

Autonomous Year-Round Sampling and Sensing to Explore the Physical and Biological Habitability of Permanently Ice-Covered Antarctic Lakes

AUTHORS

Luke A. Winslow Center for Limnology, University of Wisconsin-Madison

Hilary A. Dugan Earth and Environmental Sciences, University of Illinois at Chicago

Heather N. Buelow Department of Biology, University of New Mexico

Kyle D. Cronin Earth and Environmental Sciences, University of Illinois at Chicago

John C. Priscu Department of Land Resources & Environmental Sciences, Montana State University

Cristina Takacs-Vesbach Department of Biology, University of New Mexico

Peter T. Doran Earth and Environmental Sciences, University of Illinois at Chicago

要約

南極のマクマードドライバレーのいくつかの湖は絶えず氷で覆われ、1年中物質代謝を維持する地球上でいくつかしかない無比のシステムズです。そうである故、それらのエコシステムは地球の極域の状態や生命、そして他の氷で覆われた太陽系システムの重要な情報を提供できます。ドライバレーの過酷な環境で作業することは実際業務が現場作業の困難になる厳冬期のデータ収集に関して特に多くのチャレンジを提議します。本論文では、ボニー湖の一つでは40年以上夏の研究の取り組み対象となっており、ボニー湖で最近展開された機器の動機、設計、挑戦に関して明記しています。展開された観測機器は自動採水、植物プランクトン、セジメントトラップ及び溶存ガスと蛍光光度センサーを搭載させたケーブルマウント方式のプロファイリングプラットフォームで構成されています。それらの観測機器から得られたデータは我々に初めて極夜の居住適性環境を明確にするであろう。我々はこれらの過酷な状況で効果的に機器を運用するための提言と観測中に学んだ教訓を記しました。

Keywords: lakes, sensors, extreme environments

序論

南極大陸、ビクトリアランド南部のマクマードドライバレーは過去に火星や太陽系の他の氷の世界で存在した状態に地球上でもっとも類似する場所として検討されたことがあり年中氷で覆われたいくつかの湖があります(Doran et al., 1998, 2003; Priscu et al., 1998; Priscu & Hand, 2012)。それらの湖で我々は荒れ果てた環境を考察することで生命がどのように存在するのか理解することを可能にします。晩冬、夏、初秋の間、ドライバレー長期生態学的な研究(LTER)の一部としてボニー、ホアー、フリュクセル湖(全てテイラーバレーの中にある)で収集されたデータはそれら湖の大部分の微生物はただ極限を生存するだけではなく、活発に食べ、成長し、繁殖していることを示した(Bielewicz et al., 2011; Priscu et al., 1987a, 1987b; Takacs & Priscu, 1998; Vick & Priscu, 2012)。それ自体、それらは我々が地球上の最も過酷な環境の一つの背景として生理学上とゲノムアダプテーションを証明できる生態系であります。ドライバレー湖で行われたほとんど全ての研究はそれら湖にアクセスが可能な日中、ヘリコプターの支援に依存する結果、南半球の春、夏及び秋に限定されました(c. 8月後半から4月中旬)。夏の間は24時間の日光があり、そして冬は真っ暗闇の4か月になり外気温が -50°C に落ちます。重要な輸送支援は1回目の晩秋と2回目の晩冬で証明されたように費用が掛かることを知る必要があります(Kong et al., 2012; Lizotte et al., 1996; Vick & Priscu, 2012)。そのような状況はもし中心となるサマーシーズン以外不可能であれば現場作業を困難とします。図1は一次生産力(PPR)や他の物理、化学、生物学的特性が存在するデータが無いギャップを表示します。それら湖の晩夏から冬の間のプロセスの予測は春から夏のデータで作成された生態系モデルがベースとされてきました。ボニー湖のPPRモデルとコミュニティ呼吸(R)(二酸化炭素総量)は現代のバイオマスが夏の数か月のみ計測された植物プランクトンの光合成によって支援されていないことが明らかになった(Priscu et al., 1999; Takacs et al., 2001a)。それらの結果は呼吸炭素減少が光合成を通じて増えた新しい炭素量を超えていることを暗示し、湖は結局有機栄養生命を支援するために既に減少した炭素を使い果たするのであろう。

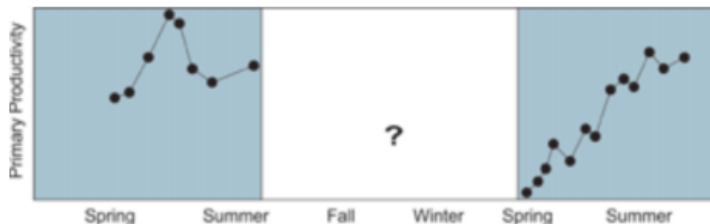


図1. PPRなどの生物学的パラメータは極域の冬季に計測された実績が今までにありません。

しかしながら、適切な炭素フラックスとプロセッシングの1年を通したデータは手作業では取得することはできませんが、この不足は炭素の1年を通した変動とプロセッシングを理解することで説明されるかもしれません。現場型センサーやサンプラーはそれらの過酷なシステムで起こる化学、生物及び物理的なプロセスをより良く理解する通年の観測データを収集することができます。現存センサーはドライバレー湖の物理学的側面を観測する能力を十分に改善されています。湖上及び湖中の温度、光と圧力センサーはそれら湖の1年を通して物理学的側面を理解するために20年以上使用されています。ドライバレーには湖に設置する設備を補足する受信可能な良い気象及び水位観測所があります。しかしながら、最近になってセンサーや観測機器は水中で使用でき、長期間展開可能な蛍光光度計、溶存CO₂センサー、自動採水器、粒子サンプラーの開発により湖の化学、生物特性を自律的に観測できるようになりました。それら湖での化学及び微生物観測を拡張するため、我々はボニー湖の氷の下で1年中計測、サンプル採集する機器1式を展開しました。それらの機器は既存のサマーフィールドキャンペーン及び湖の物理的及び気象学的状況を1年中観測しているデータを増加させます。新たに開発、展開された機器は水柱化学、物理及び微生物状況を記録するための自動採水、濾過及びプロファイリングプラットフォームを含んでいます。それらの機器は我々に初めてサマーシーズン中に固定された炭素（品質とバイオマス）の1年中観測結果を提供するでしょう。この論文で我々はマクマードドライバレー湖で使用されている存在している及び新しい技術の詳細を論じており、これら過酷な環境で機器を展開する挑戦です。

サイト説明

ボニー湖は南極ビクトリアランド南部のマクマードドライバレー中央部の大きな氷結しない流域のテイラーバレー西部の部分循環湖です（図2）。狭い水道の海閘はウエストロブレイクボニー（WLB, 0.97Km²）とイーストロブレイクボニー(ELB, 3.25Km²)の2つの葉状の湖に区切ります。現在の水道の海閘深度は各々のロブの底水を効果的に隔離する17.7m（2011年1月）の深さがあります。WLBとELBの湖の高さはそれぞれ平均海面より43及び41 m上にあります（2014年1月）。ボニー湖は1年中ボニー湖に氷河下の流れや川を通してタイラー氷河から年間流入量の大半が流れ込む氷河前線湖です。以下のセクションで各々の使用法や設計検討の詳細を述べます。

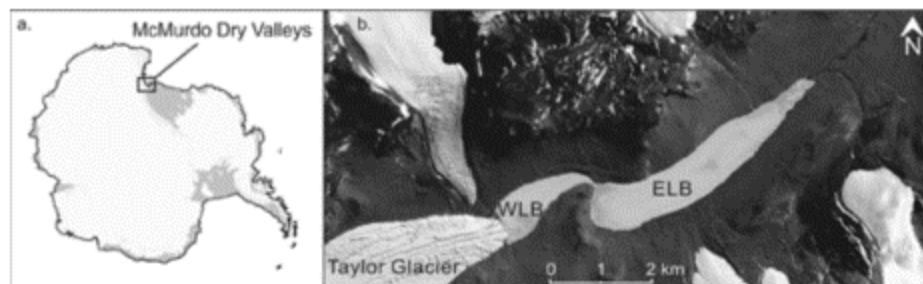


図2.
a)南極大陸のマクマードドライバレーの位置
b)ボニー湖の西（WLB）と東（ELB）及びテイラー氷河終端を示す西部テイラーバレーのマップ

テイラー氷河以下のセクションで各々の使用法や設計検討の詳細を述べます。東南極氷床から溢流水河であるテイラー氷河はWLBの西端に隣接しており、高い溶存した個体物質をより深い塩分を含んだ水の方へ氷河下を流出する水の相当量に寄与しているかもしれない。WLBの氷河の源とは対照的に、ELBの水収支は細い水路を渡ってWLBから流入することによって広範囲に支えられている(Spigel & Priscu, 1998; unpublished data)。その湖に他の全ての表層流入は上流の谷氷河から流れてくるもしくはタイラー氷河の表層で溶けた小さな間欠

河川を通して入ってきます。表層流入は低い溶存固形物濃度であり、湖の表層近傍の淡水と混ざります。その湖から表面流出はありませんし、地下水の交換は無視できるほどなので、全ての水損失は氷表面の蒸発と昇華の結果です(Spigel & Priscu, 1998)。ボニー湖は3～5 mの永久氷で覆われています。小さな堀は夏の間、湖の表面積約1%になる堀の両へり周辺が融けます(Priscu et al., 1996)。永久氷のおおいは風によって誘発された乱気流を制限し、水柱のガス抜きを制限し(Andersen et al., 1998; Priscu, 1997; Priscu et al., 1996)、また、水柱に太陽輻射の浸透を妨げます(Fritsen & Priscu, 1999; Howard-Williams et al., 1998)。なぜなら氷のおおいは今まで失われたことが無く、その湖に吹かれて移動した物質は氷のおおいと共に同調され、湖の氷の中に同居して一つの生態系として持続します(Priscu et al., 1998)。氷内の集合体は光の透過距離をさらに縮め、水柱の一次生産を制限します(Howard-Williams et al., 1998; Lizotte & Priscu, 1992)。底水の隔離は各々の湖の別個の地球化学に導いています。WLBの完全溶解個体物質(TDS)は水深15 mで急勾配の密度躍層(濃度急変)する上部で0.39から底で144g/Lに増えます。一方、ELBでのTDSは水深15から25mでより段階的な密度躍層で上部0.61から底水272g/Lに増えます(Green & Lyons, 2009)。WLBの温度は氷のおおいの下で0°Cから水深9～10mで最大3°Cに達し、以下底近傍で-5°Cに減じます。ELBにおいて15m水深近傍で温度は6°Cに増え、底近傍で-2°Cに減じます。両湖の高塩分勾配は高安定な結果であり、熱塩対流セルが存在しない水柱に層化されています(Spigel & Priscu, 1998)。我々の知識ではこれらの湖の濃度勾配は地球上で自然に発生する最も過酷なものである。

中心機器

テイラーバレーのマクマードLTERプログラムの一部として湖観測ステーションは1995年から各々の湖の総合施設で運用されています。図3は約20年の観測期間を機器によって記録された湖の水位を示しています。数年来、機器は科学技術と科学の重要性と調和して進展しました。観測施設は本質的には気象観測施設であり、湖の水深、氷の消融、氷の厚さの物理的なパラメータや水中光合成有効放射(PAR)の長期間の傾向を計測するために適合します(表1、図4)。中心となる機器はドライバレー湖のより良い通年及び長期プロセス観測を可能とします。例えば、2001～2002年、ドライバレーは洪水の多い年となりました。湖の施設のデータから研究者は流入量の広がりを通年の年と比較することができ、先例のない大洪水を泳会することができました(Barrett et al., 2008)。越冬シーズンはまた氷の減少(Dugan et al., 2013)など通年プロセスの見積を提供し、サーミスタストリングスの過去の展開データはモデル化するための氷の変遷を可能としました(Doran et al., 2003)。

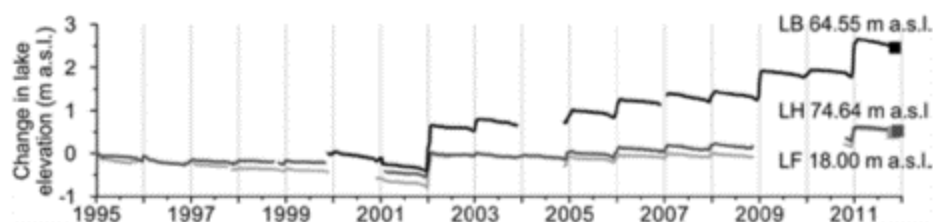


図3. 長期間計測されたボニー湖(LB)、ホアー湖(LH)、フリュクセル湖(LF)の湖水位

サンプラーとプロファイラー

過去1年間、消融、我々は市場で入手可能となる増加した有効性、自動サンプリングの性能及び観測プラットフォームをうまく利用できるようになりました。一そろいのセンサーはMcLane Laboratories(Falmouth, MA)の装置、セジメントトラップ、植物プランクトンサンプラー(PPS)、リモートアクセスサンプラー(RAS)及び改造されたアイステザードプロファイラー(ITP,図5)などで構成されています。それらの機器の中心的である目標は通年湖で起こる化学的及び微生物的プロセスをより良く理解する事です。以下のセクションで使用方法や検討された設計の詳細を説

明します。

時系列セジメントトラップ

2000年11月、セジメントトラップは湖の底へ沈降する粒子質量フラックスの大きさとタイミング及びC,NとPフラックス3種の大きさに分類(<63, 63-250、>250 μ m)して評価するためにELBとWLBの観測ステーション近傍に設置されました(マクマードドライバレー生態系の本質的に最も低いポイント)。セジメントトラップで収集され

表 1. 湖観測所の主要機器

Parameter	Instrument	Model	Record Period	Sensor Accuracy
Data storage	Data logger	Campbell Scientific CR1000 (previously CR10X)	N/A	N/A
Ice thickness	Upward facing sonar altimeter	Benthos PSA-916	2012–Present	±1 cm
Stage	Lake bottom-mounted pressure transducers	Campbell Scientific CS-455	1994–Present	±0.1% full scale (0–30 m)
Ablation	Ice-mounted pressure transducer	Campbell Scientific CS-455	1994–Present	±0.1% full scale (0–30 m)
UW PAR	Quantum PAR sensor	Licor LI-193	1994–Present	±5%

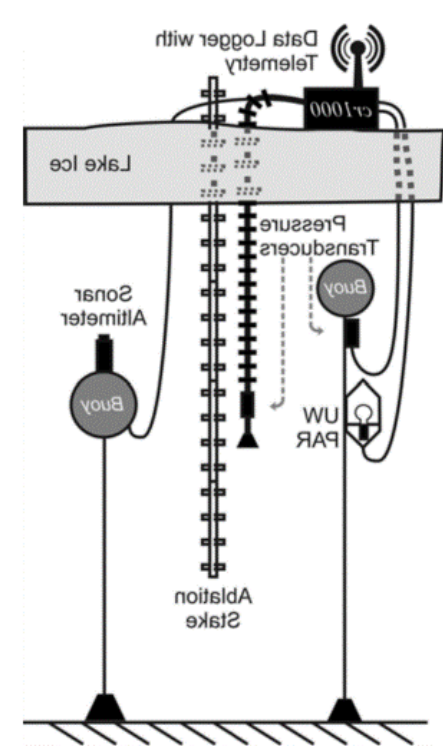


図 4. ボニー湖で展開された中心的な観測ステーション

た物質のこの分布は最近C:N:Pを含んで配分されました。これら底生フラックス計測はドライバレー生態系に結び付ける終点として検討されることが出来ます。展開されたセジメントトラップは(図6a,)は収集と予め設定された収集間隔毎に個別のコンテナ内に沈降する粒子を保管します。これら時系列サンプラーは試料容量と展開期間が調和する3週間毎にコンテナを切り替えて収集する様にプログラムされています(表2)。それらの観測で我々は沈降有機及び無機粒子の1年間の変動を捉えることができます。以前の沈降粒子の計測は受動性で連続収集機であった。それらデータは潜在的に展開と回収の間、氷の融解活動から沈降する沈殿物質の影響を有りました(Takacs et al.,2001b)。時系列セジメントトラップは氷が融解することによる影響を受けた試料を無視するで、氷から懸濁態有機物質フラックスの見積を改善する自然に起こっている沈降速度を観測することができます。なぜなら、融解する氷が重要な沈降する沈殿物を結果として起こり、自然に発生する沈殿作用の完全な1年のサイクル

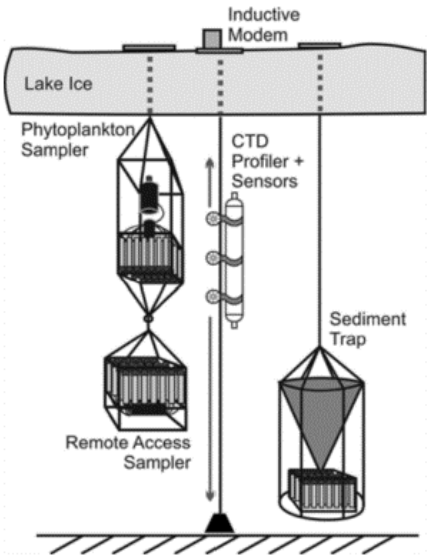


図 5. ボニー湖で自動採集及び計測様に新しく追加された機器の図

のサンプルが採集でき、それは2年毎の修正に減じるために重要です。オリジナルのセジメントトラップは5 Ahのバッテリー容量を給電する乾電池を使用していました。これはここで要求された2年間では無く、1年間の展開を支援するために十分であった。更に乾電池はボニー湖の深い水深の低い運用温度（<0℃）である故、しばしば早期にバッテリー容量が切れ動作しなくなった。この問題に取り組むために、McLane社は17Ah容量を持つ互換性のあるリチウムイオンバッテリーパックを考案しました。この変更は低温（<0℃）で延長した期間（24ヵ月）十分な電力を供給します。

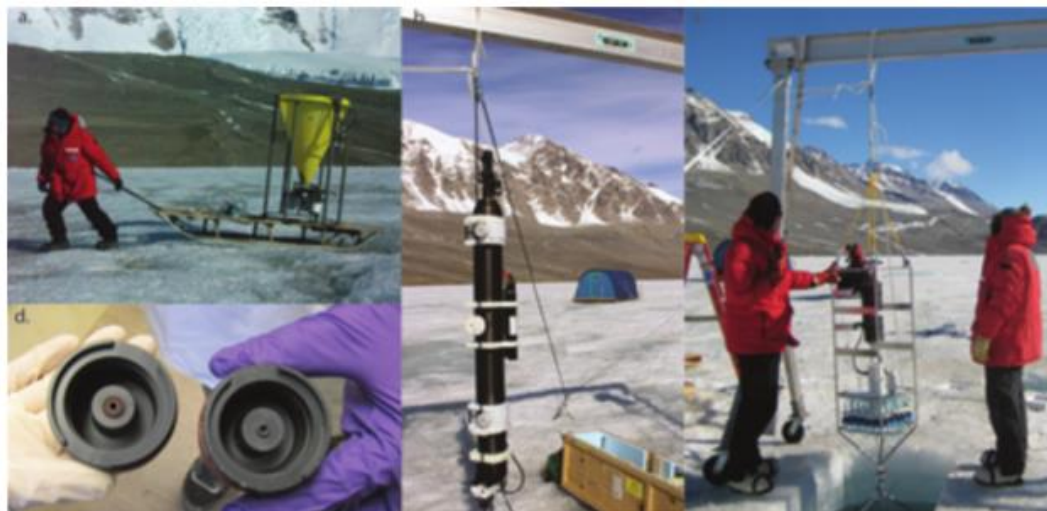


図 6.

- a) 投入するために氷上を移動中のセジメントトラップ
- b) ELBに展開されるITP
- c) ELBに展開されるPPS
- d) 試料固定用の内部コンパートメントとフィルターキャップ

表 2. 全ての機器の採集・計測スケジュール

Instrument/Sampler	Measurement/Sample Frequency
Core instrumentation (e.g., level, ice; Figure 4)	20 min (to 2013) 15 min (after 2013)
Sediment traps	3 weeks
ITP	Daily at solar noon
RAS	9 days (with five duplicate events) ^a
PPS	18 days (with three duplicate events) ^b

時系列採水サンプラー（RAS）

McLane社RASは予め据付けられた500mlサンプルバッグに試料水を機器設置後に採水及び分析するために自動採集します。RASは最大48サンプルバッグを搭載でき、最大48の独立した試料水を収集することができます（図7b）。サンプリングスケジュールは指定した日時にサンプル毎に設定できます。ボニー湖での展開では我々はPPS収集スケジュールと重複する様に1年超えの最大数及び時間分解能で試料水を収集されるスケジュールを選択しました。これは複製として使用される5つの同じ日のサンプルイベントと共に9日のサンプリング間隔になりました。試料水を保存するため、5mLの飽和塩化第二水銀が展開前に各サンプルバッグに加えられました。使用したRASは標準で供給された構成から変更されたことはありません。

プロファイラー（ITP）

最も複雑で展開された機器で最も複雑で挑戦的な機器はMcLane社ITPでありました。ITPはSeaBird社(Bellevue, WA)41CP アルゴフロートスタイルのエンドキャップに装備させたケーブル上をモーター駆動で鉛直移動するプロファイラーです（図6b、7c）。ITPは内部制御、データ記録及び自律的な移動及びセンサーペイロード用の電源システムを搭載した自己完結型です。既に南極で成功裡に展開され(Tooleetal., 2011)、年間を通して湖の状態を連続

観測するためのプラットフォームとして動作するでしょう。ITPの以前の展開と異なるボニー湖において、プロファイラープラットフォームは極めて高い腐蝕性の環境と極めて強い塩分濃度勾配に対処しなければならない、そしてセンサー類は電気伝導度(0-14 S/m)、水温(-5 to 5°C)、酸素の飽和レベル(>200%)の最も基本となる計測を含むパラメータ値のより広いレンジをカバーできなければなりません。これらいくつかの物理的な挑戦に適応するため、特注の感知パッケージはほぼ真水から高塩に変動する塩分の水及び天然水検知される一般的なガス濃度を計測するために構成されなければならない。残念ながら、そのような極端な濃度勾配やガス濃度により、予想される現場状況を研究室やフィールドテストで再現することは不可能でありました。よって1年目はこのプラットフォームの全てのシステムを綿密に調べ、必要に応じて改造が実施することが可能となります。**SeaBird** エンドキャップのCTDで提供されるものを超える別途パラメータを追加する為にいくつかのカスタマイズが実施されました。CTDそれ自体は0から14 S/mに電気伝導度レンジ拡張するために**SeaBird**社によって改造されました。追加のパラメータはプロファイラー耐圧容器の中央に貼り付けることで処理されました(**Figure 7c**)。その湖の全ての深度に渡って現場CO₂濃度を計測するために、2式の**Pro-Oceanus** 社製 (Bridgewater, Nova Scotia, Canada) **Mini-ProCO2**センサーを異なる計測レンジ(ELB: 0-2000 and 0-20,000 ppm; WLB: 0-2000 and 0-200,000 ppm)で構成することでITPに各々追加されました。最後に植物プランクトンの鉛直分布及び時間を通したそれらの光合成状態を直接観測するため、**BBE-Moldanke** (Schwentinet al, Germany) **Fluoro-probe**がITP制御システムに接続され追加されました。**Fluoro-probe**は異なる励起波長を使用してシアノバクテリア、緑藻類、珪藻類及びクリプト藻に関連した色素を識別します。全てのセンサーは中央局となるITPにより電源供給され、制御されます。各プロファイルのスタート時にITPはCO₂及び**Fluoroprobe** (クロロフィル) センサーを最大のサンプリング周波数(それぞれ0.5及び0.25 Hz)で独立した記録し始めます。センサー類は連続的にプロファイルが終了するまでこのレートでデータ収集します。ITPデータ取得ファームウェアはプロファイル終了後、各センサーから収集されたデータをダウンロードし、記録します。CTD,溶存酸素(DO)及びPARを含む全てのデータは1 Hzでサンプリングされ、データは直接ITPの記録媒体に記録されます。

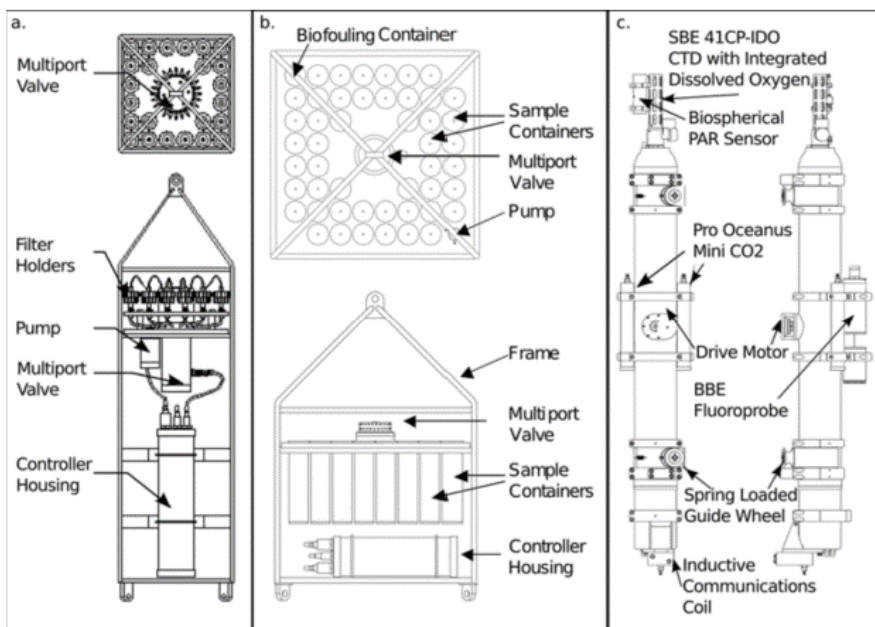


図7. McLane社機器図面

a) PPS

b) RAS

c) ITP と追加センサー

時系列懸濁粒子サンプラー (PPS)

McLane社PPSは水柱から懸濁粒子を濾過し収集する様に設計された自立式サンプラーです(**Figures 6c and 7a**)。ポンプとバルブメカニズムはフィルターへ最大10Lもしくは指定した最小ポンピングレート閾値美到達するまでユーザー設定可能な量の水をくみ上げます。RASと対照的に、PPSは24サンプルを採集することができます。各々

の24フィルターは個別の数量のフィルターチャンバーに保管されます。濾過スケジュールは3つ確認用複製試料をサンプリングスケジュールに重なり合うサンプルイベントを除いて18日間隔で1年を通して等分配されました(表2)。各サンプリングで濾過された微生物群落の正確なスナップショットを果たすため、試料収集後速やかに濾過された試料を固定する必要があります。よって、特注貯蔵部を含むフィルターチャンバー(Taylor et al., 2013)(Figure 6d)はサンプル収集まで防腐用の蔗糖溶解緩衝剤(SLB)を保持する為に使用されました。フィルターチャンバーはグルタルアルデヒドなど防腐剤と共に使用されるように設計されましたが、防腐剤のいくつかはフィルターユニットを通り抜けて湖に拡散してしまうので、環境保護がドライバレーの第一義であるので、無毒であり、配列されたDNAを保持するために使用された時に上質の保存剤となるSLBを使用することを選択しました(Mitchell & Takacs-Vesbach, 2008)。なぜならフィルターチャンバーは周辺水より濃度の薄い防腐剤を使用する設計になっており、PPSはフィルター上部に防腐剤貯蔵部が逆さまになる状態で設置されました(Figure 6c)。PPSからの取入れ口ホースはRAS採水器の取入れ口と同じ水深になる下向きに配備されました。

マクマードドライバレーの湖沼学術調査の挑戦

マクマードドライバレーの永久に氷で覆われた湖は年間を通して、氷の下で湖沼学術観測を可能とします。しかしながら、絶えず変化する氷表面の係留機器は確実に障害物になります。我々は4か月に及ぶ全暗、氷の消融、強い谷風、沈殿物を含んでいる氷結などと対抗することを学びました。経験と気づきの信頼できる水準はこの環境下でどの様に機器を運用、展開するかを根回しされています。このような経験はめったに伝達されることはなく、研究者はしばしば、わざわざ一からやり直さなければなりません。ここで我々はマクマードドライバレー湖沼学術調査に用いたユニークな現場で費やした手法を詳しく述べます。我々が以下に最重要点としている問題は読者が我々が過酷な環境下で作業を実施してきた経験から学んだことはためになるかもしれません。

輸送業務

装置や人の輸送はドライバレーでの作業においては重要な難問です。ドライバレーに到達するまでに、全ての装置と人はアメリカよりニュージーランドへ船か飛行機を経由し、マクマード基地へ飛行機で移動、ドライバレーにはヘリコプターによって移動しなければなりません。南極は迅速な工程として予定されたとしても数日伸びるあらしが多い事が知られています。機器において、リードタイムはフィールドワークが始まる2~3か月前にほぼ全ての機器はアメリカより出荷することが必要になるほど長いです。リチウムイオンバッテリーのようなアイテムは商用飛行機で運搬できない、購入及び出荷(船積)は機器設置前の数か月前から始めなければなりません。2013年、これらの輸送業務は米連邦政府の一時閉鎖によって更に複雑化されました。我々の出発たった6日遅れただけだったが、全体の極域プログラムの輸送の影響はかなり大きかった。我々はこのプロジェクトが出発前の3日前にキャンセルされなかったと通知を受け、チームの一人が出発便の24時間未満でその搭乗チケットを受領し、我々は大多数の機器の到着前にマクマードに到着しました。南極大陸、そのような遠隔地での作業に関連した別の挑戦があります。事前に適切に計画されたとは言え、思いがけない状況が発生した際にフィールドにおける必需品、良好な通信及びインターネットアクセスは特に助けになります。ドライバレーのフィールドキャンプはインターネットアクセスの間欠性がありますが、残念ながら2013年、ボニー湖のフィールドキャンプでは接続がセットアップできませんでした。これはイリジウム衛星回線で外部と通信する上で制限され、機器メーカーや予期しない事態や状況に順応能力を著しく削減された通信環境になります。

氷穴あけと融解

寒さ、ドライバレーの湖の分厚い氷は穴を貫通させることは難しく、さらに結氷板に含有された堆積物によりより困難となります。湖に風で吹かれて移動した全ての堆積物は表層の氷を通して溶け込み、数年の間留まることがで

きる氷の中間に閉じ込められる。3 から 5 m の表層結氷を貫くため、氷を貫通する穴あけと溶かすことは著しい時間が掛かることを意味します。穴をあける為、Jiffy社モデル30 アイスドリル (Sheboygan, Falls,WI) は簡単に使用でき、寒冷地においても信頼性があります。多くの湖で体積物の高い濃度は表層結氷の 1 から 3 m の深さに存在する (Fritsen & Priscu, 1999)。この氷に穴をあけると、一つの穴を開けるとしても新品もしくは新たに研がれた刃であるかが非常に重要な事であります (Figures 8a and 8b)。課題に応じて、一般的には 5~10 インチ (13~25 cm) 直径であるドリルの穴をさらに大きくする必要があります。この手順は湖の氷の中で凍ったケーブルを融かしたり大きな機器を展開するために共通です。ドライバレーで氷の穴を大きくするためには Hosty 社モデル 500 ディーゼル駆動産業用高圧洗浄機 (Camas, WA) で実行されました。これらの装置は閉鎖型ループの中で温められたエチレングリコールを循環するように改造されました (Figure 8c)。特注ステンレススチールか銅製のコイルがループ部分に使用され、水の中で熱を変換するスターターホール内に配置されました。拡張された氷の穴は氷の温度が上昇する時、ますます難しくなります。氷が等温になり、水が飽和するに従って、加えられた熱が水によってすぐに散逸されます。しかしながら加熱されたグリコールループの燃費性能は気温で上昇します。よって、融解は気温が 0°C を下回る 10 月下旬と 11 月に最も効果的になります。

風と氷浸食

滑降風はマクマードドライバレーに共通しており、70km/h の速度に達することがある (Nysten et al., 2004)。湖の表面には防風設備は無く、計装器械はこの風力に耐えるように設置されなければなりません。残念ながら、氷の風化は絶えず変化する凸凹表面を創り出しますので、係留系を永久的に設置することは不可能であります。木は氷の中に溶け込まない表面に残るいくつかある物質の一つです。この優れた熱絶縁物の不都合は氷のテーブルに座る状態に機器のパレットを導くことができるその下の氷を切除することから氷が削れない様に防ぐことができるのである。切除によるプラットフォームが持ち上げられるか傾いた際、潜在的に電源システムや機器に損害を与える強風がそのプラットフォームをひっくり返す可能性があります (図 8 d)。我々はこの問題に対し長期の解決策に取り組んでいるが、氷の中に固定されたガイラインで確認しています。



図 8. ドライバレー湖で作業の挑戦と方法

- a) ドライバレー湖でドリリングで掘り出された物質を含んだ氷破片
- b) 穴の部分を掘った後のまかれたオーガー刃
- c) Hosty 高圧洗浄機でセンサーのケーブル周辺の氷を融かす
- d) アブレーション先端と 2013 年冬季の間に風でひっくり返されたセンサープラットフォーム

腐蝕

ドライバレーの塩水湖は強い腐蝕性の環境です(Green & Lyons, 2009)。表層近傍の水は最近氷河の雪解け水から流れ込んだ真水に近く (Spigel & Priscu, 1998)、底水の塩分はやりがいのある環境を生み出します。現在使用している機器は主に表層近傍に設置されており、ほとんど腐蝕の影響を受けない傾向にあります。新しい機器がより深い深度に設置されていますので、注意は管理できない腐蝕を防ぐことに注力しなければなりません。

全ての金属と金属接触する部分は電極酸化を最小限に止めるために電氣的に絶縁されました。可能であれば、チタニウムか316ステンレススチール製の耐圧容器を選択されました (304ステンレススチールではより簡単に腐蝕します)。それらの使用が不可能な法外に高価な場合、亜鉛メッキされた鉄を使用してください。

誘導通信

McLane社ITPは機器設置後、有効な通信とデータ検索を提供するSeaBird社製誘導モデムを搭載しております。残念ながら、我々が使用しているイリジウムベースのテレメトリーシステムを介して可能なバンド幅はITPで通年通信を行う上で十分ではありません。データは各年内部ITP記録媒体から手動でダウンロードされます。これにもかかわらず我々は設置後ITPの動作を確認するためフィールドにいる間に電磁誘導モデムを使用することをくろんだ。残念ながら、我々の最初の試験後、我々は電磁誘導通信経由でITPとの確実な通信することはできませんでした。多くの試験及び実験にもかかわらず、決定的な原因は分かりませんでした。もっとも一般的な理論としては濃い塩分と溶存ガス勾配による (上記に明記) 湖の表層から湖底の極端に強い潜在的な勾配に起因すると思われます。上部の水地面はほぼ新しい表層水に位置しており、反対側は非常に変質する接触面である塩分を含んだ底水になります。この勾配は表層と底水間の接触の誘導ループでほぼ0.5Vの電位が生じ、誘導通信を妨げます。将来この手法を、使用する際はその湖では代替えできる接続を用いるべきである。

密度勾配

腐蝕問題のほかに、そのようなイオン濃度の高い勾配の環境で作業することは係留索と繋がれているにも拘らず、IPT内部のフロートの浮力変化を引き起こします。表層近傍の水の密度は約0°Cで真水は1,000Kg/m³になる一方、塩分を含む底水はそれぞれ西側ロブ1,200と東側ロブ1,141 kg/m³になります (Spigel & Priscu, 1998の方程式を使用して2012年のデータから計算)。有意な容積の排水量を持つ装置により、それらの水中重量は深度方向プロファイルを渡って急激に変化できます。確かな浮力レンジ内で運用しなければならない機器にとって、この環境は特に試されています。なぜならITPは全深度レンジに渡って中立的な浮力であるときに最大の能力を発揮しますので、ボニー湖の密度勾配は効果的なプロファイリングレンジが制限されます。我々は密度勾配問題を解決するために既に展開された我々のITPシステムに追加部品を導入することをMcLane社技術者と現在、共同研究しています。

極値

水温は1年のほとんど0°C近辺でうろつく (図9 a) ドライバレー湖の環境状況で最も手頃ですが、水柱の至る所に約-5°C~5°Cまで変化します。一方、溶存ガスレベルと塩分は陸水においては非常に極端です。例として、ほとんどの湖の溶存酸素濃度は100%飽和近傍かそれ以下であり (Hanson et al., 2007)、陸水は内陸流域のいくつかの注目すべき例外を含む真水傾向にある (Hammer, 1986)。観測された値は一般的な海洋で得られる値(average of c. 35 mS/cm; Kaye & Laby, 1995)と程遠く低く、このような環境に調和するためのセンサーの問題が原因と思われます。機器設置中にDO及び電気伝導度の両方に問題があることが証明されました。化学技術を使用したDOの観測では47mg/L位に到達します。標準ITPセンサーレンジは空気平衡飽和の120%、真水0°Cでは約18mg/Lです。この範囲外の遮断は図9 bに表されています。電気伝導度計測もまた極値 (図9 c) により検証されましたが、根本原

因はセンサーが拡張されたレンジで設定されたためはつきりしません。2014～2015年のフィールド調査のためにこれらの問題を解決するために製造会社と共に作業しています。

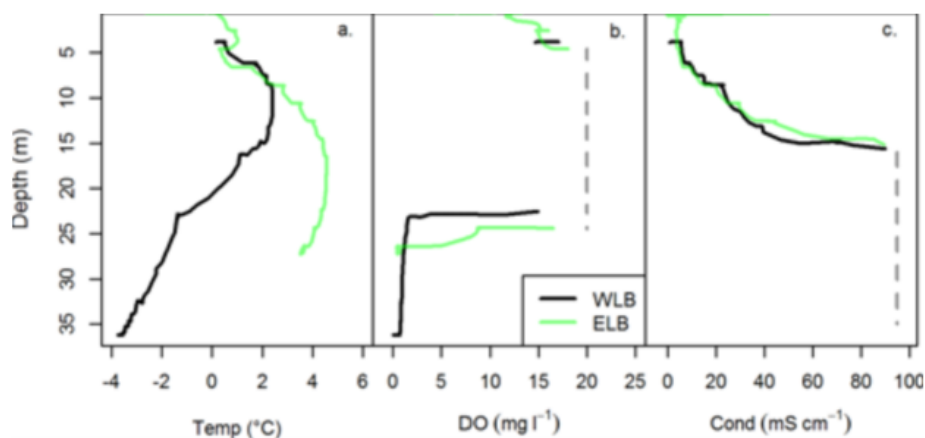


図9. マニュアル作動による予備プロフィール 灰色破線は範囲外

結論

マクマードドライバレーで研究を行うことは挑戦することである。飛躍的に改善された機器はこれら過酷な環境・生態系を理解するための新しい技術を提供している。そのような機器の展開は重要な事であり、継続研究はその最大の潜在能力をはっきり理解するために必要とされています。ドライバレー湖での機器を使用するための我々の経験と提案は既に明記された通りであり、他の研究でも同様に実行されるように促進します。ただ開かれた共同研究、研究者と技術者間の作業や極地調査に係わる討論は地球の極限環境を理解するための調査の援助になる容易に展開できるシステムの飛躍的進歩に向かっていくであろう。

翻訳者： スリーエスオーシャンネットワーク有限会社 勝呂一彦

翻訳内容に関しまして、疑義が生じた場合以下のサイトで英文論文をご確認ください。

<https://mclanelabs.com/ras-papersmedia/>