

スウェーデンにおける国際共同学生気球実験計画 -BEXUS EXIST による成層圏インフラサウンド計測実験-

高知工科大学	山本 真行, 藤津 裕亮, 平塚 丘将
スウェーデン宇宙物理学研究所	ケロ ヨハン
ルーレア工科大学 (スウェーデン)	ペルッソン ロバート, ウェステルベルグ ラス・ゴーラン, クーン トーマス
サンディア国立研究所 (スウェーデン)	ボウマン ダニエル C.

1. はじめに

高知工科大学では、超小型気球を活用した将来的な多頻度・回収型の理学観測を目的とした小型テレメータ装置・バス機器からなる超小型ペイロードシステムの開発を進めてきた。2013年に学部3年生の学生実験テーマとして開始、その後、卒業研究テーマ、修士論文テーマとして定着し、先輩から後輩へと引き継がれつつ開発を継続中である。市販のアドバルーン程度の小型ゴム気球を用いた自動操縦を含む気球実験を可能とするもので、詳細は、2015年度の本シンポジウム講演概要を参考にされたい[1]。

スウェーデンでは、北極圏の都市キルナの近郊にある大気球・観測ロケット等の実験場であるEsrange Space Center(北緯67° , 東経21°)にて、欧州の学生チーム自作の搭載機器の相乗りによる大気球実験が行われている。BEXUS(Balloon Experiments for University Students: 観測ロケットはREXUS)と呼ばれる同実験は、毎年の公募があり学生チームからの応募内容が審査され、教育プログラムとして実践的な内容が取り扱われている様子である[2]。

主著者らは、これまで地球大気中の低周波音波の観測・研究にも携わっており、同じく大気を有する火星での音波観測にも関心を持っている。採択には至らなかったが、2014年1月にはNASAのMars 2020搭載機器の公募(AO)のチャンスにも応募し[3]、着陸機への搭載機器としてのデザイン検討や環境試験も実施してきた[4]。主著者は2016年6月に隕石・流星関係の国際会議であるMeteoroids 2016出席のためオランダにあるESA, Estecを訪問したが、この際にESA関係者や本稿共著者のケロ氏等スウェーデンの研究者を含む数名と情報交換をした。当方からの情報提供は、将来の火星着陸探査に向けBBMを開発中の火星大気中での音波計測のためのマイクの件であり、彼らにはESAとロシアが共同開発している火星着陸機ExoMars 2016(本年10月に火星到達)および同2020の状況をお聞きした。ExoMars 2020には可聴音マイクのほか、低周波音であるインフラサウンドを計測できるセンサーの搭載も予定しているとの情報を得た。

主著者は国内研究者と共同して国内・南極でのインフラサウンド観測やセンサーの開発を長年続けており[5]、2010年6月のはやぶさ帰還観測ではオーストラリア・ウーメラにて大気圏再突入時の衝撃波音とそれに伴う地震の観測を実施した[6]。欧州側のチームもインフラサウンド研究者を必要としており、今後の協力を模索するという話になった。その後、暫く交流はなかったが、10月上旬にケロ氏からキルナのルーレア工科大学の学生チームが気球実験を予定しており、日本で開発中のマイクBBMを同時搭載できないかという打診があり、急遽その可能性を探り、10月17日の申請書提出に間に合うようにSkypeでの会話等を通じてケロ氏および学生チーム代表で本稿共著者のペルッソン氏と情報交換を実施し、ペルッソン氏ほかルーレア工科大学の学生の連名で申請書が提出された。

2. BEXUS学生気球実験のスキーム

以下では、ルーレア工科大学の学生提案による気球実験提案の概略と、日本側として関与可能な方法について述べる。

まず、BEXUSは、広く欧州全域の学生チームからの応募が可能であり、学生提案の申請書の作成過程や様々な審査過程を経て宇宙技術に経験のある若手研究者を育てる教育プログラムである。ESAの下、ドイツDLRとスウェーデンSNSBが共同運営しているようである。今回、以上の経緯によって初めてその一端に触れたが、Web上で入手可能な必要十分な量のマニュアルも備えられ[7]、2007年の初版から改訂が繰り返されており、教育プログラムとしての成熟度は高いと思われる。一方で、科学観測の成果を最大限生むことも目的とされている様子であり、必ずしも学生自作のみにこだわるといふ姿勢はなく、既存機器などの同時搭載によって最大限の成果を生む可能性、もしくはNo Dataなど完全な失敗を招かないための配慮も行われている様子である。

BEXUSで使われる気球は、12,000 m³のボリュームで全高45 m、トランスポンダATC (Air Traffic Transponder)、切り離し機構、バラスト投下機構、テレメータ(2 Mbps, S-Band)、制御機器EBASSを備え、最高高度25~30 km、ゴンドラ全体質量は120 kgで、搭載可能な観測機器質量としては40~100 kg、飛行時間は上空の気象条件等に依存して2~5時間とのことである。夏の終わりから秋にかけての期間は、上空の風を利用してのブーメラン飛行で、スウェーデン(またはフィンランド)北方のラップランドに降下させ回収することができると伺った。マニュアルでは、ウインドウは9月と10月の2ヶ月間のみを設定されている。飛行前の接続試験(噛み合わせ試験)、各種環境試験、最終審査等の事前スケジュールが組まれているほか、飛行実験では予備日を含め10日間のプログラムとなっている。以上、参考文献を見ていただくほうが早いですが、学生用のプログラムとはいえ、一般の大気球実験と遜色のないスケールの実験が行われているものと思われる。

日本では、教員参画のプロジェクトに学部生や大学院生が手伝い要因として参加するところから、大気球や観測ロケット、衛星開発等のプロジェクトの概略を掴んで徐々に経験値を上げて行く形が従来多かった一方、近年では宇宙工学の分野で大学宇宙工学コンソーシアム(UNISEC)が中心となり学生チームが多く参画できるイベントが企画され、申請書からの一連の審査プロセスを含めた教育プログラムが整備されつつある。しかし、宇宙工学が中心のため、科学観測については事実上できないか含まれない場合がほとんどであり、宇宙科学を目指す学生にとっては旧来の教員参画のプロジェクトに参加して経験を積む場面が今でも多いものと思われる。問題はこのチャンスが減っていることにある。

学生から見れば、在学期間中の学部4年から修士2年の3年間に飛行実験等に関われるかどうかは、時の運ということにもなりかねない。そのタイミングによって、博士進学を考える/あきらめる選択にも影響を少なからず与えるものと想像する。近年では、プロジェクトの複雑化・高度化によって、若い世代が関わるチャンスが回数と内容ともに少なくなっていると思われ、後継者の育成に暗雲が立ち込めている点は、何らかの構造改革が必要ではないかと考える。BEXUSの事例を参考にするためにも、今後の進捗を可能な限り紹介していきたい。

3. 成層圏・対流圏インフラサウンド観測計画EXIST

次に具体的な実験計画について紹介する。なお、現在申請中のものであり、今後大きく更新される可能性を有す。実験は、EXIST (EXamination of Infrasound in the Stratosphere and Troposphere)と名づけられた。ペルッソン氏を筆頭に11名連名での提案であり、プロ・マネのほか、機構系、電子系、情報系、科学系、アウトリーチ、および財務担当(すべて学生)が決まっている。協力を仰ぐ研究者として、所属大学の教授が主たる指導担当となり、他に複数の大学・機関からの氏名がある。主著者も、今回は海外からの協力者という形でこのリストに記載いただい

た。採択されれば、当方でも学生の修士論文等と絡めた実験へと発展させたく、費用面では今後競争的資金への応募も予定しているが、可能な限り善処しつつ、折半の予定で話を前に進めた。

インフラサウンドは、人間の可聴音下限の20 Hz以下の音波を指す。音波は低周波ほど大気粘性に拠る減衰の影響が周波数の2乗に反比例するため、長距離まで伝搬でき、かつ上下方向にも伝搬して音速の早い(温度の高い)大気中を選択的に伝搬して遠方に伝わる性質を持つ。直達波だけでなく成層圏上部や熱圏からの散乱成分が地上観測される。波長が長いため、大規模な爆発など以外では人工的に作る事が難しく、地球物理学的自然現象が生む場合が多い。例えば、火山噴火では空振として知られ、火山のハザード判断の有力な指標となっているほか、雷、土石流、雪崩、竜巻、地震、津波、氷河崩落等で発生することが知られている。

EXISTでは、スウェーデンの極域インフラサウンド観測網の管理者の1人であるケロ氏と共同して地上のインフラサウンド観測施設も用いて同時計測を行う。ここで問題となるのは、波源である。地球物理学的事象はいつ起きるか予測が難しい場合が多く、一度きりの気球実験には不向きである。そこで、鉄鉱石などの鉱山の多い土地柄を活かし、鉱山発破の衝撃波音を観測しインフラサウンドの高層大気中の伝搬過程に関する統計的研究が行われてきた[8]。今回の実験でも、2~5時間の飛翔実験の間に人工的発破音を波源とするインフラサウンドが複数回起きることを想定している。具体的には鉱山関係者等にインタビューして確認しつつ気球・地上同時観測の実験が進むと思われる。日本側からは、火星探査用のBBMとして開発中のマイクロフォンアレイを3台新規に製作して提供する予定である。スウェーデン側では機器開発費の少ない学生実験の状況下でも、科学的な比較実験を実施できるメリットがある。3台は係留索に沿って縦に並べ、平均値を取ることで気球の姿勢変化による成分を打ち消して、地上から届くインフラサウンドの成分(長波長成分)を観測する。地上のインフラサウンド観測では100 mスケール以上のアレイ観測で方向探知等を実現しているが、少なくとも伝搬到来音波の俯角・仰角を計測できると期待する。

上空での音波の計測は、近年あまり事例がない。1950年代の秋田・道川射場時代の実験では、国内でも小型観測ロケットに火薬を搭載して高度10 km上昇ごとに1発ずつ発音弾を順次発射し、その衝撃波音を地上のマイクロフォンアレイで計測して高層大気温度分布を得る実験が行われている。その後、大気モデル等の精密化が進み、計算での再現性が良くなったことから、同様の実験は行われていない。我々は、2012年に高度35 km以上の観測ロケットのモーター燃焼終了後に、搭載スピーカーから人工音を断続的に送出して、同時搭載の複数台のマイクでこれらの音を観測し音波伝搬の周波数特性を調べる実験を、観測ロケットS-310-41号機搭載PDI装置で実施した。驚くべきことに、最高高度地点の上空150 kmの希薄大気中でも可聴音が僅かに伝搬する様子の計測に成功し、理論予測に比較的良く合う分布が得られた[9]。この際、地上からも大音量の重低音スピーカーで上向きに予め音を発生させた状況で打ち上げを行ったが、この伝搬音は上空35 km以上では減衰しきっており観測できなかった。ロケット燃焼音により音響観測がほぼ不可能な高度域における音波伝搬特性の情報を得るには、気球実験しかない。今回の実験でマイクBBMを搭載できれば、上空への音波伝搬特性を計測したいと考えている。一般に爆破による衝撃波音は打撃音のごとくホワイトノイズ的なフラットな周波数特性があるため、上空での観測スペクトルと比較すれば音波・インフラサウンドの上下方向への伝搬時の周波数特性が実測できるものと期待している。

4. まとめ

本発表では、学生提案による気球実験プロジェクトの国内外での事例を報告するとともに、スウェーデンと日本の2国間共同での学生共同気球実験計画 EXIST を紹介した。現在この計画は審査中であり、

まさに端緒についたばかりではあるが、スウェーデンでの気球実験のスケジュールでは2017年10月の飛翔実験を予定するという非常に急ピッチでの進展が予想されるプロジェクトでもある。今後、採否にかかわらず、気球搭載可能なマイク **BBM** の開発を継続するとともに、採択の場合には、国内開発のマイクアレイセンサーの搭載を実現すべく、学生とともに積極的に関与していきたい。

参考文献：

- [1] 河野紘基, 枝本雅史, 平塚丘将, 山本真行, 超小型気球をキャリアとする緩やかな着陸点誘導型ペイロードシステムの検討および開発, *大気球シンポジウム*, isas15-sbs-025, 2015.
- [2] REXUS/BEXUS - Rocket and Balloon Experiments for University Students, <http://rexbexus.net/>, 2016年10月参照.
- [3] Masa-yuki Yamamoto, Mitsuteru Sato, Keigo Ishisaka, Yukihiro Takahashi, Kazunori Ogohara, Masashi Kamogawa, Hideaki Miyamoto, Studies of Dust and Discharges around a Martian Rover with Onboard Hazard Analyses using Electromagnetic and Acoustic Wave Measurements, *Trans. JSASS*, ists30, Pk_41-Pk_45, 2016.
- [4] 千秋博紀, 大野宗祐, 乙部直人, 山本真行, 仲吉信人, はしもとじょーじ, 梅谷和弘, 池原光介, 藤津裕亮, 火星環境模擬チャンバーを用いた探査機器の耐環境試験, *千葉工業大学研究報告*, **63**, 69-74, 2016.
- [5] Masa-yuki Yamamoto, Yoshiaki Ishihara, Masaki Kanao, Infrasonic waves in Antarctica: A new proxy for Monitoring Polar Environment, *International Journal of Geosciences*, **4**, 797-802, 2013.
- [6] Yamamoto, M.-Y., Y. Ishihara, Y. Hiramatsu, Kazuki Kitamura, M. Ueda, Y. Shiba, M. Furumoto, K. Fujita, Detection of Acoustic/Infrasonic/Seismic Waves Generated by Hypersonic Re-Entry of the HAYABUSA Capsule and Fragmented Parts of the Spacecraft, *Journal: Publ. Astron. Soc. Japan*, **63**, 971-978, 2011.
- [7] BEXUS User Manual 6.13, http://rexbexus.net/wp-content/uploads/2015/05/BX_REF_BX_user-manual_v6-13_03Feb16.pdf, 2016年10月参照.
- [8] Y Gibbons S Asming V Eliasson L Fedorov A Fyen J Kero J Kozlovskaya E Kvaerna T Liszka L Näsholm S Raita T Roth M Tiira T Vinogradov, The European Arctic: A Laboratory for Seismoacoustic Studies, *Seismological Research Letters*, **86**, 2015.
- [9] Daiki Kihara, Masa-yuki Yamamoto, Takatoshi Morinaga, Ayano Hatakeyama, Yudai Manabe, Jun-ichi Furumoto, Takumi Abe, In-situ measurement of acoustic wave propagation characteristics in middle and upper atmosphere by PDI on-board S-310-41 sounding rocket, *Trans. JSASS*, **12**, No. ists29, Pm_1-Pm_6, 2013.