



物理学会

KAGRAサファイア懸架系プロトタイプによる
研究I

2016年3月21日

東京大学 宇宙線研究所

梶田研究室修士2年 田中宏樹,

山元一広, Kieran Craig, 宮本昂拓, 都丸隆行^A, 鈴木敏一^A,

Rahul Kumar^A, Ronny Nawrodt^B, 梶田隆章

ICRR, ^A*KEK*, ^B*Friedrich-Schiller-Universität Jena*

Abstract

- ・ 現在、重力波検出のため、重力波検出器KAGRAが建設中。
- ・ KAGRAでは熱雑音を低減するため、サファイアミラーを4本のサファイアファイバーで吊って20Kに冷却する（サファイア懸架系）。
- ・ サファイア懸架系のprototypeを構築し、実験を行った。

Contents

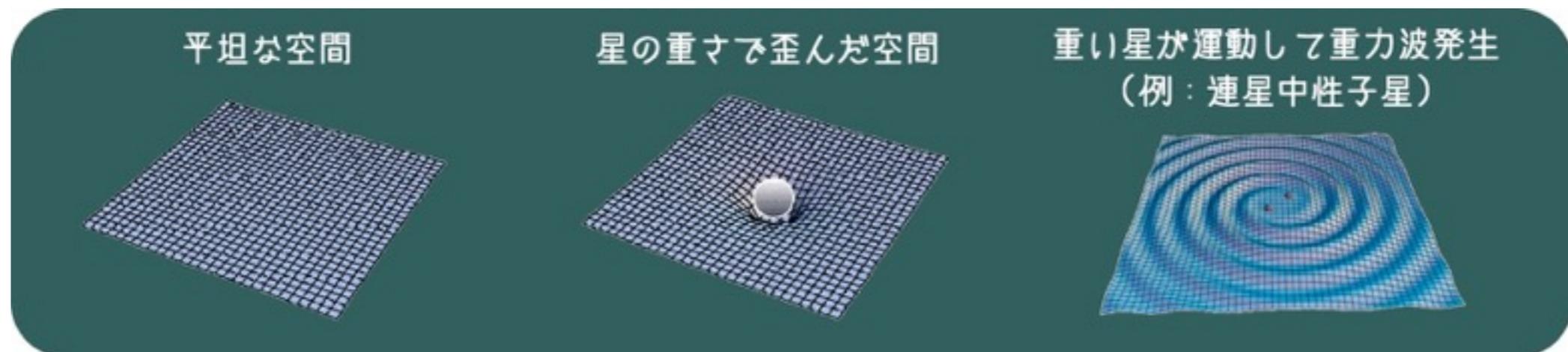
1. 重力波とは
2. KAGRAの特徴
3. Sapphire suspension
4. one fiber prototype
5. まとめ

重力波とは

一般相対性理論によると、非常に重い物体の周囲の時空は歪む。その物体が加速度運動すると、その歪みは光速で伝搬する。これを重力波と呼ぶ。

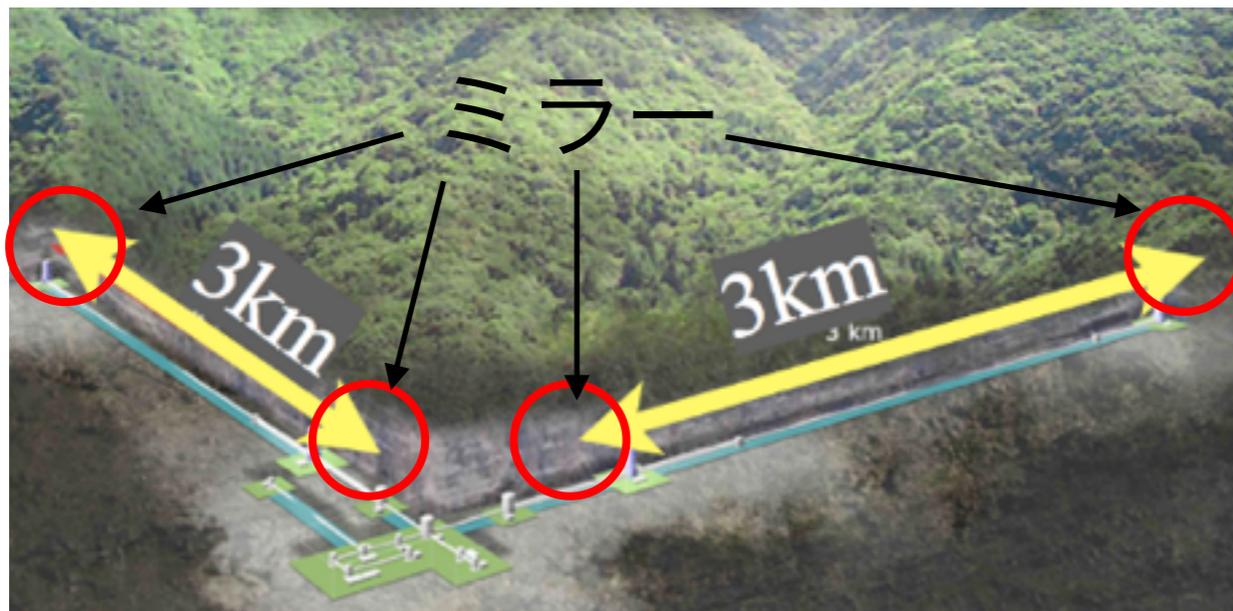
重力波は1916年に予言され、約100年経った昨年、初めて観測された（LIGO）。

KAGRAでも観測を目指している。



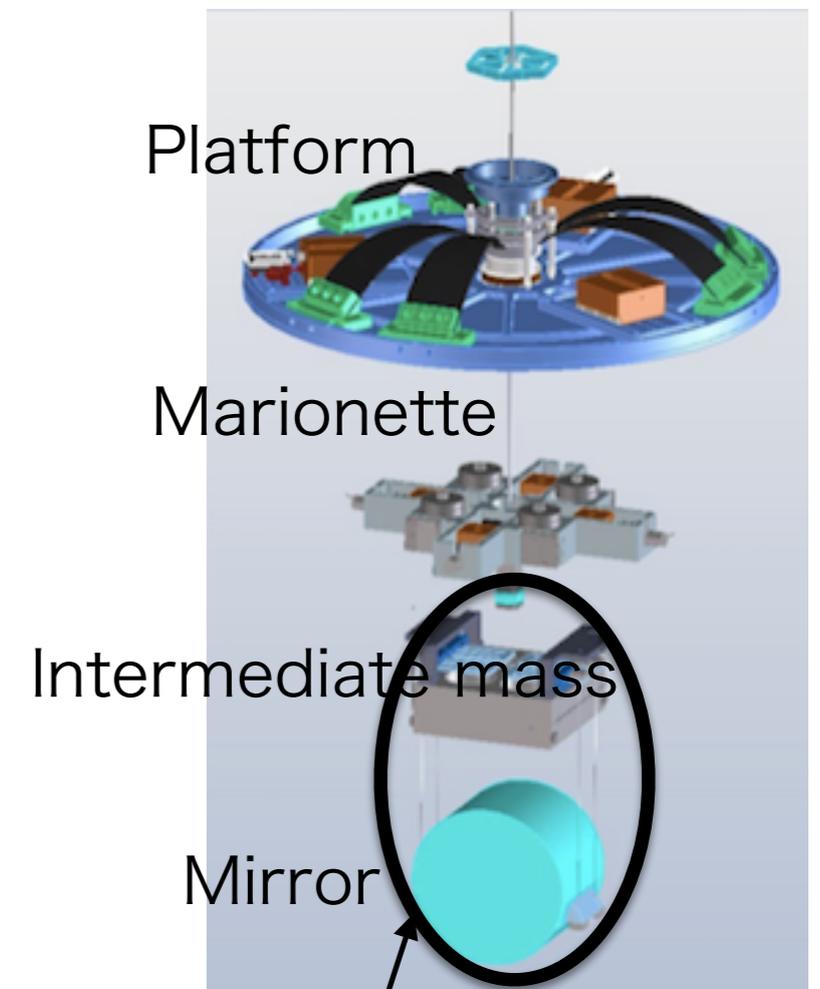
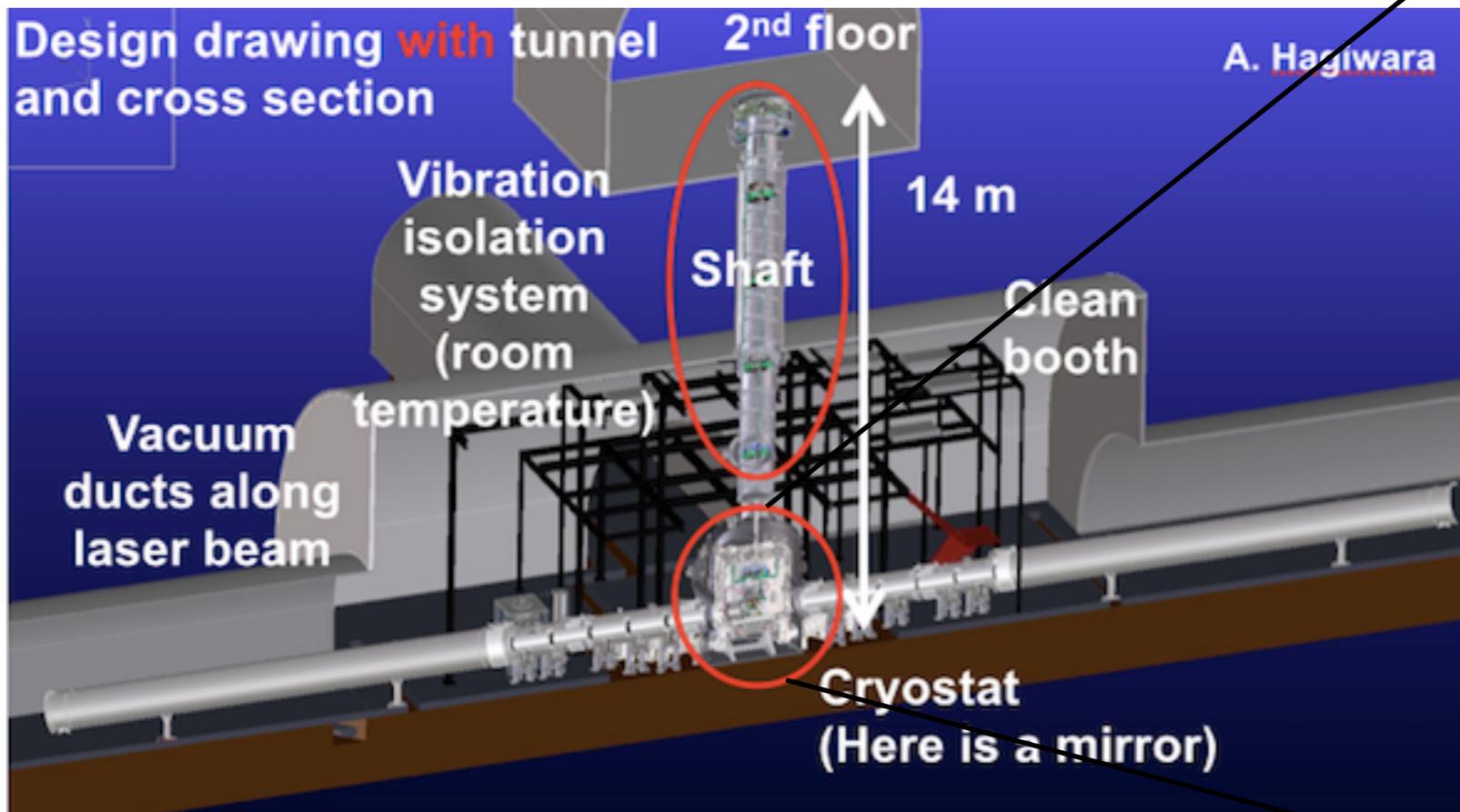
KAGRAの特徴

- 3kmの干渉計型重力波検出器（飛騨市神岡町池の山）。
- 原理的な雑音には地面振動、熱雑音、量子雑音がある。
- 地面振動を減らすため、地下に作られ、また熱雑音を減らすため、Fabry-Perot cavityのミラーを冷却する。
- 量子雑音を抑えるため、ハイパワーレーザー（180W）を用いる。



Cryogenic payload

低温懸架系



サファイア懸架系
Sapphire suspension

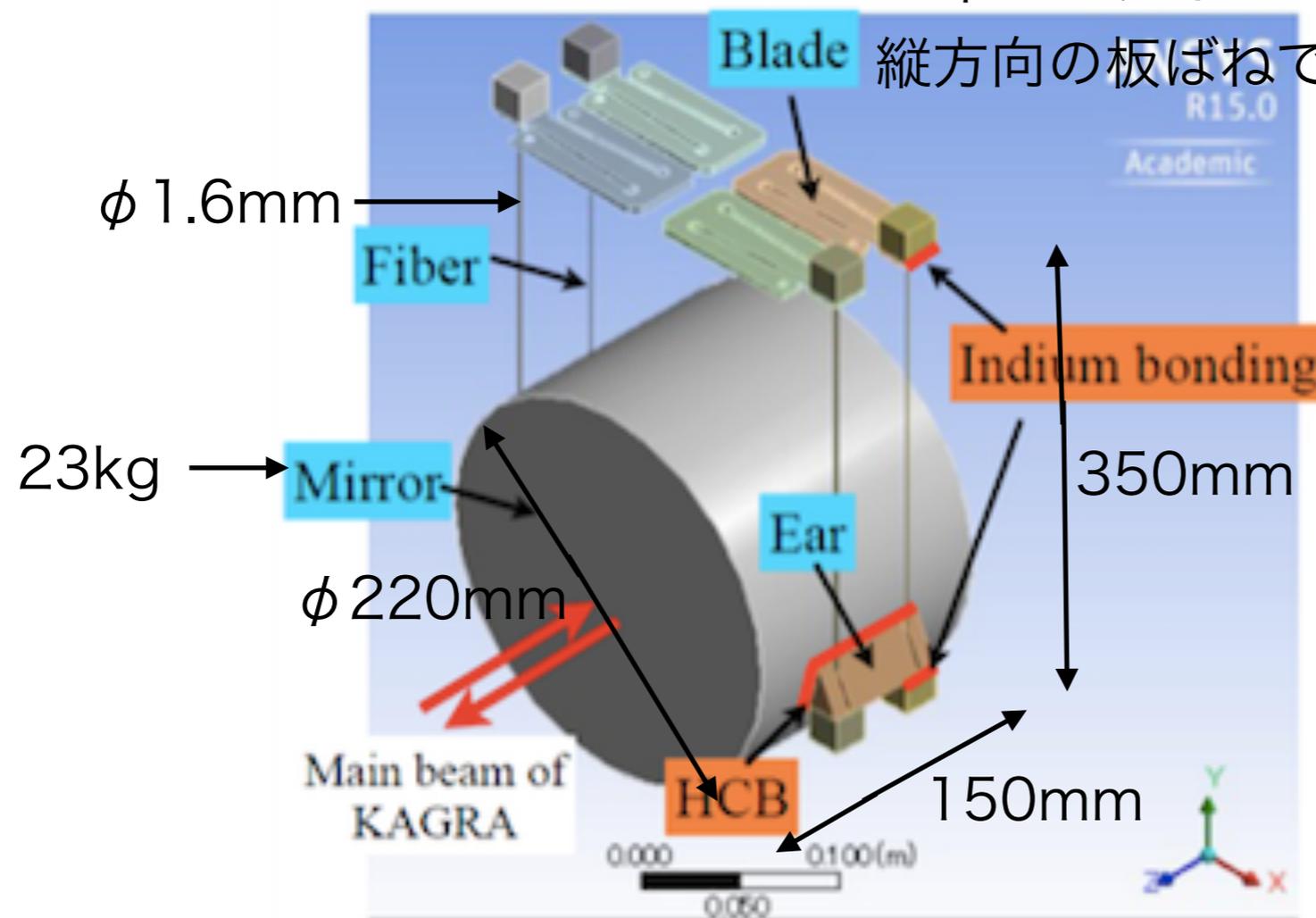
Sapphire suspension

全てサファイアで作られる

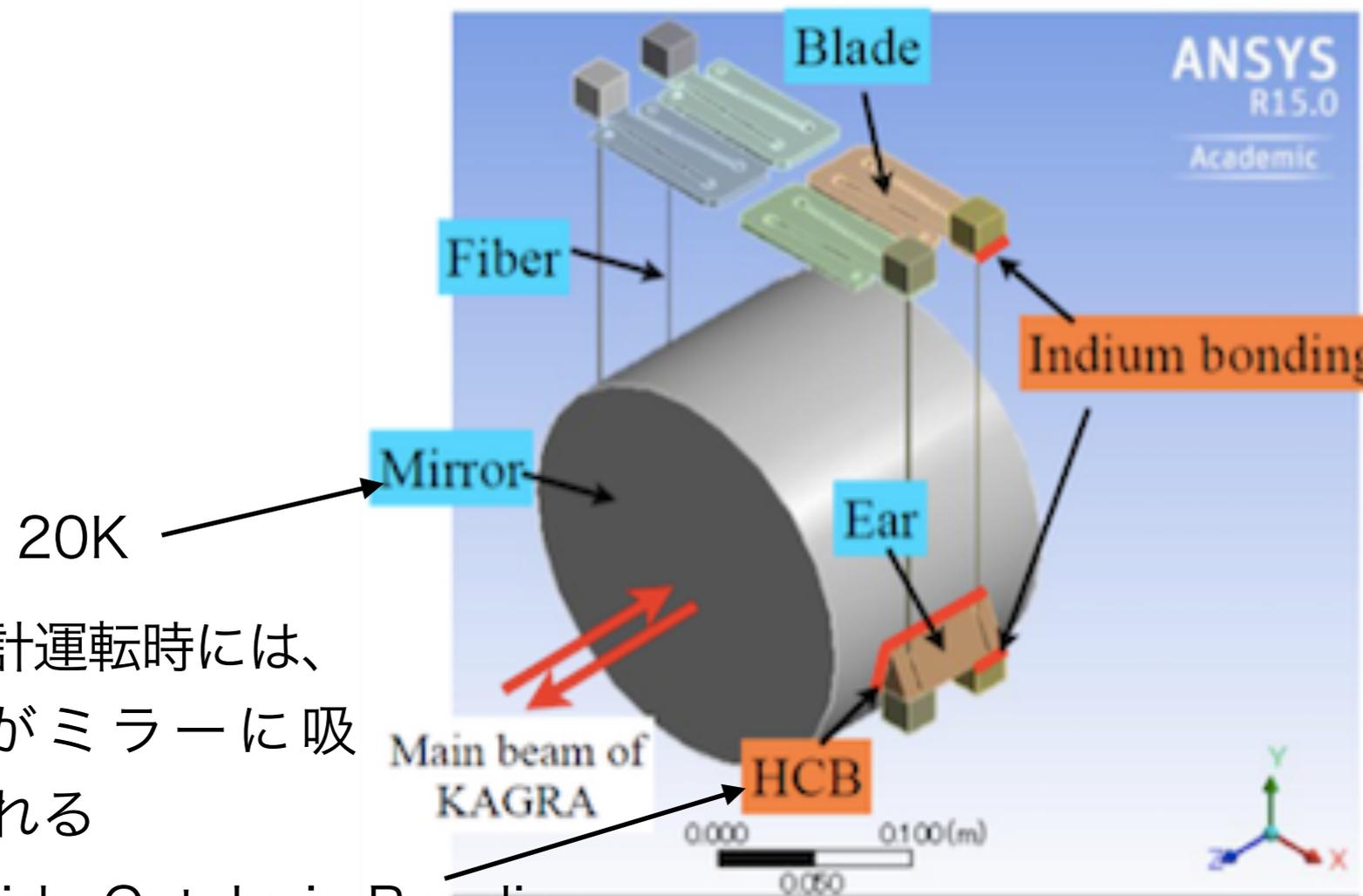
利点…サファイアは低温で熱雑音が小さい。

ファイバーの熱伝導でミラーを冷却するが、サファイアは低温で熱伝導率が高い。

4本のファイバー間の長さの差を補正する
縦方向の板ばねで、Intermediate massにつける



Sapphire suspension



熱伝導を良くする、
取り外し可能

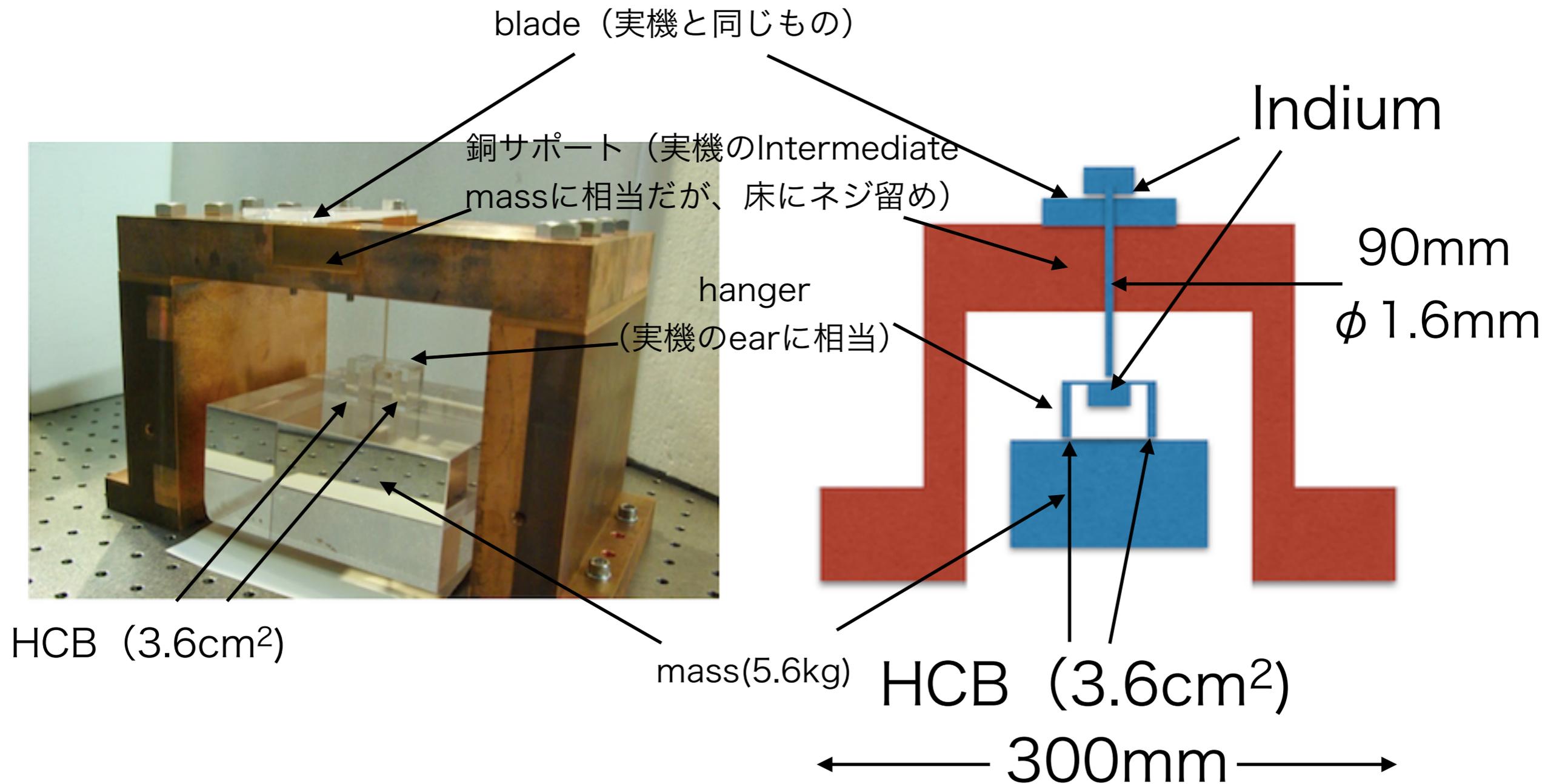
20K →
干渉計運転時には、
1Wがミラーに吸
収される

Hydroxide Catalysis Bonding
低温で強固

One fiber prototype

- ・ サファイア懸架系の前に、one fiber prototypeを構築した。
- ・ ファイバー 1 本とblade 1 つで、5.6kg（ミラーの質量の1/4）のマスを吊るす。
- ・ 全てサファイアで、かつ接合部の要素が含まれている。
- ・ ファイバーが 1 本なので、バランスを取るのが容易。
- ・ 各パーツがKAGRAの要求値を満たしていることは、先行研究で確認されたので、次に組み立てた状態で要求値を満たすことを確認する。
- ・ one fiber prototypeで得た情報を実機製作に活かす。

One fiber prototype

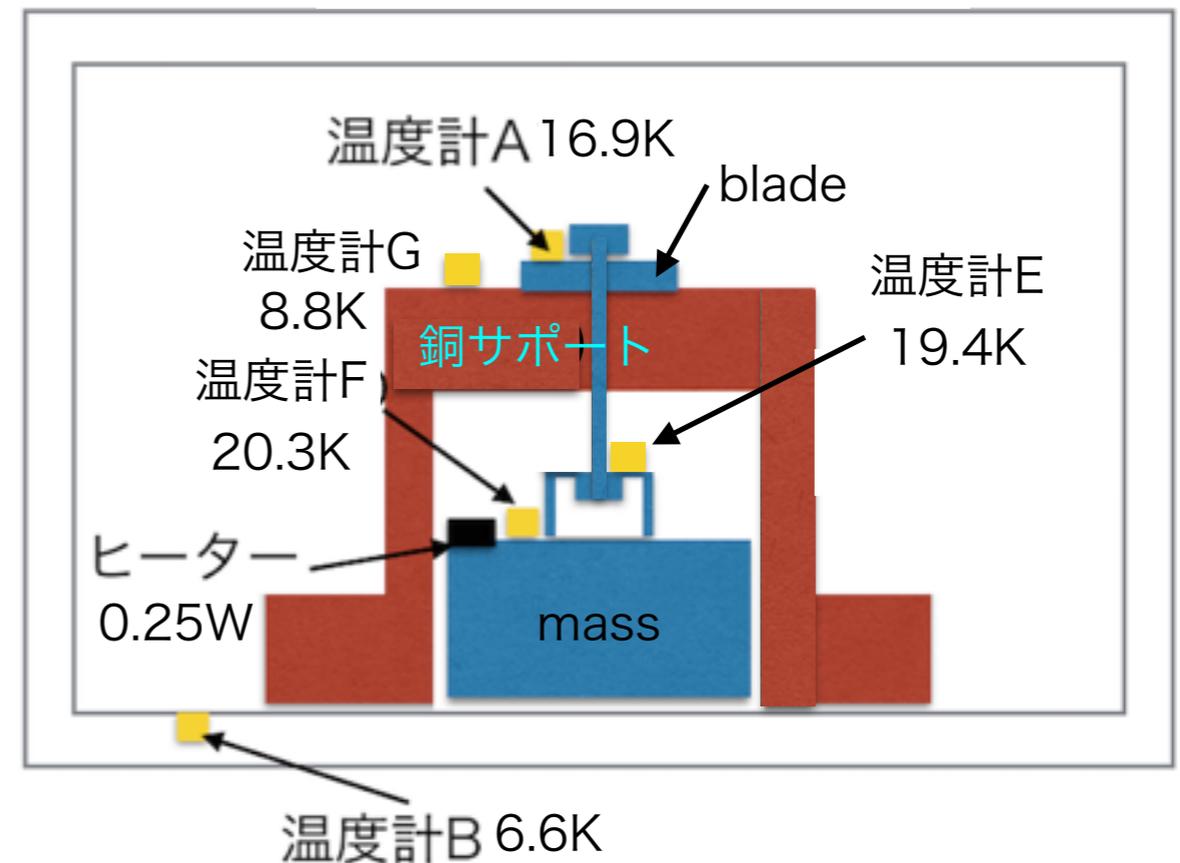
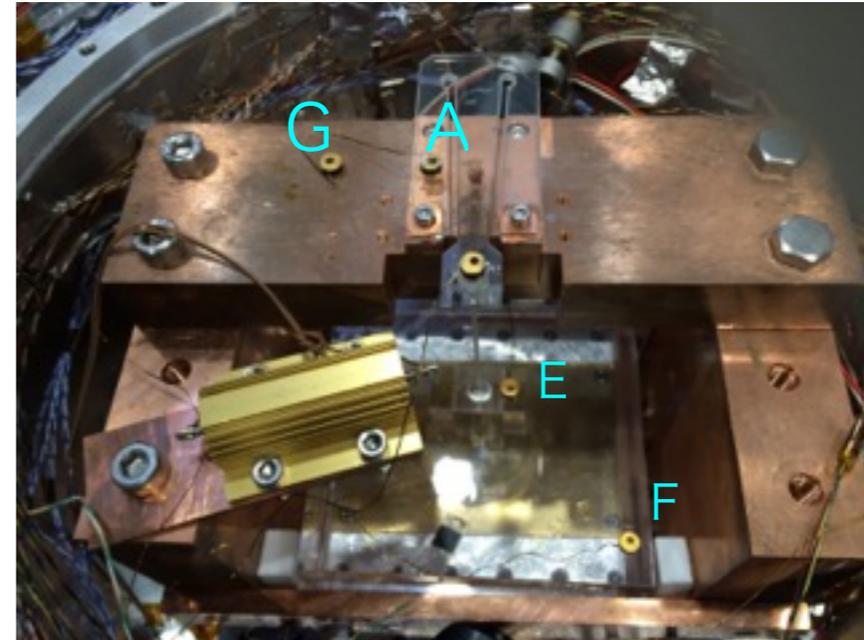


One fiber prototype

- ・ 実機でミラーがレーザー光のうち1Wを吸収することで、ミラーの温度が20Kを大きく超えてしまわないかを調べねばならない。
- ・ 実機ではミラーを4本のサファイアファイバーで吊るすので、1本あたり0.25Wを吸収しなければならない。

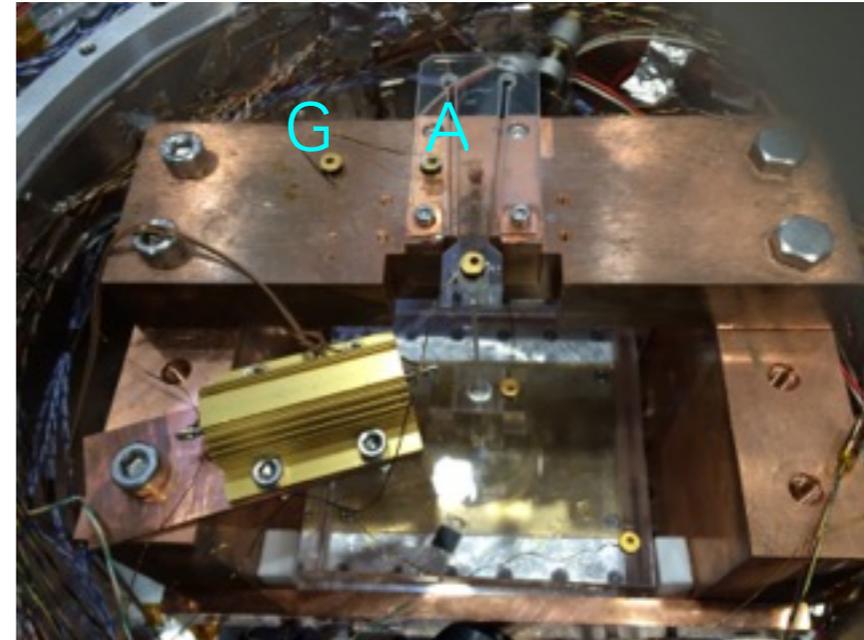
One fiber prototype

- one fiber prototypeを冷却後、ヒーターでmassに0.25Wを与え、各部分の温度を調べた。
- 銅サポート (8.8K) とblade (16.9K) の間に大きな温度差があることがわかった。→このままではKAGRAのミラーは29Kほどに上がり、熱雑音が要求値より大きくなってしまう。
- 銅サポートとbladeの間にIndiumを挟むなどして、熱接触をよくする予定。

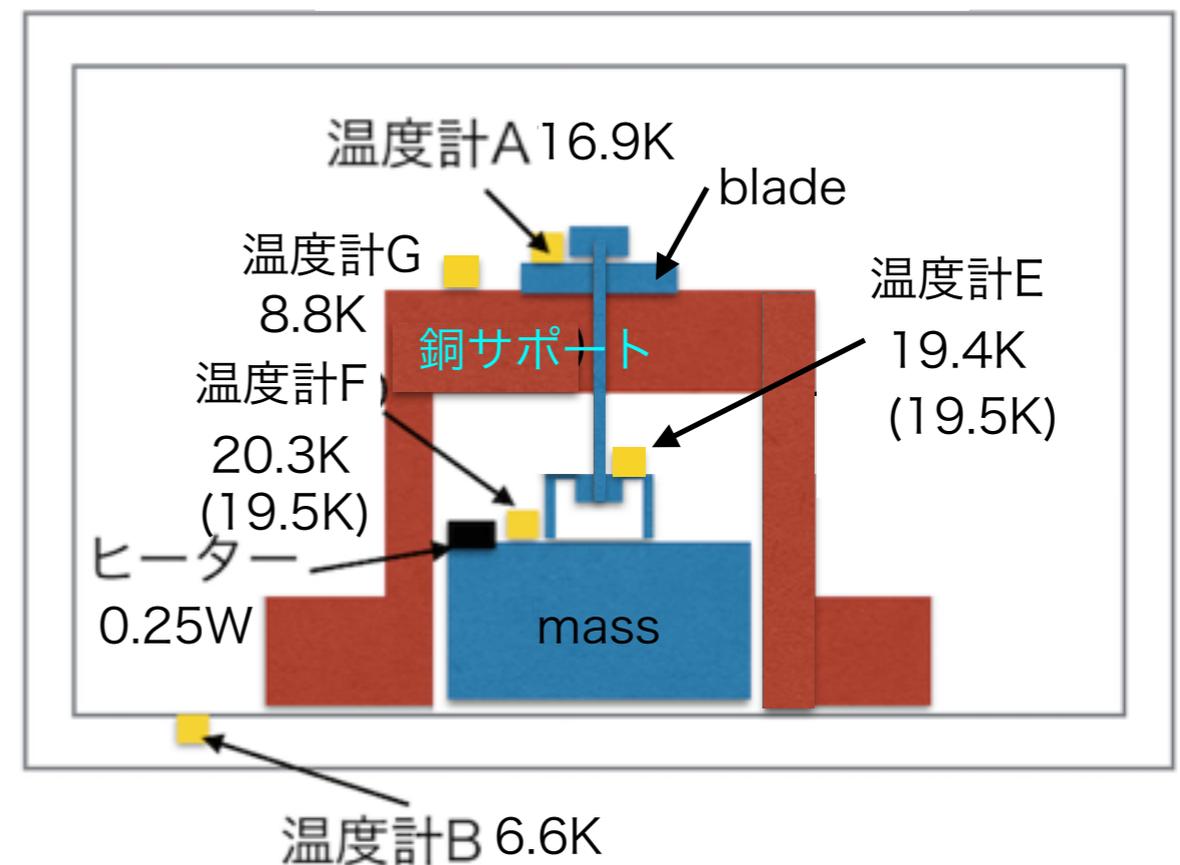


One fiber prototype

- bladeが16.9Kのとき、hangerやmassが何度になるはずかを、先行研究によるサファイアの熱伝導率等を用いて概算した（図のカッコ内）。



- hangerの温度は計算値と非常に近く、fiber, blade, Indiumの熱抵抗には大きな問題はないと言える。
- massの温度が計算値と比較して高く、HCBの熱抵抗が大きすぎると考えられる→この対策は今後検討。



KAGRA まとめ

KAGRAでは熱雑音低減のため、ミラーとその懸架系を冷却する。

今回はそのうちサファイア懸架系について研究した。

(1)サファイア懸架系のプロトタイプとしてone fiber prototypeを組み上げた。

(2)one fiber prototypeを冷却し、熱負荷試験を行った。

- ・ bladeと銅サポートの間の熱接触を、熱雑音を考慮した上で改善する必要がある。

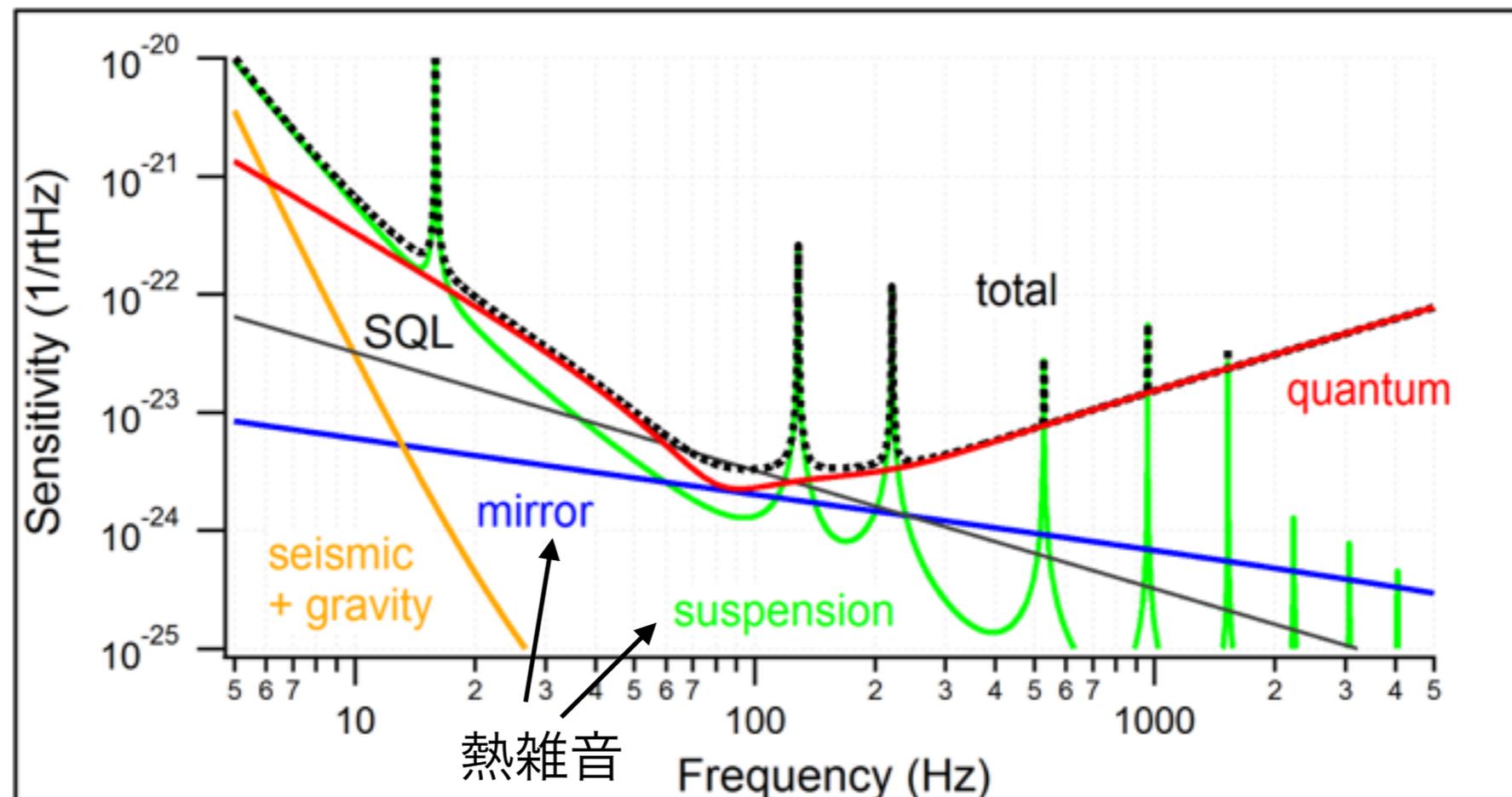
- ・ blade spring、Indium、fiberの熱抵抗については先行研究の要素試験結果と矛盾していない。

- ・ HCBの熱抵抗についても改善しなければならない。

Thank you!

重力波検出器の感度

- 原理的な雑音には地面振動、熱雑音、量子雑音がある。
- これらの雑音を極限まで下げることが重要である。



KAGRA
の感度曲線

HCB

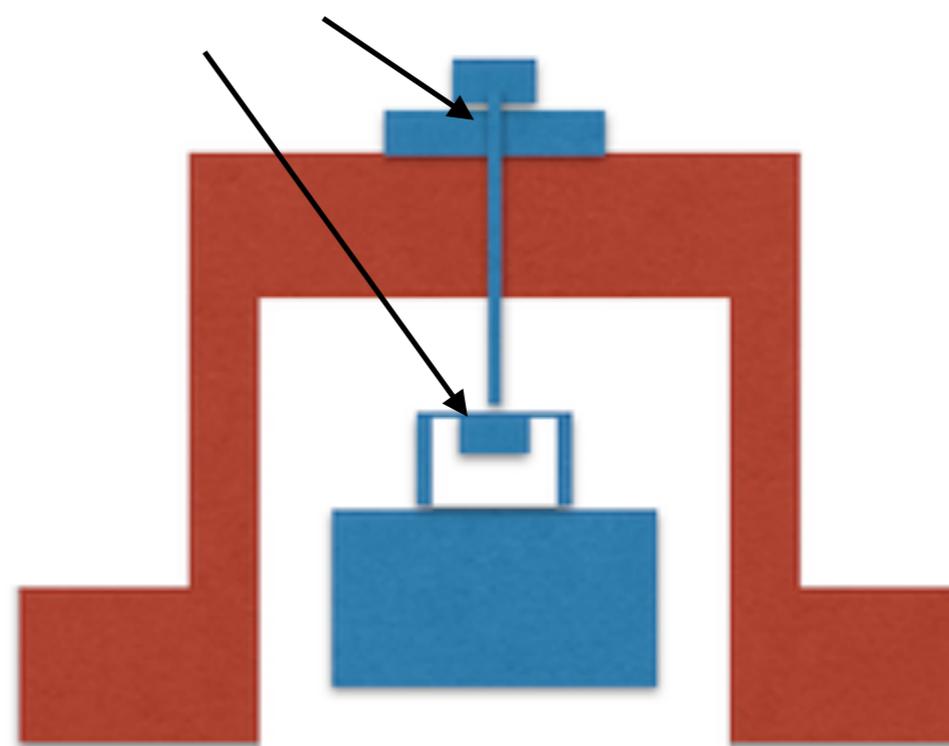
- 低温や高真空でも非常に強い接着力を持つ。
- 非常に薄い。
- 歪まない。
- グラスゴー大学で研究されている。
- Sodium silicate solution中のOH基が、バルクのAlと結合して Al(OH)_3 を形成し、その後 $-\text{Al(OH)}-\text{Al(OH)}-\text{Al(OH)}-$ という鎖を作ることで強固なBondingとする。

Indium welding

- ・ 複雑な形状にも対応した、非接触な加熱方法が必要。
- ・ 非接触の方法としてハロゲンランプを使用した。
- ・ 35W、HEAT TECH 社の ハロゲンランプ(HPH-18)、遠赤外なので、Indiumに直に熱を与えられる。



この2箇所ではIndium weldingが必要

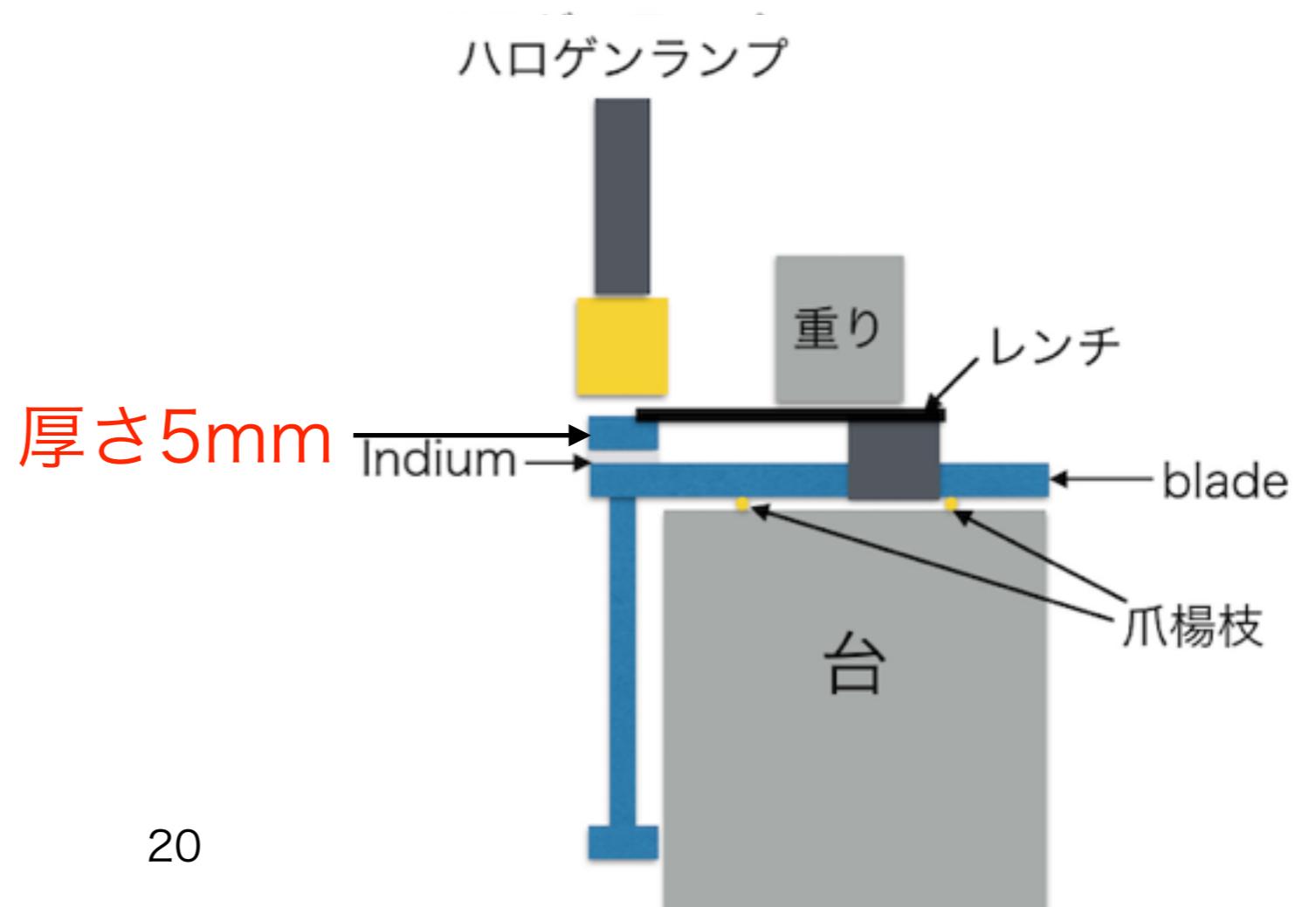


bladeとfiberのIndium welding

- ・ 実機との違い

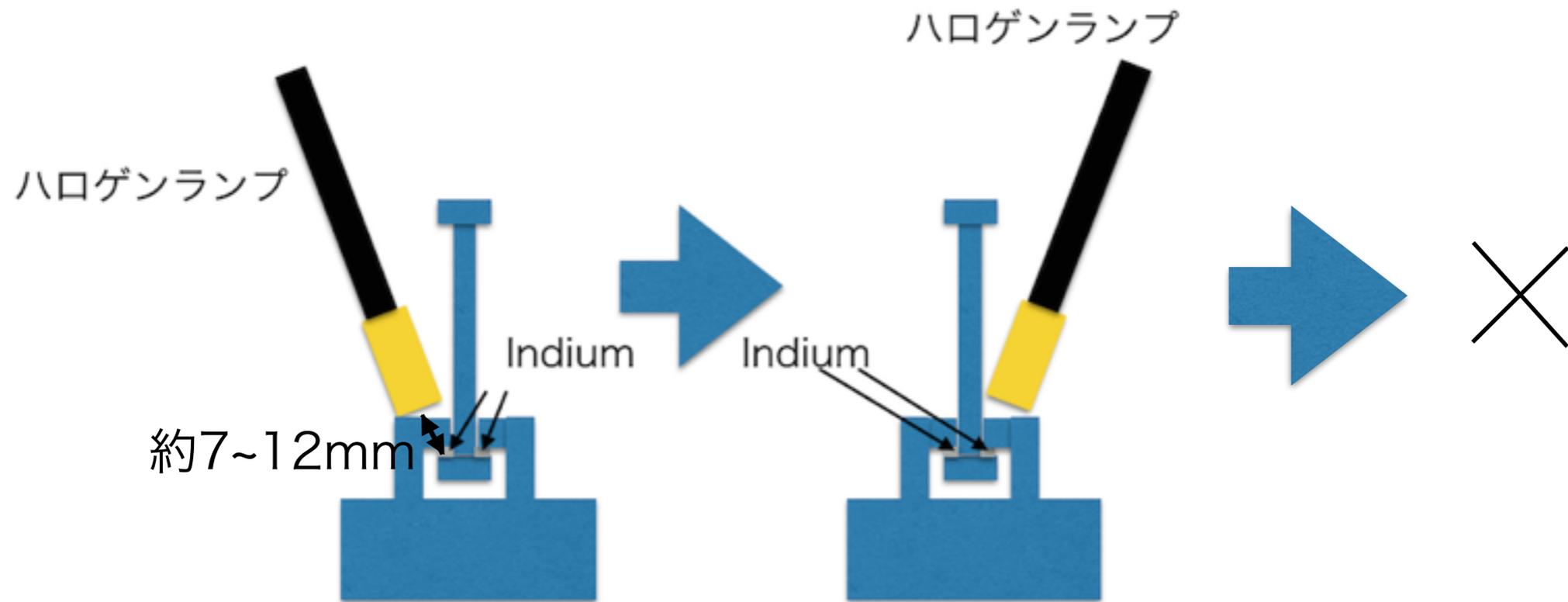
今回使用したfiber headの厚さは5mmだが、KAGRAのfiber headは厚さ10mmなので、ランプとIndiumの距離が遠くなる。より強力なハロゲンランプを購入するなど、検討の必要がある。

実機ではcleannessが要求されることから、爪楊枝等を用いることは難しい。専用のジグを作る必要がある。



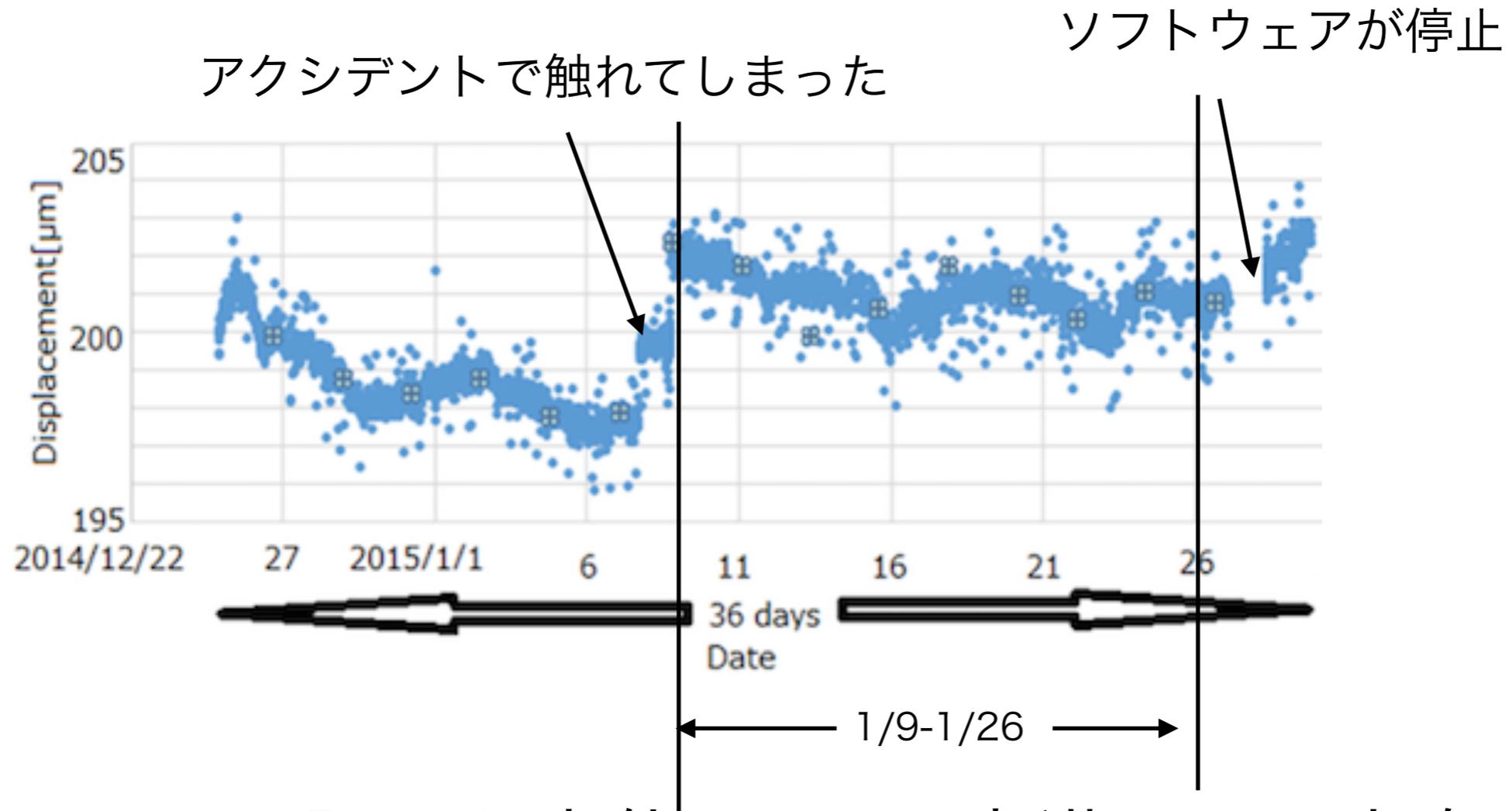
hanger と fiber の Indium welding

hanger と fiber の間の Indium は溶かすことができなかった
Indium は取り除かず、mass の荷重で圧着させた。



- one fiber prototype ではハロゲンランプのアクセスが難しい。
- 実機のアクセスは容易。

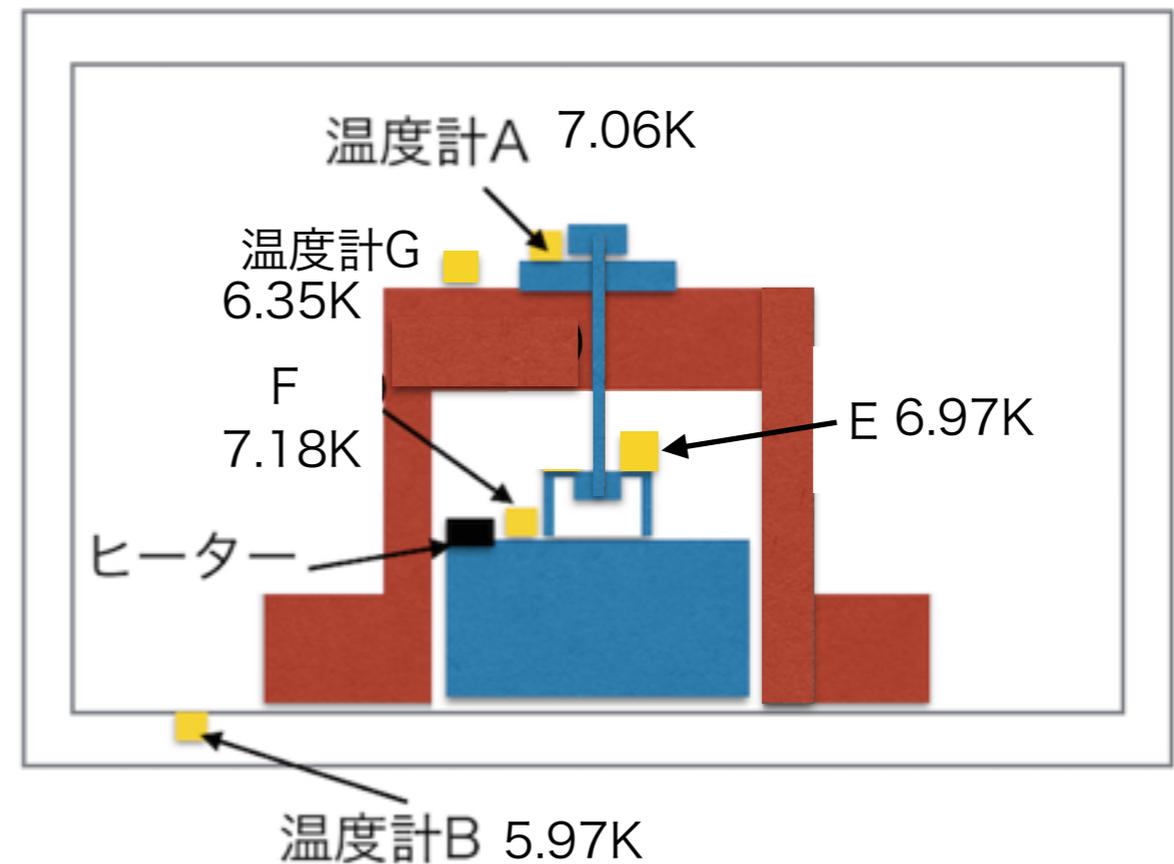
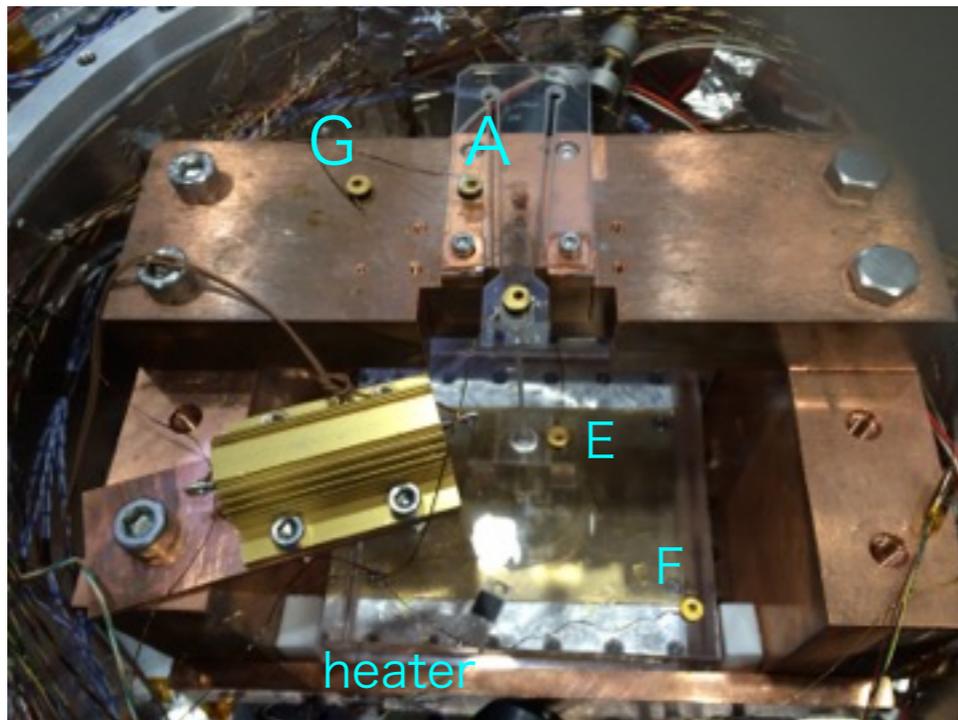
室温耐荷重試験



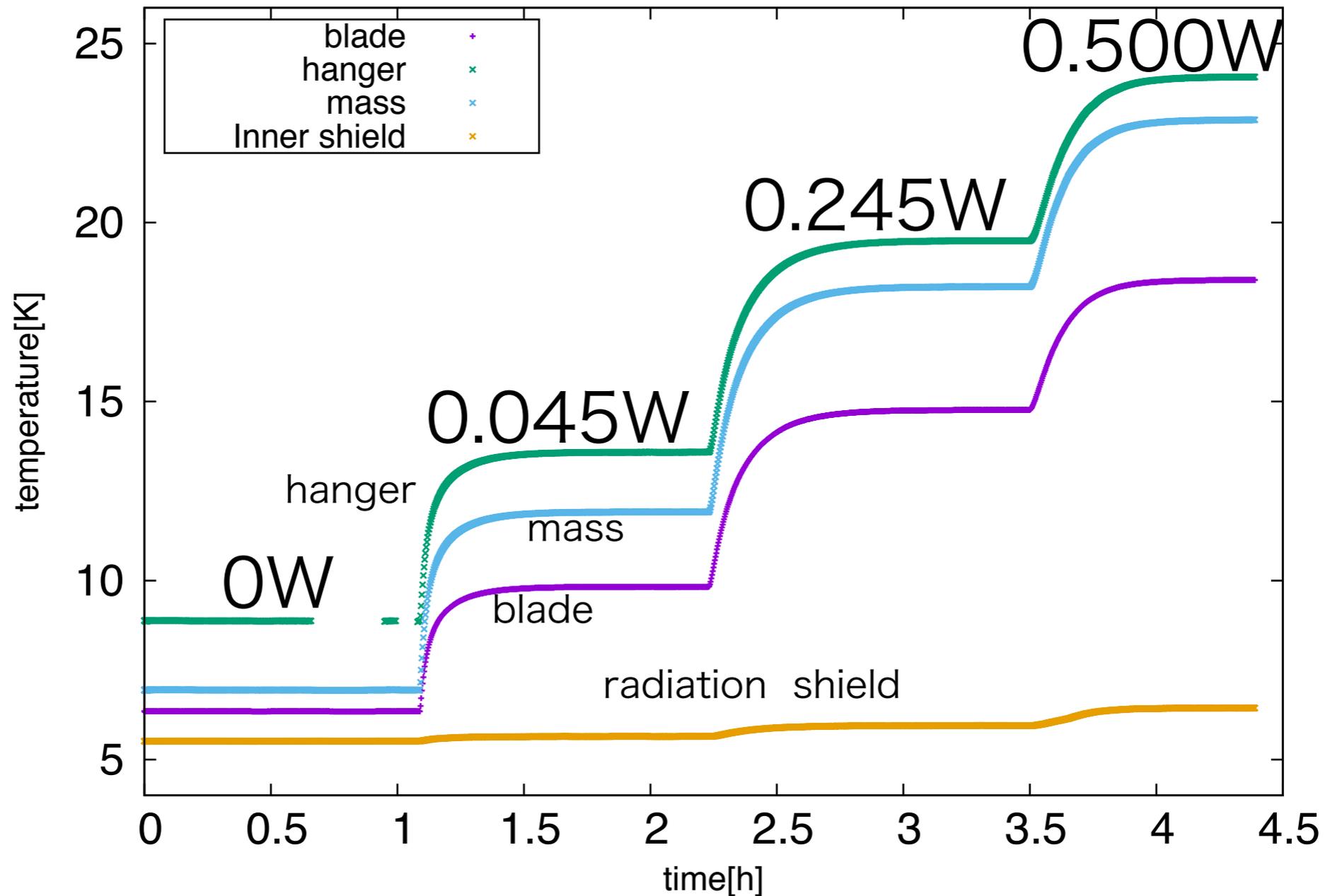
1/9-1/26に限ると変位は $4\mu\text{m}$ 未満で、1方向へのdriftはなかった。

heat load test(9th)

After cooling down



Result (1回目)



ヒーターで熱を加えた後、定常状態に到達するのを待った。

温度計のゆらぎは非常に小さかった。

heat load test(9th)

- HCBの熱伝達率…20K付近で 1.6×10^5 (W/(m² · K))

計算に用いた図

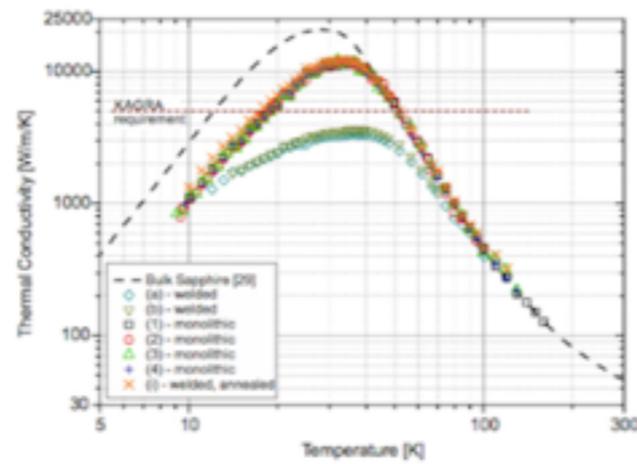


図 7.51: サファイアの熱伝導率 [43]

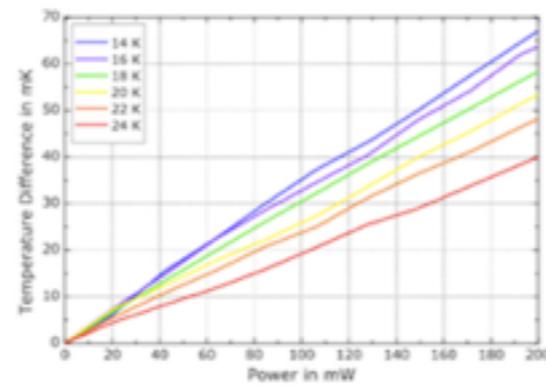


図 7.52: Indium の表裏の温度差 [44]

IM

