

月の砂漠に水をもとめて

月の極域にも ロプノールはある！



山中 千博(大阪大・理)

19世紀末
地球科学における冒険的フィールドワーク



シルクロードのオアシス
ロプノールの伝説

Sven Anders Hedin
1900年3月28日
伝説のLop Nur湖および遺跡を発見
→ シルクロードの日

さまよえる湖

“Wandering lake” Lop Nur

タクラマカン砂漠



周囲の山脈から水が供給

標高差がないために、
浸食と堆積によって、川の流れが
変わり、南北に湖が移動していた。
約1500年周期。
現在は完全に枯渇



Japanese Lunar polar Exploration Lander

21世紀前半における惑星科学的探査
(冒険)

月の砂(レゴリス)中にある微量水の探索
近年のリモートセンシングで月面微量水の証拠が増加



水の重要性

水惑星がどのように形成されるか？

水環境、生命発生、生命活動との密接な関係

水の起源はどこ？（供給と捕獲）

水の挙動はいかに？（保持、移動、散逸）

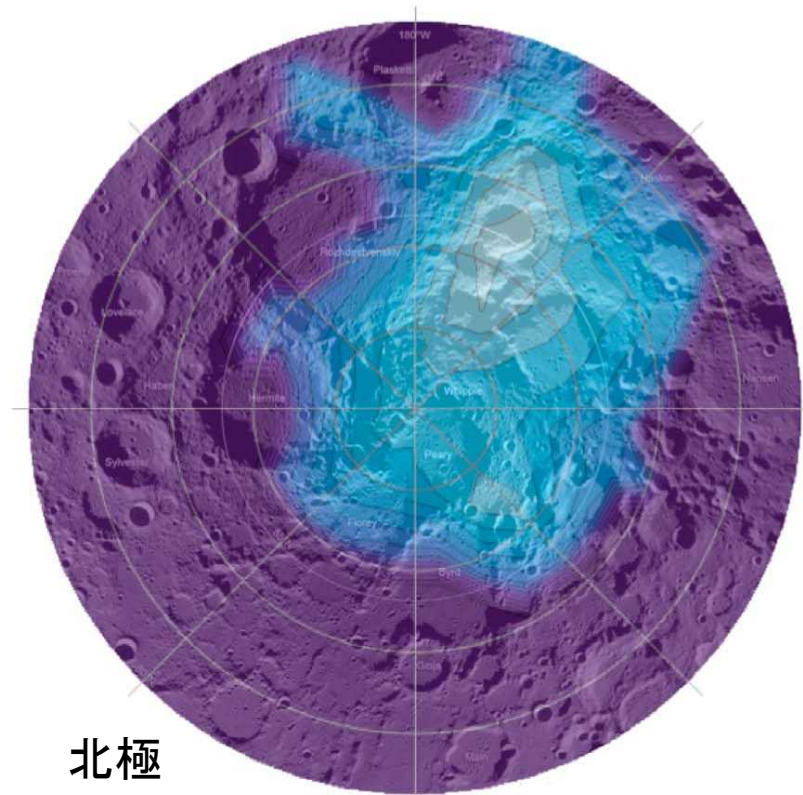
宇宙開発上も、地球外の水資源探索は重要

持続可能な有人・無人宇宙活動に不可欠な物質

電気分解で水素燃料

地球からの輸送コスト >> 現地調達コスト

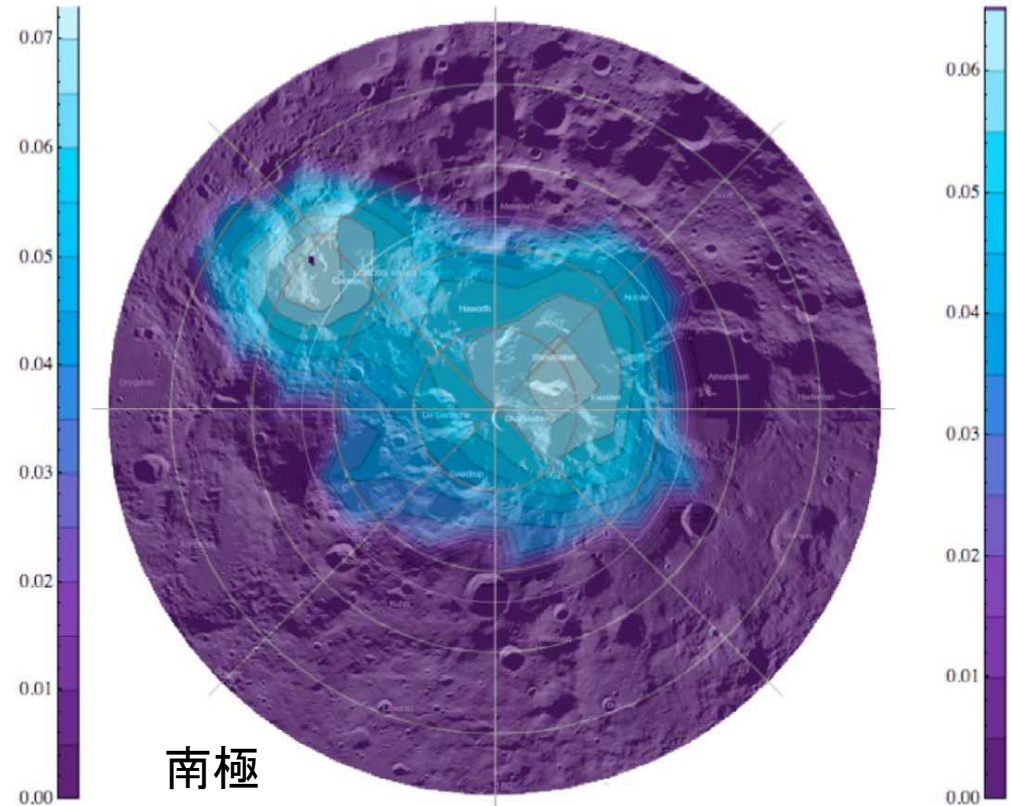
月極域で広範に見られた水素濃集 -中性子分光法-（水素に感度あり）



北極

（緯度80° 以上）

WEH enhancement = $([H] - [H]_0) \times 9$
[H]₀: average non-polar level (0.045% WEH)



南極

（緯度80° 以上）

Epithermal neutron (Resol: 400 m/pixel)

Miller et al., 2012

水等価水素量 **WEH $\approx$ 0.1-0.5 wt%** (Sanin et al., 2017)

月面における水供給源はどこ？

1) 太陽風 + 岩石(酸化物)

重水素をほとんど含まない水素Hと岩石酸素Oの反応

(ごく最近の説には地球からの水素・酸素供給の可能性も)

2) 隕石(微小隕石) 地球の水の源

3) 彗星 重い水素Dを～2倍程度(対地球水比)含む

参考 火成活動が活発な古い時期なら...月固有の水(火山ガス)も。

月マントル中の水は地球なみ(<数百ppm)?

(2008年以降の発見 – 分析科学 & リモセンの進化)

月の地下には どれだけの水があるだろうか？

これを探しに行く冒険の旅に必要な装備は？

微量→ 地球水によるコンタミをふせぐため、その場観測が必要

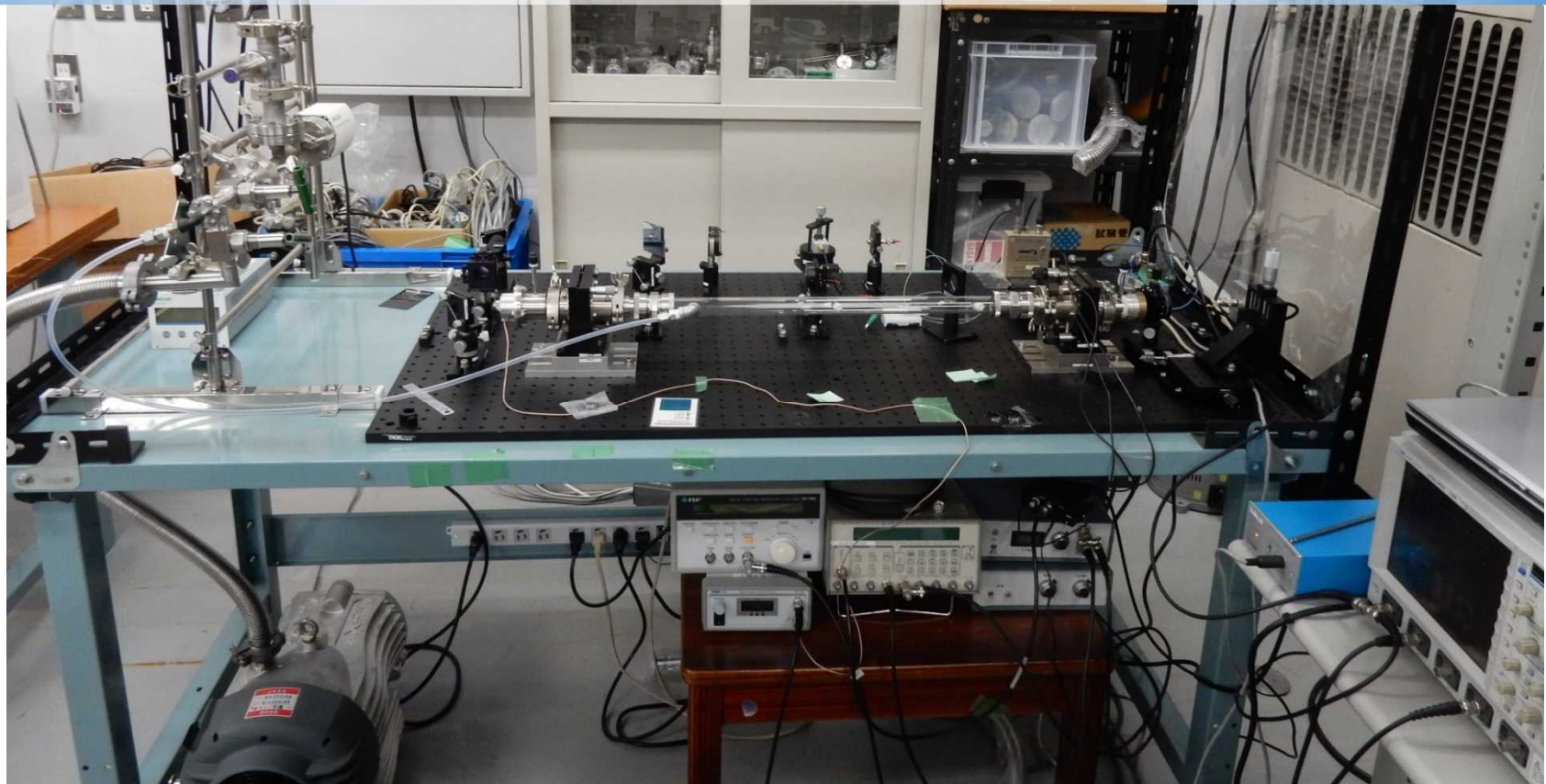
計画されているもののひとつが、

レーザー微量水分計

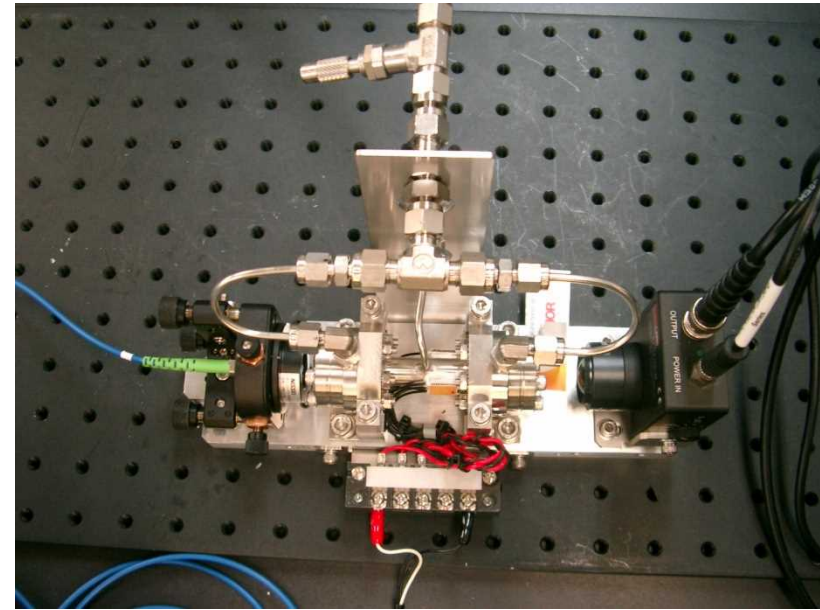
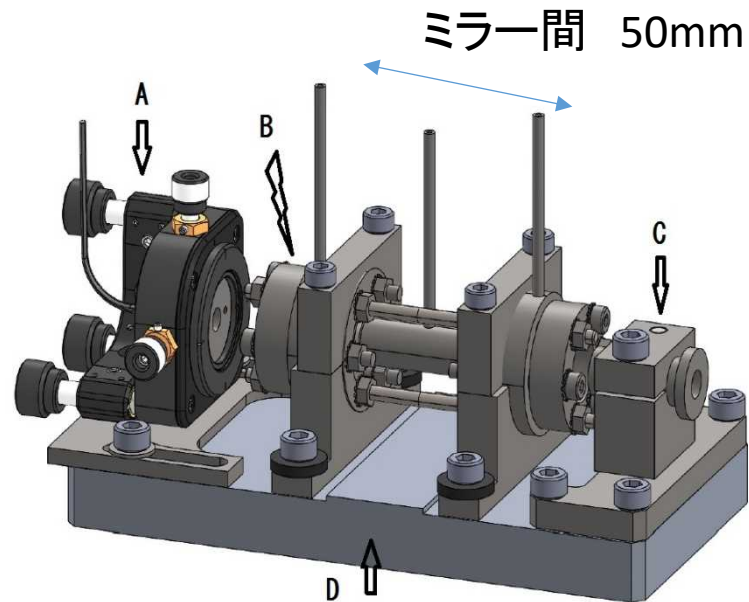


レーザー軽元素同位体 アナライザー

通常の 50cm レーザー検出光学セル



宇宙探査イノベーションハブ 2016-19（神栄テクノロジー, AIST, 阪大, 茨城大, 鹿児島大）
ガス中微量水分計の小型・軽量・ロバスト化技術の研究



重量2.7kg, サイズ100mm×100mm×260mmの**小型軽量なレーザー水分計(CRDS)**

（世界最小） 体積比は当初目標の33% まで削減

ロバスト性（JIS C60068-2-6 正弦波振動試験 落下試験などクリア）

最高検出感度 0.8ppbから20ppmの幅広い測定レンジ

市場・事業化

半導体製造ライン、リチウムイオン電池生産ライン・ガス精製プラントなど
高感度でリアルタイム水分計測が必要とされる領域へ製品開発中

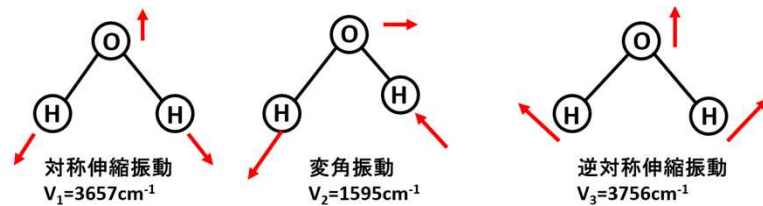
（事業化計画 5000万円, COVID-19のため遅延）

目的 宇宙機搭載レーザー微量水分計

ハブで開発した小型CRDS装置(5cm)をベース

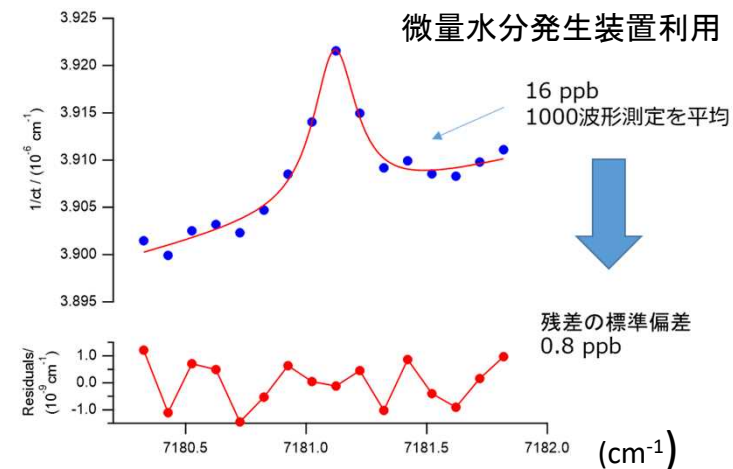
→ 波長1.39 μm 帯のレーザー

1) レゴリスから抽出した微量水分計測



近赤外では基本吸収の倍音領域を観測

乾燥窒素1気圧中水分



2) + extra 水素同位体(H/D) 分析

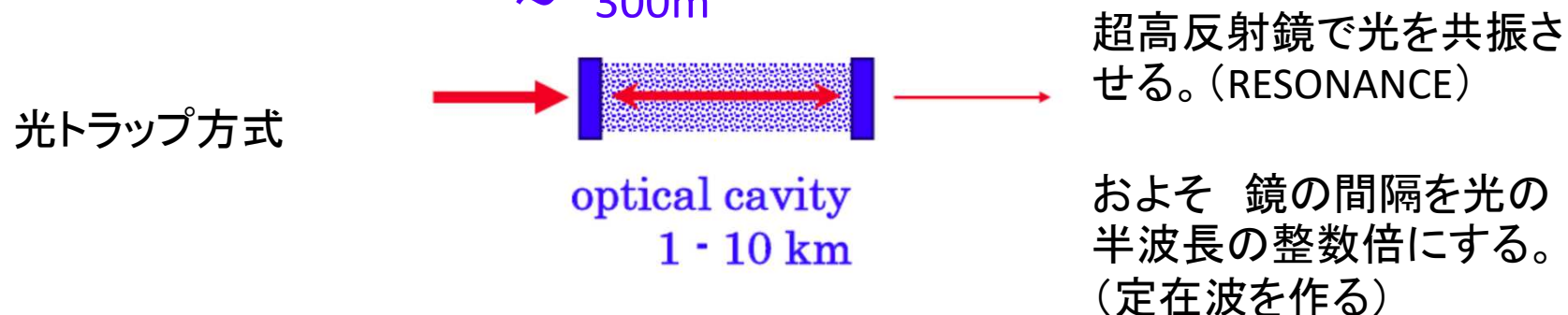
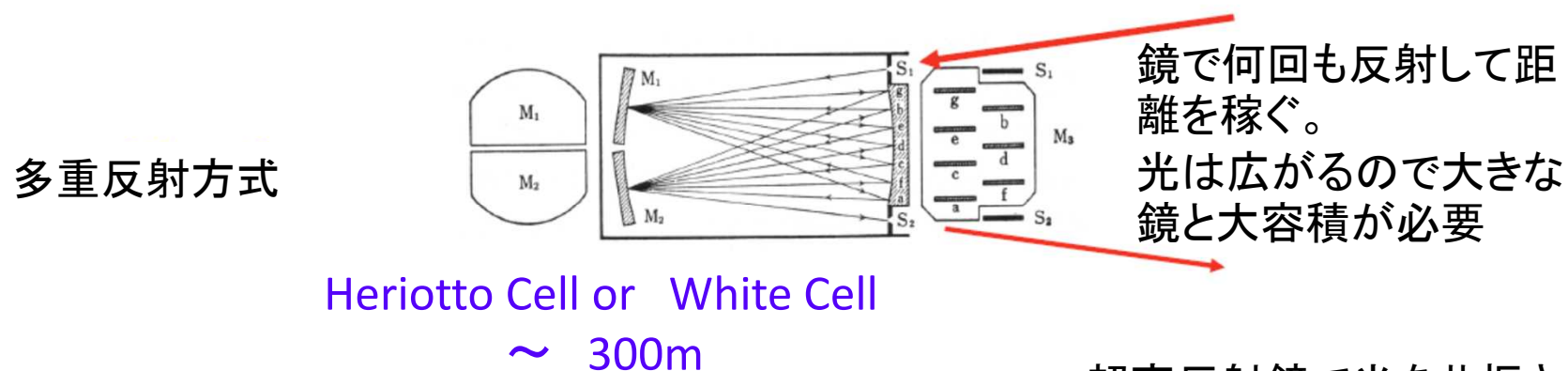
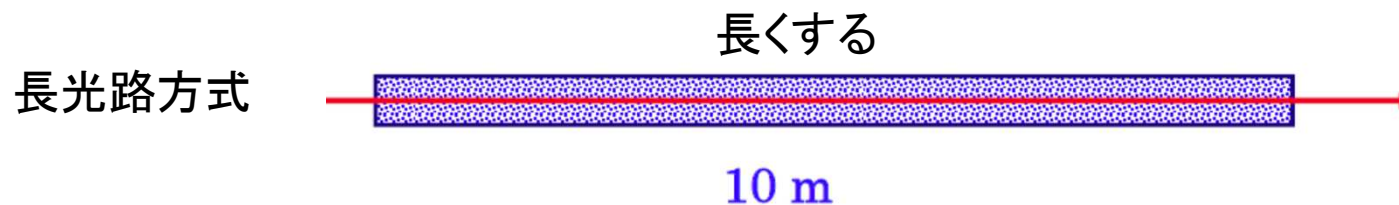
参考

^1H , $^2\text{H}(=\text{D})$ 重水素) 0.999885:0.000115

^{16}O , ^{17}O , ^{18}O 0.99757: 0.00038: 0.00205

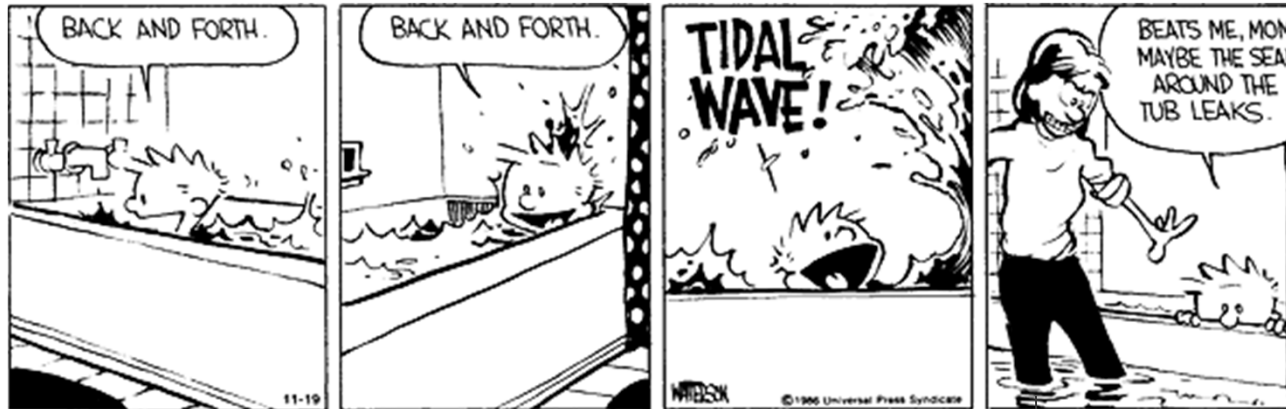
組み合わせ水同位体 H_2^{16}O , H_2^{17}O , H_2^{18}O , **HDO**

微量のマイナー成分を光で測定するには、長い光路が必要
(わずかな吸収を、積算して計測する)



CAVITY RINGDOWN (CRDS) 法 とよぶ

CRDS法とは...

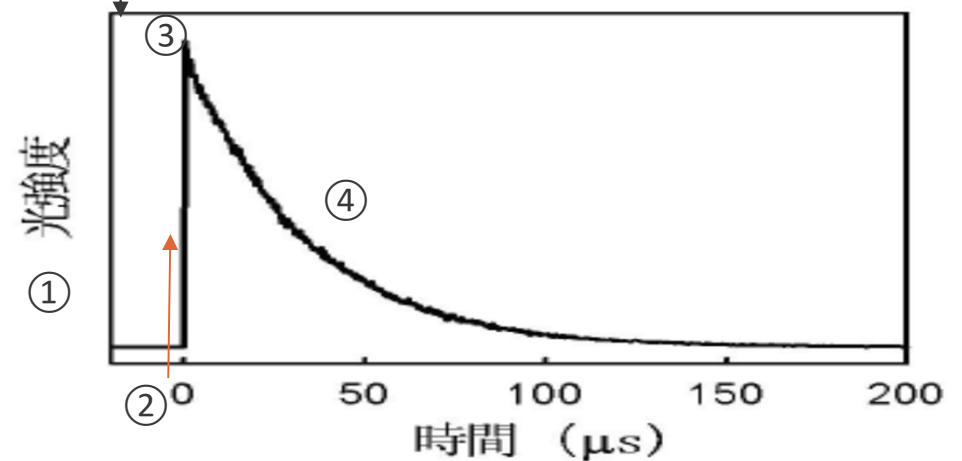


Calvin and Hobbes

$$L_{CRDS} = \frac{L_{cell}}{1 - R}$$

実効的なcavity長
R : 反射率

- ① cavity に レーザーが入る
- ② cavity長が半波長の整数倍 $\frac{\lambda}{2} \times n$ になる瞬間
共振→セル内に光がビルドアップ
- ③ レーザーを高速で遮断 →
- ④ 出射側 検出器には減衰波形が観測される

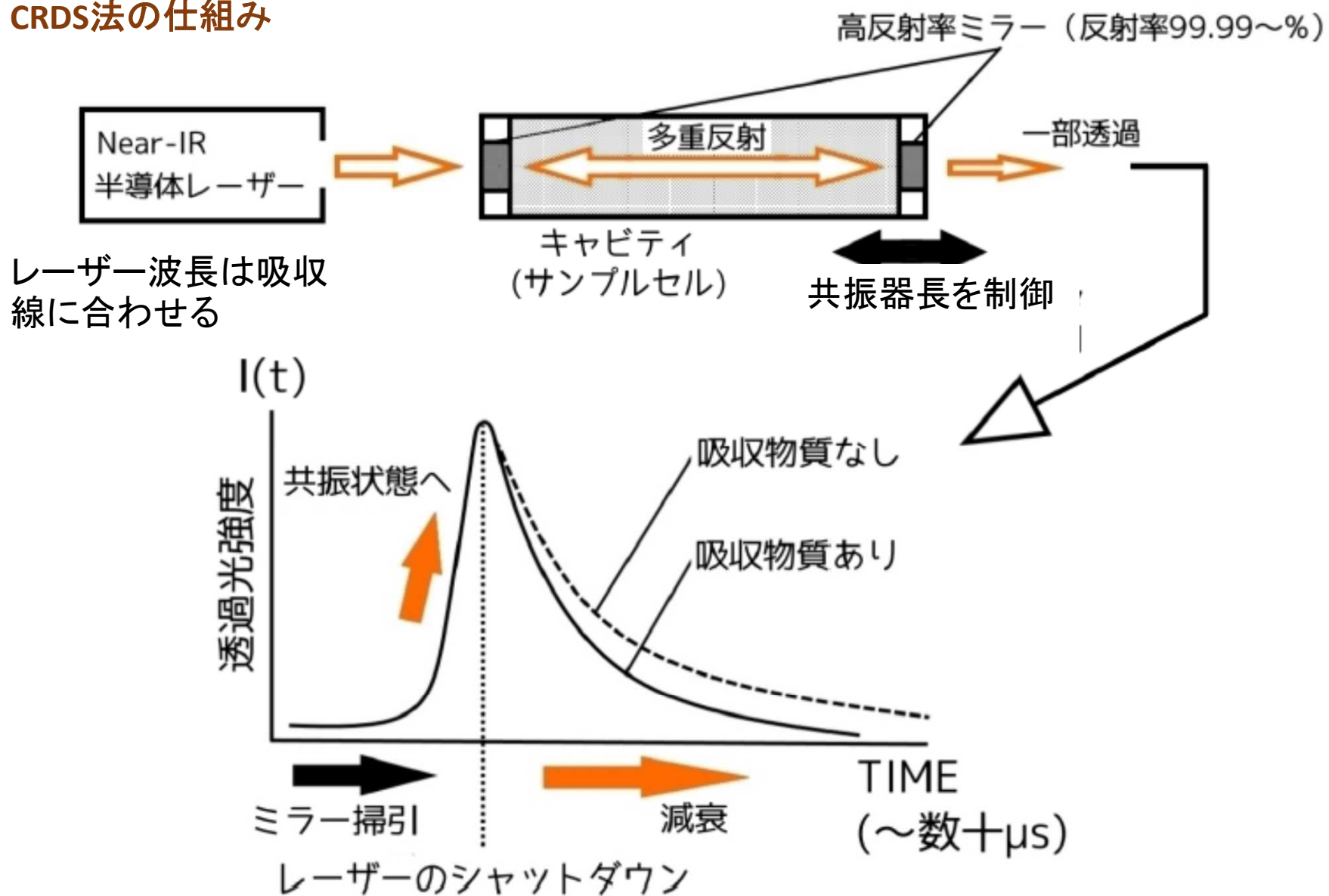


真空時のリングダウン時間は、 $\tau = \frac{L_{cell}}{c(1-R)}$

R=99.996で $\tau = 4.16\mu s$,

R=99.998で $\tau = 8.33\mu s$

CRDS法の仕組み



光の計測は 減衰時間の時定数だけでよい。

マイナー同位体Dの偏差を示す値

デルタD値
$$\delta D = \left[\frac{\left(\frac{D}{H}\right)_{sample}}{\left(\frac{D}{H}\right)_{VSMOW}} - 1 \right] \times 1000 [‰]$$
 千分率(パーミル)

地球におけるD/H比 (標準海水Vienna Standard Mean Ocean Water)

$$\left(\frac{D}{H}\right)_{VSMOW} = 155.76 \pm 0.1 \text{ ppm} \sim \frac{1}{6420} \quad \text{これを } \delta D = 0 \text{ とする}$$

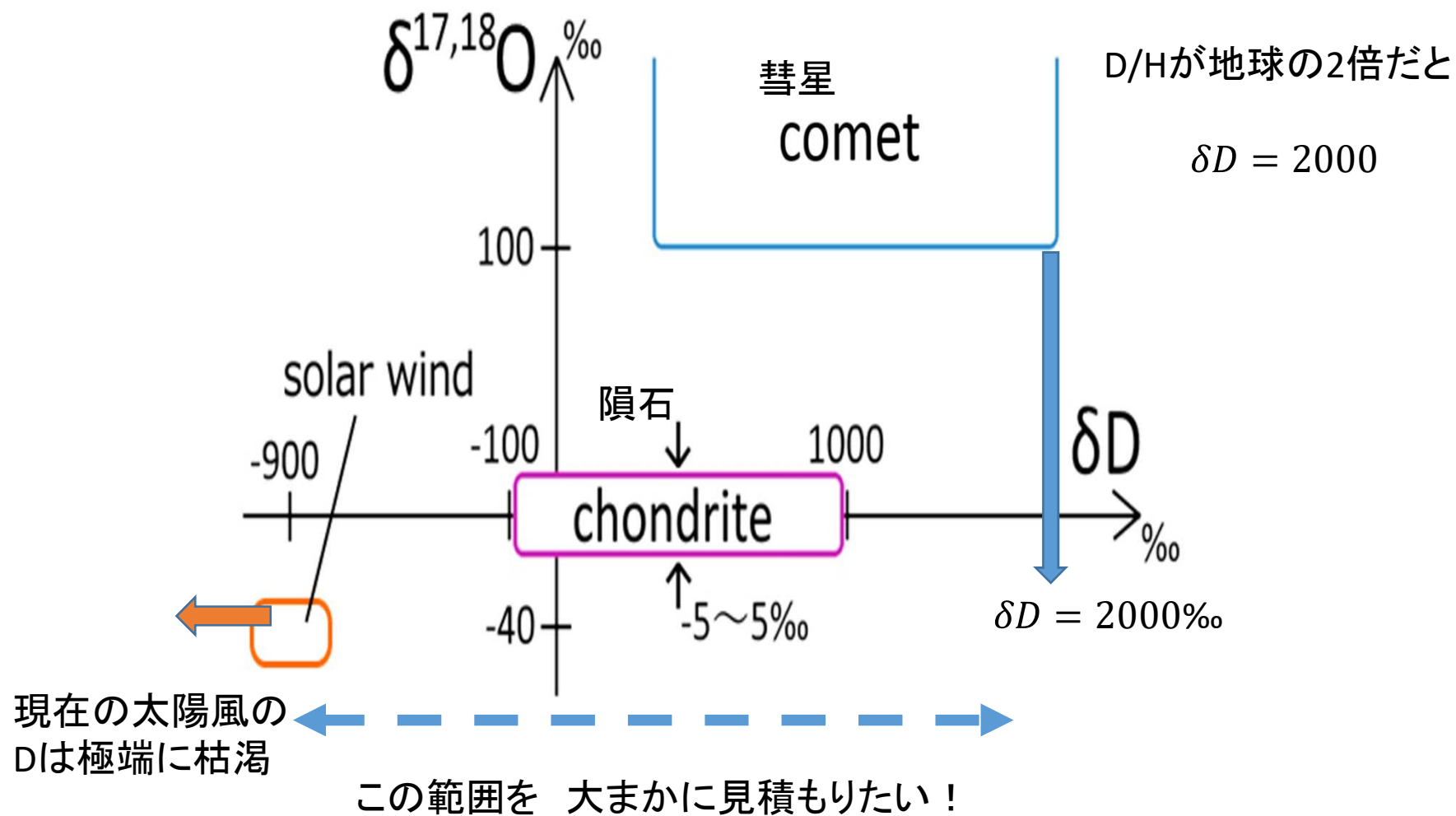
蒸発移動時に軽いHは動きやすい → 南極氷で $\delta D = -400$ あり
標準海水D/Hの60%程度

月の $\left(\frac{D}{H}\right)$ 比が地球の1/10だと、

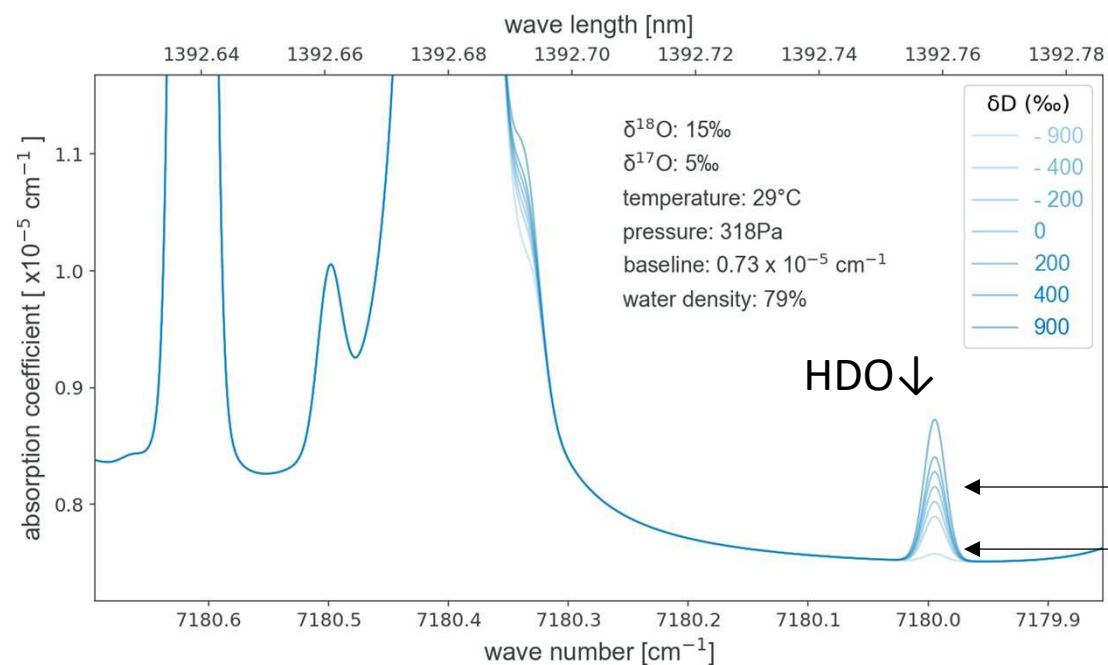
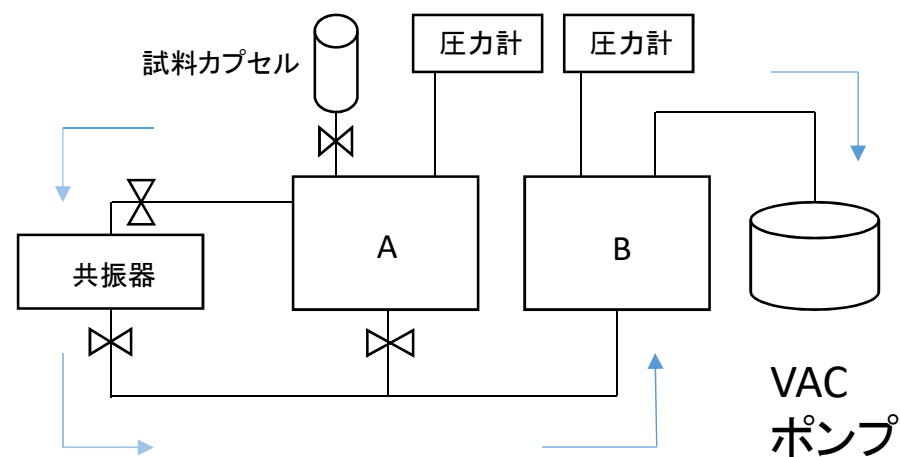
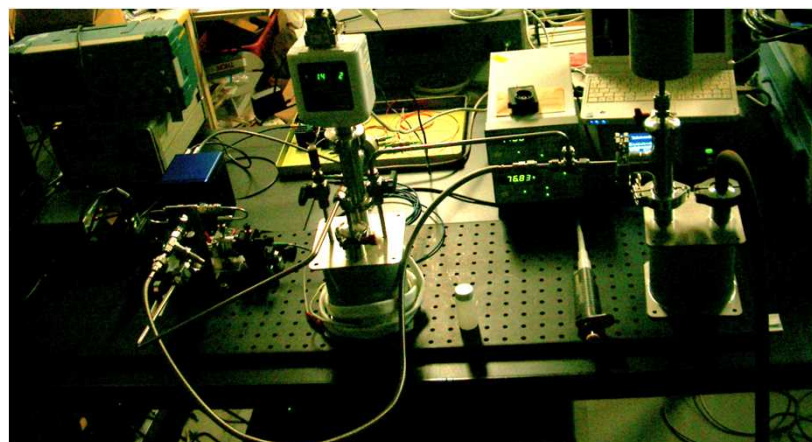
$$\delta D \rightarrow \left(\frac{1}{10} - 1\right) \times 1000 = -900$$

月の1/100だと、

$$\delta D \rightarrow \left(\frac{1}{100} - 1\right) \times 1000 = -990$$



$\delta \text{値} = (\text{R試料} / \text{R標準} - 1) \times 1000 \text{ ‰}$
 ただしR = 微量同位体量 / 主同位体量である。



波長を変えればD/H測定にさらに適する領域もあるが、今回は先行した水分計ファーストで計画されている。

$\delta\text{D} = 0$ のレベル
 $\delta\text{D} = -900$ のレベル

まとめ レーザー微量水分分析

CRDS法 = 軽量・低電力・高感度レーザー水分計
必要試料容積を最小化できる極微量用高感度分析法
微量水分計測 > ppbレベル@大気圧 ~ 28ng/mol

宇宙機としてダウンサイズ ~ng/cell
 ϕ 5cmセル(~15cm³)で、 2kPaー200Pa 純水蒸気ガス計測

同位体計測(extra) 要求性能は
D/H 比 10% 精度
低濃度測定限界 対地球DH比 1/10 ($\delta D = -900$) or better

ADORE (Aquatic Detector using Optical REsonance)
と命名

なんとか よりよい成果を出したいと思っています！



謝辞 宇宙探査イノベーションハブ

第2回 地産・地消型探査技術／課題解決型 2016年12月－2019年3月

ガス中微量水分計の小型・軽量・ロバスト化技術の研究

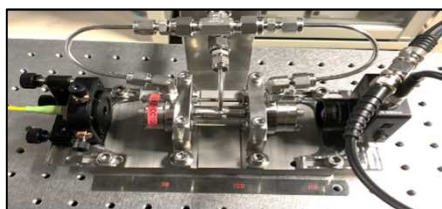
産学共同による成果から日本独自の宇宙探査へ

神栄テクノロジー 株式会社（本田 真一）

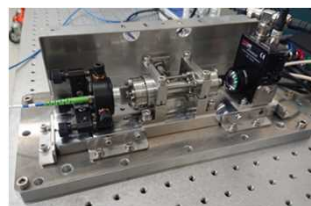
国立研究開発法人 産業技術総合研究所（阿部 恒）

国立大学法人 大阪大学（山中 千博），茨城大学（橋爪 光）

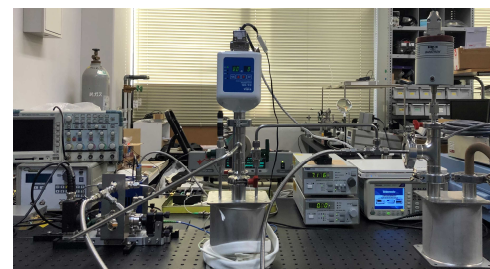
鹿児島大学（大橋 勝文）（報告書 記載順）



小型CRDS実証機2号機・3号機



4号機



阪大の同位体計測用
5cm CRDS装置