

令和 3 年 6 月 22 日現在

機関番号：18001

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2020

課題番号：17K06714

研究課題名（和文）水と緑の固有性を継承する沖縄らしい基地跡地利用の実現に向けた実践的研究

研究課題名（英文）A Proposal-based Research about the Reuse Fundamental Plan of the Marine Corps Air Station Futenma for considering watershed-based open space plan in Okinawa Pref., Japan

研究代表者

小野 尋子（ONO, Hiroko）

琉球大学・工学部・准教授

研究者番号：20363658

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：水循環基本法でも「地域の固有性が高い」とされているように、地下水は、降雨後の流出・浸透・蒸発散・貯留・湧出のメカニズムにおいて、表面水よりも地域の環境特性の影響を受けやすく、そのため、対象地域の属性について調査をベースにメカニズムを解明し、その実情に合わせたマネジメントが不可欠とされてきた。それについて、各年度ごとに成果を出し、流域水収支のメカニズムと開発、湧水口別湧水量推計と湧水枯渇回避に向けて、浸透方策などを提言した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

駐留米軍用地普天間飛行場や返還地区である西普天間住宅地区は琉球石灰岩台地上にあり、高い透水性を持つ地質特性から崖下での豊かな湧水が湧出している、地下水を基軸とする水収支が対象地域の自然特性となっている。又吉・小野(2019)は西普天間住宅地区が存在する宜野湾 E 流域の年平均降水量と現況土地利用から、年間理論浸透量の推計値、湧水量の実測調査による区間推計値との適合度から、対象地区の土地利用別流出係数の同定を行った。翌大城・小野・栄野川(2020)は、返還され地区内への立ち入りが可能となった事を活かして、地区内の湧水の実測調査を行い、各湧水の流出特性を累積雨量との関係で解析をした。

研究成果の概要（英文）：Groundwater is more affected by the environmental characteristics of the region than surface water in the mechanism of runoff, infiltration, evapotranspiration, storage, and gushing after rainfall. As the Basic Law on Water Cycle, It has been indispensable to elucidate the mechanism of the attributes of the target area based on the survey and to manage it according to the actual situation.

Regarding this, the results were produced every year, and the mechanism and development of the basin water balance, the estimation of the amount of spring water by spring outlet, and the infiltration measures for avoiding the depletion of spring water were proposed.

研究分野：都市計画

キーワード：大規模開発 流域水循環 普天間飛行場

1. 研究開始当初の背景

申請者は、これまで沖縄県宜野湾市にある普天間飛行場跡地利用計画(約480ha)について、継続的に研究及び計画策定支援を続けてきた注1)。特に普天間飛行場は、琉球石灰岩台地上に位置しており芝地に覆われた米軍の飛行場が地下水を涵養する事から、普天間飛行場が立地する台地下では豊かな湧水群が発達している。こうした地下水は、現在田芋農家を中心として、産業用および家庭用に利用されており、また貴重な生態系を残存している。今後、普天間飛行場が返還され、開発により地表面が被覆された場合、大きな影響を受ける事が予想され、基地跡地の開発に向けて、周囲の既成市街地や地域の歴史を考慮した環境に共生する沖縄らしい土地利用計画のあり方についての研究による検証は喫緊の課題であった注2)。

注1) 申請者は基地跡地利用提案について、沖縄県主催の計画提案全国コンペで研究室の調査研究成果ベースとした調査研究に平成25年度より関わっている。
 注2) 宜野湾市米軍普天間飛行場は、平成8年に、自米特別行動委員会(SACO)において全面返還が合意された。米軍普天間飛行場の480haという面積は、飛行場が立地する沖縄県宜野湾市の市域面積の25%にも相当する広大な面積である。飛行場は周囲を既成市街地に取り囲まれており、安全の問題、騒音や振動といった住民生活への影響、基地建設のために移転させられた接収地に端を発する密集市街地が形成、道路ネットワークの分断等多くの課題を有している一方で、戦後形成された周囲の既成市街地と比較すると基地内の緑被率は70%を超える等、市街化された沖縄本島中南部の貴重な緑地空間としても機能している。

2. 研究の目的

沖縄県および宜野湾市が設置した跡地利用計画検討委員会では、大きく2点、自然歴史的な環境を整理した「保全的要素」の観点と導入する都市機能「利活用要素」の観点で検討が進められている注3)。普天間飛行場は480haと広大な面積であるため、多面的な検討が肝要であるが、申請者は土地利用計画の専門家として、研究における調査および計画支援における地域住民や地主の意向を伺う中で、「広域的な水と緑をどう保全していくか」「戦前の伝統的な沖縄の集落空間が有していた豊かな民俗的空間をどう再生するか」の2点が「沖縄らしい魅力的な基地跡地利用の実現」にむけて重要である注4)。これらについて、学術的観点から研究を進め、行政関係機関と協調的な関係性を保ちながらアクションリサーチとして研究成果を還元することを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、2段階で研究を遂行する。各段階の関連性は一見低く感じられるが、「地下水の水収支モデルを精緻化し将来水需要を想定する事」と、その地下水を涵養するための緑地の担保を「土地区画整理事業の中でどう捻出するか」は表裏一体の課題である。

- ・第1段階(H29-30)；現在の普天間飛行場周辺の湧水量を観測し、統計的な解析を行い(実測値推計)、同時に現状の流域別土地利用状況からGISを用いて水収支モデルを作成し(理論値推計)、その比較から地下水涵養モデルの精緻化する
- ・第2段階(R1-継続研究として中断)；将来需要の動向を踏まえながら、地下水涵養のために必要とされる緑地量を推計し、その広大な緑地を区画整理事業の中で実現するための方策について、都市に活力を与える「魅力的な大規模緑地」を有する先進事例を参考にしながら、減歩や技術基準、透水性舗装等技術採用の検討を行う。

注3) 沖縄県及び宜野湾市では、平成18年2月の『普天間飛行場跡地利用基本方針』を皮切りに、上位計画の改訂や地元意向を踏まえ、順次検討・見直しをしてきている。順次検討・見直しを経て、平成25年3月に「全体計画の中間とりまとめ」が策定された。同計画では、大規模緑地(100ha)の創出と基地内に残存する自然環境・歴史文化等の資源の保全をベースとした土地利用配置の指針が定められ、その方針は地主、住民、行政間で一定の理解と合意が得られつつある。現在は平成29年3月に向けて利活用の基本方針の整理が進められている。
 注4) 水と緑については生態学的観点および現況の水利用実態の観点から重要である。宜野湾の戦前の基地内にあった集落については郷友会が企画して、戦時中の米軍偵察機による航空写真から集落地区を作成し、地域の年配者の生活に関わる証言をまとめたDVDを独自に作成しており、込められた思いは大きい。

4. 研究成果

本研究においては、地下水を含む流域水収支の特性を解明し、持続可能性の観点から跡地計画における大規模公園広場状緑地配置に関する配慮事項を提言する事を目的とした。また計画作成支援研究であるため、分析に留まらず、計画反映も試みた。研究の方法では、等タンクモデル主流となる地下水調査の方法を用いる事ができない事から、ベクチューリン(1963)の不圧地下水の水収支式(i)を応用して、自由地下水量の変化量を求める事とした。式(i)を琉球石灰岩台地の特性及び水収支期間を考慮しD1、A1、D2は無視できるとした注5)。また、現在流域毎で地下水水盆は独立していると推測されている為、隣接する地下水水盆からの流入Q1はない。更に基地内は立ち入り等が不可能である為、灌漑利用Iについても行われていない。一方で、琉球石灰岩台地では、地表の琉球石灰岩が雨で浸食されて地下の鍾乳洞に直接つながる洞窟を形成している箇所があり、そこでは地表水が直接地下に流れ込む為、地表水の伏流量を示す変数としてS(伏流量)を置いた。さらに単位を水柱高ではなく、量で表せるように両辺にF(水収支地区の面積)を乗じた。この(ii)式の構造を前提として、式のそれぞれの項を既報含め段階的に求めた。これにより各湧水の実測調査結果を基に実測調査と応答モデルから地下水日流出量Q2を導出し、各湧水の流出特性から各湧水口につながる地下構造を推定した。また、流域毎の特性は、推計結果から流域別の自由地下水量の変動について推計した。

$$\pm D1 \pm D2 + \mu \frac{\Delta H}{\Delta t} = P + C - E + \frac{A1-A2}{F} + \frac{Q1-Q2}{F} + \frac{Iir-Iret}{F} \quad (i) \quad \mu \frac{\Delta H}{\Delta t} F = PF - EF + S - A2 - Q2 \quad (ii)$$

$\pm D1$ ：地表における水量の変化、 $\pm D2$ ：不飽和帯内の土中水の変化、
 P ：降水量、 C ：地表と地中の凝縮量、 E ：蒸発散量、

$\mu \frac{\Delta H}{\Delta t}$ ：自由地下水量の変化 (ΔH は Δt 時間内の地下水位変化、 μ は地下水上昇の場合には飽差率、地下水下降の場合には排水率となり有効空隙率と同じである。)

$\frac{A1-A2}{F}$ ：地表流入量、 $A2$ ：地表流出量、 F ：水収支地区の面積

$\frac{Q1-Q2}{F}$ ：地下水流入量、 $Q2$ ：地下水流出量

$\frac{Iir-Iret}{F}$ ：灌漑水流入量、 Iir ：灌漑水流出量で還元水となる

※以上の各成分はすべて水柱高mmで表される

$\mu \frac{\Delta H}{\Delta t} F$ ：自由地下水量の変化量 (ΔH は Δt 時間内の水収支地区の地下水位変化を表し、 μ は地下水水盆においては有効空隙率を1とする。)

PF ：水収支地区の降水量、 EF ：水収支地区の蒸発散量、 S ：水収支地区の伏流量

$A2$ ：水収支地区の地表流出量、 $Q2$ ：水収支地区の地下水流出量

※以上の各成分はすべてm/day表される

対象地の概要

宜野湾市の地形は北西側に下る海岸段丘が形成されており、地表分水嶺となる最も海抜の高い長田付近から2つの段丘を形成して海に至る(Fig.1の地形と地層)。普天間飛行場は第一の段丘上に立地し、地質は全て琉球石灰岩土壌となっている。GISで計測すると注6)基地内の緑被率は約70%と周辺の既成市街地と比較して非常に高い注7)。琉球石灰岩は表流水を形成しない為、流域上部から流れてきた雨水は石灰岩が卓越する普天間飛行場部分で、地下に浸透し、不透水層まで浸水した後地下水脈や水盆を形成し、北西部の海岸低地(大山水田周辺)から湧水として再び地上に表出する(Fig.1の地下水)注8)。宜野湾市の表流水及び地下水流域は、分水嶺、不透水基盤の等高線及び市内に整備された下水道(雨水排水)により大きく分けて5つに区分されA~E流域(流域面積：約1620万㎡)と表される。このうち普天間飛行場に大きく関わる流域はC~E(流域面積：約480万㎡)流域である(Fig.2)。

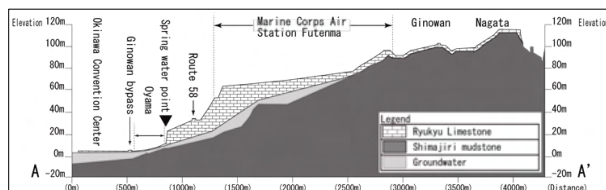


Fig.1 Cross section of Topography and

Table 1 Number of actual measurements of each spring

	3	6	17	8	9	11	13	
	Mendakar ihiga	Arankiga	Yanachiyaga	Usinshanga	Hyakaga	Runsinga	Ukura	Total
Existing research (Times)	21	21	6	6	21	6	6	87
Original research (Times)	92	90	83	29	90	50	55	489

独自の湧水量調査:湧水に関する既存調査は、平成 16、18、22、24 年度の宜野湾市自然環境調査において行われた流量調査結果 (Table 1 (N₁)) がある。しかし、既存の調査は、①観測日が月に 1 回程度である事から降水量を考慮できないという欠陥、②調査年度により計測地点や方法が異なるというデータの不備がある為、平成 27 年 9 月 14 日から平成 28 年 12 月 29 日に 7 地点、計 489 回の流量調査を独自に実施した (Table 2 (N₂))。特に①に関しては、現地調査でいくつかの湧水口では雨天後の湧水の増加が確認されていた事から注 10)、湧水量を推定する上で降水量の考慮が不可欠であった。独自調査の対象は、宜野湾市の主な湧水地点として、流量が豊富な 7 地点 ((3)(6)(7)(8)(9)(11)(13)) で、現在も家庭用及び産業用利用として取水が行われている湧水地点 (Fig. 2, Table 1) を対象とし、湧水の形状を考慮して容積法及び流速法により流量を測定した。

湧水量実測値の長期降水量累計及び短期降水量累計の推定:実測調査では、降水直後に直接流出として急激に流量が通常時の 2~3 倍に増加する湧水や琉球石灰岩への浸透や地下水量への貯留により、時間をかけてゆっくりと浸透し、遅れて流量の変動を示す湧水が確認された。降水量データは、気象庁沖縄気象台胡屋の日別降水量を用い、調査日より過去 90 日の降水量累計 D1~D90 を用いた注 11)。次に、実測値と降水量累計 (D1~D90) の短期及び長期変動における推定式を導出する為、重回帰分析を行なった注 12)。自由度調整済み決定係数 $R_2=0.51\sim0.77$ の推定式を得た。実測値と推定値のハイドログラフの重なりもよく、再現性は高いと言える。また、推定値の変動幅の少ない(3)メダカリヒガ、(11)ふんしん川は直前降水量の影響を受けず、安定的な流量が見込める。

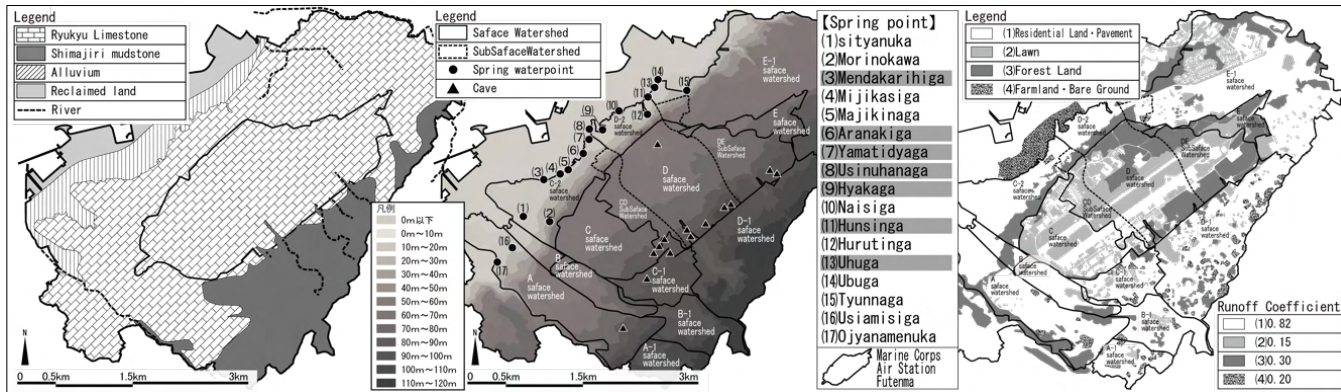


Fig. 2 Geology & classification of surface & subsurface watershed (注 9)

Table 2 Existing Land use

	Runoff Coefficient	A Watershed Area(ha)	A-1 Watershed Area(ha)	B Watershed Area(ha)	B-1 Watershed Area(ha)	C Watershed Area(ha)	C-1 Watershed Area(ha)	C-2 Watershed Area(ha)	CD Watershed Area(ha)	D Watershed Area(ha)	D-1 Watershed Area(ha)	D-2 Watershed Area(ha)	DE Watershed Area(ha)	E Watershed Area(ha)	E-1 Watershed Area(ha)
(1)Residential Land・Pavement	0.82	108.7	36.0	42.8	65.3	60.9	39.4	83.2	29.1	30.7	148.0	45.2	23.9	5.4	235.0
(2)Lawn	0.15	7.0	0.0	11.7	0.3	58.8	6.3	0.0	14.6	77.4	16.3	1.2	23.8	11.5	54.3
(3)Forest Land	0.30	52.7	3.4	16.9	6.6	4.9	5.7	18.7	0.0	66.7	19.8	15.3	44.0	23.5	49.3
(4)Farmland・Bare Ground	0.20	12.8	5.5	0.0	12.5	0.0	7.7	2.0	0.0	0.0	22.3	0.0	0.0	0.0	3.3
Watershed Area	-	181.2	44.9	71.4	84.7	124.6	59.1	103.9	43.7	174.8	206.4	61.7	91.7	40.4	341.9

各湧水口の推定式と流出特性及び地下構造

前述で得られた推定式の各項の寄与率注 13)より、長期及び短期降水量累計における湧水の流出特性を明らかにし、地下構造を推測する為、三角図を用いて Type 別に 3 つに分類した注 14) (Fig. 3)。更に、この分類から推測される地下構造を Fig. 4, 5, 6 に模式的に示す。

Type I: 定数項寄与率が高い湧水口(3)(6)(9)

Type I は、湧水日流量に於ける定数項寄与率が高い湧水群で、長期及び短期に関わらず降水量の影響をあまり受けず常時湧水が安定して流出している事を示している。一般に自由水面をもつ湧水の水量は地下水水頭の高さの変動によって圧力差を受けて変動する注 15)。そのことから湧水の背後につながる地下構造は、いくつかの水盆の中でも相対的に大きな地下水盆に接続し、水頭差が生じにくい為、安定的に水が流れ出す構造をもつ事が推測できる (表面積が広い地下水盆から湧水が出るタイプ、Fig. 4 Type I ①)。また、表面積が狭い場合、その他の湧水に比べ深い層からの流出になっていると推測できる (水盆の深い位置から湧水が出るタイプ、Fig. 7 Type I ②)。Fig. 3 に年平均流量を推計して示しているが、流量の多い(8)ウツヌナガ、(9)ヒヤカ、(6)アラナキ、(7)ヤマチヂヤガ、(11)フンシん川は、Fig. 3 より安定的な流量が見込める湧水(3)メダカリヒガは積極的な保全が求められる。

Type II: 長期降水量累計寄与率が高い湧水口(11)(13)

Type II は、湧水日流量に対して長期降水量累計の寄与率が高い湧水群である。Type I と比べて、11月~1月で5月~9月の半量くらいに流量が減り、季節変動が大きいことが確認できる。また、湧水も比較的安定した流量を保持できると考えられるが、Type I との違いは、地下水の貯留構造にあると推測される。Type I では地下水盆から主に流出しているのに対して、Type II では流出特性から、地下水盆は相対的に小さく、厚い琉球石灰岩の帯水層に貯留した地下水が浸透する事によって流出している (層が厚く表面積が小さい地下水盆から湧水が出るタイプ、Fig. 5 Type II ①)、もしくは上部の厚い琉球石灰岩層を浸透し水盆に貯留後比較的浅い層の水脈からの流出 (層が厚く地下水盆の浅い位置から湧水が出るタイプ、Fig. 5 Type II ②) が推測される。Fig. 6 より、(13)ウフガは日あたり 40~60mm の強い降水時には、直前降水量の影響を受けて湧水量の変動を示すが、(11)ふんしん川は、直前降水量の影響を受けず、湧水量は年間通じた緩やかな季節変動を見せる。量の多い(8)ウツヌナガ、(9)ヒヤカ、(6)アラナキ、(7)ヤマチヂヤガ、(11)フンシん川は、Fig. 3 より安定的な流量が見込める湧水(3)メダカリヒガは積極的な保全が求められる。

Type I-II 融合型: 定数項と長期寄与率が高い湧水口(8)

寄与率で単独で突出せずに、複数の項が拮抗するタイプも確認された。これは石灰岩厚や水盆形状、湧水口との接続関係で、Type I, II 双方の要素を持っていると推測される。

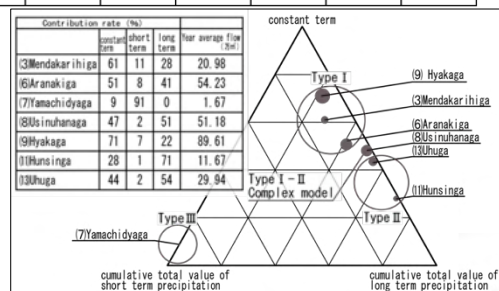


Fig. 3 ternary diagram of each spring water

(3) $y=347.92^{***}+2.52D_{10}^{***}+0.60D_{90}^{***}$ (R²=0.77)
 (6) $y=765.09^{***}+13.20D_{10}^{***}+3.07D_{90}^{***}$ (R²=0.57)
 (9) $y=1739.67^{***}+33.54D_{10}^{***}+6.72D_{90}^{***}$ (R²=0.76)

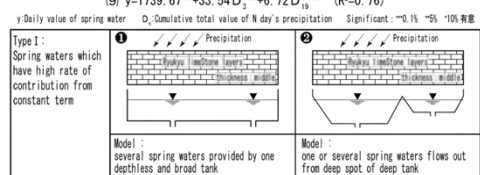


Fig. 4 Assumed pattern of Type I

(11) $y=90.09+1.10D_{10}^{***}+0.46D_{90}^{***}$ (R²=0.51)
 (13) $y=362.85+1.38D_{10}^{***}+1.04D_{90}^{***}$ (R²=0.77)

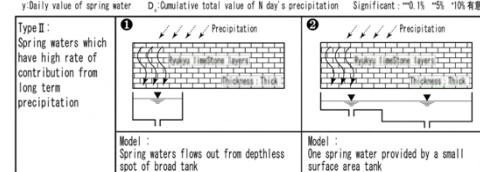


Fig. 5 Assumed pattern of Type II

Type III：短期降水量累計寄与率が大きい湧水口(7)

Type IIIは、短期降水量累計寄与率が大きく直前降水の影響を受け易い湧水群である。降水直後は比較的短時間で湧水量が急増し、その後は緩やかに減少するといった河川の流量変動に似た傾向を示す(Fig.6)。これは、湧水口直前で地表水が流入し直接流出として湧出している、又は琉球石灰岩台地の特質として形成された洞窟への流入や大きな水脈など地下河川が存在する事が推測される注16)。

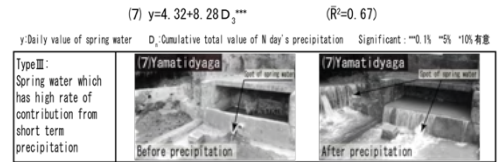


Fig. 6 Assumed pattern of Type III

2つの地下断面図と推定した Type 別地下構造の妥当性の検証

前節で推計した Type 別地下構造を検証する事は、ボーリングデータ等がなく困難であるが、現在、行政が唯一把握している地下断面図(2つの断面図 Fig. 7、断面位置は Fig. 9)と前節で推定した Type 別地下構造を比較し考察を行った。具体的には Fig. 7 より、各湧水地点の背後につながる琉球石灰岩層の各断面における層厚及び平均層厚を計測し、地下水盆を示す範囲より水盆の深さ及び幅によって水盆の形状の特定を行った(Table 3)。

B-B' 断面図より、Type I 定数項寄与率が大きい常時安定した湧水が流出する湧水口で(3)メダカヒガ-及び(6)アラクガ-に接続する地下水盆では、表面積が大きく浅い地下水盆を有している(Type I の①)。その事から、降水によって地下水位の高さが変わらず、また、地下水の貯留が一定程度確保されており、安定的な湧水の流出がなされていると推測される。また、地下水盆は、南西側に向かって傾斜している事が読み取れ、(3)メダカヒガ-は深い位置からの流出であると推測される(Type I の①と②)。次に、(8)ウシヌハガ-及び(9)ヒヤカガ-に接続する地下水盆は、表面積が小さく深い地下水盆を有している。湧水口と断面図の位置関係から水盆の深い水底部に接続口が位置していると推測され、地下水位の高さ変動の影響が出にくい事が推測されるが、(8)と(9)の湧水の出方は異なるので今後断面図が増えることで検証されていくだろう。

Type II の長期降水量累計寄与率が大きい長期的な湧水の変動を示す湧水口(11)(13)では、相対的に石灰岩層厚が大きい事が読み取れる(Table 3)。Fig. 7 の2つの地下断面図からは、水盆の形成が見られない事からB-B' 断面図より海側に連続した水盆を形成、もしくは石灰岩そのものに帯水していると推測される。以上より、Type I、Type II とともに前節で推定した流出特性及び地下構造と概ね一致する。

Type III の短期降水量累計寄与率が大きい直前降水量の影響を受けやすい湧水口(7)では、不透水層である島尻泥岩の尾根線部に位置し、さらに石灰岩層が薄い事が Fig. 7 及び Table 3 より読み取れる。前節で推定した地下河川のような洞窟状は 2 つの地下断面図からは確認できなかった為、妥当性の検証は今後の課題である。

流域別水収支モデルの作成

前節までで各湧水口の推計式を作成した事により、日降水量(P)に対して、地表流出量(A2)、地下浸透量(PF-EF-A2+S)、湧水量(Q2)の関係から地下水総量が制御できる事が可能となった。これらを用いて、流域別水収支モデルを作成する。

流域別の基準となる地下水賦存量の推計

次に水収支モデル作成にあたり、過去のボーリングデータの地下水位を標準水位と仮定し、各流域の基準となる推定地下水賦存量を GIS 計測及び 1/2500 模型上の検討により求めた。それぞれ C 流域：338.67 万 m³、D 流域：198.92 万 m³、E 流域：409.01 万 m³と推計された。この値は、地質構造が類似する沖縄県宮古島の地下水賦存量の値とも近似する注17)。この値を基準として変動を求めた。

流域別湧水量(Q2)の推計方法 (Fig.8 黒折れ線)

流域水収支モデル作成において、C、D 流域下における主な湧水地点 7 地点においては、日別の湧水量を用いた。その他の小湧水地点については、流域別年間総湧水量の按分比より推定した注18)。

地下水量変化の推計方法 (Fig.8 各グラフ中央灰色折れ線)

日別地下浸透量は表面流出係数注19)に GIS により計測した土地利用用途別面積を乗じて浸透量を計算した。流域平均

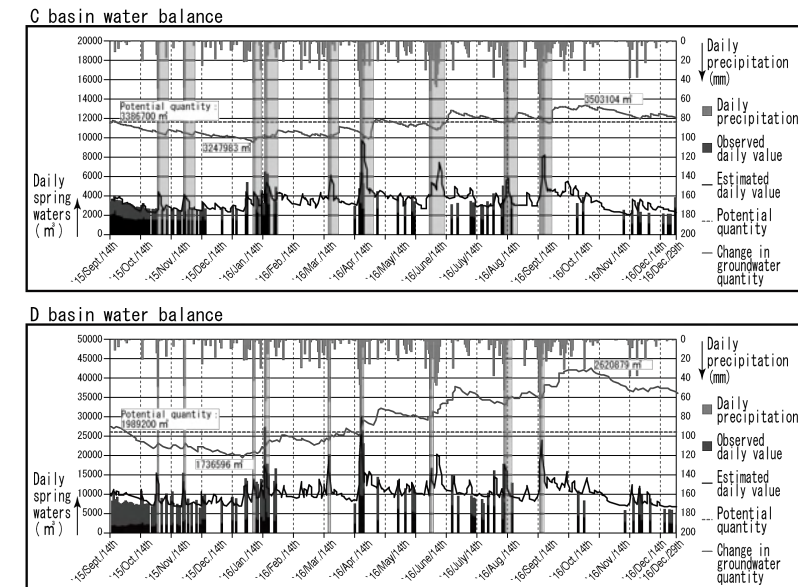


Fig. 8 Estimated virtual tank models of watersheds

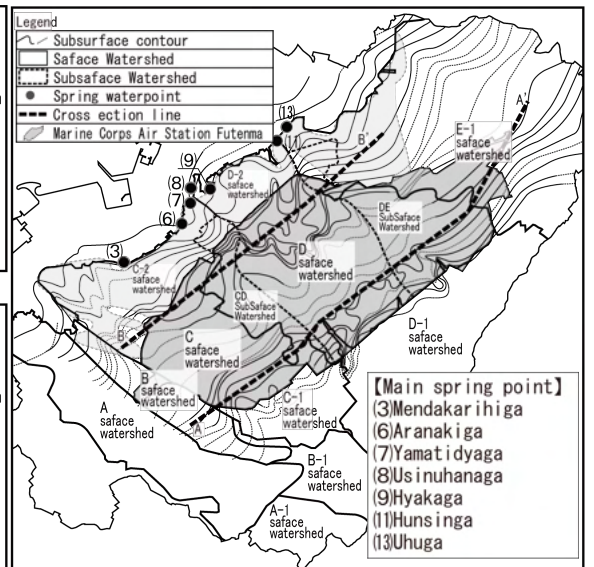


Fig. 9 Contour figure of impermeable layer

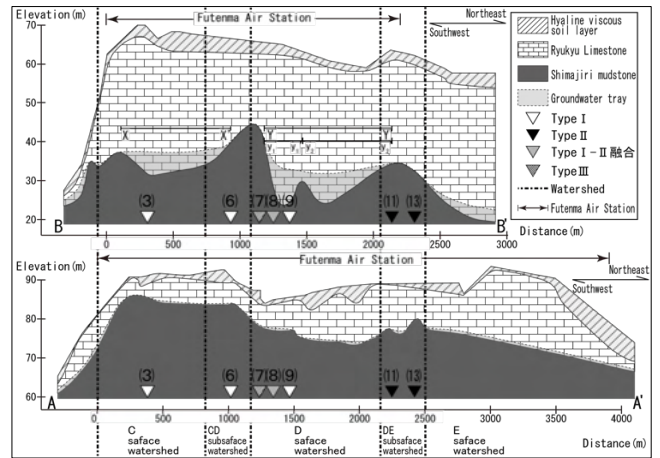


Fig. 7 Two cross sections of A-A' and B-B' (Reference Fig. 11 cross section line)

Table 3 Average thickness of Ryukyu limestone layer and area of water basin

Main spring point	A-A' cross section	B-B' cross section	Average layer thickness	Water basin depth	Water basin width	Type
(3)Mendakar ihiga	3.3	29.1	16.2	5.6	X-X'	I
(6)Aranakiya	5.4	22.9	14.2	*	822.7	I
(7)Yamatidyaga	5.7	19.2	12.4	*	*	III
(8)Usinuhana	6.8	27.4	17.1	6.7	[Y-Y'] 956.0	I-II
(9)Hyakaga	7.7	29.3	18.5	8.5	[Y-Y'] 668.5	I-II
(11)Hunsinga	11.7	26.8	19.2	*	*	I
(13)Uhuga	8.3	27.4	17.9	*	*	II

* 2 軸断面図からは、水盆の深さ及び幅が測定できない unmeasurable 単位 (m)

層厚と日透透能力の関係より算出された値を過日降水量として算出した^{注20)}。これに対し、地下水賦存量を年平均値とした。以上の結果より、日別の地下水貯留量変化 (Fig. 8 灰色折れ線) を求める事が可能となり C 及び D 流域における流域水収支モデルを作成した。

流域別水収支の特性

C 流域 (流域面積 324.1 万 m²) : C 流域の推定地下水賦存量は 338.67 万 m³ となる。日降水量に対して、約 10.2 日遅れて地下水位が増加する変動を示す (Fig. 12 灰色折れ線、Fig. 12 網掛け薄灰色)。一方の湧水流出特性 (Fig. 8 黒折れ線) は、地下水貯留量の変動に追従する傾向が確認できる。日降水量が 40 mm を超える降雨強度が強い日には表面水の流入があり、湧水量にも変動がみられる。流域全体で降水後約 3.0 日で湧水量が増加する傾向がみられた (Fig. 8 網掛け濃灰色)。流量が安定的であり、また地下水賦存量が多い事から長期的に安定的な水源としての積極的な保全検討が求められる。

D 流域 (流域面積 577.7 万 m²) : D 流域の推定地下水賦存量は、198.92 万 m³ となる。日降水量に対して、3.3 日遅れて地下水位が増加する変動を示す (Fig. 8 灰色折れ線、網掛け薄灰色)。D 流域では、地下洞窟そのものへの表面水の混入も多く、湧水の流量は極めて極端に変動する。特に日降水量が 40 mm を超えるような降雨強度が強い時には、急激な湧水量の増加がみられ、流域全体で降水後約 1.4 日で湧水量が増加する傾向がみられた (Fig. 8 網掛け濃灰色)。C 流域と比較すると、流量が不安定で地下水賦存量も相対的に少ない事がわかる。

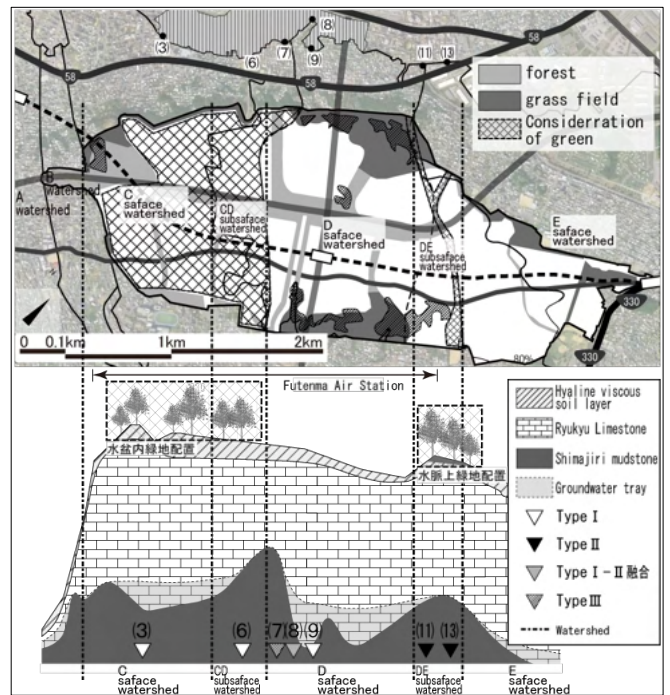


Fig. 10 Greening plan with considering spring type and watershed

第 2 段階の緑地の配置方針について:

跡地利用計画の緑地配置の検討における配慮事項の提案

第一段階の成果より、1) Type I と C 流域の広場状緑地計画では、芝地の量的誘導が必要である。これらの湧水では、地下水盆地の表面積が広い地下タンクを共有している為、浸透した降水は最終的に同じタンクに集水される (Type I (3)(6)(9)、Type I-II 融合型(8)) に形成されている地下水盆地 (Fig. 14)。したがって、広場状緑地は流域上のどの場所にあっても問題はない。しかしその一方で跡地利用における地上上部の土地利用については、既報 (参考文献 9)) より C 流域の地下水の供給量と需要量^{注21)} に差がなく逼迫した状況である事から需用量を考慮した湧水量を担保する為の芝地の量的な計画配慮が求められる。2) Type II と DE 流域の広場状緑地計画では、地下水脈上の直接的な芝地配置の誘導が必要である。これらの湧水では、琉球石灰岩中の帯水層に地下水が貯留した後水脈を通して流出すると推測される (Type II (11)(13)) のように水盆地を形成せず水脈を通して流出する湧水 (Fig. 10)。その為、水脈上部で建造もしくは舗装がなされた場合、湧水は直接影響を受ける。このような地下構造を有すると推測される場合においては、水脈上部の直接的な芝地配置の計画配慮が求められる (Fig. 10)。

計画策定支援研究としてのアクションリサーチの経緯

本研究は、H27 年度より研究室で調査分析を行い、結果を共有する形で行政機関、地権者 (地主会、若手の会)、市民代表 (NBIM) と意見交換を行いながら進めてきた。地下水保全の方向性については一定の共有認識があるものの広場状緑地配置の方針については有識者検討会議間で見解が割れており、特に著者らは平成 27 年度の自然部環境部会の立場から地下水保全に向けて、調査に基づいて、流域別の広場状緑地配置の必要性、特に C 流域での芝地量の確保について、事務局を通じて公園懇談会に何度か申し入れていた。しかし、公園懇談会の理念は「基地跡地の中心に大規模緑地を」として、基地中央に広場状緑地を配置 (D 流域中心で配置) する検討が進んでいた^{注22)}。地元の大学として、将来の水問題未だに防く事は、重要な責務であった。事務局をはじめとした関係者への広場状緑地計画の流域別検討の重要性について、事前説明を徹底し、地主会や市民等それぞれの利用団体からも意見を聞いて調整を進めた。この過程で、有識者及び地主会、農業組合の方々から推計した流出特性について地域の経験的な湧水の流れと合致するとコメントを受けた^{注23)}。最終的な土地利用計画の実現にあたっては、流域別の地下水需要や流出特性を考慮し検討すると検討会の合意を得、実際の行政計画の中に方針が位置付けられた。これが本研究の計画策定支援研究面での成果である。

本研究の成果

本研究の成果は、普天間流域下において湧水量実測調査 (計 489 回) を継続した事で、①各湧水群の降水量と湧水量の関係の説明する応答モデルを作成し、日流量変化を概ね再現できるモデルが得られた事、②、①により現在ほぼ唯一の水収支と地下構造の合理的な推定根拠となっている事、③これにより、基地跡地利用の 100ha の大規模緑地計画の配置計画に対して、根拠のある配慮事項の提案を行える事、④及び計画策定支援研究としてこれらを調整し行政計画に反映してきた事が成果である。

注 5) 琉球石灰岩台地の特性では、地表における水量の変化を表す D₁ は地表に河川など表面貯留を形成しない為、無視できる。隣接小流域からの地表流入 A₁ は、琉球石灰岩台地上では一日の浸透量が 1650 mm/日にも及ぶ為、降水が地表に留まらな、そこで下水道へ直接表面流出した量以外は浸透すると仮定できる。D₂ は、琉球石灰岩中の空隙率が 10% である事、不透水層との間に鍾乳洞を形成する為、土壌中の水の流動方向は常に鉛直下向きに力がかき、不飽和状態であると考えられる為無視できる。

注 6) 既報にて緑地率算出にあたり、宜野湾市:平成 18 年度宜野湾市自然環境調査報告書 3-6 より、(1)宅地、舗装道路、(2)芝地、(3)樹林地、(4)畑地・裸地の土地利用分布図をベースに航空写真より抽出した緑を重ねて面積を計測した。裸地として学校等のグラウンドで大きな面積を占める箇所については追加して計測を行った。

注 7) しかし、基地跡地は周囲を市街化区域に取り囲まれており、かつ跡地中央に沖縄本島中南部を縦貫する鉄道の新駅新設が予定されているため、開発ポテンシャルが高いことから、基地跡地全てが開発適地となり、現状と比較して非被覆地割合が減少することが予想されている。そのため、本研究では全域が市街化したとしても湧水量を確保できるようにすることを前提としている。実際に、那覇市首里飯保を対象とした既存の調査では、市街化により、地下浸透量が 1/3 程度減少することが明らかになっている (参考文献 14)。

注 8) 普天間飛行場が立地している C-E 流域の内、C 及び D 流域は、中間流出となる河川との接続はなく、すべて湧水としての流出である。

注 9) Fig.4 の地質情報は「宜野湾市史第 9 巻資料編 8 自然」p.94、流域分類情報は「平成 18 年度自然環境調査報告書 3-5」、洞窟情報は「宜野湾市史第 9 巻資料編 8 自然」p.165」より引用し、図面作成を行った。湧水地点は「平成 18 年度自然環境調査報告書 3-8」の湧水リストを参照し、現地調査により位置を特定し図面にマッピングを行った。

注 10) 現地調査では短期間に降水強度が強い場合、地表水の流入や直接流出等によって、流量が急激に増加する様子が確認された。

注 11) 地元の地下水を利用する農家の方々によると、湧水は降雨後 1~3 ヶ月程度の長期的な変動を示すがリアルタイムで得られた。更に、現地調査では、長期的な変動に限らず、降雨後 1~2 日、早い湧水で数時間後の流量が確認された為、当日から過去 90 日の累計降水量を用いて、D₁~D₉₀ で設定した。

注 12) 参考文献 8) で、降水量と湧水量の間の過程をフックのツツとしく内部構造を問わずに分析可能な応答モデルとして、D₁~D₉₀ で設定した。

注 13) 日別降水量及びその累計値は、降水量ゼロの度数が非常に高く、左に向かうにつれて度数が低減するに反比例して分布する。そのため、寄与率を求める際には、降水量の平均値ではなく、調査期間の日別降水量 D₁~D₉₀ の、それぞれの中央値を用いて、推計値に代入した。

注 14) 湧水の出力特性分析では、各要素が拮抗する関係、各要素寄与率等がそれぞれ 33% となる。33% が拮抗する関係にある相反変数の中で、第一寄与率と第二寄与率で 10% 以上の差があるものについては、大きい方の変数による影響が卓越すると考え、そちらにタイプ分けを行った。

注 15) 菅原 (1972) によって提案されたクワザル基本形は、孔の大きさと水深の高さに比例して流量が増加する関係を示しており、 $q = \lambda h (g/q)$ (流量、 λ : 口係数、 h : 水深)。

注 16) 実測調査の中でも、降雨直後の流量の急増、水質の濁り及び臭いなどが確認され、流動特性結果と一致する。

注 17) 地下水の大きさ、湧水口の深さ、地下水の不透過層の深さや形状で決定されるが、宮古島の地下水盆地について、宜野湾の C-E の 3 流域とほぼ同様の流域面積 (12km²) の、地下水の貯留量は、仲原ダム (流域面積 13.87km²) で 1330 万 m³、福里ダム (流域面積 11.84km²) で 1270 万 m³ となっており、本調査での推定値に近い。

注 18) 地下水地点と計測困難な湧水は参考文献 5) を元に按定した。既存の調査に基き、C 流域ではメタカヒカヒカを基準とし按定係数を 1.30、森の川 0.11、ジカガ 0.05、D 流域では、ヒカガヒカを基準とし按定係数を 1.30、ヒカガヒカ 0.14、747カガ 1.84 とした。

注 19) 湧水流出係数は、宅地、舗装:0.82、芝地:0.15、樹林地:0.30、畑地:0.20

注 20) 表面地盤の琉球石灰岩層における浸透能力は、参考文献 15) より 1650mm/日と検定されており、本地区においても類似した地質構造である事から、浸透した降水が自由水面に到達する日数を流域別の石灰岩の平均層厚から算出し過日降水量とした。流域別でそれぞれ、C 流域: 10 日、D 流域: 12 日、DE 流域: 13 日とした。

注 21) 参考文献 9) にて報告、流域別の地下水需要量は C 流域:83.0 万 m³/年、D 流域: 175.4 万 m³/年、E 流域:15.0 万 m³/年である。

注 22) 公園懇談会にて、地下水の独自調査もなされおらず、また、実測を伴った当方の検討結果の考慮もなされおらず、ランドスケープ・インシアブという理念が先行した計画案であった。

注 23) 農業組合との意見交換にて、将来の農業利用に向けて水質の維持及び需要量を考慮した流域別の水収支モデル作成の必要性についての意見も頂いた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Hiroko ONO, Yuya ENOKAWA	4. 巻 2019
2. 論文標題 Study for Sustainable Development in Watershed: Case Study of Adjustment between OYAMA Land Readjustment Project and FUTENMA Air Base Development Plan in Okinawa, Japan Urban Area, Okinawa Prefecture: A Case of Asato River in South Central Part of Okinawa Pref	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 21st International Conference on Sustainable Water Management	6. 最初と最後の頁 887-890
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Hiroko ONO, Yuya ENOKAWA	4. 巻 12
2. 論文標題 A Planning Process Review of Adjustment among Large-scale Developments within same Watershed Area, in case of reuse Fundamental Plan of the Marine Corps Air Station Futenma in Okinawa Pref., Japan	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The 12th International Symposium on Architectural Interchanges in Asia	6. 最初と最後の頁 157 - 162
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 栄野川 優也, 小野 尋子	4. 巻 83 (748)
2. 論文標題 地下水流出特性の解明と跡地内大規模公園の広場状緑地配置に関する配慮事項の提案	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本建築学会計画系論文集（日本建築学会）	6. 最初と最後の頁 1057 - 1065
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 大城舜太, 小野尋子
2. 発表標題 駐留軍用地跡地開発による湧水及び地下水への影響 -西普天間住宅地区内湧水を対象として-
3. 学会等名 日本建築学会九州支部
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 小野尋子、 榮野川優也、大城舜太
2. 発表標題 西普天間住宅地区開発による水循環の変化と開発における保全方策の実態と課題 -普天間飛行場跡地利用計画における緑地計画に関する提案型 研究その 13-
3. 学会等名 日本建築学会九州支部
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 小野 尋子 , 榮野川 優也
2. 発表標題 シンガポールのイギリス軍用地返還跡地における緑地の活用とビジネスパークの事例研究 普天間飛行場基地跡地計画における提案型研究その12
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 又吉 真太郎 , 小野 尋子
2. 発表標題 駐留軍用地跡地開発による湧水及び地下水への影響 沖縄県宜野湾市西普天間住宅地区を対象として
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 栄野川 優也 , 小野 尋子
2. 発表標題 大山土地区画整理事業の緑地配置案を踏まえた普天間飛行場の緑地配置の提案 普天間飛行場跡地利用計画における緑地計画に関する提案型研究その11
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 栄野川優也、小野尋子、大城舜太
2. 発表標題 西普天間住宅地区開発における涵養方策の提案と効果に関するアクションリサーチ -普天間飛行場跡地利用計画における緑地計画に関する提案型研究その15-
3. 学会等名 日本建築学会九州支部
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 又吉真太郎,小野尋子
2. 発表標題 駐留軍用地開発による湧水及び地下水への影響に関する研究 -西普天間住宅地区を対象として-
3. 学会等名 日本建築学会九州支部研究報告会 (58) 437 - 440 2019年03月
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 栄野川優也,小野尋子
2. 発表標題 沖縄県宜野湾市大山土地区画整理事業の緑地配置案別流域湧水量に関する研究 普天間飛行場跡地利用計画における緑地計画に関する提案型研究 その 10
3. 学会等名 日本建築学会九州支部支部研究会 (58) 445 - 448 2019年03月
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 小野 尋子, 榮野川優也
2. 発表標題 沖縄県宜野湾市大山土地区画整理事業における湧水を活用した緑地配置の検討 普天間飛行場跡地利用計画における緑地計画に関する提案型研究 その 9
3. 学会等名 日本建築学会九州支部支部研究会 (58) 441 - 444 2019年03月
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 小野 尋子, 榮野川優也
2. 発表標題 シンガポールのイギリス軍用地返還跡地における緑地の活用とビジネスパークの事例研究 - 普天間飛行場基地跡地計画における提案型研究 その 12-
3. 学会等名 日本建築学会北陸大会
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 榮野川優也, 小野 尋子
2. 発表標題 大山土地区画整理事業の緑地配置案を踏まえた普天間飛行場の緑地 配置の提案 - 普天間飛行場跡地利用計画における緑地計画に関する提案型研究 その 1 1 -
3. 学会等名 日本建築学会北陸大会
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 榮野川優也 小野 尋子
2. 発表標題 普天間飛行場基地跡地計画の緑地計画における提案型研究
3. 学会等名 日本建築学会九州支部 (建築九州賞 受賞講演) (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小野尋子 榮野川優也
2. 発表標題 流域圏における大規模開発の相互調整の実態からみる課題 普天間飛行場基地跡地計画における提案型研究 その7
3. 学会等名 日本建築学会全国大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 榮野川優也 小野尋子
2. 発表標題 普天間流域下の将来需要推計からみた跡地利用の緑地計画における配慮事項の提案 普天間飛行場基地跡地 計画における提案型研究 その8
3. 学会等名 日本建築学会全国大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

特になし

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------