少々手荒い技術革新であった。具体的には以下の通りである。

第1に、森林破壊を起こした。新品種による増収を拡大するため、緑の革命は、農地開発を進めた。その後、森林の価値が大きく認められるようになったが、それでもなお、背に腹は代えられない、と、森林破壊は続いている。現在進行中のアマゾンの火災は、このことと関連している、との報告がある²²⁾。森林破壊は、もちろん、まわりまわって、地球温暖化→作物収量の低下、をまねいている。

第2に、作物の病害が拡大した。作物病自体は近代以前にもあったが、それが拡大した。このことにより、せっかくの緑の革命による増収が一定量抑えられただけでなく、新しい病原体が次々と出現する、さらにはその新病原体がかつてないほどの甚大な病害をもたらす、という新たな問題を引き起こした。以上は項目4でも述べた。この「副作用」の対策として、我々は、次々と新しい農薬を開発・適用することとなった。農薬の使用量はもちろん、莫大である。この中には、後に毒薬認定されたものも含まれていた。人体への被害も非常に大きいものがあった²³⁾。

第3に、農地破壊を起こした。これは、大量の化学肥料使用が主な原因である²⁴⁾。緑の革命は、大規模農業を目指した。圃場は大きく、農薬は大量に、そして化学肥料も大量に使用された。化学肥料自体は作物の成長を促進する。しかし、影響はそれだけではない。化学肥料の組成は、非常に単純で、「窒素リン酸カリ」として知られている。その単純な組成の化学物質が、毎年大量に撒かれる。農地は、木を切り倒しただけの土壌から人工物質ばかりの組成の土壌に変わっていく。この人工的土壌は作物に有害である。理由は以下の通りである。作物には、化学肥料以外の土壌成分も必要であり、その成分は、大量化学肥料栽培を続けるほど、失われることになる。また、植物は本来、多様な土壌生物と共生するが、人工的土壌では、その共生生物の多様性まで一気に失われることになる。そうなるともう、作物はその圃場で収穫できなくなる。対策としては、化学肥料を減らすしかない。しかし、現代農業は市場経済下にあり、収量を減らしてまでそんなことをする農業者はいない。大量の化学肥料使用は、今後も続いていく。

第4に、経済格差が拡大した。原因は、緑の革命の恩恵が、主に先進国の農業にもたらされたことによる。緑の革命に従って農業を行うには、新品種の種子を購入し、大量の農薬と化学肥料を使用する必要がある。当時これができたのは、豊かな農業者に限られた。結果として、経済格差が開いてしまったのである。現代の飢饉危機に晒されている地域は、ことごとく先進国ではない。このことが、この格差拡大を説明している。

以上、マルサスの予言は、2022年現在でも依然として正しい、ということになる。

7 その他の新しい課題とリスク

緑の革命は、我々の食料問題に対し最大級のソリューションとなったが、上述のように新しい課題を生んだ。これらの「緑の革命の副作用」以外にも、現在、食料問題にまつわる新たな課題やリスクがある。

第1に、フードロスがある。食料生産から食料消費まで、現代では市場経済に組み込まれている。現代の市場経済には、大量生産大量消費の原則がある。消費期限がある食料は、必然的に大量廃棄されることになる。この問題の原因は、経済の基本構造に関わるので、解決は容易ではない。家畜の飼料やフードバンクへの転用は、焼け石に水、となっているのが現状である²⁵⁾。

第2に、項目4でも述べたが、人道的食料支援が届かないことがある。個々の飢饉について、なぜ支援が届かないかは歴史学に任せたいが、一般に最も大きな障壁は、国家同士の戦略的枠組みや紛争や戦争などではないかと思われる。フードロスとともにこの問題については、我々農学者ができることは、残念ながら非常に限られている。

第3に、地球温暖化に代表される環境破壊がある。温暖化は、直接作物の不作の原因となる。気候変動に関する政府間パネル IPCC の 2040 年の温暖化目標は+1.5°Cであるが²⁶⁾、1.5°C上昇でとどまったとしても、現在使用している作物品種をそのまま使えば、農業は大打撃を被ることになる²⁷⁾。

第4に、未知のリスクを取り上げたい。2022年2月22日、本稿が切直前のNHKニュースでは、猛禽類に鉛汚染が蔓延している、とのことである。汚染源は人間が発した銃弾である。空の王者猛禽類であつてももちろん食物連鎖の下にあり、この鉛は時間をかけて生物間に広がる。まわりまわってマグロに入ったら……。同じような危機として、マイクロプラスチックがある。この問題でも、我々は、危機意識の低さを突きつけられたように思う。それほど難しい話ではないが、世界中がずっとマイクロプラスチックの危機に気づけなかった。プラスチックは分解しない夢の素材、とつい最近まで謳っていたことが思い起こされる。そして、現在も大量に食品流通で使用され

ているプラスチックを全廃するのは、非常に困難である。世界の海から全てのマイクロプラスチックを回収することは、全くイメージできない。魚などを経由すると思われるが、マイクロプラスチックはすでに人体に入っていて、今後の健康被害が予測されている²⁸⁾。

以上のように、我々は、全てのリスクを知ることができない。このように「実は有害だった」ということは、過去の事例を数え上げればきりがない。1967年、真鍋が地球温暖化を発見したように²⁹⁾、食料確保に関連するリスクは、大変残念ながら今後も発見される、と考えられる。

8 分子育種

ここまで、人類の食料確保の歴史を簡単に振り返ってきたが、歴史の記述が乏しい古代・中世から近代・現代に至るまで、ごく一時の飽食はあったが、基本的に苦しみから解放されたことは無かったようである。人口増加は、特に産業革命以降すさまじい。緑の革命によって我々は食料問題に立ち向かったが、現在、飢餓人口は8億を超える、と言われている³⁰⁾。まさか人口を減らすことは、もちろんできない。経済学も、経済成長のためには人口増加せよ、と言う³¹⁾。今後我々には、さらなる技術革新「第2の緑の革命」、が必要なのである。

ポーローグの品種改良は、古典的なかけ合わせであった。目的の表現型(高収量)を与えられたら、その後、不要な遺伝子を取り除かなければならない。そのために戻し交配、という操作をする。戻し交配も、一種のかけ合わせである。戻し交配には10世代を必要とする。昔の農学者の苦労には、全く頭が下がる。そして現在、ポーローグの時のように、世界の農学者は品種改良に努めている。緑の革命の時の「奇跡の種」を、さらに大きく上回る高収量の品種が育種目標である。同時に、新品種には耐暑性も与えなければいけない。IPCCは+1.5°Cにとどめる、とのことなので、農学者としては2.0°C耐暑性を向上させる必要がある。この仕事には、筆者も微力ながら参画した。成果として、実験植物でこの性能(2.0°Cの耐暑性向上)を達成した³²⁾(図8)。この基礎研究は、作物にそのまま応用できる。この方法は、ポーローグの時のものとは異なり、現代の方法、遺伝子組換えである。遺伝子組換えでは、戻し交配の過程が無いので、2、3年で遺伝子組換え植物ができる。それなら、2040年の気温1.5°C上昇に間に合うか、といえ、残念ながら、全く間に合わない。何故か?(実験植物ではない)遺伝子組換えをしたことがない作物種においては、まず、その方法を開発しなければならず、その開発には10年ほど必要だからである。既存の全ての作物種でこれをやると、全く間に合わない、という計算になるのである。これが現状である。しかし、間に合わないかどうかはともかく、とにかく研究者を増やして研究費をかけて、どんどん遺伝子組換えを行わなければ、1958年以上の飢饉がやってくる。なお、イネ研究は、日本が最先端の一角をな



図8 遺伝子組換えタバコの耐暑性³²⁾

す。高収量のコシヒカリは、2011年、芦荊に開発されている³³⁾。イネは、作物であるのと同時に実験植物であることが、この成果をもたらした。

9 ケイ酸肥料

2050年、世界人口は100億を超えると予想されている³⁴⁾。この人口増加に対し、遺伝子組換え法によって現在用いられている全ての作物品種を分子育種する時間はない。

筆者は、①現在の全世界のカロリー供給のうち50%をもまかなうのは米・小麦・トウモロコシ(3大穀物)であること³⁵⁾、②これらは全てイネ科に属すること、③イネ科作物はその栽培に大量のケイ酸を必要とすること³⁶⁾、④これまでケイ酸を供給することにより顕著に作物収量を上げた肥料はないこと³⁷⁾、以上の情報を得た。

最も普遍的なケイ素化合物はシリカ(SiO_2)であり、地殻などの環境中に大量に存在している。ケイ素化合物の化学的性質については、例えば人工的シリカであるガラスは、その化学反応しない性質から試薬ビンとして利用されている。また、核のゴミは地下に埋める前に、ガラスで固める(ガラス固化体)。「試薬ケイ酸」は存在しない。これまでケイ酸肥料が実現していないのは、ケイ酸を化学的に調製するのが非常に困難であるから、と考えられる。

しかしながら筆者は、ケイ酸肥料の可能性を追求することとした。ケイ素化合物を検索したところ、沖縄県のトリムライフインターナショナル社による、廃ガラスを粉砕・焼成した新素材が存在することを発見した(図9)。この新素材を純水に浸けたところ、驚くべきことに、十分量のケイ酸を溶出した(data not shown)。この新素材を肥料として使用したところ、3大穀物が全て、成長促進し、肝心の収量も大きく増加した(data not shown)。現在、この収量増の分子機構を研究しているが、仮説として、①新素材からケイ酸が溶出し、②イネ科植物がケイ酸を取り込み、③植物体内にシリカが蓄積し、④植物体が大きくなり、⑤葉が増え、⑥光合成量が増え、⑦収量増となった、と考えている。さらには、この新素材による環境負荷、作物への耐暑性付与、についても研究を進めているところである。



図9 新素材³⁸⁾

謝辞

筆者は分子育種に近い生物学を専門としていましたが、全く意図せずいつのまにか肥料の科学に踏み入ってしまった。また勉強だ！と、急遽、大学の化学の授業を思い出して復習しています。本研究が第2の緑の革命になるのかは、全く分かりませんが、危機はすぐ目の前に迫っています。もはや、肥料でも分子育種でも、科学でも政治でも、どんな方法でも良いのです。この危機に備えようと現在働いている私たちは、私たちよりずっと大きな被害を受けるであろう次の世代の若者たちとも力を合わせれば、これからあつと言う間にやってくるこの世界的食料危機を、のり越えることができるでしょう。

本稿執筆に際し、多大なご指導をくださいました 沖縄工業高等専門学校 校長 伊原 博隆 先生 に、心より感謝申し上げます。本稿掲載につき、お力添えくださいました 同校 図書館 比嘉 信 様 に、厚く御礼いたします。

引用

- 1) 縄文の食生活 <https://www.jomon-no-mori.jp/jomon-no-mori/adventure/adventure-3/> (1/28/2022)
- 2) 日本人は何を食べてきたのか <http://blog.sizen-kankyo.com/blog/2009/02/485.html> (1/28/2022)
- 3) ジャガイモを食べる人々 https://media.thisisgallery.com/works/gogh_11 (1/28/2022)
- 4) 中世ヨーロッパの食事 <https://www.rekishiwales.com/entry/medieval-diet> (1/28/2022)
- 5) トウモロコシの原種を見てみよう http://www.tbg.kahaku.go.jp/event/topics/2009/10zea_mays/ (1/28/2022)
- 6) 人類の歴史を変えたトラクター <https://www.nhk.or.jp/kaisetsu-blog/400/300317.html> (2/4/2022)
- 7) 農業革命 <http://www.y-history.net/appendix/wh1101-012.html> (2/4/2022)
- 8) アンモニア合成を通して人類を支えた研究者たち <https://www.titech.ac.jp/public-relations/about/stories/ammonia-synthesis> (2/4/2022)
- 9) ハーバー・ボッシュ法 <http://sekatsu-kagaku.sub.jp/industrial-chemistry.htm> (2/4/2022)
- 10) A. Smith, An Inquiry into the Nature and Causes of the Wealth of Nations, W. Strahan and T. Cadell, 1776.
- 11) T. R. Malthus, An Essay on the Principle of Population, Joseph Johnson, 1798.
- 12) 食で読み解くヨーロッパ <https://book.asahi.com/jinbun/article/14176335> (2/10/2022)
- 13) これが最後のパンデミックではない <https://www.bbc.com/japanese/features-and-analysis-52953254> (4/20/2022)
- 14) 藤原辰史, カブラの冬, 人文書院, 2011.
- 15) チャーチルのインド人嫌悪 <https://www.afpbb.com/articles/-/2754712> (2/10/2022)
- 16) ソ連国民は何故いかにして飢えたか <https://jp.rbth.com/history/83730-soren-kiga-no-rekishi> (2/10/2022)
- 17) 毛沢東時代の大飢饉は仕方なかった? <https://wedge.ismedia.jp/articles/-/3366> (2/10/2022)
- 18) FAOとWFPは20か国以上での急性の飢餓の急増を警告 <https://ja.wfp.org/news/acute-hunger-set-soar-over-20-countries-warn-fao-and-wfp-call-urgent-and-scale-action-avert> (2/10/2022)
- 19) 12万人以上の子どもが未曾有の食料危機の状況に置かれている
https://www.savechildren.or.jp/scjcms/sc_activity.php?d=2849 (2/10/2022)
- 20) 農業と平和 <https://jp.unu.edu/u-thant/borlaug.html#files> (2/10/2022)
- 21) 緑の革命 <https://geographers.info/2019/06/29/green-revolution/> (2/10/2022)
- 22) アマゾン森林消失 <https://www.jiji.com/jc/article?k=2021112000368&g=int> (2/10/2022)
- 23) R. L. Carson, Silent Spring, Houghton Mifflin Harcourt, 1962.
- 24) 農地土壌劣化について <https://www.kaku-ichi.co.jp/media/crop/earth-building/soil-deterioration> (2/10/2022)
- 25) 食品ロスとは https://www.maff.go.jp/j/shokusan/recycle/syoku_loss/161227_4.html#3 (2/10/2022)
- 26) 早まる温暖化 https://www.sustainablebrands.jp/news/os/detail/1204100_1531.html (2/10/2022)
- 27) 地球温暖化が世界の食料需給に及ぼす影響の計量モデル分析
https://www.jircas.go.jp/ja/publication/research_results/2005_01 (2/10/2022)
- 28) マイクロプラスチックの影響 <https://sdgs.yahoo.co.jp/originals/65.html> (2/10/2022)
- 29) ノーベル物理学賞に真鍋淑郎氏 <https://www.yomiuri.co.jp/science/20211005-OYT1T50211/>

(2/10/2022)

- 30) 世界飢餓人口 <https://www.asahi.com/articles/ASP7D5R8DP7DUHBI01G.html> (2/10/2022)
- 31) 人口増加と経済成長 <https://www.nikkei.com/article/DGXMZ035607790R20C18A9SHH000/> (2/10/2022)
- 32) K. Sanmiya, K. Suzuki, Y. Egawa, M. Shono, Mitochondrial small heat-shock protein enhances thermotolerance in tobacco plants. *FEBS Lett.*, 557, 265-268, 2004.
- 33) 多収量イネは「第2の緑の革命」を実現できるか <https://jbpress.ismedia.jp/articles/-/8851> (2/10/2022)
- 34) 世界人口推計 https://www.unic.or.jp/news_press/features_backgrounders/33798/ (2/18/2022)
- 35) 黒岩裕介, 上原奏子, 芦荊基行, 植物科学の研究成果を利用するイネ育種プロジェクト, 植物の生長調節, 48, 169-171, 2013.
- 36) N. Mitani-Ueno, N. Yamaji, J. F. Ma, High silicon accumulation in the shoots is required for down-regulating the expression of Si transporter genes in rice, *Plant Cell Physiol.*, 57, 2510-2518, 2016.
- 37) 明日をつくる土づくり肥料 <https://www.zennoh.or.jp/operation/hiryu/pdf/pamphlet.pdf> (2/18/2022)
- 38) スーパーソルとは <https://www.trims.co.jp/super-sol> (2/18/2022)

The 2nd Green Revolution

Kazutsuka Sanmiya

Department of Bioresources Engineering

Summary

Food acquisition by us *Homo sapiens* began with prehistoric hunter-gatherer. The food at that time must have been far from modern satiety. There are some major milestones in the history of food acquisition since then. Agricultural inventions, climate disasters, crop pathogens, democracy, market economy, industrial revolution, war, all have had a tremendous impact on our food. We have been short of food many times in history and have overcome it each time. The "Green Revolution" in 1960s was one of the greatest technological innovations ever. We are still able to acquire food this way. But now, the benefits of the Green Revolution are gradually diminishing, with today's world hungry population exceeding 800 million. We are facing new risks of our time: population growth, agricultural soil destruction and global warming. We need the "Green Revolution" again. As the attempt, molecular breeding by genetic recombination is being promoted immediately. However, it is calculated that this method will not be in time for population growth at all. I decided to address this issue with a new fertilizer that supplies silicate to the crops.

Key words: Food shortage problem, Agriculture, Green Revolution, Molecular breeding, Silicate

沖縄語の名詞・動詞・形容詞・副詞の「修飾語」と「規定語」 —首里・那覇を例にして—

*崎原 正志

総合科学科 (mashi_s@okinawa-ct.ac.jp)

要旨

首里・那覇を例にして、沖縄語の「品詞」および「文の部分」に関して、主に「名詞・動詞・形容詞・副詞」が表す「修飾語」および「規定語」の記述を行う。村木新次郎(2012)『日本語の品詞体系とその周辺』に従えば、品詞は、「文の材料としての単語の語彙＝文法的な特徴による分類」であり(p.51)、文の部分とは、「当該の文を構成している要素」で、「1つの単語が文の部分になることもあるが、単語の結合体が文の部分となることもある」(pp.50-51)。これらの定義を基に、鈴木重幸(1972)『日本語文法・形態論』も参照し、これらふたつの先行研究の共通点や相違点などの比較・分析を行いながら、日本語の品詞体系とその周辺、および文の部分について再確認する。また、琉球諸語の品詞体系については、下地理則(2018)『南琉球宮古語伊良部島方言』を参照し、全体の整理を行った後、先述の村木(2012)にしたがって、沖縄語の品詞および文の部分について記述する。

キーワード：文の部分、品詞、語(単語)、沖縄語

1. はじめに¹

「鳥は空を飛ぶ。」という文の「空を」は「飛ぶ」の対象(補語)ではなく、状況(状況語)を表す。英語の *Birds fly in the sky.* の文と比べてみると、「鳥は」の部分に *Birds* が、「空を」の部分に *in the sky* が、「飛ぶ」の部分に「*fly*」が対応している。

「鳥・空」や「*birds・sky*」は名詞で、「飛ぶ」や「*fly*」は動詞である。「は・を」や「*the*」は語ではなく、語の部分である²。名詞は主語や補語になることを主要な機能とする。副次的に述語・修飾語・規定語・状況語・独立語になる。動詞は主に述語になり、副次的に修飾語・規定語・状況語になる。上例では、「鳥は」は主語、「空を」は状況語、「飛ぶ」は述語である。

このような文の部分と品詞に関する議論は日本語学においては当たり前になってきたが³、琉球諸語

¹ 本稿は、崎原(2019)および崎原(2021)の発表を発展させたものである。

² 「*in*」の扱いに関しては、筆者の研究不足のため保留とする。

³ 鈴木(1972)、松本(2005)、村上(2010)、村上(2019)、村木(2010)、村木(2015)、三尾(1958)など。

学においてはあまり議論されていない。標準日本語をそのまま訳したような沖縄語の文もみかけるが、それは文の部分と品詞に関する議論が不十分であることを示しているのだろう。

本稿では、単語、品詞、文の部分とは何かについて整理し、沖縄語の品詞と文の部分について考察し、琉球諸語における品詞と文の部分についての議論を深めていきたい。

また、本稿で用いられている用例は、芝居の脚本や、会話集、筆者が調査によって採集したものなどである。尚、本稿で言う沖縄語とは首里・那覇を中心とした広範囲で使用される社会方言を指す⁴。先人たちの知識と労力に心より感謝申し上げます。

表1 用例の典拠一覧

略称	出典情報	テキストの種類
(大沖)	「大好き沖縄」編集部(編).『大好き沖縄』	民話(モノログ)
(沖辞)	『沖縄語辞典』	辞典
(音声)	首里那覇音声データベース ⁵	談話資料(調査票)
(語遊)	儀間進「語てい遊ばなシマクトゥバ(新聞連載コラム ⁶)」	創作会話集
(暮らし)	宮里朝光他(2006)『沖縄ぬ暮らしとう昔話』	創作会話集
(猿)	玉那覇朝子(訳).『猿の生肝』	沖縄芝居の脚本
(実践)	又吉元亮(1997)『実践首里語テキスト』	創作会話集
(芝居)	那覇市教育委員会, & 沖縄言語研究センター(1994a) 『沖縄芝居脚本集第2巻(後略)』	沖縄芝居の脚本
(芝居2)	那覇市教育委員会, & 沖縄言語研究センター(1994b) 『沖縄芝居脚本集第3巻(後略)』	沖縄芝居の脚本
(全国)	『全国方言文法データベース』	談話資料(調査票)
(楽沖)	中松竹雄(2003)『楽しい沖縄語会話』	創作会話集
(調査)	面接調査・80代男性、首里平良町出身	談話資料(調査票)
(那民)	那覇市教育委員会(1982)『那覇の話資料』第4集	民話(モノログ)
(日放)	日本放送協会(編)(1972)『全国方言資料』第10巻	談話資料(自然談話)
(ニュ)	伊狩典子他(1998)『しまくとうば』	方言ニュース原稿
(入門)	西岡敏・仲原穰(2000)『沖縄語の入門(後略)』	テキスト
(フィ4)	儀間進(2005)『うちなあぐちフィーリングパート4』	散文(エッセイ集)
(方談)	国立国語研究所(編)(1985)『方言談話資料(8)(後略)』	談話資料(自然談話)
(方談10)	国立国語研究所(編)(1987)『方言談話資料(10)(後略)』	談話資料(自然談話)
(琉球弧)	儀間進(1979)『琉球弧: 沖縄文化の模索』	散文

⁴ 「首里那覇社会方言」の詳細については、當山(2015)を参照。

⁵ 2022年2月2日 現在、リニューアル中のため、利用不可。

⁶ (語遊「スン」2009/6/28, p. 18)のように「」内に見出し語、後ろに掲載日付とページ数を記載する。

今回は、用例のほとんどを崎原(2017)から引用した。したがって、全てを網羅したとは言えない段階にあるが、これを出発点に発展させていけたらと考えている。

用例の表記方法は、簡易的な音韻表記で記す。長音は aa, ee, ii, uu, oo、促音は kk, tt, cc のように音を重ね、声門閉鎖音はʔで記す。/s/は、i と e の前で[e~ʃ] (シ・シエ) となる。[tɕ~tʃ] (チャ・チ・チュ・チェ・チョ) や[dʒ~dʒ] (ジャ・ジ・ジュ・ジェ・ジョ) は、/c/や/z/で記す。

助詞(／助辞／くっつき／接語)の前には= (イコール) を置き、接辞との境界には- (ハイフン) を置いて区切る。グロスはこの通りである。

表2 グロス一覧

1 一人称, 2 二人称, 3 三人称, ABL 奪格(から), ADD 累加・共存(も), ADN 連体, ADVRS 逆接(だが), ALL 方向格(へ), ASSRT 強い主張(よ), BEN 受益, CMPR 比較格(より), CND 条件(たら・れば), CNJ 接続詞, COM 共格(と), COP コピュラ, CPL 完結・完了(してしまった), CAUS 使役, CH 士族・貴族言葉, CL 平民言葉, CLM 主張(さ), CSL 原因・理由(ので), DAT 与格(に), DES 希望(たい), DIM 指小辞, DIREV 直接証拠(ようだ・そうだ・らしい), DUB 疑い, EQ 問い返し質問, F 女性言葉, FIL フィラー, FN 形式名詞, FOC 焦点化, GEN 属格(の), HMB 謙譲語, HON 尊敬, 敬意, HORT 勧誘, IMP 命令, IMP1 第一命令形, IMP2 第二命令形, IMPRS 印象(ような気がする), IND 直説法・叙述法, INDC 働きかけ, INF 不定, 連用形, INFR 推量(だろう・はず), INST 具格(で), INT 意志, INTJ 感動詞・間投詞等, INTR 前置き, IP 間投助詞, LIM 限界格, LOC 場所格, M 男性言葉, MIR 驚き・意外等, MON 独話・独り言, NASS 断定回避, NEG 否定, NLZ 名詞化, NOM 主格(が), OBLG 義務・必要(しなければならない), PASS 受身, PEJ 軽蔑, 卑下, PFX 接頭辞, PL 複数, POL 丁寧さ, POT 可能, PROG 継続相, PROH 禁止, PST 単純／第一過去, PST2 証拠性／第二過去(しよった), PST3 推論を含む過去(してある), PUR 目的(しに), QT 引用, RES 結果(してある), SEQ 中止・継起(して), SFP 終助詞, SG 単数, SIM 同時・並行(しながら), SYNT 同調・同意(ね), TOP 主題(は), VOC 呼格, WHQ 補充／疑問詞質問, YNQ 真偽／肯否質問, YNQ2 真偽質問2, YNQ3 その他の質問文。

1.1. 先行研究と用語の整理

今回、先行研究と用語の整理のため、参照した文献は次の3つである。

1. 村木新次郎(2012)『日本語の品詞体系とその周辺』(ひつじ書房)
2. 鈴木重幸(1972)『日本語文法・形態論』(むぎ書房)
3. 下地理則(2018)『南琉球宮古語伊良部島方言』(くろしお出版)

副次的に、1の文献に関して、村木新次郎(2015)「日本語の品詞をめぐる」『日本語文法』15巻2号を、2の文献に関して、村上三寿(2019)「言語の普遍性のもとで日本語のしくみをとらえる」『琉球アジア文化論集：琉球大学人文社会学部紀要』5を、3の文献に関して、下地理則(2015)「現代日本語ムード・テンス・アスペクト論(書評)」『日本語文法』15巻2号を参照した。

1.2. 単語の認定

鈴木(1972)は、「が・を・の」のような形式は、単語ではなく、くっつきとする(p.152)。ただし、「単語的な性格をもっている」ことは認め、「単語と語尾・接尾辞の中間に位置するものである」と定義している(p.152)。

村木(2012)も、原則、鈴木(1972)にしたがい、単語を語彙的な意味と文法的な形式を持ち、文の部分になる性質を備えた言語形式だとする(pp.63-64)。また、「が・を・の」のような形式は、語彙的な意味を欠き、それ自身が文の部分になれないという点から、助辞(広義の接辞)としているが、結びついている形式との分離性・独立性は高いとする(同上)。

下地(2018)は、形態統語的自立性と音韻的自立性という観点から、語・接語・接辞を区別している(pp.53-54)。「が・を・の」のような形式を助詞とし、名詞や動詞とならぶ品詞のひとつとしている。また、語レベルでは「が・を・の」は接語であり、語や接辞と対立する(同上)。

やや乱暴なまとめだが、どちらも「が・を・の」の分離性・自立性を認め、鈴木はくっつき、村木は助辞、下地は助詞としている。本発表では、「が・を・の」は単語の部分だとする村木の定義にしたがうが、慣例の「助詞」という用語に統一して表記する。

1.3. 品詞について

村木(2012)は、品詞を「文の材料としての単語の語彙=文法的な特徴」によって「分類」したものとする(p.51)。名詞・動詞・形容詞・副詞・陳述詞・接続詞・感動詞・後置詞・助動詞・従属接続詞を挙げている。尚、コンピュータ類は、「単語と単語の要素である形式(形態素)との中間に位置づけられるもの」で、助動詞と関連する半単語とし、独立した品詞は立てていない。陳述詞は鈴木(1972)でいう陳述副詞のことである。村木(2012)と鈴木(1972)は、副詞から陳述(副)詞を区別している。まとめたのが表3である。後述の通り、「～成分」を「～語に」置き換えても差し支えない。

表3 品詞とその機能(村木2012, p.61)

		一次的な機能	二次的な機能
主要な品詞	名詞	主語や補語になる(曲用する)	述語・修飾成分・規定成分・状況成分・独立成分になる
	動詞	述語になる(活用する)	修飾成分・規定成分・状況成分・(主語・補語になる)
	形容詞	規定成分/述語になる(活用する)	修飾成分・(主語・補語になる)
	副詞	修飾成分になる	(規定成分・述語になる)
周辺	自立	陳述詞	陳述成分になる
		接続詞	接続成分になる

的 な 品 詞	的	感動詞	独立成分になる	
	補 助 的	後置詞	名詞とくみあわさって、状況成分・規定成分になる	補語・述語になる
		助動詞 ⁷	述語の本体とくみあわさって、述語の文法的な意味にかかわる	
		従属接続詞	節をうけて状況成分になる	

表3の通り、主要な品詞である名詞・動詞・形容詞には一次的な機能と二次的な機能がある。そのため、機能に合わせて、語形変化を伴う（例えば、名詞であれば、主語のときは「～は／が」、補語のときは「～を」、状況語のときは「～で」等となり、形容詞であれば、規定語のときは「～い／な／の」、修飾語のときは「～く／に／ ϕ 」等となる）。副詞は例外として、主要な品詞のひとつではあるが、基本的に一次的な機能（修飾語となる）しかなく、語形変化がないという特徴がある⁸。

この他、名詞は、規定語になるだけでなく、規定を受ける側にもなる（ccu=nu mimi 「人の耳」、nintooru ccu 「寝ている人」、?unu ccu 「その人」など）。また、名詞や動詞、多くの形容詞や一部の副詞は、修飾を受ける側にもなる（?ippee siiza 「だいたい年上」、?ippee awatitooon 「とても慌てている」、?ippee sikaraasan 「とても寂しい」、?ippee juu wakain 「とてもよくわかる」という構文的特徴なども考慮する必要がある。

村木（2012）は、単語の認定や品詞体系については、概ね、鈴木（1972）にしたがうとしているが（p.36）、形容詞の扱いに関して、次のような違いがある。

村木（2012）：「イ／ク」を語尾変化とし、両者を形容詞とする（例：はやイ／はやク）（p.66）。

鈴木（1972）：「い→く」を派生による品詞の転成とし、形容詞→副詞とする（p.161, p.467）。

この違いは、単語の機能を分析する上で、大きく影響する。どちらの立場を取るか、はっきりさせて論じる必要があるだろう。本稿では村木（2012）にしたがって記述する。

1.4. 文の部分について

文の部分は、文の成分とも呼ばれ、村木（2012）は、文の部分を単語の「文中における機能」だと定義する。つまり、名詞に分類される単語が文中において、主語や、述語や、修飾語や、状況語などとして機能する。文の部分には、述語・主語・補語・修飾語・規定語・状況語・陳述語・接続語・独立語を挙げている。尚、村木（2012）では、修飾語以下は「～語」という用語を使用せず、「修飾成

⁷ 村木（2015）では、「補助述語詞」と名づけに違いがある。

⁸ 上記のような特徴から「副詞」を主要な品詞から除外することもできる。

分・規定成分」のように「～成分」という用語を用いているが、記述の便宜上特に区別する必要はないと考えるため、本稿では、すべて「～語」で統一する。

またまた乱暴なまとめだが、まとめると、次のようになる（詳細は村木 2012 や村木 2015 を参照）。

補語：目的語、対象語（鈴木 1972）とも呼ばれる。「述語があらわす属性に必要な〈対象〉をおぎなう文の成分」のことである（村木 2012, p.54）。日本語では主に格助詞「を」を伴って表される。

修飾語⁹：連用修飾語のうち、補語・状況語・陳述語を除いた「述語があらわす属性の〈内的特徴〉（様子、程度、量）をくわしくする」狭義の連用修飾語のことである（同上, p.54）。

規定語：いわゆる連体修飾語である。

状況語：（主語と述語からなる）文全体の「〈外的状況〉（時間、場所、原因、目的、場面）をあらわす任意的な文の成分」である（同上, p.56）。

陳述語：いわゆる陳述詞があらわす機能である（鈴木では独立語の一種、陳述副詞が表す）。

接続語：「単語と単語、あるいは文と文をつなぐ成分である」（同上, p.57）（鈴木では独立語の一種、接続詞が表す）。

独立語：いわゆる感動詞があらわす機能である（鈴木では独立語の一種、感動詞が表す）。

下地（2018）では、形態統語的自立性と音韻的自立性という観点から、語・接語・接辞を区別していると述べた。そのうち、形態統語的に自立した「語と接語」を、統語的位置や機能によって分類したものを「語類（word class）」と呼んでいる（p.71）。主要な語類には、名詞類・連体詞・動詞・形容詞・助詞の5つを挙げている。その他の語類に、副詞・接続詞・間投詞を挙げている。指示詞、疑問詞、PC 語群は、複数の語類にまたがる機能類（function class）だとする。

これらを踏まえて、試験的に、村木（2012）の分類方法を基に、沖縄語の品詞と文の部分についてまとめてみる。ただし、今回は、主要な品詞である名詞・動詞・形容詞・副詞が表す機能に焦点をあてて記述する。周辺的な品詞の詳細な分析・記述に関しては今後の課題である。

2. 沖縄語の文の部分と品詞について（分類）

沖縄語の文の部分と品詞について試験的に分類を行ってみる。しかし、今回は用例の多くを崎原（2017）にしぼったため、網羅できていない部分もあり、より詳細な分析はこれからである。あくまでも今後の研究につなげていくための記述である。また、全体の記述を試みたが、紙幅の都合上、本

⁹ 村木（2012）では、「修飾成分・規定成分・状況成分・陳述成分・接続成分・独立成分」というように「語」ではなく「成分」という用語を使用しているのは、これらが、副次的な文の部分であるからであり、文の中核を成す主語・述語・補語とは区別するためである。しかし、先述の通り、本稿では、このような区別は行わず、「語」に統一して記述を行う。

稿では、「修飾語」と「規定語」の記述を掲載するに留める。尚、文の部分についての定義は村木(2012)の説明を直接引用する。

2.1. 修飾語

「述語があらわす属性の<内的特徴>(様子、程度、量)をくわしくする副次的な文の部分である。動詞や形容詞に従属する。疑問詞「どう」「どのように」「どんなに」「どのくらい」「いくつ」「いくら」などの語句に対応する。修飾成分になる中心は副詞である」(村木 2012, pp.54-55)。

2.1.1. 副詞の「修飾語」

副詞には語形変化がなく、主要な機能は修飾語になれることである。

2.1.1.1. 様子(疑問詞「どう」「どのように」に対応)¹⁰

- 1) keeim-i. joonnaa ?ik-i=joo.
帰る-YNQ ゆっくり 行く-IMP1=SFP
「帰るのか。ゆっくり行けよ。」(日放, 306-307)
- 2) sikam-an gutu saanai ?ir-ee simut-ee-ru-munnu.
驚く-NEG よう さっさと 言う-CND 済む-RES-ADN-FN.非難
「ビビらんでさっさと言えばよかったものを。」(芝居, 978)

次のような時間的な側面を表す用例は、ある種の様態的特徴も捉えているため、その機能は、時間的な状況語と程度を表す修飾語にまたがっている。

- 3) ?attani¹¹ kurazoorit-oon.
急に 暗くなる-PROG
「急に暗くなっている。」(音声「クラジョーリユン」)
- 4) humicee tatta cuuku=ru na-ibii-kutu, joozin si-misoor-i=joo.
熱気.TOP だんだん 強く=FOC なる-POL-CSL 用心 する-HON-IMP1=SFP
「熱気はしだいに強くなりますから、用心しなさいませ。」(調査, 2016/7/25)

¹⁰ 副詞には、他に mattooba (まっすぐ)、zibattu (ぎっしり、容器などにすきまなく入ったさま)、hukubukuutu (ふくよか)、matteen(gwaa) (まん丸く、まるまると)、jahwatteen(gwaa) (柔らかく)、zattu(gwaa)(ni) (ざっと、簡単に)、kasiikasii (さっさと)、?uttaati (わざと、故意に)、cirinaatarinaa/cirinaataranaa (切らしたり足りなくなったり)、hwiciribicciri (切れ切れに) などがある。

¹¹ ?atta-は接頭辞である。他の語や形態素について「急、いきなり」といった意味を付け加える。例えば、?atta-bui (にわか雨)、?atta-uduruci (急に驚くこと、びっくり) など。

2.1.1.2. 程度 (疑問詞「どんなに」に対応)¹²

程度を表す修飾語は、①程度強調、②比較強調、③様態強調の3つに分けられる。

2.1.1.2.1. 程度強調 (動作や状態等の程度を詳しくする)

- 5) macija=nu ?uiagi=nu ?ucikud-i ?ippee kumat-oon.
商店=GEN 売上=NOM 落ち込む-SEQ とても 困る-PROG
「商店の売上げが落ち込んで、とても困っている。」(ニュ, 25)
- 6) zikoo ?awari s-oo-ibiin.
とても 苦勞 する-PROG-POL
「とても苦勞しています。」(実践, 26)
- 7) ?anindee ?iinee ?usumasa wazir-ac-i ?uturumun nai-ta-ru hazi.
そんな風に 言う-CND すごく 怒る-CAUS-SEQ 恐ろしい事 なる-PST2-ADN INFR
「そう言ったら酷く怒らせて怖い思いをしていただろう。」(琉球弧, 216)
- 8) cuu=ja kawati sikaraasan.
今日=TOP かわって 寂しい
「今日は格別に寂しい。」(沖辞, 316)
- 9) cinkwaa=ndi ?i-see waka-inagu-nucaa=ja ?ansukaa sic-abir-an=doo=tai.
かぼちゃ=QT 言う-NLZ.TOP 若-女-PL=TOP あまり.TOP 好き-POL-NEG=SFP.ASSRT=POL.F
「かぼちゃって言ったら、若い女たちはそれほどは好きじゃないですよ。」(実践, 18)

2.1.1.2.2. 比較強調 (動作や状態等の程度が一方より異なることを強調する)

- 10) naada=naa naada=naa s-i ?agimaa s-ank-ee. juku=n nikka nai-sa.
まだ=YNQ2 まだ=YNQ2 する-SEQ 急き立てる事 する-NEG-IMP2 もっと=FOC 遅く なる-SFP.CLM (語遊「アギマースン・アシガチュン」2009/10/25, p. 15)
「まだかまだかと言って急き立てないでよ。もっと (余計に)遅くなるよ。」
- 11) hwizai=jaa. niziri=ncoon kan-aan-munnu, hwizai=ja juku=n kan-aan.
左=IP 右=でさえ 敵う-NEG-CSL 左=TOP もっと=FOC 敵う-NEG
「左か。右でさえ敵わないのに、左はもっと (余計に)敵わない。」(芝居, 694)

2.1.1.2.3. 様態強調 (事象の様態の観点から程度を詳しくする。程度修飾を受けることが可能)

- 12) cuuzuutu jaacuu jacu-ru kangee jan=di=nu kutu ja-ibiin.
強く お灸 焼く-ADN 考え COP=QT=GEN 事 COP-POL
「強くお灸をすえる考え¹³だとの事です。」(ニュ, 136)

¹² 他にも sakkoo, sitataka, ?umicittu があるが否定的な表現と結びつくため制限がある (本文中の ?usumasa もそうかもしれない)。また、古い表現に duudu/duttu (非常に)、siguku (すごく) などがある。また、jumu-sikaraasan (非常に寂しい) の jumu/jun-や soo-icigatanasan (非常に敷居が高い) の soo-, kee-wasiriin (つい忘れる) の kee-, cii-wasiin (つい忘れる) の cii-, saa-hagoosan (薄汚い) の saa-, suru-hazikasan (こっぴどかしい) の suru-, sara-miimun (まったく新しいもの) の sara-, maa-mattengwaa (丸々と) の maa-, ?uc-cikajun (使い果たす) の ?uQ-のような接頭辞による程度の付け加えがあるが、語彙的な意味に取り込まれていて、単体としては文の中で機能しない。語基や接辞の品詞性も考えられるが、単語とは区別して論じる必要がある (村木 2012, pp.78-79)。

¹³ 直訳。「厳しく取り締まる方針」くらいの意。

2.1.1.3. 量 (疑問詞「どのくらい」「いくつ」「いくら」に対応)

程度と量は連続的である。ここで挙げるものが程度の意味で用いられる場合もある。また、次に挙げる例の他に、?uciuciitu (軽く)、?umujoo(gwaa) (ほんの少々、おぼろげに)、bicceen(gwaa) (ほんの少し)、bannai (どンドン) などがある。

13) ccu=nu mandoo-ibii-ru-munnu kuree nagee mat-an=dareena-ibiran=doo.

人=NOM 多い-POL-ADN-CSL これ.TOP 長く 待つ-NEG=OBLG-POL=SFP.ASSRT

「人が多いですから、これは長く待たなければなりませんよ。」(入門, 116)

14) naada jud-ee-uran. ?icutaa mat-i.

まだ 読む-SEQ.TOP-いない 少しの間 待つ-IMP1

「まだ読んでない。ちょっと待て。」(入門, 18)

15) dateen huubi ?utabimiseen=ri.

たくさん 褒美 BEN.HON=QT

「たくさん褒美をくださるって。」(芝居, 982)

16) zinoo jukai cikat-a-ra=jaa.¹⁴

お金.TOP 相当 使う-PST-DUB=YNQ3

「お金は相当使っただろう?」(芝居, 1092-1094)

17) naahin benkjoo s-oot-eer-ee sikenoo ?utir-ant-a-ru hazi ja-siga.

もう少し 勉強 する-PROG-PST3-CND 試験.TOP 落ちる-NEG-PST-ADN INFR COP-ADVRS

「もう少し(もっと)勉強していたら試験は落ちなかっただろうが。」(調査, 2015/6/3)

2.1.1.4. 結果

その他、副詞には述語で表される事象の変化の結果を表すものがある。

18) kurikaa=nkai miikuni cukur-att-a-ru subajaa

この辺=DAT 新しく 作る-PASS-PST-ADN そば屋

「この辺に新しくできた (lit.作られた) そば屋」(入門, 114-115)

また、次にみる変化の結果を表す副詞は、動詞 nain (なる) と組み合わせさせて、ひとまとまりで述語となり、文として成り立つ。

19) teerjuuzo=kara=ndi ?ii-nee, sipuutu nat-oon=tee.

停留所=ABL=QT 言う-CND ずぶ濡れ なる-PROG=SFP

「停留所からだど、びっしょりになっただろうねえ。」(話遊「ンディオン」2010/7/25, p. 13)

20) naada=naa naada=naa s-i ?agimaas-ank-ee. juku=n nikka nai-sa.

まだ=YNQ2 まだ=YNQ2 する-SEQ 急き立てる-NEG-IMP2 一層=FOC 遅く なる-CLM

「まだかまだかと言って急き立てないでよ。余計に遅くなるよ。」(用例 38 と同じ)

¹⁴ jukai (相当) は主に量について言うが、意味拡張して、程度を示す場合もあるようだ。また規定用法もあるため、形容詞として分類できる可能性もある (jukai jan と言えるかどうか)。

2.1.1.6. 副詞のいろいろ¹⁵

鈴木(1972)は、副詞とされている単語のうち、いくつかは「の」を伴って規定語になったり、コピュラを伴って述語になるものが日本語にあり、これらの単語の品詞の認定に関しては議論の余地があるとしている(pp.462-463)。

沖縄語においても、具体的ではない、ある一定のまとまりとしての数や量を表す?uhwooku(多く・たくさん)や?ihwi(少し)の類、kuuteen(gwaa)(ほんの少し)、?inteen(少し)、muru(全部)などは、助詞がついて規定語になったり、そのままの形で修飾語になったり、述語になったりして、品詞の認定は意見が分かれるところであり、当面、決めてかかることはできないが、主に修飾語として機能するため、とりあえず、今回は副詞の項で記述しておく。

?uhwookuは、?uhwooku=nu ccu-nucaa「たくさんの人たち」のように、=nuを伴って規定語になれば、そのままの形で修飾語にもなれる。ただし、述語になることはできない。したがって、第三形容詞に分類できる可能性もある。

- 21) cuu=ja depaato cuu=nu ?uhwooku ?icc-oon=jaa.
今日=TOP デパート.TOP 人が たくさん 入る-PROG=SFP.SYNT
「今日はデパートは人がたくさん入っているねえ。」(全国, 1-6-2)

「少し」の語形に地域差による音声的な違いや、その他様々なバリエーションがあるが、修飾語としての文の機能は変わらない。焦点助詞がついて対比したり、指小辞-gwaaがついて「ほんの～」といった意味あいを付け加えるだけである。?ihwi ja-sa.(少しだよ)のように述語になったり、?ihwi=jaka wakaran.(少ししかわからない)のように助詞を伴って修飾語になったりする。

- 22) ciburu=nu ?ihwi-gwaa jamu-ssaa.
頭=NOM 少し-DIM 痛む=SFP.MON
「頭が少し痛むなあ。」(暮らし, 86)

- 23) A: caaga ?uhwee tuidukuru=nu ?a-ra=jaa.
いくらか 少し.TOP 取り分=NOM ある-DUB=SFP.SYNT
「いくらか少しは取り分があるだろうねえ。」
B: ?uhwi dukuru jam-i. muru tuidukuru ja-sa.
少し どころ COP-YNQ 全部 取り分 COP-SFP.CLM
「少しどころか!全部取り分よ。」(芝居, 982)

- 24) duku maku nai-kutu, ?ihwee banmikasa-wa=rujaru.
あまりに 腕白 なる-CSL 少し.TOP ぱんとやる-CND=OBLG
「あまりに腕白だから、少しはこらしめてやらないと。」(音声「バンミカスン」)

- 25) ?ihwinaa k-uu=joo.
少し 来る-IMP=SFP
「たまには (lit.少しは) 来なさい。」(方談 10, 255-256)

¹⁵ 時間副詞は、主に「状況語」=時間を表すため本稿では記述しないが、先に述べたように時間的な側面と様態的な側面を持つ時間副詞も存在する。紙幅の都合上、詳しくは別の機会で行う。

kuuteen(gwaa) (ほんの少し) は、-na を伴って、規定語になれる (kuuteen-na ?ukka 「わずかな負債」 沖辞, 346) ため第二形容詞として分類できる可能性がある。また、用例のようにそのままの形で、あるいは kuuteen=ssi simun (ちょっとでいい) のように助詞=ssi を伴って修飾語にもなれる。

26) kuuteen kwir-i.

少し くれる-IMP

「少しくれ。」(沖辞, 346)

muru (全部) はそのままの形で修飾語になれる。また、コンピュータ jan と組み合わせさせて述語になれ (例: kussa=saani murujan 「これで全部だ」)、助詞=saani を伴って修飾語になる (例: murusaani cassa natooga 「全部でいくらだ?」)。さらに、muru は「全然・まったく」という意味では、陳述語になる。

27) cuu=nu kutu muru wasir-a.

今日=GEN 事 全部 忘れる-INT

「今日の事全部忘れよう。」(調査, 2017/1/23)

mata (また) は、修飾語になったり、接続語や陳述語になったりして、多機能性を持つ特殊な副詞である。ただし、形態論上名詞的なふるまいをする mata は、意味上は修飾的である。

28) naa, ?isi ?itt-oo-kutu. mata ?uree siimee zoozi-jat-een=tee.

FIL 石 入れる-PROG-CSL また 3SG.TOP 潜り.TOP 上手-だ-RES.INFR=SFP

「あ、石を入れているから。またそいつは潜りは上手だったんだろうな。」[接続的、「そして」](方談, 345)

29) kungutooru ii hanasee mata=too neeran hazi=jaa.

このような 良い 話.TOP また=COM.TOP ない.ADN INFR=SFP

「このような良い話はまたとはないだろうなあ。」[修飾的、「再び」](芝居, 848)

30) cuu wakarit-i ?ik-ee, mata ?ici=ga ?ica-ra¹⁶ wakari=nu sakazicii.

今日 別れる-SEQ 行く-CND また いつ=FOC 会う-DUB 別れ=GEN 盃

「今日別れて行けば、またいつ会うだろうか別れの盃。」[修飾的、「再び」](芝居, 908)

31) ?unzoo mata nuunci ?unu hweesa ?uk-imisoooc-a-ga.

2SG.HON.TOP また なぜ この 早さ 起きる-HON-PST-WHQ

「貴方はまたどうしてこんなに早く起きなさったのか?」[陳述的(ミラティビティ)](実践, 13)

jukai (相当) は規定語になるとき、日本語の「相当な／の」のように -na も -nu も可能である (『沖縄語辞典』, p.287)。jukai jan という述語になる例を見つけていない。jukai は主に量を表す修飾語あるいは規定語になるが、そこから意味拡張して程度を表す例も多くあるようなので、副詞により近づいているのかもしれない。

2.1.2. 名詞の「修飾語」

名詞が修飾語になることもあるが、典型的な〈人・もの〉名詞ではなく、様態・数量を表し、副詞

¹⁶ 動詞 ?icajun (会う) の-ra 疑い形 (～だろうか) は、?icajura だが原文のまま掲載した。

に近い。形を変えずそのまま修飾語になれることもあれば、他の語や助詞と組み合わせさせて、修飾語になれることもある。

例えば、次は、名詞や名詞句が数や量を表す例である。

32) cukeen ?nzas-ee=karaa hikkumir-an-sa.

一回 出す-CND=ABL.TOP 引っ込める-NEG-SFP.CLM

「一回出したならば戻らないよ。」(実践, 46)

33) ?umukazi=nu bun=jaa.

面影=GEN 分=SFP

「ほんの気持ちの分 (ちょっとだけ) ね。」(フィ 4, 31)

名詞が副詞を修飾するケースもある。

34) nama sigu ?nzit-i ?ik-ee.

今 すぐ 出る-SEQ 行く-IMP1

「今すぐ出て行け！」(調査, 2015/11/30)

2.1.3. 形容詞の「修飾語」

形容詞が修飾語になる時は、第一形容詞では-san から-ku (あるいは-siku)¹⁷、第二形容詞では-jan から-ni の語形変化が起こる。

35) kuci magiku ?akij-aani

口 大きく 開ける-SEQ

「口を大きく開けて」(入門, 65-66)

36) dekisi=ndi ?i-see soozikini kaki-wa=ru=jaa.

歴史=QT 言う-NLZ.TOP 正直に 書く-CND=FOC=SFP

「歴史というのは正直に書かないとね。」(方談, 352)

ただし、第二形容詞では、そのままの形で修飾語になるものや、修飾語にならないものも存在する(表4を参照)。形容詞として分類するには、規定語になれることと、述語になれることが重要である(基本、主語や補語にはなれない)。規定語を欠き、述語にしかなれない形容詞もあるし、述語になれず、規定語にしかなれない第二形容詞(=連体詞)もある。次の表4に第二形容詞についてまとめてみたが、暫定的な分類である。

¹⁷ cuusan (強い) と cuuku (強く)、wakasan (若い) と wakaku (若く)、sikaraasan (寂しい) と sikaraasiku (寂しく) など。

表4 沖縄語の第二形容詞一覧¹⁸

グループ		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
機能形式	単語	sizika sooziki zoozi cirii(n)	tasika	teesici	makutu muri	rippa raku	ganzuu masi	tassja	gwanku hakuzoo	deezi	hasittu
	規	-na	○	○	○	○	○	○	○	○	○
述語	-jan	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	-sun	×	×	×	○	○	○	×	×	×	○
	-nain	○	? ¹⁹	×	? ¹⁹	○	○	? ¹⁹	○	○	○
修飾・陳述	-ni	○	○	○	○	○	? ¹⁹	○	×	×	×
	-φ	×	○	×	×	×	×	×	×	○ ²⁰	×

規定語になるとき nu を伴う第三形容詞（詳しくは後述）もそのままの形で修飾語になれる。

37) [識名御殿に散歩しに行きませんか?という問いに対して]

?an ja-ibii-sa=jaa. marukeeti ?ic-abiim-i.

そう COP-POL-CLM=SFP.SYNT 久しぶりに 行く-POL-YNQ

「そうですね。久しぶりに行きますか。」(楽沖, 101)

38) marukeetinaa=ja sumuci=n jum-an-i.

時々=TOP 本=ADD 読む-NEG-YNQ

「たまには本も読まないか!」(入門, 78)

2.1.4. 動詞の「修飾語」

その他、動詞も単独で、または句の形式で修飾語になる。主に様子・様態を表す。語形は中止形 (-i, -aani)、-igacii, -agacii (しながら) などをとる。

39) toohu=nu kasizusii ?awatit-i ?ucikwaj-ai

豆腐=GEN 粕雑炊 慌てる-SEQ 食らう-SEQ

「豆腐の粕入り雑炊を慌ててかきこんで...」(芝居, 1020-1022)

40) ?unccu-taa=j a mii=ja hurac-oot-i, nint-i=ru mensee-ee sabiran-i.

この人-PL=TOP 目=TOP 開ける-PROG-SEQ 寝る-SEQ=FOC いる.HON-のではありません-YNQ

「この人たちは目は開けていて、寝ていらっしゃるんじゃないやありませんか?」(実践, 37)

41) kuci magiku ?akij-aani, nuudii=nu ?uku misit-i kwi-misee-bir-i.

口 大きく 開ける-SEQ 喉=GEN 奥 見せる-SEQ BEN-HON-POL-IMP1

「口を大きく開けて、喉の奥を見せて下さい。」(入門, 65-66)

¹⁸ 以下、分類を保留したものである。mari (まれ) : mari-ni (まれに)、mari-na kutu (まれなこと) (沖辞, 363)。mari jan (まれだ) と言えるか要調査。hujuu (無精) : hujuu-na ccu (無精な人)、hujuu sun (無精する) (沖辞, 217)。

¹⁹ 「?」としたのは、文献未確認・未調査であるため。すなわち「×?」は、内省では不可だが、文献未確認・未調査であるため、そのように記した。

²⁰ 修飾成分として程度(とても・非常に)を表すのは、比較的新しい用法である(儀間 2005, p.17)。

- 42) jaa ?nzir-ee=kara tamasee kanagit-i=du ?accu-ru.
家 出る-CND=ABL 精神.TOP 引き締める-SEQ=FOC 歩く-ADN
「家を出たら気を引き締めて注意するんだぞ (lit. 歩くんだぞ)。」(フィ 4, 42)
- 43) cinkwaa koo-igacii sibui nc-oo-ibiit-an.
南瓜 買う-SIM 冬瓜 見る-PROG-POL-PST
「南瓜を買いながら冬瓜を見ていました。」(実践, 18)

-gutu を伴った「～する／しないように (～する)」も修飾語として働いている。あとの2例では-gutu を使った修飾語全体がもう一つの修飾語である kumeekiti (詳しく) や cimu isiti (気を静めて) を強調・補足している。

- 44) guburii=nu neeran-gutu s-an=dee naran=doo.
ご無礼=GEN ない-ように する-NEG=OBLG=SFP.ASSRT
「失礼の無いようにしなければならぬぞ！」(芝居, 546)
- 45) nuu=nu ?at-a-ga. wakai-ru-gutu kumeekit-i cik-ac-i turas-ee.
何=NOM ある-PST-WHQ わかる-ADN-ように 詳述する-SEQ 聞く-CAUS-SEQ BEN-IMP2
「何があったのか。わかるように, 詳しく聞かせてくれ。」(語遊「クメーカーン」2010/12/12, p. 13)
- 46) ?uduruci=n s-an-gutu cimu isit-i²¹ juu cik-i=joo=jaa.
驚き=ADD する-NEG-ように 肝 据える-SEQ よく 聞く-IMP=SFP=SFP.SYNT
「驚かないで, 気を静めてよく聞くんだよ。」(フィ 4, 67)

名詞／形容詞／副詞＋動詞 sun (する) がひとまとまりとして、述語になったり、修飾語になったり、規定語になったり、状況語になったりする。ここでは修飾語になる場合を挙げる。

・名詞＋ssi

- 47) curasugai ss-i ?ama=kai=du ja-ee s-an-i.
おしゃれ する-SEQ あそこ=ALL=FOC COP-INF.TOP する-NEG-YNQ
「おしゃれしてあそこにじゃないか？」(実践, 33)
- 48) wanee ?akaciciuki ss-i c-oo-ibii-siga.
1SG.TOP 早起き する-SEQ 来る-PROG-POL-ADVRS
「私は早起きして来ていますが…」(実践, 48)
- 49) naa=ja koogaaki ss-i ?nzit-i cuu-ta-ee s-an-i.
2SG.HON=TOP 頬被り する-SEQ 出る-SEQ 来る-PST2-INF.TOP する-NEG-YNQ
「あなたは頬被りして出て来たじゃないか。」(芝居, 964)
- 50) too, ?anse ?iibinuci ss-i misit-i kwi-misoor-ee.
INTJ CNJ 指差し する-SEQ 見せる-SEQ BEN-HON-IMP2
「そう, それじゃあ指で差して見せて下さいな。」(実践, 40)
- 51) tii hucukuruu s-oot-i, juntaku s-imisoo-i.
手 内に入れる様 する-PROG-SEQ おしゃべり する-HON-SEQ
「手をポケットに入れて, おしゃべりしなさって。」(実践, 38-39)

²¹ kukuru ?uticikiti (lit.心落ち着けて) に置き換え可能 (儀間 2005, p.67)。

・形容詞+ssi 用例が見つからなかったが、「?ussa ssi (喜んで) ~する」や「raku ssi (楽しんで) ~する」のような場合が考えられるだろう。

・副詞+ssi

- 52) takaturubai ss-i ?eezi ss-i=n hwizi=n s-an.
ぼーっと する-SEQ 合図 する-SEQ=ADD 返事=ADD する-NEG
「ぼーっとして呼んでも返事もしない。」(音声「タカトゥルバイ」)

動詞 nain (なる) も、名詞/形容詞/副詞+nain がひとまとまりとして、述語になったり、修飾語になったり、規定語になったり、状況語になったりする。ここでは修飾語になる場合を挙げる。様態を表す名詞に nat-i (なって) が組み合わさると、その「状態・様態で」という意味で「名詞+nati」がひとまとまりで修飾語として機能する。

- 53) haace nat-i ?nz-i k-uu=wa.
駆け足 なる-SEQ 行く-SEQ 来る-IMP=SFP
「駆け足で行って来い!」(猿, 1)

2.2. 規定語

「文中の名詞に従属する成分である。「どんな」や「どの」「誰の」「何の」「どこの」「いつの」などの疑問詞に対応する。規定成分には、装飾的に規定するものと、限定的・選択的に規定するものがある。装飾的な規定と限定的・選択的な規定とは、相互に排除する場合もあれば、双方をかねる場合もある」(村木 2012, p.55)。

2.2.1. 形容詞の「規定語」(連体修飾語とも呼ばれる)

疑問詞「どんな」に対応する(装飾的な)規定部分になる中心は形容詞である。形容詞単独で、あるいは句の形式で修飾語になる。

- 54) nasarii-ru daki jassa-ru sina ?aganeet-i c-aani
できる-ADN だけ 安い-ADN 品 探す-SEQ 来る-SEQ
「できるだけ安い品を探して来て...」(ニュ, 119)
- 55) kibun=nu wassa-ru ccu=nu nuuga kunu tamunoo nuu ja-ga.
気分=NOM 悪い-ADN 人=NOM 何か この 薪.TOP 何 COP-WHQ
「気分が悪い人がなんだこの薪は。どうした?」(芝居, 594)

また、単語作りの要素として、第一形容詞の-sa の形が名詞の前について複合語を作る。

- 56) mazi tihazimi=ni maasa maasu ?nzas-a=na.
まず 手始め=DAT 美味しい 塩 出す-HORT=SFP
「まず手始めに美味しい塩を出そう(そして、塩が溢れて止まらなくなるという話)。」(大沖 33, 86)

規定語になるとき、-saru ではなく、-sii になる第一形容詞がある²²。

- 57) kundu=n mata kamarasii kutoo ?ar-an=ga ?a-ra=jaa.
今度=ADD また ややこしい こと.TOP COP-NEG=FOC ある-DUB=SFP
「今度もまたややこしいことではないだろうね。」(芝居, 546)

第二形容詞は、規定語になるとき、-na をとる。

- 58) gwanku-na mun ja-kutu bjooin=kai=ja ?ik-an=di=du ?i-miseen=dec.
頑固な 者 COP-CSL 病院=ALL=TOP 行く-NEG=QT=FOC 言う-HON=SFP.NASS
「頑固な人だから、病院には行かないとおっしゃるんですよ。」(芝居 2, 1342)

neetukeetu (まずまず)、cikunaamukunaa (しわくちや)、marukeeti (時々、たまに)、bici (別)、huntoo (本当)などは、nu を伴い規定語になるため、**第三形容詞**として分類できる可能性がある²³。

- 59) sima=nu neetukeetu-nu utu mut-ee ?an s-ee sinroo=ja s-ant-i=n simut-a-ru-munnu.
島=GEN まずまず-の 夫 持つ-CND そう する-SEQ 心労=TOP する-NEG-SEQ=ADD 済む-PST-ADN-FN.仮想
「島のまずまずの夫を持てば、こうして心労しなくてもよかったのに。」(芝居, 568)

- 60) cikunaamukunaa-nu cin cic-i=ru ?icun=naa. huuzee neen-siga.
しわくちや-の 着物 着る-SEQ=FOC 行く=YNQ2 みっとも ない-ADVRS.NASS
「しわくちやの着物を着て行くの？みっともないが…」(調査, 2015/6/25)

- 61) macaahii marukeeti-nu naahwakembuci ja-gutu ?amakuma misit-i k-uu=hii=naa.
(人名) 時々-の 那覇見物 COP-CSL あちこち 見せる-SEQ 来る-INT=SFP=POL
「マチャー兄さん、たまの那覇見物だからあちこち見せて来ますね。」(芝居 2, 1482)

2.2.2. 動詞の「規定語」

動詞が装飾的な規定語になることもある。?icic-oo-ru ?iju (生きている魚)のように単独で、あるいは次のように句の形式で規定語になる。

- 62) ?ikusa sicu-ru ccu=nu u-ibiim-i.
戦争 好き-ADN 人=NOM いる-POL-YNQ
「戦争が好きな人がいますか。」(実践, 47-48)

2.2.3. 名詞の「規定語」

疑問詞「どの」「誰の」「何の」「どこの」「いつの」に対応し、限定的・指定的・選択的な規定語になる中心は「この」「その」「あの」のような指示的な単語と名詞である。名詞は、助詞=nu あるいは ga を伴って規定語となる(所有・所属の規定関係にある場合は ga を伴う場合もあるため)。

²² kamarasan - kamarasii (気難しい)、hukasan - hukasii (深い)、mizirasan - mizirasii (珍しい)、hwirumasan - hwirumasii (不思議な)、matasan - matasii (完全な) など。

²³ 日本語の第三形容詞が規定成分になるとき「の」の形を取るように、沖縄語でも「の」に対応する nu の形を取る形容詞を第三形容詞に分類できるだろう。他に、mattaci (そっくり)、?uccikacci (ほとんど同じの、おつつかつ)、tadeema (すぐ、急ぎの)、juhudu (余程) などがある。これらの語は主語や補語にはなれず、格体系を持たない。ただし、これらの語にはおそらく述語にはなれないものや、bici のように格体系を持つものもあるため検討を要する。

- 63) ?ama=nu toohu kamii-nee
あそこ=GEN 豆腐 食べる-CND
「あそこの豆腐を食べたら…」(実践, 33)
- 64) ?ittaa=gaa ?ari=ga kunzoo=ja wakar-an.
2PL=NOM.TOP 3SG=GEN 根性=TOP わかる-NEG
「お前たちにはあいつの根性(の悪さ)はわからない。」(実践, 17)
- 65) ccu=nu hanasi cik-i=joo.
人=NOM 話 聞く-IMPI=SFP.IND
「人の話聞けよ。」(作例)
- 66) nama=nu joosi=kara s-iinee
今=NOM 様子=ABL する-CND
「今の様子からすると」(全国, 1-7-2-5)

助詞=kara を伴った規定語も一例あった。

- 67) nama=kara nizuugunimnee kunu takoojama=uti
今=ABL 二十五年前 この(地名)=LOC
「今から二十五年前, この多幸山で…」(芝居, 778)

名詞/形容詞/副詞+sun(する)がひとまとまりとして、述語になったり、修飾語になったり、規定語になったり、状況語になったりする。ここでは規定語になる場合を挙げる。規定語になる時、sunはsuruに、soon(している)はsooruに変化する。

・名詞+sun

- 68) saki=nu jasiui su-ru macija=tu=nu ?uisuubuu ss-i ?ika-n=dareenaran-ai
酒=GEN 安売り する-ADN 店=COM=GEN 売り勝負 する-SEQ 行く-NEG=OBLG-SEQ
「酒の安売りするお店との販売競争をして行かなければならないし」(ニュ, 118)
- 69) mirukujugahuu=nu ?unigee su-ru miruku ja-siga,
豊年=GEN お願い する-ADN 弥勒 COP-ADVRS
「豊年のお願いをする弥勒だが」(那民, 123)

・形容詞+sun

- 70) waa=ga kanasa s-oo-ru hanazimi-gwaa=nu ?usa-gwaa ja-ibiin.
1SG=NOM 可愛い する-PROG-ADN (地名)-DIM=GEN (人名)-DIM COP-POL
「私が可愛がっている花染屋のウサグワアです。」(芝居, 560)
- 71) kunzan=utee ?untasa s-att-oo-ru ?anu tusui=nu
国頭=LOC.TOP 慕われる する-PASS-PROG-ADN あの 年寄=NOM
「国頭では慕われているあの年寄りが」(芝居, 804-806)

・副詞+sun

- 72) cinihizii=ja mattooba s-oo-ru tcu=nu cuu=ja...
日頃=TOP まっすぐ する-PROG-ADN 人=NOM 今日=TOP
「日頃はまっすぐな人が今日は…」(作例なので要調査)

2.2.4. 副詞の「規定語」

ʔuhwooku (多く・たくさん) や kuuteen (ほんの少し) は、=nu や-na を伴って、規定語になれる。鈴木 (1972) もこれらを副詞と認定するか、別の品詞とするかは検討を要すると述べている (p.463)。

3. さいごに

ここまで、形式 (品詞) を重視しながらも、意味や機能 (文の部分) の分析を不十分ではあるが、整理してみた。広く浅くではあるが、沖縄語の品詞のうち名詞・動詞・形容詞・副詞と、文の部分のうち修飾語・規定語について整理できたことは、これからの琉球諸語研究にとって草分け的かつ有意義な記述研究となるだろう。

語の認定やその定義、品詞の認定に関しては、研究者によってかなりばらつきがある。「名詞・動詞・形容詞・副詞」といった主要な品詞は、日本語、沖縄語両方に認められる品詞であり、また「修飾語」や「規定語」はどの言語にも認められる文の機能であるため、今回の分析では日本語の枠組みをそのまま分析に用いても差し支えないだろう。しかし、その他の周辺的な品詞に関しては、日本語の分析をそのまま適用させることは難しい場合もあるので、今後の分析ではその点を注意しながら、分析を続けていきたい。

引用／参考文献

- 狩俣 繁久 (2018) 「琉球語のとりたて表現」 野田尚史編『日本語と世界の言語のとりたて表現』くろしお出版.
- 儀間 進 (2005) 『うちなあぐちフィーリングパート4』沖縄タイムス社.
- 工藤 真由美 (2014) 『現代日本語ムード・テンス・アスペクト論』ひつじ書房.
- 言語学研究会(編) (1983) 『日本語文法・連語論 (資料編)』むぎ書房.
- 国立国語研究所(編) (1963) 『沖縄語辞典』大蔵省印刷局.
- 崎原 正志 (2017) 『琉球語沖縄首里方言のモダリティ：叙述・実行・質問のモダリティを中心に』琉球大学人文社会科学研究科博士論文.
- 崎原 正志 (2019) 「「名詞+する」日沖対照研究—首里・那覇方言を中心に—」沖縄言語研究センター月例研究発表会配布資料, 2019年5月25日, 琉球大学50周年記念会館.
- 崎原 正志 (2021) 「沖縄語の文の部分と品詞について—首里・那覇を例にして (覚書) —」沖縄言語研究センター月例研究発表会配布資料, 2021年6月5日, オンライン開催.
- 下地 理則 (2015) 「工藤真由美著『現代日本語ムード・テンス・アスペクト論』書評」『日本語文法』15(2). ひつじ書房.
- 下地 理則 (2018) 『南琉球宮古語伊良部島方言』くろしお出版.

- 鈴木 重幸 (1972) 『日本語文法・形態論』 むぎ書房.
- 當山 奈那 (2015) 「首里方言のなかの地域方言と社会方言」『琉球方言研究』4, 88-102. 琉球大学法学部国際言語文化学科琉球方言研究室.
- 松本 泰丈 (2005) 「品詞と文の部分」『語彙と文法の相関：比較・対照研究の視点から(社会文化科学研究科研究プロジェクト報告書)』123, 1-21. 千葉大学大学院社会文化科学研究科.
- 三尾 砂 (1958) 『話しことばの文法』法政大学出版局.
- 村上 三寿 (2010) 「〈文の成分〉はなぜ必要か—文を部分にわけることの意味」『国文学：解釈と鑑賞』75(7), 6-15. ぎょうせい.
- 村上 三寿 (2019) 「言語の普遍性のもとで日本語のしくみをとらえる」『琉球アジア文化論集：琉球大学人文社会学部紀要』5.
- 村木 新次郎 (2010) 「文の部分と品詞」『国文学：解釈と鑑賞』75(7), 102-111. ぎょうせい.
- 村木 新次郎 (2012) 『日本語の品詞体系とその周辺』ひつじ書房.
- 村木 新次郎 (2015) 「日本語の品詞をめぐって」『日本語文法』15(2). 日本語文法学会.

「異型花柱性」を巡る生態学と進化生物学の今

*渡邊謙太

技術支援室

kenta-w@okinawa-ct.ac.jp

要旨

異型花柱性は、被子植物に見られる性的多型で、長花柱花と短花柱花からなる二型花柱性と、それに中花柱花を加えた三型花柱性が知られている。花のタイプは遺伝型により決まり、一般に同じタイプの個体間の受粉では、種子を作らない（同型花不和合性）。そのため繁殖は送粉者（花粉の媒介者）に強く依存している。このような複雑な性表現である異型花柱性は、自殖を防ぎ、他殖を促進する植物の工夫と考えられている。チャールズ・ダーウィンによる1862年の論文「On the two forms, or dimorphic condition, in the species of *Primula*, and on their remarkable sexual relations」以来160年もの間、多くの研究者がこの現象を研究してきたが、今なお未解決の問題が多く残されている。

本総説では、まず異型花柱性について基本的な情報を解説し、続いてこれまで世界で展開されてきた異型花柱性に関連する研究テーマについて整理して紹介した。さらに、日本の在来植物を対象とした異型花柱性研究の文献についてシステマティック・レビューを行い、対象分類群の年代による変化や地理的傾向を示した。最後に日本の在来植物を対象とした異型花柱性に関する研究の主要なテーマになると考えられる異型花柱性の「適応的意義と維持」と「進化的崩壊」について、今後の研究課題を検討した。

南北に広がる島嶼国日本では、冷温帯から亜熱帯までの気候があり、一つの植物種が地域によって異なる送粉者と共生関係を結んでいる例もあり、繁殖生態や花形態の地域間比較等、今後も様々な研究の展開が考えられる。

キーワード：異型花柱性、二型花柱性、三型花柱性、日本列島、小笠原諸島、琉球列島

1 緒言

異型花柱性とは被子植物の性表現（雌雄性）の一つで、同じ種の両性花の形態に二型または三型を有する植物の繁殖戦略である。生態学の分野では有名な現象だが、この言葉を知っている人は専門家を除くとほとんどいないかもしれない。異型花柱性に関する研究は、これまで多くの研究者を魅了し、生態学や進化生物学等の分野に重要な影響を与えてきた。筆者もこの現象に魅了された一人として、この異型花柱性を中心とした生物学を研究してきた。本稿では、1) まず異型花柱性という現象とその特徴を

解説し、関連した研究がどのように展開し、なぜ多くの分野において重要なのかについて解説する。2) 続いて日本における異型花柱性の研究がどのような植物種を対象に行われてきたのかをシステマティック・レビューを通して紹介する。3) 最後に日本の在来植物を用いた今後の研究の可能性について、特に異型花柱性の維持と崩壊という観点から紹介する。

2 異型花柱性とは

2.1 被子植物の大発明「異型花柱性」

異型花柱性（ヘテロスタイリー；Heterostyly）は、被子植物に見られる他殖を促進する性的多型の一 種である。この性表現が特殊であるのは、全ての花は、それぞれの花の中に雄蕊（オシベ）と雌蕊（メシベ）の両方を持つ両性花であるにもかかわらず、個体によってオシベとメシベの長さが相補的に異なる二型や、三型の異なるタイプの花が存在することである（図 1）。花柱とはメシベを指し、異型花柱性はメシベ（花柱）の長さに多型があることを意味している。

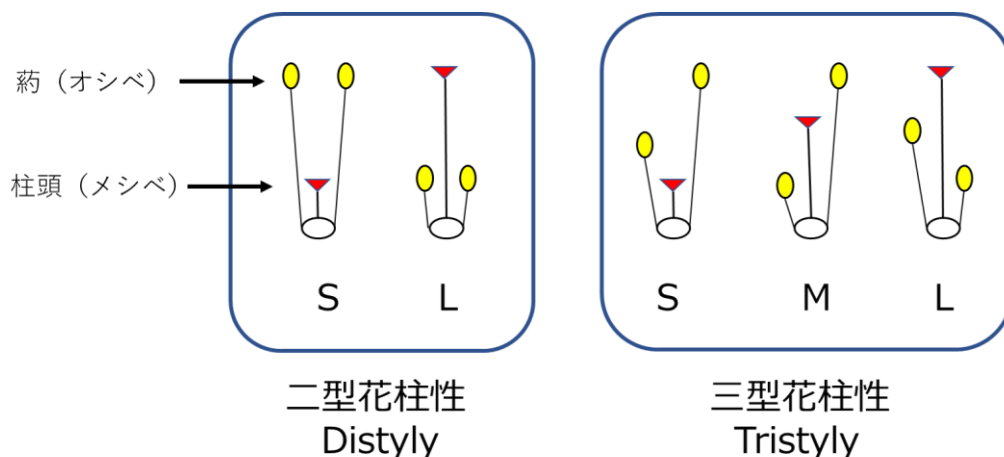


図 1. 二型花柱性 (Distyly, 左) と三型花柱性 (Tristyly, 右) の花の模式図。

赤い三角はメシベの柱頭を、黄色い楕円はオシベの葯を示す。二型花柱性はメシベの短い S 型、短花柱花 (Short-styled flower) とメシベの長い L 型、長花柱花 (Long-styled flower) の 2 種類の花から構成される。それぞれのタイプは、遺伝的に決まっており、一つの株には一つのタイプの花のみをつける。

三型花柱性では、オシベが二重に配置され、S 型、L 型に加え、M 型、中花柱花 (Middle-styled flower) がある。

二型花柱性の場合、メシベがオシベよりも長い長花柱花 (L 型, long-styled flower, pin) をつける個体とメシベがオシベよりも短い短花柱花 (S 型, short-styled flower, thrum) をつける個体の遺伝的に異なる 2 つのタイプが見られる (図 1 左、図 2)。これらの二つのタイプの花は、一般的に個体内の受粉では結実しない自家不和合性 (self-incompatibility) を持つ。さらに多くの場合、同じタイプ同士の花では、たとえ異なる個体の花同士で受粉したとしても種子を作ることができない同型花不和合性 (intramorphic incompatibility) を併せ持つ。つまり、結実するためには異なるタイプの個体同士で受粉する必要があり (適合受粉, legitimate-pollination)、そのためには花粉を異なるタイプの花の柱頭に届ける送粉動物 (花粉媒介者, pollinator) の存在が不可欠である。メシベとオシベのタイプ間での相補的な位置関係は、送粉動物への花粉の付着位置と密接に関係し、効果的な花粉の移動を助けているとも考えられる (図 3)。この異型花柱性は、全被子植物の 1% 程度存在すると推定されている (Renner 2014)。

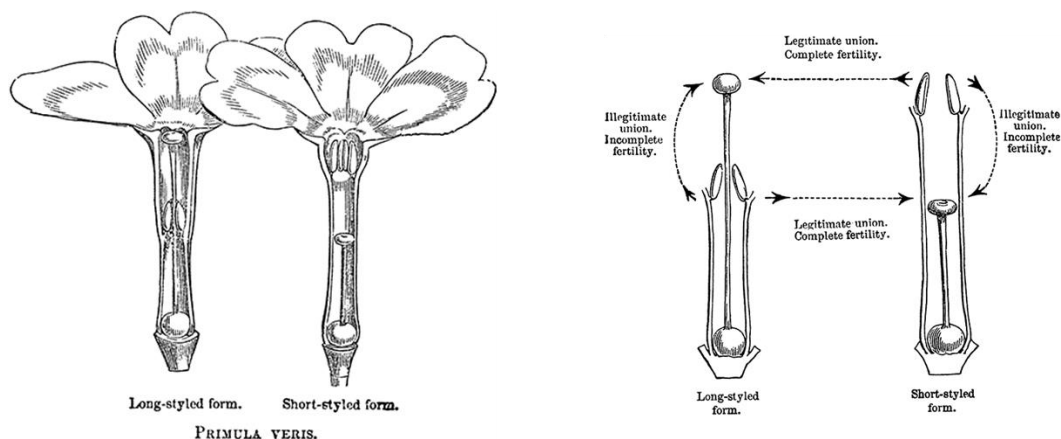


図 2. ダーウィンによるサクラソウ科カウスリップ (*Primula veris*) に見られる二型花柱性の図。

花の断面図 figure1 (左) とメシベとオシベの位置関係 figure 2 (右) を Darwin (1877) より転載。

いずれの図も左が長花柱花 (L型; Long-styled flower, メシベが長く柱頭が高い位置に、オシベは短く葯が低い位置にある)、右が短花柱花 (S型; Short-styled flower, メシベが短く柱頭が低い位置に、オシベは長く葯が高い位置にある)。

同じ花の花粉や同じタイプの花の花粉では受精せず (Illegitimate)、異なるタイプの花の花粉を受粉する必要がある (Legitimate)。異なるタイプのメシベとオシベが相補的な位置関係にあることがわかる。

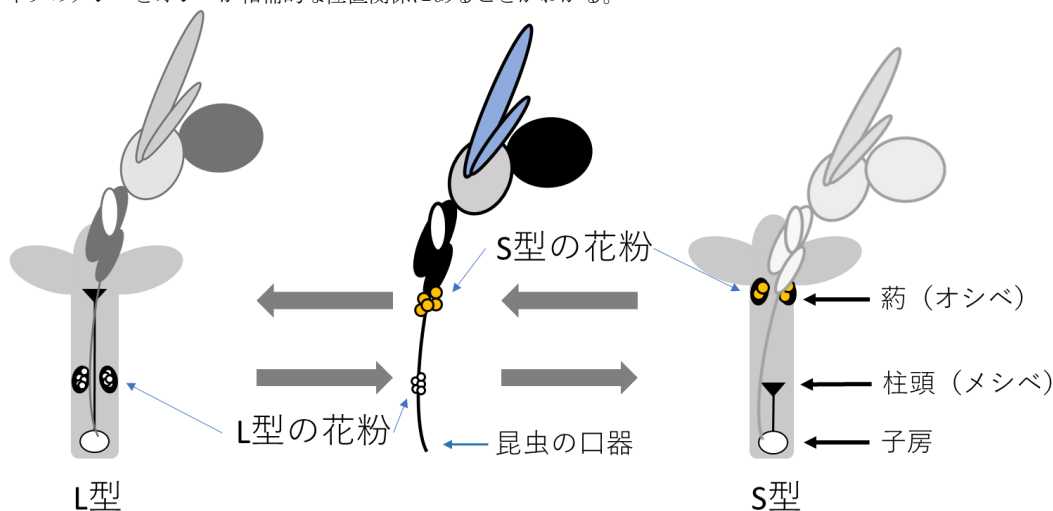


図 3. 二型花柱性の L 型 (長花柱花) と S 型 (短花柱花) の花を訪れた訪花昆虫と花粉の付着部位の想定される関係 (渡邊 2021 を改変)。

L 型の花粉 (白い丸) はオシベのある低い位置 (昆虫の口器の先端) に付着し、S 型の低いメシベの柱頭に届けられる。S 型の花粉 (オレンジの丸) はオシベのある高い位置 (昆虫の口器の根元) に付着し、L 型の高いメシベの柱頭に届けられる。この訪花昆虫の口器への花粉の付きわけが二型花柱性のオシベとメシベの高さの相補的位置関係の意味であると解釈されているが、必ずしも全ての二型花柱性種で当てはまるわけではない。

進化論で有名なチャールズ・ダーウィンは、この異型花柱性に見られる花の多型が、実は自殖を防ぎ、他殖を促進する植物の巧妙な進化の結果であると気がつき「私は自身の研究人生の中でこれらの植物の構造の意味を発見した以上に大きな満足を感じたことは他にはなかった」と記している (Darwin 1958)。ダーウィンの時代には、植物は主として両性花が自家受粉により種子を作り、繁殖していると考えられていた。しかし、ダーウィンは著書「*The effect of cross and self fertilization in the vegetable kingdom* (植物の受精、Darwin 1876)」の中で、丁寧な観察と実験に基づき、自家受粉による近交弱勢の一般性や、多くの植物が他家受粉を志向していることを示した。また植物は様々な方法で動物を誘引し、同じ種の花の間で効率的に花粉を運ばせる工夫を進化させていると考えた。ダーウィンは翌年、「*The different*

forms of flowers on plants of the same species (同種に見られる異型花) Darwin (1877)」という本を出版し、その4分の3を異型花柱性の説明に費やしている。異型花柱性の意味の発見は、この植物による他殖志向というダーウィンの考えを端的に象徴する発見だったといえる。

異型花柱性には、上で紹介した二型花柱性の他に、より稀ではあるが長花柱花と短花柱花に中花柱花を加えた3タイプある三型花柱性が知られている(図1右、図4)。

これまで異型花柱性は、サクラソウ科・ミソハギ科をはじめとして、全世界から28科199属で知られているが(Barrett *et al.* 2000, Naiki 2012)、異型花柱性は少なくとも23回は独立に進化したと考えられている(Lloyd & Webb 1992, Barrett 2019)。こうした複雑な繁殖システムが、複数の系統で独立に繰り返し進化したことは、異型花柱性の適応的な優位性を示していると考えられる。

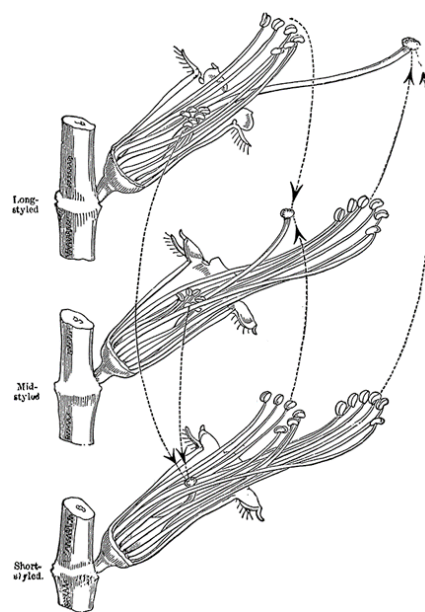


図4. ダーウィンによるミソハギ科エゾミソハギ (*Lythrum salicaria*) に見られる三型花柱性の図。

Darwin (1877) figure 10 より転載。

三型花柱性のL型(長花柱花、上段)、M型(中花柱花、中段)、S型(短花柱花、下段)。二型花柱性と同様、同じ花の花粉や同じタイプの花の花粉では受精せず(Invalid), 異なるタイプの花の花粉を受粉する必要がある(Valid)。

2.2 世界における異型花柱性の研究の今～異型花柱性研究がなぜ面白いのか～

異型花柱性に関する生態学・進化生物学的研究は、実質的にチャールズ・ダーウィンの一連の論文(Darwin 1862 他)並びに、先述の「*The different forms of flowers on plants of the same species*」(Darwin 1877)によって始まったとされる。この中でダーウィンは14科38属に異型花柱性を確認している。その後、多くの研究者が様々な分類群で調査研究した結果、現在では28科から異型花柱性知られている。その数はダーウィンの最初の発表の約倍になっているが、1877年の段階でこれだけの分類群に異型花柱性を認めていたというのは驚きである。(なお、二型花柱性という現象の発見自体は1700年代と考えられている(Gilmartin 2015).)

ダーウィンの著作から145年経った現在(2022年)までに数多くの研究者が異型花柱性に関連して数え切れないほど多くの研究を行ってきた。その生態学的・進化生物学的研究のテーマを大別すると以下の7つにまとめることができる。

- ①どのような分類群に異型花柱性が見られるのか?
- ②それぞれの分類群の異型花柱性にはどのような特徴があるのか?
- ③どのような遺伝的メカニズムで異型花柱性がコントロールされているのか?
- ④異型花柱性はどのように進化したのか?
- ⑤異型花柱性にはどのような適応的な意味があるのか?
- ⑥異型花柱性は野外でどのように維持されているのか?
- ⑦異型花柱性はどのような要因により、どのような過程で崩壊するのか?

①②については、世界中の様々な分類群において知見が集積され続けている。顕著な傾向として、かつてヨーロッパや北アメリカなどの温帯域に生育する草本を中心に行われていた異型花柱性の研究が、近年は亜熱帯から熱帯の樹木種を対象にする研究も増えてきていることが挙げられる。ここでは①②について詳しく触れることを避け、③～⑥について簡単に世界の研究の現状を紹介する。

③異型花柱性の遺伝的機構については、理論的なモデルが先行した。異型花柱性のような複雑な繁殖システムを実現するためには、最低でもメシベの形質、オシベの形質、花粉の形質を決める3つの遺伝子が必要となると想定された。しかも、これらの3つの遺伝子は互いに連鎖し、あたかも一つの遺伝子のように振る舞っていなければならない。この遺伝子モデルはスーパージーンモデルと呼ばれ、多くの間接的な検証が行われ、実際に多くの異型花柱性に関する現象を非常にうまく説明できることがわかってきた (Lewis & Jones 1992)。しかし、この完成度の高いモデルが早くに構築されていたにもかかわらず、この遺伝子の実体が明らかになったのはごく最近のことである。2016年、サクラソウ科サクラソウ属 (*Primula*) における遺伝子の詳細がついに明らかになり、一つの大きな節目を迎えた (Li *et al.* 2016, Kappel *et al.* 2017)。サクラソウ属の異型花柱性の遺伝様式は理論的に想定されていた遺伝構造とは異なる形 (ヘミ・ザイゴート (hemizygote)) ではあったが、遺伝子群の実質的な振る舞いは予測されていたものと良く合致していた。サクラソウ属の他にも、タデ科ソバ属 (*Fagopyrum*)、アマ科アマ属 (*Linum*)、トケイソウ科ツルネラ属 (*Turnera*)、ミズアオイ科ホテイアオイ属 (*Eichhornia*)、ムラサキ科ムラサキ属 (*Lithospermum*) 等でも遺伝的な構造が徐々に明らかとなってきた (Kappel *et al.* 2017)。

④異型花柱性の進化は、進化生物学者にとって、極めて重要な関心事項であった。ダーウィンが「最も複雑な繁殖様式 (most complex mating system)」とよんだ複雑なシステムは、ダーウィンの時代から、被子植物で少なくとも複数回、独立に進化 (収斂進化) してきたということが想定されていた。このことは、異型花柱性という繁殖形態が適応的にそれだけ有利だということを示している。しかし、それがどのように進化してきたのかを明らかにすることは困難な課題だった。しかし、③で述べたように遺伝子の構成が徐々に明らかになってきており、さらに⑤で述べる異型花柱性の適応的意義についての研究が進むことで、進化の謎も徐々に明らかになることだろう。分類群ごとに異なる進化的背景があることも想定されるため、今後の研究の展開が期待される。

⑤異型花柱性の適応的意義については、ダーウィンが最初に着想したように、基本的には他家受粉を促進するための適応という点には疑問の余地がない。しかし、オシベとメシベの位置関係が、昆虫の口器の異なる部位につき分けるという考えは、必ずしも全ての分類群で当てはまるわけではないことがわかっている。

⑥異型花柱性の野外における維持については、⑤の適応的意義と関連し、実際にどのような送粉者により、どの程度の花粉の移動があるのか等を明らかにし、異型花柱性がどのように積極的に維持されているのか、その背景を解明する研究である。この点を詳細に実証した研究は多くない。

⑦異型花柱性の進化的崩壊は、世界中の分類群で頻繁に起こっており、崩壊過程が現在進行中の集団も多く見られる。そのため地域の植物を材料として最も取り組みやすい進化生物学の研究テーマであるともいえる。この点で、④の複雑で目の当たりにすることが極めて難しい異型花柱性の進化 (Barrett 2013) に関する研究とは対照的である。また人為的影響で異型花柱性の崩壊が生じることもあり、種の保存、あるいは遺伝的多様性の保全、さらには種本来の特性の保全を考える上で非常に重要である。

このように異型花柱性に関する研究は、上記①から⑦まで、世界中で今もなお活発な研究が続けられているテーマである。これらの研究の熱が冷めない大きな理由は、極めて複雑な交配システムが複数の系統で繰り返し進化していること、異型花柱性の崩壊という形で新たな進化が世界中の様々な分類群で頻繁に生じていること、送粉者との共生関係がこうした進化の要因であること、他殖を強力に促進する機構であること等、生態学や進化生物学上の重要な課題と密接に関連しており、かつ未解決の問題を多く含むためであると考えられる。

この項の最後に、世界の異型花柱性に関する研究をまとめた包括的な文献・総説を紹介しておく。1987年のダーウィン著作以降、約90年の成果と知見を包括的に整理しまとめた Ganders (1979) は、この分野で最も引用される基礎的な文献の一つとなっている(引用回数890回;2022年2月時点)。その13年後、Barret (1992) 編集による書籍「*Evolution and function of heterostyly*」は、その後の研究課題についての指針を示した。この書籍の中でも Lloyd & Webb (1992) による異型花柱性の進化に関する議論は後の研究に大きな影響を与えた。Barrett & Shore (2008) は、当時次々と明らかになってきた異型花柱性の遺伝的な基礎について論じている。最近のレビューとしては、Weller (2009) がダーウィン以降の異型花柱性に関する研究の展開をダーウィンが指摘していた課題と関連付けて解説している。Naiki (2012) は倍数性と異型花柱性の崩壊の関連を主要なテーマとしているものの、世界における異型花柱性の系統的分布を表としてまとめているという意味でも重要な文献である。Kappel *et al.* (2017) は、サクラソウ属を始め異型花柱性をコントロールする遺伝子の構造に関するこの時点での最新の知見をまとめている。Barret (2019) は、これまでの異型花柱性に関する研究の進展を解説した上で、「異型花柱性の多様性、異型花柱性の進化、送粉・受粉・性比、進化的崩壊、遺伝的構造」の5つを研究課題として挙げた上で、「異型花柱性をもっとも良く理解されている花の多型であるが、まだ多くの未解決の問題が残されている」と結論している。

2000年以降の20年間で重要な変化としては、①DNA配列の解析を主とする分子系統分類学の進展により、進化のイベントがいつ頃、どの系統で、どのように生じたのかを明らかにできるようになったこと、②遺伝子情報の解析が進んだことにより、ブラックボックスだったスーパージーンの実体が徐々に明らかになり、さらにこうした研究の対象が一部のモデル植物以外にも広がったことが挙げられる。さらに多様性という側面からは、③熱帯地域における異型花柱性種の研究、特に中南米や東～東南アジア、太平洋地域における分類群を対象とした研究の増加が顕著である。

2.3 日本における在来植物を対象とした異型花柱性研究の利点

日本でも、ソバ (*Fagopyrum esculentum*, Buckwheat タデ科) 等の栽培植物を対象とした異型花柱性の遺伝子に関する研究なども活発に行われているが (Matsui and Yasui 2020 等)、ここでは在来植物を対象とした研究に絞って紹介したい。日本の在来植物を対象にした異型花柱性の研究は1990年代からの鷲谷らによるサクラソウの異型花柱性に関する一連の研究が世界的にも評価されている (Washitani *et al.* 1996 等)。またこの時点での研究成果については、鷲谷いづみ編著 (2006) 「サクラソウの分子遺伝生態学」(東京大学出版会) に詳しくまとめられている。

ある地域における異型花柱性植物を分類群の多様性の側面から研究する場合、日本の在来植物を対象とすることには大きな利点が3点あると考えられる。

第一に、日本は植物相の調査が非常に進んだ地域である。日本産植物種は極めて詳細に調査されており、近年分類学的再検討や、一部の分類群では新種も見つかっているが、基本的な種の記載は完成に近い。日本産植物については「Flora of Japan」(講談社)や「日本の野生植物」(平凡社)でほぼ網羅され、極めて詳細な記述が見られる。花の性表現についても、完全ではないが多くの記述がなされ、写真を入力することもできる。第二に、南北に長い島弧は、温帯性の植物から、亜熱帯性の植物まで変化に富むため、温帯性の草本を中心とした異型花柱性植物と、熱帯性の樹木を中心とした異型花柱性植物の両方が見られる。第三に、日本を構成する全ての陸域が「島」であるということである。日本は 6000 以上の多様な島々からなり、それぞれの環境は極めて多様である。

このような利点のある日本の在来植物を対象にして、これまでどのような研究が行われてきたのかをまとめることには、今後の研究の可能性や方向性を示す上で有意義であろう。そこで次の節では日本の在来植物に関する異型花柱性研究について、システマティック・レビューを実施し、これまでの研究を振り返るとともに、今後の研究の展開について考察する。

3 日本における異型花柱性研究の今

3.1 日本における異型花柱性研究 (システマティック・レビュー)

これまで日本においてどのような異型花柱性に関する研究が行われてきたのかを明らかにするため、文献データベースを用いたシステマティック・レビューを行った。この際、材料としては日本の在来植物と古来の栽培植物を、内容としては異型花柱性に関する生態学的・進化生物学的な研究のみを対象として選択した。

一次データベース (Primary database) としては、「Web of Science (Core Collection 1900-)」(<https://access.clarivate.com/>) を、二次データベース (Secondary database) としては、「Cinii」(<https://ci.nii.ac.jp/>) を使用した。一次データベースの検索ワードは「heterostyly」、「distyly」、「tristyly」& 「Japan」を用いた (2021 年 2 月 28 日実施)。二次データベースの検索ワードとしては日本語に対応した日本の文献に関する検索になるため、「heterostyly」、「distyly」 or 「tristyly」に加え、「異型花柱性」、「二型花柱性」、「三型花柱性」の各語を用いた (2021 年 2 月 28 日実施)。これらの検索結果 (identification list) の中から、重複を削除し (de-duplication)、次に残った文献を吟味し、目的と合致しない文献を除去し、採用する文献を絞り込んだ (Screening)。最後に、1 次データベースと 2 次データベースで採用された文献を比較し、重複する文献を除き、最終的に採用する文献を選択した。

これらのシステマティック・レビューによる文献の検索・選択の過程を表 1 に示す。当初検出された文献数は一次データベースで 60、二次データベースで 122 であったが、重複削除、吟味を経てそれぞれ 31、60 の文献が採用され、合計 91 の文献から二つのデータベースの重複分 11 本を削除し、80 の最終的な文献がリストアップされた (Appendix 1)。

以下の項目では、ここでリストアップされた 80 の文献のうち、栽培植物であるソバに関する研究を除いた 72 の文献について、対象分類群と、年代別に傾向について考察する。

表 1. レビューによる文献の検索・選択過程

	1 次データベース	2 次データベース
	Web of Science	Cinii
検索結果	60	122
重複削除	-10	-22
結果の吟味・除去	-19	-40
採用	31	60

3.2 日本における異型花柱性研究の対象分類群の動向

3.2.1. 概略

今回のシステマティック・レビューの方法では1980年代以前の文献はヒットしなかった。1980年代にはPuff (1980)によるイナモリソウ(アカネ科)の論文をはじめとして、地域的な異型花柱性の記録の報告が見られるようになる。その後1991年の鷺谷らによるサクラソウの研究を皮切りに、鷺谷らによるサクラソウやアサザを中心とした異型花柱性の研究が展開され、多くの論文が出版された。その中には、送粉者の不足からスーパーゼーンの組み替え体が集団中に広がり、異型花柱性が崩壊するというような世界的にインパクトを与えた研究(Washitani *et al.* 1996等)が含まれている。さらに、その頃の最先端であったゲノムの情報も用いて、保全生態学的な解析を実施している。こうした内容はエコゲノムプロジェクトとも呼ばれ、「サクラソウの分子生態学」という本にもまとめられている(鷺谷 2006)。

2000年代に入るところから、こうしたモデル植物としてのサクラソウやアサザの研究の他にも、様々な分類群の進化生態学的研究が活発になってきた。こうした研究の中には、異型花柱性の崩壊の要因について、送粉者のシフトの可能性や(Naiki & Kato 1999, Watanabe *et al.* 2018)、倍数化に伴う可能性など(Naiki & Nagamasu 2004, Nakamura *et al.* 2007, Naiki 2012)が議論されている。

3.2.2. 分類群と対象地域の変化

日本における異型花柱性研究は、ほぼ二型花柱性に関する研究である。これは、日本の在来植物で三型花柱性を有しているものが広域分布種であるミソハギ科ミソハギ属の2種(エゾミソハギとミソハギ)のみであり、残りの30種以上は全て二型花柱性であるためであると考えられる(Watanabe 2022)。

対象種としてはサクラソウが最も多く全体の約四分の一を占めている(23%)。これは、異型花柱性のモデル植物として研究対象となっていたためである(図5A)。ついで、アサザ、カタバミ、オガサワラボチョウジなどの植物の論文が複数出版されている。

対象の植物を科ごとに見ると、サクラソウ科についてアカネ科が多く、この2科が大半を占めていることがわかる(図5B)。これは、日本に分布する異型花柱性植物種がサクラソウ科とアカネ科を合すると全異型花柱性種の過半数を占めている(Watanabe 2022)ことに起因していると考えられる。これら2科については、分布と生育形態に、重要な違いがある。サクラソウ科は温帯性で狭義の日本列島にのみ、分布しているのに対し、アカネ科の分布の中心は熱帯地方で、日本では亜熱帯の琉球列島や小笠原諸島に多い。またサクラソウ科サクラソウ属は全て草本であるのに対し、アカネ科は多くが木本であることも重要な違いである。従って、日本の二型花柱性植物は、冷温帯では草本のサクラソウ属を中心とした異型花柱性植物が多く、亜熱帯ではアカネ科を中心とした木本の二型花柱性植物が多いといえることができる。

1900年代には、日本列島の冷温帯における草本植物を対象とした研究が目立ったが、2000年代になってから琉球列島と小笠原諸島を含む分類群の研究が盛んになってきてきた。世界的にも1900年代には冷温帯域の草本植物が対象とされていたが、2000年代から熱帯亜熱帯域での木本植物にも目を向けられるようになった。日本の研究動向もこうした世界的傾向と合致しているといえる。このことは、論文の出版年代と分類群の関係からも見ることができる(図6)。

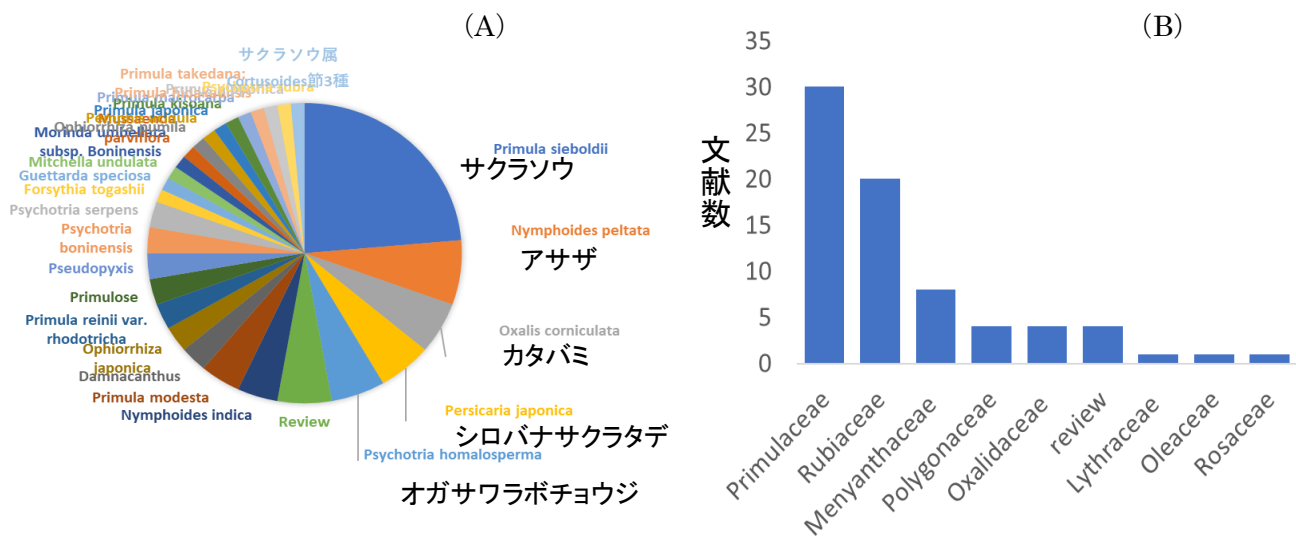


図 5. 日本における異型花柱性に関する種ごとの文献の割合 (A) と科ごとの文献数 (B)。

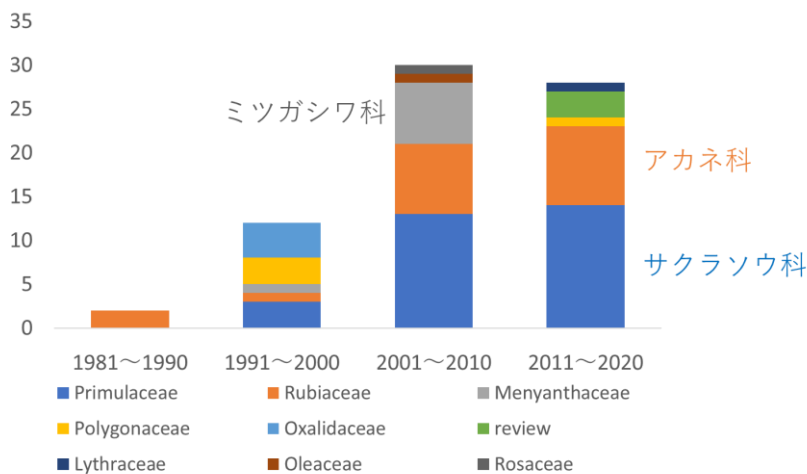


図 6. 日本の異型花柱性植物に関する論文数の出版年代別推移。

日本列島（狭義、琉球列島・伊豆諸島・小笠原諸島・千島列島などを除く）では、アカネ科のイナモリソウの研究に始まり、異型花柱性が崩壊したカタバミ類、サクラソウやサクラソウ属の植物、ミツガシワ科の湿地植物、タデ科のシロバナサクラタデ等の研究がある。最近では、サクラソウ属の固有節コイワザクラ節の繁殖生態と系統に関する研究がある（本レビューに含まれなかった総説として山本 2021 がある）。

小笠原諸島では、2000 年代の時点で異型花柱性の植物は知られていなかった。しかし、筆者らの研究により、アカネ科の固有植物オオシラタマカズラとオガサワラボチョウジの 2 種が形態的にも機能的にも二型花柱性であることが明らかとなった。小笠原諸島の植物相を見渡しても、今後新たに異型花柱性植物がこの諸島から発見される可能性は非常に低い。

琉球列島では、異型花柱性の研究としてサツマイナモリ、シラタマカズラ、ミズガンピ、ハテルマギリ等、また異型花柱性が崩壊したことが疑われる種として、コンロンカ、アマミイナモリ、ボチョウジ、

ナガミボチョウジなどが挙げられる。

Watanabe (2022) によると、日本で知られている異型花柱性植物は三型花柱性がミソハギ科のミソハギ属の2種、二型花柱性はミソハギ科(1属; ミズガンピ属)の他、ミツガシワ科(3属; イワイチョウ属、ミツガシワ属、アサザ属)、モクセイ科(2属; レンギョウ属、ソケイ属)、タデ科(1属;)、サクラソウ科(1属; サクラソウ属)、アカネ科(7属; アリドオシ属、ハテルマギリ属、シチョウゲ属、ツルアリドオシ属、サツマイナモリ属、イナモリソウ属、ボチョウジ属)、ボロボロノキ科(1属; ボロボロノキ属)の計7科17属ということになる。しかし、世界で異型花柱性が知られている属で日本に分布するものは上記の他に10科18属(Watanabe 2022)あり、今後この中から新たに異型花柱性の記録が見つかる可能性も考えられる。今回のシステムティック・レビューでは、現在異型花柱性が維持されているグループの他、異型花柱性が崩壊したと疑われる例も含まれていることには注意が必要である。

4 日本の在来異型花柱性植物を巡る研究のこれから～異型花柱性の維持と崩壊～

ここでは、日本の在来植物を対象とした研究として、筆者が今後も重要になると考える2つのテーマ: 1) 野外における異型花柱性の適応的意義と維持 (fitness and maintenance) と2) 異型花柱性の進化的崩壊 (evolutionary breakdown) について解説する。そこには、送粉者の変化や喪失、花の形態、そして島という条件が密接に関連しているので併せて簡単に説明したい。

4.1. 異型花柱性の適応的意義と維持

ダーウィンが考察してから145年もの間、異型花柱性に関する数え切れないほどの研究がなされてきた(Weller 2009)にもかかわらず、未だに異型花柱性の適応的意義とこの複雑な性表現の維持機構には未解決の点が多い(Barrett 2019)。

適応的意義として大きな課題があるのが、花の器官の相補性である。ハナバチ媒花の種は花の器官が相補的である種が多いものの、アカネ科やモクセイ科に多いスズメガ媒花等は、それぞれの器官がずれている種が多く、この器官の配置にどのような適応的な意義があるのかは未だに明らかでない。日本産の植物では、オガサワラボチョウジ、ハテルマギリ、オキナワソケイなどがそれに当たる。それぞれの花型の個体数の比率についても、理論的には1対1が理想とされるが、この比率からの偏りが大きな種も多く存在し、その原因についても議論が続いている。例えば、オガサワラボチョウジでは、S型が有意に多いことがわかっており、これはS型のわずかな同型花不和合性の漏れが影響していると考えられる(Watanabe *et al.* 2014)。

4.2. 異型花柱性の進化的崩壊

異型花柱性の進化を考える際には、異型花柱性の成立と崩壊の2つの方向が考えられる。異型花柱性の成立は遺伝的に極めて複雑なため、まれにしか起こらない現象であるのに対し、崩壊は頻繁に生じていると考えられる。異型花柱性の崩壊のパターンとしては、ほとんどの場合が単型自家和合性に進化するものであるが、より稀な例としては雌雄異株に進化することが知られている(Watanabe 2014b, Watanabe & Sugawara 2015)。さらに最近明らかになってきたハワイ諸島のボチョウジ属では、異型花柱

性が一旦単型に崩壊してから、雌雄異株化したという複雑な進化過程が想定されている(渡邊 2021)。

異型花柱性の進化的崩壊を引き起こす要因としては、送粉者の喪失、送粉者の変化、集団サイズの減少、倍数化などが挙げられている。単型自家和合性の進化は、「自家不和合性の崩壊」と言い換えることができる。「自家不和合性の崩壊」は異型花柱性の集団内ではある程度頻繁に生じているが、送粉者の喪失など、何らかの原因でそれが集団中に広がり、固定すると考えられる(Washitani 1996)。様々な系統で、頻繁に起こる進化であるために、どのような生態学的な要因で崩壊が起こるのかを検証することが比較的容易である。逆に単型自家和合性に崩壊した物が、再び異型花柱性を確立することは難しく、非可逆的な進化であると考えられている(Barrett 2013)。異型花柱性から雌雄異株への進化はより複雑で、長舌の昆虫から短舌の昆虫への送粉者の変化が引き金になるとの仮説が提唱されているが(Beach & Bawa 1980)、未だに実証した例はない。雌雄異株も他殖促進の性表現であり、かつそれぞれの個体が単型で適応度が両性株の半分になるため、このような進化が起こる要因は説明が難しい。さらに、琉球列島に分布するナガミボチョウジでは、世界で他に例がない異型花柱性から雌雄異花同株を含む雑居性への進化が報告されているが、この進化過程についてもまだ明らかになっていない(Watanabe *et al.* 2021)。

異型花柱性の進化的崩壊や花形態の変化を引き起こす主要な要因であると考えられる送粉者のシフト(pollinator shift)や喪失(pollinator loss)は、様々なことを原因として引き起こされる。例えば小笠原諸島のオガサワラボチョウジでは、本来の訪花昆虫が、人為的な影響で失われてしまったと考えられる。そもそも植物が島に渡ってきた時点で、その島の動物相に本来の送粉動物が存在しない場合、その植物はポリネーターのシフトや喪失を経験することになる。そのことで、定着できず絶滅する植物種もあるだろうし、定着しても異型花柱性が崩壊したり、花形態が大きく変化したりすることが考えられる。島ではこのような状況が起こりやすく、これが海洋島で異型花柱性が少ない理由の一つであると考えられる(Watanabe & Sugawara 2015)。

日本には様々な島がある上に気候帯も広く、送粉者相の異なる地域に同一の植物種が広く分布しているということがしばしば知られている。このような系は、異型花柱性の維持、崩壊、適応的意義などを検証する材料として重要であると考えられる。世界中の多くの島に見られる植物で、日本にも分布する植物としては、ハテルマギリとミズガンピが挙げられる。またボロボロノキは、マルハナバチの分布する温帯域から、マルハナバチ類の見られない琉球列島にも分布しており、それぞれの島で送粉者への適応に差がある可能性が考えられる。

4.3. 異型花柱性の可能性のある植物群、異型花柱性が崩壊した可能性のある植物群

日本における異型花柱性のリストによると、異型花柱性は日本列島ではおよそ 0.7 %程度であり(Watanabe 2022)、全世界の 1 % (Renner 2014) という推計とそれほど大きな違いはない。しかし、これはあくまで文献に基づくデータであり、全てが詳細に調査されたわけではないため、異型花柱性の可能性のある植物群が見逃されていたり、崩壊した可能性のある植物群が新たに見つかる可能性も十分に考えられる。現在までの知見を活用して今後さらに研究が進むことを願っている。

5. 謝辞

今回の招待論文に招待して下さった伊原博隆校長に感謝いたします。また本研究に関連して多くの方々のご協力をいただきました。システムティック・レビューで用いた Web of Science の検索については、産業総合研究所の井口亮博士にご協力いただきました。心より感謝いたします。なお、本研究の一部は科学研究費補助金 (KAKENHI 18K14782、22K06378 代表：渡邊謙太) により実施されました。

6. 引用文献

- Barrett, S. C. H. 2013. The evolution of plant reproductive systems: how often are transitions irreversible? *Proceedings. Biological Sciences/The Royal Society* **280**: 20130913.
- Barrett, S. C. H. 1992. [ed.], *Evolution and function of heterostyly*. Springer. Berlin, Germany.
- Barrett, S. C. H. 2019. ‘A most complex marriage arrangement’: recent advances on heterostyly and unresolved questions. *New Phytologist* **224** (3) : 1051–1067.
- Barrett, S. C. H. & Shore, J. S. 2008. New insights on heterostyly: comparative biology, ecology and genetics. In: Franklin-Tong, V. E. (ed) . *Self-incompatibility in Flowering Plants*. Springer. P. 3–32.
- Beach J. H. & Bawa, K. S. 1980. Role of pollinators in the evolution of dioecy from distyly. *Evolution* **34** (6) : 1138–1142.
- Darwin, C. 1862. On the two forms, or dimorphic condition, in the species of *Primula*, and on their remarkable sexual relations. *Botanical Journal of the Linnean Society* **6** (22) :77–96.
- Darwin, C. 1876. *The effect of cross and self fertilization in the vegetable kingdom*. London: John Murray.
- Darwin, C. 1877. *The different forms of flowers on plants of the same species*. London: John Murray.
- Darwin, C. 1958. *The Autobiography of Charles Darwin, ed. Nora Barlow*. Pickering Masters: The Works of Charles Darwin, 29.
- Ganders, F. R. 1979. The biology of heterostyly. *New Zealand Journal of Botany* **17**: 607–635.
- Gilmartin, P. M. 2015. On the origins of observations of heterostyly in *Primula*. *New Phytologist* **208** (1) : 39–51.
- Huu, C. N., Kappel, C., Keller, B., *et al.* 2016. Presence versus absence of CYP734A50 underlies the style-length dimorphism in primroses. *eLife* **5**: 1–15.
- Kappel, C., Huu, C. N., & Lenhard, M. 2017. A short story gets longer: recent insights into the molecular basis of heterostyly. *Journal of Experimental Botany* **68**: 21–22, 5719–5730.
- Lewis, D. & Jones, D. A. 1992. The genetics of heterostyly. In: Barrett SCH, ed. *Evolution and function of heterostyly*. New York: Springer-Verlag, 129–150.
- Li, J., Cocker, J. M., Wright, J., *et al.* 2016. Genetic architecture and evolution of the S locus supergene in *Primula vulgaris*. *Nature Plants* **2**: 16188.
- Lloyd, D. G. & Webb, C. J. 1992. The evolution of heterostyly. In S. C. H. Barrett (Ed.) , *Evolution and function of heterostyly*, P. 151–178. Springer.
- Matsui, K. & Yasui, Y. 2020. Buckwheat heteromorphic self-incompatibility: genetics, genomics and application to breeding. *Breeding Science* **70** (1) :32–38.

- Naiki, A. 2012. Heterostyly and the possibility of its breakdown by polyploidization. *Plant Species Biology* **27**: 3–29.
- Naiki, A. & Kato, M. 1999. Pollination system and evolution of dioecy from distyly in *Mussaenda parviflora* (Rubiaceae). *Plant Species Biology* **14**(3): 217–227.
- Nakamura K., Denda T., Kameshima O. & Yokota M. 2007. Breakdown of distyly in a tetraploid variety of *Ophiorrhiza japonica* (Rubiaceae) and its phylogenetic analysis. *Journal of Plant Research* **120**: 501–509.
- Renner, S. S. 2014. The relative and absolute frequencies of angiosperm sexual systems: Dioecy, monoecy, gynodioecy, and an updated online database. *American Journal of Botany* **101** (10), 1588–1596.
- Washitani, I. 1996. Predicted genetic consequences of strong fertility selection due to pollinator loss in an isolated population of *Primula sieboldii*. *Conservation Biology* **10**: 59–64.
- 鷺谷いずみ 2006. サクラソウ. サクラソウの分子遺伝生態学. 東京大学出版会. P. 1–14.
- Watanabe, K. 2022. Heterostyly on Japanese Islands. *BioRxiv*.
- 渡邊謙太. 2021. 島と異型花柱性の生物学：小笠原・沖縄・ハワイから. 種生物学会和文誌. **40&41**. 9章. P. 181–208. 文一総合出版社.
- Watanabe, K., Kato, H., Kuraya, E. & Sugawara, T. 2018. Pollination and reproduction of *Psychotria homalosperma*, an endangered distylous tree endemic to the oceanic Bonin (Ogasawara) Islands, Japan. *Plant Species Biology* **33**: 16–27.
- Watanabe, K., Kato, H. & Sugawara, T. 2014a. Distyly and incompatibility in *Psychotria homalosperma* (Rubiaceae), an endemic plant of the oceanic Bonin (Ogasawara) Islands. *Flora - Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants* **209**: 641–648.
- Watanabe, K., Shimizu, A. & Sugawara, T. 2014b. Dioecy derived from distyly and pollination in *Psychotria rubra* (Rubiaceae) occurring in the Ryukyu Islands, Japan. *Plant Species Biology* **29**: 181–191.
- Watanabe, K., Shimizu, A. & Sugawara, T. 2021. Polygamous breeding system identified in the distylous genus *Psychotria*: *P. manillensis* in the Ryukyu archipelago, Japan. *PeerJ*. **9** (e12318) : 1–17.
- Watanabe, K. & Sugawara, T. 2015. Is heterostyly rare on oceanic islands? *AoB Plants* **7**: plv087. 1–16.
- Watanabe, K., Yang, T.Y.A., Nishihara, C., Huang, T.L., Nakamura, K., Peng, C.I. & Sugawara, T. 2015. Distyly and floral morphology of *Psychotria cephalophora* (Rubiaceae) on the oceanic Lanyu (Orchid) Island, Taiwan. *Botanical Studies* **56** (10): 1–9.
- Weller, S. G. 2009. The different forms of flowers-what have we learned since Darwin? *Botanical Journal of the Linnean Society* **160**: 249–261.
- 山本将也. 2021. 岩に生える小さなサクラソウの分子生態学. *植物地理・分類研究* **69**(2): 169–178.

The Ecology and Evolutionary Biology of Heterostyly in Japan

Kenta Watanabe

Science and Technology Division

Heterostyly is the genetic polymorphism which consists of two (distyly) or three (tristyly) different morphs of flowers in the population. The flowers usually require the pollen from the different morph to set seeds, so that heterostylous plants dependent on suitable pollinators to reproduce. Numerous studies have been published on the biology of heterostyly since Charles Darwin's book "*The different forms of flowers on plants of the same species*" in 1877, however there are still so many issues remain unsolved.

In this article, I reviewed the studies on heterostyly of plants native to Japan. I also showed that future studies related to the fitness, maintenance, and the evolutionary breakdown of heterostyly.

Key words: heterostyly, distyly, tristyly, Japanese islands, Ogasawara Islands, Ryukyu Islands

Appendix 1. システマティック・レビューにより選択された論文
(オンラインリポジトリ)

[https://www.okinawa-ct.ac.jp/UserFiles/File/04toshoho_kakari/R3/kiyou/Appendix Evolutionary.zip](https://www.okinawa-ct.ac.jp/UserFiles/File/04toshoho_kakari/R3/kiyou/Appendix_Evolutionary.zip)

論 文 等

220 席級新形態旅客機の前進翼平面形状の空力最適化

*森澤征一郎¹, 野村聡幸², 川添博光³

¹沖縄工業高等専門学校 機械システム工学科, ²宇宙航空研究開発機構, ³岐阜大学高等研究院
(*morizawa@okinawa-ct.ac.jp)

要旨

本研究では、220 席級旅客機への搭載を想定した前進翼に関して、翼平面形状のパラメトリックスタディと遺伝的アルゴリズムによる空力最適化を実施した。その結果、双方ともセミスパン長が大きくなるほど空力性能が向上し、同様の空力性能及び空力最適形状が得られた。一方で、内翼と外翼の前進角の変化やキック位置での翼弦長は、空力性能に大きな影響を与えない。しかし、セミスパン長と外翼前進角が大きくなると衝撃波失速が生じ、空力性能は悪化するため、空力最適形状は基本形状とは大きく異なるものとなった。また内翼と外翼の空力性能への寄与を比較すると、外翼の寄与が極めて大きいことがわかった。

キーワード：前進翼，空力最適化，平面形状，数値流体力学，遺伝的アルゴリズム

1. 緒言

旅客機の需要増加に伴い、様々な国で将来旅客機の研究開発が進められている。米国では N+3 NASA Research Announcement が進められ、欧州では Clean Sky プログラムが進められている¹⁾。JAXA 航空でも 220 席級の中型旅客機を対象に新形態将来旅客機概念設計が行われ、高性能 Tube & Wing 機や幅広胴体機などが検討されている²⁾。また、新形態将来旅客機の有望なオプションを増やす目的で JAXA 公募型研究が行われ、東京大学による高アスペクト比複葉翼ジェット旅客機³⁾や我々の研究グループによる前進翼旅客機の検討が進められている。

前進翼は臨界マッハ数が大きいことに加えて、後退翼より誘導抵抗が小さく、剥離が翼根から生じるため失速特性にも優れている⁴⁾。特に、亜音速域において前進翼の揚抗比 L/D が後退翼のそれより大きいという報告もある^{5,6)}。しかし、前進翼は一般的な旅客機に用いられる後退翼と比べ、ねじれや曲げによるフラッタ振動を起こしやすい⁷⁾。この傾向は機体の大型化に伴い顕著となる。そのため、歴史的にこれまで前進翼を用いた旅客機は HFB320 ハンザジェット（乗客 10 数人程度）に留まっている。

以上の背景のもと、新形態将来旅客機概念設計のために、数値流体力学 (CFD) を用いて 220 席級旅客機の前進翼平面形状に関するパラメトリックスタディを進め、それらの空力特性、及び流れ場の関係を調査し、議論してきた⁸⁾。本研究ではこのパラメトリックスタディをさらに進めるとともに、遺伝的アルゴリズムによる空力最適化によって巡航空力特性向上の探索を試みる。そして、探索で得られた最適形状と流れ場の関係について議論する。

2. 問題設定

本 220 席級旅客機の代表例として Boeing767 の平面図を図 1 に示す⁹⁾。本研究では図 1 の主翼平面形状を内翼・外翼から成るテーパ形状によって近似し、その前後を反転させて作成した平面形状を前進翼の基本形状とする。また、平面形状の検討にあたっては翼根位置での翼弦長 C_{Root} によって規格化した形状パラメータを用いる。形状パラメータは内翼及び外翼の前進角 α_1 及び α_2 、キंक位置での翼弦長 C_{Kink} 、内翼のスパン長 b_1 、セミスパン長さ $b/2$ の計 5 つとし、それらを図 2 に示す。また、本研究で行った空力最適化における形状パラメータの探索範囲を第 1 表に示す。パラメトリックスタディの条件については表 2 に示す。表 2 の空欄については基本形状と同じ値であるため省略した。なお、翼面積 S は一定 (Boeing767 の主翼面積と同じ) としたため、翼端 C_{Tip} は他の形状パラメータから自動的に決定される。翼型については、遷音速旅客機の標準模型 NASA-CRM の超臨界翼 CRM.65 airfoil¹⁰⁾ を用いた。

目的関数は 2 つ定義する。1 つ目の目的関数は設計揚力係数 0.45 での揚抗比 ($Obj1$) である。2 つ目の目的関数は巡航時の揚力係数 $C_L = 0.3 \sim 0.6$ における揚抗比を積分した値 ($Obj2$) である。本研究ではこれら 2 つの目的関数によって巡航空力特性の最大化を目指す。目的関数の導出例を図 3 に示す。

計算条件は主流マッハ数 0.8, レイノルズ数 6.97×10^7 (翼根翼弦長基準) とする。迎角 AoA は $0 \sim 6^\circ$ まで 1° 刻みで計算を行った。

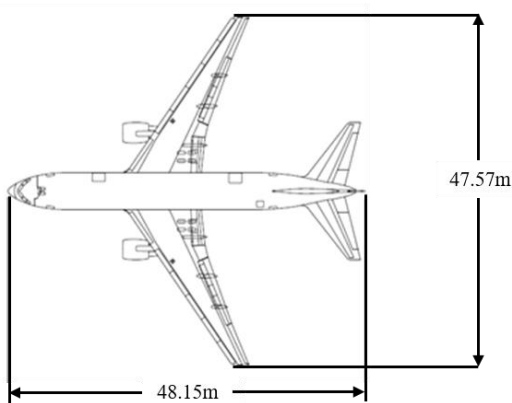


図 1 Boeing767 の平面図

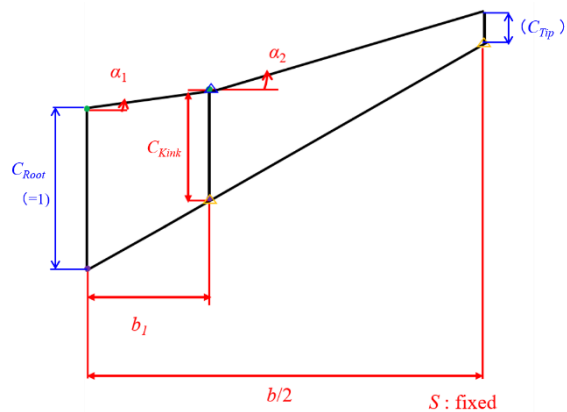


図 2 翼平面の形状パラメータ

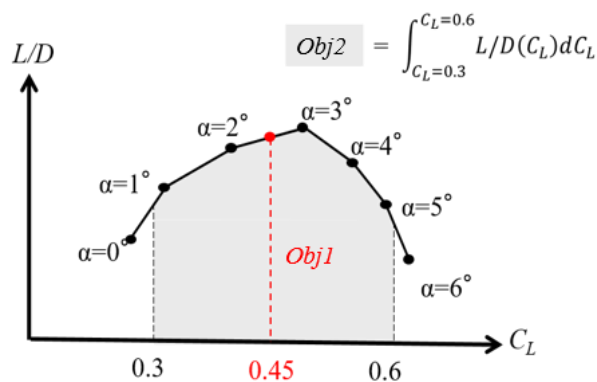


図 3 目的関数の導出例

表1 空力最適化での形状パラメータの探索範囲

形状パラメータ	範囲
内翼の前進角	$0^\circ \leq \alpha_1 \leq 80^\circ$
外翼の前進角	$0^\circ \leq \alpha_2 \leq 80^\circ$
内翼のスペン長	$0.225 \leq b_1 \leq 1.35$
セミスパン長	$1.35 \leq b/2 \leq 2.70$
キンク位置での翼弦長	$0.1 \leq C_{Kink} \leq 1.0$

表2 パラメトリックスタディでの形状パラメータ

ケース名	α_1	α_2	b_1	$b/2$	C_{Kink}
基本形状	5.36°	19.65°	0.655	2.13	0.63
Case01	15.36°				
Case02	25.36°				
Case03		9.65°			
Case04		29.65°			
Case05		39.65°			
Case06	15.36°	29.65°			
Case07	25.36°	39.65°			
Case08			0.355	2.43	
Case09			0.955	1.83	
Case10					0.53
Case11					0.73
Case12	29.65°	29.65°			
Case13	25.36°	49.65°			
Case14	35.36°	49.65°			
Case15	10.36°				
Case16	20.36°				
Case17	30.36°				
Case18	10.36°	29.65°			
Case19	15.36°	29.65°			
Case20	20.36°	29.65°			
Case21	25.36°	29.65°			
Case22	30.36°	29.65°			
Case23			0.554	2.23	
Case24			0.454	2.33	
Case25			0.252	2.53	

表2 パラメトリックスタディでの形状パラメータ(続き)

ケース名	α_1	α_2	b_1	$b/2$	C_{Kink}
Case26					0.68
Case27			0.856	1.93	
Case28			0.755	2.03	
Case29	10.36°	9.65°			
Case30	15.36°	9.65°			
Case31	25.36°	9.65°			
Case32	30.36°	9.65°			
Case33					0.58
Case34					0.43

3. 数値計算法

3.1 CFD による計算手法

CFD の計算コードは JAXA で開発された LANS3D¹¹⁻¹³⁾を用いた。支配方程式は 3 次元圧縮性 Navier-Stokes 方程式であり, RANS 計算によって定常解を求めた。乱流モデルには Baldwin-Lowmax モデル¹⁴⁾を用いた。離散化手法として対流項には 3 次精度の MUSCL 法¹⁵⁾で高次精度化した SHUS 法¹⁶⁾を, 粘性項には 2 次精度中心差分を用いた。時間積分には 1 次精度の ADI-SGS 陰解法¹⁷⁾を用いており, 局所時間刻みにより収束加速を行った。図 4 に計算格子を示す。計算格子のトポロジーは C-H 型を用いており, 格子点は 497×134×151 である。なお, 計算時間の節約のため, 半裁モデルとした。

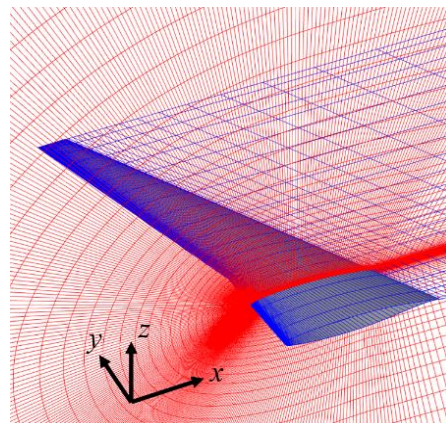


図4 計算格子

3.2 遺伝的アルゴリズムによる空力最適化

本節では本研究で実施した遺伝的アルゴリズムによる空力最適化の手順を示す。図 5 に示すように始めは乱数により初期個体を生成し, その個体に対して CFD により目的関数を計算し評価する。この評価にはパレートランキング¹⁸⁾を用いる。その後, トーナメント選択により親個体を複製選択し, それら

に交叉・突然変異を施して子個体を生成する．そして，この子個体に対しても CFD により目的関数を計算し，評価する．最後にこれら親個体，子個体を統合したものを生存選択に掛けて，次世代の親とする．以上の操作を繰り返して解を進化させる．ここで遺伝的アルゴリズムには Non-dominated Sorting Genetic Algorithms II (NSGA-II)¹⁹⁾を用い，交叉にはブレンド交叉²⁰⁾，突然変異には多項式突然変異法²¹⁾を用いた．また，本研究では，1世代あたりの個体数 20，世代数 8，交叉率 1.0，突然変異率 0.1 とした．

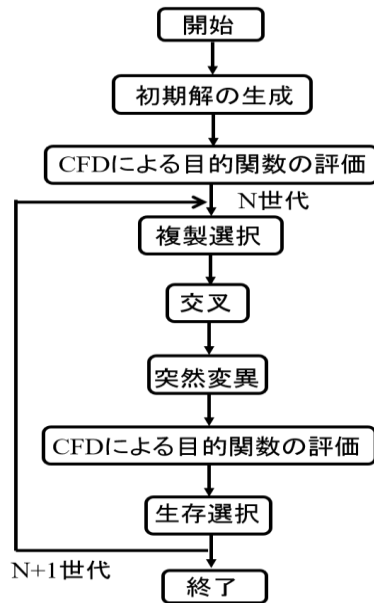


図 5 遺伝的アルゴリズムによる空力最適化の計算手順

4. 計算結果・考察

4.1 パラメトリックスタディによる結果

本研究で実施したパラメトリックスタディの結果を図 6 に示す．この結果から 2 つの目的関数は正の相関を持つことがわかる．ただし，Case14 は最大 C_L が 0.45 に達しておらず，目的関数 $Obj1$ を計算できなかったため図 6 にプロットされていない．また，全ケースを形状パラメータに基づいて分類し，形状パラメータの目的関数に対する感度を調べる．

図 7-11 に(i)内翼の前進角 α_1 ，(ii)外翼の前進角 α_2 ，(iii)内翼・外翼の前進角 $\alpha_1&\alpha_2$ ，(iv)セミスパン長 $b/2$ ，(v)キンク位置での翼弦長 C_{Kink} の 5 つに形状パラメータを分類し，それらの形状パラメータに対する目的関数の分布を示す．

図 7 より内翼の前進角 α_1 の異なる形状に対して目的関数のばらつきが小さい．ただし，Case17 だけがその分布よりわずかに離れ，目的関数の値が小さくなっている．Case17 は $\alpha_1 = 30.36^\circ$ と図 7 で α_1 が一番大きい形状である．すなわち， α_1 は目的関数への影響が小さいが， α_1 が特に大きい場合のみわずかに目的関数を悪化させることがある．

図 8 より外翼の前進角 α_2 の異なる形状では基本形状の目的関数の値が最大である．外翼の前進角は Case03 で $\alpha_2 = 9.65^\circ$ ，Case04 で $\alpha_2 = 29.65^\circ$ であり，基本形状はこれらの中間の前進角を持つ．このことから α_2 は基本形状辺りに最適値があることがわかる．

図 9 より内翼・外翼の前進角 $\alpha_1&\alpha_2$ の異なる形状でも基本形状が目的関数の最大値を取る．図 7 の目

的関数のばらつきが小さいことから、内翼の前進角 α_1 より外翼の前進角 α_2 による形状の変化が目的関数に与える影響が大きいと考えられ、図 8 と同様の結果となった。

図 10 よりセミスパン長 $b/2$ が異なる形状では目的関数が大きく変化していることが確認できる。翼面積は固定であるので、セミスパン長はアスペクト比と言い換えることができる。つまり、基本形状より低アスペクト比の場合は目的関数が減少し、高アスペクト比の場合は目的関数が増加する。

図 11 よりキंक位置での翼弦長 C_{Kink} が異なる形状では目的関数の値が基本形状と同程度か、または小さくなっていることがわかる。特に C_{Kink} が基本形状より大きい場合では目的関数の値が小さくなる。一方、 C_{Kink} が基本形状より小さい $C_{Kink}=0.53$ の Case10, 及び $C_{Kink}=0.58$ の Case33 は基本形状と同程度の目的関数の値を持つ。しかし、さらに小さい $C_{Kink}=0.43$ の Case34 では目的関数の値が大きく低下する。このことから目的関数の変化に対する C_{Kink} の感度はある一定の範囲では小さいが、その範囲外では大きくなる。

以上より、巡航時の揚抗比に関する目的関数は高アスペクト比を有する翼形状が大きな値を取るが、外翼の前進角 α_2 とキंक位置での翼弦長 C_{Kink} が基本形状から大きく変化した場合に、前進翼の空力特性を急激に悪化させる恐れがあることがわかった。

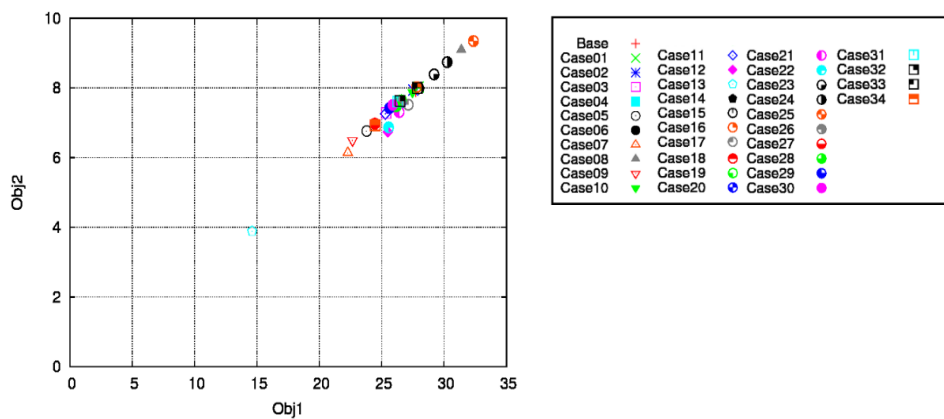


図 6 全パラメトリックスタディの結果

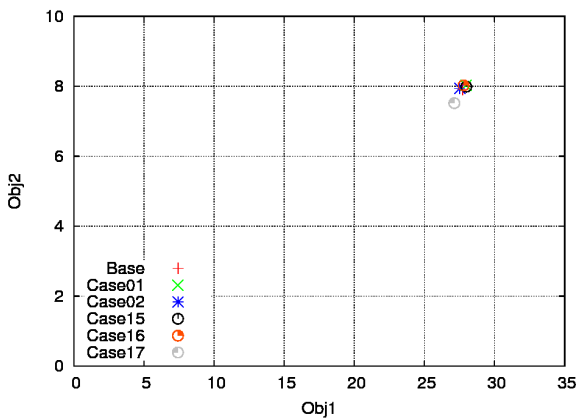


図 7 α_1 による目的関数の分布

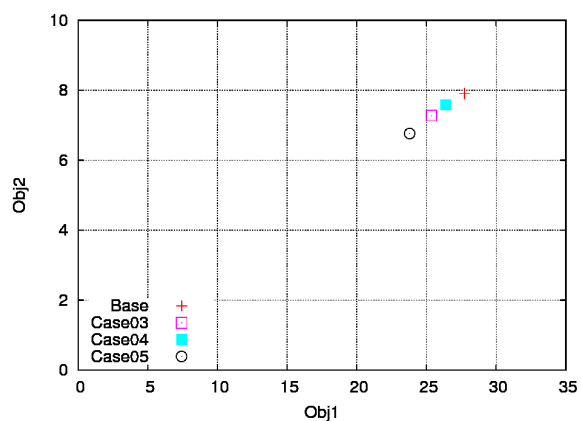


図 8 α_2 による目的関数の分布

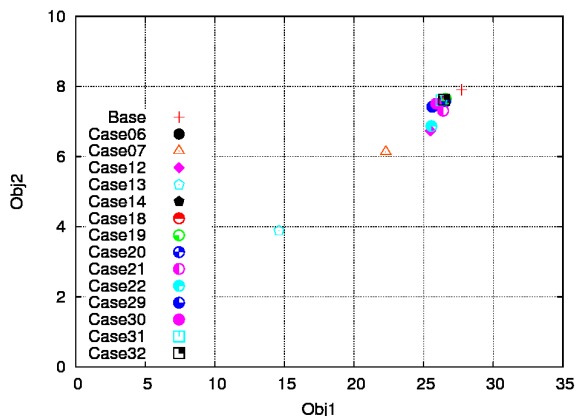


図 9 α_1 & α_2 による目的関数の結果

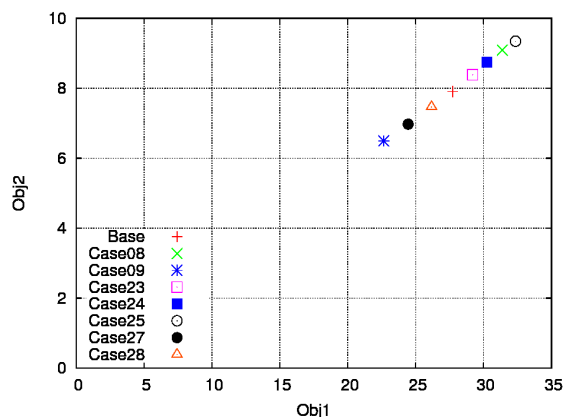


図 10 $b/2$ による目的関数の分布

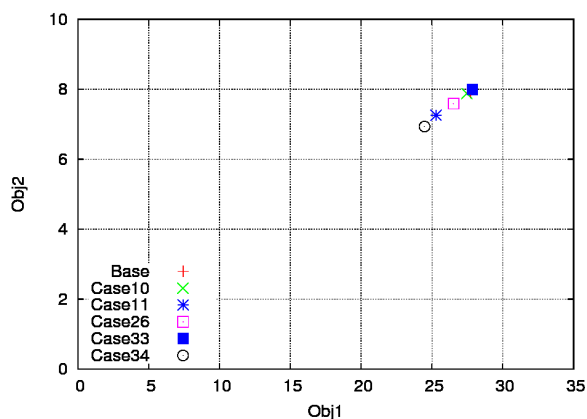


図 11 C_{Kink} による目的関数の分布

4.2 空力最適化の結果

前節では形状パラメータを手動で操作し、目的関数に対して翼平面の形状パラメータの感度を調べた。本節では遺伝的アルゴリズムを用いて、この形状パラメータを自動的に操作し、2つの目的関数を同時に最適化した際の翼平面形状を調べる。図12に遺伝的アルゴリズムによる多目的空力最適化の結果を示す。図12より最適化で得た目的関数の分布はパラメトリックスタディの結果と同様に正の相関を示した。また、世代が進むにつれて解が収束し、第7世代と第8世代で得た結果では空力特性がほぼ同等となった。そこで基本形状、パラメトリックスタディ及び最適化で得た最も良い空力特性を示す形状 (Case25, ID138, ID155) を図13-16に示す。また、各形状に対して目的関数の値を記載した。その結果、Case25, ID138, ID155の翼平面形状は同程度の目的関数の値を示した。そして、これらの形状はいずれも基本形状と比べてセミスパン長 $b/2$ が大きい、すなわち高アスペクト比を有する翼平面形状となり、前節で指摘した結果と同様の傾向を示した。また、外翼の前進角 α_2 とキンク位置での翼弦長 C_{Kink} の値は Case25, ID138, ID155 で同程度の結果となったが、一方で、内翼の前進角 α_1 は ID138, ID155 で Case25 より大きくなった。これらの結果についても前節で指摘したように、巡航時の揚抗比に関する目的関数は高アスペクト比を有する翼形状が大きな値を取る。そして、目的関数に対する α_2 , C_{Kink} の感度はある一定の範囲では小さいが、形状パラメータがある一定の範囲を超えると目的関数が急激に悪化するため、類似の形状となったと考えられる。

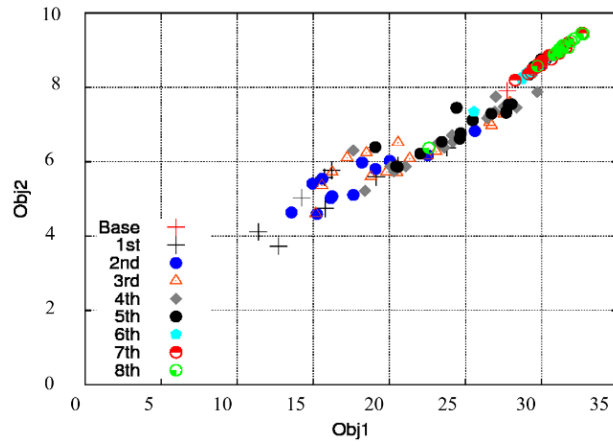


図 12 遺伝的アルゴリズムによる多目的空力最適化の結果

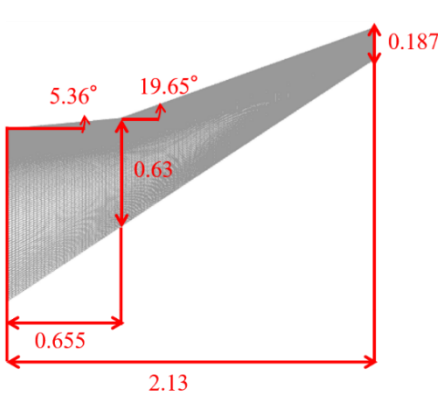


図 13 基本形状の翼平面形状
 ($Obj1 \doteq 27.74$, $Obj2 \doteq 7.90$)

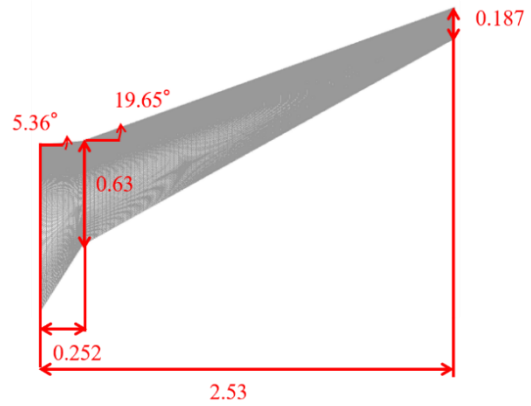


図 14 Case25 の翼平面形状
 ($Obj1 \doteq 32.36$, $Obj2 \doteq 9.34$)

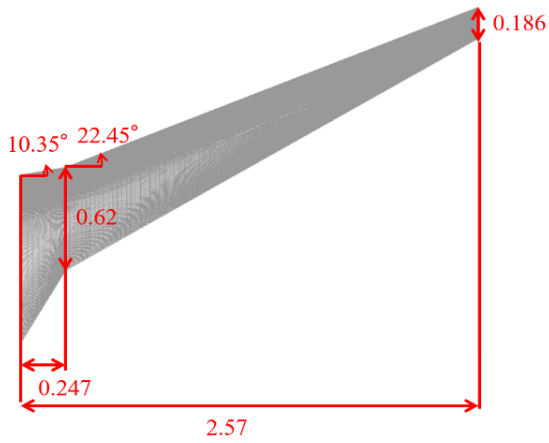


図 15 ID138 の翼平面形状
 ($Obj1 \doteq 32.66$, $Obj2 \doteq 9.45$)

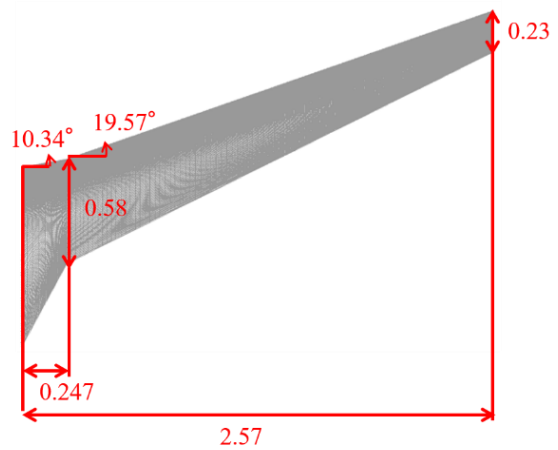
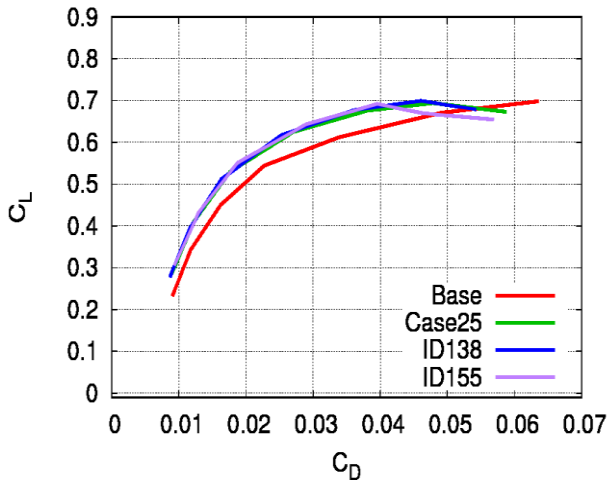


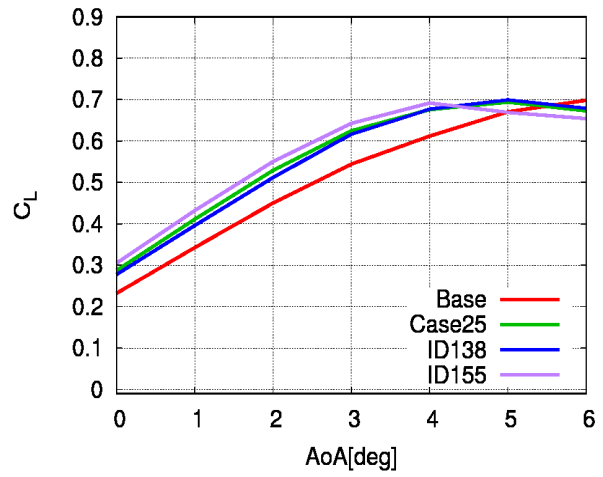
図 16 ID155 の翼平面形状
 ($Obj1 \doteq 32.74$, $Obj2 \doteq 9.43$)

基本形状を含む4つの形状に対して空力特性を比較した結果を図17に示す。図17(a)のポーラーカーブより抗力係数 $C_D \leq 0.04$ において、Case25, ID138, ID155 は基本形状よりポーラーカーブが上方へシフトし、高アスペクト比化による性能向上がわかる。一方、 $C_D \geq 0.04$ において、ID155 の揚力係数 C_L が著しく低下している。図17(b)より C_L - AoA 曲線を調べると、迎角 $AoA = 4^\circ$ 以上で C_L の低下が確認できる。図17(c)の C_D - AoA 曲線を調べると、 $AoA = 5^\circ$ 以上では高アスペクト比を有する翼形状では C_D は小さくなる。ただし、同じアスペクト比を有する ID138 と ID155 を比較した場合、ID155 の C_D が大きい値を示し、 C_L の低下が見られた。そこで $AoA = 5^\circ$ での各形状の流れの可視化結果を図18に示す。流れ場の可視化は翼表面に圧力係数 C_p を示し、流線を赤線で示した。さらに、衝撃波の発生位置を示すために Shock Function²²⁾が1となる等値面を黒色で描いた。Shock Function は $(\vec{v} \cdot \nabla p) / (a|\nabla p|)$ で定義され、 \vec{v} , p , a はそれぞれ速度、圧力、音速を示す。その結果、各形状での衝撃波が発生し、その後方で流れが剥離した衝撃波失速が確認できる。そして、ID155 は他の3つの形状に比べてより広範囲で衝撃波失速が確認される。この広範囲での衝撃波失速が ID155 での C_D 増加及び C_L 低下の原因と考えられる。

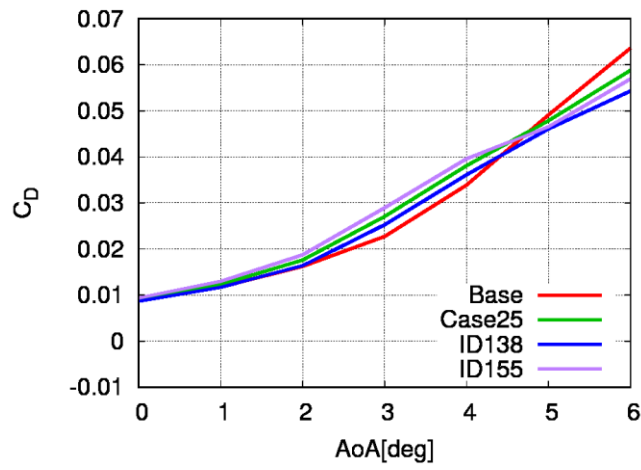
次に、翼全体の空力特性に対する内翼及び外翼の寄与を調べる。図19に内翼及び外翼の揚力係数 C_L 及び抗力係数 C_D を示す。各係数の無次元化には全主翼面積を用いた。その結果、外翼の C_L 値及び C_D 値はともに内翼より大きな値を示した。一方、内翼の C_L 値及び C_D 値は、Case25, ID138, ID155 について迎角 $AoA = 3 \sim 4^\circ$ 付近で C_L の減少、 C_D の急増が見られた。内翼には低迎角において負の C_D 値が見られた。しかし、これらの変化と図17の空力特性を比較すると、翼全体の空力特性に対する内翼の寄与は小さく、外翼が翼全体の空力特性を決定していると言える。なお、上記の負の C_D 値について調べるため、セミスパン長 $b/2$ で規格化したスパン位置 $\eta \doteq 0.05$ での気流に垂直方向の圧力 ($C_p - z/t$) 分布図を図20に示す。 $C_p - z/t$ 分布図は翼厚 0 から最大翼厚 t までの圧力分布を示し、圧力抵抗を調べることができる。図中の drag loop は局所抵抗、suction loop は局所推力を示し、それらの面積の差がほぼ抵抗係数となる²³⁾。その結果、基本形状に比べて Case25, ID138, ID155 は $z/t \leq 0.3$ での suction loop や $0.3 \leq z/t \leq 0.6$ での drag loop の面積は同程度であるのに対して、 $z/t \geq 0.6$ での suction loop は基本形状より大きくなっている。また、基本形状の $\eta \doteq 0.05$ での C_D 値がほぼ0となる。これらのことから、Case25, ID138, ID155 は $\eta \doteq 0.05$ で推力を発生させる。さらに、Case25, ID138, ID155 の内翼の C_L 及び C_D の急激な変化を調べるため、 $AoA = 3^\circ$ での流れ場を図21に示す。流れ場は図18と同様な方法で可視化した。その結果、図21からいずれの形状についても内翼で衝撃波が生じているが、剥離域は内翼の後縁近くに限られている。図18からわかるように迎角を増すことで内翼の剥離域が衝撃波直後まで拡大しており、それによって内翼の C_L 値が急激に減少したと考えられる。



(a) ポーラーカーブ

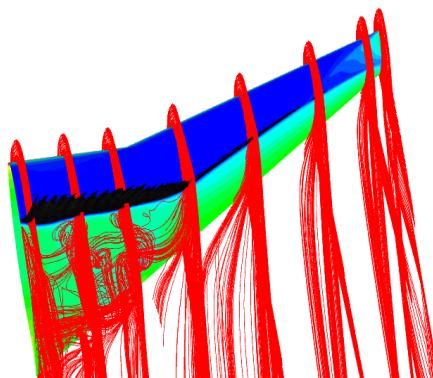


(b) C_L - AoA 曲線

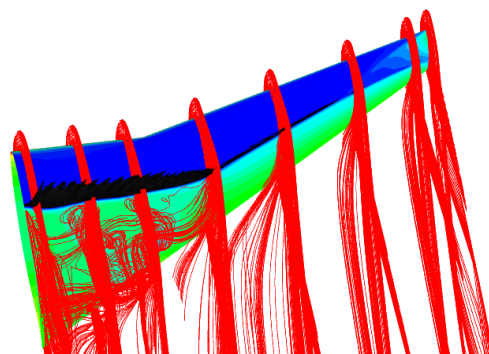


(c) C_D - AoA 曲線

図 17 空力特性の比較



(a) 基本形状



(b) Case25

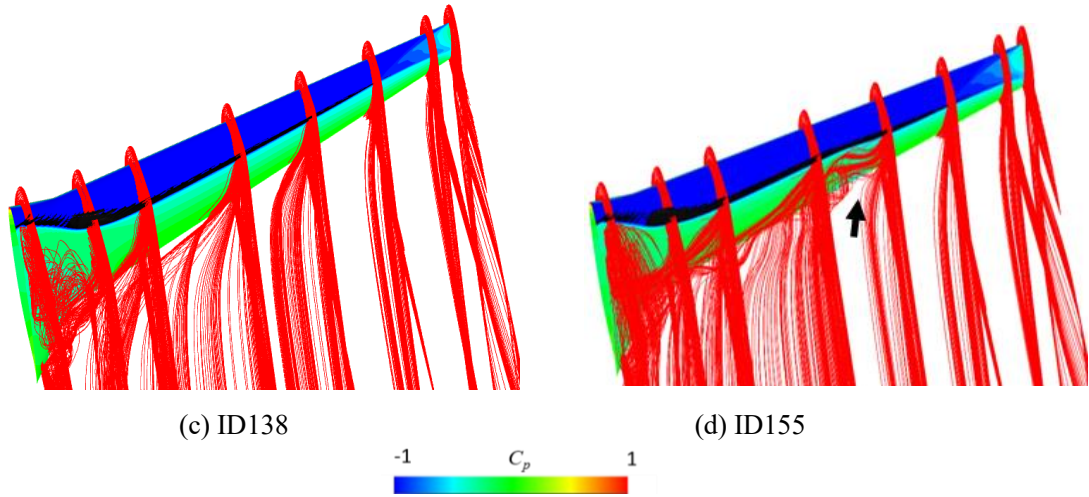


図 18 迎角 5°での流れ場の比較

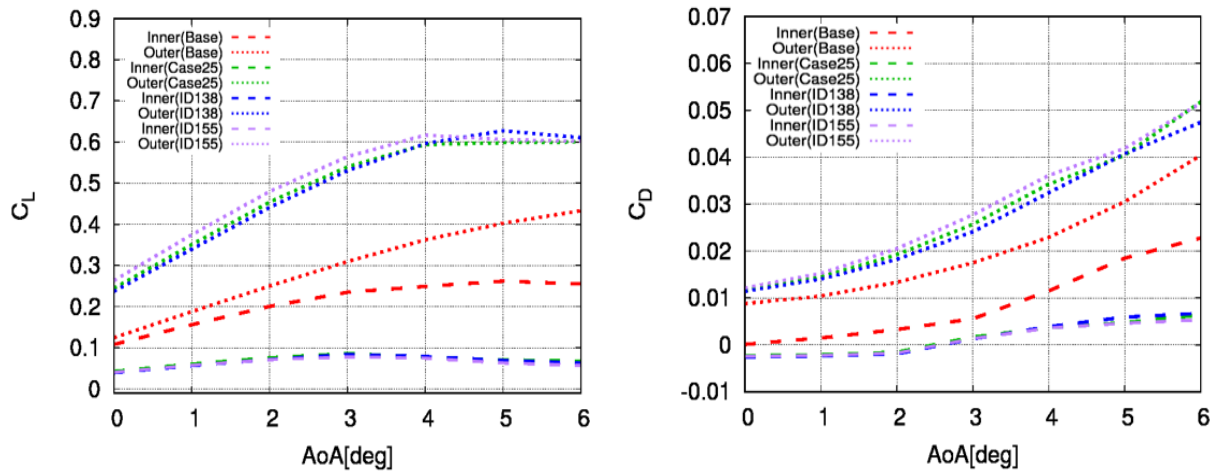


図 19 内翼及び外翼の空力特性

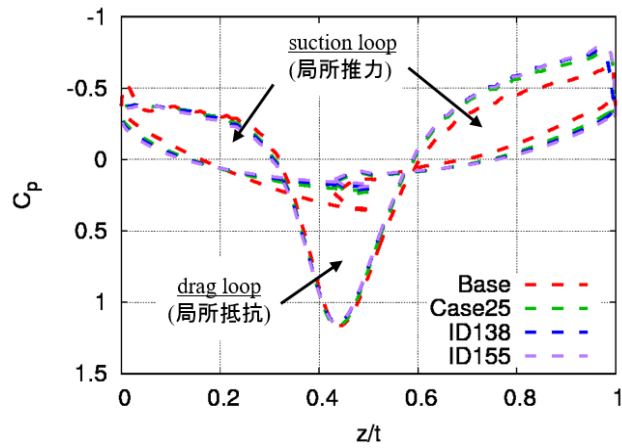


図 20 迎角 0°の内翼($\eta \doteq 0.05$)での C_p - z/t 分布

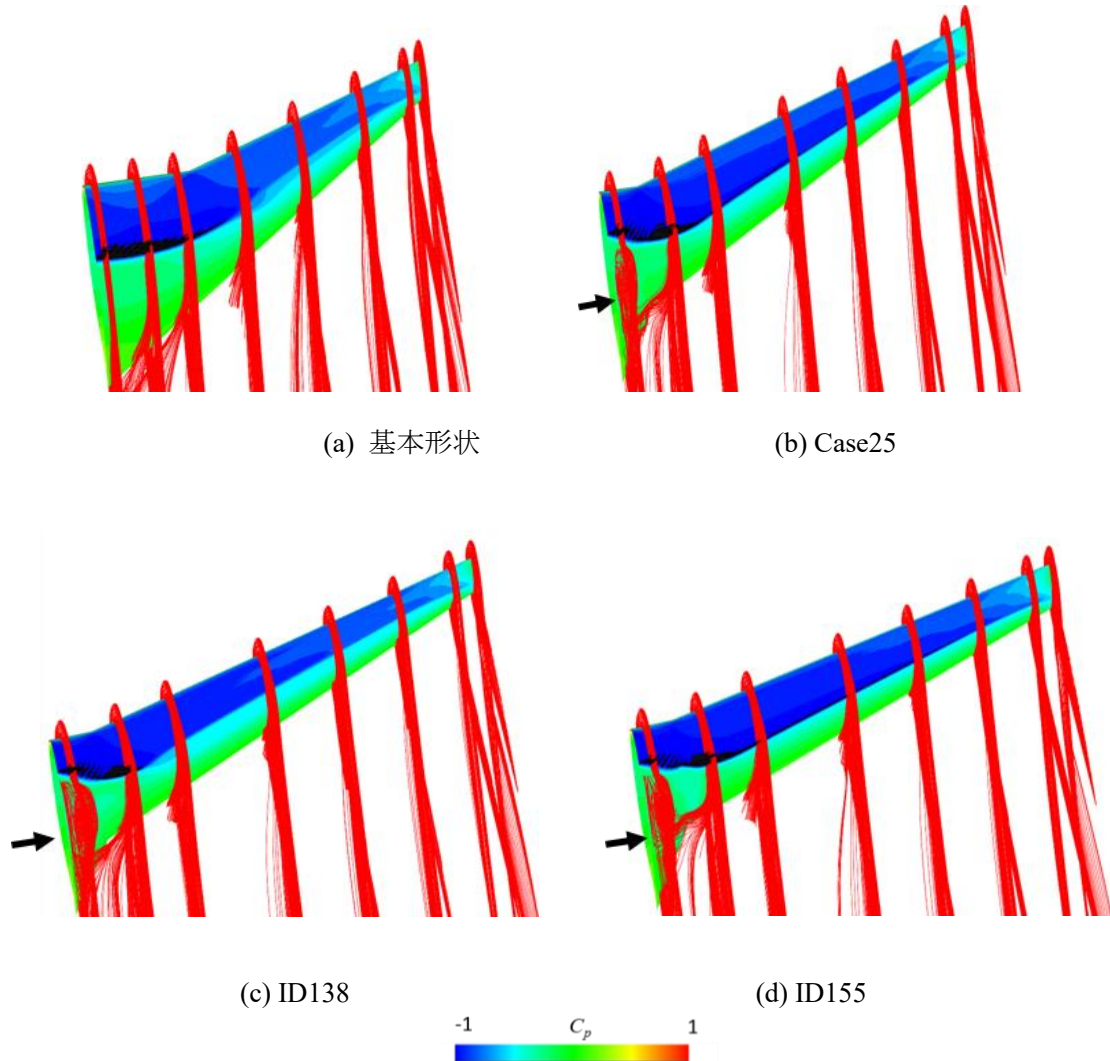


図 21 迎角 3°での流れ場の比較 (続き)

5. 結論

新形態将来旅客機の有望なオプションとして前進翼旅客機を検討している。本研究では以下の2つのアプローチを用いて乗客 220 席級旅客機の前進翼平面形状に関する調査を行った。

1. パラメトリックスタディによって空力特性に対する感度の高い形状パラメータを抽出する。
2. 遺伝的アルゴリズムを用いた空力最適化によって最適形状を探索する。

上記2つのアプローチ結果は同程度の空力特性となり、翼形状もセミスパン長が大きい高アスペクト比の翼平面形状となった。また、内翼の前進角に対する目的関数のばらつきは小さい。一方、外翼の前進角及びキंक位置での翼弦長に対する目的関数のばらつきは一定の範囲内では小さいが、その範囲外では目的関数を大きく悪化させることがわかった。この原因は、高迎角において衝撃波による剥離域が翼根から翼端にわたって広範囲で発生したためである。また、翼全体の空力特性に対する内翼及び外翼の寄与を調べた。その結果、内翼の翼全体へ与える寄与は小さく、内翼の空力特性が変化しても翼全体の空力特性にはほとんど影響しないことがわかった。

謝辞

本研究は JAXA 公募型研究「新形態旅客機概念の検討」の 1 テーマとして実施したものであり、数値計算には JAXA のスーパーコンピュータ「JSS2」を用いた。ここに関係者に深く謝意を表します。

引用文献

- 1) 清水貴文: 航空科学技術に係る日欧米の研究開発動向, 科学技術動向, 097 (2009), pp.19-34.
- 2) <http://www.aero.jaxa.jp/research/ecat/> (2018 年 2 月 20 日確認)
- 3) 益子哲行, 今村太郎, 李家賢一, 野村聡幸: 高アスペクト比を有する複葉ジェット旅客機旅客機概念設計及び CFD 解析について, 第 54 回飛行機シンポジウム, JSASS-2016-5219, 2016.
- 4) Breitsamter, C. and Laschka, B.: Vortex Flowfield Structure at Forward Swept-Wing Configurations, *Journal of Aircraft*, 38, 2 (2001), pp.193-207.
- 5) Weeks, T. M. and Leet, L. H.: The X-29A forward swept wing advanced technology demonstrator program, *Proc. of the International Conference on Forward Swept Wing Aircraft*, Univ. of Bristol, Bristol, U. K., pp.I.1.1-I.1.8, 1982.
- 6) Nangia, R. K.: Aspects of forward swept wing research at the University of Bristol, *Proc. of the International Conference on Forward Swept Wing Aircraft*, Univ. of Bristol, Bristol, U. K., pp. I.9.1-I.9.24, 1982.
- 7) Bispinghoff, C., Ashley, H., and Halfman, L. R.: *Aeroelasticity*, Dover Books on Aeronautical Engineering, 1996.
- 8) 森澤征一郎, 友枝宏之, 野村聡幸, 川添博光: Boeing767 級旅客機に適した前進翼平面形のパラメトリックスタディ, 第 55 回飛行機シンポジウム, JSASS-2017-5062, 2017.
- 9) http://www.boeing.com/commercial/airports/3_view.page (2018 年 2 月 20 日確認)
- 10) CRM.65 airfoil section, <https://commonresearchmodel.larc.nasa.gov/crm-65-airfoil-sections/> (2018 年 2 月 20 日確認)
- 11) Fujii, K, Endo, H., and Yasuhara, M.: *Activities of Computational Fluid Dynamics in Japan: Compressible Flow Simulations*, High Performance Computing Research and Practice in Japan, Wiley Professional Computing, JOHN WILEY & SONS, pp. 139-161, 1990.
- 12) Fujii, K. and Yoshihara, H.: NAVIER-STOKES BENCHMARK TESTS, *Supercomputers and Their Performance in Computational Fluid Dynamics* Ed. by Kozo Fujii, Notes on Numerical Fluid Mechanics, 37 (1993), pp. 105-126.
- 13) Fujii, K.: Performance of a Japanese Vector-Parallel Supercomputers on Large-Scale CFD Problems -Solution Techniques for Large-Scale CFD Problems, *Computational Methods in Applied Sciences*, Ed. by W. G. Habashi, (1995), pp. 123-137.
- 14) Baldwin, B. and Lomax, H.: Thin Layer Approximation and Algebraic Model for Separated Turbulence Schemes with Spectral-like Resolution, *Journal of Computational Physics*, 103, 1 (1992), pp. 16-42.
- 15) Van Leer, B.: Towards the Ultimate Conservative Difference Scheme, IV. A New Approach to Numerical Convection, *Journal of Computational Physics*, 23 (1977), pp. 276-299.
- 16) Shima, E. and Jounouchi, T.: Role of CFD in Aeronautical Engineering (No.14)-AUSM Type Upwind Schemes, *Proceeding of the 14th NAL Symposium on Aircraft Computational Aerodynamics*, pp. 7-12, 1997.
- 17) Fujii, K.: Simple Ideas for the Accuracy and Efficiency Improvement of the Compressible Flow Simulation

- Methods, Proceedings of the International CFD Workshop on Supersonic Transport Design, Tokyo, March 1998.
- 18) Goldberg, D.E.: Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Addison Wesley, 1989.
- 19) Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., and Meyarivan, T.: A fast and elitist multiobjective genetic algorithm (NSGA-II), Evolutionary Computation, IEEE Transactions, 6, 2(2002), pp.182-197.
- 20) Eshelman, L. J. and Schaffer, J. D.: Real-Coded Genetic Algorithms and Interval Schemata, Foundations of Genetic Algorithms 2, Morgan Kaufmann, San Mateo, CA, pp. 187–202, 1993.
- 21) Deb, K. and Goyal, M.: A Combined Genetic Adaptive Search (geneAS) for Engineering Design, Computer Science and Informatics, 26, 4 (1996), pp.30-45.
- 22) Lovely, D. and Haines, R.: Shock Detection from Computational Fluid Dynamics Results, AIAA paper 99-3285, 1999.
- 23) 神谷信彦: 遷音速における二次元翼の抵抗発散, NAL TR-299, 1973.

Aerodynamic Optimization on Planforms of Forward-Swept Wing for a 220-Seat Class Aircraft

*Seiichiro Morizawa¹, Toshiyuki Nomura², and Hiromitsu Kawazoe³

¹ Department of Mechanical Systems Engineering, ² Japan Aerospace Exploration Agency, ³ Gifu University,
Institute for Advanced Study

In this study, two discussions on the planforms of forward-swept wings for a 220-seat class aircraft are conducted. The two discussions are related with a parametric study of the wing planforms and an aerodynamic optimization with genetic algorithm. Both of the studies result in similar aerodynamic performances and geometries. As for the geometries, the longer semispan length leads directly to a better aerodynamic performance. On the other hand, the changes in the inner/outer swept-forward angles and the chord length at the kink position have little influence on the aerodynamic performances. However, the aerodynamic performances are getting worse when both the semispan length and the outer swept-forward angle are getting larger. The geometries optimized are greatly different from the wing planform of the base geometry, which is caused by shock stall. In comparison between the inner and outer wings, the aerodynamic performances of the outer wing are crucial to those of the entire wing.

Key Words : Forward-Swept Wing, Aerodynamic Optimization, Wing Planform, CFD, Genetic Algorithm

Investigation of a Planar Wing with Wing Grid using CRM.65.airfoil

*Seiichiro Morizawa¹ and Shigeru Obayashi²

¹Dep. Mechanical Systems Engineering, National Institute of Technology, Okinawa College.

²Institute of Fluid Science, Tohoku University.

(*morizawa@okinawa-ct.ac.jp)

Abstract

In this study, to acquire design guidelines for future aerodynamic wingtip design with a wing grid, the aerodynamic coefficients of a planar wing with a wing grid and a rectangular wing, employing CRM.65.airfoil, at low- and high-Mach number conditions are compared using numerical simulation. As the result, the planar wing with a wing grid generates the extra induced-drag coefficient when the lift coefficient is the same. This is because the wingtip vortices of the wing grid occur, and the pressure coefficient on the first wingtip becomes especially smaller. Therefore, there is no advantage in these conditions with a wing grid when no proper dihedral angle or twist angle is set.

Keywords: Wing grid, Wingtip design, Planar wing, Aerodynamic characteristics, CFD

1. Introduction

Reducing the induced drag on an aircraft is important because it accounts for approximately 25% and 60% of the total drag during cruising and takeoff, respectively¹⁾. Drag is generated near the wingtip, where high-pressure air from the bottom to the top of the wing could exit. This causes a pressure difference between the upper and lower surfaces, creating a tip vortex. A straightforward approach for drag reduction is utilizing a high-aspect-ratio wing. This is because the wing portion affected by the tip vortex is lower for a high-aspect-ratio wing, and thereby reduces the strength of the tip vortex. However, the wingspan is restricted because the structural weight of aerodynamic loads must be considered. A common alternative for drag reduction is to deform the wingtip shape, a practice termed the wingtip concept²⁾. The purpose of the concept is to ensure attenuation of the wingtip vortex energy without increasing the aspect ratio.

Recently, the wing grid mimics the wingtip of birds during gliding, with a wingtip model proposed³⁾. La Roche et al. demonstrated that a glider with a wing grid involves a similar lift-to-drag ratio⁴⁾. This result suggests that the wing grid configuration can reduce drag, including induced drag on civil aircraft. However, studies on wing grid at high Reynolds number ($Re \geq O [10^6]$) for civil aircraft class are scant. In addition, both low- and high-Mach number conditions, such as low speed for takeoff and transonic speed for cruising, are not considered. The relations between aerodynamic characteristics and flow field with respect to the wing geometry, including the induced drag, are not yet clear. The study of wing grids such as the position and allocation of each wing grid and the optimal dihedral angles are also necessary when designing the wingtip of a civil aircraft.

The objective of this study is to acquire guidelines for the optimal wingtip with a wing grid. As the first step for this study, the relationships between the aerodynamic characteristics and flow fields on a planer wing with a wing grid employed as CRM.65.airfoil. In addition, the comparisons between a wing grid and a rectangular wing with the same span length are conducted to see the difference in aerodynamic characteristics at low- and high-Mach numbers conditions

generated by wingtip with and without a wing grid. For this purpose, we performed numerical investigations at those two conditions at a Re of 5.0×10^6 , with these conditions assumed as those for during flight takeoff (low Mach number) and cruising (high Mach number). The corresponding lift and drag coefficients and lift-to-drag ratios were calculated and plotted, with flow fields on the upper surface obtained from pressure coefficients. In addition, the pressure distribution on the wings near the wingtip region is examined. Finally, two drag characteristics such as pressure/viscosity drag, and induced drag are also investigated.

2. Problem Description

2.1 Governing equations

The governing equations are three-dimensional compressible Navier-Stokes equations. The conservative and non-dimensional forms of the equations are as the follows:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial}{\partial x_j} \tau_{ij} \quad (2)$$

$$\frac{\partial e}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} [(e + p)u_j] = \frac{1}{Re} \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij} u_i) - \frac{1}{Re} \frac{\partial q_j}{\partial x_j} \quad (3)$$

where t, ρ, p, e, u_j ($= u, v, w$) are the time, density, static pressure, total energy, and velocity in each direction x_j ($= x, y, z$) for $j = 1, 2, 3$, respectively. All variables are normalized by the chord length c of the main wing, the density ρ_∞ , the viscosity μ_∞ , and the velocity u_∞ of the freestream. The viscosity μ is calculated by the Sutherland's law as follows.

$$\frac{\mu}{\mu_\infty} = \left(\frac{T}{T_\infty} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{T_\infty + C}{T + C} \quad (4)$$

where T is the temperature. The constant values T_∞ and C are set to be 460.0 and 198.6. For the perfect gas, the static pressure p and speed of sound a can be calculated as follows.

$$p = (\gamma - 1) \left(e - \frac{1}{2} \rho u_k u_k \right) \quad (5)$$

$$a^2 = \gamma \frac{p}{\rho} \quad (6)$$

where γ ($=1.4$) is the specific heat ratio. The viscous stress tensor τ_{ij} and heat flux vector q_j are written as follows.

$$\tau_{ij} = 2\mu s_{ij} - \frac{2}{3} \mu \delta_{ij} s_{kk} \quad (7)$$

$$q_j = -\frac{1}{\gamma - 1} \frac{\mu}{Pr} \frac{\partial a^2}{\partial x_j} \quad (8)$$

where δ_{ij} is the Kronecker delta and Pr is the Prandtl number. The ratio of strain tensor s_{ij} is the following.

$$s_{kk} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (9)$$

2.2 Numerical schemes

To discretize eqs. (1) ~ (3), partial derivatives of the convective term using a simple high-resolution upstream scheme (SHUS)⁵⁾ with a three-order monotone upstream scheme for the conservation laws (MUSCL)⁶⁾ were employed. The viscous terms were computed using the second-order central difference scheme. An alternating direction implicit symmetric Gauss-Seidel scheme (ADI-SGS)⁷⁾ for the second-order backward differentiation was adopted for time integration with a local time step, and the steady-state equations were solved. The Spalart-Allmaras model⁸⁾ was utilized as the turbulent model.

2.3 Validation of the computational methods

In this study, the numerical computation data are compared with experimental data⁹⁾. The validation followed the CRM.65.airfoil of NASA-CRM aircraft model¹⁰⁾ (CRM.65.airfoil sections), as illustrated in Fig. 1. The validation conditions include a Reynolds number (Re) of 5.0×10^6 and a Mach number (M_∞) of 0.74. The angles of attack (AoA) of the computation were set from 0° to 6° at increments of 1° , while the grid points were $497 \times 101 \times 151$.

The experimental and computational methods data in this study for the lift and drag coefficients are compared in Fig. 2. The comparison reveals the computational methods predict the coefficients and highlight their trends. Therefore, we concluded that the computational methods are suitable for the investigation in this study. In addition, the wingtip prediction is compared with the experimental data of the pressure coefficient (C_p) distribution at each airfoil section against the span-direction of the ONERA M6 wing¹¹⁾. The computational method of this study captures the general trend of the C_p distribution in the span direction of the span-direction at 99% position. We conclude that the computational methods of this study can predict the accuracy of the wingtip well.

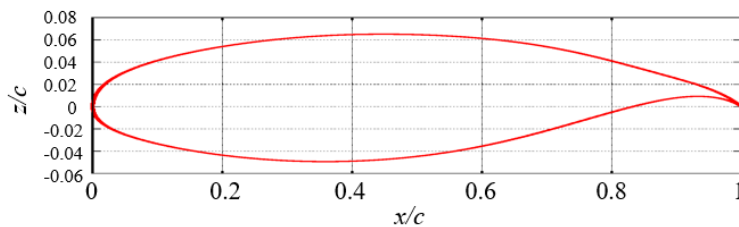


Fig. 1 CRM65.airfol of NASA-CRM aircraft model

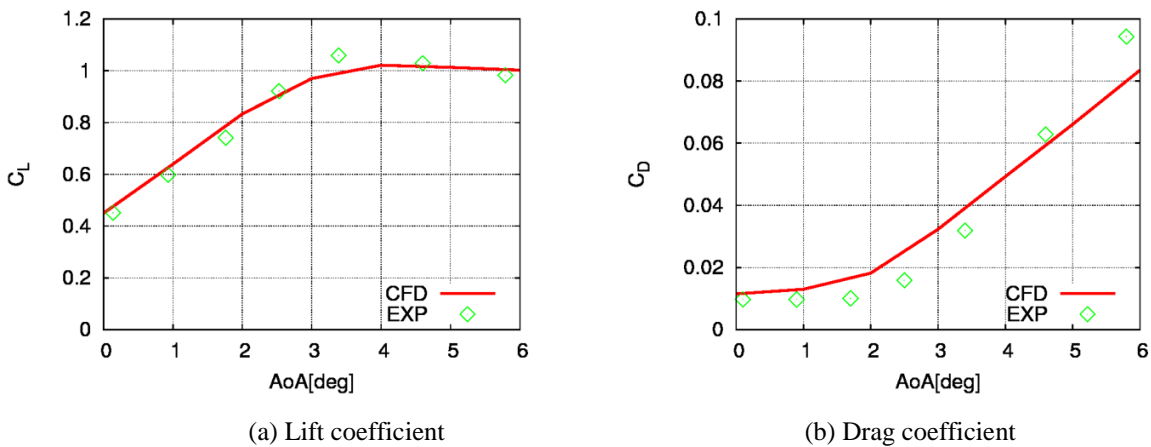


Fig. 2 Comparison of current computation and experimental data for the (a) lift coefficient and (b) drag coefficient showing a close relationship

2.4 Computational geometry, grids, and cases

The computational geometries of the wing grid and rectangular wing are shown in Fig. 3, with the half wing models used to save the computational cost, with the CRM.65 airfoil utilized. The aspect ratio of the rectangular wing was set to 5.6 as employed³⁾. The CRM.65 airfoil is also employed for the wingtips of the wing grid in this study. The wingtip shapes of the wing grid and rectangular wing are rounded to the camber line as shown in Fig. 4. Figure 5 shows the wingtips layout of the wing grid. The mounting angles for these wingtips are set at 0° , and the chord line of the wing grid matches that of the main wing. The four wingtips of the wing grid are set at regular intervals. To determine the wingtip length of the wing grid, the length ratio between the wing grid region and the main wing was set to be 0.7 based on the previous literature¹²⁾.

The C-H type grid topology was employed for computation, where the grid outer boundary layer is 20 times the chord length away from the wing. The minimum size of the grid in the normal directions is obtained as $0.05/\sqrt{Re}$. In addition, improving the local grid accuracy for the wingtip region was necessary. However, since computer resources are restricted, maintaining identical grid quality between the main wing and the wingtip is difficult due to the wing grid. In this study, a zonal method was adopted to enhance local grid resolutions of the wing grid, and the connection between the main wing (zone1) and wingtip (zone2) is depicted in Fig. 6 (a). The grids in green and red were independently generated by the wingtip of the wing grid and main wing, creating the need for processing each grid. Figure 6 (b) shows the connection between the wingtip (zone 2) and its outer region (zone3). These zones of Fig. 6 are calculated by a united zonal method based on the fortified solution algorithm¹³⁾. The grid points were set to $497 \times 71 \times 151$ (zone1), $605 \times 33 \times 151$ (zone2), and $497 \times 34 \times 151$ (zone3).

The computational conditions in this study include the AoA changing from 0° to 6° at a 1° increment, Mach numbers (M_∞) of 0.20 and 0.74, and a Reynolds number based on the chord length of 5.0×10^6 . In this study, the Re is considered with a fixed Re at $M_\infty = 0.20$ and 0.74. This is corresponding to the vilified one in Fig. 2. We assume that the flow field does not change drastically at high Re , such as $Re > O(10^6)$, and could compare purely the difference in the M_∞ .

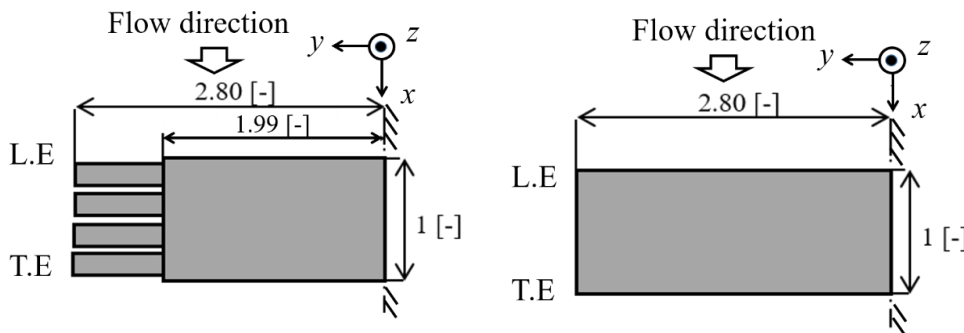


Fig. 3 Computed geometry of the wing grid and rectangular wing

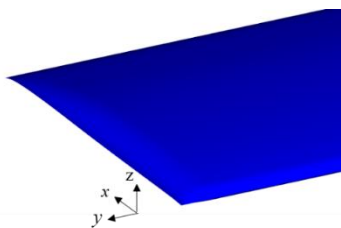


Fig. 4 Wingtip shapes of the wing grid and rectangular wing

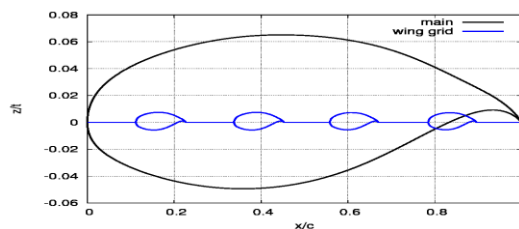
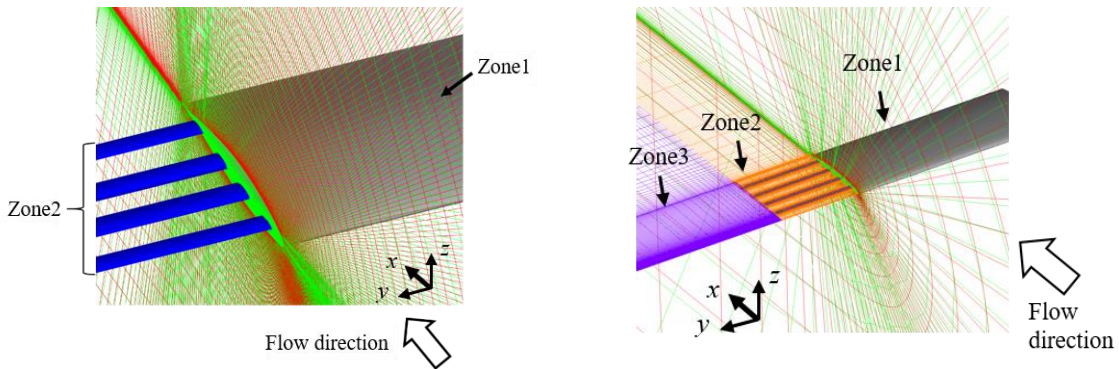


Fig. 5 Wingtips layout of wing grid



(a) Connection between the main wing and wingtip (b) Connection between the wingtip and its outer region

Fig. 6 Computational grid of the wing grid near the wingtip region

2.5 Postprocessing

2.5.1 Estimation of the lift and drag coefficients from pressure coefficients distributions

To estimate the lift and drag coefficients, the pressure coefficients (C_p) against the normalized chord-length direction (x/c) and normalized vertical-length one (z/t) are investigated. A typical example of these C_p distributions on airfoils of the aircraft is plotted as illustrated in Fig. 7, with C_L and C_D obtained by the loop areas. The area of C_p against x/c between the upper and lower surfaces is approximately the C_L value of the wing¹⁴). Relatedly, Kamiya explained that the difference between the drag-loop and suction-loop areas is equal approximately to the C_D value¹⁵).

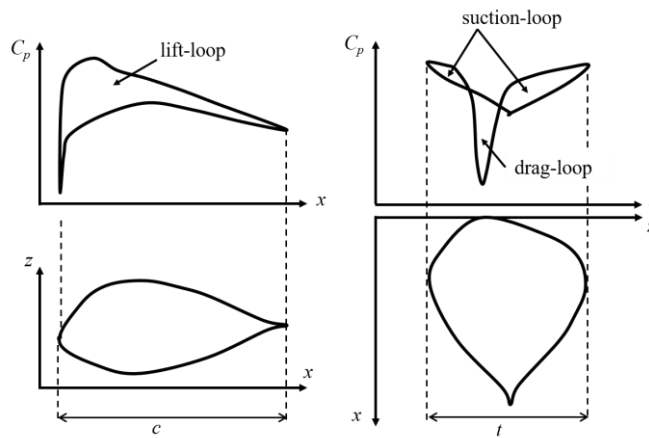


Fig. 7 Schematic diagram of pressure coefficient distributions for estimating C_L and C_D

2.5.2 Drag Decomposition

To obtain drag characteristics of the near-flow field, in this study, we adopted two decompositions for the drag coefficient (C_D). The first involves the viscous-drag (C_{Dv}) and the pressure-drag (C_{Dp}) coefficients, whereas the other is divided into the profile-drag (C_d) and the induced-drag (C_{Di}) coefficients. In particular, the latter drag decomposition¹⁶) is expressed as follows:

$$C_D = C_d + C_{Di} = C_d + \frac{C_L^2}{\pi e AR} \quad (2)$$

where e and AR are the Oswald efficiency and aspect ratio of the wing. The C_{Di} in eq. (2) is obtained by subtracting C_D from the C_d calculated when C_L is zero.

3. Results and Discussion

3.1 Fundamental characteristics

The lift and drag coefficients (C_L and C_D) at M_∞ of 0.20 and 0.74 against the AoA are displayed in Fig. 8. To investigate these coefficients of the wing grid and rectangular wing, the rectangular wing area is employed as the reference area. In Fig. 8 (a), the C_L of the wing grid at M_∞ of 0.74 is smaller at all AoA values than that of the rectangular wing, and the C_L difference between these wings widens as the AoA increases. Conversely, the C_L of the wing grid at M_∞ of 0.20 is higher at all AoA values, and a similar trend of C_L difference between these wings at M_∞ of 0.74 against AoA is observed at M_∞ of 0.20. Therefore, the C_L of the wing grid at M_∞ of 0.20 is higher than that of the rectangular wing at an AoA of 6° . These results suggest that the wing grid facilitates obtaining lift than the rectangular wing for the same span-length, highlighting its superiority for flight takeoff at a low Mach number and high AoA . This indicates that the wing grid is characterized by low wing loading under these conditions. However, these wing grid characteristics are reversed at the transonic conditions of flight cruising.

In Fig. 8 (b), the wing grid C_D at M_∞ of 0.20 and 0.74 surpass those of the rectangular wing, and the C_D difference between the two at M_∞ of 0.20 is almost identical at all AoA values, whereas that at M_∞ of 0.74 becomes smaller as the AoA increases and the C_D of the rectangular wing is close to that of the wing grid. In addition, the C_D increases with AoA for the wing grid, and rectangular wings at M_∞ of 0.74 are higher than those at M_∞ of 0.20. At lower AoA , the C_D value of low M_∞ for those wings is larger than that of high M_∞ for those wings. On the other hand, at higher AoA , the C_D value of low M_∞ for those wings is smaller than that of high M_∞ for those wings. These results suggest that the C_D values at M_∞ of 0.74 and low AoA for the wings, equivalent to the cruise condition of aircraft are lower, whereas the C_D at M_∞ of 0.20 and higher AoA for the wings, equivalent to the takeoff condition are higher. Therefore, the planar wing with a wing grid seems disadvantageous due to high drag for the entire flight conditions (i.e., takeoff, cruising, and landing), although a similar drag rise trend is observed for the rectangular wing.

Figure 9 shows the lift-to-drag ratio (L/D) at M_∞ of 0.20 and 0.74 against the AoA . The L/D values of the wing grid at both M_∞ values are lower than those for the rectangular wing at all AoA values, with values at M_∞ of 0.74 for the wings shifting to higher AoA values compared with those at M_∞ of 0.20. This is because, at higher AoA , the C_D of the wings at M_∞ of 0.74 is higher than those at M_∞ of 0.20 (Fig. 8 (b)). In addition, the C_D difference between the wing grid and rectangular wing at M_∞ of 0.74 is lower than that at M_∞ of 0.20 as the AoA increases. These results suggest that the planar wing with a wing grid exhibits poor aerodynamic performance compared to a rectangular wing for the same span-length.

Next, to assess the low and high AoA results, the flow fields of the wings are examined. The pressure coefficient (C_p) values on the upper surfaces of the wings at M_∞ of 0.20 and 0.74 for AoA values of 0° and 6° are displayed in Figs. 10 and 11. The red lines are located at a span-length direction, y/b of 2.38, and are used for illustration in Fig.12. In Fig. 10, at an AoA of 0° , low C_p is observed for the wing grid near the trailing-edge region of the first wingtip, whereas for the rectangular wing, it is only observed in the leading-edge region. In Fig. 11, at an AoA of 6° , low C_p is visible for the wing grid near the entire region of the first wingtip and the trailing-edge region of the second, whereas for the rectangular wing, it is still observed only near the leading-edge region of the wingtip.

To further compare the C_p differences between the wings, the C_p distributions at y/b of 2.38 against the normalized vertical-length direction (z/t) at AoA of 6° and normalized chord-length direction (x/c) at AoA of 0° are exhibited in Fig. 12 (a) and (b). The suction-loop is missing for the wing grid in each region (Fig. 12 (a)), with only drag-loops present.

The result for the wing grid differs from that of the rectangular wing, suggesting that the planar wing with a wing grid enhances the C_D values at an AoA of 0° , as shown in Fig. 9 (b). In addition, Fig. 12 (a) shows that the drag-loop covers the largest area for each wingtip of the wing grid. Conversely, in Fig. 12 (b), low C_p distributions are present near the first and second wingtips of the wing grid and are characterized by enlarging areas. The total C_p difference between the upper and lower surfaces of the wing increases beyond that of the rectangular wing. These results indicate that a planar wing with a wing grid enhances the C_L values at an AoA of 6° , as in Fig. 8 (a).

Finally, to investigate the low C_p distributions near the first and second wingtips of the wing grid, the flow fields are illustrated in Fig. 13. Figure 13 (a) shows the color streamline of normalized velocity at y/b of 2.38 with the monochrome contour of C_p . Figure 13 (b) shows the color C_p with contour lines filling the gap in the wing grid. As the result, Fig. 13 (a) suggests that the flow accelerations at the first and second wingtips of the wing grid are observed, and that trend is evident at the trailing edge. As shown in Fig. 13 (b), there is also a concentration of contour lines near the trailing edge and the gaps of wingtip near the trailing edge are lower C_p . These results seem that the flow acceleration reaches the trailing edge without deceleration due to the short chord length of the wing grid.

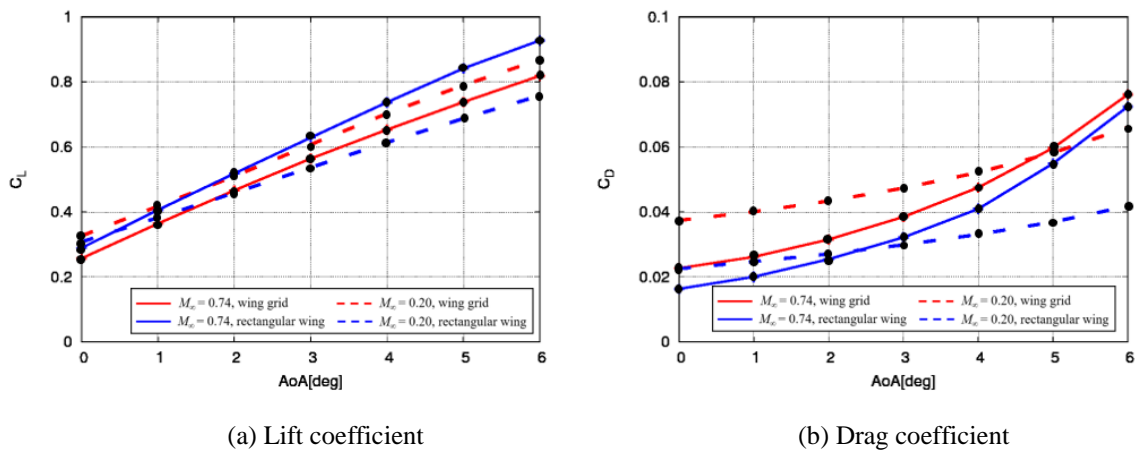


Fig. 8 Aerodynamic coefficients between wing grid and rectangular wing

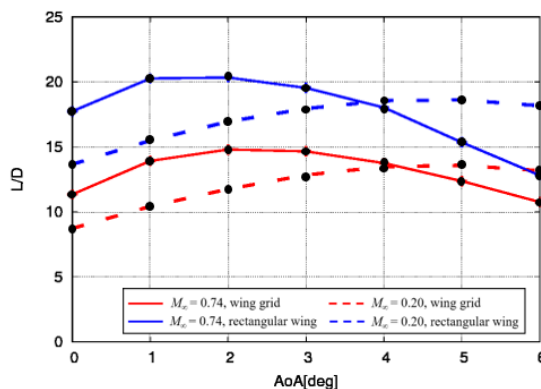


Fig. 9 Lift-to-drag ratio for the wing grid and rectangular wing at AoA from 0° - 6°

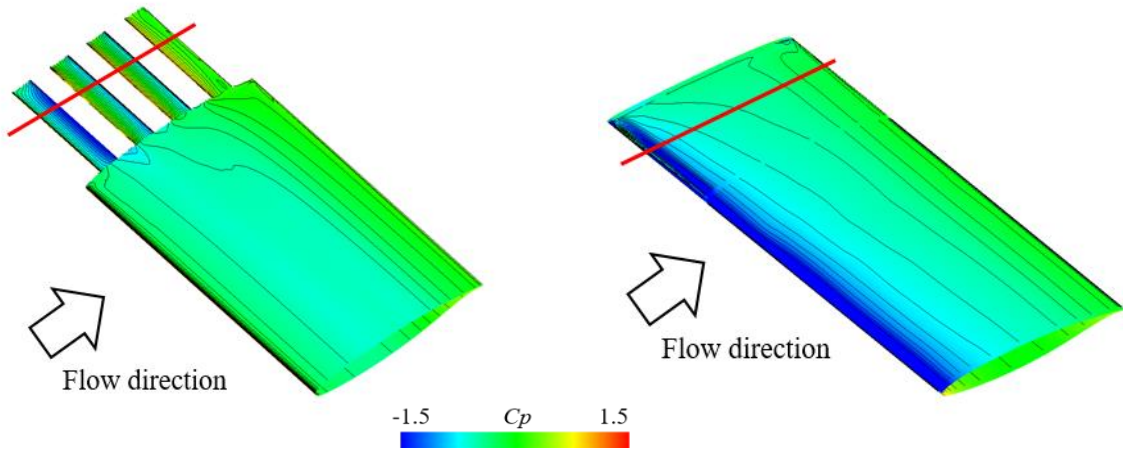


Fig. 10 Surface pressure coefficients at an AoA of 0° and M_∞ of 0.74 for the wing grid and rectangular wing

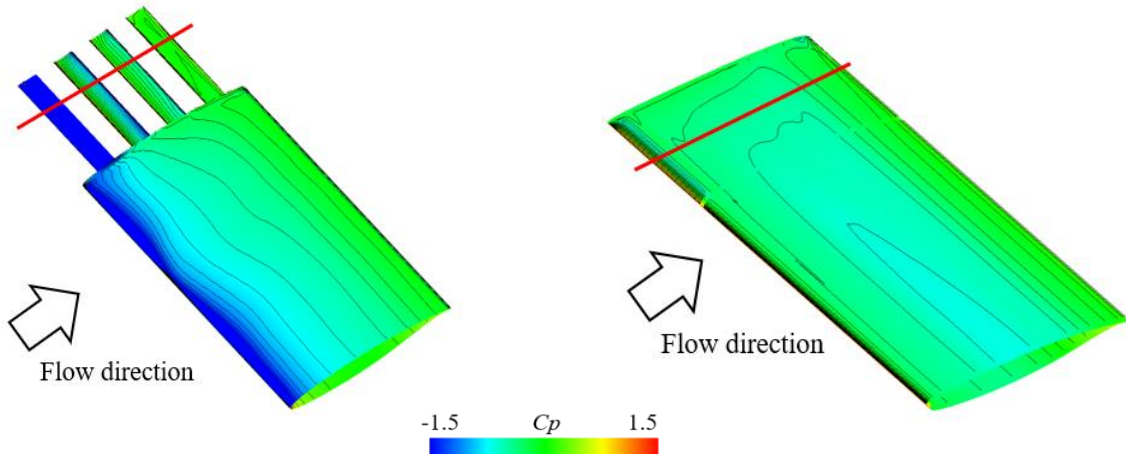
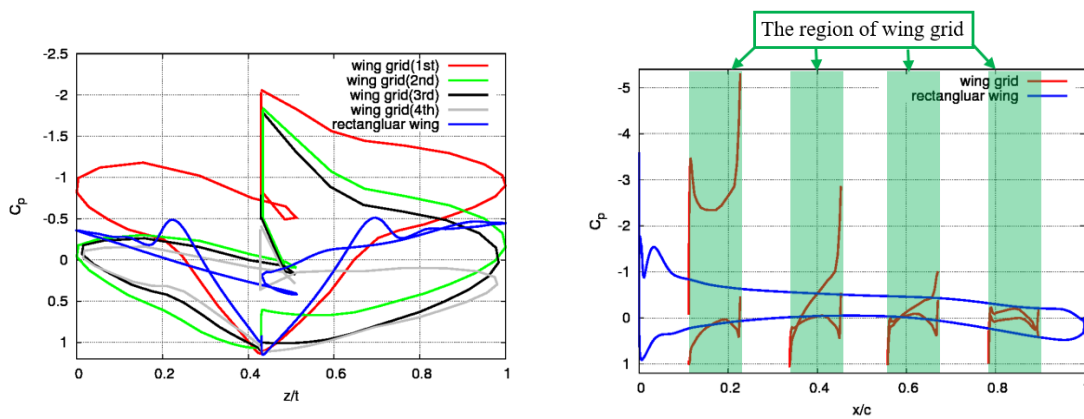


Fig. 11 Surface pressure coefficient at an AoA of 6° and M_∞ of 0.20 for the wing grid and rectangular wing



(a) Vertical-length direction with AoA of 0° and M_∞ of 0.74 (b) Chord-length direction with AoA of 6° and M_∞ of 0.20

Fig. 12 Pressure-coefficient distributions at $y/b = 2.38$ for the wing grid and rectangular wing

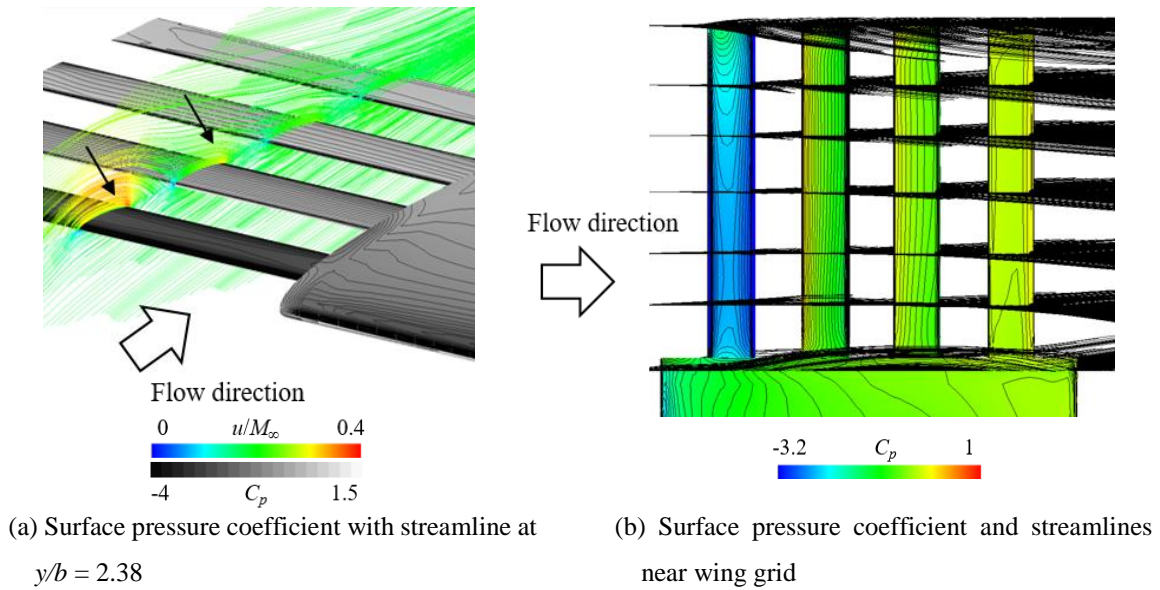


Fig. 13 Flow fields near wing grid at an AoA of 6° and M_∞ of 0.20

3.2 Decomposition of the drag coefficient

To better understand the drag characteristics of the planar wing with wing grid such as viscosity drag, pressure drag, and induced drag, decompositions of the C_D based on Fig. 8 (b) are conducted in this section. The viscous-drag (C_{Dv})/ pressure-drag (C_{Dp}) coefficients and induced-drag (C_{Di}) coefficients are shown in Figs. 14 and 15. The C_{Dv} of the wings is almost constant against the AoA , while their C_{Dp} exhibit similar trends to the C_D , increasing at approximately the same intervals at M_∞ of 0.20 for the wings and the difference C_{Dp} between these wings become smaller at M_∞ of 0.74 for the wings as the AoA increases. The result indicates that the planar wing with wing grid involves an extra C_{Dp} during flight takeoff (low Mach number) because the AoA dependence on the drag increase appears.

To obtain the C_{Di} , computations from -5° to -1° at increments of 1° were conducted in addition to Fig. 8, with the C_D at $C_L = 0$ obtained by linear interpolation and the C_{Di} derived from eq. (1). The C_{Di} against the AoA and polar-curve excluding the profile drag (C_d) are displayed in Fig. 15 (a) and (b). Figure 15 (a) shows that the C_{Di} differences at low AoA between the wing grid and rectangular wing at M_∞ of 0.20 and 0.74 are also low, whereas the differences increase as the AoA increases. Consequently, the C_{Di} at M_∞ of 0.20 of the wing grid becomes higher than that of the rectangular wing, and the C_{Di} at M_∞ of 0.74 of the wing grid becomes lower than that of the rectangular wing. This is because similar trends of C_L are confirmed as mentioned above in 3.1, and the C_{Di} of the wing grid is enhanced due to the increase in C_L . In contrast, the polar-curve between the wing grid and the rectangular wing has similar distributions at M_∞ of 0.20 and 0.74, respectively. As shown in Fig. 15 (b), the C_{Di} differences at low C_L between the wing grid and rectangular wing at M_∞ of 0.20 and 0.74 are also low, and the differences increase when C_L is higher.

Therefore, the planar wing with wing grid generates the extra C_{Di} during the flight takeoff phase when the designed C_L is set. To investigate the extra C_{Di} of the wing grid at M_∞ of 0.20 and 0.74, the flow field near wingtips is investigated.

Figure 16 shows the C_p with contour lines at an AoA of 6° , and the different colored streamlines of each wingtip are also illustrated. The wingtip vortices generated from the wing grid are observed from both M_∞ of 0.20 and 0.74. In particular, the C_p on the first wingtip becomes smaller, and the flow acceleration occurs as mentioned above in Fig. 14. These results seem that the wing grid in this study has no wing dihedral angle, and the first wingtip vortex is enhanced.

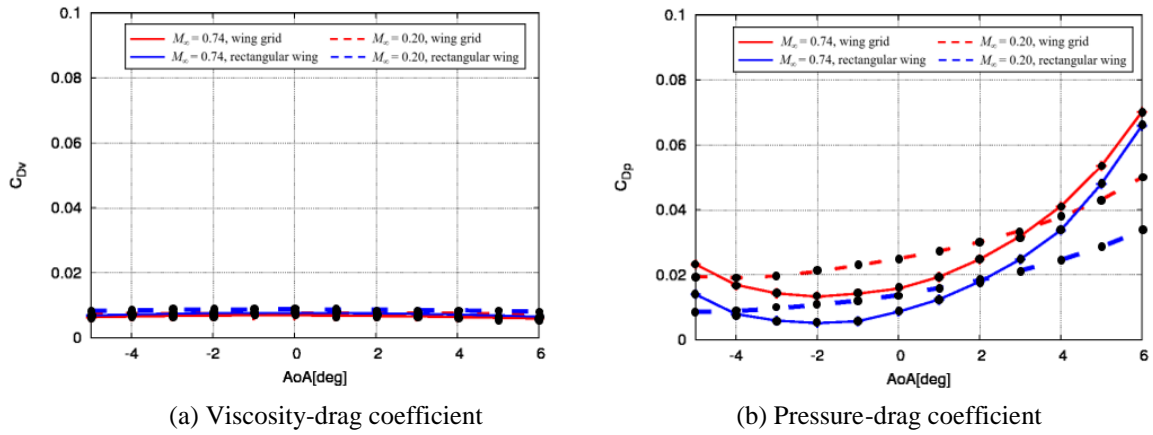


Fig. 14 Drag decomposition between viscous-drag and pressure-drag coefficients

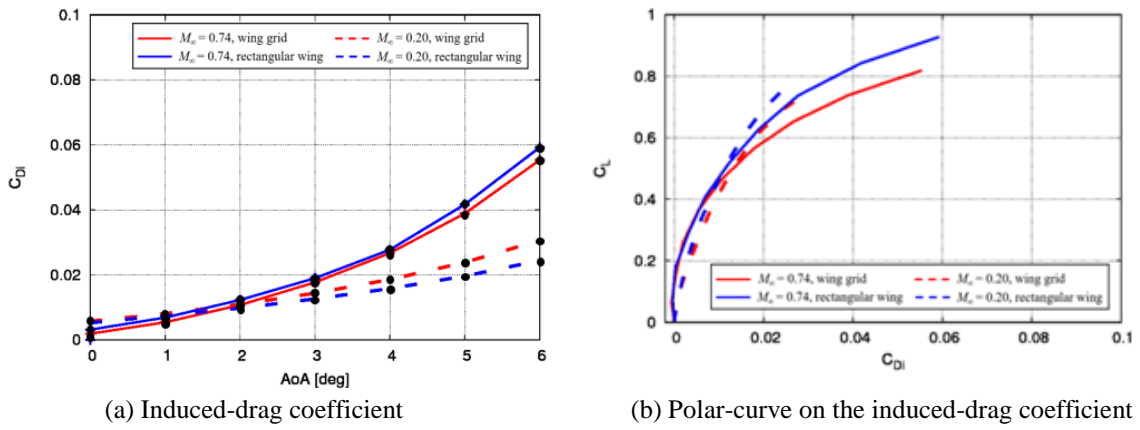


Fig. 15 Drag decomposition of induced-drag coefficient

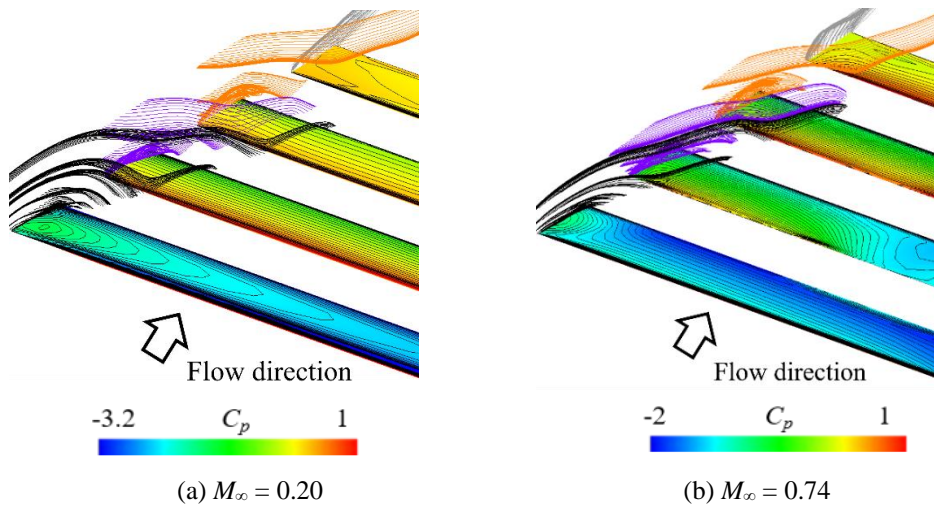


Fig. 16 Surface pressure coefficient at an AoA of 6° with different colored streamlines near the trailing edge

4. Conclusions

In this study, to acquire design guidelines for future aerodynamic wingtip with wing grid, numerical computations of a planar wing with wing grid and rectangular wing at M_∞ of 0.20 and 0.74 were conducted. The CRM.65.airfoil is employed as these wings, and the aerodynamic coefficients of the wing grid and rectangular wing were compared to see the difference in aerodynamic characteristics generated by wingtip with and without a wing grid. The pressure coefficients on the upper surface and near wingtip regions were investigated. Drag decompositions were conducted to assess the viscous-drag, pressure-drag, and induced-drag coefficients (C_{Dv} , C_{Dp} , and C_{Di}).

The results for the aerodynamic coefficients indicated that the lift slope of the wing grid at M_∞ of 0.20 and the lift coefficient (C_L) at high all angles of attack (AoA) for the wing grid was higher than those for the rectangular wing. However, these characteristics were reversed for the wing grid at M_∞ of 0.74. Thus, the wing grid showed low wing loading under aircraft takeoff conditions, whereas the wing loading of the wing grid at aircraft cruising conditions is getting worse than that of the rectangular wing. The drag coefficients (C_D) at M_∞ of 0.20 for the wing grid were higher at all AoA values than those of the rectangular wing, and the C_D difference between the wing grid and the rectangular wing is small at an M_∞ of 0.74 and the difference between them is closing when the AoA is higher. Thus, the planar wing with wing grid exhibited disadvantages for the entire aircraft flight conditions (i.e., takeoff, cruising, and landing) due to higher drag. The lift-to-drag ratios for the wing grid at M_∞ of 0.20 and 0.74 were lower than those of the rectangular wing at all AoA values because of the higher drag of the planar wing with the wing grid at these conditions.

The pressure coefficients (C_p) on the upper surface of the wings at M_∞ of 0.20 and 0.74 for AoA values of 0° and 6° were also compared. For the wing grid, a low C_p region at an AoA of 0° was observed near the trailing-edge region of the first wingtip but absent for the rectangular wing. This was because the suction-loops were missing for the wing grid in each region, with only drag-loops resents. Contrarily, at AoA of 6° , low C_p regions were observed for the wing grid near the entire region of the first wingtip and trailing-edge region of the second and observed only near the leading-edge region for the rectangular wing. In addition, the flow accelerations at the first and second wingtips of the wing grid are also observed even at the trailing edge.

Drag decompositions into viscous-/pressure-drag coefficients (C_{Dv} and C_{Dp}) and profile-/induced-drag coefficients (C_d and C_{Di}) were also conducted. The results revealed the C_{Dp} influences on the wings at M_∞ of 0.20 and 0.74 dominated those of the C_{Dv} . Also, the C_{Di} differences at low AoA between the wing grid and rectangular wing at M_∞ of 0.20 and 0.74 were low. On the other hand, owing to the relations of the C_L distribution between these wings, the C_{Di} at M_∞ of 0.20 of the wing grid becomes higher than that of the rectangular wing and the C_{Di} at M_∞ of 0.74 of the wing grid becomes lower than that of the rectangular wing. The planar wing with wing grid generates the extra C_{Di} when the designed C_L is set. This is because the wingtip vortices of the wing grid occur, and the C_p on the first wingtip becomes especially smaller. Therefore, there is no advantage in low speed (takeoff and landing) or high speed (cruising) with a wing grid when no proper dihedral angle or twist one is set.

Acknowledgments

This work was partially conducted under a Collaborative Research Project of the Institute of Fluid Science, Tohoku University.

References

- 1) Anderson, J. D. Jr., Fundamentals of Aerodynamics, Fifth Edition, (2011), pp.464–465, McGraw-Hill.
- 2) Raymer, D. P., Aircraft Design: A Conceptual Approach, Eighth Edition, (2012), p.93–95, AIAA Education Series.
- 3) La Roche, U. and Palffy, S., WIGN-GRID: Novel Devices for Reduction of Induced Drag on Wings, Proceedings of International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS–1996) (1996), Paper No. ICAS-96-2.10(R), pp.2303–2309.
- 4) La Roche, U. and La Roche, H. L., Induced Drag Reduction using Multiple Winglets, looking beyond the Prandtl-Munk Linear Model, (2004), The American Institute of Aeronautics and Astronautics, Paper No. AIAA-2004-2120.
- 5) Shima, E., and Jounouchi, T., Role of CFD in Aeronautical Engineering (No.14)-AUSM Type Upwind Schemes, Proceeding of the 14th NAL Symposium on Aircraft Computational Aerodynamics, (1997), pp.7–12.
- 6) Van Leer, B., Towards the Ultimate Conservative Difference Scheme, IV. A New Approach to Numerical Convection, Journal of Computational Physics, Vol. 23, (1997), pp.276–299.
- 7) Nishida, H., and Nonomura, T., ADI-SGS Scheme on Ideal Magnetohydrodynamics, Journal of Computational Physics, Vol.228, (2009), pp.3182-3188.
- 8) Spalart, P. R. and Allmaras, S. R., A One-Equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows, (1992), The American Institute of Aeronautics and Astronautics, Paper No. AIAA-92-0439.
- 9) Koike, S., Ito, T., Kusunose, K., Nakajima, T., Sato, M., Kanda, H., Murayama, M., Nakakita, K., and Yamamoto, K., Effect of Vortex Generators on Two-Dimensional Wings in Transonic Flows, JAXA Research and Development Report, JAXA-RR-14-002, (2014), pp. 83–87 (in Japanese).
- 10) CRM.65.airfoil sections, NASA Common Research Model (online), available from <https://commonresearchmodel.larc.nasa.gov/crm-65-airfoil-sections/>, (accessed on 22 January 2022).
- 11) NPARC Alliance Validation Archive: ONRA M6 wing (online), available from <https://www.grc.nasa.gov/WWW/wind/valid/m6wing/m6wing.htm> |>, (accessed on 22 January 2022).
- 12) Hummel, D., The Aerodynamic Characteristics of Slotted Wing-tips in Soaring Birds, Proceedings of the International Ornithological Congress (1980), pp. 391–396.
- 13) Fujii, K., Simple Ideas for the Accuracy and Efficiency Improvement of the Compressible Flow Simulation Methods, Proceedings of the International CFD Workshop on Supersonic Transport Design, (1998b), pp.21–23.
- 14) Anderson, J. D. Jr., Introduction to Flight, McGraw-Hill International Edition, Eighth Edition, (2016), pp.322–326.
- 15) Kamiya, N., On the Drag Divergence of Two-Dimensional Airfoils at Transonic Speeds, Technical Report of National Aerospace Laboratory, NAL TR-299, (1973), pp.1–116 (in Japanese).
- 16) Anderson, J. D. Jr., Fundamentals of Aerodynamics, Fifth Edition, (2011b), pp.514–516, McGraw-Hill.

国史『球陽』が示唆する 18 世紀後半の琉球海溝巨大地震

木村和雄

総合科学科

要旨

地震学的には不明な点が多い琉球弧中央部について、琉球国史『球陽』の読解からその地殻変動像の復元を試みた。その結果、対象地域では 18 世紀後半に巨大地震が続発していたことが示唆された。1768 年の地震では、地盤の強固な首里で建造物や陵墓などが損壊し、時の尚穆王が王殿からの退避を余儀なくされたほか、慶良間諸島の座間味島では津波による家屋流失の後、旧阿佐村が移転を強いられるなど、大きな被害を生じた。いわゆる八重山津波として知られる 1771 年の震災では、沖縄島、慶良間諸島、久米島で先島より強い地震動が表現されており、那覇にも強度 1 程度の津波が到達していた。また西表島では余震または誘発された地震による液状化が起きている。1791 年には津波地震と思われる、地震動の記述を欠いた大規模な潮位変化が沖縄島内各地で記録された。特に中城湾に面した与那原では津波の高さが 10m を超えたとされる。これらの地震・津波は、その現象の強さと空間的広がりから、プレート境界を震源とする M8 級かそれ以上の巨大地震によって引き起こされた可能性が高い。また、それらの地異が集中した期間の前後約 100 年間には、匹敵する地震・近地津波の記述が無いことから、琉球海溝では巨大地震が続発する数十年の活動期と百年スケールの静穏期とが繰り返されていると考えられる。

キーワード：沖縄、古地震学、津波、活動期、静穏期

1 はじめに

琉球弧は、日本列島を構成する主要な島弧-海溝系であり、プレート境界型地震やそれに伴う津波の発生が予想される地域である。しかし明治以降の地震観測では、震源の浅い巨大地震や規模の大きな近地津波は発生していないと見なされ、政府の海溝型地震評価の対象にはなっていない。さらに、琉球海溝はプレート間のカップリングが弱いいため巨大地震は起きない (Scholz and Campos, 2012) という仮説さえある。高良ほか (2008) は、歴史文献から沖縄の災害史の復元を試みるなかで、『球陽』に記載された地震・津波に言及しているが、データベース構築が主目的であったためか、個々の現象はあまり吟味していない。

一方、琉球史に未曾有の被害をもたらした 1771 年の八重山津波 (明和の大津波) は、従来、巨大ではない M7.4 程度の大地震によって引き起こされたとされてきた (気象庁、理科年表など)。しかし津波規模の逆解析からは M8 を大きく上回る巨大地震が発生していた可能性が指摘されている (中村 2014 など)。また琉球海溝南部の物性探査からは、海溝軸付近は軟弱な物資で構成されているためカップリングが弱いのは確かだが、それゆえに津波地震 (地震動の割に大きな津波を起こす地震) が生じ易い

ことも指摘されている (Arai *et al.*, 2016)。そして木村 (2011, 2017) などは、沖縄島の太平洋側には地震成の可能性が高い巨大地すべりが多数分布すること、16-19 世紀頃の放射年代値を示す海棲生物の遺骸が、河川を遡上して堆積した事例などを報告している。

こうした断片的な、歴史時代における巨大地震・津波発生を示唆する情報や条件を検証する意味で、本稿では、琉球王国正史『球陽』を通読し、記録された地異の情報を関連記事とともに地理的に整理することによって、特に沖縄島を中心とした中琉球における地震・津波被災履歴と地殻変動像の復元を試みた。その結果、琉球弧では 18 世紀後半に巨大地震が連続していたことが明らかになった。

2 『球陽』における地異の記載とその背景

『球陽』は、尚敬王の命により王国の官吏であった鄭秉哲らが西暦 1743-1745 年に編纂した、琉球王国の正史である。その首巻は太古の神話的叙述から始まり、正二巻 15 世紀からの多分に脚色されているであろう琉球統一や政変等の記述を経て、編纂の 100 年ほど前に当たる正六巻 17 世紀半ば頃から具体的な内容が増えていく。『球陽』の後半部、正十四巻の西暦 1746 年以降の記事は適宜追記されたものとされるが、その編纂方針や執筆者は定かでない。このうち地震、斜面変動による地盤災害や津波などの地異が、時と場を明瞭に指示して記されるのは西暦 1660 年代以降、王国終焉の 1870 年代までである (表)。地震・近地津波およびそれらに関連する記事の過半は、西暦 1760 年から 1791 年の間に集中する。

表 『球陽』に記載された地異とその関連事項 Table: Convulsion of nature described in “*Kyū-yō*”

巻(vol)	本文番号	琉球年月日	西暦(AD)	場所 location	現象 phenomena
6-1	352	尚質17年	1664年	硫黄鳥島 Iwo-torishima	地震、噴火、津波 volcanic eruption
6-1	355	尚質18年3月	1665年	?	地震 earthquake
6-2	409	尚質20年	1667年	宮古島 Miyako	地震 earthquake
8-1	542	尚貞19年	1687年	与那城郡 Yonashiro	異常潮位、遠地津波 apogean tsunami from Peru
8-2	606	尚貞28年5月2日	1696年	宮古島 Miyako	地震 earthquake
15-1	1201	尚穆9年3月29日	1760年	首里 Shuri	地震 earthquake
15-1	1201	尚穆9年4月15日	1760年	首里 Shuri	地震 earthquake
15-2	1248	尚穆17年6月9日	1768年	首里 Shuri	地震、津波(1.2m) earthquake & tsunami
15-2	1248	同上	1768年	慶良間諸島 Kerama	津波(遡上高5m以上?) tsunami
15-2	1249	尚穆17年6月26日	1768年	首里 Shuri	王が正殿に戻る King cancelled evacuation
15-2	1250	尚穆17年6月29日	1768年	慶良間諸島 Kerama	阿佐村へ移転命令 village relocation
16-1	1286	尚穆20年3月10日	1771年	沖縄島・慶良間諸島 C. Ryukyus	地震、津波(1~2m) earthquake & tsunami
16-1	1286	同上	1771年	八重山・宮古島 S. Ryukyus	津波(10m, 7m, 39m) tsunami
16-1	1287	尚穆20年4月	1771年	八重山 Yaeyama	赤蠅大発生 fly explosion
16-1	1288	尚穆20年7月-8月	1771年	西表島 Iriomote	地震 earthquake、液状化 liquefaction
16-1	1293	尚穆21年1月	1772年	沖縄島 Okinawa	疫病 epidemic
16-1	1297	尚穆21年9月	1772年	首里 Shuri	首里の傭人不足、一般民を大量採用 severe labor shortage
16-2	1333	尚穆27年11月	1778年	全土沿岸 all over Ryukyus	軽石漂着 pumice drift
17	1399	尚穆40年4月11日	1791年	那覇、本部 Naha, Motobu	津波(1.5m) tsunami
17	1399	同上	1791年	与那原 Yonabaru	津波(11m) tsunami
20-3	1632	尚瀨20年5月-6月	1824年	津波古 Tsuhako	崩落、土石流 (270×1000m) debris flow
21-2	1804	尚育8年3月	1842年	宮古島 Miyako	地震 earthquake
22-3	2036	尚泰11年7月	1858年	浜比嘉島 Hamahiga	崩落、岩盤すべり rock slide
22-3	2038	尚泰11年8月-12月	1858年	首里? Shuri?	地震 earthquake
22-7	2210	尚泰21年6月27日	1868年	那覇 Naha	異常潮位、遠地津波 apogean tsunami from Chile
22-8	2253	尚泰25年9月8日	1869年	国頭村浜 Kunigami	崩落、落石 rock fall
22-8	2264	尚泰26年	1870年	宮古島 Miyako	異常潮位、地下水異常 tide & ground water annormally
22-8	2265	尚泰26年	1870年	宮古島 Miyako	木像漂着 wooden statue drift

ここで『球陽』における地異の記述の特徴とその背景を、予めとりまとめておく。まず大地震や津波による被害が記録された箇所・範囲についてであるが、1771 年春の南琉球 (先島) を例外として、首里と泊ないしは那覇港および国内の特定の 1、2 地点のみで、面的な被災状況は不明である。また地名がない記事もあり、文脈から首里または泊/那覇港と判断できるものは吟味の対象とした。人的被害

についても、やはり 1771 年春の八重山津波を例外として、記載されていない。地盤災害の記録があるのは、首里および 1771 年夏の西表島のみである。ちなみに首里は、琉球層群の分厚い石灰岩からなる台地であり、地すべりのリスクがある外縁の斜面を除けば、極めて地盤の強固な地域である。沖縄島における一般的地盤である、国頭層群や島尻層群から成る丘陵・台地や、低地における被災状況はまったく記載されていない。同様に津波に関しても、記述は断片的であり、その強度と分布を系統的に把握することはできない。18 世紀における琉球王国の総人口は約 17~20 万人とされ（比嘉 2021）、現在のほぼ 1/8 であった。したがって地震・津波災害によって深刻な被害を受け得る人々は、現在よりはるかに少なかったことに留意する必要がある。時代は下るが、20 世紀初頭に発行された旧版地形図を見ると、中城湾に面した低地集落は、島状の微高地にあった泡瀬と既に臨海低地上にあった与那原を例外として、基本的に台地外縁の山麓緩斜面に立地しており（木村 2018）、強度 2 程度までの津波や液状化などで被害を受ける位置にほとんど住家は無かった。ただし、上記のように記録対象や内容がきわめて限定的であるだけでなく、民間伝承と地形から明らかな土砂災害が『球陽』には掲載されていない事例もあり（例えば、木村 2021）、記述が無いことが無事を意味するとは限らないことにも留意する必要がある。

なお現存する『球陽』写本の画像は筑波大学が「諸本集成収録ファイル」として、記事の読み下し文は「球陽全文検索」として、それぞれ公開されている。以後、引用する場合は収録巻に後者の記事番号を付記する。また潮位変化の記述を津波強度として解釈する際は首藤ほか（2007）を参照した。

3 中琉球を襲った顕著な地震と津波

3.1 西暦 1771 年春のいわゆる「八重山」津波について

琉球王国を襲った最も大きく、最もよく知られた自然災害は、1771 年春（琉球暦：尚穆 20 年 3 月 10 日）の「八重山」津波である。石垣島では 8 千人以上、宮古島でも 2 千人を大きく上回る犠牲者を出したこの巨大津波については、『球陽』でも先島の惨状が例外的な文量をもって被災集落を列挙しつつ詳述され、その実態はサンゴ礁地域研究グループ（1990）などによって検証されている。その記事の冒頭には、同日同刻に久米島・慶良間諸島を含む「国中が大いに震え」、泊/那覇港では「似満潮」な潮位変化が短時間で反復したとある（巻 16-1、No. 1286）。従来この地異については、甚大な被害を生じた南琉球ばかりが注目されてきたが、中琉球でも広域的な大地震として特筆され、強度 1 程度の津波が到達していたのである。

地震動と津波に関して地理的に整理すると、中琉球では「大地震のあと異常潮位」、宮古島では「地震のあと 3 波の大津波」、石垣島では地震と潮位に関する記述は無く、津波被災状況だけが連続と綴られている。この記述から、地震動自体は南琉球よりも中琉球のほうが大きかったことが窺え、その震央は先島付近ではなく、むしろ沖縄島に近かった可能性が示唆される。地震の揺れの強さは、かつて震度 4 相当が中震、震度 5 相当なら強震と表現されていた。この「大地震」を震度 5 弱程度以上とすれば、強震域が東西 200km 近くかそれ以上におよぶことと、引き続いた津波の規模から、M7 級の地震では説明し難い。一方、津波による被害は石垣島や宮古島では甚大であるものの、その西方の

西表島や与那国島では被害記録が無い。これは、津波の波源が従来説のような石垣島南方ではなく同東方～東南方で、琉球弧西端の島々から見れば石垣島～石西礁湖がバリアとなった可能性を示唆する。それらの事象と Arai *et . al* (2016) による「南琉球の海溝直近は固結が弱くゆっくり地震 (slow slip) が生じ易い」という指摘から、図1のような簡易的な震源・波源像を推定した。

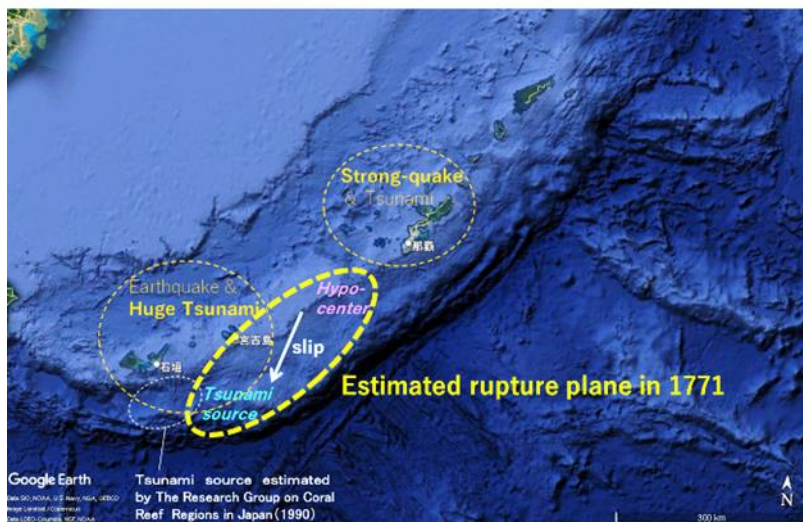


図1 1771年地震の震源と津波の波源のイメージ(基図はGoogleEarth)
Fig.1 Estimated rupture plane of 1771 earthquake. The earthquake is well-known as a cause of catastrophic tsunami disaster in South Ryukyus. According to “*Kyu-yo*”, seismic intensity in Central Ryukyus was greater than that in South Ryukyus.

すなわち1771年春の地震は、沖縄島南西沖のプレート境界を震源とする巨大地震で、震央周辺に強震動をもたらした。地震性のすべりは、海溝軸に近づくにしたがってプレート境界の物性相応に変位速度が低下し、いわゆる「ゆっくり地震」的になった。このことが南琉球で地震動が顕著でなかった要因であろう。しかし速度は遅くとも、変位自体は宮古島南方の海溝軸まで達し、付近の物質的軟弱さも相俟って大きく海底を変形させた結果、巨大津波が発生したと考えた(図1)。

さらに1771年の夏から秋にかけて(琉球暦：尚穆20年7月～8月)、余震または誘発されたと思われる複数回の地震によって、西表島の仲間川河口周辺で液状化が生じたことを示す記録もある(巻16-1, No. 1287)。このような地震・津波の空間的広がりや、余震ないしは誘発地震でも地盤災害が発生していることから見て、1771年の本震はM8を大きく上回る巨大地震であり、「八重山」という限定的範囲ではなく「琉球地震津波」あるいは「琉球大震災」とでも呼ぶべき事象が起きていたと解せる。

3.2 首里と慶良間諸島に打撃を与えた1768年の大地震と大津波

その他の記事については、他の地異同様、特定地点における限られた簡素な表現に留まり、現象や被害の面的な広がりには記録されていない。しかしながら個々の事象は注目に値する。まず西暦1760年(琉球暦：尚穆9年3月29日)には、首里城で石柱が多数倒壊した大地震が、その後に生じた余震(同年4月16日)とともに記録されている(巻15-1, No. 1201)。

西暦1768年(琉球暦：尚穆17年6月9日)の地震ではさらに大きな被害が生じ、石柱だけでなく首里城内外の建物や陵墓などが損壊した(巻15-2, No. 1248)。このためか、尚穆王は一時的に王殿から退き、6月26日に復したことが記されている(巻15-2, No. 1249)。つまりこの17日間は王府としての機能が停止していた可能性がある。地盤災害に関する記述は、この1768年に関わる項が『球陽』では最も分量が多く、17世紀以降の中琉球において最大の地震であったと見なせる。現在復元されて

いる首里城の縄張は、1768年の大修理に際して作成された図面に基づくとされており（首里城公園HP）、この改修工事が震災復興のためであったことは想像に難くない。地盤の強固な首里において顕著な物的損害が出ていることから、この地震では中琉球の狭からぬ範囲で震度6弱以上のゆれに見舞われたと考えられるが、先述の通り、首里以外の被災状況は不明である。

この地震の直後、泊/那覇港では1m前後（三四尺）の潮位変化が反復しており、強度1程度の津波が到達していたとみられる。また慶良間諸島の座間味島では、南に開いた内湾に面する座間味、阿佐の両村が津波によって浸水し、9戸が失われている（巻15-2, No. 1248）。明記された被害件数が少ないためか、この津波はあまり注目されていないが、座間味島で居住可能なのは小規模な浜に面した狭隘な低地に限られ、『球陽』の記録が網羅的ではないことなども考慮すれば、被災率が低かったとは言いきれない。むしろ被害が壊滅的であったことを示す傍証として、5戸が失われた旧阿佐村は被災から3週間後に王府より移転命令を受けた（巻15-2, No. 1250）ことを挙げておく。集落は海拔3~4mのバームより内陸側に立地していたはずであるが、住居が倒壊・流亡していることから浸水深は2m以上、遡上高は5mを超えていたと推定され、津波強度は3以上に達していた可能性が高い。

これらの現象や被害は中琉球を震源とするM7級の大地震では発生し難い。ちなみに気象庁（2010）によれば、2010年に那覇の東南東約100kmで生じたMj7.2の地震では、沖縄島の大部分は震度4、震源に近い糸満で震度5弱に達した程度であった。また断層変位が横ずれ主成分だったこともあり、中城湾で記録された潮位変動は+0.1mで、津波強度としては-1以下に留まっている。

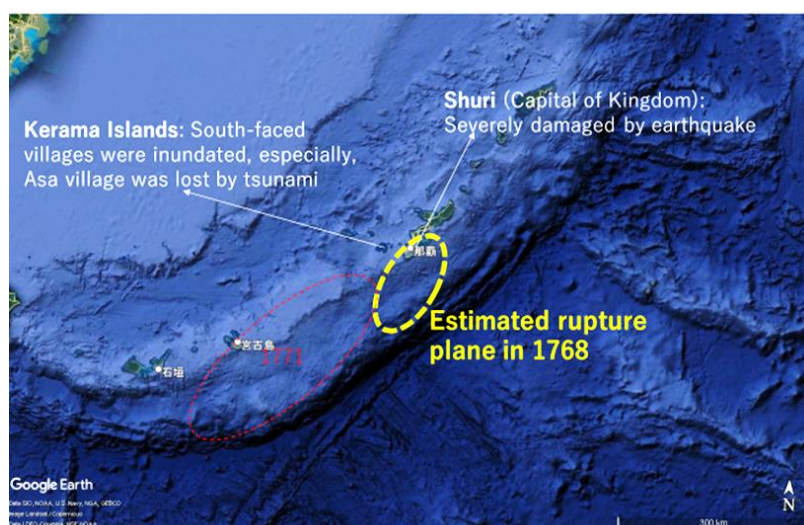


図2 1768年地震の震源イメージ
(基図は GoogleEarth)

Fig. 2 Estimated rupture plane of 1768 earthquake. This earthquake gave the strongest ground motion to Central Ryukyus since 17th century. Major disaster in Kerama indicates that tsunami source was located south of the islands.

1768年の地震は、大きな地盤災害、津波被害とも中琉球の記録であることから、琉球弧中央部を震源とする典型的なプレート境界型の巨大地震であったと推定した。特に、津波による被害が座間味島の南に開いた内湾奥において極めて顕著なことから、津波の波源域は慶良間諸島南方の琉球海溝軸付近と考えられる（図2）。

3.3 与那原に押し寄せた1791年の大津波

西暦1791年（琉球暦：尚穆40年4月11日）には、おそらく津波地震と思われる、地震の記述を欠いた大規模な異常潮位が記録されている。本部郡の渡久地港では、宿駅周辺の堤が損壊し村落内まで

浸水したほか、那覇港に係留されていた馬艦船2隻、山原船1隻が舳いを切られて国場川を遡上し奥武山へ漂着するなど(巻17, No. 1399)、沖縄島西岸では津波強度1~2程度を示す記述がある。また『球陽』における沖縄島東岸の異常潮位記録として貴重な与那原港では、10.8m(三丈六尺)もの水位上昇があったとされ(巻17, No. 1399)、この値が正しければ津波強度は4に達していたことになる。それらもまたM7程度の地震による海底の変位では生じ難い現象である。

しかしこの地異に関しても、従来、あまり言及されてこなかった。それは最高潮位が記された与那原において「人家船隻恙無(≒家も船も無事)」とあるように(巻17, No. 1399)、現象と被害の記述が符合せず、記事の信憑性が疑われていたためと考えられる。これに関して松浦(2020)は、津波規模の割に被害が及ばなかったのは、与那原の集落が当時は現在よりも高所にあったためと推定している。この報告は、潮位の値を1771年春の宮古島におけるそれと取り違え、「大里郡」与那原を「大黒郡」と誤読するなど難は多いものの、推論の主旨は概ね妥当であろう。そのひとつの傍証として「運玉森東麓の山麓緩斜面上あった与那の島(≒古島)が、近世の土石流災害を契機に、現在の与那原中心市街地(新島)付近へ移転復興した」という木村(2021)の説を挙げておく。また「恙無(つつがなし)」という表現についてであるが、字義通りに何事も無ければ、国史に記録が残るはずもない。

『球陽』の他の記事では、例えば、落雷で家屋が焼失しても住民が避難して無事だった場合には「家人恙無」と表現している(巻16-1, No. 1322など複数の類例有り)。つまり地異の記述における「恙無」は、「大きな厄災・異変にも関わらず、幸いにして人的あるいは物的損失は免れた」とでも意識すべきであろう。そして1791年の異常潮位の記事は、疑念を払拭するかのよう「非常之事也」という文言で締められており(巻17, No. 1399)、正確な波高はともかく、大津波の到達は事実とみなせる。

1791年の津波について、松浦(2020)は1768年の津波とも1960年チリ地震津波とも異質であるとして、南米沖以外を波源とする遠地津波であった可能性を指摘している。しかし現在のところ該当する地震、火山活動や副振動等は知られていない。いうまでもなく津波は伝播する過程で流体力を減ずる。観測史上最大のMw9.5を記録し、遠地津波としても過去最大級の影響を及ぼした1960年チリ地震津波でも、ハワイでは最大波高10mを超えていたが、日本での遡上高は最大6m程度であった(中央防災会議2010)。もし沖縄島東岸へ10mを超える遠地津波が到達したとすれば、北西太平洋のどこかで1960年チリ地震に匹敵するかそれ以上の海底変位が生じていたことになる。そうであれば、波源の近くには津波石のような明瞭な痕跡が、太平洋沿岸各地には記録や伝承が、それぞれ数多く残っているようなものである。他方、一連の島弧-海溝系であっても異質な地震津波は生じ、一度の津波でもその振る舞いは伝播経路上や到達した場の条件によって様々である。例えば日本海溝付近においては、2011年の典型的なプレート境界型、1933年のアウターライズ型(風神ほか2003)などがあり、1896年明治三陸地震津波は、プレート境界の軟弱な物性に起因するゆっくり地震によって生じている(金森1991)。ちなみに1896年の事例は、被災地における地震動が微弱でしかも振動周期が長かったため、多くの住民はあまり地震を認識できず津波への対応が遅れたことにより、犠牲者が2万人を超える巨大災害になったと考えられている(中央防災会議2005)。

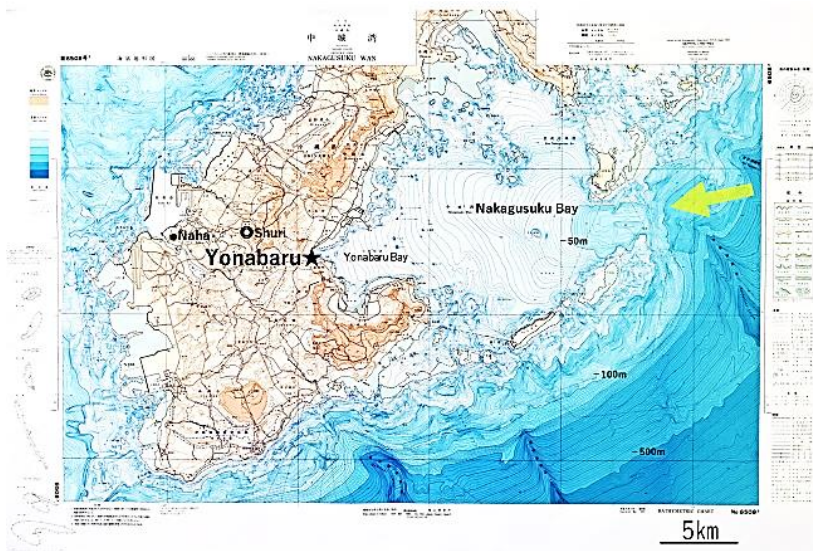


図3 与那原周辺の地形場（基図は海上保安庁(1985)）津波が東北東から中城湾に入射した場合（矢印）、あまり流体力を減じることなく与那原へ到達することになる
 Fig. 3 Geomorphic setting around Yonabaru. In the case tsunami arrive as “yellow arrow”, fluid force concentrates to Yonabaru.

翻って1791年の津波においては、与那原における潮位変化が限られた記録の中でも突出して大きいことと周囲の地形場から見て、その波源は松浦（2020）の見解とは逆に、与那原の東北東近海であったことを指摘したい。地形場について述べると、まず中城湾の海岸線に沿っては、エプロン礁や地すべり移動体と見られる岩礁が分布し、津波の流体力を減衰・分散させそうな海底地形が発達している（図3）。ところが、かつてマリンタウン埋立地造成前に中城湾に面していた与那原沿岸は、それら岩礁が途切れ、海底はENE-WSW軸の凹地になっていた。図3ではこの部分を与那原湾と表記している。また中城湾と太平洋との間には、津堅島周辺～久高島周辺など規模の大きな裾礁が連なっていて、天然の防潮堤として機能し得る。しかしこれも与那原東方沖の南北2kmほどの海域だけは裾礁が途切れており、ボトルネック状の開口部になっている。中城湾の海底は概ね遠浅ではあるが、この湾口部は先完新世の河谷跡のように見え、V字型に鋭く落ち込み水深60m以上に達する。つまり与那原付近は、東ないしは東北東から津波が入射した場合において、流体力が減じにくく相対的にエネルギーが集中してしまう地形場なのである（図3）。このことから、1791年には沖縄島東方の海溝寄りのプレート境界で1896年明治三陸地震に似たゆっくり地震が発生し、その変位が与那原沖で海溝軸に達したため、『球陽』に記述された特徴的な津波が発生したと考えた（図4）。

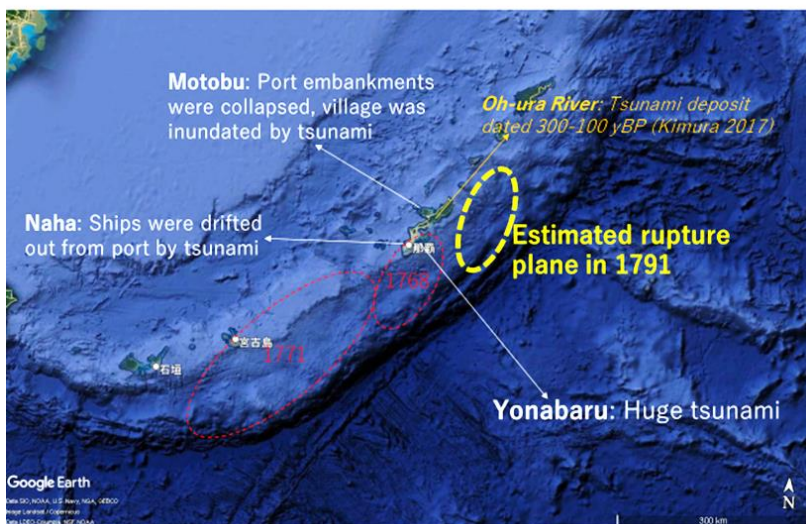


図4 1791年津波地震の震源イメージ（基図はGoogleEarth）
 Fig. 4 Estimated rupture plane of 1791 “silent” earthquake. This earthquake is characterized by little ground motion and huge tsunami. These features suggest that the earthquake occurred close to trench axis, similar to the 1896 Meiji Sanriku earthquake.

なお、沖縄島北部太平洋側に位置し、南東へV字型に開いた大浦湾の奥において、16～19世紀のC-14年代値を示す海棲生物の遺骸が、大浦川を遡上して現成のマングローブ泥炭層の下に堆積していることが報告されている(木村2017)。その期間には複数の津波が沖縄島に到達しており、異常堆積物の起源を正確に同定することは困難だが、1791年の津波が上述の通り与那原沖の琉球海溝を波源としていたならば、大浦湾の位置と向きから見て、その最有力候補になる。

4 18世紀後半における地異の集中が意味するもの

このように『球陽』の記録からは、中琉球を中心とする琉球弧で西暦1768年、1771年、1791年と、わずか20年あまりの間に、プレート境界が震源とみられるM8級かそれ以上の規模の巨大地震と顕著な近地津波が集中して発生したことが示唆される。またそれらに先立つ1760年にも、地盤の強固な首里に被害を与えた大地震が起きている。一方、その前後それぞれ約100年間にも地震の記録はあるが、中琉球・首里で大地震と明示されているのは1760年、1768年、1771年の3件である。西暦1665年には発生日時や場所が不明の大地震の記事があり(巻6-1, No. 355)、その前後に硫黄島島の火山活動(巻6-1, No. 352)と宮古島での被害地震(巻6-2, No. 401)が記録されているが、記述は極めて簡素で地震の規模や相互の関係性は推定し難い。また近代的地震観測開始後の1901、1911年には奄美大島付近において大～巨大地震が発生しているが(世界の被害地震の表)、観測された規模(M7.5、M8.0)に対する地震動は弱く津波も限定的で、震源の位置や発震機構について見解は分かれるものの、沖縄島以南への影響はほぼ無かった。津波に関して、西暦1664年の被害津波は硫黄島島の火山活動によるもの、1687年の異常潮位はペルー沖地震による遠地津波、1868年の異常潮位はチリ沖地震による遠地津波とそれぞれ符合し(世界の被害地震の年表)、琉球海溝が波源ではない。なお巨大地震が続発していた1778年には王国全土の海岸で軽石の漂着が報告されているが(巻16-2, No. 1333)、その給源や琉球弧の地震活動との関係は不明である。

琉球海溝の北東側に連なる南海トラフでは、よく知られているように、100～200年程度の周期で巨大地震が発生/連動する時期と静穏な時期とが繰り返されてきた。またこれと呼応するように、西南日本弧では、内陸活断層による被害地震が多発する数十年と、かつて「関西は地震が起きない」という迷信を生んだような静穏な数十年とが交互する(尾池1995)。琉球海溝も、南海トラフと同じくユーラシアプレートとフィリピン海プレートの境界であり、巨大地震の発生パターンに共通性があるのは蓋然的と言える。したがって『球陽』の地異の記録は、18世紀後半の琉球弧中央部が、プレート境界にたまった歪みを解放する、活動期であったことを示す証左となる。ただし中琉球では、海溝型と思われる巨大地震が短期間に3回以上も発生しており、その後は200年以上に渡って空白域となるなど、明らかに西南日本とは異質な部分もある。これに関しては稿を改めて論じたい。

ところで、これらの地異はすべて琉球王国における尚穆王の治世(1752-94)に生じている。歴史的にはあまり触れられていないが、後の琉球処分へとつながることになる、王国が薩摩藩への債務依存体質に陥った背景として、これら一連の地震災害が影響してはいないだろうか?先に述べたように、首里城の大改修は西暦1768年の地震による被害からの復旧を目的としていた可能性が高く、『球陽』

には明記されていないものの、大きな財政出動があったはずである。記事として残された首里と座間味島だけが被災したとは考えにくく、人的損失があった可能性も否定しきれない。その3年後の1771年には津波の直接的被害によって1万人以上が犠牲になっただけでなく、震災との関係は不明だが沖縄島で疫病が流行り、翌年正月までに5000人近い犠牲者が出ている(巻16-1, No. 1293)。つまり1768年震災からの復興途上だったであろう半年あまりの間に、琉球王国は更なる厄災によって、明記されているだけでも総人口のほぼ一割を喪ったことになる。太平洋戦争中の沖縄戦には及ばないが、人口比ではそれに迫る損失を強いられたのである。労働力や人头税に代表される財政収入は激減したはずで、人材欠乏については、1772年にそれまで世襲であった首里城の傭人を市井から大量採用したことからも窺える(巻16-1, No. 1297)。そしてこの後、琉球を含む日本全土は「天明の大飢饉(1782-88)」に見舞われることになる。飢饉に際した食糧の融通等を通じて、琉球が奄美、薩摩へ接近し依存的関係性を深めたことは、既に高良ほか(2008)が指摘している。尚穆王の治世に相次いだ地震災害は、先代の尚敬王の治世(1713-51)で進められた薩摩藩との関係を基盤とした王国運営を緊急避難的に加速させ、その行財政をも揺るがしていた可能性がある。

5 おわりに

琉球王国正史『球陽』に記録された地震・津波を地理的に再検討した結果、次のようなことが推定できた。1) 18世紀後半の琉球弧では海溝型の巨大地震が続発していた。2) 1768年には沖縄島を中心とした中琉球を襲う史上最大の地震と大津波が発生し、顕著な被害をもたらしていた。3) 1771年の震災は、破局的な被害を被った南琉球だけでなく、中琉球でも津波を伴った広域的な大地震として記録されており、地震の震源および津波の波源は従来説よりもやや東側に想定し得る巨大地震によって引き起こされた。4) 1791年には、沖縄島東方を震源とするゆっくり地震により、大津波が発生していた。5) 沖縄島以南の中琉球では、その後200年以上に渡ってプレート境界を震源とする巨大地震は起きていない。6) 以上のことから、琉球海溝中央部では、数十年の間に巨大地震が続発する活動期(cluster)と百年スケールの静穏期(gap)が繰り返されてきた可能性がある。そうであれば、静穏期の長さや次の活動期が懸念されるが、『球陽』では17世紀半ばよりも古い記述が定かでないため、その検討は今後、別な手法に委ねられる。また、個々の地震・津波災害についても『球陽』の記載に基づく概略に止めたが、地形・地質調査の成果やその他の文献・伝承等の検討を加え、稿を改めて詳述していきたい。

資料・文献

「球陽」諸本集成 収録ファイル

<http://www.tulips.tsukuba.ac.jp/limedio/dlam/B95/B952220/1/vol07/kyuyo/index3.htm>

球陽全文検索 http://tutenze.pluto.ryucom.jp/public_html/index.html

気象庁・石垣島地方気象台 明和の大津波

<https://www.data.jma.go.jp/ishigaki/known/jishin/meiwa.html>

地震調査研究推進本部 <https://www.jishin.go.jp/>

首里城公園 <https://oki-park.jp/shurijo/about/186>

世界の被害地震の表 <https://iisee.kenken.go.jp/utsu/>

理科年表 <https://www.rikanenpyo.jp/>

Arai *et al.* (2016): Structure of the tsunamigenic plate boundary and low-frequency earthquakes in the southern Ryukyu Trench Nature Communications 7, 12255

Scholz & Campos (2012): The seismic coupling of subduction zones revisited JGR 117, B05310

尾池和夫(1995): 活動期に入った地震列島 岩波書店

風神朋枝ほか(2003): 日本海溝アウターライズで発生した1933年昭和三陸地震の震源過程 日本地球惑星科学連合2003年大会講演要旨 S052-003

海上保安庁(1985)1: 50,000 海底地形図「中城湾」

金森博雄編(1991): 地震の物理 岩波書店

気象庁(2010): 平成22年2月 地震・火山月報(防災編)

木村和雄(2011): 沖縄島南東部沿岸に発達する巨大な地すべり状の地形は何を意味するのか? 季刊地理学 63, p167-168

木村和雄(2017): 沖縄島北東部、大浦川河口付近における三角州の発達と異常堆積物 沖縄高専紀要 11, p25-35

木村和雄(2018): 沖縄島中部の伝統的集落立地における地形条件 季刊地理学 69, p140

木村和雄(2021): 沖縄島南部、運玉森付近の災害伝承と与那原の変遷 沖縄高専紀要 15, p1-8

サンゴ礁地域研究グループ(1990): 熱い自然—サンゴ礁の環境誌 古今書院 The Research Group on Coral Reef Regions in Japan (1990): Atsui shizen (Tropics in Japan: Natural history of coral islands)

首藤伸夫ほか(2007): 津波の事典 朝倉書店

高良倉吉ほか(2008): 沖縄の災害情報に関する歴史文献を主体とした総合的研究 平成17年度～平成19年度科学研究費補助金(基盤研究(B))研究成果報告書

中央防災会議 災害教訓の継承に関する専門調査会(2005): 1896年明治三陸地震津波

中央防災会議 災害教訓の継承に関する専門調査会(2010): 1960年チリ地震津波

中村衛(2014): 1771年八重山津波の断層モデルの再検討 日本地球惑星科学連合2014年大会講演要旨 SSS34-P27

比嘉吉志(2021): 近世琉球における人口推移の地域性 島嶼地域科学 2, p19-39

松浦律子(2020): 1791年沖縄本島での津波の原因について 歴史地震 35, p358

Late 18th century megaquake cluster along Ryukyu trench, based on decoding “*Kyu-yo*”, the national history archive of Ryukyu Kingdom.

KIMURA, Kazuo

Department of Liberal Arts

abstract

Behavior of Ryukyu trench, especially about mega-earthquake, is unknown based on seismic observation since late 19th century. On the other hand, slight geological evidence of large earthquakes and tsunami is reported in Okinawa Island. The author attempts to reinforce those evidence through bibliographic survey. “*Kyu-yo*” is the national history archive of Ryukyu Kingdom. Convulsions of nature from middle 17th century to late 19th century are described in the document. It indicates that there was megaquake cluster in late 18th century. In 1768, Shuri Castle was damaged by earthquake and King Sho Boku evacuated from his palace. After shock, tsunami hit Kerama Islands and Asa village was lost. The well-known and cruel “Yaeyama tsunami disaster” occurred in 1771. In this earthquake, seismic intensity in Okinawa, Kerama and Kume islands was greater than that in Yaeyama Islands. In 1791, Yonabaru port suffered huge tsunami caused by silent earthquake. Naha port and Motobu port were also at the mercy of the tsunami. Judging from intensity and distribution of phenomena, the three earthquakes occurred along Ryukyu trench, and were either Magnitude 8 or more. The archive tells that Ryukyu trench is an earthquake nest similar to Nankai trough. After the slow-slip in 1791, however, seismic gap continues in the area around Okinawa Island. It means that Ryukyu arc is accumulating distortion for the next megaquake cluster.

keywords: Okinawa, paleoseismology, tsunami, cluster, gap

外部の限定少数の人向けに「遠隔授業」を実施する方法の考察 ～ Blackboard Learn や Microsoft Teams に頼らない実施方法 ～

*松露真

沖縄工業高等専門学校 総合科学科

要旨

オンラインでの学校説明会やオンラインでのオープンキャンパスにおける「受験対策講座」を念頭に、学外の人(沖縄工業高等専門学校に所属していない人)向けに、より簡単でよりセキュアな遠隔授業を実施する方法について考察した。今回その結果として大きく分けて4種類の方法を挙げた。合わせて、4種類の方法の利点と欠点なども述べた。

キーワード：遠隔授業、オンラインでの教授、受験対策講座

1 はじめに

沖縄工業高等専門学校(以下、沖縄高専)の総合科学科数学教員の共著で、日本数学教育学会へ「沖縄高専における遠隔授業の実践」という論文を執筆し投稿した。この論文は沖縄高専の一般科目(数学)において行われた遠隔授業を、授業形式ごとに分類した上で各授業での利点欠点を考察したものである。この論文執筆の際、次を考えた。

沖縄高専所属の学生ならば Blackboard Learn や Microsoft Teams でこれらの授業が成り立つ。
しかしこのような環境なしで同様の授業を行う場合どのようにすればよいか。

沖縄高専の教員が Blackboard Learn(以下、Blackboard)や Microsoft Teams を利用できない人にオンラインで教える機会は、

- (1) 受験生向けの入試対策講座
- (2) 来日できていない留学生向けの教授
- (3) 社会人講座などの公開講座

が考えられる。特に(1)についてはそのタイミングでの教授が必須であり「後日のフォロー」ではうまくいかない。また(2)は来日後にフォロー可能とはいえ、他の学生と同時期に“授業”ができる方がよい。さらに(3)は COVID-19 等の関係から少なくともこの2年程度は開かれていないとはいえ、地域貢献等の観点等から考慮しておいた方がよい。以上より、特別な環境にない人へのオンラインでの教育を実施する方法について考察することは、今後の沖縄高専の発展にとって有益である。

2 要件

今回考えるオンラインでの教育が満たすべき条件を以下で設定した。

(ア) 相手に関する条件

- 沖縄高専の学生以外の人である。・・・Blackboard や Microsoft Teams は未設定である。
- インターネット環境がある。
- 電子メールでのやり取りのみできる。
- 動画ファイルの再生ができる。
- その他の ICT に関する技術は、沖縄高専本科 1 年生入学生レベルとする。

(イ) 実施に関する条件

- 教授時間：30 分
- 教授内容：高等専門学校の本専入試問題過去問(数学)・・・著作権の面で問題がない。
- 教授形式：任意(オンデマンド型でもリアルタイム型でもよい)

(ウ) その他の条件

- 参加規模：50 人・・・限定少数である。不特定多数ではない。
- 参加者は動画等の録音・録画・複製その他の禁止を了承済み(ノートを取るのは可)。
- 参加者以外はこの教授を受けることができない。

3 要件を満たす方法の例

3.1 分割してメールで送信

次の方法で要件は満たされる。

- ① オンデマンド型教授で動画を撮影する。
- ② その動画を、電子メールで送信可能なファイルサイズの複数(仮に n 本)の動画に分割する。
- ③ その複数の動画を参加者全員に電子メールで送信する。

この方法の利点と欠点は次のとおりである。

- 利点：
 - 参加者の ICT に関する技術レベルによらず実施できる。
- 欠点：
 - 多数(n 通)のメールを送信/受信することになり、手間である。
 - 最終的なファイル容量が膨大になる。(メールサーバへの負荷、メーラーの容量超過等で困る)
 - 動画ファイルの複製が容易である。

3.2 本校 web ページ等へのアップロード

次の方法で要件は満たされる。

- ① オンデマンド型教授で動画を撮影する。
- ② その動画を、web ブラウザでダウンロード可能なファイルサイズの複数の動画に分割する。(必要に応じ、それぞれの動画にパスワードをつける。)

- ③ 本校の web ページにこれらのファイルを配置する。
- ④ 配置場所の URL(及び必要に応じてパスワード)を参加者全員に電子メールで送信する。

なお、配置場所へのアクセスにパスワードを要求するよう設定するなどの工夫も可能である。この方法の利点と欠点は次のとおりである。

- 利点：
 - ▶ 後述する方法とは違い、アップロードは沖縄高専内部であるのでよりセキュアである。
 - ▶ 参加者の ICT に関する技術レベルによらず実施できる。
- 欠点：
 - ▶ 本校の web サーバに負荷がかかる。
 - ▶ 動画ファイルの複製が容易である。

この方法の応用として、ファイル共有サービスを利用する方法も考えられる。この場合、本校 web サーバの負荷は解消される。しかし参加者はファイル共有サービスに慣れていない可能性が高い。またアップロードが沖縄高専内部であるという利点(セキュリティ面の利点)を放棄することになる。加えて一般的ではない外部サーバに動画ファイルを配置するのは教員側に抵抗があると思われる。

3.3 動画共有サイトの利用(アップロード/ライブ配信)

次の方法で要件は満たされる。

(その1: オンデマンド型)

- ① オンデマンド型教授で動画を撮影する。
- ② その動画を、動画共有サイトへアップロードする。(必要に応じ、アクセス制限をつける。この際に参加者のアカウント情報が必要となる場合もある。)
- ③ アップロード先の URL(及び必要に応じてパスワード等)を参加者全員に電子メールで送信する。

(その2: リアルタイム型)

- ① ライブ配信を行う URL(及び必要に応じてパスワード等)を参加者全員に電子メールで送信する。
- ② 定刻にライブ配信を行う。

この場合に利用する動画共有サイトは、参加者がよく知っていて、かつ登録等なしに閲覧できるものが望ましい。この条件を満たすものは、執筆時点だと YouTube だと考える。なお、YouTube でこのような設定を行う場合、「非公開動画」と「限定公開動画」の2つの方法がある。両方とも、YouTube での検索結果にその動画が現れないようにする設定である。この2つの違いは、前者の場合、設定時に参加者の Google アカウントが必要であり、参加者は参加する際にこのアカウントでログインしなければならない。一方後者の場合、参加者に URL を知らせるだけでよい。

この方法の利点と欠点は次のとおりである。

- 利点：
 - ▶ 参加者のアクセスが容易である。
- 欠点：
 - ▶ 教員側がアカウント作成をしなければならない。

- アクセス制限が必要である。
- (YouTube の「非公開動画」などを利用した場合)参加者の個人情報が必要となる場合もある。よって自身の個人情報を提供するのを嫌う人は参加できない。

3.4 web 会議システムの利用

次の方法で要件は満たされる。

- ① 用いるオンライン会議システムのクライアントを参加者に準備してもらう。
- ② 会議 URL(及び必要に応じてパスワード等)を参加者全員に電子メールで送信する。
- ③ 定刻にライブ配信を行う。

この場合に利用する web 会議システムは、沖縄高専では普段から利用している Microsoft Teams が最も楽だと考える。その他には Zoom も選択肢の 1 つである。

この方法の利点と欠点は次のとおりである。

- 利点：
 - 教員側が慣れている(たとえ Microsoft Teams 以外の web 会議システムを使うとしても、web 会議そのものは普段の授業や会議で体験しているので)。
- 欠点：
 - 参加者が慣れておらず、準備は大変になる可能性がある。
 - (Microsoft Teams 以外の場合)利用する web 会議システムに教員側が慣れていない可能性がある。

4 考察

上記の方法を比較すると、以下の通りどの方法を使うかの判断は何を優先するかによって決まる。

- (ア) 「誰にでもできること」を優先させるなら、「分割してメールで送信」を選ぶ。ただしこの場合、手間とファイル容量、動画ファイルの複製の面には目をつぶる必要がある。
- (イ) 「外部に一切のデータをアップロードさせないこと」を優先させるなら、「本校 web ページへのアップロード」を選ぶ。ただしこの場合、web サーバの負荷と動画ファイルの複製の面には目をつぶる必要がある。
- (ウ) 「参加者の手間を減らすこと」を優先させるなら、「動画共有サイト利用」を選ぶ。ただしこの場合、設定面の手間(加えて、方法によっては個人情報の収集)には目をつぶる必要がある。
- (エ) 「教授する側が慣れている方法」を優先させるなら、「web 会議システムの利用」を選ぶ。ただしこの場合、参加者に手間をかけてもらう点に目をつぶる必要がある。

なお、予算が潤沢にあるという理想的な状況下を仮定すると(イ)が最も良いと筆者は考える。その理由は次の通りである。(ア)と(イ)は関わる人が沖縄高専関係者と参加者に限定される。よって仮に違法な複製等が見つかったとしても、「犯人探し」をする範囲が明確である。つまり、残りの方法に比べてよりセキュアであると言える。ここで(ア)と(イ)を比較すると、より現実的な方法は(イ)である。以上より理想的な状況下では(イ)が最適であると考えられる。しかし予算等、現実的に考えると、(ウ)が有力な候補ではある。ただ(ウ)を選択する場合、セキュリティ面でより安全な動画共有サイトを利用するなどの工夫は

必要だと考える。

5 沖縄高専での 2021 年度の実施方法

沖縄高専では 2021 年度、サマースクールにおいて外部の人向けのオンライン教授を行った。本校の広報担当の先生いわく、このときは次の方法で行ったとのことである。

- ① オンデマンド型で動画ファイルを作成してもらう。
- ② その動画ファイルを YouTube に限定配信設定でアップロードする。
これらの動画はサマースクールの日限定の配信とした。
- ③ 希望した中学生にのみ配信先を連絡する。

6 今後さらに考慮すべきこと・・・著作権の問題

今回は話を「どのようにすればできるか」に特化して要件を設定した。実際には、今回の要件以外にも考慮すべきことがある。それは著作権の問題である。今回特に意識した学校説明会での「受験対策講座」は、法律上の授業には当たらない。よって「受験対策講座」は著作権法第 35 条(学校その他の教育機関における複製等)の適用外となる。したがって、例えば国語の入試問題で著作権が消滅していない小説の問題については、解説をする場合、法律上の考察が必要である。また同様の理由で、来日できていない留学生に対する教授が授業であるかどうかを法律面で考える必要がある。もし授業ではないと判断されれば、「受験対策講座」と同様の配慮が必要になる。解決方法の 1 つとして、著作権法第 32 条に基づく引用の形式を取ることが考えられる。ただしこれは法的に熟考した結果ではないので、可能ならば法律の専門家を交えて、実施前に可否を慎重に検討しなければならない。

参考文献

- 1) 平嶋竜太・宮脇正晴・蘆立順美、『入門 知的財産法 第 2 版』、有斐閣、191 ページ・192 ページ、(2020 年)。
- 2) 加藤晋介(監修)・コンデックス情報研究所(編著)、『改正著作権法がよくわかる本』、成美堂出版、105 ページから 107 ページまで、(2017 年)。

参考 URL

- 1) YouTube ヘルプ、「動画のプライバシー設定を変更する」、
<https://support.google.com/youtube/answer/157177?hl=ja&co=GENIE.Platform%3DAndroid>、
(2022 年 4 月 11 日アクセス)。

A study of how to do online lecture for the students who want to enroll KOSEN -- without Blackboard Learn and Microsoft Teams --

*SHIN Shoro

Department of Integrated Arts and Sciences, National Institute of Technology, Okinawa College

Abstract

People who do not belong to National Institute of Technology, Okinawa College (for example, the students who want to enroll KOSEN) may have no accounts on Blackboard Learn (online education system) and Microsoft Teams. So when we teach online for them, we should use another way. On this report, there are 4 methods.

Key Word : online lecture, entrance examination

国 際 会 議 発 表

Automatic Wheelchair Control using Brain Machine Interface

Fuyuki Higa¹, Hiroki Kamehama², Shun Okuhama², Ryuma Kinjo², Ryu Tuha²,
Furugen Hinata², Hoshi Souta², Sougen Harada³, Katuko Nakahira³, Kota Nakagawa³,
Katuya Nakahira²

¹ National Institute of Technology, Okinawa College, Nago, Japan 905-2192, ic171233@edu.okinawa-ct.ac.jp

² National Institute of Technology, Okinawa College, Nago, Japan 905-2192

³ Nagaoka University of Technology, Nagaoka, Japan 940-2188

Keywords: wheelchair control, brain machine interface, electroencephalogram

Wheelchairs have been widely recognized in everyday life. We've been conducting research and development of an automatic wheelchair control for students with disabilities to actively participate in their school life. Wheelchair users are forced to bear the emotional and physical burden. Especially for students with severe motor disabilities, operating switches and levers that require muscle movement can be a great burden. Therefore, this paper describes a novel wheelchair control method using brain machine interface (BMI) in daily school life.

As a first step, we detailly analyzed the brain waves to estimate the physical movements. Figure 1 shows the analyzed results of electroencephalogram (EEG) when the subject raises his left and right hands. Four real-time frequency spectrums are shown using short-time fourier transform in this figure. In a second step, we estimate the relationship between the physical movements (left and right hand raising) and real-time frequency spectrums using convolutional neural network. As shown in figure 2, the machine learning results so far have not converged on validation. We believe that high definition and increased EEG data improve the convergence of machine learning validation.

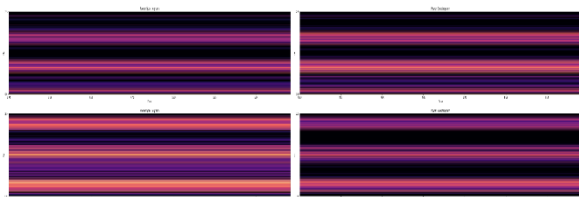


Figure 1 Real-time frequency spectrum of electroencephalogram

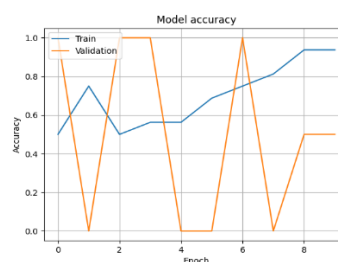


Figure 2 Machine learning transition estimating physical movements using electroencephalogram

REFERENCES

- [1] Tomoya MIYASAKA, Syunichi KUWANA, Akira WATANABE, Yuuji TANAKA, Yoshiyuki MURAKAMI, Feasibility of using a Biological Signals-based Input Device with Disabled People, Especially Children, B.Edu.Health Sci.UG Univ. vol.3,121-127,2011

業 績 一 覽

業績一覧リンク(「Research map」「KAKENdb」等)

校長

伊原 博隆

<https://researchmap.jp/read0173117>

<https://nrid.nii.ac.jp/ja/nrid/1000010151648/>

機械システム工学科

武村 史朗

<https://researchmap.jp/read0151466>

<https://nrid.nii.ac.jp/ja/nrid/1000070455187/>

比嘉 吉一

<https://researchmap.jp/read0054137>

<https://nrid.nii.ac.jp/ja/nrid/1000020335368/>

眞喜志 治

<https://researchmap.jp/read0051405>

<https://nrid.nii.ac.jp/ja/nrid/1000070289297/>

眞喜志 隆

<https://researchmap.jp/read0017950>

<https://nrid.nii.ac.jp/ja/nrid/1000060219300/>

山城 光

<https://researchmap.jp/yoihanasaku>

<https://nrid.nii.ac.jp/ja/nrid/1000070239995/>

安里 健太郎

https://researchmap.jp/k_asato

<https://nrid.nii.ac.jp/ja/nrid/1000010610321/>

下嶋 賢

<https://researchmap.jp/read0151469>

<https://nrid.nii.ac.jp/ja/nrid/1000060385490/>

津村 卓也

<https://researchmap.jp/read0046580>

<https://nrid.nii.ac.jp/ja/nrid/1000000283812/>

鳥羽 弘康

<https://researchmap.jp/read0151467>

政木 清孝

<https://researchmap.jp/read0054043>

<https://nrid.nii.ac.jp/ja/nrid/1000030323885/>

森澤 征一郎

<https://researchmap.jp/smorizawa>

<https://nrid.nii.ac.jp/ja/nrid/1000050757961/>

情報通信システム工学科

兼城 千波

<https://researchmap.jp/read0055210>

<https://nrid.nii.ac.jp/ja/nrid/1000030318993/>

金城 伊智子

<https://researchmap.jp/ichik>

<https://nrid.nii.ac.jp/ja/nrid/1000010550262/>

高良 秀彦

<https://researchmap.jp/okinawa-ct.ac.jp>

谷藤 正一

<https://researchmap.jp/sh-tanifuji>

山田 親稔

<https://researchmap.jp/read0151474>

<https://nrid.nii.ac.jp/ja/nrid/1000040412902/>

神里 志穂子

<https://researchmap.jp/read0151473>

<https://nrid.nii.ac.jp/ja/nrid/1000000442492/>

中平 勝也

<https://researchmap.jp/123-4>

<https://nrid.nii.ac.jp/ja/nrid/1000030500566/>

宮城 桂

<https://researchmap.jp/read2983>

<https://nrid.nii.ac.jp/ja/nrid/1000000734550/>

相川 洋平

https://researchmap.jp/yohei_aikawa

<https://nrid.nii.ac.jp/ja/nrid/1000080804616/>

亀濱 博紀

https://researchmap.jp/_hkame

メディア情報工学科

伊波 靖

<https://researchmap.jp/yasuc18>

<https://nrid.nii.ac.jp/ja/nrid/1000060390564/>

玉城 龍洋

<https://researchmap.jp/read0125888>

<https://nrid.nii.ac.jp/ja/nrid/1000060413837/>
タンスリヤボン スリヨン

<https://researchmap.jp/suriyon>
<https://nrid.nii.ac.jp/ja/nrid/1000000322107/>

與那嶺 尚弘
<https://researchmap.jp/read0182617>
<https://nrid.nii.ac.jp/ja/nrid/1000000259805/>

佐藤 尚
<https://researchmap.jp/stakashi>
<https://nrid.nii.ac.jp/ja/nrid/1000070426576/>

鈴木 大作
<https://researchmap.jp/read0151477>

西村 篤
<https://researchmap.jp/azsy>
<https://nrid.nii.ac.jp/ja/nrid/1000070413888/>

バイティガ ザカリ
<https://researchmap.jp/read0151478>
<https://nrid.nii.ac.jp/ja/nrid/1000040462155/>

金城 篤史
<https://researchmap.jp/akinjo>
<https://nrid.nii.ac.jp/ja/nrid/1000030606794/>

當間 栄作
<https://researchmap.jp/90826778>

生物資源工学科

池松 真也
<https://researchmap.jp/read0151479>
<https://nrid.nii.ac.jp/ja/nrid/1000040442488/>

伊東 昌章
<https://researchmap.jp/read0149583>
<https://nrid.nii.ac.jp/ja/nrid/1000000395659/>

濱田 泰輔
<https://researchmap.jp/hamada-t>
<https://nrid.nii.ac.jp/ja/nrid/1000010253717/>

平良 淳誠
<https://researchmap.jp/read0151482>
<https://nrid.nii.ac.jp/ja/nrid/1000020462153/>

玉城 康智

<https://researchmap.jp/TamaYasu>
<https://nrid.nii.ac.jp/ja/nrid/1000060413887/>

沖田 紀子

<https://researchmap.jp/n-okita>

磯村 尚子

https://researchmap.jp/Naoko_Isomura
<https://nrid.nii.ac.jp/ja/nrid/1000090376989/>

三宮 一幸

<https://researchmap.jp/sanmiya>
<https://nrid.nii.ac.jp/ja/nrid/1000010462152/>

嶽本 あゆみ

<https://researchmap.jp/tkmt4208>
<https://nrid.nii.ac.jp/ja/nrid/1000060505858/>

田邊 俊朗

<https://researchmap.jp/read0151483>
<https://nrid.nii.ac.jp/ja/nrid/1000050378915/>

萩野 航

<https://researchmap.jp/hagino>

総合科学科

小池 寿俊

https://researchmap.jp/koike_kazutoshi
<https://nrid.nii.ac.jp/ja/nrid/1000020225337/>

成田 誠

<https://researchmap.jp/read0151485>

星野 恵里子

<https://researchmap.jp/read0039206>

山本 寛

<https://researchmap.jp/read0151491>

青木 久美

<https://researchmap.jp/read0151486>

木村 和雄

<https://researchmap.jp/read0191326>
<https://nrid.nii.ac.jp/ja/nrid/1000080314889/>

澤井 万七美

<https://researchmap.jp/read0067691>
<https://nrid.nii.ac.jp/ja/nrid/1000060330726/>

下郡 剛

<https://researchmap.jp/read0151488>
<https://nrid.nii.ac.jp/ja/nrid/1000050413886/>

森田 正亮

<https://researchmap.jp/black-kousen>
<https://nrid.nii.ac.jp/ja/nrid/1000050390563/>

吉居 啓輔

<https://researchmap.jp/yoshii>

和多野 大

<https://researchmap.jp/read0110168>

緒方 勇太

<https://researchmap.jp/y.ogata>
<https://nrid.nii.ac.jp/ja/nrid/1000050800801/>

カーマン マコア クイオカラニ

<https://researchmap.jp/Carman>

片山 鮎子

<https://researchmap.jp/ayuko.k>

崎原 正志

<https://researchmap.jp/masashisakihara>
<https://nrid.nii.ac.jp/ja/nrid/1000030828611/>

島尻 真理子

<https://researchmap.jp/RFMS>

松露 真

<https://researchmap.jp/shoro>

山内 祥之

<https://researchmap.jp/yamauc-y>

吉井 りさ

<https://researchmap.jp/ryoshii>

特命教授

佐藤 進

特命助教

村山 裕子

安田 直子

伊東 繁

<https://researchmap.jp/read0173088>
<https://nrid.nii.ac.jp/ja/nrid/1000080069567/>

技術支援室

蔵屋 英介

<https://researchmap.jp/read0201011>

<https://grants.jst.go.jp/search/?qg=%E8%97%8F%E5%B1%8B%E8%8B%B1%E4%BB%8B&c8%5B%5D=kakenhi>

具志 孝

<https://researchmap.jp/gushitakashi>

比嘉 修

<https://researchmap.jp/o.higa>

<https://nrid.nii.ac.jp/ja/nrid/1000020504525/>

渡邊 謙太

<https://researchmap.jp/kenta-w>

<https://nrid.nii.ac.jp/ja/nrid/1000050510111/>

新田 保敏

<https://researchmap.jp/yarata>

大嶺 幸正

<https://researchmap.jp/omine>

白幡 大樹

<https://researchmap.jp/hiroki.shirahata>

仲間 祐貴

<https://researchmap.jp/nakama>

<https://kaken.nii.ac.jp/ja/grant/KAKENHI-PROJECT-16H00402/>

総務課

比嘉 信

<https://kaken.nii.ac.jp/ja/grant/KAKENHI-PROJECT-19918035/>

学生課

伊地 信人

<https://kaken.nii.ac.jp/ja/grant/KAKENHI-PROJECT-21921020/>

沖縄工業高等専門学校紀要発行規程

	平成18年8月31日
	規程第7号
改正	平成19年3月22日
	規程第1号
	平成22年2月17日
	規程第1号
	平成24年1月25日
	規程第3号
	平成25年3月19日
	規程第4号
	平成26年4月16日
	規程第7号
	平成28年2月17日
	規程第1号
	平成29年3月15日
	規程第3号
	令和3年3月17日
	規程第2号

(目的)

第1条 沖縄工業高等専門学校（以下「本校」という。）の教育・研究活動の活性化を図るとともに、本校教職員等の研究成果及び教育研究活動状況を広く公表するため、沖縄工業高等専門学校紀要（以下「紀要」という。）を発行するものとする。

(誌名等)

第2条 紀要の名称は、「沖縄工業高等専門学校紀要第〇号（Bulletin of National Institute of Technology, Okinawa College No.〇）」とする。

2 この規程において紀要とは、この規程に基づき編集発行されたもので、電子的方法により記録されたものをいう。

(審査・編集)

第3条 紀要の投稿原稿審査、編集、発行等に関する事項は、沖縄工業高等専門学校図書委員会（以下「委員会」という。）において審議決定する。

(掲載事項)

第4条 紀要の掲載事項は、次の各号に掲げるものとする。

- (1) 研究論文、国際会議発表、総説、解説、教育研究報告、又は資料（以下「論文等」という。）
- (2) その他委員会での審議を経て、校長が特に認めた事項

(投稿者)

第5条 紀要に投稿できる者は、次の各号に掲げる者とする。

- (1) 本校の教職員
- (2) 委員会での審議を経て、校長が特に認めた者

2 共著の場合は、前項の投稿者1名を含めばよいものとする。

(発行)

第6条 紀要は、原則として、電子的方法により年1回発行するものとする。

(事務)

第7条 紀要に関する事務は、総務課において処理する。

(雑則)

第8条 この規程に定めるもののほか、紀要の編集及び原稿の執筆に関し必要な事項は、別に定める。

附 則

この規程は、平成18年8月31日から施行し、平成18年4月1日から適用する。

附 則 (平19. 3. 29規程第1号)

この規程は、平成19年3月29日から施行する。

附 則 (平22. 2. 17規程第1号)

この規程は、平成22年4月1日から施行する。

附 則 (平24. 1. 25規程第3号)

この規程は、平成24年4月1日から施行する。

附 則 (平25. 3. 19規程第4号)

この規程は、平成25年4月1日から施行する。

附 則 (平26. 4. 16規程第7号)

この規程は、平成26年4月16日から施行し、平成26年4月1日から適用する。

附 則 (平28. 2. 17規程第1号)

この規程は、平成28年2月17日から施行する。

附 則 (平29. 3. 15規程第3号)

この規程は、平成29年4月1日から施行する。

附 則 (令 3. 3. 17規程第2号)

この規程は、令和 3年3月17日から施行する。

沖縄工業高等専門学校紀要投稿編集要領

(平成18年 8月31日制定)
平成19年 3月22日改正
平成19年10月23日改正
平成22年 2月17日改正
平成24年 1月25日改正
平成25年 3月19日改正
平成28年2月17日改正
平成30年10月4日改正
令和3年3月29日改正

第1節 総則

(趣旨)

第1条 この要領は、沖縄工業高等専門学校紀要発行規程（平成18年規程第7号。以下「発行規程」という。）第8条の規定に基づき沖縄工業高等専門学校（以下「本校」という。）が発行する紀要（以下「紀要」という。）の投稿、編集等に関し必要な事項を定めるものとする。

(投稿論文等の種類及び内容)

第2条 紀要に掲載する研究論文等（以下「論文等」という。）は、発行規程第5条に定める者が主となり執筆したもので、未発表のものとする。

2 論文等の種類及び内容（抄録等を含む。）は、発行規程第4条に規定する区分とし、その内容は次の各号のとおりとする。また、掲載書式等については付録のとおりとする。

- (1) 研究論文 独創的であり、新しいデータ・結論或いは事実を含むもの
- (2) 総説 それぞれの研究領域における自己の研究成果も交えて考察を加え、体系的に整理したもの
- (3) 解説 特定分野に関連する内容又は、学会などで発表されたものを、わかりやすく解説したもの
- (4) 教育研究報告 内容面に独創性がある教育研究の報告
- (5) 資料 実験・開発・調査等で価値ある結論・データの記載があるもの。翻訳・注釈・解説・紹介・翻刻・文献目録等を含む。
- (6) 国際会議発表 国際会議にて発表した抄録、概要等
- (7) その他 学位論文紹介、沖縄工業高等専門学校図書館運営委員会（以下「委員会」という。）の審議を経て校長が特に認めた事項

3 論文等においては、次の各号に則ったものとする。

- (1) 人を対象とする研究報告等は、ヘルシンキ宣言(1964年6月第18回WMA総会採択)の精神に則ったものでなくてはならない。
- (2) 実験動物を用いた研究報告等は、各施設の実験動物指針に則って行われたものとする。
- (3) 個人情報記載の含まれる論文等については、プライバシーに十分配慮したものであること。

第2節 研究論文等

(頁数)

第3条 論文等のページ数は、図、表及び写真等を含み、最大10ページ前後とする。ただし、人文社会系の研究論文、総説及び、解説においては最大20ページ前後とする。

(論文等の構成)

第4条 紀要に掲載する論文等の構成は、原則として、題名(タイトル)、執筆者名(著者名)、執筆者の所属機関、要旨(要約)、キーワード、緒言、本文、謝辞、引用文献とする。

2 論文等の原著が和文の場合は英文、原著が英文の場合は和文の題名、執筆者名、執筆者の所属機関、要旨を、当該論文等の末尾に記入するものとする。

3 英語以外の外国語(独語、仏語など)を使用する場合は、英文の場合に準ずるものとする。

(原稿の書式・版組)

第5条 紀要の原稿は、原則として、A4版用紙を縦置きとし、ワープロによる和文又は英文の横書き1段組みとし、その書式は次のとおりとする。ただし、紀要の原稿が縦書き和文の場合は縦書き2段組みとする。

(1) 使用フォント

原稿の使用フォントは、和文の場合はMS明朝、英文の場合はTimes New Romanを原則とするが、記号等についてはこれら以外のフォントを使用してもよいものとする。

(2) 余白

上35mm、下25mm、左20mm、右20mmとする。

(題名及び執筆者名)

第6条 題名及び執筆者名は、次のとおりとする。

(1) 題名

- ・題名の活字は14ポイントとし、位置は中央とする。
- ・後2行あける。

(2) 執筆者名

- ・執筆者名は10.5ポイントとし、位置は中央とする。
- ・執筆者が複数の場合は、コンマ(,) (和文にあっては全角)で区切る。
- ・主執筆者の左肩には*印(和文にあっては全角上付きの*印)を付す。
- ・後1行あける。

(3) 執筆者の所属機関

- ・所属機関は10.5ポイントとし、位置は中央とする。
- ・本校の執筆者にあっては所属名を記す。ただし、非常勤講師については本校における身分を記す。
- ・執筆者が複数の所属機関にまたがるときは、機関名・部署名(その執筆者の所属する組織の最小単位)まで記入し、左肩に執筆者名に対応した上付き数字^{1 2 3}…(和文にあっては全角)を付す。
- ・主執筆者については、所属機関とともにメールアドレスを付す。ただし、メールアドレスの記載を希望しない場合は、記載しなくてもよいものとする。
- ・後2行あける。

(要旨等)

第7条 英文要旨は300語以内、和文要旨は1,000字以内の10.5ポイント、左詰め、1段組みとし、図・表等を取り入れないものとする。ただし、分野が漢文学や国文学等の英文になじまない場合は和文要旨のみとし、英文要旨は省略することができる。

2 要旨に引き続き、5語以内のキーワードを記入する。

(本文等)

第8条 本文の活字は10.5ポイントとし、本文には読者が理解しやすいように章節小見出しを付け、1段組みとする。

- 2 緒言、実験材料、実験方法、結果、考察、謝辞などの見出しの活字は、10.5ポイント、太字とし、前後1行あける。ただし、各専門分野の慣例その他の例により、これらの項目を統合又は省略し、順序を変更し、或いは別の項目をたてても差し支えないものとする。
- 3 前項に定める各項目をさらに区分けし、小見出しを付ける場合は、ポイント・システム(例：1.1……、1.2……)により10.5ポイント、太字とし、前1行あける。数字は和文にあっては全角とする。

(図、表及び写真等)

第9条 図、表及び写真等は、全て電子化し、執筆者において次のとおり原稿中にレイアウトするものとする。

- (1) 表のタイトルの活字は、10.5ポイントとし、「表1」、「Table 1」等と表示し、続いてタイトルを明記する。表中の文字は、原則としてMS明朝10.5ポイントとする。
 - (2) 図及び写真の下には、10.5ポイントで「図1」、「Fig. 1」、「写真1」、「Plate 1」等と表示し、続いてタイトルを明記する。さらに説明文を10.5ポイントとしてこれに続ける。
 - (3) 他の刊行物から図、表及び写真等を引用するときには、タイトルに続けて出典を明記するものとする。
 - (4) 図、表及び写真等の大きさは、原則として最大1ページ以内とする。
- 2 図、表及び写真等は、原則としてカラー入稿とする。ただし、執筆者がモノクロでの掲載を希望する場合は、モノクロに変換して入稿すること。

(引用文献)

第10条 引用文献については、本文中の該当箇所に肩付き文字^(1)、2、3)、3-5)又は[1]、[2,3]、[3-5]等の記述で示すものとする。ただし、各専門分野の慣例その他により、本文中の該当箇所の後に(著者、発行年)の形式で示すものについてはその例によるものとする。また、同一発行年に複数あるときは(〇〇、1998a)のようにアルファベットを付す。

2 引用文献の記載は、次のとおりとする。

- (1) 雑誌掲載論文の場合は、番号の次に、著者名、題名、雑誌名、巻号、頁(最初と終わり)、(発行年)、ピリオドの順で記載する。
- (2) 図書の場合は、筆者名、書名、発行所、引用頁、(発行年)、ピリオドの順で記載する。
- (3) 論文の省略法は、所属する学会で定められた命名法に従う。引用文献は、原則として、上記の項目・順番で記入することとするが、著者の所属する学会の慣行に従ってもよいものとする。ただし、同一の論文等内では書式を統一するものとする。

(執筆上の注意)

第11条 執筆上、特に注意すべき内容は次のとおりとする。

- (1) 文体は、口語文章体とする。
- (2) 用語以外は、できる限り「常用漢字」を用い、仮名は「現代仮名遣い」とする。
- (3) 数字、ローマ字、ギリシャ文字・ドイツ文字等は、大文字、小文字、上つき及び下つき等の別を、明瞭に記載する。
- (4) 句点(。)、ピリオド(.)、読点(、)、コンマ(,)、中点(・)及びコロンの(:)等の句読点は全角を用いる。
- (5) 同一の論文等内では書式を統一するものとする。

(提出書類等)

第12条 投稿に際しては、データファイル(学内で定められた、電子情報の移送方法に従うこと)とし、別に定める投稿期限までに担当係に提出するものとする。

(投稿論文等の査読)

第13条 投稿論文等は、査読を行い、委員会の責任において原稿の採択、掲載順序、形式を整えるための加除訂正等を行うものとする。

2 投稿された研究論文等の査読は、原則として委員会の定めた査読者(本校教員)が行うものとするが、必要に応じ学外者に査読を依頼することができるものとする。

3 査読者は、投稿原稿の形式の不備等についてチェックし、委員会を通じ投稿者に改稿又は再提出を求めることができるものとする。

4 投稿者が前項の査読により修正等を指示されたときは、投稿者は所定の期日までに改めて前条第2号及び第3号に関わる書類等を提出しなければならない。

5 掲載可否の結果は、投稿者へ通知する。ただし、掲載否の通知に係る文書には、掲載否とした理由を付記する。

6 投稿者が、掲載否の理由が不当であると判断した場合は、異議申立てを行うことができる。異議申立ては、申立ての理由を付記した文書に当該投稿論文を添付して行う。なお、異議申立てができるのは1回とし、異議申立てが行える期間は、投稿者に通知が届いた日以降1月以内とする。

7 異議申立てについての審議は、委員会にて行うものとする。

8 異議申立てが認められた場合は、当初と異なる査読者が査読を行い、結果は委員会を通じ投稿者へ通知する。なお、異議申立ての結果、掲載可と決定した研究論文等は、次号の紀要に掲載する。

(校正)

第14条 執筆者による校正は2校までとし、原則として校正時の原稿の追加及び書き直し等は認めない。

(執筆者の業績掲載)

第15条 紀要に掲載する投稿者の業績は、researchmap等のリンクを伏す形式で掲載する。

第3節 雑則

(原稿の責任)

第16条 紀要に掲載された論文等の内容については、著者がその責任を負う。

2 他の著作物から図表等を引用する場合には、原著者及び発行者の許可を得るのも著者の責任において行うものとする。

(著作権)

第17条 紀要に掲載される全て論文等の著作権(電子的形態による利用も含めた包括的な著作権も含む。ただし、著作者人格権は除く。)は、本校に帰属する。ただし、著者自身が自著の論文等を複製、翻訳などの形で利用することは差し支えない。

(雑則)

第18条 この要領に定めるもののほか、紀要の投稿、編集等に関し必要な事項は、委員会において定めるものとする。

附 則

この要領は、平成18年8月31日から施行し、平成18年4月1日から適用する。

附 則 (平19. 3. 22)

この要領は、平成19年3月22日から施行する。

附 則 (平19. 10. 23)

この要領は、平成19年10月23日から施行する。

附 則 (平22. 2. 17)

この要領は、平成22年4月1日から施行する。

附 則 (平24. 1. 25)

この要領は、平成24年4月1日から施行する。

附 則 (平25. 3. 19)

この要領は、平成25年4月1日から施行する。

附 則 (平28. 2. 17)

この要領は、平成25年4月1日から施行する。

附 則 (平30. 10. 4)

この要領は、平成30年10月4日から施行する。

附 則 (令 3. 3. 29)

この要領は、令和3年3月29日から施行する。

< 研究論文 (記載例) >

《横書き》

題名：MS明朝(14pt)太字

沖縄県に産出する植物の新規生理活性物質の構造

(2行あける 10.5pt)

執筆者名：MS明朝(10.5pt)

*主執筆者沖縄高専¹，共著者A²，共著者B¹，共著者C³

(1行あける)

所属機関：MS明朝(10.5pt)

¹生物資源工学科，²〇〇大学〇〇学部〇〇学科，³〇〇製作所〇〇研究部

(xxxxx@okinawa-ct.ac.jp) メールアドレス：記述を希望しない場合はなくてもよい

(2行あける)

要旨

MS明朝(10.5pt)太字

要旨：MS明朝(10.5pt)和文 1000字以内

新規な生理活性物質が、沖縄県産の植物 Okinawa ryukyuum の熱水抽出物から単離された。質量分析法および核磁気共鳴法により推定された構造は本植物の治癒活性を明確に説明するものであった。しかしながら、この活性を十分に発揮するには、より長い夏季休暇が必要であった。

キーワード：夏季休暇 5語以内

(1行あける)

緒言

見出：MS明朝(10.5pt)太字

(1行あける)

緒言：MS明朝(10.5pt)

沖縄県においてはさまざまな植物資源が.....

(1行あける)

実験材料

章節小見出し：MS明朝(10.5pt)太字

(1行あける)

本文 (MS明朝 10.5ポイント).....

(1行あける)

小見出しを付ける場合はポイント・システム (1.1...、1.2...) MS明朝(10.5pt)太字

1.1 小見出し

表

表中の文字は原則MS明朝
10.5ポイント

表1タイトル，出典〇〇 MS明朝(10.5pt)

写真

写真1タイトル MS明朝(10.5pt)

(1行あける)

実験方法

(1行あける)

引用文献

.....〇〇〇〇¹.....

(1行あける)

結果

(1行あける)

.....
.....

(1行あける)

考察

(1行あける)

.....
.....

(1行あける)

謝辞

(1行あける)

.....
.....

(1行あける)

引用文献

(1行あける)

1) 雑誌掲載論文の場合

1) 著者名、題目、雑誌名、巻号、頁(最初と終わり)、(発行年).

2) 著者名、書名、発行所、引用頁、(発行年).

2) 図書の場合

(2行あける)

英文題名 : Times New Roman 14pt 太字

Structure of a novel bioactive substance extracted from the plants harvested in Okinawa

(1行あける)

英文執筆者名 : Times New Roman 10.5pt

*Name of Author A¹, Name of Author B², Name of Author C³

(1行あける)

英文所属機関 : Times New Roman 10.5pt

¹ Department of Bioresources Engineering, ² Department of XX, XX University, ³ Research Laboratory, YY Engineering

(2行あける)

英文要旨 : Times New Roman 10.5pt

A novel bioactive substance was isolated from the hot water extract of the plant *Okinawa Ryukyuum*. The structure deduced from the results from mass spectra and NMR spectra well explains the healing activity of this plant. However, further long summer vacation was required to exert the full activity.

(国文学等, 英文によりがたい場合は省略してもよい。)

Key Word : Summer vacation

《縦書き》

□ (1行あける)

□□□□□□□□□□□□□□□□
 タイトル十六ポイント明朝体太字

□□——サブタイトル十三ポイント明朝体——

執筆者名(十三ポイント明朝体) □□□

□ (2行あける)

□□□□—

縦書き2段組 (36字×33行/段) MS明朝9ポイント

1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6

1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6

1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6

□ (1行あける)

□□□□—

1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6

1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6

□ (1行あける)

□□□□—

1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6

1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6

□ (1行あける)

□□□□—

1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6

1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6

□ (1行あける)

□□□□—

1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6

1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6

□ (1行あける)

□□□□—

1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6

1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6

□ (1行あける)

□□□□—

1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6

1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6

□ (1行あける)

□□□□—

1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6

沖縄工業高等専門学校紀要

第16号

2022年8月31日 発行

編集・発行 沖縄工業高等専門学校
〒905-2192
沖縄県名護市字辺野古905番地
電話 (0980) 55-4037

