



国際

沿岸レポート

PIANC世界会議と 拡張パナマ運河

九州大学 名誉教授 善功 企
(沿岸技術研究センター 参与)
九州大学 工学研究院 教授 中川 康之
(海域港湾環境防災共同研究部門)

1. PIANC世界航路会議の概要

2018年5月7日から同11日まで、パナマシティで開催された「第34回 世界航路会議 (World Navigation Congress)」に参加する機会を得た。日本から欧州(フランクフルト)経由で24時間以上かかったので、「やっと着いたか」という感じではあったが、時差の影響が少なく、良い選択であった。この会議は、「国際航路協会 (World Association for Waterborne Transport Infrastructure)、略称: PIANC」が4年に一回開催する国際会議であり、2014年のサンフランシスコでの第33回開催に続き、ラテンアメリカ地域では初めて開催された会議である。日本では、1990年に大阪でアジア地域最初の会議(第

表1 国別投稿論文数

	国 名	論文編数(割合)	備 考
1	アメリカ	56 (18.1%)	その他の国 (13か国): ポルトガル・スイス・スウェーデン・シンガポール・ニュージーランド・フィリピン・ロシア・ルーマニア・エジプト・ドバイ・イスラエル・コロンビア・ジャマイカ
2	オランダ	37 (11.9%)	
3	パナマ	32 (10.3%)	
4	ベルギー	26 (8.4%)	
5	ドイツ	22 (7.1%)	
6	フランス	20 (6.5%)	
7	スペイン	15 (4.8%)	
8	日本	13 (4.2%)	
9	オーストラリア	12 (3.9%)	
10	ブラジル アルゼンチン イラン	8 (2.6%)	
13	オーストリア 中国	7 (2.3%)	
15	イギリス カナダ	6 (1.9%)	
17	ノルウェー チリ	3 (1.0%)	
19	デンマーク インド 南アフリカ	2 (0.6%)	
22	その他 (13か国)	1 (0.3%) x13	
	合 計	310	

27回)が開催された。この会議では、皇太子殿下から「交通路としてのテムズ川」をテーマに講演を賜った。今回の会議参加者は約500名程度で、そのうち日本からの参加者は50名を超えた。

会議におけるテクニカル・セッションでは、6つの大きなテーマについての発表・報告が行われた。プログラムによると投稿論文数は全部で310編であった。その内訳は、①内航水運 (Inland Navigation; 117編)、②浚渫 (Dredging; 26編)、③ロジスティクス及びインフラストラクチャー (Logistics & Infrastructure; 19編)、④港 (Ports; 103編)、⑤マリナー (Marinas; 13編)、⑥環境 (Environment; 32編) である。

論文の国別投稿数を表1に示す。全部で34か国からの投稿があったが、最多はアメリカの56編、続いてオランダ、開催国のパナマ、PIANC本部のあるベルギー、ドイツ、フランス、スペインと欧州勢が並ぶ。日本はスペインに続いて13編で8位であった。論文は内容が重要であって数ではないと言うものの、当該分野での各国のアクティビティの高さを示す一つの指標とも考えられる。

この会議は、テーマを絞った学術的な国際会議とは異なるが、世界の水・海域における各種・多様な問題に対する情報が得られ興味深いものであった (<http://www.pianc2018.com/> 参照)。特筆すべきトピックは、前日の年次総会 (AGA) で水野剣一氏 (五洋建設技術研究所) が、40才以下の若手に与えられるデパペ・ウィリアムズ賞 (De Paepe Willems Award) 第一位を受賞され、バンケットで紹介されたことである。誠に誇らしいことであった。なお、論文のタイトルは「System of Inspection and Diagnosis for Port Structures Using Unmanned Boat」である。

本会議では、テクニカルツアーとして運河に関係する4コースが提供された。約2年前に完成した拡張パナマ運河 (ここでは、新しくなった運河を拡張パナマ運河とよぶ) を訪問する機会を与えられたので少し紹介したい。

2. 拡張パナマ運河

2.1 拡張プロジェクト概要

パナマ運河のあるパナマ共和国は、人口約403万人、土地面積約7万6千km²で北海道よりやや小さい。乾季と雨季があり、ガトゥン湖側の年間降水量は3500mmを越え、運河沿いには雨林が広がっている。この多雨が多量の水を消費する閘門式のパナマ運河を支えてきたといっても良い。民族は、混血70%、先住民7%、他からなる。

約300万年前は南・北アメリカ大陸は切り離されており太平洋と大西洋は繋がっていたといわれる。その後の海底隆起によ



図1 パナマ運河の現況 (パナマ運河庁(PCA)パンフレットより)

り両大陸は陸続きとなりパナマ地峡 (Isthmus of Panama) が創造される。地峡とは、海峡の対語で、両大陸を結ぶ細長い陸地で、その両側が海になっている場所のことであり、パナマ地峡のほかスエズ地峡などがある。

運河は地峡の最も狭い場所を南北に横断するように建設された「閘門式運河」である。パナマ運河拡張後の現況を図1に示す。大西洋側にはガトゥン閘門 (3段階の閘室)、太平洋側には、ミラフローレス閘門 (2段階の閘室) とペドロ・ミゲル閘門 (1段階の閘室) があるが、拡張工事では、これらの閘門に加えて新たにアクア・クララ閘門 (3段階の閘室:大西洋側) とココリ閘門 (3段階の閘室:太平洋側) が建設されすべての閘門が運用されている。写真1は、太平洋側のココリ閘門、ミラフォーレス閘門、ペドロ・ミゲル閘門を示す。運河の掘削で難工事を



写真1 太平洋側の三閘門

余儀なくされ「クレブラ・カット」として知られるクレブラの大陸分水嶺地帯が十数キロ続く。チャグレス川を堰き止めて造られたガトゥン湖の現在の水位は27mである (建設当初は25.5m)。また、チャグレス川上流のアラフエラ湖も運河の水位管理を目的とした人造湖である。

運河の全長は約80km、運河の通過に要する時間は8～10時間程度であるが、両洋間の移動時間は24～30時間程度を要する。ちなみに、1979年米海軍ペガサスミサイル艇が2時間41分の最速通過記録を達成している。

拡張パナマ運河計画は、従来の旧運河の閘門の隣に新たな閘門を建設し、旧運河の運用と併せて運河の機能を増強しようというもので、2006年10月22日パナマ運河庁 (PCA) からの提案が「国民投票」にかけられ承認された後、2007年9月3日工事が開始され、約9年弱の工事を経て2016年6月26日拡張パナマ運河が正式に開通した。

PCAの提案は三段階式閘門の新規建設等により、①旧閘門と併用して年6億トンの貨物の通過を可能にし (実際の通行量は拡張建設前の約2倍となった)、②巨大化する新たなパナマックス船 (ネオパナマックス船) に対応する (パナマックス船とネオパナマックス船の比較は表2参照) というもので、当初の予算は、約52億5千万ドル (約5800億円、1US\$=110円として) といわれるが、工期延長等により、実際にはもう少し費用を要したかもしれない。

拡張パナマ運河の最近の国別利用状況を表3に示す。アメリカがずば抜けており全体の68.3%、続いて中国18.3%、チリ、日本11.4%となっている。

表2 パナマックス船とネオパナマックス船の比較

	パナマックス ^{注1)}	新パナマックス	備考
全長 (m)	294.1	366	
全幅 (m)	32.4	49	
喫水 (m)	12 ^{注2)}	15.2	
最大高 (m)	57.91	57.91	アメリカ橋高による

注1) : 実際に通過が許可されている船舶の大きさの制限値 (例外有) 排水量65,000トンが典型的な大きさ

注2) : 熱帯淡水において

表3 パナマ運河の国別利用状況 (2017年度)

順位	国名	2017年度 全貨物量 (トン)	割合 (%)
1	アメリカ	166,073,901	68.3
2	中国	44,003,726	18.3
3	チリ	27,535,517	11.4
4	日本	27,385,734	11.4
5	メキシコ	25,309,513	10.4

2.2 拡張プロジェクトの主な工事

新規閘門建設のほか、航路浚渫・拡幅等々、主な工事は以下の通りである。

- (1) 太平洋側に建設する新閘門（ココリ閘門）とクレブラ・カットを結ぶ新たな進入航路（旧進入航路とほぼ平行な6.1kmの掘削・築堤。新進入航路とミラフォーレス湖（旧航路）の間には9mの水位差があり、これに対処しなければならない。
- (2) 太平洋、大西洋両運河入口の増深と拡幅。
- (3) ガトゥン湖の増深と拡幅、クレブラ・カットの増深（斜面のすべり破壊対策が必要）。
- (4) ガトゥン湖の水位レベルの増大（水位27mへ）。
- (5) 太平洋、大西洋側それぞれにおける新三段階式閘門の設計ならびに建設。

2.3 拡張前後の運河（閘門）の比較

拡張パナマ運河の建設に当たっては、表4に示すように、閘門規模の増大のほかに、従来の旧運河とは異なる新たな試みが行い入れられている。特に、①各閘室に繋がる貯水池を設けることで、これまで垂れ流しであった湖の水を60%リサイクルできるようにしたこと、②維持管理が容易な二重の引き戸式（ローリングタイプ）の水門にしたこと、③曳航操船を電動機関車（ロコモティブ）からタグボートにしたこと、などがあげられる。

表4 拡張前後の運河（閘門）の比較

	旧閘門	新閘門
運用	1914.8.15	2016.6.26
最大船舶	パナマックス	ネオパナマックス
最大容量 (TEU)	5,000	14,863
閘門長 (m)	304.8	427
閘門幅 (m)	33.5	55
閘門深さ (m)	12.8	18.3
レーン数	2	1
貯水池	なし	あり
ゲートタイプ	前後観音開き式	左右引き戸式
曳航操船	電気機関車	タグボート

図2は、貯水池から閘室（Chamber）への給排水システムを描いたものである。海面から27mの湖面まで3段階に分けて9mずつ上下するが、水の給排水は重力のみによって行われる。新閘門では上・中・下段の3つの閘室の横に水位の異なる3つの貯水池（Water-saving Basin）があり、閘門で利用した水の60%が再利用され節約される。

写真2(a),(b)は、それぞれ、扉が前後に移動するいわゆる観音開き式の旧ゲートと引き戸のように扉が左右に転がる引き戸式（ローリングタイプ）の新ゲートである。二重の新ゲートの扉の一方を壁の方向に引き込んでメンテナンスを行うことができるので通常の運用を続けながらメンテナンスが可能であり、旧ゲートに比較して維持管理が容易である。

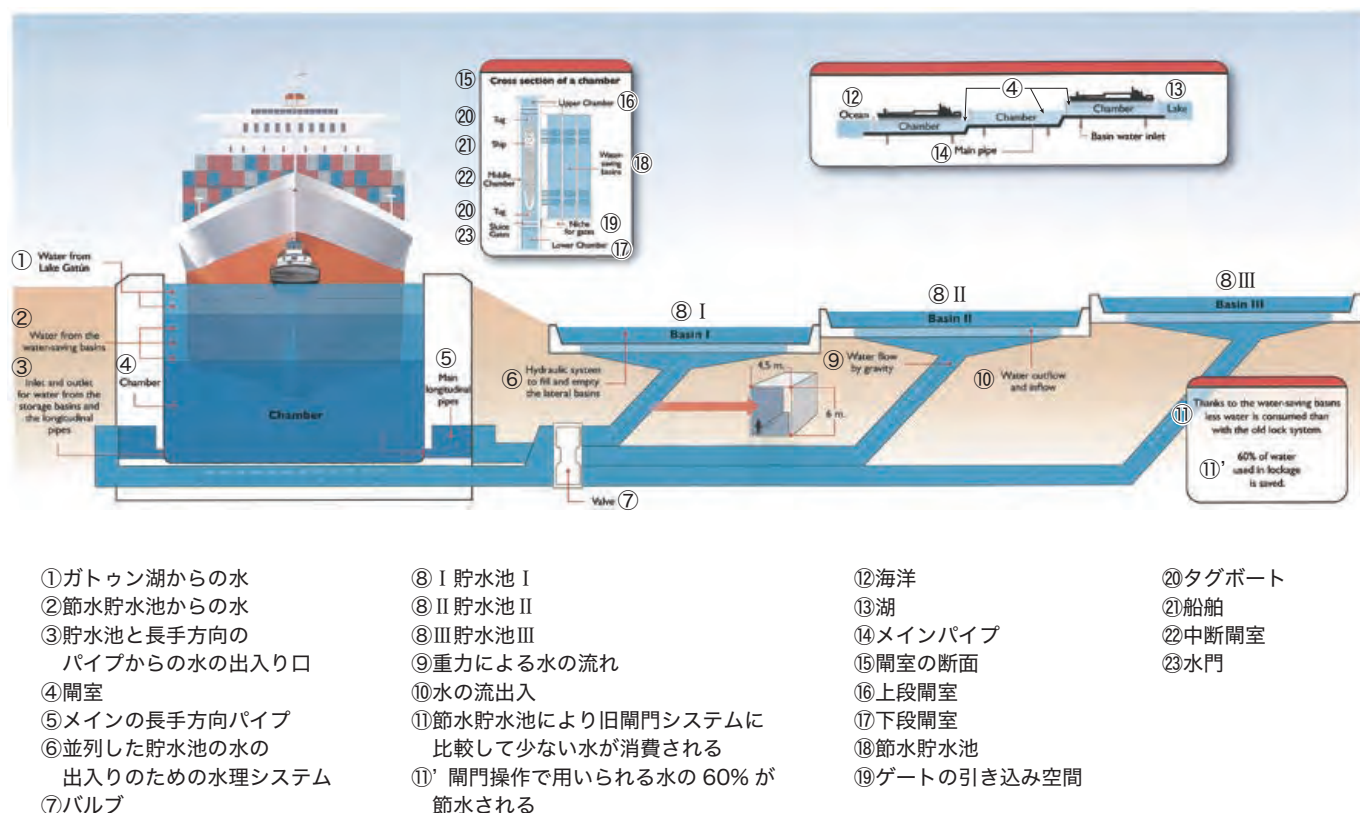


図2 給排水システム

写真3(a),(b)は、それぞれ、新旧閘門で用いられる曳航操船用の電動機関車（ロコモティブ）およびタグボートである。ロコモティブでは、基本的には、前・後方の四台で引っ張りながら操船するが、閘門縦側壁に防舷材のようなものは設置されていない。新閘門ではタグボートによる曳航操船が行われているが、タグボート自身が左右に揺れるなど見た目にはやや不安定な感じを受けた。閘室の側壁には防舷材が設置されている。



写真2(a) 観音開き式水門



写真2(b) 引き戸式(ローリングゲート)水門



写真3(a) 曳航操船用電動機関車(ロコモティブ)



写真3(b) 曳航操船用タグボート

2.4 水位管理

パナマ運河の安定した運用のためには、人造湖ガトゥン湖エリアの水位管理は極めて重要である。図3は、パナマックスサイズの船舶を対象としたときのガトゥン湖の水面高さを示している。水面高さを24.84mとすると、これは最大喫水12.04m、余裕水深1.52m、水底面高さ11.28mの和で表される。ネオパナマックスサイズの喫水は表2によると15.2mであるから、この場合3.2m水位を上げるか、または水底面を下げるか、もしくはその両方に対応する必要があることになる。拡張計画では、2.2で述べたように、ガトゥン湖の水位増大と浚渫による増深・拡幅で対応しているようである。

表5には、パナマ運河の安定的運用に重要な役割を果たす3つの湖について示している。ガトゥン湖でみると、占有面積、貯水量は、それぞれ東京ドーム（46,755㎡、124万㎡）の約9325倍、625杯分に相当する。アラフエラ湖は、1935年チャグレス川上流にマッデングダム（Madden Dam）を建設し運河の水位をコントロールする目的で造られた人造湖である。

暴風雨、洪水時の速やかな水管理は重要であり、観測、予測、先を見越した事前準備等の対応がなされる。過去30年で最悪ケースは、1985年12月4～5日に発生した暴風雨で、ガトゥン湖の水位が一時間で5.1cm急上昇したため、ガトゥンダムの水門の開放を余儀なくされた例が報告されている。

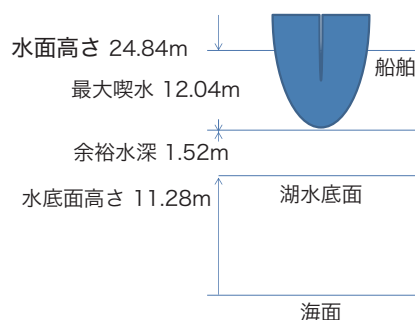


図3 ガトゥン湖の水面高さ調整

表5 水位調節のための3つの湖

	ガトゥン湖	アラフエラ湖	ミラフォーレス湖
建設ダム名	ガトゥンダム	マッデングダム	ミラフォーレスダム
ダム建設年	1906-1913	1933-1935	1914
標高 (m)	26.67	76.81	16.46
占有面積 (km ²)	436	50.2	3.94
貯水量 (百万 m ³)	775	651*	2.46
最高水位 (m)	26.81	78.6	×
上記到達日	1993.12.12	1983.12.20	×
最低水位 (m)	24.56	57.95	×
上記到達日	1997.5.17	1976.8.1	×

*実行上の貯水容量

3. パナマ運河の略歴史

大航海時代、コロンブスのアメリカ大陸発見（1492年）から21年後の1513年、冒険家バルボア（Balboa）が「南の海」（後の太平洋）を発見。翌年、スペイン王がパナマ知事に2つの海を結ぶ自然ルートの発見を命じる。これが、二つの海を結ぶ運河建設計画の始まりと考えられる。ルート発見には失敗したが、「Camino Real」道路が開かれ、ペルーからスペインへ金・銀等を運ぶ輸送ルートとなった。1527年スペイン人船乗りが「荒れ狂うチャグレス川」河口のコロンから上流50kmまで航行、チャグレス河の活用がパナマ運河建設に向けて重要なカギとなることを示した。併せて太平洋側のパナマシティーに向かう30kmの「Camino de Cruces」道路が整備され、大西洋・太平洋間を結ぶ道路ルートが完成した。1534年にはスペイン皇帝チャールズVが運河建設の調査・具体案の作成を命じたが、実現にはまだまだ時間を要した。

19世紀になると、運河に対する興味はスペインのほか仏・英・米・独・コロンビア等の列強間に拡がっていった。1848年、米西海岸ではゴールドラッシュが始まり、北米大陸の東～西海岸間を結ぶルートの開発が喫緊の課題となっていた。1852年米国企業が地峡横断鉄道のコンセッションをコロンビア政府（当時パナマ地域はコロンビアの支配下）から取得した。1852年大西洋側のコロン市から開始された鉄道建設は1855年太平洋側のパナマ市まで、わずか数年で完成した。枕木の数だけ死者がでたともいわれる過酷な工事であったが、ここにパナマ地



写真4(a) パナマ運河鉄道の特急列車



写真4(b) 展望車内

峡を横断する鉄道ルートが完成した。現在のパナマ運河鉄道（Panama Canal Railway）の特急列車を写真4（パナマ市バルボア駅）に示すが、一日一往復（片道一時間強）の便しかなく、殆どは、太平洋側バルボア港（パナマ市）と大西洋側コロン港（コロン市）間のコンテナ輸送（運河通行が困難な船舶の喫水調整など）に用いられているようである。

1869年には、レセップスによるスエズ運河が開通した。9年後の1878年、コロンビア議会は、パナマ地峡運河の建設と運用について99年のコンセッションを承認、これは、後の「フランス運河（French Canal）」建設の法的根拠となった。1880年レセップスはスエズ運河の成功を基にパナマ運河建設を開始した。これにはエッフェルも参加したという。海面式運河を目指すも、パナマ地峡クレブラ地域の大分水嶺としての特異な地形・地質（海底の隆起によって造成された分水嶺と脆い地質）と降雨（樹木の伐採により雨水に対する抵抗性の低下）、黄熱病・マラリアなどの疫病（防疫法が未確立）、財政難（難工事と放漫財政による資金難ともいわれる）などにより1889年会社は倒産し工事は失敗に終わった。クレブラ・カットとよばれるクレブラ地区の掘削状況と完成後の状況を写真5に示す。



写真5(a) クレブラ・カット 工事状況

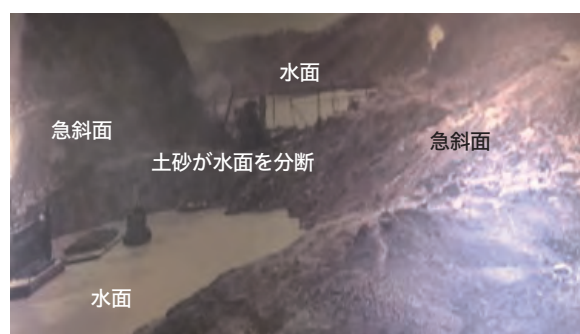


写真5(b) クレブラ・カット（掘削工事状況と完成後の状況）



1903年1月運河の重要性を認識する米国は、建設に失敗したフランスから未完成の運河を含むすべての権利を購入し、コロンビア政府と運河建設の条約を締結した。しかし、コロンビア議会はこれを承認しなかったため、米国は、パナマ市内の独立派を支援して同年11月「パナマ共和国」として独立させ、すぐさま独立を承認し、パナマ共和国とパナマ運河条約を締結した。さらに、1904年には、パナマ地峡運河理事会（Isthmas Canal Commission）を発足させ、パナマ運河の建設にとりかかった。なお、後述するが、このとき（1904年6月1日）、東京帝国大学を卒業して間もない青山士青年（25才）は、ニューヨーク港でパナマのコロン港に向かう船ユカタンの船上で契約書にサインし工事従業員の一人となっている。

米国による運河建設は、当初は「フランス運河（French Canal）」と同様に「海面式」が大勢であったが、建設現場からの提案により、1906年米上院において、わずか5票差で「閘門式」にすることで決着した。チャグレス川の洪水対策、クレブラ・カットの掘削土量の低減による技術的・経済的効果が期待されたといわれている。

1914年8月15日パナマ運河が正式に開通し、ここにパナマ地峡を横断する海運ルートが完成した。完成後、パナマ運河は、いずれの国の商船も自由な航行の権利を有する「国際運河」として米国の管理下（運河に沿って約10マイルの幅）におかれたが、1999年12月31日正午、運河の管理はパナマ共和国（パナマ運河庁）に引き渡された。その後の社会・経済・政治等の変化に伴い、パナマ運河の拡張について様々な検討が行われ、遂に、2007年運河拡張工事が開始され、2016年6月26日拡張パナマ運河が正式にオープンした。

4. パナマ運河の自然環境

パナマ運河沿いの雨林（Rain Forest）は、降雨による土壌の浸食と堆積を防ぎ、また蓄えた雨水を川に戻すなど運河のオペレーションにとっても重要な働きをする。そのためだけではない

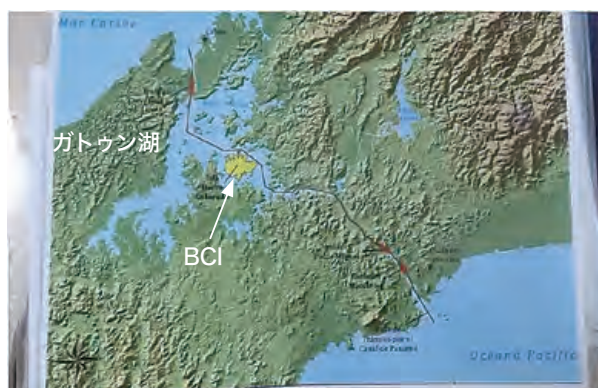


図4 バロー・コロラド島(BCI)位置図

が、パナマ運河沿いには四つの国立公園（National Park）と自然の記念碑（Natural Monument）がある。後者は、ガトゥン湖ができることにより水没して孤島となったバロー・コロラド（Barro Colorado）島（図4）のことであるが、1923年に生物保存地区になり、孤立した島内における動植物の生態を研究するため、1946年からはスミソニアン熱帯研究所（Smithsonian Tropical Research Institute）により運営が行われている。島を訪問するには事前申し込みが必要であり人数も限られるが、幸運にも会議の合間に訪問する機会を得た。湖岸のガンボア（Gamboa）の渡船場（写真6（a））から小一時間で島への入り口、研究所の船着場に着いた（写真6（b））。島内にはいくつかのトレッキングコースがあり、ケンブリッジ大学のドクターコースの米国人学生ガイドが案内してくれた。有毒の大木、毒蛙（？）、食べられる蟻（ごきぶりの仲間との説明もあり）（写真7）、スパイダー・モンキーなど、あまり快適とは思えない環境ではあったが、雨林独特の生態系の一端に触れることができた。後述の青山士はこのような雨林で二年余り^{キャンプ}天幕生活をしたというのを知り感慨深いものがあった。



写真6(a) ガンボアの渡船場



写真6(b) スミソニアン熱帯研究所の船着場

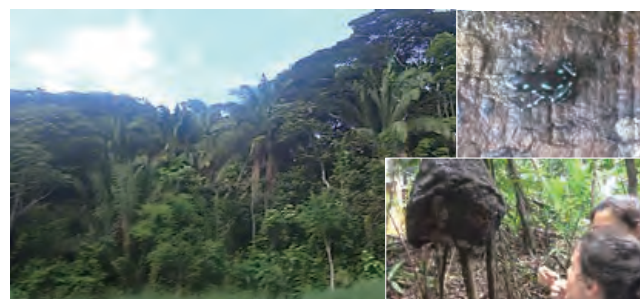


写真7 雨林の毒蛙(?)と食べられる蟻

5. パナマ運河建設に係った唯一の日本人—青山 士

青山 士はパナマ運河建設に係った唯一の日本人として知られている。パナマ運河博物館に写真が展示されていると聞いてでかけた。大きくはないが確かに Akira Aoyama の顔写真が展示されていた。また、別の所には、職場の同僚と一緒に写った集合写真があった。館内展示物は写真禁止ということでお見せできないのは残念である。

青山は1878年9月23日静岡県磐田市で生まれた。この年は、前述のように、コロンビア議会がフランスの会社に運河のコンセッションを認める法案を承認した年であり、その後の彼の人生を顧みると何かの縁を感じざるを得ない。青山の書「ばなま運河の話」の「はしがき」に詩人ゲーテの夢として図5中に示す手書きのメモがある。青山の運河に対する思い入れが良く表れているものと考えられる。その本によると、1903年7月11日東京帝国大学を卒業後（24才）の、一か月後の8月11日にはもう横浜港から船でカナダへ向かっている。カナダのビクトリアに着いたのち、直ちにシアトルへ行き、種々なる労働に従事して時の至を待つと記されている。1903年11月18日パナマ運河条約が、米国と独立したばかりの「パナマ共和国」との間で締結されるのをみてニューヨークに向かう。1904年3月中旬ニューヨークに到着。イスマン・カナル理事（Isthmian Canal Commissioner）の一人、コロンビア大学バア（Burr）教授へ廣井勇教授の紹介状を持って就職を依頼する。1904年6月1日ニューヨーク港でコロン港に向かうユカタン船上で契約書にサインし工事従業員の一（本人の記述）となる。このとき青山は25才であった。コロンから運河の基となるチャグレス川を七哩ほど遡ったボイオ（Bohio）に落ち着いてから、測量・地質調査（Wash boring and Diamond drill Boring）に従事しつ

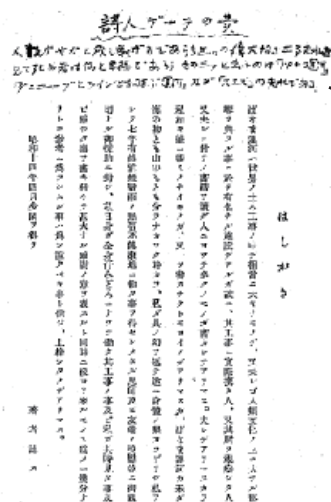
つ、劣悪な環境の天幕生活で二年余りを過ごした。1906年には、海面式か閘門式かで揺れていた米上院において5票差で閘門式に決着した。その後、設計・製図の内業に従事したが、後日、青山は約7年半のパナマでの仕事を顧みて次のように懐述している。「私が設計して残してきたうちでガトゥン閘門の湖水の方の翼壁及び下流の中央繫船壁及び小規模ではありますが、ガトゥン村の給水工事の鉄筋混凝土造のアグア クララ フィルトレーション プラント（Agua Clara Filtration Plant）は、私が帰るときは百分の七八十出来て居りましたが其後出来上がりの写真を見ますと取入口、沈澱池、ラビット、メカニカルサンドフィルタ、浄水池、ポンプ小屋及び試験所等、皆設計通りに出来て居るのを見ますと、少しは働きがいがあった様に感ぜられます。……」。19011年11月11日青山は約7年半の仕事に従事したパナマ運河地帯を去る。33才であった。そして、翌年1912年日本に帰国し、その後我が国の河川土木・港湾分野で活躍したことは周知の通りである。1963年3月21日没、享年84才であった。

本の最後に、親友からパナマ滞在中に送られた島崎藤村の詞「椰子の実」（1901年）を読んで「故郷ヲ離ルル数千里ノ椰子ノ生ヘテ居ル彼ノ地ニ於テ只独デ読タ時ハ実ニ感慨無量デアリマシタ」と記している。

その後、太平洋戦争中、パナマ運河破壊計画を海軍から相談されたとき、「私は造ることは知っているが、壊し方は知らない」と答えたというエピソードが残されている。

参考文献

- 1) 青山 士 (1939) : ばなま運河の話、私家本、土木学会図書館
この本の原典は、青山 士 : 技術 パナマ運河の話 (上) (下)、それぞれ、雑誌「港湾」第4巻、10号及び11号、1926年
- 2) EDICIONES BALBOA社 (2017) : Guide to the Panama Canal
- 3) 高橋 裕 (1962) : 名誉(会)員 青山 士氏をお訪ねして、土木学会誌、47-01、pp.36-39.



詩人ゲーテの夢
人類がやがて成し遂げるであらう三つの偉大なる工事それを見て死ぬ者は何と幸福であらう；その三つと云ふのは「パナマ運河」「ダニユープとラインとを結ぶ運河」及び「スエズ」の夫れである。（青山士の手書きのメモより）



ゲーテ像
(会議の帰途立寄ったフランクフルト ゲーテ公園, 2018.5.14)

図5 青山 士の手書きのメモ