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

－ 普天間飛行場基地跡地計画における緑地計画に関する提案型研究その2 －

A RESEARCH BASED PROPOSAL OF POINTS FOR MAKING GREEN OPEN SPACE PLAN WITH
CONSIDERING CHARACTERISTIC OF SPRING WATER FLOW IN RETURNING FUTENMA BASE

－ A Proposal-based research about the open space planning of the reuse fundamental plan of the Marine Corps Air a
Station Futenma in Okinawa pref., Japan vol.2 －

栄野川 優也^{*1}, 小野 尋子^{*2}

Yuya ENOKAWA and Hiroko ONO

This study aims to find care points of greening plan in reuse plan of Marine Corps Air Station Futenma. By using observed daily value of each spring waters (total 489 times), we developed estimation formulas of daily spring waters and cumulative total value of short & long term precipitation, And then using these estimation formulas, we presumed subsurface structure. Finally, we simulated water balance models of each watershed. Concretions are follows: 1) Developed estimation formulas of daily spring waters and precipitation by multiple regression analysis. 2) Using 1), we presumed 3 types subsurface structure. 3) Proposed care points of greening plan.

Keywords : Marine Corps Air Station Futenma, Groundwater balance, Daily flow rate, Multiple regression analysis, Subsurface structure, Response model

普天間飛行場, 水収支, 日流量, 重回帰分析, 地下構造, 応答モデル

1. 研究の背景

宜野湾市普天間飛行場跡地利用計画として、平成 25 年 3 月に「全体計画の中間とりまとめ」¹⁾が策定され、その中で地下水保全の方針がまとめられた。しかしその後の検討の中で、地下水をどの程度保全すべきなのかという量的な検討や、流域別の検討については不十分であった。具体的には、平成 27 年 8 月時点まで大規模公園面積 100ha の量的根拠及び緑地と地下水涵養の関係についての調査検討は、行政でも民間でもなされていなかった。「中間とりまとめ」の中では地下水の保全の必要性については位置づけられているものの、同方針策定後から平成 27 年 8 月の間に、①地下水涵養の観点ではどの程度の広場状緑地^{注 1)}の保全が必要か(必要緑地の量的検討)、②地下水の現在および将来的な需要をどの程度見込んで地下水を涵養しなければならないのか(地下水の現在および将来需要面での検討)、③複数ある流域の中でどの流域で地下水確保が重要なのか(緑地配置の流域別検討)等についての検討がなされていなかった。そこで、著者らは平成 27 年度の「普天間飛行場跡地利用計画検討」において、地下水の涵養源となる普天間飛行場内の緑地と湧水量の関係を解明し、今後の跡地利用計画の中で広場状緑地計画として配慮する必要性について独自の調査を元に提言してきており^{注 2)}、それらは方針として行政計画の中に位置づけられた。本稿は、続く平成 28 年度調査分析と計画策定支援の成果についてである。行政が策定する基地跡地利用基本構想につ

いて計画策定支援型の取り組みを著者らが実施せざるを得なかった経緯は、大きく 2 点ある。1 点目は平成 24 年 3 月に制定された「沖縄県における駐留軍用地跡地の有効かつ適切な利用の促進に関する特別措置法（以下、特措法）」における基地跡地利用特有の時間的制約である^{注 3)}。2 点目は、1 点目の時間的制約を考慮すると環境配慮については返還前の早期の検討が重要にも関わらず基地内に立ち入れないことから、現在主流の地下水を含む水収支モデルの解析手法であるタソクモデルを使用できないという点である。実際の大規模開発では、法に基づく戦略的環境アセスメントが実施される。しかし、先行して返還された跡地利用計画では、返還後基本構想から基本計画へと急速に移行する為、戦略的環境アセスメントによって検討内容を根本から変更する事は難しい状況であった^{注 4)}。現状では普天間飛行場を涵養源とする地下水が、海岸段丘下で湧水となり、活発な農業用水利用がなされており、基地跡地の開発の仕方いかんでは多大な影響を与える事が明らか^{注 5)}、事実に基づく慎重な検討が求められる。しかし、1 点目の特措法の時限縛りにより一度返還されてしまうと環境配慮を含めた時間をかけた協議が難しいという矛盾を抱える。

以上より、返還前の立ち入りが不可能な基本構想検討段階において、可能な限りの環境配慮と検討が重要となる。将来にわたる水紛争を未然に防ぐ為、また現在主流の調査手法が使えない事より、大学の中立的で試行的な調査研究による計画策定支援が必要となった。

^{*1} 琉球大学大学院理工学研究科 博士前期課程

^{*2} 琉球大学工学部 准教授・博士(社会工学)

Graduate School of Civil Engineering and Science, Univ. of Ryukyus, B.Arch.
Assoc. Prof., Faculty of Civil Engineering, University of Ryukyus, Ph.D.

2. 研究の目的と方法

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。また計画策定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、タンクモデル等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、ベクチャーリン(1963)²⁾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。

$$\pm D_1 \pm D_2 + \mu \frac{\Delta H}{\Delta t} = P + C - E + \frac{A_1 - A_2}{F} + \frac{Q_1 - Q_2}{F} + \frac{I_0 - I_{ret}}{F} \quad (i)$$

$\pm D_1$: 地表における水量の変化、 $\pm D_2$: 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。)
 $\frac{A_1 - A_2}{F}$: 地表流入量、 A_2 : 地表流出量、 F : 水収支地区の面積
 $\frac{Q_1 - Q_2}{F}$: 地下水流入量、 Q_2 : 地下水流出量
 $\frac{I_0 - I_{ret}}{F}$: 灌漑流入量、 I_{ret} : 灌漑流出量で還元水となる
※以上の各成分の単位はすべて水柱高 mm で表される

式(ⅰ)を琉球石灰岩台地の特性及び水収支期間を考慮し D_1 、 A_1 、 D_2 は無視できるとした^{注6)}。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 Q_1 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。その一方で、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。

$$\mu \frac{\Delta H}{\Delta t} F = PF - EF + S - A_2 - Q_2 \quad (ii)$$

$\mu \frac{\Delta H}{\Delta t} F$: 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
 A_2 : 水収支地区の地表流出量、 Q_2 : 水収支地区の地下水流出量
※以上の各成分の単位はすべて m^3/day で表される

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。調査解析のフローと本研究の構成を Fig.1 に示す。各湧水の実測調査結果を基に4章で実測調査と応答モデルから地下水日流出量 Q_2 を導出し、5章では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6章で参考文献9)の既報の結果と本稿4章の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。以上すべての結果を踏まえて7章で、湧水口のタイプ及び流域の特性を踏まえた広場状緑地計画における配慮事項を提言し、行政や地権者らと複数回協議を行った(8章)(Fig.1)。

2-1 各項目に対する詳細な調査手法と分析方法

4章の降水量に対する地下水量の応答モデルの作成に当たっては、普天間周辺の主な湧水地点(7地点)において平成27年9月14日より1年半(489回)の流量実測調査(容積法及び流速法)と降水量の関係性を分析した。湧水量は長期降水量累計と短期降水量累計によって説明ができると仮説を設定し、気象庁沖縄気象台胡屋の日別降水量データを用いて、 $D_1 \sim D_{90}$ で表す累計降水量と流量実測データの関係について重回帰分析で式を導いた(Fig.2)。降水との関係から得られた推定値と実測値よりハイドログラフを作成した。5章では得られた推定式の各項(定数項/変数1:短期降水量累計/変数2:長期降水量累計)の寄与率より、湧水口別の流出特性を明らかにし、地下構造を推測す

Fig.1 Research composition

Fig.2 Derivation schemes of estimation

る為にType別に分類を行った。その後Type分けの妥当性を検討する為に、現在、行政が把握している地下断面図(2断面)と比較し考察した。6章では複数の湧水を統合し地下水を含む流域水収支を4章及び既報の結果を用いて推計し、流域別のハイドログラフ、ハイドログラフ、自由地下水量の変動を分析した。これらを踏まえて7章では湧水口のType別地下構造及び流域水収支を考慮した、地上の広場状緑地配置の配慮事項の提案を行い、行政や地主らと協議の場を持った。

3. 対象地の概要

3-1. 宜野湾市の地形・地質、表流水及び地下水流域の分類

宜野湾市の地形は北西側を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拔の高い長田付近から2つの段丘を形成して海に至る(Fig.3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となっている³⁾。GISで計測すると^{注7)}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8)}。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に地下で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.3の地下水)^{注9)}。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.4)。

Fig.3 Cross section of Topography and geology

3-2. 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⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾において行われた流量調査結果(Table 2(N₁))がある。し

Fig. 4 Geology & classification of surface & subsurface watershed 注10)

Table 1 Land covered ratio of each watershed

	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	8.0	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	6.8	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

かし、既存の調査は、①観測日が月に1回程度であること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 11)}、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. 4、Table 2) 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。

Table 2 Number of actual measurements of each spring

	(3) Mendakarihiga	(6) Aranakiga	(7) Yamachidyaga	(8) Usinuhana	(9) Hyakaga	(11) Hunsinga	(13) Uhuga	Total
Existing research (Times)	21	21	6	6	21	6	6	87
Original research (Times)	92	90	83	29	90	50	55	489

4. 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盆への貯留により、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 $D_1 \sim D_{90}$ を用いた^{注 12)}。

次に、実測値と降水量累計 ($D_1 \sim D_{90}$) 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 13)}。結果、次頁 Fig. 7 に示す通り、自由度調整済み決定係数 $R^2=0.51 \sim 0.77$ の推計式を得た。得られた式より、推計した日流量推計値は同図中、黒実線折れ線グラフ、日流量実測値は同図中、黒棒グラフで示してある。実測値と推計値のハットログラフの重なりもよく、再現性は高いと言える。また、推計値 (黒折れ線グラフ) の変動幅の少ない (3)メンダカリヒガ、(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。

5. 各湧水口の推定式と流出特性及び地下構造

4 章で得られた推定式の各項の寄与率^{注 14)}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 15)} (Fig. 5)。更に、この分類から推測される地下構造を Fig. 6, 8, 9 に模式的に示す。

Fig. 5 ternary diagram of each spring water

5-1. Type I : 定数項寄与率が高い湧水口 (3)(6)(9)

Type I は、湧水日流量にしろる定数項寄与率が高い湧水群である。これらの湧水は、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 16)}。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. 6 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. 6 Type I ②)。Fig. 5 に年平均流量を推計して示してあるが、流量の多い (8)ウシヌハナ、(9)ヒャカガ、(6)アナキガと、Fig. 7 より安定的な流量が見込める湧水 (3)メンダカリヒガは積極的な保全が求められる。

Fig. 6 Assumed pattern of Type I

5-2. 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

Fig. 7 Hyetograph and Hydrograph of springs

水群である。作成したパイログラフでも示すように、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. 8 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. 8 Type II ②）が推測される。Fig. 7 より、⑬ウフガーは日当たり 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ふんしん川の湧水量は直前降水量の影響を受けず、年間通じた緩やかな季節変動のみを見せる。

Fig. 8 Assumed pattern of Type II

5-3. Type I - II 融合型：定数項と長期寄与率大きい湧水口(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。

5-4. Type III：短期降水量累計寄与率大きい湧水口(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. 9)。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17)}。

Fig. 9 Observed pattern of Type III

5-5. 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. 10、断面位置は Fig. 13) 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. 10 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 定数項寄与率大きい常時安定した湧水が流出する湧水口で(3)メンダカリヒガ-及び(6)アナンキガ-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 (5-1 の 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)メンダカリヒガ-は深い位置からの流出であると推測される (5-1 の Type I の ①と ②)。次に、(8)ウシムナガ-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大きい長期的な湧水の変動を示す湧水口 (⑪⑬) 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. 10 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 とも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、さらに石灰岩層厚が薄い事が Fig. 10 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。

Fig. 10 Two cross sections of A-A' and B-B' (Reference Fig. 11 cross section line)

Table 3 Avarage thickness of Ryukyu lime stone 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)Mendakarihiga	3.3	29.1	16.2	5.6	X-X' 822.7	I
(6)Aranakiga	5.4	22.9	14.2	*	*	I
(7)Yamatidyaga	5.7	19.2	12.4	*	*	III
(8)Ushimunahaga	6.8	27.4	17.1	6.7	[Y-Y' 287.5, X-X' 956.0]	I - II
(9)Hyakaga	7.7	29.3	18.5	8.5	[Y-Y' 287.5, X-X' 956.0]	I
(11)Hunsinga	11.7	26.8	19.2	*	*	II
(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)

6. 流域別水収支モデルの作成

4 章において、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。Fig. 11 に手順を示す。

Fig.11 Procedure of developing water balance model

6-1. 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(5-5 同資料)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18)}。この値を基準として変動を求めた。

6-2. 流域別湧水量(Q₂)の推計方法 (Fig. 12 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、4 章の結果から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19)}。

6-3. 地下水量変化の推計方法 (Fig. 12 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20)}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。流域平均層厚と日浸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21)}。これに対し、6-1 の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. 12 灰色折れ線) を求める事が可能となり C 及び D

Fig.12 Estimated virtual tank models of watersheds

流域における流域水収支モデルを作成した。

6-4. 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)。湧水流出特性 (Fig. 12 黒折れ線) も、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 40mm を超えるような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. 12 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ことから長期的に安定する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. 12 灰色折れ線、網掛け薄灰色)。D 流域では、地下洞窟そのもの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. 12 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。

7. 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

5～6 章の分析結果より、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、地下水脈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)に形成された地下水盆地 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。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22)}に差がなく逼迫した状況であること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(面積:52ha)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緑地配置の誘導が必要である。これらの湧水では、石灰岩中の帯水層に地下水が貯留した後に水脈を通して流出すると推測される (Type II

Fig.13 Contour figure of impermeable layer

(11)(13)のように水盆を形成せず水脈を通して流出する湧水)。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緑地配置の計画配慮が求められる (Fig. 14)。

Fig. 14 Greening plan with considering spring type and watershed

8. 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 (NBM) と意見交換を行いながら進めてきた。8 章では、本研究の計画策定支援研究としての取り組みと成果を整理する。これまで、各関係主体と累計 20 回の協議を重ねてきており、H27 年度は 9 回行った^{注 23)}。平成 28 年度は 11 回の各種団体と丁寧な調整を図った。なぜなら、著者らが関わった平成 27 年度「有識者検討会議：文化財・自然環境部会」及び平成 28 年度の「跡地利用計画策定有識者検討会議」とは別の検討会議となる平成 28 年度「普天間公園（仮称）懇談会」との連携に課題があった為である。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いた。著者らは調査に基づいて地下水保全のためには、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が必要である事について、平成 27 年度から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公園を」とあり、基地中央の D 流域に広場状緑地を配置する案で検討が進んでいた。地元の大学として、将来の水問題を未然に防ぐ事は、重要な責務であったため。事務局や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・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、地主会、農業組合の方々から推計した流出特性が地域の経験的な湧水の流れと合致するとのコメントも受けた^{注 24)}。最終的に平成 28 年度最後の検討会議にて、著者らの全ての調査結果報告書と模型を提出し、提案について検討会の中でプレゼンを行った。結果、広場状緑地計画では公園懇談会の基地跡地中央配置の広場状緑地計画素案 (D 流域案) を踏襲するのではなく、理念は継承しつつも、最終的な土地利用計画の

実現にあたっては、流域別の地下水水需要や流出特性を考慮し検討するとの検討会合意を得、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。

9. 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を継続した事で、①各湧水群の降水量と湧水量の関係を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。

謝辞

本研究は、行政や地権者、多くの地域の方々の御協力により研究を遂行する事ができました。この場を借りて感謝申し上げます。なお、本研究は、JSPS 科研費・基盤研究 C（課題名：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 科研番号 17K06714）の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) Okinawa Pref., Ginowan City, CYUKAN TORIMATOME (Midterm report of Comprehensive plan) 2013. 3
沖縄県、宜野湾市：全体計画の中間とりまとめ、2013. 3
- 2) Ichikawa, M.: Suimongakunokiso (Basics of hydrology), KOKIN shoin, p. 241, Apr. 1992
市川正巳：水文学の基礎, 古今書院, p. 241, 1992-04
- 3) Ginowan City, Ginowansi (Ginowan city history), vol. 9-8, 2000. 3
宜野湾市史編集委員：宜野湾市史第 9 巻資料編 8 自然、沖縄県宜野湾市教育委員会文化課、2000. 3
- 4) Heisei16nendo Ginowansisizenkankyouhoukokusyo (Ginowan City Official Report, Ginowan City Natural Environment Survey Report, Mar.) 2005
宜野湾市：平成 16 年度宜野湾市自然環境調査報告書
- 5) Heisei18nendo Ginowansisizenkankyouhoukokusyo (Ginowan City Official Report, Ginowan City Natural Environment Survey Reports, Mar.) 2007
宜野湾市：平成 18 年度宜野湾市自然環境調査報告書
- 6) Heisei22nendo Ginowansisizenkankyouhoukokusyo (Ginowan City Official Report, Ginowan City Natural Environment Survey Report, Mar.) 2011
宜野湾市：平成 22 年度宜野湾市自然環境調査報告書
- 7) Heisei24nendo Ginowansisizenkankyouhoukokusyo (Ginowan City Official Report, Ginowan City Natural Environment Survey Report, Mar.) 2013
宜野湾市：平成 24 年度宜野湾市自然環境調査報告書
- 8) TANAKA M and other.: Chiikikanyousuimongaku (Regional Environmental Hydrology), ASAKURA shoten, p. 103, Mar., 2016
田中丸治哉ほか：地域環境水文学 (地域環境工学), 朝倉書店, p. 103, 2016-03
- 9) Enokawa Y and Ono H., A Proposal-based Research about the Open Space Planning of the Reuse Fundamental Plan of the Marine Corps Air Station Futenma In Okinawa pref., Japan—An action research for discussing the necessity of the watershed-based open space plan under the consideration of the water supply demand structure in Ginowan Area —, Journal of Architecture and Planning (Transactions of AIJ), vol. 81, 729, pp. 2453-2462, 2016. 11
- 10) Enokawa Y and Ono H., A Proposal-based Research about the Reuse Fundamental Plan of the Marine Corps Air Station Futenma in Okinawa Pref., Japan—A Proposal of the watershed-based open space plan under the consideration of the water supply demand structure in Ginowan Area —, AIJ, Conference meeting, Urban Planning, 2016 (Aug.)
- 11) Ono H, Enokawa Y and Kawamoto R., A Proposal-based research about the reuse fundamental plan of the Marine Corps Air Station Futenma in Okinawa Pref., Japan : An action research from 2011 to 2016 vol.1, AIJ, Conference meeting, Urban Planning, 2016 (Aug.)

- 12) Enokawa Y and Ono H., A Proposal-based research about the reuse fundamental plan of the Marine Corps Air Station Futenma in Okinawa Pref., Japan :the relation of daily flow and precipitation, and character of each spring. , Okinawa Geography Society, Conference meeting, Special session,2016 (Dec.)
- 13) Enokawa Y and Ono H.,Clarification of groundwater balance in *Ginowan* watershed by multiple regression model of quantity of daily flows and amount of precipitation. AIJ-Kyusyu, Conference meeting,vol.,56,2017(Mar.)
- 14) Takazato Y and other. , The alterations in groundwater balance effected by artificial constructions in *Ryukyu* Limestone area, with special reference to the hydrogeology in *Shuri* Limestone Block, *Naha* City, *Okinawa*,Japan. Bulletin published by Science of Univ. of Ryukyus
- 15) Kuroda T and other., A case study of groundwater conservation measures in the Naha New Urban Development Project Area
- 16) Ono H and Enokawa Y., A Proposal-based Research about the Reuse Fundamental Plan of the Marine Corps Air Station *Futenma* in Okinawa Pref., Japan: Deduced Tank model Vol.3,AIJ, Conference meeting,Urban Planning,2017(Sep.)
- 17) Enokawa Y. and Ono H. , A Proposal-based Research about the Reuse Fundamental Plan of the Marine Corps Air Station *Futenma* in Okinawa Pref., Japan- A Proposal of the watershed-based open space plan under the consideration of Groundwater and Ground Environment in *Ginowan* Area Vol.4 ,AIJ, Conference meeting,Urban Planning,2017(Sep.)

注

- 注 1) 中間とりまとめでは、(仮称)普天間公園の 100ha の大規模公園の創設が計画されており、重要植生や文化財と一体的保全を行う樹林地の保全とそれ以外にイベント等を想定した広場状の芝地の計画がある。実際の基地跡地計画では、地下水の保全が方針として打ち出されており、その為の涵養方策としては、公園以外の民有地も含めた緑地の誘導や透水性舗装の活用も予想されるが、土地利用としての持続性より浸透設備に頼らない（浸透設備の残存能力を考慮しなくてよい）事から、地下水涵養源としては第一義的には、施設緑地内の広場状緑地で考慮すべきとの立場を本研究は取っている。本文中「広場状緑地」は施設緑地である大規模公園内の広場状緑地を指し、「緑地計画」は普天間飛行場跡地内の保全樹林等と公園部分を含む緑地全体の計画としている。
- 注 2) 検討と土地利用上の提案にかかる取り組みについては、参考文献 9) にて報告している。また、沖縄県・宜野湾市『普天間飛行場跡地利用計画策定調査業務委託報告書』、平成 28 年 3 月の中でも、II-16 ページにて、昨年度の著者らの調査を踏まえた提案を受けて、今後の基地跡地利用の考え方の中で「流域毎の水収支の傾向、流出量の算定と実測値の比較」が必要な検討事項として明記された。
- 注 3) 跡地利用特措法の既定により、引き渡し翌日から 3 年以内に土地区画整理の事業認可を受ける事が軍用地料相当の特定給付金が支給要件となる。返還に伴い国からの軍用地料が途絶える事から、供用開始となる時期までの代替措置である特定給付金の支給の可否は地主にとって大きな課題であり、返還後早期の計画立案が必要となる。その為、基地に立ち入る事ができない返還前でも、基本構想策定に向けての早期検討が求められる。
- 注 4) 沖縄県では、戦略的環境アセスメントが導入されており、開発案については基本構想段階で提示された複数案を比較しながら、より環境への負荷が少ないものを選択するが、基地跡地のように返還以前に立ち入りができない場合、返還前に検討される基本構想策定において環境配慮や予測が難しい。その為、環境負荷の軽減措置については後手に回ってしまう。実際に、先行して返還された隣接する「西普天間住宅地地区」(50.8ha)は、平成 27 年 3 月に返還され、同年 4 月から立ち入りが可能になったが、平成 26 年度中に戦略的環境アセスメントが実施されてしまった。その後、平成 27 年度調査の中で、基地内に観測溝を設け地下水位の変動や湧水口の常時流速計測が可能となり、高度なシミュレーションによる地下水の解析が可能となった。しかし、戦略的環境アセスメントによる検討案(2 案)の比較は、すでに立ち入り調査が難しかった平成 26 年度で終了してしまっており、その時点で跡地利用における主要な緑地の保全・創出の位置については概ね決定してしまいシミュレーションの解析を計画に反映できなかったという問題がある。
- 注 5) 参考文献 9) にて既報。年間約 260 万 m³の農業用水利用がある。
- 注 6) 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降水の浸透量が 1650 mm/日にも及ぶ為、降水が地表に留まらない。そこで下水道へと直接表面流出した量以外は浸透すると仮定できる為、無視できる。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の力が働き、不飽和状態であると考えられる為無視できる。
- 注 7) 既報参考文献 9) にて緑被率算出にあたり、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なった。
- 注 8) 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軌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、那覇市首里儀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 9) 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 10) Fig4 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上にマッピングを行った。
- 注 11) 現地調査では短期の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 12) 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事がヒアリングより得られた。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の急増が確認された為、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 13) 参考文献 8) で、降水量と湧水量の間の過程をブラックボックスとし内部構造を問わずに分析可能な応答モデルとしていることを参照し式を作成した。
- 注 14) 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、左に向かって度数が低減するグンベル分布する。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、推計式に代入し求めた。
- 注 15) 湧水の出力特性分析では、各要素が拮抗する場合、各要素寄与率が等分され約 33%となる。33%で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 Type 分けを行なった。
- 注 16) 菅原(1972)によって提案されたシグモイド基本形は、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説明しており、 $q = \lambda h(q: \text{流量}, \lambda: \text{口径係数}, h: \text{水深})$ 。
- 注 17) 実測調査の中でも、降雨直後に流量の急増、水質の濁り及び臭いが確認され、流動特性結果と一致する。
- 注 18) 地下水盆の大きさは、湧水口の深さと地下の不透水層基盤の深さや形状で決定されるが、参考文献 14) の宮古島の地下水盆について、宜野湾の C-E の 3 流域とほぼ同様の流域面積(12km²)での、地下ダムの貯留量は、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 19) 小湧水地点と計測困難な湧水は参考文献 5) を元に按分して求めた。既存の調査に基づき、C 流域ではシグモイドカーブを基準とし按分係数をシグモイド:1.30、森の川:0.11、シグモイドカーブ:0.05、D 流域では、ヒャーカーブを基準とし按分係数をヒャーカーブ:0.14、フレンチカーブ:1.84 とした。
- 注 20) 表面流出係数は、宅地・舗装:0.82、芝地:0.15、樹林地:0.30、畑地:0.20
- 注 21) 表層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た過日降水量とした。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 22) 参考文献 9) にて報告。流域別の地下水需用量は 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 23) 平成 27 年度のアクションプランの経緯については既報(参考文献 9))。
- 注 24) 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。

A RESEARCH BASED PROPOSAL OF POINTS FOR MAKING GREEN OPEN SPACE PLAN WITH CONSIDERING CHARACTERISTIC OF SPRING WATER FLOW IN RETURNING FUTENMA BASE

– A Proposal-based research about the open space planning of the reuse fundamental plan of the Marine Corps Air a Station Futenma in Okinawa pref., Japan vol.2 –

Yuya ENOKAWA ^{*1} and *Hiroko ONO* ^{*2}

^{*1} Graduate School of Civil Engineering and Science, Univ. of Ryukyus, B.Arch.

^{*2} Assoc. Prof., Faculty of Civil Engineering, University of Ryukyus, Ph.D.

This study aims to find out care points of greening plan in re use plan of Marine Corps Air Station Futenma.

Research methods were observed daily spring water flows, multiple regression analysis, analyzed out and in flow characters of each spring waters, and then assuming the subsurface structure.

At first, by using observed daily value of each spring waters (total 489 times), we developed estimation formulas, which described as form of multiple regression analysis formulas, of daily spring waters and cumulative total value of short & long term precipitation. The results were that these adjusted R² of estimation formulas are from 0.51 to 0.77, these mean that formulas could give explanations of existing circumstances. These estimation formulas are called response models in hydrology which explains interconnection of amounts precipitation and spring waters.

On Second, we analyzed out and in flow characters of each spring waters by response models. The results of this step, we got 3 types (subdivided in 4types) of out and in flow characters of each spring waters. Type I is spring waters which explain by constant term mainly. It means that these spring waters gush out stably and constantly, and so, it assumed these spring waters flow out from one depthless and broad tank. (Fig.6, spring water(3)(6)(9)) Type II is spring waters which explain by influence of long term precipitation mainly. It means that these spring waters flow around from 1 to 3 months behind precipitation, like very long and slow pace rivers. So we assumed these spring waters come from small surface area tank or the come from thick Ryukyu lime stones layer (Fig.8, spring water(11)(13)). Mixture type I and II is spring water (8). This spring water has both character of I and II. Type III is spring water influenced by short term precipitation. It means that the spring water flows out comparatively soon after rainfall, within few days. So we assumed the spring water is connected with cave and it works like a underground river. (Fig.9, spring water(7))

Considering our all results, we proposed and discussed to local government and land owners about the point of greening plan in reuse plan of Futenma. 1) Greening plan which located type I, Mixture Type I and II, and watershed C and D should be care for quantitative approach. Because these springs are assumed to be shared a depthless and broad underground tank, every precipitation will be penetrating and finally reach same water basin. So, the point of greening area is not a location but the enough quantity for recharging amounts of spring waters. (Fig.14 enough quantity greening in the same water basin, watershed C and D, type I) 2) Greening plan which located above the underground water vein, like type II and watershed D and E should be care for on-site approach. Because these springs are assumed be pooling precipitation in the gryke of Ryukyu lime stone layer, if the surface of this site be covered by buildings or be paved, it will be directory influenced to recharge spring water. (Fig.14 on-site greening above the underground water vain, watershed D and E, type II)

Conclusion of our proposal-based research is that our proposals were adopted in the official reuse planning as a policy in March 2017.

This work was supported by JSPS KAKENHI Grant Number JP17K06714.

(2017年10月4日原稿受理, 2018年3月6日採用決定)