

# 「ものづくりとサイエンスのはざままで」

東北大学理学研究科天文学専攻  
市川隆

## 要約

実証科学である自然科学においては物作りは不可欠である。どんな理論でも実験による検証がなければ空論であり、すべてのデータは実験装置から生まれる。このような哲学から東北大の市川研究室では、ものづくりに基づく研究を基本にしてきた。この哲学は修士1年の時以来身についたものだ。学部3年までは理論家志望だったが、天文学実習で望遠鏡にふれ、装置の不具合に悩まされながらなんとか装置を工夫して観測レポートを書いて以来、手を動かしつつ、サイエンス成果を得るのが自分の天分であることを知った。幸運にも修士1年から大宇陀観測所の40cmシュミット望遠鏡の立ち上げに参加する機会が与えられ、悪戦苦闘してD論を書いたことが今の自分の原点である。物事にこだわらず早い段階で自分の資質を見極めるのも大切であろう。

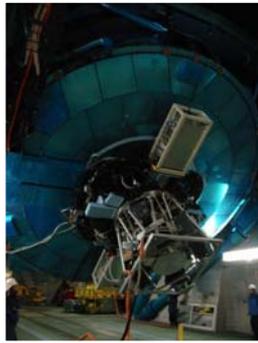
しかし物作りの目標はあくまで天文学であり、科学の目標なくしてもの作りはない。従って、いかにもの作りが重要といってもサイエンスの目標を持たなければ失敗する。かつて新しい技術が生まれた時、それを宇宙に向ければ何か見えてくるかもしれないという期待をもって装置作りがされたこともあった。たまたま空にその装置を向けたら新しい宇宙の姿が見えたこともあった。しかしそのようなケースでも本来それら装置は天文学以外のサイエンスの目標を持ったものであったことを忘れてはならない。

装置作りは現在では大変高度な技術を必要とする。天文学も巨大科学となり、8-10m望遠鏡の時代から30m望遠鏡の時代に移ろうとしている。このような時代にあって、どのように物づくりに基づくサイエンスを推進していったら良いか大変難しい。大プロジェクトに加わって歯車のひとつになるか、小さな装置で新しい分野を切り開くか。技術が非常に高度化した現在、どちらでも片手間では新しい装置を作ることはできない。世界と互して戦おうという装置開発者は、論文を大量生産する観測・理論家を横目に、5年も10年も実験室に閉じこもり、ただひたすら開発・実験を続けている。装置開発はプロフェッショナルでなければできない時代になりつつあり、大学院に進学する時、装置開発を選ぶか理論・観測を選ぶか大変迷うこともあるだろう。大学の一研究室で世界と互する観測装置を開発し、しかも自分たちでサイエンスの論文まで仕上げるようにするにはどうしたら良いか、私もそのはざままで常に葛藤の毎日である。

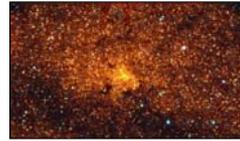
私たちの研究室では世界最高性能の「モアックス」という近赤外線多天体分光撮像装置を開発した。広視野、多天体分光機能の両方で世界に例のないものであり、世界からの注目を集めている装置である。自分の作った装置で目的のサイエンスができた時の醍醐味は格別のものである。次に私たちは南極に望遠鏡を作ろうとしている。なぜモアックスが成功したか、またなぜ南極に進出するのか、講演では「ものづくりとサイエンスのはざま」で苦しんできた背景を通じて、今後の観測装置開発とサイエンスのあり方を述べてみたい。

## 20年かかってやっと完成した装置とサイエンス

世界最高性能と世界にまだない独創的な  
近赤外線多天体分光撮像装置  
「MOIRCS(モアックス)」

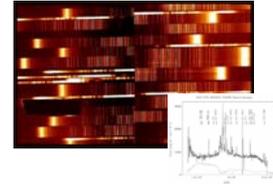


## 独創的な2つの特徴



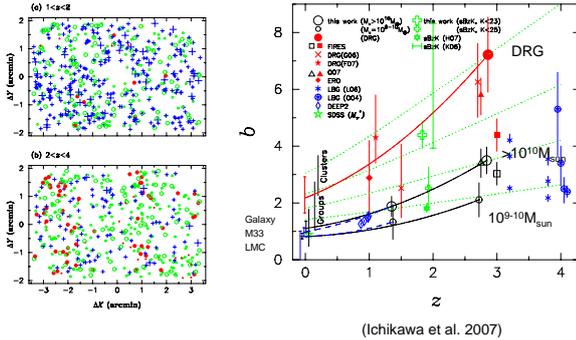
広視野。優れた像質( $\sim 0.2''$ )を保ったまま、従来8-10m望遠鏡の10倍近い視野

冷却スリット板が使える赤外線での初めての多天体分光機能。50天体以上の同時分光。従来の50倍以上の効率



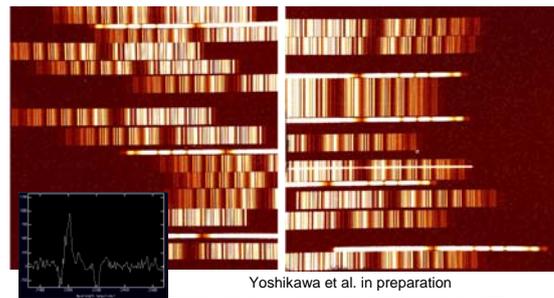
## クラスタリング進化を基に近傍銀河(銀河系、M33、LMCなど)の先祖を捜す

視野はまだ狭いが、星質量に基づく最も遠方の銀河地図



## GOODS-N領域における多天体分光

(Akiyama et al. ; Yoshikawa et al. in preparation)



H alpha emission at  $z=2.35$

1970年代、1980年代 私が学生だった頃

### ●三大学天文学教室 + 東京天文台

ものづくりをする暇があったら、研究をしなさい  
装置は研究者が技官やメーカーに作らせるもの  
研究は誰かが作った装置を使ってするもの

(今でもその傾向は残っている)

### ●物理学教室

新しいサイエンス開拓のために、オリジナルの装置開発をしなさい

X線、赤外線天文学の勃興

なんとか装置開発をしたい。しかし天文学教室では実験を教える先生がいない

修士・博士を通じて、大宇陀40cmシュミット望遠鏡の立ち上げと装置開発に参加するチャンス、開発とサイエンスで学位取得



しかし、しよせん三流の天文学

そんな時期

CCDカメラを天文教室の大学院生が独学で開発した

川上 岡山観測所  
高遠 木曾観測所

世界から遅れること10年、完成はしたがいずれも性能が悪く、サイエンスに結実せず

結局

岡山観測所 市販されているCCDカメラを外国から購入

天文教室から新しいサイエンスを拓く光・赤外線技術は育たなかった

すばる望遠鏡のSuprimeCAMIに代表される最先端のCCDカメラは物理出身の実験家を作った(関口、宮崎)

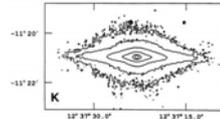
オーバードクターになって7年以上も経過した約20年前、装置開発を続けていくべきか、観測研究をしていくべきか迷っていた頃

まだ有効な赤外線カメラがない時代

これからは近赤外線の広視野観測だ！！

単素子のInSb検出器で描いたM104

近赤外線2.3  $\mu$ m



Wainscoat (1990)

可視光の写真



赤外線で見るとダークレーンが見えない

銀河の基本構造を解明できる ⇨ 銀河の恒星質量分布を表す

しかし、まだ世界に広視野赤外線カメラは存在しない

自分で作るしかない？

しかし、近赤外線装置は作ったことはない

幸い、一橋大学の商学部だが、助手になることができた

勉強から始める？？？

そんな矢先、上野さん(当時京都大学大学院生)が日本で開発された赤外線センサー(512x256PtSi)を用いて世界で初の広視野カメラを開発した(外国では58x62InSb)



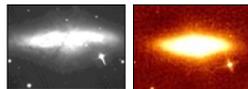
上野さんから、赤外線のいろはを勉強

我々も独力で広視野赤外線カメラを開発しよう

三菱が開発した1040x1040PtSiセンサーを借りて木曾観測所のシュミット望遠鏡に搭載する当時世界最大の赤外線カメラを開発

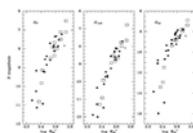
(市川、柳沢、伊藤)

上野カメラで見たM82  
可視 赤外線



M82はSaタイプ Ichikawa et al. (1995)

Infrared Tully-Fisher



$H_0=73\text{km/s/Mpc}$  Watanabe et al. 2001

恒星質量に基づく銀河構造のサイエンス構想は実ったが、...

しかし、一時世界で注目されるも、PtSiは感度が悪すぎた(量子効率 $\sim 1\%$ )

この間に世界では著しい赤外線カメラの進歩

外国ではAstronomical Instrumentationという分野があり、装置開発のプロが主体となって装置開発

日本の素人が素手で勝てるわけない

しょせん、二流にしかなれない

ものづくり+サイエンスで苦しんだが

やはり最先端の装置開発をしていくべきである  
しかし最先端を切り開く技術は一朝一夕にはできない

小さな装置開発の地道な努力によって技術力は成長していく  
物作りが途絶えると、取り戻すのに大変な労力を必要とする

日本の実験天文学の最先端は若手が開拓した

ミリ波天文学 海部(森本)  
赤外線天文学 佐藤(奥田)

東北大学に赴任したのをチャンスに

広視野赤外線カメラを開発して

恒星質量に基づく銀河の進化、大規模構造の研究をしたい

装置開発に基づく実験教育を大学でどのように位置づけるか

- ◆5年以内にサイエンスができ、学位が取得できる  
装置の独創性+サイエンス
- ◆(全体の一部であっても主要な部分の) 開発の主体となること  
単なるお手伝い、サービスとならないように

すばる望遠鏡はまだ手が届く範囲にある

日本の望遠鏡である  
技術開発に理解がある

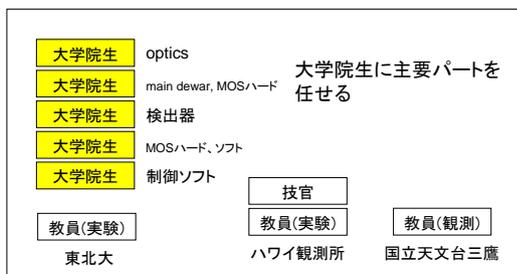
### MOIRCS開発の意図

- ◆大学でもの作りの基づくサイエンスの基盤を育てたい  
(東北大天文では装置開発の経験がない。実験室もない)

(少ない予算で)完全手作りで開発する

東北大の実験室の立ち上げ  
学部天文授業の内容を実験に変更

1999年R&D開始、2004年ファーストライト(6年)  
構想から研究成果までは10年近く



大型共同利用装置に大学院生が参加することは日本の天文の特殊性

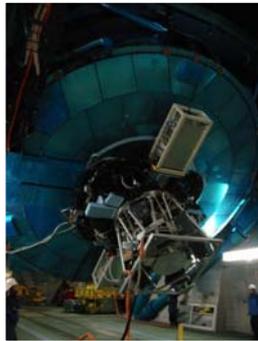
すばる望遠鏡で始めての日本の手作り観測装置。しかも大学院生が主体



## やっと世界一流の装置が完成

すばるで最も人気の高い装置のひとつ  
KECK天文台、GEMINI天文台からも観測時間交換の提案  
外国の国際会議でも話題

### ものづくりの重要性の確認



しかし、開発している間に世界の研究はどんどん進歩していた

## 「恒星質量に基づく銀河の進化」

### もはや当たり前前のサイエンス

MOIRCSが公開されるのを待っている人たちは  
たくさん論文を書いて、プロポーザルの準備を十分にしている

MOIRCS開発者は開発に疲れて、さて、これから勉強とはなかなかいかない

しかし、この開発の過程で再確認したこと

- ◆サイエンス同様、装置開発でも世界と戦うためには高い技術能力が必要。新しいサイエンスには新しい装置が必要
- ◆5年以上も実験室に閉じこもっても開発に専念しなければ良いものはできない
- ◆地道な基礎開発、人材育成が不可欠

大学院生は開発で精一杯  
さらに世界一のサイエンスを課すのは酷か

装置開発で成果を上げた院生をどう評価して、職に結びつけるか、正直、大変難しい

## 天文学も巨大科学時代

光・赤外線 米国の30m望遠鏡計画に参加するか

### ◆分担金を払って、望遠鏡時間を買う?

このようなお金の使い方が日本で許されるか  
技術力が途絶え、ずっと望遠鏡時間を買いつけることになる

### ◆観測装置を開発して搭載してもらう?

共同利用装置として、独創的で日本にしかできないものがあるか  
同種の装置の時、外国の装置開発プロ技術集団との競争に勝てるか  
設計に何年もかけて、外国とのコンペに負けたら教育はどうなる

## 大学の研究室とプロジェクトへの参加

—大プロジェクトに参加して何を得るか—

大学の役割

教育

研究

社会への還元

このような中で.....

## 大プロジェクト参加は失敗が許されない

### ◆博士論文(複数)が関わっている

### ◆共同利用装置である(完璧でなければならない)

全エネルギーを開発に注がなければならない

最近の例 AKARI, HINODE

自分で作った一流の装置で、自分で一流のサイエンス成果を出すのは夢か?

## 光・赤外線の大規模計画

30m望遠鏡

赤外線天文衛星SPICA

- ◆ 大学と研究所との連携、交流
- ◆ コミュニティの一致団結
- ◆ 大学における開発研究の位置づけ
- ◆ 開発に専念する体制の整備  
などなど

これらの議論は並行して進めていくとして、大学が主体となることのできるプロジェクトはどんなものがあるか

MOIRCSのさらに上を目指したいが、大学の一研究室ではMOIRCSが限界か

それでも

MOIRCSのさらに上を行きたい

すばるではできないことをしたい

さらに将来につながる可能性を持ちたい

にわかに脚光

## 小型天文衛星

東北大地球物理(惑星探査TOPS)が最初のミッションとして採択

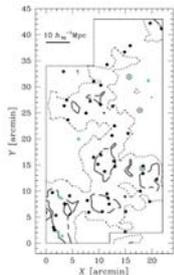
- ・大学が主体となって推進可能
- ・オリジナルのサイエンスが可能
- ・技術基盤はある

地上最後の天文フロンティア

## 南極

とってもおもしろそうだ。

High- $z$ ( $z>3$ )で恒星質量に基づく大規模構造を見たい



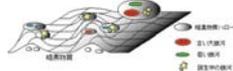
Ly $\alpha$  銀河で見る大規模構造  
( $z=4.49$ ) (Shimasaku et al. 2004)

星生成現場の大規模構造

恒星質量で見ると

?

ダークマターと銀河の  
質量進化の相関



## 南極望遠鏡

ペンギンが横にいて、ブリザードが吹き荒れる場所に望遠鏡？



<http://www.penguin3.com>



<http://southpole.nikkansports.com/>

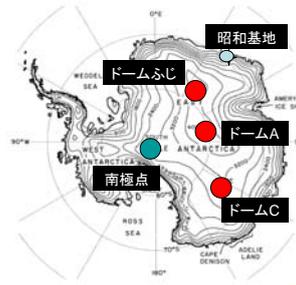


昭和基地



<http://www-lan.unice.fr/Com/crdtsa/indexantartic.htm>

### 天文台サイトとしての南極内陸は有望か



- 氷床は常に高気圧帯 (ブリザードはない)
- 風が弱い
- 晴天率が高い
- 気温が低い (赤外放射が少ない)
- 水蒸気量が少ない (大気吸収が少ない)



南極点に米国は10mサブミリ望遠鏡を建設(2007年3月)

フランス・イタリア・オーストラリア・アメリカによる

### 南極 Dome Cの開拓

PILOT 2.4m望遠鏡計画  
将来の巨大望遠鏡の候補地?



ヨーロッパの南極における次のサイエンスは天文学である  
今年末、80cm赤外線望遠鏡を完成

中国が米国とオーストラリアの協力を得て、Dome Aに天文サイト調査基地を設置(2006)

### Camp at the summit of Dome A



米国は、2m望遠鏡4台の赤外線干渉計を計画

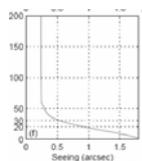
### ドームCにおける

2003年から本格的な天文気象調査



南極の大氷床は空気が冷えて安定成層し、下降流が常に流れる高気圧下にある。

標高	3200m
風速	平均 3m/s @ 地上
5m	
快晴	74%
オーロラ	なし
シーイング	夏 0.27"
(Vバンド)	0.58" @ 5m
	冬 1.3" @ 8.5m
	0.36" @ 30m
大気の水蒸気量	0.6mm PWV



### 日本の南極天文進出

- ◆ 今ならヨーロッパにおいつける
- ◆ 中国や米国とはほとんど同時
- ◆ 3大氷床(ドーム)のひとつに独自の基地を持つ
- ◆ 複数大学が協力すれば、極地研のサポートを得て、推進できる規模である

## 日本の南極基地

### ドームふじ

標高 3800 m (気圧 600hPa)  
 風速 5.8m/s 地上10m



## ドームふじ基地の難点

ドームふじまでの荷物運搬は雪上車のみ

冬は平均マイナス70°C(最低-80°C)。この温度で望遠鏡、観測装置が動くか  
 雪の上に望遠鏡を設置する。氷床は沈む(100mは雪、その下は水)

夏は白夜(ただし冬は24時間観測可能)

建物は10年で雪の下。吹き溜まり(ドリフト)のため

こしばらく越冬はなかった。越冬隊は6名程度  
 などなど



日本は雪上車で1000kmを運搬

日本の

## 南極赤外線2m望遠鏡計画

テラヘルツ10m望遠鏡との連携も含めて

市川 隆 (東北大)  
 高遠徳尚、浦口史寛、家正則 (国立天文台)  
 栗田光樹夫 (名古屋大)  
 田口 真 (極地研)他、惑星大気グループ  
 中井直正 (筑波大)



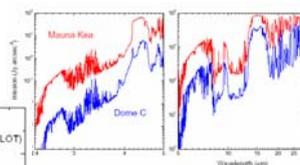
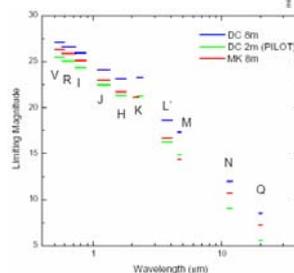
天文コンソーシアムの結成へ

中井を議長として、大学(筑波大、東北大、名古屋大等)、共同利用研(極地研、国立天文台)

## 赤外線バックグラウンド

Burton et al. (2005)

近赤外で数十分の1



温度が低いこと、透過率が高いことにより  
 ずばる望遠鏡とほぼ同等の性能が得られる

ただし波長2.2  $\mu$ m以下では効果は少ない

OHIは同じ、オーロラもある

## マウナケアとドームふじの比較

条件	すばる望遠鏡	ドームふじ
晴れる	65%	75%以上
大気が安定している(シーイング)	0.6"	< 0.5" (?)
標高が高い	4205 m	3800 m
大気温度が低い	0°	-70° (冬)
水蒸気量が少ない(透過率が高い)	3 mm PWV	< 0.6 mm PWV
風が弱い	平均7m/s	平均 3m/s @地上5m

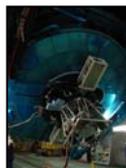
## 観測装置

- ・近赤外線(2-5  $\mu$ m)広視野カメラ
- ・中間赤外線カメラ



## 広視野深探査

長時間連続変光



MOIRCS



ほぼ同じ撮像性能

さらに、マウナケアでは透過しない波長帯がある



名古屋大超軽量望遠鏡(栗田他)

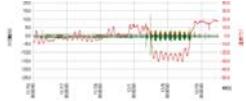
## 天文サイト調査開始！

2006-2007年南極観測隊に委託



荷物に忍ばせた加速度ロガー

## 雪上車の振動測定



## 基礎実験から一歩一歩

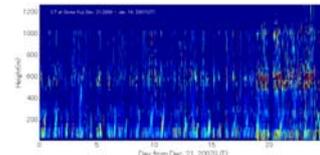


すべての物品をマイナス80℃で駆動

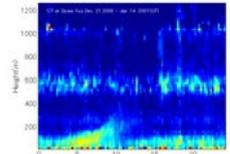


ドームふじに設置したSODAR

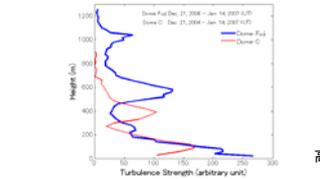
## 全観測データ



## 大気擾乱のデータ

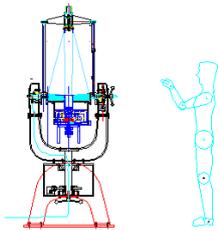


## 日変化データ



高さ分布

## 極寒仕様の全自動40cm赤外線望遠鏡の開発



極寒下での駆動を考慮した40cm赤外線望遠鏡(架台は仮)

## ロードマップ

### サイト調査(シーイングモニタ等)と短期成果

- 2006-2007 夏期観測隊に観測依頼(既存の装置持参)
- 2006-2009 調査用小口径望遠鏡の開発
- 2010 40cm赤外線望遠鏡設置

### 2m望遠鏡

- ~2007 概念設計
- 2008-2011 設計
- 2012 製作
- 2013 南極移送
- 2014 ドームふじにて組み上げ
- 2015 観測開始

## 装置開発に携わりたい大学院生に

- ◆(完成した時)新しいサイエンス、将来につながる開発であるか、常に自問する
- ◆(迷わず)最大限のエネルギーを注いで、最良の装置を作る  
(研究の訓練を受けていないので、酷な話だが)
- ◆完成したら、必ず、自分でサイエンスの論文を書く  
観測者、理論家を巻き込んで論文を増やす
- ◆装置を開発した人には必ず利点があるはず。それをチャンスとして生かせ

装置なくて天文学に発展なし

装置開発に自信を持とう