

研究代表者：

氏 名 海老塚 昇

所属・職 国立研究開発法人 理化学研究所 光量子工学研究領域・研究員

研究題目：高効率高分散回折格子の開発

1. 研究の実績

(1) 研究の実施日程

研究項目	実 施 日 程											
	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
フォトレジスト 回折格子の試作			試作	評価							試作	評価
Si, Ge切削加工 実験	評価				ダイヤモンド 工具設計		ダイヤモンド工具の製作					
Quasi-Bragg grating の試作					常温接合法 の調査		基板の製作	積層、研磨	加工	エッチング	加工	評価
					基板メーカ の調査							

(2) 研究の成果の説明

I. はじめに

従来の格子がノコギリ刃形状の表面刻線型回折格子は透過型の場合に分散（回折角）が大きくなると1次回折光の効率が著しく低下してしまう。さらに透過型の表面刻線型回折格子は回折角が大きくなるのに従って、格子の屈折率を大きくしなければならない。Fig. 1のような透過型の表面刻線型回折格子の界面における屈折の式は

$$\sin \theta_0 = n \sin \theta_1 \quad \dots (1)$$

$$n \sin (\alpha - \theta_1) = \sin \theta_2 \quad \dots (2)$$

である。ここで、入射角と回折角が等しい場合に  $\theta_2 = \alpha + \theta_0$  (Fig. 1) なので、2式は

$$\begin{aligned} n \sin (\alpha - \theta_1) &= \sin (\alpha + \theta_0) \\ n (\sin \alpha \cos \theta_1 - \sin \theta_1 \cos \alpha) &= \sin \alpha \cos \theta_0 + \sin \theta_0 \cos \alpha \\ (n \cos \theta_1 - \cos \theta_0) \sin \alpha &= (\sin \theta_0 + n \sin \theta_1) \cos \alpha \\ &= 2 \sin \theta_0 \cos \alpha \end{aligned}$$

$$\tan \alpha = 2 \sin \theta_0 / (n \cos \theta_1 - \cos \theta_0) \quad \dots (3)$$

である。1, 2, 3式より、入射角と回折角が  $\theta_0 = 45^\circ$  の場合に  $\theta_2 < 90^\circ$  以下という制限によって、格子の屈折率は2.3以上でなければならない。可視光において屈折率が2.3以上の媒質はZnSeやZnS、TiO<sub>2</sub>、ダイヤモンド等に限定されており、

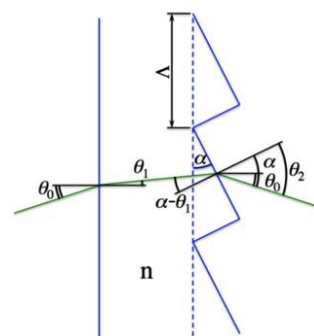


Fig. 1 Propagation of incident beam in surface relief grating with saw tooth grooves.

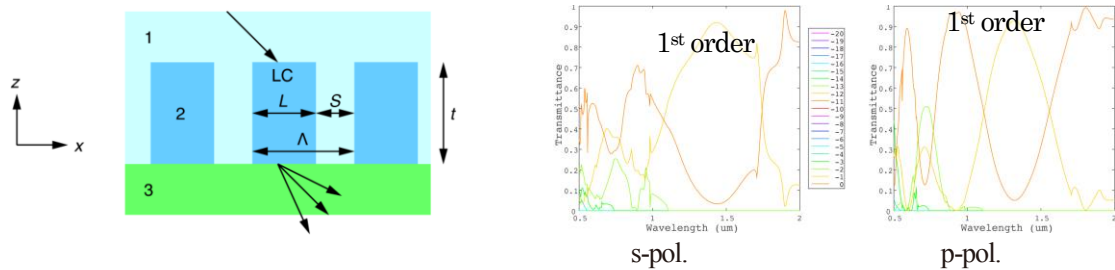


Fig.2 Schematic representation of volume binary grating. Fig. 3 Diffraction efficiencies of birefringence Bragg binary grating.  $n_1=1.0, n_{2S}=1.55, n_{2P}=1.70, n_3=1.5, L\&S = 0.5:0.5 [\mu\text{m}], t = 2 \mu\text{m}, \theta_B=45^\circ$ .

特に波長 400nm 以下においてはダイヤモンド以外には存在しない。

一方、屈折率が正弦波状に変調された Volume phase holographic (VPH) grating は S あるいは P 偏光の回折効率が最大 100% を達成することが可能である。しかし、S と P 偏光の分光効率特性が異なるために Bragg 角が大きくなると自然偏光に対する回折効率が低くなってしまふ。また、屈折率変調量の制限により、分散が大きくなると帯域幅が狭くなる。さらに VPH grating は回折次数が高くなると回折効率が低下してしまふ。

## II. Birefringence binary Bragg (3B) grating および Volume binary (VB) grating

Volume binary (3B) grating は光学異方性媒質を用いて S と P 偏光の分光効率特性を一致させて大きな回折角においても高い回折効率を達成できる。一方、Volume binary (VB) grating は畝と溝の幅を調整することによって S と P 偏光の分光効率特性を一致させ、高次回折光においても高い回折効率を達成できる。理研の岡本 隆之 専任研究員が独自に作成した厳密結合波解 (RCWA) のソフトウェアを光学異方性媒質にも対応できるように改良して、3B grating および VB grating (Fig. 2) の回折効率の数値計算を行った。3B grating は 1 次回折光に対して Fig. 3 のように L&S が等しい場合でも S と P 偏光の回折効率の極大波長を一致させることができる。一方、VB grating は畝と溝の幅を変えることによって Fig. 3 のように S と P 偏光の回折効率の極大波長を一致させることができるが、1 次回折光については溝の幅が波長の 1/10 より狭くなると (エバネッセント波の影響で) 効率が低下するために 3B grating より格子が厚くなり、帯域幅が多少狭くなることが分かった。また、VB grating は Fig. 5 のように高次回折光においても S と P 偏光の極大波長をほぼ一致させることができ、高い効率を達成できる。なお、2~5 次回折光においては VB grating より 3B grating の L&S を調整する方が S と P 偏光の極大波長を一致させることが容易であると類推される。

これらの高アスペクト比の矩形格子を実現するために、豊田工業大学のナノテクノロジープラットフォームとの共同研究により、MEMS 技術を応用してフォトリソ等の厚い矩形回折格子の製法を開発している。当初、格子周期 2, 3, 4 $\mu\text{m}$  の 3 種類、L&S = 1:1 の格子が 1 枚に描画されたマスクを使用して溝の深さが 5~10 $\mu\text{m}$  の矩形格子の試作を行った。しかし、溝が基板まで到達しない場合や基板との密着性が悪くて格子が倒れてしまひ、最適条件な加工を見出すことが困難であった。そこで、レジストのカタログの製作例と比較するために格子周期 20 $\mu\text{m}$ 、L&S = 1:1 のマスクを用いて溝の深さが 100 $\mu\text{m}$  程度の矩形格子を試作した。

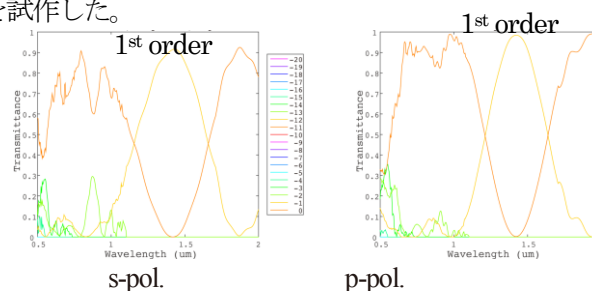


Fig. 4 Diffraction efficiencies of volume binary gratings for the 1st diffraction order.  $n_1=1.0, n_2=1.55, n_3=1.5, L\&S = 0.8:0.2 [\mu\text{m}], t = 5 \mu\text{m}, \theta_B=45^\circ$ .

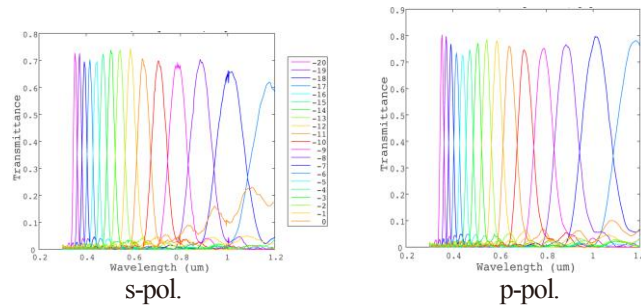


Fig. 5 Diffraction efficiencies of volume binary gratings for the 6th to 20th diffraction orders.  
 $n_1=1.0, n_2=1.55, n_3=1.5, L\&S = 4.75:0.25 [\mu\text{m}], t = 9 \mu\text{m}, \theta_B=45^\circ$

現在はマスクレス紫外線露光装置を用いて格子周期  $5\mu\text{m}$ 、 $L\&S=4:1$  と  $3.5:1.5$ 、溝の深が  $5\sim 20\mu\text{m}$  の矩形格子の試作を行っている。

### III. Quasi-Bragg grating

Quasi-Bragg (QB) grating は Fig. 6 のようにブラインドや錠戸のように短冊状の鏡面が精度よく平行に配列されたミラー基板を積層したエッセル分光用の透過型回折格子である。QB grating は次数が高いほど高い回折効率を達成することができるが RCWA 法によって確認されている。過去に片面に厚さ数  $10 \text{ nm}$  のクロムミラーを成膜した石英ガラス基板を直径  $10 \mu\text{m}$  のガラスビーズを混入した光学接着剤によって 40 枚積層した。しかし、この QB grating はガラスビーズの直径の偏差のため、Fig. 7 上段のように回折格子としては機能しなかった。

昨年度に豊田工業大学のナノテクノロジープラットフォームの設備を利用して、厚さ  $0.5\text{mm}$  の石英基板の両面にクロム膜とフォトレジストを塗布し、片面にマスクレス紫外線露光装置によって直径  $15 \mu\text{m}$  の円形パターンを  $0.3\text{mm}$  間隔の六角格子状に描画して、レジストを現像し、フッ酸系の溶液で石英をエッチングしてスペーサを形成した。このスペーサ付ミラー基板 20 枚を紫外線硬化型接着剤によって積層した。また、東北大学電気通信研究所との共同研究により、金の常温接合により厚さ  $0.5\text{mm}$  の石英のミラー基板 20 枚を精密に積層した。これらのミラー基板を積層したブロックをワイヤーソーで切断して研削・研磨加工により厚さ  $0.9\text{mm}$  の QB grating を試作した。

スペーサ基板を積層した QB grating の回折像を観察したところ、Fig. 7 中段のように非対称な回折パターンが見られた。この回折パターンからミラー基板が概ね等間隔でありながら、何カ所か間隔が異なる事によると考えられる。原因として積層後に  $100\text{g}/\text{cm}^2$  程度の加重を 10 時間以上かけて余分な接着剤を取り除いているものの、紫外線露光の時には加重を解放したために接着層の厚さより大きな異物が基板を押し上げているか、スペーサとミラーの間に微小な異物が挟まっているためと考えられる。一方、金の常温接合により積層した QB grating は、Fig. 7 の下段のように可視光においても実用的な格子周期精度 (rms  $\lambda/5$  以下と思われる) であることが分かった。正確な格子周期精度を評価するためにレーザー干渉計 (Zygo 社 GIP) によって回折光の波面測定を試みたが、口径が小さいことによる回折広がりによって点像サイズが隣り合う次数と重なってしまうために測定できなかった。

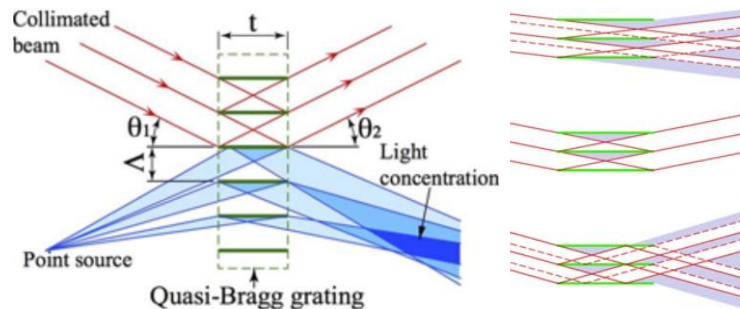


Fig. 6 Schematic representation of QB grating (left). Right: beam propagations of QB grating, small, ideal and large incident and diffraction angles (Quasi-Bragg angle) from top to bottom.

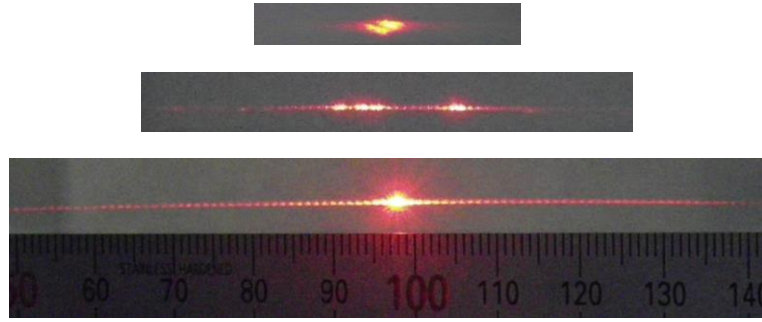


Fig. 7 Diffracted beam images of QB gratings, Quasi-Bragg angle: 45 deg. QB grating on the upper panel is that silica glass substrates of 0.2mm in thickness deposit with chromium film on one side are laminated by adhesive mixed with glass beads of 10  $\mu\text{m}$  in diameter. QB grating on middle panels is that silica glass substrates of 0.5 mm in thickness deposit with chromium film on one side and another side has spacer formed by etching of silica glass are laminated by adhesive. QB grating on the lower panels is that silica glass substrates of 0.5 mm in thickness deposit with gold film on both sides are laminated by fusion of gold in room temperature.

#### IV. Immersion grating

Immersion grating は光路が高屈折率媒質で満たされた反射型回折格子であり、分散光学素子のサイズが大きくなり、光学系を冷却する必要がある赤外線において、分光器のサイズが劇的に小型化されるために極めて有効である。以前に超精密加工装置および鋳鉄ダイヤモンド砥石を用いた ELID 研削法により試作されたゲルマニウム ( $n=4.0@10\mu\text{m}$ ) の Immersion grating が、名古屋大学において開発された中間赤外線 (7.5~13.5 $\mu\text{m}$ ) 高分散分光器: GIGMICS に搭載されている。しかし、研削加工では溝の底が丸くなり、効率が低下してしまうために、近赤外線 (1~5 $\mu\text{m}$ ) 用の Immersion grating は製作が困難である。

一昨年度にシリコン ( $n=3.5@1.5\mu\text{m}$ ) やゲルマニウムの Immersion grating の精密な階段格子の切削加工法を開発するためにシリコンやゲルマニウム基板に負のすくい角を持つ単結晶ダイヤモンドのバイトを用いたシェーバー加工 (Fig. 8) および、単結晶ダイヤモンドの単刃エンドミルを用いたフライカット (Fig. 9) による V 溝加工を行い、溝の形状や加工表面の状態、加工時間等の評価を行った。その結果、単刃のダイヤモンド工具では加工時間が膨大 (800 時間以上) になり、工具の摩耗により正確な格子形状の加工が困難であることが判明した。

そのために昨年度には Fig. 10 のような 60 枚刃の単結晶ダイヤモンド・エンドミルを開発することになった。昨年度中に 60 枚刃のエンドミルを用いたシリコンやゲルマニウム基板に V 溝の試験加工を行う予定であったが、エンドミルの製作に 2 度失敗して納期が 3 ヶ月以上遅れ、2 月末に納品されたために、試験加工が今年度に延期になった。

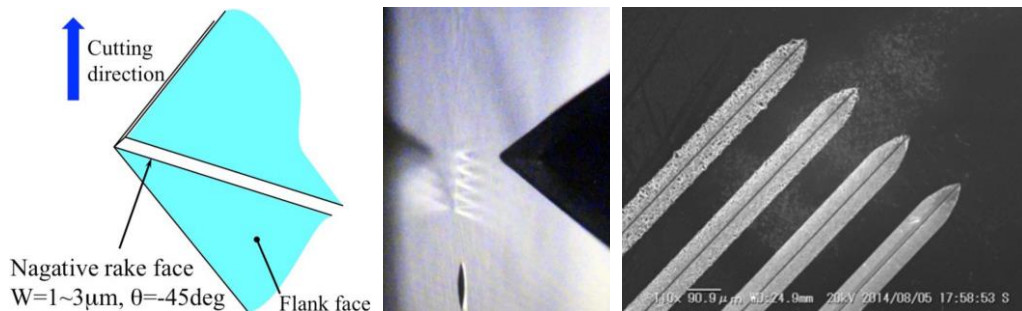


Fig.8 Schematic representation of single-crystal diamond bite. Saving process for silicon substrate (center). SEM image of V-grooves processed by diamond bite (right).





Fig.9 Optical micrograph of tip of end mill of single-crystal diamond (left,  $\phi=0.5\text{mm}$ ) and fly-cutting for a silicon substrate (center). SEM image of V-grooves processed by diamond end mill (right).

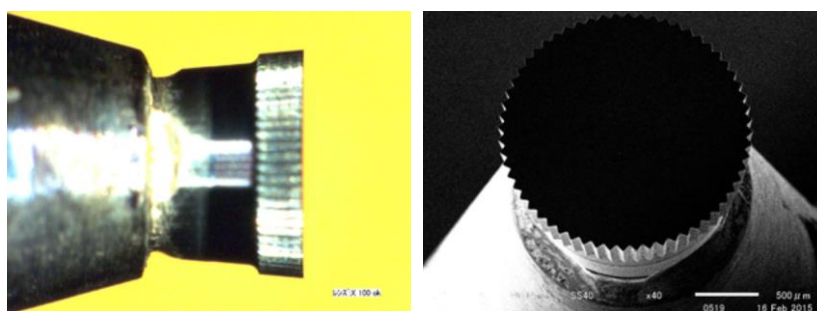


Fig.10 Optical micrograph (left) and SEM image (right) of end mill of single-crystal diamond with 60 cutting edges (left,  $\phi=2.0\text{mm}$ ).

## V. 成果発表

### 国際会議集録論文

- N. Ebizuka, et al., "Birefringence Bragg Binary (3B) Grating, Quasi-Bragg Grating and Immersion Gratings," Proc. SPIE 9151, 5C1-5C9 (2014).

### 国内会議口頭発表

- 海老塚 昇 他, "次世代天文学観測装置用の新しい回折格子", 2014年精密工学会秋季大会, 鳥取大学, 2014年9月16-19日
- 海老塚 昇 他, "次世代天文学観測装置用の新しい回折格子の開発", 第4回可視赤外線観測装置技術ワークショップ, 国立天文台(三鷹), 2014年12月3,4日

### 国内会議ポスター発表

- N. Ebizuka, et al., "Current Status of Novel Gratings for Next Generation Astronomical Instruments II", 2014年度すばるユーザーズミーティング, 国立天文台(三鷹), 2015年1月13-15日
- 海老塚 昇 他, "新しい透過型高分散回折格子および Immersion grating の開発状況", ワークショップ「近赤外高分散分光で狙う低質量星周りのハビタブルな地球型惑星」, 国立天文台(三鷹), 2015年3月4日

使用実績報告書

1. 総括表

区分	費目	予算額 (円)	決算額 (円)	研究費の 充当額 (円)	備考
支出	設備備品費	0	0	0	
	消耗品費	1,727,273	1,402,708	1,402,708	
	その他の経費	1,272,727	1,602,128	1,597,292	国内旅費 728,220 海外旅費 323,720 参加費等 244,865 消費税相当額 32,596 一般管理費272,727 (上限)
	合計	3,000,000	3,004,836	3,000,000	
収入	研究費の額	3,000,000	3,000,000		
	自己調達額	0	4,836		
	その他	0	0		
	合計	3,000,000	3,004,836		

2. 決算費目別内訳

(A) 支出

a 設備備品費

種別	仕様	数量	単価 (円)	金額 (円)	発注年月日	引取年月日	支払年月日	備考
				発生なし				
計								

b 消耗品費

種別	仕様	数量	単価 (円)	金額 (円)	支払年月日	備考
ワイヤグリッド偏光フィルム		1式	54,000	54,000	2014. 11. 28	
パソコン用電源アダプタ		1個	8,413	8,413	2014. 10. 31	
紫外線硬化型液晶		1式	26,568	26,568	2014. 12. 25	
ウェアトレ-H22-10-0615 他		1式	51,030	51,030	2015. 1. 30	
洗浄ケースS型		1組	42,660	42,660	2015. 1. 30	
石英基板		5枚	22,680	113,400	2015. 1. 30	
ウェアトレ-H22-60-0615 他		1式	9,671	9,671	2015. 1. 30	
石英基板 80枚		1式	163,598	163,598	2015. 2. 27	
クロムメッキ付石英基板一式 (5枚)		1式	108,540	108,540	2015. 2. 27	

パソコンとカメラの接続用ケーブル		1個	1,620	1,620	2015. 1. 9	
石英基板洗浄		1式	52,488	52,488	2015. 2. 27	
TS 近紫外用アロマティックレンズ 50 ×100 UV-VIS 他		1式	26,244	26,244	2015. 3. 30	
NORLAND光学接着剤 NOA65		1個	3,780	3,780	2015. 3. 30	
単結晶ダイヤモンド多刃エンドミル		1式	216,000	216,000	2015. 3. 30	
BK7プリズム		2個	59,400	118,800	2015. 4. 30	
積層型回折格子		2式	135,000	270,000	2015. 4. 30	
へパフィルター部品 プレフィルター 1093*0 ほかに		1式	27,896	27,896	2015. 4. 30	
積層基板 (20枚積層、25x10x0.9)		1式	108,000	108,000	2015. 4. 30	
計				1,402,708		

c その他の経費

種別	摘要	数量	単価 (円)	金額 (円)	発注年月日	引取年月日	支払年月日	備考
外勤交通費	海老塚昇、2014年5月28日、東京大学柏キャンパス		2,460	2,460	2014. 5. 28	2014. 5. 28	2014. 6. 6	
	海老塚昇、2014年6月11日、パシフィコ横浜		1,520	1,520	2014. 6. 11	2014. 6. 11	2014. 6. 27	
国内出張	No.100069-24 山形 7/29 伊賀上野		28,180	28,180	2014. 7. 29	2014. 7. 29	2014. 8. 8	
	No.100069-25 海老塚 7/29 伊賀上野		27,580	27,580	2014. 7. 29	2014. 7. 29	2014. 8. 15	
	No.100069-23森田 7/29-30 伊賀上野・神領		31,700	31,700	2014. 7. 29	2014. 7. 30	2014. 8. 22	
外勤交通費	海老塚昇、2014年8月8日、東京大学工学部		720	720	2014. 8. 8	2014. 8. 8	2014. 8. 22	
	山形豊、2014年8月8日、東京大学工学部		480	480	2014. 8. 8	2014. 8. 8	2014. 8. 22	
国内出張	No.100069-33 海老塚 8/27-28 仙台		38,100	38,100	2014. 8. 27	2014. 8. 28	2014. 9. 12	
	No.100069-32 山形 8/27 仙台		24,940	24,940	2014. 8. 27	2014. 8. 27	2014. 9. 12	
	No.100069-42 海老塚 9/15-19 鳥取・姫路		94,720	94,720	2014. 9. 15	2014. 9. 19	2014. 10. 3	
	No.100069-43 海老塚 9/24-25 名古屋		39,460	39,460	2014. 9. 24	2014. 9. 25	2014. 10. 3	
外勤交通費	海老塚昇、2014年9月30日、シチズンホールディングス		800	800	2014. 9. 30	2014. 9. 30	2014. 10. 10	
	海老塚昇、2014年10月16日、パシフィコ横浜		1,520	1,520	2014. 10. 16	2014. 10. 16	2014. 10. 24	
	海老塚昇、2014年10月30日、シチズンホールディングス		800	800	2014. 10. 30	2014. 10. 30	2014. 11. 7	
	海老塚昇、2014年11月19日、科学未来館、オプトクエスト		1,840	1,840	2014. 11. 19	2014. 11. 19	2014. 11. 28	
国内出張	No.100069-60 海老塚 11/20-21 名古屋		39,690	39,690	2014. 11. 20	2014. 11. 21	2014. 12. 5	
	No.100069-70 海老塚 11/28-29 京都		44,140	44,140	2014. 11. 28	2014. 11. 29	2014. 12. 12	

	No.100069-71 山形 11/28 京都		30,820	30,820	2014.11.28	2014.11.28	2014.12.12	
外勤交通費	海老塚昇、2014年12月5日、パシ フィコ横浜		1,490	1,490	2014.12.5	2014.12.5	2014.12.19	
外勤交通費	海老塚昇、2014年12月24日、シ チズンホールディングス		800	800	2014.12.24	2014.12.24	2015.1.9	
	海老塚昇、2015年1月7日、東京 工業大学		1,100	1,100	2015.1.7	2015.1.7	2015.1.23	
国内出張	No.100069-84 海老塚 1/20 仙台		23,700	23,700	2015.1.20	2015.1.20	2015.1.30	
	No.100069-85 海老塚 1/21-24 名古屋・京都		76,280	76,280	2015.1.21	2015.1.24	2015.1.30	
	(返金) No.国内出張 No.100069-85 海老塚 1/21-23 名古屋・滋賀 原伝票： 20143010103109		-14,000	-14,000	2015.1.21	2015.1.23	2015.2.10	
	No.100069-90 海老塚 2/4-5 滋賀・京都		45,220	45,220	2015.2.4	2015.2.5	2015.2.27	
	No.100069-92 海老塚 2/19-21 名古屋		61,360	61,360	2015.2.19	2015.2.21	2015.3.6	
外勤交通費	海老塚 昇 3/9 一橋大学		660	660	2015.3.9	2015.3.9	2015.4.3	
	海老塚 昇 3/16 東洋大学		960	960	2015.3.16	2015.3.16	2015.4.3	
国内出張	No.100069-98 海老塚 3/23-26 名古屋・滋賀		76,210	76,210	2015.3.23	2015.3.26	2015.4.3	
	No.100069-99 海老塚 3/17-18 京都・滋賀		44,970	44,970	2015.3.17	2015.3.18	2015.4.3	
海外渡航費	No260608 海老塚 2014/6/21-29 カナダ		6,130	6,130	2014.6.21	2014.6.29	2014.7.4	
	No260608 海老塚 2014/6/21-29 カナダ		317,590	317,590	2014.6.21	2014.6.29	2014.7.4	非課税
学会講演費	SPIE Astronomical Telescopes+Instrumentation 2014、海老塚昇		89,865	89,865	2014.8.29	2014.8.29	2014.9.12	非課税
	2014年度利用料金(微細加工ブ ラットフォーム実施機関)		150,000	150,000	2015.3.9	2015.3.9	2015.3.20	
学会参加費	ユネスコ国際光年記念 精密工 学会・国際シンポジウム、海老 塚昇		5,000	5,000	2015.3.23	2015.3.23	2015.4.3	
消費税相当額	No260608 海老塚 2014/6/21-29 カナダ		32,596				2014.7.4	非課税
	SPIE Astronomical Telescopes+Instrumentation 2014、海老塚昇						2014.9.12	非課税
一般管理費			272,727	272,727				
計				1,602,128				



(B)収入

種 別	摘 要	金 額 (円)	備 考
研 究 費 の 額	国立天文台からの振込	3,000,000	
自 己 調 達 額		4,836	
そ の 他		0	
計		3,004,836	

(注) 共同研究の実施に際し、収入を得た場合や取引相手先からの納入遅延金が発生した場合には、収入の欄におけるその他に計上すること。