

電気通信大学電気通信学部 教授

白田 耕藏

「量子固体と非線形光学：新しい光学過程の開拓」

## 1. 研究実施の概要

本研究の狙いは、代表者等が水素原子系で実証してきた光・物質系の強結合の物理に基づく「量子干渉効果による光学応答の制御」のコンセプトを高密度の固体系に拡張し発展させることであり、固体系として量子固体として知られる固体水素を用いることがその最大の眼目である。固体水素は、その光学遷移のスペクトル幅が気相原子系のそれよりも格段に狭くなることが期待され、いわば「孤立分子（原子）の量子性と固体の高密度性をあわせ持つ」物質であり強結合の物理を展開する場として好適な系である。

本計画は5年計画でありその内容は大きく三種の研究課題に分けられる。第1の課題は本計画の本質的部分である。量子固体である固体水素を作業媒質として光の場と物質が強く結合する系の非線形光学・量子光学の研究を系統的に展開し、従来の非線形光学・量子光学の枠組みを越えた新しい体系の構築を目指すものである。第2の課題は単結晶固体水素作製法の開発に関するものである。固体水素の質は本計画の到達点を左右する重要な因子であり系統的な研究を実施する。第3の課題は非線形光学研究の基礎データを与えるものとしてのレーザー分光法に基づく固体水素の分光学的研究である。作製した結晶の質を精度良く評価するためにもレーザー分光法は極めて有効である。もちろん、上記の三課題は第1の課題を中心に密接不可分な関係にあり、それぞれの課題ともに緊密な連携の下に第1の課題の完成を目指し目的意識的に実施した。

### 量子固体の非線形光学・量子光学

量子固体を用いる非線形光学を固体水素を用いた誘導ラマン散乱についての研究により端緒についたものである。量子固体の「孤立原子（分子）の量子性と固体の高密度性をあわせ持つ」という従来の非線形光学物質に無い特長は、伝統的な非線形光学の常識を覆す結果を生み出した。即ち、非線形光学の誕生以来、光パラメトリック過程における位相整合は物質の屈折率分散特性で記述されてきたが、固体水素の誘導ラマン散乱の結果は、物質系と光の場の相互作用により最適化された光・物質系の強結合固有状態が生成し位相整合は自己組織的に達成し得る（Self-induced phase-matching, 自己誘起位相整合）事を示すものである。本課題では、この強結合誘導ラマン散乱の研究を突破口に、更に一般的な非線形光学・量子光学過程に拡張し発展させることを目指して研究を実施した。最大のポイントは物質中に大きなコヒーレンスを制御性良く生成する事により、強結合系の非線形光学を光エレクトロニクスや量子光学の手法へ一般化する試みを実験・理論の両面から行うことである。

固体水素の純振動ラマン遷移に大きなコヒーレンスを生成し強結合状態を準備する事により、位相整合の制約のない、任意で高効率な非線形ラマンサイドバンド発生を実現した。この結果は、いわばどのような光であっても任意に水素分子の振動周波数に対応する125THz という超高周波で効率良く変調できる事を意味し、量子クリスタル発振器とでも言えるものが実現した事を意味する。量子クリスタル発振器をレーザーに関わる極限技術

として展開することを目指して、フェムト秒光パルスを変調する事を理論・実験の両面から検討した。理論の予測によれば、固体水素の大きなコヒーレンスによりフェムト秒光パルスを変調すれば、単一のサブフェムト秒光パルス発生という前人未到の技術が達成できる。また、量子結晶発振器の応用例として、光パルスの伝播速度を真空中の光速から4桁も制御できる事を理論・実験の両面から示した。更に、量子固体を高Q光共振器と組み合わせる事により新しい側面を開拓する研究を行った。作業物質は固体水素ではなく、液体水素を用いて行った。液体水素の微小球作成技術を開発し、球内での全反射によるWhispering Gallery Modeを用いて $10^9$ を超える巨大Q値が実現でき、その結果として紫外から近赤外にわたるコヒーレントな光の系列（光コム）が実現できる事を示した。

#### 単結晶固体水素作製法の開発

非線形光学の作業媒質として十分な質を持つ固体水素単結晶の作成法を開発した。開発した方法は加圧液相成長法および気相成長法である。前者は光学セル中で水素を3重点直下で加圧下で結晶成長させる方法である。セルのサイズを変えることにより20mm程度の大きさの結晶から $100\mu$ 程度のものまで作成可能である。結晶の評価法も開発した。光学的な均質性は局所的な偏光回転計測により、結晶軸はブリルアン計測により、また総合評価としては超高分解能ラマン計測により行った。気相成長法は低温のサファイア等の基板の上に水素ガスを吹き付けることにより結晶成長させる方法である。この方法の長所は、非線形光学の視点からは、相互作用長が極めて容易に制御できることである。また、出射窓が不要となるため、超広帯域の光パルス発生等で出射窓材料の分散が問題になる場合は特に有用な方法である。また、種々の原子・分子等を固体水素中にドーピングする際も有効である。

#### 固体水素の分光学的研究

固体水素系で様々な新しい光学過程が実現できるのは、固体水素の量子固体としての際立った特徴によるものである。光学過程の基礎を支える土台としての固体水素の基礎特性についての詳細なデータベースを構築するべく、高分解能レーザー分光の諸手法を用いた研究を実施した。強結合系を実現するためのキーパラメータであるパイブロン位相緩和については時間分解コヒーレント反ストークスラマン散乱、コヒーレントラマン損失分光法等により系統的に研究した。

以下に電通大非線形・量子光学グループ、京都大高分解能分光グループ、東北大物性グループの成果の概要を述べる。

#### 電通大非線形・量子光学グループ

固体水素パイブロン系を主たる作業遷移と定めて、レーザー分光によりその評価を行う方法を確立した。用いた方法は、時間分解コヒーレント反ストークス光散乱、ラマン損失

分光、コヒーレントブリルアン散乱、バイブロンエネルギー緩和計測等である。なお、本項の研究は東北大グループと共同で行った。バイブロンの位相緩和時間が 100ns 以上であり、ラマン線幅が不均一幅も含めて 5MHz ときわめて小さいことを示し、その温度依存性の起因も明らかにした。

位相緩和の小さなバイブロン系にパルス的に最大に近いコヒーレンスを生成し、その量子コヒーレンスを用いたパラメトリック過程を系統的に実験と理論の両面で研究した。典型的な結果はインコヒーレント光のパラメトリックビーティングである。バイブロンの量子コヒーレンスは伝統的な位相整合の限界を越えて、 $2000\text{cm}^{-1}$ にもわたるバンド幅を持つインコヒーレント光をすら効率よく変調しサイドバンドを発生させることを示した。インコヒーレント光の強度は 1 光子レベルでも良いことをも示した。この結果を理論的に突き詰めることにより、発生するサイドバンドの自己相関関数およびサイドバンド間の相互相関関数はコヒーレンスと相互作用するプローブ光の自己相関関数と任意の次数で一致し、プローブ光の完全なコピーが異なる波長で生成されることを示した。また、パラメトリックビーティングの時間・空間発展はサブフェムト秒領域の光パルス発生になりえることを示した。

固体水素バイブロンラマン遷移を用いて、透明系であっても 4 桁以上にわたるダイナミックレンジで光パルスの伝播速度が制御できることを理論的・実験的に示した。遠共鳴のラマン系のパルス伝播の固有モードの存在を理論的に予測し実験で実証した。

固体水素と同様な特性を持つ液体水素により液滴を作成する技術を開発し、液体水素液滴の非線形光学を拓いた。液滴の Whispering Gallery Mode の Q 値は  $10^9$  以上にもなることを示し、誘導ラマン過程により紫外から近赤外を完全にカバーするコヒーレント光の系列が発生できることを示した。

#### 京都大高分解能分光グループ

固体水素自身及び固体水素に様々な分子種をドーピングし様々な遷移を高分解能分光の手法で研究した。固体水素の純振動遷移の第 1 高調波光学吸収を高分解能用近赤外差周波レーザーを用いて観測し、その解析から固体内の励起状態の性質及び結晶の量子効果を明らかにした。固体水素中にメタン分子を微量に混在させた結晶を生成しその高分解能分光を行うことで、固体水素のミクロな結晶構造の解析を行うとともに、スペクトルの温度変化から固体内の励起状態の緩和過程に関する研究を進めた。

#### 東北大物性グループ

バイブロンの位相緩和、ブリルアン計測、熱緩和計測など光散乱計測の基本手法を確立した。また、固体水素以外の物質系への探索研究を実施した。

## 2. 研究構想

本課題は「孤立原子／分子の量子性と凝縮系の高密度性を併せ持つ」光学媒質を実現する事により「気相の原子／分子系で発展してきた光学過程と凝縮系で発展してきた光学過程の双方の特長を兼ね備える従来の枠組みを越えた新しい非線形光学過程」を開拓する事をそのねらいとするものである。本計画では光学媒質として量子固体である固体水素を、光学過程として光の場と物質系の強結合状態を第1義的なキーワードとして、非線形光学研究からその基盤を与える分光・物性測定に関わる研究を展開する。本チームは電通大の非線形・量子光学グループ（リーダー、白田耕藏（研究代表））、京都大の高分解能分光グループ（リーダー、百瀬孝昌助教授）、東北大の物性グループ（リーダー、斎官清四郎教授）からなる。各グループの担当研究項目は以下のとおりである。

### 電通大：非線形・量子光学グループ

#### 担当研究項目

- 固体水素の非線形光学
- 量子クリスタル発振器の非線形光学
- 超短サブフェムト秒光パルスの発生
- ラマン共鳴媒質中の非線形光伝播
- 固体水素の定常的ラマンコヒーレンスの評価
- 球滴高Q光共振器中の非線形光学
- コヒーレントラマン損失分光による位相緩和評価
- 超高分解能低周波非線形光散乱分光法の開発
- 高品質固体水素結晶作成法の開発

### 京都大：高分解能分光グループ

#### 担当研究項目

- 固体パラ水素の高分解能レーザー分光
- 固体パラ水素中の励起状態とその緩和の研究
- 固体パラ水素の結晶状態の評価と制御

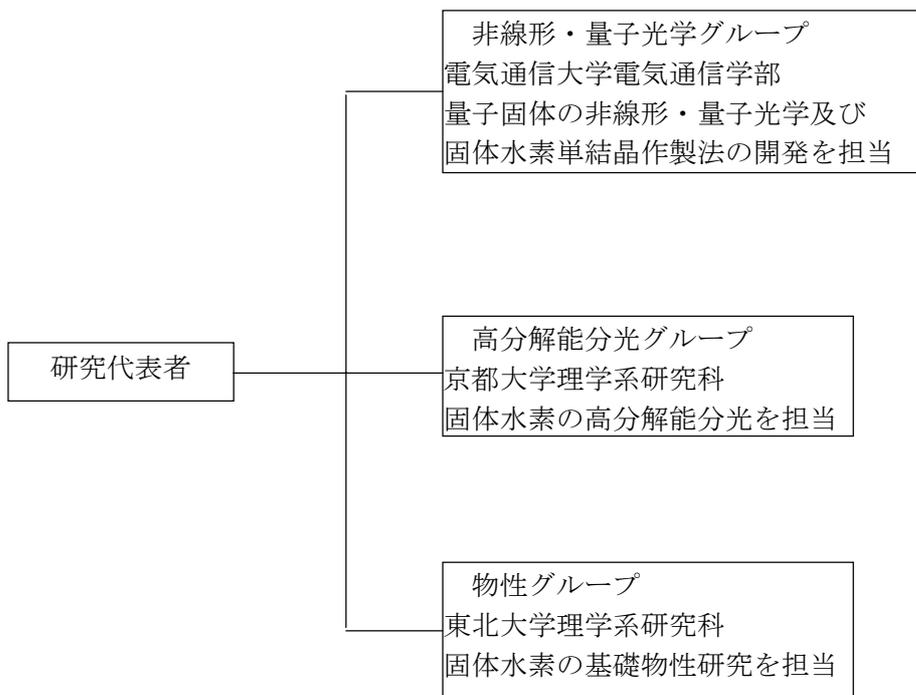
### 東北大：物性グループ

#### 担当研究項目

- 固体水素の光散乱分光
- 固体水素の基底状態の緩和の研究

### 3. 研究実施体制

#### (1) 体制



### 4. 研究期間中の主な活動

#### (1) ワークショップ・シンポジウム等

年月日	名称	場所	参加人数	概要
平成 11 年 9 月 14 日 ～15 日	研究チーム研究会	八王子セミナー ハウス (東京都)	32 名	次ページの通り
平成 12 年 10 月 13 日	研究チーム研究会	電気通信大学 (東京都)	41 名	次ページの通り
平成 13 年 9 月 11 日	研究チーム研究会	電気通信大学 (東京都)	37 名	次ページの通り

研究チーム研究会（平成 11 年度）

開催日時： 9 月 14-15 日

場所： 八王子セミナーハウス

趣旨： 研究チームの現状での到達点を明らかにし今後の展開について共通認識を高める。また各グループ間の情報伝達も含め懇親を深める。

参加者数：32 名（チーム内 26 名、招待講演者 3 名及び 研究統括、技術参事、本部主任調査員）

———研究会プログラム———

9 月 14 日

13 : 30	挨拶と研究会の概要	電通大	白田
13 : 40	最大コヒーレンスを用いた非線形光学 I	電通大	桂川
14 : 05	最大コヒーレンスを用いた非線形光学 II	電通大	梁
14 : 30	コヒーレンスの緩和の計測：時間領域	電通大	李
14 : 55	最大コヒーレンスとサブフェムト秒パルスの発生	電通大	Fam
15 : 20	強結合による低群速度伝播とパラメトリック過程	電通大	白田、Fam

15 : 45 休憩

16 : 00	固体水素の逆ラマン分光	東北大	伊藤
16 : 25	ラマン増幅器としての固体水素	電通大	桂川
16 : 45	固体水素内のスペクトル線幅について	京大	百瀬
17 : 10	液体水素ドロプレットの誘導ラマン散乱	電通大	植竹
17 : 35	広帯域光コムジェネレータ（招待）	東工大	興梠

18 : 05 休憩

18 : 30-20 : 30 懇親会

21 : 00-23 : 00 Poster/Discussion

9 月 15 日

8 : 45	固体水素のブリルアン散乱分光	東北大	是枝
9 : 10	超高分解能ブリルアン利得計測	電通大	黒田、李
9 : 35	光学測定用超低温クライオスタットの試作	電通大	鈴木
10 : 00	固体水素と量子トンネル効果	(招待)	
		原研	熊田

10 : 30 休憩

10 : 45	吹きつけ法によって成長させた固体水素の結晶構造	京大	香月
11 : 10	固体/液体水素の電子状態と非線形光学	電通大	リカルド
11 : 30	液体ヘリウム中の中性原子のレーザー分光（招待）	理研/電通大	高見
12 : 00	今後の展開	電通大	白田

12 : 15-13 : 30 昼食・休憩

13 : 30-15 : 00 Poster/Discussion

研究チーム研究会（平成 12 年度）

研究チーム研究会を下記により開催した。研究会はインフォーマルな非公開形式で行った。

開催日時： 平成 12 年 10 月 13 日（金）

場所： 電気通信大学 東 6 号館 会議室

趣旨： 研究チームの現状での到達点を明らかにし今後の展開について共通認識を高める。また各グループ間の情報伝達も含め懇親を深める。

参加者数： 41 名（チーム内 35 名、招待講演者 2 名及び 研究統括、技術参事、事務参事、本部主任調査員）

内容： 以下に添付するプログラムに示す。

———研究会プログラム———

9 : 30	挨拶と研究会の概要	電通大	白田
9 : 40	大きなコヒーレンスを用いた非線形光学	電通大	桂川
10 : 05	強結合による低群速度伝播とパラメトリック過程	電通大	白田、Fam
10 : 30	固体水素中での低群速度光伝播	電通大	梁
10 : 55	休憩		
11 : 15	固体水素のコヒーレントラマン分光	電通大	高柳
11 : 40	光励起に伴う固体水素結晶のひずみ	京大	清水、百瀬
12 : 05	エネルギー緩和の計測	電通大	李
12 : 30	昼食・研究室案内・ポスター		
14 : 00	（招待）光誘起相転移理論の現状と展望	阪大	小川
14 : 30	固体パラ水素における強制レーレー散乱	東北大	斎官
14 : 55	超高分解能ブリルアン利得計測	電通大	黒田
15 : 20	固体水素の遠赤外吸収観測	京大	香月、百瀬
15 : 45	休憩		
16 : 00	（招待） Collapse of two-atom vacuum Rabi oscillation in a planar microcavity	電通大	氏原
16 : 30	液体水素ドロプレットの誘導ラマン散乱	電通大	植竹
16 : 55	液滴光共振器と誘導ラマン過程（理論）	電通大	Fam
17 : 20	固体／液体水素中の原子の非線形光学	電通大	恵
17 : 30	今後の展開	電通大	白田
17 : 40	— 18 : 40	ポスター	
19 : 00	— 21 : 00	懇親会	

研究チーム研究会（平成 13 年度）

研究チーム研究会を下記により開催した。研究会はインフォーマルな非公開形式で行った。

開催日時： 平成 13 年 9 月 11 日（火）

場所： 電気通信大学 東 6 号館 会議室

参加者数： 37 名（チーム内 33 名、招待講演者 2 名及び 研究統括、技術参事）

内容： 以下に添付するプログラムに示す。

———研究会プログラム———

9 : 30	挨拶と研究会の概要	電通大	白田
9 : 40	固体水素 <b>Vibron</b> の位相緩和（実験）	電通大	桂川
10 : 05	固体水素 <b>Vibron</b> の位相緩和（理論）	電通大	<b>Fam</b>
10 : 35	固体水素のコヒーレントラマン分光	電通大	黒田、原
10 : 55	休憩		
11 : 15	固体水素中での低群速度光伝播	電通大	梁
11 : 40	固体水素による超短光パルス発生制御（理論）	電通大	<b>Shon</b>
12 : 10	大きなコヒーレンスによる非線形光学	電通大	桂川、李、富崎、小野
12 : 30			昼食・研究室案内・ポスター
14 : 00	（招待）拡散するが再結合反応しない固体パラ水素中の水素原子	原研	熊田
14 : 30	レーラー散乱の研究	東北大	大野、岡田、是枝、 斎官
14 : 55	固体水素中の不純物トンネル拡散の理論	東北大、阪大	岡島、小川
15 : 20	高 Q 光共振器を用いた非線形光学	電通大	伊丹、高澤、梁
15 : 45	休憩		
16 : 00	固体水素中での共鳴 <b>EIT</b> の実現	電通大	白田
16 : 20	オルソ水素赤外遷移と量子光学過程	電通大	<b>Patnaik</b>
16 : 50	高精度レーザー周波数安定化	電通大	桜井、大島、黒田
17 : 10	フーリエリミットナノ秒パルスレーザー	電通大	秋野
17 : 30	今後の展開	電通大	白田
17 : 50 — 18 : 50	ポスター 分光用極低温クライオスタットの製作 伏谷、百瀬	京大	保科、香月、
	固体水素薄膜気相成長用クライオスタットの製作 他 午後の口頭講演発表分	電通大	佐用
19 : 00 — 21 : 00	懇親会		

## 5. 主な研究成果

(1) 論文発表 (国内 5 件、海外 59 件)

<電気通信大学：論文発表>

1. Fam Le Kien and K. Hakuta, "Parametric beating of a quantum probe field with a prepared Raman coherence", submitted to Physical Review A.
2. A. K. Patnaik, J. Q. Liang, and K. Hakuta, "Coherent manipulation of group velocity of light in an optical fiber", to be published in Proceedings of Photonics 2002.
3. Fam Le Kien, A. Koreeda, K. Kuroda, and K. Hakuta, "Temperature dependence of the Raman shift and width of solid parahydrogen: Effect of vibron-phonon scattering", submitted to Jpn. J. Appl. Phys.
4. K. Kuroda, A. Koreeda, S. Takayanagi, M. Suzuki, and K. Hakuta, "High Resolution Coherent Raman Spectroscopy of Vibron in Solid Parahydrogen", submitted to Physical Review B.
5. Fam Le Kien, J. Q. Liang, and K. Hakuta, "Slow Light Produced by Far-Off-Resonance Stimulated Raman Scattering", Invited Paper in IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, in press.
6. A. K. Patnaik, J. Q. Liang, and K. Hakuta, "Slow Light Propagation in a Thin Optical fiber via Electromagnetically Induced Transparency", Physical Review A, in press.
7. Fam Le Kien, K. Hakuta, and A. V. Sokolov, "Frequency modulation and Pulse Compression by Coherent Multimode Molecular Motion", Physical Review A, Vol. 66, 055802 (2002), Virtual Journal of Ultrafast Science, December issue.
8. Fam Le Kien, K. Hakuta, and A. V. Sokolov, "Pulse compression by parametric beating with a prepared Raman coherence", Physical Review A, Vol. 66, 023813 (2002); Virtual Journal of Ultrafast Science, September issue (2002).
9. S. Uetake, R.S.D. Sihombing, and K. Hakuta, "Stimulated Raman scattering of a high- $Q$  liquid hydrogen droplet in ultraviolet region", Optics Letters, Vol.27, 421 (2002).
10. Nguyen Hong Shon, Fam Le Kien, and K. Hakuta, and A.V. Sokolov, "Two-dimensional model for femtosecond pulse conversion and compression using high-order stimulated Raman scattering in solid hydrogen", Physical Review A, Vol. 65, 033809 (2002).
11. J.Q. Liang, M. Katsuragawa, Fam Le Kien, and K. Hakuta, "Slow light produced by stimulated Raman scattering in solid hydrogen", Physical Review A, Vol.65, 031801(R) (2002).
12. M. Katsuragawa, J.Q. Liang, Fam Le Kien, and K. Hakuta, "Efficient Frequency Conversion of Incoherent Fluorescence Light", Physical Review A, Vol.65, 025801 (2002).
13. Fam Le Kien, Nguyen Hong Shon, and K. Hakuta, "Generation of subfemtosecond pulses by beating a fs pulse with a Raman coherence adiabatically prepared in solid hydrogen", Physical Review A, Vol.64, 051803(R) (2001).
14. K. Kuroda, J.Z. Li, M. Suzuki, M. Katsuragawa, and K. Hakuta, "Coherent Brillouin spectroscopy in solid parahydrogen", Journal of Low Temperature Physics, Vol.125. 39-48 (2001).
15. 白田耕藏, "固体水素：光を制御する魅力的な場", 固体物理 (トピックス)、Vol.36、

- 343 (2001).
16. J.Z. Li, M. Suzuki, M. Katsuragawa, and K. Hakuta, "Measurement of the energy decay for the first vibrational-excited-state in solid parahydrogen", *Journal of Chemical Physics*, Vol.115, 930 (2001).
  17. S. Uetake and K. Hakuta, "Nonlinear optics with liquid hydrogen droplet", *SPIE Proceedings*, Vol.4270, pp.19-28 (2001).
  18. S. Uetake and K. Hakuta, "Liquid hydrogen droplet as an ultrahigh-Q optical cavity", *SOLS Proceedings*, in press.
  19. 白田耕藏, "量子コヒーレンスによる光学応答の制御", *応用物理(総合報告)*, Vol. 70, No. 2, 138-148 (2001).
  20. 桂川眞幸, 百瀬孝昌, 鈴木勝, 是枝聡肇, 白田耕藏, "固体水素を用いた新しい光学過程", *光学(解説)*, Vol. 30, No. 2, 111-116 (2001).
  21. M. Katsuragawa, J.Q. Liang, and K. Hakuta, "Parametric stimulated Raman scattering with solid hydrogen", *Journal of Low Temperature Physics*, Vol.122, 359-365 (2001).
  22. Fam Le Kien and K. Hakuta, "Normal modes and propagation dynamics in a strongly coupled Raman medium", *Physical Review A*, Vol.63, 023807(6) (2001).
  23. J.Q. Liang, M. Katsuragawa, Fam Le Kien, and K. Hakuta, "Sideband generation using strongly-driven Raman coherence in solid hydrogen", *Physical Review Letters*, Vol.85, 2474-2477 (2000).
  24. Fam Le Kien and K. Hakuta, "Stimulated Raman scattering with slow light", *Canadian Journal of Physics*, (Festschrift for 75<sup>th</sup> Birthday of B.P. Stoicheff), Vol.78, Issue 5-6, 543-559 (2000).
  25. Fam Le Kien, Nguyen Hong Quang, and K. Hakuta, "Spontaneous emission from an atom inside a dielectric sphere", *Optics Communications*, Vol.178, 151-164 (2000).
  26. J.Z. Li, M. Katsuragawa, and K. Hakuta, "Single-longitudinal-mode pulsed dye laser with coaxial end-pumping and self-seeding", *Optical Review*, Vol.7, 275 (2000).
  27. S. Uetake, M. Katsuragawa, M. Suzuki, and K. Hakuta, "Stimulated Raman scattering in liquid hydrogen droplet", *Physical Review A*, Vol.61, 011803R (2000).
  28. M. Katsuragawa and K. Hakuta, "Raman gain measurement in solid parahydrogen", *Optics Letters*, Vol.25, 177 (2000).
  29. K. Hakuta, M. Katsuragawa, J.Z. Li, J.Q. Liang, and M. Suzuki, "Stimulated Raman scattering in the strong coupling regime", in *Frontiers of Laser Physics and Quantum Optics* (Springer Verlag, 2000), pp.261 - 267.
  30. Fam Le Kien, J.Q. Liang, M. Katsuragawa, K. Ohtsuki, K. Hakuta, and A.V. Sokolov, "Subfemtosecond pulse generation with molecular coherence control in stimulated Raman scattering", *Physical Review A*, Vol.60, 1562-1571 (1999).
  31. Fam Le Kien and K. Hakuta, "Production of coherence of a nonallowed transition in the stationary regime of a Raman scattering scheme", *Physical Review A*, Vol.59, 2458-2467 (1999).
  32. M. Katsuragawa, M. Suzuki, R.S.D. Sihombing, J.Z. Li, and K. Hakuta, "Nonlinear Optics in Solid Hydrogen", *Laser and Particle Beams*, Vol.16, 641-648 (1998).
  33. J.Z. Li, M. Katsuragawa, M. Suzuki, and K. Hakuta, "Stimulated Raman scattering in solid hydrogen: Measurement of coherence decay", *Physical Review A*, Vol.58, R58-R60 (1998).
  34. M. Suzuki, M. Katsuragawa, R.S.D. Sihombing, J.Z. Li, and K. Hakuta, "Solid hydrogen for

- nonlinear optics", *Journal of Low Temperature Physics*, Vol.111, 463-468 (1998).
35. M. Katsuragawa, M. Suzuki, J.Q. Liang, J.Z. Li, R.S.D. Sihombing, and K. Hakuta, "Stimulated Raman scattering with strong-coupling in solid hydrogen", *Journal of Low Temperature Physics*, Vol.111, 497-502 (1998).
  36. K. Hakuta, M. Suzuki, and M. Katsuragawa, "Dark-state coherence and stimulated Raman scattering in solid hydrogen", *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, Vol.355, 2405-2408 (1997).

<京都大学：論文発表>

37. 香月浩之、百瀬孝昌、物性研究、固体水素の振動励起状態の高分解能分光研究- 固体の量子性と振動励起子の部分的非局在状態の直接観測、印刷中。
38. Mizuho Fushitani, Takamasa Momose, and Tadamas Shida "The  $^2P_{1/2}$ - $^2P_{3/2}$  Transition of the Iodine Atom Photoproduced from Alkyl Iodides in the Solid Parahydrogen: Detection of New Absorptions" *Chem. Phys. Lett.* **356** (3/4) 375-382 (2002).
39. Hiroyuki Katsuki, Toshihiro Nakamura, and Takamasa Momose, "Observation of Discrete Energy States of Weakly Confined Vibron in Solid Parahydrogen" *J. Chem. Phys.* 116(20), 8881-8892 (2002).
40. Mizuho Fushitani, Susumu Kuma, Yuuki Miyamoto, Hiroyuki Katsuki, Tomonari Wakabayashi, Takamasa Momose, and Andrey F. Vilesov, "Generation of infrared radiation by Stimulated Raman Scattering in Para-Hydrogen Crystal at 5 K" *Opt. Lett.*, in press.
41. Takamasa Momose, C. Michael Lindsay, Yu Zhang, and Takeshi Oka, "Sharp Spectral Lines Observed in  $\gamma$ -ray Ionized Parahydrogen Crystals", *Phys. Rev. Lett.* 86(21), 4795-4798 (2001).
42. Takamasa Momose, Yu Zhang, and Takeshi Oka, "High Resolution Spectroscopy of Ions in  $\gamma$ -ray Irradiated Solid Parahydrogen", *Physica B*, 284-288, 387-388 (2000).
43. Norihito Sogoshi, Toshiyasu Kato, Tomonari Wakabayashi, Takamasa Momose, Simon Tam, Michelle E. DeRose, and Mario E. Fajardo, "High Resolution Infrared Absorption Spectroscopy of  $C_{60}$  Molecules and Clusters in Parahydrogen Solids" *J. Phys. Chem. A* 104(16), 3733-3742 (2000)
44. Hiroyuki Katsuki and Takamasa Momose, "Observation of Rovibrational Dephasing of Molecules in Parahydrogen Crystals" *Phys. Rev. Lett.* 84(15), 3286-3289 (2000).
45. Hiromichi Hoshina, Tomonari Wakabayashi, Takamasa Momose, and Tadamas Shida, "Infrared Spectroscopic Study of Rovibrational States of Perdeuterated methane ( $CD_4$ ) trapped in Parahydrogen Crystal" *J. Chem. Phys.* 110(12), 5728-5733 (1999).
46. Simon Tam, Mario E. Fajardo, Hiroyuki Katsuki, Hiromichi Hoshina, Tomonari Wakabayashi, and Takamasa Momose, "High Resolution Infrared Absorption Spectra of Methane Molecules Isolated in Solid Parahydrogen Matrices" *J. Chem. Phys.* 111(9), 4191-4198 (1999).
47. Takamasa Momose, "Impurity Molecules in Parahydrogen Crystal; High Resolution Infrared Spectroscopy" *J. Low Temp. Phys.* 111(3/4), 469-474 (1998).
48. Yu Zhang, Teresa J. Byers, Man-Chor Chan, Takamasa Momose, Karen E. Kerr, David P. Weliky, and Takeshi Oka, "High-resolution Infrared Spectroscopy of the  $J=1$   $H_2$  pair in Parahydrogen Crystals." *Phys. Rev. B* 58(1), 218-232 (1998).

49. Takamasa Momose, and Tadamas Shida "Matrix Isolation Spectroscopy Using Solid Parahydrogen as the Matrix: Application to High-resolution Spectroscopy, Photochemistry and Cryochemistry" *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, 71(1), 1-15 (1998).
50. David P. Weliky, Karen E. Kerr, Teresa J. Byers, Yu Zhang, Takamasa Momose, and Takeshi Oka "High-resolution Infrared Spectroscopy of Isotopic Impurity Q<sub>1</sub>(0) Transitions in Solid Parahydrogen" *J. Chem. Phys.* 105(11), 4461-4481 (1997).
51. Takamasa Momose "Rovibrational States of a Tetrahedral Molecule in a Hexagonal Close Packed Crystal" *J. Chem. Phys.* 107(19), 7695-7706 (1997).
52. Takamasa Momose, Masaaki Miki, Tomonari Wakabayashi, Tadamas Shida, Man-Chor Chan, Steven S. Lee, and Takeshi Oka, "Infrared Spectroscopic Study of Rovibrational States of Methane Trapped in Solid Parahydrogen" *J. Chem. Phys.* 107(19), 7707-7716 (1997).
53. Takamasa Momose, Hiroyuki Katsuki, Hiromichi Hoshina, Norihito Sogoshi, Tomonari Wakabayashi, and Tadamas Shida, "High Resolution Laser Spectroscopy of Methane Clusters Trapped in Solid Parahydrogen" *J. Chem. Phys.* 107(19), 7717-7720 (1997).
54. Robert M. Dickson, Takamasa Momose, Teresa J. Byers, and Takeshi Oka, "High Resolution Spectroscopy of the Impurity Induced Q<sub>3</sub>(0) Transition of Solid Parahydrogen" *Phys. Rev. B.* 57(2), 941-949 (1998).

<東北大学：論文発表>

55. K. Edamatsu, T. Ito, K. Matsuda and S. Saikan, "Homogeneous linewidths and confined-phonon sidebands of the resonant excited luminescence of CuCl quantum dots" *Phys. Rev. B* 64 (2001) 195317
56. K. Edamatsu, T. Ito, K. Matsuda, and S. Saikan, "Resonant luminescence linewidths and confined-phonon sidebands of CuCl quantum dots" *phys. stat. sol. (b)* 224 (2001) 629-632
57. M. Takeda, K. Matsuda, C. Suzuki, and S. Saikan, "Two-photon excited fluorescence line narrowing spectroscopy in dyes without inversion symmetry" *J. Lumines.* 86 (2000) 285-288
58. M. Mikami, T. Ueta, D. Kobayashi, A. Koreeda, and S. Saikan, "Electron-phonon interaction of a dye dissolved in interstitial water" *J. Lumines.* 86 (2000) 257-260
59. K. Uchikawa, M. Sakamoto, A. Koreeda, and S. Saikan, "Accumulated photon echo spectroscopy for stained tissue samples" *J. Opt. Soc. Am. B* 17 (2000) 1058-1067
60. M. Yoshizawa, A. Kubo, and S. Saikan "Femtosecond relaxation kinetics of fluorescent and nonfluorescent states in blue and red-phase polydiacetylene" *Phys. Rev. B* 60 (1999) 15632-15635
61. M. Mikami, T. Nishimura, M. Isonaga, D. Kobayashi, and S. Saikan, "Novel method for the derivation of 1-phonon function from fluorescence line narrowing spectrum" *J. Phys. Soc. Jpn.* 68 (1999) 3430-3435
62. A. Koreeda, M. Yoshizawa, S. Saikan, and M. Grimsditch, "Quasielastic light scattering from rutile" *Phys. Rev. B* 60 (1999) 12730-12736
63. M. Yoshizawa, K. Suzuki, A. Kubo, and S. Saikan, "Femtosecond study of S<sub>2</sub> fluorescence in malachite green in solutions" *Chem. Phys. Lett.* 290 (1998) 43-48
64. 齋官清四郎、非線形過渡分光（蓄積フォトンエコー）丸善 実験物理学講座 9 レー

ザー測定 151-166p (1999).

(2) 特許出願 (国内 5 件、海外 0 件)

①国内

- (1) 白田耕藏、「共振器及びレーザーの安定化装置」 出願番号 特願 2001-365025  
2001 年 11 月 29 日
- (2) 白田耕藏、グエン ホン ション、ファム レ キエン、「レーザー変調装置及び変調方法」出願番号 特願 2001-259787 2001 年 8 月 29 日
- (3) 白田耕藏「波長変換装置及び波長変換方法」出願番号 特願 2001-3033372001  
年 9 月 28 日
- (4) 桂川眞幸、白田耕藏、鈴木勝、「固体パラ水素を用いた高性能遠赤外検出器」 出願番号 特願 2000-367709 2000 年 10 月
- (5) 桂川眞幸、白田耕藏、梁佳旗、「共振器長可変レーザー共振器とパルスレーザー光源装置」出願番号 特願 2000-365878 2000 年 10 月

②海外

なし

(4) 新聞報道等

①受賞

2001 年度 松尾学術賞 白田 耕藏

「固体水素を用いた量子コヒーレンス非線形光学の研究」