

P2-159:月面コーナーキューブミラーの高精度製造方法検討(1)

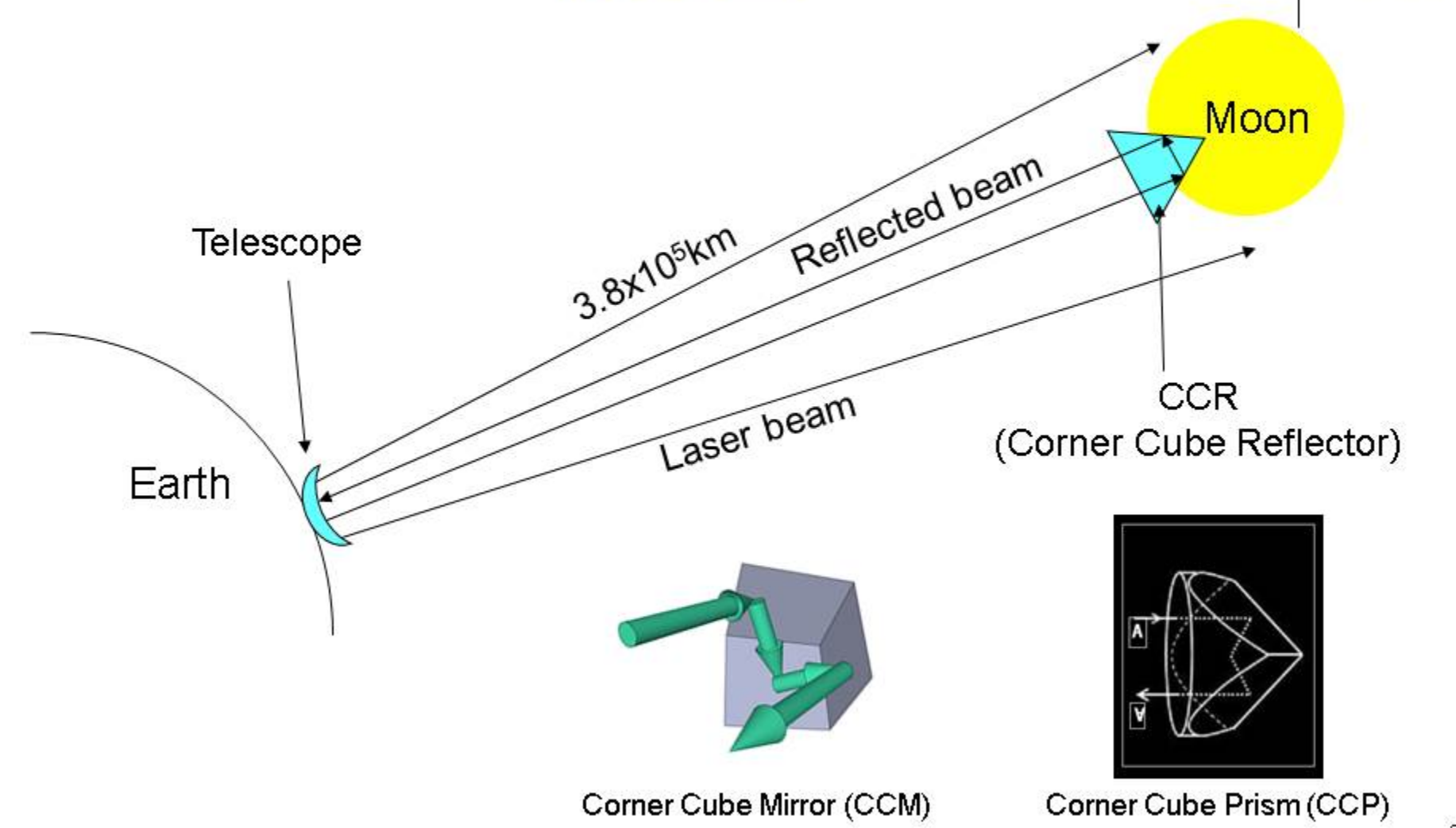
○鹿島伸悟¹⁾、荒木博志¹⁾、野田寛大¹⁾、花田英夫¹⁾、國森裕生²⁾、大坪俊通³⁾、安田進⁴⁾、宇都宮真⁴⁾

1:国立天文台 RISE月惑星探査検討室 2:NICT 3:一橋大 4:JAXA

背景

- 次期SELENE計画の一環として、月面に口径20cmクラスのコーナーキューブミラー(CCM)を設置し、地球月間の距離をcmオーダーで精測する計画がある
- この変動を高精度に解析することで、月の内部構造やその起源を明らかにすることが可能となる
- このような高精度な測定を可能にするためには、CCMに非常に高精度求められるが、その中でも最も厳しいのが角度精度である
- 具体的には、各ミラー間の直角精度0.1秒が要求される
- 地球月間の光行差を考慮すると、3面の内の1面を90度(基準角)+0.65秒(DAO) $\pm$ 0.1秒(精度)で作製する必要もある
- 本発表では、この角度精度の解析とそれを実現する製造方法に関して報告する

Lunatic Laser Ranging (LLR)の模式図

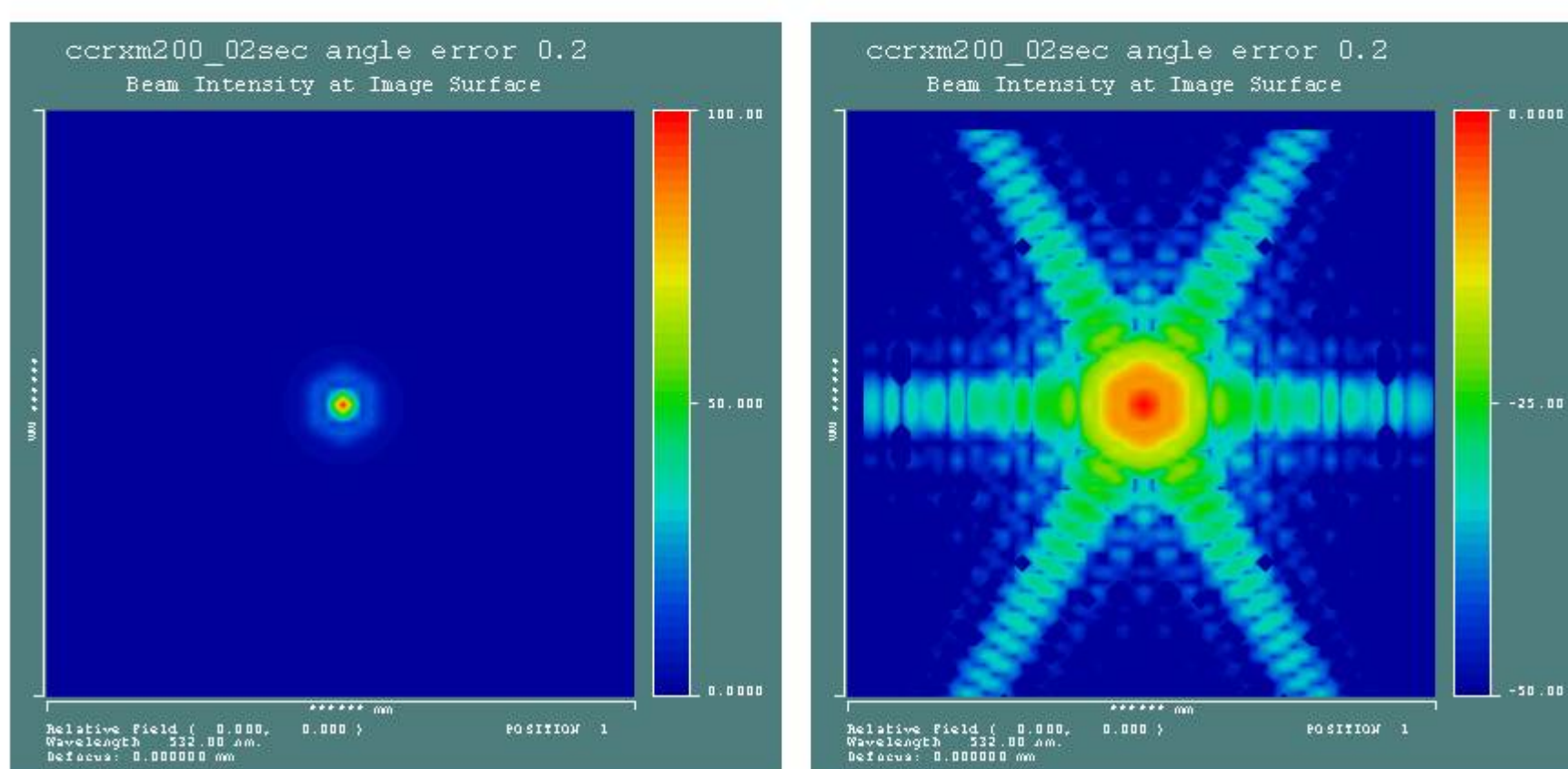


角度エラー解析方法

- まずは光行差(DAO)を考慮しない場合の計算を行う
- 角度エラーは、3面共通に0.1秒、0.2秒、0.3秒を与えた
- 解析は、月面に設置したCCMで反射されたビームが地上観測点でどうなるかを計算する
- 計算は、角度エラーとBeam Divergence(長距離を伝搬する際のビームの拡がり)の両方の影響を含む
- 許容量は従来通り、「中心軸から3.5 μ rad (half angle)以内に全エネルギーの50%以上が含まれること」とした
- ここで言う3.5 μ radは、DAOが無い場合の光行差による最大偏角に相当する
- 光行差によるズレは、月地球間の相対速度に応じて3.5-7 μ radとなる

計算結果例:角度エラー0.2"

- 同じスケールでの計算であるが、左は通常表示、右はdB(対数)表示である
- 左図では何も無いように見える場所にもビームが拡がっていることがわかる



計算結果一覧

- 角度エラーは3面に同じだけ与えている(対称性があつた方が計算精度が上がるため)
- tgr/gridはFFT計算時の分割数と分割幅であり、これを変えると微妙に結果が変わる
- 分割幅が小さく、分割数が大きいくほど正確になるが、計算時間とメモリの問題で下記程度が限界である
- 青で示した1024/25000が、もっとも計算時間と精度のバランスが良い
- 許容量は50%であるため、これだけなら0.2秒でも良いが、他にも劣化要因はあるため、やはり0.1秒程度が望ましく、一橋大の結果と一致する

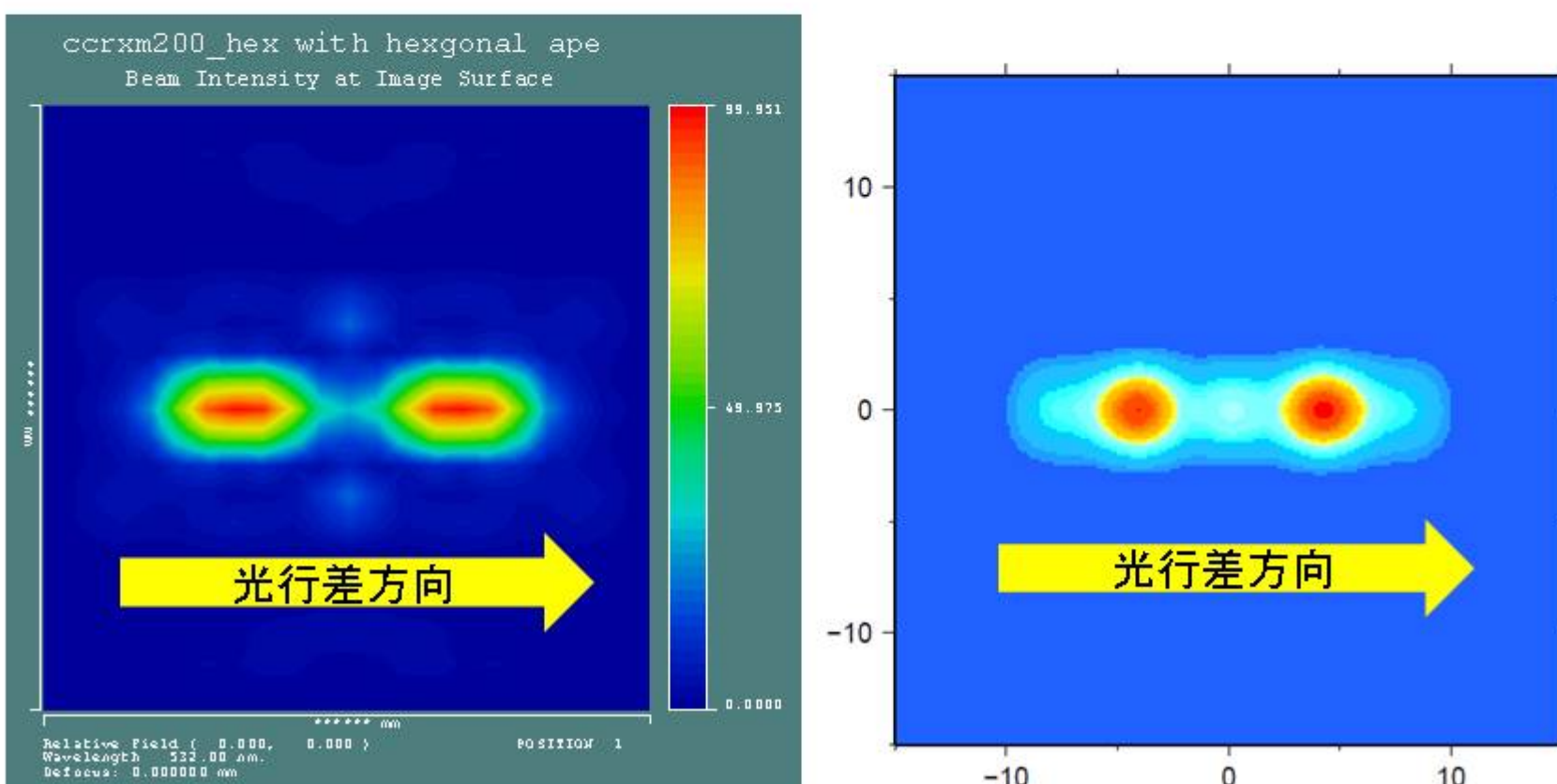
		tgr/grid	
angle error	1024/25000	2048/25000	2048/12500
0"	84.68%	84.68%	83.65%
0.1"	75.60%	74.66%	80.17%
0.2"	55.37%	53.51%	55.78%
0.3"	30.92%	30.27%	31.40%

DAO解析方法

- 今度は、角度エラーはなく、ある1面にDAOを0.5秒、0.6秒、0.7秒、0.8秒与えた場合を計算する
- 一橋大により、DAO=0.65秒が最適と計算されているため、その前後を計算してみた
- 解析は、月面に設置したCCMで反射されたビームが地上観測点でどうなるかを計算する
- DAOを与えることにより、ビームがある方向に延びるため、その方向を地球と月の相対光行差の方向になるようにすれば、戻ってきたビームを効率よく受光することができる
- 光行差は一定値ではないので、最適値を求めるのはCodeVでは難しく、今回は一橋大の計算結果と定性的に合致することを確認しただけである(最適化は今後の課題である)

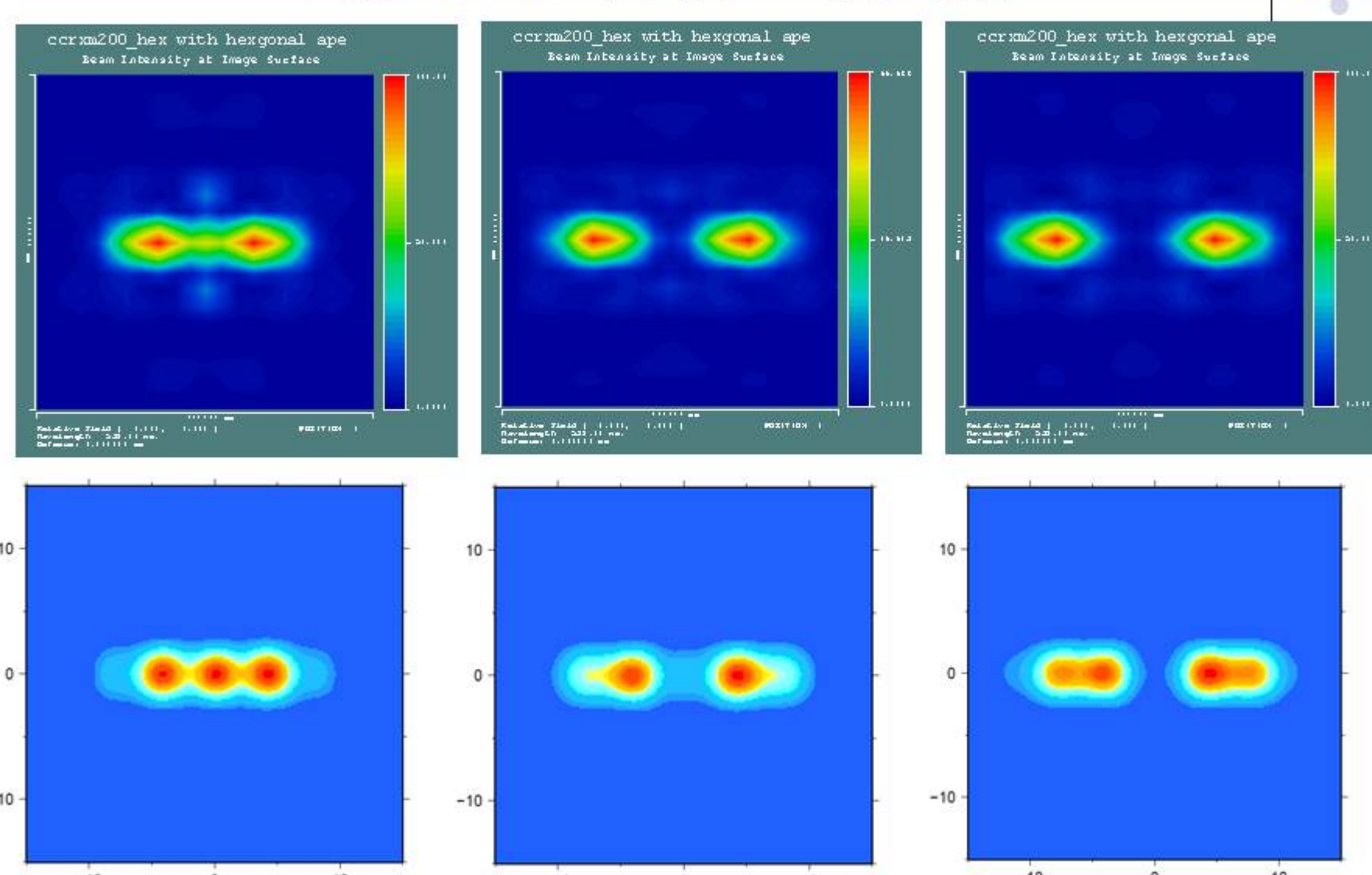
計算結果:DAO=0.6"

- 左がCodeVでの計算、右が一橋大の計算結果
- 大凡同じ大きさになるように計算領域を合わせただけであるが、定性的には合致していると思われる



計算結果:DAO=0.5", 0.7", 0.8"

上段がCodeV、下段が一橋大計算



角度解析のまとめと考察

- 実際にCCMを製作した場合、角度エラーはそれだけが独立で現れるものではなく、形状誤差のひとつとして現れる
- もし完全な平面であれば、どのように角度を測定しても一定値になるが、一般には測定方法や測定場所に依存する
- 今後の製作に於いて、何をもちて角度エラーとするかを定義しておく必要がある
- 一橋大の現状プログラムは平面のみであるが、CodeVでも同様な計算ができれば、これまで報告してきたような熱・重力変形も取り入れた完全な形での解析が可能となる
- 面形状をZernikeで表せば、その第2,3項は「傾き」を表すため、計算や測定でも「(回帰平面の)角度」と「形状」の分離が可能となる
- DAOの最適化は複雑であるため、CodeVで頑張るか、一橋大のプログラムを面変形も考慮可能なものにして貰うかは今後の検討の中で決めて行きたいと思う

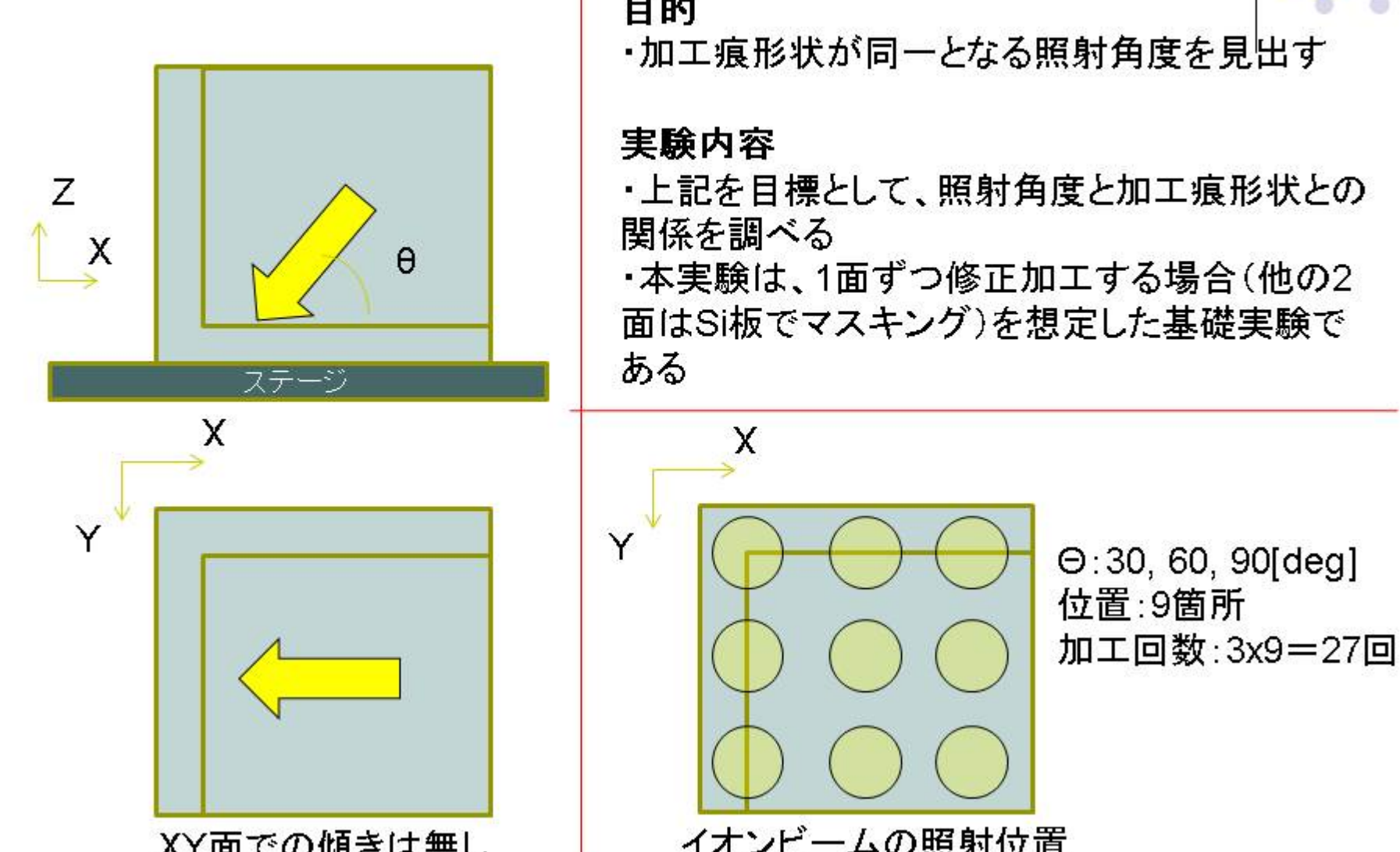
製造方法

- 前述の角度精度を実現する製造方法として、1)一体加工、2)3面貼合せ加工の2手法を並行して検討している
- 一体加工はその名の通り、立方体、あるいはほぼCCMの形状に一体鋳造(?)した部材から最終形状に仕上げるものである
- 一体加工では修正研磨が必須となるが、色々な修正研磨方法を検討した結果、IBF(Ion Beam Figuring)が最も有効と考え、その基礎検討を行っている
- 3面貼合せは、各面を独立に製作し、それらを高精度に貼り合わせるものであり、貼合せはオプティカルコンタクトで行う
- 材質は、熱特性と加工性より単結晶シリコンを考えている(荒木氏ポスター参照)
- 質量制限より、一体加工では各ミラーの厚さを10mmとしているが、3面貼合せはこの厚さでは精度が出せないため、「肉抜き」が必須となる

一体加工による製作検討

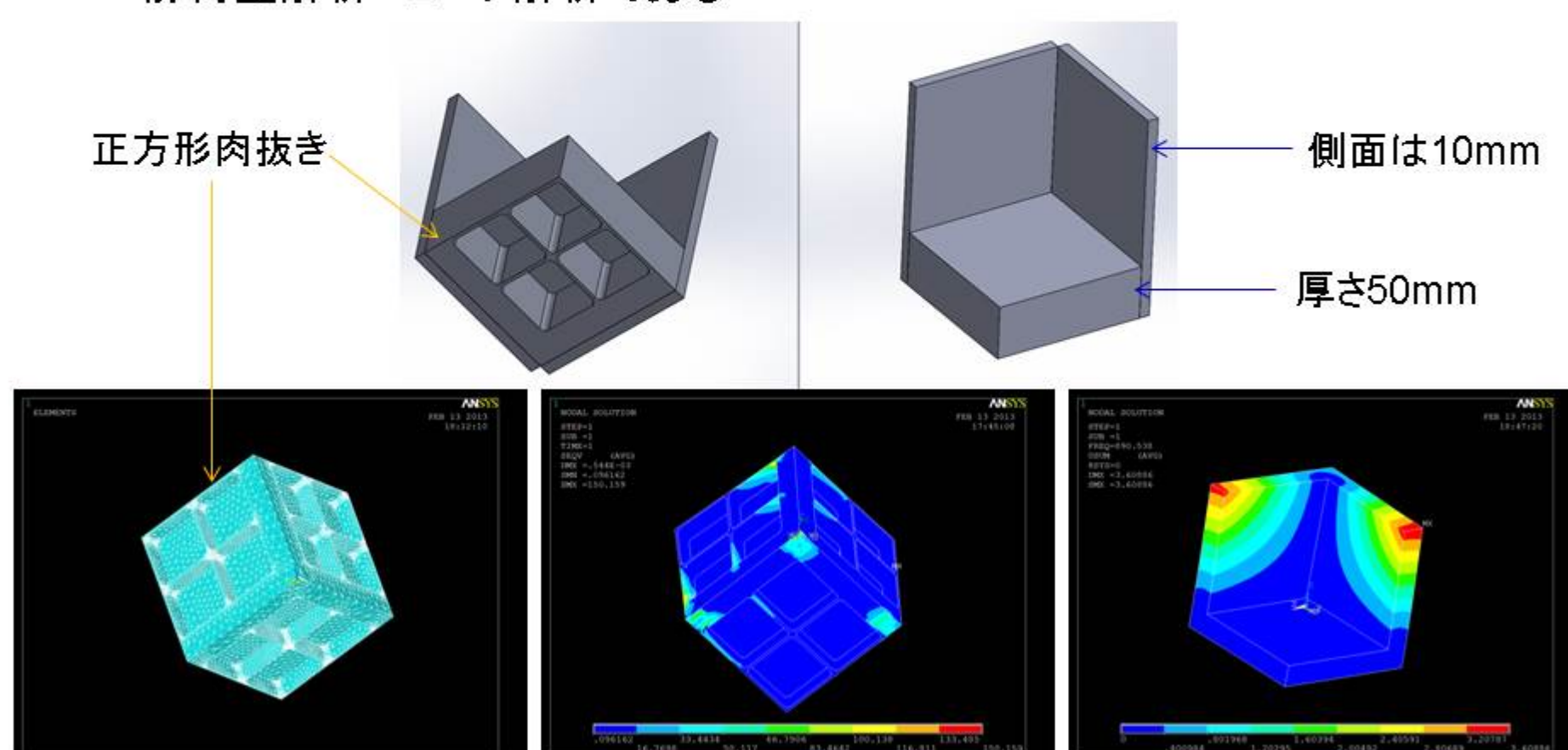
- IBFの基礎検討として、修正研磨全般に詳しい千葉工大の瀧野研と、実際にIBF装置を所有している東京理科大谷口研と共同研究体制を敷いている
- 瀧野氏は元ニコンでずっと修正研磨の研究をされていたこの道の権威であるが、現職場には装置やソフトが無い
- 谷口氏は研究室にIBF装置及び修正研磨制御ソフトを持っており、瀧野氏とは懇意であることより、三者間での共同研究となった
- 瀧野氏・谷口氏共に、最終目標が月面CCMの一体成形であることは承知されているが、まずは「角(稜線部)の精密研磨に関する基礎研究をしましょう」ということになっている
- これは瀧野氏の学部4年生の人の卒研にもなるとのことである

実験内容(瀧野氏作成資料より)

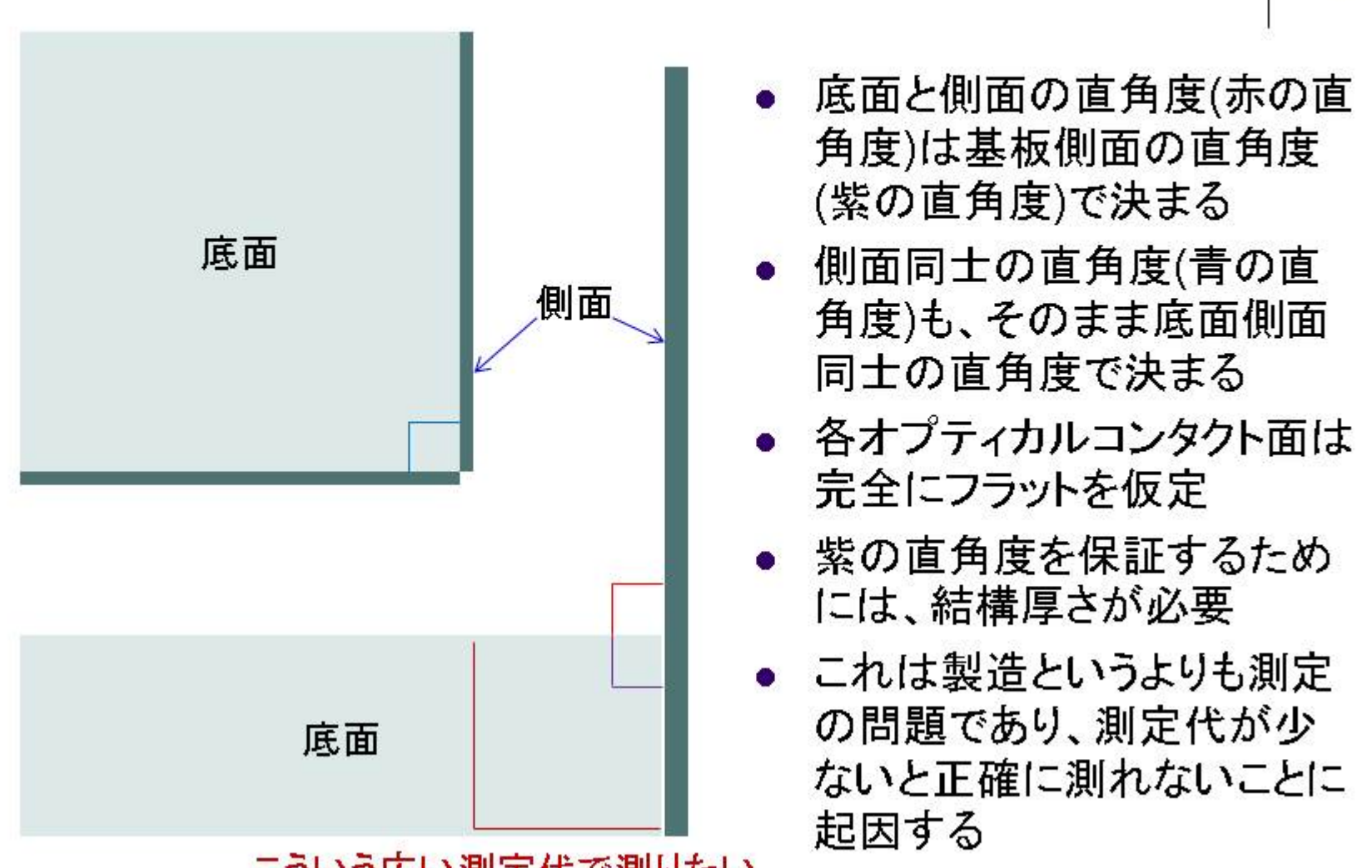


3面貼合せによる製作検討

- 下記のような形状を考えている(宇都宮氏考案)
- 底面が非常に厚くなるため、肉抜きが必須となる
- 一番下は、少し形状は異なるが、JAXA安田氏による有限要素モデル・静荷重解析・モード解析である



この構造(宇都宮案)のメリット



- 底面と側面の直角度(赤の直角度)は基板側面の直角度(紫の直角度)で決まる
- 側面同士の直角度(青の直角度)も、そのまま底面側面同士の直角度で決まる
- 各オプティカルコンタクト面は完全にフラットを仮定
- 紫の直角度を保証するためには、結構厚さが必要
- これは製造というよりも測定の問題であり、測定代が少ないと正確に測れないことに起因する

製造方法に関するまとめ

- IBFに関しては、作業は基本的に千葉工大と東京理科大で実施して貰い、天文台は基板や治具の提供、及び定期的な打合せ等を行っている
- 3面貼合せは、現在日東光器(株)と進めており、まず肉抜きの影響(肉抜きした面を研磨すると、肉抜きのパターンに伴う面の凹凸が生じる)を見るため、サンプルの作製を依頼している(2/E完成予定、その後Zygoで測定・解析)
- オプティカルコンタクトに関しては、その密着力だけでは打ち上げ時のGに耐えられない可能性があるため、オプティカルコンタクト後、温度を上げる・長期間真空中に放置等で密着力を上げられないかの実験を開始したところである(実験用基板完成1/E、OC実施後水沢の真空槽に入れる、密着力はJAXA筑波の試験器で破壊検査する)