

飽和吸収分光法による Kr 原子の超微細構造と 同位体シフトの解析

加藤 勝美^{*1} 西宮 信夫^{*2} 鈴木 正夫^{*3}

Analysis of hyperfine structures and isotope shifts of Kr by saturated absorption spectroscopy.

Katsumi Katoh^{*1}, Nobuo Nishimiya^{*2} and Masao Suzuki^{*3}

The saturated absorption spectrum of Kr I has been measured using a laser diode in the wavelength region from 0.76 to 0.90 μ m. The hyperfine structures of ^{83}Kr and isotope shifts of even mass Kr were resolved for the 7 lines belonging to the $^2P_{3/2}$ configuration and the 6 lines to the $^2P_{1/2}$. The line frequencies of ^{84}Kr and the shifts were measured at accuracies better than $\pm 0.001 \text{ cm}^{-1}$ by a wavelength meter (Anritsu: MF9630A) and at $\pm 1.5 \text{ MHz}$ by a confocal interferometer, respectively. The nuclear hyperfine coupling constants of A and B of ^{83}Kr for the $5S [3/2]1$ and $5S' [1/2]1$ states have been determined in a better accuracy. Using the specific mass shifts and the field shifts obtained by a method of King's plot, the changes in the mean-squares of the nuclear charge radii have been calculated.

1 序論

近赤外線領域に多数観測される希ガス原子の放電スペクトルは、標準スペクトルとして古くから利用されてきたがドップラ幅の制約を受ける。レーザ分光法では、ファブリペロ干渉計を用いて発生させたフリンジ信号を周波数マーカとして用いる関係で相対的精度は高いのだが、絶対精度は古典的分光法の精度に劣る。本グループでは、飽和吸収分光法により $\text{Ar}^{1)}$ 、 $\text{Kr}^{2,3)}$ 、 Xe 原子⁴⁾ の放電スペクトルを測定し、絶対波数、超微細構造定数、同位体シフトなどに関わる研究を進めてきた。

特に、Kr 原子の場合、天然には 6 種の同位体 (^{78}Kr : 17.3, ^{84}Kr : 57.0, ^{83}Kr : 11.5, ^{82}Kr : 11.6, ^{80}Kr : 2.35, ^{76}Kr : 0.36) が存在するのだが、 ^{86}Kr の $6D [1/2]1 \leftarrow 5P [3/2]1$ 遷移の波長が、1960 年に長さ標準⁵⁾ と定められた経緯もあって、同位体濃縮された試料によって正確な測定が行われた。Kaufmann と Hamphery による干渉分光測定^{6,7)} の精度は高くレーザ分光と比較しても十分の精度を持つ。また、Jackson は各同位体を分離濃縮した試料のアークスペクトルを干

渉分光法で測定し、 ^{83}Kr の超微細構造や even Kr の同位体シフトを解析した^{8,9)}。天然存在比の高い ^{84}Kr の測定は遅れ、Kaufman がフーリエ変換分光計による測定結果を報告したのは 1993 年であった¹⁰⁾。

天然存在比の試料でも超微細構造や偶数同位体を分解できるサブドップラレーザ分光法は極めて有効である。Brandenberger 等は、 ^{83}Kr を濃縮した試料の放電スペクトルを飽和吸収分光法により測定し、核磁気相互作用定数と核四極子相互作用定数の値を報告^{7,8)} しているが、偶数同位体は分離できなかった。Schuessler 等は 1990 年に原子ビームを作りドップラ幅の影響を除き、 $5P [3/2]2 \leftarrow 5S [3/2]2$ 遷移の同位体シフトを測定し原子核半径の 2 乗平均の差を求めている¹³⁾。Cannon 等はレーザ光を、原子ビームに直交させて照射し、検出器に質量分析器を用いて同位体を分離し超微細構造や同位体シフトを測定した^{14,15)}。Keim 等は、Schuessler 等と同様な方法で、 $^{72-96}\text{Kr}$ の同位体シフトを測定し各同位体ごとに原子核半径の 2 乗平均の差を求めた¹⁶⁾。

これら一連の研究により、近赤外線領域の Kr 原子のスペクトル構造は明らかとなってきたが、簡便

^{*1} 東京工芸大学大学院研究生 ^{*2} 東京工芸大学大学院電子工学専攻助教授

^{*3} 東京工芸大学大学院電子工学専攻教授

2005 年 9 月 12 日 受理

な飽和吸収分光法により質量数が偶数の同位体を分離して測定できず、また一方原子ビームを用いる方法では準安定状態である $5S[3/2]2$ と $5S'[1/2]0$ を基点とする遷移に限定される弱点があった。本研究では波源変調法を採用することにより分解能を向上させ、Fig. 1 に示す $5S[3/2]1$ と $5S'[1/2]1$ を含む 16 遷移のうち実線で示す 13 遷移について、偶数同位体が分離された飽和吸収スペクトルを検出し、超微細構造や同位体シフトを解析することができた。

2 実験法

2-1 測定遷移

Kr の基底状態は $(4s)^2(4p)^6$ で、このうち一つの電子が励起された Kr I の準位のうち、第 1 励起状態と第 2 励起状態に関わる遷移が Fig. 1 に示されている。

太い実線は、準安定状態からの遷移であって、細い実線は寿命の短い $J=1$ の準位からの遷移である。点線で示す 760nm, 758nm と 975nm の遷移はレーザーの発振波長の制約で測定できなかった。このうち、760nm の $5P[3/2]2 \leftarrow 5S[3/2]2$ については、Schuessler¹³⁾, Cannon^{14, 15)}, Keim 等¹⁶⁾による原子ビームの測定結果を引用することとした。図中括弧内の数字は、遷移確率を示し単位は 10^6 s^{-1} である¹⁷⁾。

2-2 測定システム

飽和吸収レーザー分光装置の概要¹⁻⁴⁾を Fig. 2 に示す。半導体レーザービームをポンプ光とプローブ光に分割し、互いに逆方向からレーザーガルバトロン（浜松ホトニクス）のホローカソード電極内に入射する。半導体レーザーは、 $0.85 \mu\text{m}$ 領域については New Focus (Model: 6200)、 $0.76 \sim 0.83$, $0.87 \sim 0.89 \mu\text{m}$ で

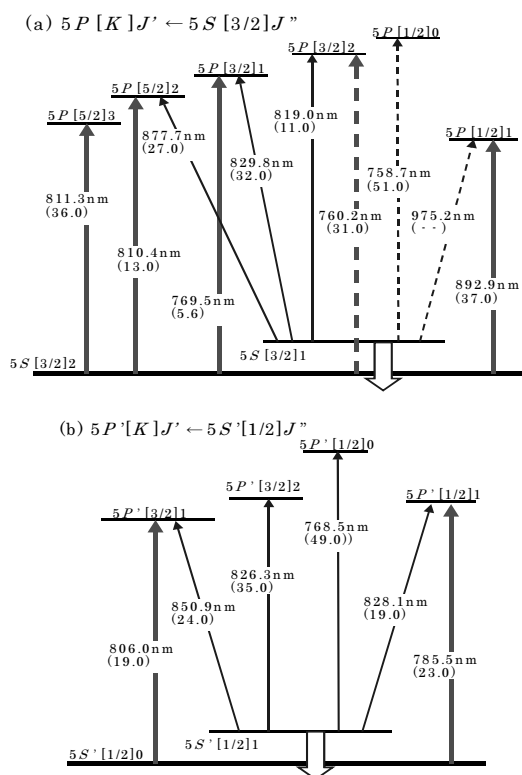


Fig. 1 Transitions in the $5P$ and $5S$ levels.

は EOSI (Model: 2010M) を使用した。

励起光のパワーは $2 \sim 3 \text{ mW}$ 、プローブ光は $100 \sim 200 \mu\text{W}$ である。プローブ光の一部を光波長計 (Anritsu MF9630A: $\pm 0.001 \text{ cm}^{-1}$) と共焦点型干渉計 (長さ: 25 cm , $299.1 \pm 1.5 \text{ MHz}$) に導き、絶対波数とスペクトルの周波数シフトを測定した。周波数測定系は、Rb の D_2 線¹⁸⁾ を参照し周波数較正した。

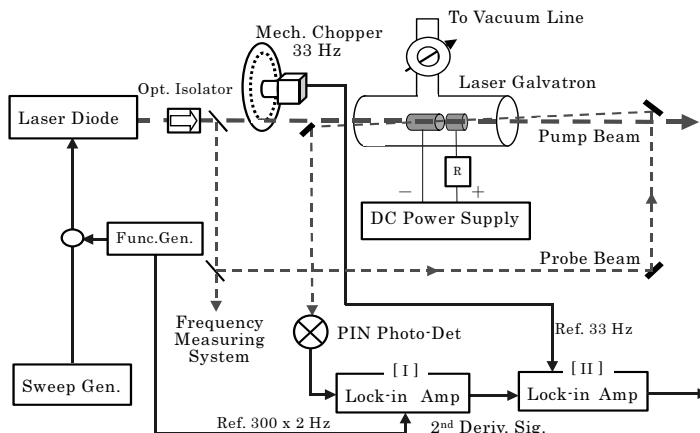


Fig. 2 Experimental setup.

ガス圧力 0.1~1.2 Torr、放電電流 5~8 mA の放電条件で安定なグロー放電が得られた。低いガス圧力ではホローカソード電極 (Fe: $3\phi \times 18\text{mm}$) の中にプラズマを閉じ込めることができない場合が生じたが、Ar ガスを加え全圧が 1.0~1.2 Torr となるよう調節した。Ar ガス混入によりピーク強度が増大しライン幅も減じ S/N の良い信号が得られた。また、測定誤差を超える圧力シフトは生じなかった。

レーザの外部共振器に備え付けられている PZT に、振幅の小さい 300Hz のサイン波を重ねた三角波を加え、レーザ周波数を FM 変調するとともに掃引した。プローブ光で検出した透過信号を、変調周波数の 2 倍波である 600Hz を参照信号として位相検波した。この方法ではドップラ幅の吸収信号 (透過率曲線) の 2 次微分成分が重なるので、ポンプ光を 33Hz の光チョップにより変調し第 2 の位相検波増幅器により低減させる 2 重変調方式を採用した。飽和吸収スペクトルの半値半幅は約 50MHz であった

ので、FM 変調幅がこれ以下となるよう留意した。

また、波長計の値、吸収信号、フリンジマーカなどは GPIB バスを介し PC 処理できるようにした。

2-3 観測した飽和吸収スペクトル

測定したスペクトルのうち、 $5P[3/2]1 \leftarrow 5S[3/2]2$ と $5P[1/2]1 \leftarrow 5S[3/2]2$ を Fig. 3 に示す。強度の強い ^{84}Kr の信号を中心に $^{80}, ^{82}, ^{86}\text{Kr}$ などの偶数同位体によるスペクトルと ^{83}Kr の超微細構造を明瞭に分解・検出できた。中央の凸部はドップラ幅の背景信号の残渣である。V を付したものは下準位を共有する通常のクロスレゾナンスで、N と付したものは緩和過程が介在するタイプである。一般に N と V の極性は互いに逆となるが、 $\{(9/2-11/2)-(11/2-13/2)\}$ では異常性が見られる。これは介在する $5P[3/2]2 \rightarrow 5S[3/2]1$ と $5P[1/2]1 \rightarrow 5S[3/2]1$ の緩和過程の差による効果と考えている。多数の超微細構造を伴う $J'=2 \leftarrow J''=2$ や $3 \leftarrow 2$ の遷移をはじめ、測定した他のスペクトルを Appendix : Fig. A1~A4 に示す。

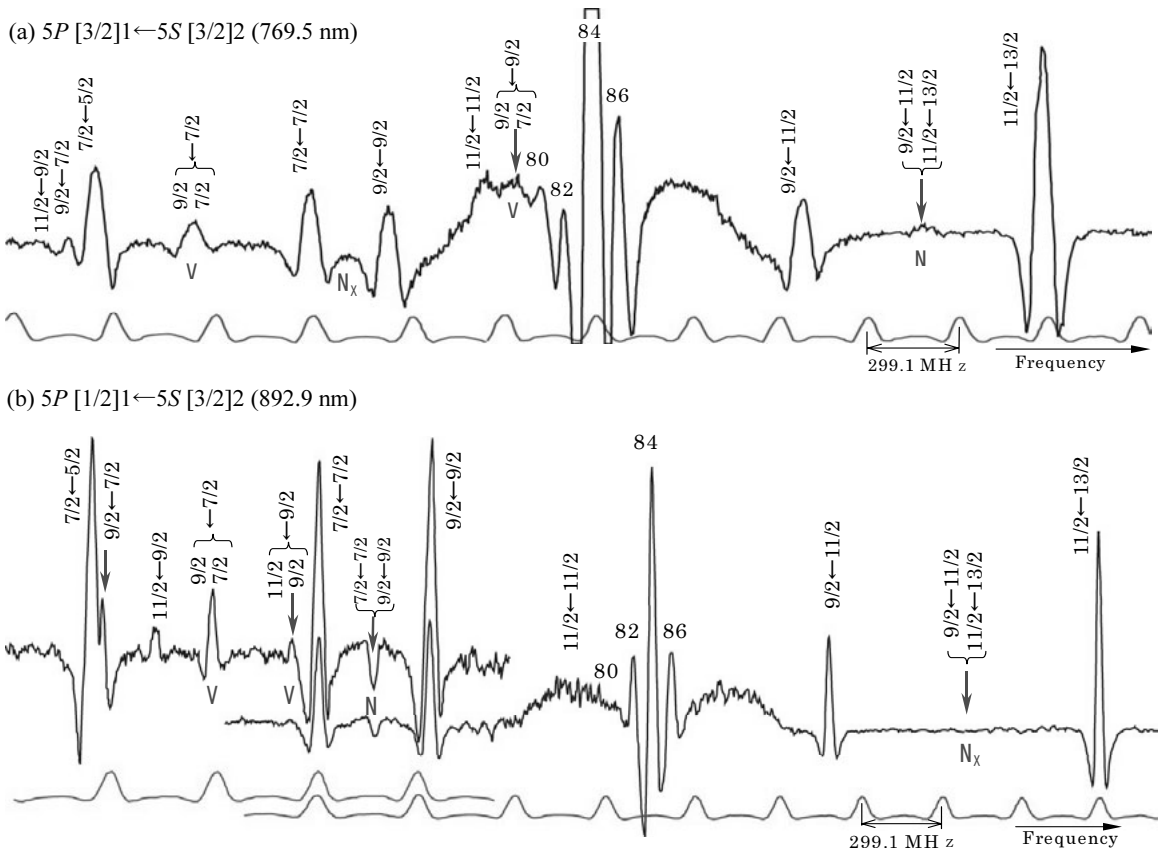


Fig. 3 Observed saturated absorption signals of the $J' = 1 \leftarrow J'' = 2$ transitions .

3 測定結果と同位体シフトの解析

3-1 遷移波数

中心部に現れる S/N の良い $^{86,84,82}\text{Kr}$ については、波長計を用いて絶対波数を決定した。強度の弱い $^{78,80}\text{Kr}$ と ^{83}Kr の微細構造については、共焦点ファブリペロー干渉計によるフリンジ信号を参照し、 ^{84}Kr を基準に周波数シフトを測定した。結果を Table 1 に示す。括弧内の数字は 5 ～ 7 回の測定結果の標準

偏差を示している。 Kaufmann 等による測定結果^{6,10)} も併記したが、標準偏差の範囲で一致しており、同位体分離していない試料でも十分標準スペクトルとして機能することを示している。表の 5 列目にある ^{83}Kr については、次節に述べる方法で核スピンの相互作用による摂動を除いた値である。

^{84}Kr を基準とする周波数シフトを Appendix の Table A1 と A2 に取りまとめた。この表には禁止遷移である $5S[3/2]1 \leftarrow 5S[3/2]2$ と $5S'[1/2]1 \leftarrow 5S'[1/2]0$

Table 1 Line centers of the $5P \leftarrow 5S$ transitions. (in cm^{-1})

Transition	$^{86}{}^a$	$^{84}{}^a$	$^{83}(\text{unpertbd}){}^b$	$^{82}{}^a$	$^{80}{}^b$	$^{78}{}^b$
$P_{3/2}$ -Configuration						
$J'' = 2$						
$5P[3/2]2 - 5S[3/2]2$ ref. 6, 10	.6016 (1)	13151.5986 (3)	---	---	---	---
$5P[3/2]1 - 5S[3/2]2$ This Work ref. 6, 10	.6557 (4) .6550 (1)	12992.6530 (3) .6523 (3)	(.6524) [1]	.6501 (5)	.6480 [2]	---
$5P[5/2]2 - 5S[3/2]2$ This Work ref. 6, 10	.6395 (2) .6393 (1)	12335.6372 (2) .6369 (3)	(.6366) [1]	.6345 (2)	.6324 [2]	.6298 [2]
$5P[5/2]3 - 5S[3/2]2$ This Work ref. 6, 10	.6620 (3) .6617 (1)	12322.6596 (4) .6585 (3)	(.6590) [1]	.6573 (4)	.6549 [2]	.6523 [2]
$5P[1/2]1 - 5S[3/2]2$ This Work ref. 6, 10	.7760 (7) .7752 (1)	11196.7737 (2) .7730 (6)	(.7732) [1]	.7712 (2)	.7694 [1]	---
$J'' = 1$						
$5P[3/2]2 - 5S[3/2]1$ This Work ref. 6, 10	.5769 (4) .5762 (1)	12206.5735 (4) .5720 (3)	(.5724) [1]	.5701 (5)	---	---
$5P[3/2]1 - 5S[3/2]1$ This Work ref. 6, 10	.6304 (4) .6296 (1)	12047.6269 (4) .6257 (3)	(.6258) [1]	.6235 (4)	.6197 [1]	---
$5P[5/2]2 - 5S[3/2]1$ This Work ref. 6, 10	.6140 (4) .6139 (1)	11390.6109 (4) .6105 (3)	(.6098) [1]	.6077 (5)	---	---
$^2P_{1/2}$ -Configuration						
$J'' = 0$						
$5P'[1/2]1 - 5S'[1/2]0$ This Work ref. 6, 10	.5331 (4) .5324 (1)	12727.5304 (3) .5294 (5)	(.5296) [1]	.5277 (4)	.5255 [1]	---
$5P'[3/2]1 - 5S'[1/2]0$ This Work ref. 6, 10	.3010 (2) .3010 (1)	12404.2995 (2) .2991 (6)	(.2990) [1]	.2967 (3)	.2948 [1]	---
$J'' = 1$						
$5P'[1/2]0 - 5S'[1/2]1$ This Work ref. 6, 10	.3691 (5) .3687 (1)	13008.3651 (3) .3650 (10)	(.3642) [1]	.3612 (5)	.3579 [1]	---
$5P'[3/2]2 - 5S'[1/2]1$ This Work ref. 6, 10	.4659 (2) .4651 (1)	12098.4624 (3) .4611 (6)	(.4614) [1]	.4590 (3)	.4554 [1]	---
$5P'[1/2]1 - 5S'[1/2]1$ This Work ref. 6, 10	.4458 (8) .4454 (1)	12072.4419 (4) .4418 (5)	(.4405) [1]	.4380 (5)	.4349 [1]	---
$5P'[3/2]1 - 5S'[1/2]1$ This Work ref. 6, 10	.2158 (4) .2140 (1)	11749.2123 (3) .2099 (6)	(.2113) [1]	.2087 (4)	.2053 [1]	---

a) The values determined by using a wavelength meter (Anritsu MF9630A) and those given in the references.

The numbers in the brackets are those of the standard deviations calculated from the 5 to 7 recordings.

b) The values calculated from the frequency shifts measured by using the fringe markers as a frequency reference.
The numbers in the square brackets are those of the relative uncertainties.

の遷移を示してあるが、これは上準位を共有する $5P[5/2]2 \leftarrow 5S[3/2]2$ と $5P[5/2]2 \leftarrow 5S[3/2]1$ など複数の遷移の差周波数から算出した仮想遷移の周波数シフトである。これらの値は $5S[3/2]1$ と $5S'[1/2]1$ の超微細構造定数を最小 2 乗法で決定するにあたり、 $5P$ と $5S$ 準位の定数の間や、 $5P'$ と $5S'$ 準位の定数の間に生じる相関を除くため導入した。

3-2 ^{83}Kr の超微細構造定数と同位体シフト

^{84}Kr を基準とする超微細構造の概要を Fig. 4 に示す。まず観測値に含まれる核磁気相互作用定数 A と核四極子相互作用定数 B に基づく効果を除く。すなわち、[1] 超微細構造の分裂幅 $\Delta\nu_{HF}^{obs}$ より A と B を算出し、[2] 中心からのシフト $\Delta\nu_{HF}^{calc}(F' \leftarrow F'')$ を求め、[3] 実測したシフト $\Delta\nu_{IS}^{obs}(F' \leftarrow F'')$ との差を無摂動の ^{83}Kr 同位体シフト $\Delta\nu_{IS}^{obs}(84, 83)$ とした。

Appendix : Table A1~A2 示す核スピンの相互作用による周波数シフトは次式で与えられる¹⁹⁾。

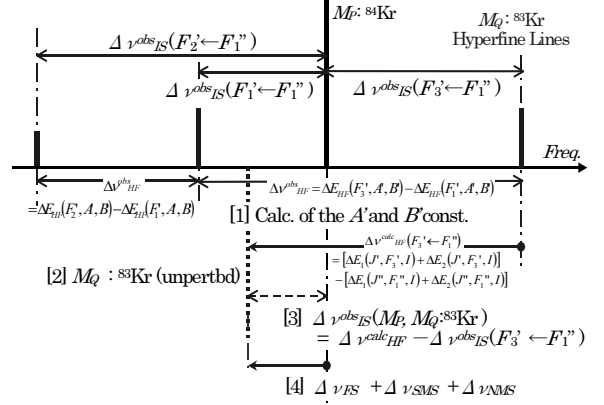


Fig. 4 Schematic diagram of isotope shift.

$$\Delta E_1 = \frac{A}{2} \cdot C \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\Delta E_2 = \frac{B}{2} \cdot \frac{3C(C+1) - 4J(J+1)I(I+1)}{4J(2J-1)I(2I-1)} \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 $C = F(F+1) - J(J+1) - I(I+1)$ である。

Table 2 Nuclear Hyperfine Coupling Constants.

Transition	Level	This Work	Previous Work				
			Cannon <i>a</i> : 1993, <i>b</i> : 1990	Brandenberg <i>c</i> : 1991, <i>d</i> : 1989	Keim <i>e</i> Trickl <i>f</i>	Jackson <i>g</i>	Theory Husson <i>h</i>
² P _{3/2} -Configuration							
5 <i>P</i> [<i>K</i>] <i>J</i> ← 5 <i>S</i> [3/2]2							
5 <i>S</i> [3/2]2: <i>F</i> ^{''} > Fixed to those in ref. 20.	5 <i>S</i> [3/2]2	<i>A</i> -243.969000 (9) <i>B</i> -452.1572 (21)	-243.87 (0.05) <i>a</i> -453.97 (0.70) <i>a</i>		-243.8 (0.3) <i>e</i> -454.0 (4.0) <i>e</i>		-239.5 -449.7
5 <i>P</i> [3/2]2 · 5 <i>S</i> [3/2]2	5 <i>P</i> [3/2]2	<i>A</i> <i>i</i> <i>B</i> <i>i</i>	-108.49 (0.12) <i>a</i> -85.7 (1.6) <i>a</i>	-108.7 (0.3) <i>c</i> -83.0 (3.0) <i>c</i>	-108.3 (0.3) <i>e</i> -86.0 (5.0) <i>e</i>		-108.5 -80.9
5 <i>P</i> [3/2]1 · 5 <i>S</i> [3/2]2	5 <i>P</i> [3/2]1	<i>A</i> -176.96 (0.20) <i>B</i> -65.9 (1.6)	-176.97 (0.23) <i>a</i> -66.5 (1.0) <i>a</i>	-176.8 (0.5) <i>c</i> -77.0 (2.0) <i>c</i>			-179.6 -68.1
5 <i>P</i> [5/2]2 · 5 <i>S</i> [3/2]2	5 <i>P</i> [5/2]2	<i>A</i> -156.44 (0.05) <i>B</i> -411.0 (1.1)	-156.49 (0.08) <i>b</i> -407.7 (1.3) <i>b</i>	-156.0 (1.0) <i>d</i> -410 (20) <i>d</i>			-158.0 -407.7
5 <i>P</i> [5/2]3 · 5 <i>S</i> [3/2]2	5 <i>P</i> [5/2]3	<i>A</i> -103.78 (0.06) <i>B</i> -438.0 (2.3)	-103.73 (0.07) <i>a</i> -438.8 (1.2) <i>a</i>	-103.0 (1.0) <i>d</i> -430 (30) <i>d</i>			-103.1 -431.7
5 <i>P</i> [1/2]1 · 5 <i>S</i> [3/2]2	5 <i>P</i> [1/2]1	<i>A</i> -143.85 (0.12) <i>B</i> -19.0 (0.9)		-143.9 (0.3) <i>c</i> -21.0 (1.0) <i>c</i>			-137.6 -20.4
5 <i>S</i> [3/2]1: <i>F</i> ^{''} > ← 5 <i>S</i> [3/2]2: <i>F</i> ^{''} > Pseudo Transition							
5 <i>P</i> [5/2]2 · 5 <i>S</i> [3/2]1 } 5 <i>P</i> [5/2]2 · 5 <i>S</i> [3/2]2 } 5 <i>P</i> [3/2]1 · 5 <i>S</i> [3/2]1 } 5 <i>P</i> [3/2]1 · 5 <i>S</i> [3/2]2 }	5 <i>S</i> [3/2]1	<i>A</i> -161.91 (0.17) <i>B</i> -115.3 (1.2)			-160.6 (1.9) <i>f</i> -110.6 (8.4) <i>f</i>	-160.4 (0.6) -105.8 (3.0)	-162.5 -107.9
² P _{1/2} -Configuration							
5 <i>P</i> '[1/2]1: <i>F</i> ^{''} > ← 5 <i>P</i> ' [1/2]1: <i>F</i> ^{''} > Combination Difference							
5 <i>P</i> '[1/2]1 · 5 <i>S</i> '[1/2]0 } 5 <i>P</i> '[1/2]1 · 5 <i>S</i> '[1/2]1 }	5 <i>P</i> '[1/2]1	<i>A</i> 226.54 (0.05) <i>B</i> 27.5 (0.3)	226.47 (0.16) <i>b</i> 26.5 (1.2) <i>b</i>	226.8 (0.4) <i>d</i> 22.0 (2.0) <i>d</i>		226.6 (0.6) 21.0 (3.0)	228.4 20.7
5 <i>P</i> '[3/2]1: <i>F</i> ^{''} > ← 5 <i>P</i> ' [3/2]1: <i>F</i> ^{''} > Combination Difference							
5 <i>P</i> '[3/2]1 · 5 <i>S</i> '[1/2]0 } 5 <i>P</i> '[3/2]1 · 5 <i>S</i> '[1/2]1 }	5 <i>P</i> '[3/2]1	<i>A</i> -576.55 (0.07) <i>B</i> 18.4 (0.4)	-576.68 (0.16) <i>b</i> 18.6 (1.2) <i>b</i>			-576.8 (0.5) 22.8 (3.0)	-571.1 24.3
5 <i>S</i> '[1/2]1: <i>F</i> ^{''} > ← 5 <i>S</i> ' [1/2]0 Pseudo Transition							
5 <i>P</i> '[1/2]1 · 5 <i>S</i> '[1/2]1 } 5 <i>P</i> '[1/2]1 · 5 <i>S</i> '[1/2]0 } 5 <i>P</i> '[3/2]1 · 5 <i>S</i> '[1/2]1 } 5 <i>P</i> '[3/2]1 · 5 <i>S</i> '[1/2]0 }	5 <i>S</i> '[1/2]1	<i>A</i> -739.89 (0.12) <i>B</i> -105.2 (1.2)			-739.8 (1.6) <i>f</i> -116.0 (9.6) <i>f</i>	-739.6 (0.5) -111.5 (3.0)	-742.9 -113.9
5 <i>P</i> '[3/2]2 · 5 <i>S</i> '[1/2]1	5 <i>P</i> '[3/2]2	<i>A</i> -289.63 (0.12) <i>B</i> 53.1 (2.6)		-291.0 (1.0) <i>d</i> 30 (20) <i>d</i>			-288.7 57.0

(*a*) ref. 15, (*b*) ref. 14, (*c*) ref. 12, (*d*) ref. 11, (*e*) ref. 16, (*f*) ref. 22, (*g*) ref. 8, (*h*) ref. 21.

(*i*) The S/N of the $5P[3/2] \leftarrow 5S[3/2]2$ was poor to determine the hyperfine constants. The values by Cannon et al.¹⁵⁾ were used for the $5P[3/2]2$.

Appendix に示す $F = F' \leftarrow F''$ のシフトを用いて決定した相互作用定数 A と B を Table 2 に示す。

$^2P_{3/2}$ に関わる $J' = (1, 2, 3) \leftarrow J'' = 2$ 遷移では、 $5S[3/2]2$ 準位の A と B について Faust 等が原子ビーム NMR 法により精度の良い値を報告²⁰⁾しているの、これを用いて最小 2 乗法により決定した。

$5S[3/2]1$ と $5S'[1/2]1$ 準位の A と B は、算出した仮想遷移 $|5S[3/2]1:F' \rangle \leftarrow |5S[3/2]2:F'' \rangle$ や $|5S'[1/2]1:F' \rangle \leftarrow |5S'[1/2]0:F'' \rangle$ のシフトより決定した。

これまでの測定結果と比較すると、 $J'' = 2$ に関わる遷移では Cannon 等による結果^{14, 15)} と一致している。また、Husson 等による理論計算の結果²¹⁾ を表

の最右列に記載する。何れも B の値に標準誤差を超える不一致が見られる。これは (2) 式の係数が (1) 式の A を与える係数 $C/2$ に比べ 1 桁小さいために生じた結果で分裂幅の測定誤差に起因している。

$5S[3/2]1$ と $5S'[1/2]1$ に関わる測定は、Jackson による干渉分光による測定⁸⁾ と Trickel 等が真空紫外域にある基底状態($4p$)⁶ からの直接遷移をパルスレーザにより測定した結果²²⁾ のみで、本研究の結果と比較し精度は低い。改善した $5S'[1/2]1$ の値を用いて決定した $5P'[3/2]2$ の A と B を最下行に示す。 $B = 53.1(2.6)$ MHz は、Brandenberger 等¹¹⁾ の結果に比べ誤差が小さく、Husson 等の理論値に近い値である。

Table 3 Isotope Shifts. (in MHz)^{a)}

Transition	86-84	84-83	84-82	83-82	82-80	80-78 ^{b)}	86-83	Ref
$^2P_{3/2}$-Configuration								
$J'' = 2$								
$5P[3/2]2 \cdot 5S[3/2]2$	73.4 (1.1)	20.7 (1.4)	69.3 (1.1)	48.6 (1.4)	78.6 (0.8)	85.5 (0.7)	94.1 (1.4)	14
	73.7 (4.0)	16.5 (6.0)	67.9 (4.0)	51.4 (2.0)	80.0 (4.0)	82.7 (4.0)	90.2 (6.0)	13
	72.4 (0.5)	17.1 (1.8)	66.6 (2.0)	49.5 (2.0)	77.0 (4.0)	89.0 (4.0)	89.5 (1.8)	16
	69.0 (1.2)	---	69.3 (2.1)	---	79.4 (3.9)	87.5 (2.4)	---	9
$5P[3/2]1 \cdot 5S[3/2]2$	73.6 (3.1)	16.5 (0.8)	71.2 (2.2)	54.7 (2.2)	79.3 (5.0)	---	90.1 (3.1)	This Work
	74.2 (1.2)	16.2 (1.5)	66.9 (1.6)	50.7 (1.5)	81.4 (1.7)	82.6 (1.2)	90.4 (1.5)	14
	68.1 (1.5)	---	71.9 (4.2)	---	77.9 (1.8)	87.5 (3.0)	---	9
	---	---	---	---	---	---	---	---
$5P[5/2]2 \cdot 5S[3/2]2$	69.3 (1.2)	17.9 (0.8)	66.4 (2.2)	48.5 (2.2)	77.8 (2.0)	79.0 (2.0)	87.2 (1.2)	This Work
	70.0 (1.3)	17.2 (1.3)	66.3 (1.0)	49.1 (1.3)	77.4 (1.0)	79.1 (1.0)	87.2 (1.3)	14
	71.1 (2.4)	---	61.5 (3.0)	---	77.3 (3.0)	83.9 (3.0)	---	9
	---	---	---	---	---	---	---	---
$5P[5/2]3 \cdot 5S[3/2]2$	67.3 (1.7)	17.2 (0.8)	64.3 (1.7)	47.1 (1.7)	75.3 (5.0)	78.4 (5.0)	84.5 (1.7)	This Work
	65.9 (1.3)	14.8 (1.4)	63.9 (0.9)	49.1 (1.4)	74.0 (0.9)	78.8 (0.9)	80.7 (1.4)	14
	65.7 (3.0)	---	63.6 (3.0)	---	76.1 (1.5)	72.9 (3.0)	---	9
	---	---	---	---	---	---	---	---
$5P[1/2]1 \cdot 5S[3/2]2$	61.8 (1.7)	14.7 (0.8)	58.7 (1.5)	44.0 (1.5)	69.6 (2.0)	---	76.5 (1.7)	This Work
$J'' = 1$								
$5P[3/2]2 \cdot 5S[3/2]1^{c)}$	103.8 (4.0)	33.2 (3.1)	101.7 (2.7)	68.5 (3.1)	110.0 estmd	---	137.0 (2.4)	This Work
	100.4 (1.2)	---	100.1 (3.0)	---	112.7 (2.7)	115 (2.4)	---	9
$5P[3/2]1 \cdot 5S[3/2]1$	103.9 (4.5)	32.5 (2.7)	101.1 (3.5)	68.6 (2.7)	114.3 (3.5)	---	136.4 (4.5)	This Work
	103.1 (1.5)	---	98.3 (1.8)	---	113.3 (2.7)	118 (2.7)	---	9
$5P[5/2]2 \cdot 5S[3/2]1$	99.9 (2.2)	34.4 (0.9)	98.1 (3.5)	63.7 (3.7)	111.4 estmd	---	134.3 (2.2)	This Work
	98.9 (2.1)	---	94.7 (2.1)	---	109.7 (2.7)	116 (2.7)	---	9
$^2P_{1/2}$-Configuration								
$J'' = 0$								
$5P'[1/2]1 \cdot 5S'[1/2]0$	70.8 (3.0)	24.6 (0.8)	70.5 (3.0)	45.9 (3.0)	77.0 (3.0)	---	95.4 (3.0)	This Work
	69.3 (1.6)	24.0 (0.8)	67.0 (0.8)	43.0 (1.6)	78.2 (0.6)	81.7 (0.6)	93.3 (1.6)	14
	69.3 (1.5)	22.8 (2.1)	68.7 (2.1)	45.9 (2.1)	79.8 (1.5)	83.1 (1.8)	92.1 (2.1)	9
$5P'[3/2]1 \cdot 5S'[1/2]0$	69.9 (3.0)	14.7 (0.8)	65.7 (2.4)	51.0 (2.4)	76.0 (2.0)	---	84.6 (3.0)	This Work
	68.6 (2.3)	16.3 (2.3)	64.2 (1.7)	47.9 (1.9)	76.9 (0.8)	78.4 (0.9)	84.9 (1.9)	14
	66.0 (1.2)	19.2 (2.1)	66.3 (2.1)	47.1 (2.1)	74.4 (1.5)	82.2 (1.8)	85.2 (2.1)	9
$J'' = 1$								
$5P'[1/2]0 \cdot 5S'[1/2]1$	105.5 (4.1)	28.2 (0.8)	102.1 (3.5)	73.9 (3.5)	112.4 (3.6)	---	133.7 (4.1)	This Work
	103.7 (1.5)	17.7 (3.0)	103.7 (3.0)	86.0 (3.0)	114.8 (2.1)	119 (3.0)	121.4 (1.5)	9
$5P'[3/2]2 \cdot 5S'[1/2]1$	101.1 (3.1)	30.0 (0.8)	99.2 (3.2)	69.2 (3.2)	109.5 (2.2)	---	131.1 (3.1)	This Work
	99.2 (1.5)	---	96.2 (1.8)	---	110.9 (2.4)	112.8 (2.1)	---	9
$5P'[1/2]1 \cdot 5S'[1/2]1$	100.4 (3.5)	41.3 (1.0)	101.6 (3.8)	60.4 (3.8)	109.3 (4.5)	---	141.7 (3.5)	This Work
	97.1 (1.5)	---	99.8 (1.8)	---	109.1 (3.0)	115 (2.1)	---	9
$5P'[3/2]1 \cdot 5S'[1/2]1$	102.3 (2.2)	29.3 (1.2)	99.3 (3.5)	70.0 (3.0)	111.8 (3.6)	---	131.6 (2.2)	This Work
	98.0 (1.5)	36.0 (2.7)	95.6 (2.7)	59.6 (2.7)	106.4 (2.1)	115 (1.8)	134.0 (2.4)	9

a) The shifts given by thick letters are those refined by this work.

b) The line positions of ^{78}Kr were only determined for the $5P[5/2]2 \leftarrow 5S[3/2]2$ and $5P[5/2]2 \leftarrow 5S[3/2]2$ transitions.

c) The shifts of ^{83}Kr from the ^{82}Kr and ^{86}Kr were calculated using the value from ^{84}Kr given in Table 1.

決定した超微細構造定数を用い核スピンによる摂動を除いた ^{83}Kr のシフトと偶数同位体のシフトを Table 3 に示す。この結果を用いボーアシフト (Bohr shift, Normal mass shift)、特定質量数シフト (Specific mass shift) と体積シフト (Field shift, Volume shift) について King の方法²³⁾ により解析した。

$\nu^{nPj \leftarrow nSi}$ における質量数 $M_p > M_Q$ のシフトは、ボーアシフト $\Delta \nu_{NMS}$ 、特定質量数シフト $\Delta \nu_{SMS}$ 、体積シフト $\Delta \nu_{FS}$ との 3 つの項の和で与えられる^{19, 23)}。

$$\Delta \nu_{NMS}^{nPj \leftarrow nSi}(M_p, M_Q) = \nu^{nPj \leftarrow nSi} \cdot \frac{1}{1836.15} \cdot \frac{M_p - M_Q}{M_p \cdot M_Q} \dots (3)$$

$$\Delta \nu_{SMS}^{nPj \leftarrow nSi}(M_p, M_Q) = K^{nPj \leftarrow nSi} \cdot \frac{M_p - M_Q}{M_p \cdot M_Q} \dots (4)$$

$$\Delta \nu_{FS}^{nPj \leftarrow nSi}(M_p, M_Q) = F^{nPj \leftarrow nSi} \cdot \delta \langle r^2 \rangle_{M_p, M_Q} \dots (5)$$

ここで、(4)式の $K^{nPj \leftarrow nSi}$ は、

$$K^{nPj \leftarrow nSi} = \langle nPj | \sum p_k p_l | nPj \rangle - \langle nSi | \sum p_k p_l | nSi \rangle \dots (6)$$

と与えられる 2 電子系の運動量の交差項である。

(5)式の $F^{nPj \leftarrow nSi}$ は、

$$F^{nPj \leftarrow nSi} = \pi \cdot \Delta | \Psi(0) |^2 \left(\frac{a_0^3}{Z} \right) f(Z) \dots (7)$$

と与えられる。ここで、 a_0 はボーア半径、 Z は原子番号、 $f(Z)$ は Z の関数 (Field shift function)²³⁾ で原子固有の値である。従って (5) 式の体積シフトは、原子核の位置における電子の確率密度の遷移に伴う変化分 $\Delta | \Psi(0) |^2$ 、すなわち電子状態に依存する遷移特有な定数項 F と同位体ごとに異なる原子核半径の 2 乗平均の差 $\delta \langle r^2 \rangle$ とに分離される。

M_p と M_Q より $\mu(M_p, M_Q) = M_p M_Q / (M_p + M_Q)$ を求め、実測したシフトより換算シフト (reduced shift)

$$\zeta^{nPj \leftarrow nSi}(M_p, M_Q) = \mu(M_p, M_Q) \cdot \Delta \nu_{IS}^{nPj \leftarrow nSi(obs)}(M_p, M_Q) \dots (8)$$

を算出しこれを縦軸とする。 $\delta \langle r^2 \rangle$ から

$$\rho(M_p, M_Q) = \mu(M_p, M_Q) \cdot \delta \langle r^2 \rangle_{M_p, M_Q} \dots (9)$$

を求めこれを横軸に取る。この 2 つの関係式から、

$$\zeta^{nPj \leftarrow nSi}(M_p, M_Q) = F^{nPj \leftarrow nSi} \cdot \rho(M_p, M_Q) + K^{nPj \leftarrow nSi} \dots (10)$$

が得られる。勾配より F -factor が定まり、切片より K -term が求まるので、

$$\Delta \nu_{SMS}^{nPj \leftarrow nSi}(M_p, M_Q) = K^{nPj \leftarrow nSi} \cdot \frac{1}{\mu(M_p, M_Q)} - \Delta \nu_{NMS}^{nPj \leftarrow nSi}(M_p, M_Q) \dots (11)$$

の関係を用い特定質量数シフトが定まる。

複数の遷移 $nPj' \leftarrow nSi'$ について、周波数シフトの測定値がある場合、それぞれ換算シフトを (8) 式より算出し、両者の関係を求めると次式が得られる。

$$\zeta^{nPj' \leftarrow nSi'}(M_p, M_Q) = \frac{F^{nPj' \leftarrow nSi'}}{F^{nPj \leftarrow nSi}} \cdot \zeta^{nPj \leftarrow nSi}(M_p, M_Q) + \eta_{nPj' \leftarrow nSi'}^{nPj \leftarrow nSi} \dots (12a)$$

$$\eta_{nPj' \leftarrow nSi'}^{nPj \leftarrow nSi} = K^{nPj' \leftarrow nSi'} - \frac{F^{nPj' \leftarrow nSi'}}{F^{nPj \leftarrow nSi}} \cdot K^{nPj \leftarrow nSi} \dots (12b)$$

この King's Plot^{19, 23)} の勾配 F'/F と切片 η から一方の遷移 ($nPj' \leftarrow nSi'$) に関わる F -factor と K -term、そして原子核半径の 2 乗平均の差が求まるのだが、参照遷移の信頼性が結果に影響を与える。

3-3 参照遷移の選択

基準とする参照遷移を決めるにあたりこれまで行われてきた方法を検討した。

Schuessler 等¹³⁾ は、 $5P[3/2]2 \leftarrow 5S[3/2]2$ の F -factor を電子状態の理論より $F = -0.604(35)$ GHz/fm² と算出し、1979 年に Gerhardt 等²⁴⁾ が求めた $\delta \langle r^2 \rangle_{84, 86} = 0.033(20)$ fm² を参照し、(10) 式の関係を用いて特定質量数シフトとボーアシフトの比 $\Delta \nu_{SMS} / \Delta \nu_{NMS} = -0.10(20)$ と定め、これを基準とし質量数 78~90 の同位体について $\delta \langle r^2 \rangle_{M_x, 86}$ を決定した。

Fricke 等²⁵⁾ は、X 線解析により原子核半径を直接求め、この結果と Cannon 等による $5P[5/2]2 \leftarrow 5S[3/2]2$ のシフト¹⁴⁾ を用いて、Schuessler 等と同様 (10) 式の関係から、 $F = -0.438(86)$ GHz/fm² と $\Delta \nu_{SMS} / \Delta \nu_{NMS} = -0.08(6)$ とを決定し、 $\delta \langle r^2 \rangle_{84, 86} = 0.041(23)$ fm² を得ている。これは、X 線解析の結果より求まる $\delta \langle r^2 \rangle_{84, 86} = 0.034(8)$ fm² と大きく異なる。

Keim 等¹⁶⁾ は Schuessler 等と同じ遷移について質量数 72~96 の同位体シフトを測定し、 $F = -0.608(50)$ GHz/fm²、 $\Delta \nu_{SMS} / \Delta \nu_{NMS} = -0.22(9)$ 、 $\delta \langle r^2 \rangle_{84, 86} = 0.042(6)$ fm² と報告している。

最近 Brandi 等²⁶⁾ は、真空紫外線域にある基底状態からのスペクトルを解析した。参照遷移に Keim 等による $5P[3/2]2 \leftarrow 5S[3/2]2$ の周波数シフトを用い、 F -factor には Schuessler 等の値と Keim 等の値の重み平均 $F = -0.605(35)$ GHz/fm² を採用している。特定質量数シフトを決定するにあたり、Fricke 等による X 線解析のデータの中から相対誤差が小さくなる 86-78, 86-80, 86-82 などの値を選び、(10) 式の関係を用いて $\Delta \nu_{SMS} / \Delta \nu_{NMS} = -0.20(8)$ を得ている。

Table 4 Selection for the reference line and the changes in the mean squares of the nuclear charge radii reported.

Transition /Remark	Observed Isotope Shifts (in MHz)							Parameters for King's Plot		
	86-84	84-83	84-82	83-82	82-80	80-78	86-83	F [GHz·fm ⁻²]	K [GHz·amu]	SMS/NMS
Reference-Lines for the King's Plot										
$5P[3/2]2 \leftarrow 5S[3/2]2$										
a, b) Cannon	73.4 (1.1)	20.7 (1.4)	69.3 (1.1)	48.6 (1.4)	78.6 (0.8)	85.5 (0.7)	94.1 (1.4)	---	---	---
c) Schussler	73.7 (4.0)	16.5 (2.0)	67.9 (4.0)	51.4 (2.0)	80.0 (4.0)	82.7 (4.0)	90.2 (6.0)	-0.604 (35)		-0.10 (20)
e) Keim	72.4 (0.5)	17.1 (1.8)	66.6 (2.0)	49.5 (2.0)	77.0 (4.0)	89.0 (4.0)	89.5 (1.8)	-0.608 (61)		-0.22 (9)
f) Brandi								-0.605 (30)	172.3 (2.3)	-0.20 (8)
$5P[5/2]2 \leftarrow 5S[3/2]2$										
ThisWork	69.3 (1.2)	17.9 (0.8)	66.4 (2.2)	48.5 (2.2)	77.8 (2.0)	79.0 (2.0)	87.2 (1.2)	-0.544 (35)	172.5 (24.3)	-0.14 (11)
b) Cannon	70.0 (1.3)	17.2 (1.3)	66.3 (1.0)	49.1 (1.3)	77.4 (1.0)	79.1 (1.0)	87.2 (1.3)	-0.526 (71)	175.3 (49.7)	-0.13 (24)
g) Fricke								-0.438 (86)		-0.08 (6)
Changes in the mean-squares of the nuclear charge radii										
$\delta < r^2 > [\text{fm}^2]$	86-84	84-83	84-82	86-82	86-80	86-78	86-83			
c, d) Schussler	0.033 (7)	---	---	0.053 (7)	0.088 (7)	0.122 (7)	0.015 (10)			
e) Keim	0.042 (6)	---	---	0.071 (14)	0.114 (24)	0.173 (26)	0.031 (11)			
g) Fricke-Xray	0.034 (16)	---	---	0.067 (16)	0.117 (16)	0.159 (16)	0.017 (16)			

(a, b) ref. 14, 15: Although the accuracies are better than those by Schuessler et al.¹³⁾ and Keim et al.¹⁶⁾, the results by King' plot are greatly deviate because the isotope shift of 86-83 is different by 4 MHz as shown by thick letters.

(c, d) ref. 13, 24: Schuessler et al. used 0.033 fm² for $\delta < r^2 >_{86, 84}$ determined by Gerhardt et al.²⁴⁾, which is considered to be smaller.

(e) ref. 16, (g) ref. 25.

F -factor、 K -term や $\delta < r^2 >_{84, 86}$ は参照データによって異なり、差は 30% にもなるので、これまで使われてきた Table 4 に示す参照遷移に検討を加えた。

(10) あるいは(12)式により King's Plot を行う上で、同位体シフトの測定誤差が結果に及ぼす影響は大きい。Table 4 に示すように $5P[5/2]2 \leftarrow 5S[3/2]2$ では本研究の値と Cannon 等の結果は一致しているが、参照遷移として使われた $5P[3/2]2 \leftarrow 5S[3/2]2$ では太字で示す $\Delta\nu^{obs}$ (86-83) に 4 MHz の差があり、この影響で $\Delta\nu^{obs}$ (84, 83) の相対誤差は 20% にもなる。

そこで、本研究では同位体シフトが良く一致している $5P[5/2]2 \leftarrow 5S[3/2]2$ を参照遷移とするため、まず Brandi 等が求めた方法で $5P[3/2]2 \leftarrow 5S[3/2]2$ の

F -factor、 $\Delta\nu_{SMS}/\Delta\nu_{NMS}$ と(10)式の定数項 K を決定し、次いで Fig. 5(b) に示すように(12)式の関係を用いて、 $F = -0.544(35)$ GHz/fm², $\Delta\nu_{SMS}/\Delta\nu_{NMS} = -0.14(11)$, $K = 172.5(24.3)$ GHz·amu と決定した。

Fig. 5(a) から分かるように、84-83 と 83-82 の点はグラフの勾配 F -factor に影響を与える。そして定数 K -term も原子核半径の精度に依存して変化する。

Fricke等による μ 中間子 X線解析の結果²⁵⁾では、84-83、83-82、86-84 などの原子核半径の差は小さく相対誤差が大きくなる。一方これが小さくなる 86-82、86-80 や 86-78 などの座標は、Fig. 5(a) の中心にあるので、 F -factor の理論値を用いると定数項である K -term もこの精度で一意的に決まる。

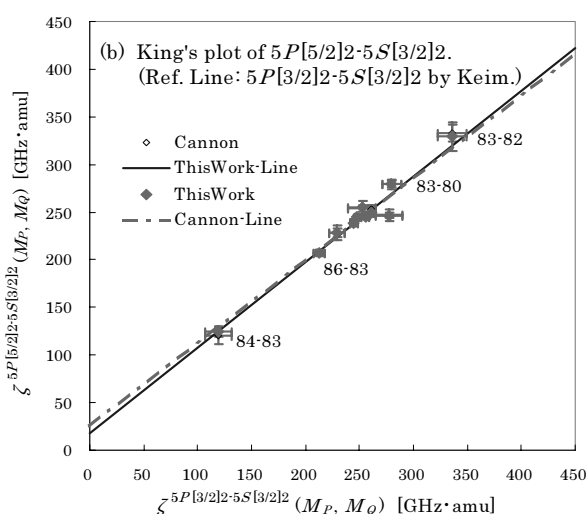
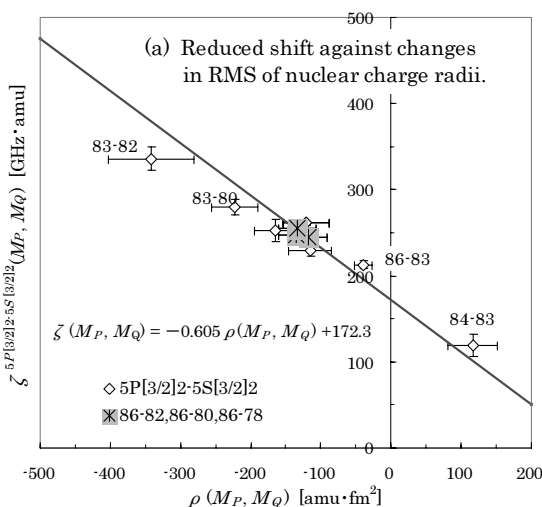


Fig. 5 Selection of the reference line for the King's plot.

Schuessler 等¹³⁾ は Gerhardt 等が報告²⁴⁾ している 86-84 の差 $\delta \langle r^2 \rangle_{84,86} = 0.033 (20) \text{ fm}^2$ を用いたため、全て $\delta \langle r^2 \rangle$ が小さくなる系統的な誤差が生じた。

決定した $5P[5/2]2 \leftarrow 5S[3/2]2$ の F -factor と K -term を参照値とし、各遷移の F -factor、 K -term を (12)式、 $\Delta \nu_{\text{SMS}}(86, 84)$ を(11)式により求めた。

3-4 体積シフトと特定質量数シフト

Table 3 に示す 14 の遷移のうち、参照遷移を除く 12 遷移の換算シフトを(8)式を用いて算出し、King's Plot を行った。

Fig. 6 に、4 つの遷移について結果を例示する。Plot (a)と(b) は、 $^2P_{3/2}$ -Configuration に関わるもので、(c)と(d) は $^2P_{1/2}$ -Configuration の例である。寿命の短い $J'' = 1$ の遷移では Jackson の結果を参照データとした。Plot (d) に示すように、 $\zeta(84-83)$ と $\zeta(83-82)$ 、

$\zeta(86-83)$ と $\zeta(83-80)$ など ^{83}Kr のシフトの測定精度が F -factor や K -term に大きく影響する。この遷移では Table 3 の最下行に示すよう ^{83}Kr のシフトが、84-83 と 83-82 で $\sim 10 \text{ MHz}$ 違っているためである。

King's Plot の結果を Table 5 に示す。表中 3 列目と 4 列目の F'/F と η は King's Plot から直接得られるパラメータである。また最下行に仮想遷移 $5S[3/2]1 \leftarrow 5S[3/2]2$ と $5S^*[1/2]1 \leftarrow 5S^*[1/2]0$ の結果も併記した。

準安定状態である $5S[3/2]2$ と $5S^*[1/2]0$ に関わる遷移では、Cannon 等によるシフトの測定値¹⁴⁾ を用いて求めた Plot を参照値とした。 $J' \leftarrow (J'' = 2, 0)$ について比較すると 3 行目に示す $5P[5/2]3 \leftarrow 5S[3/2]2$ 以外はどれも一致している。これは Table 3 に示すよう ^{83}Kr のシフトが 86-83 では 80.7 MHz と本研究の結果より 4 MHz 小さいためである。

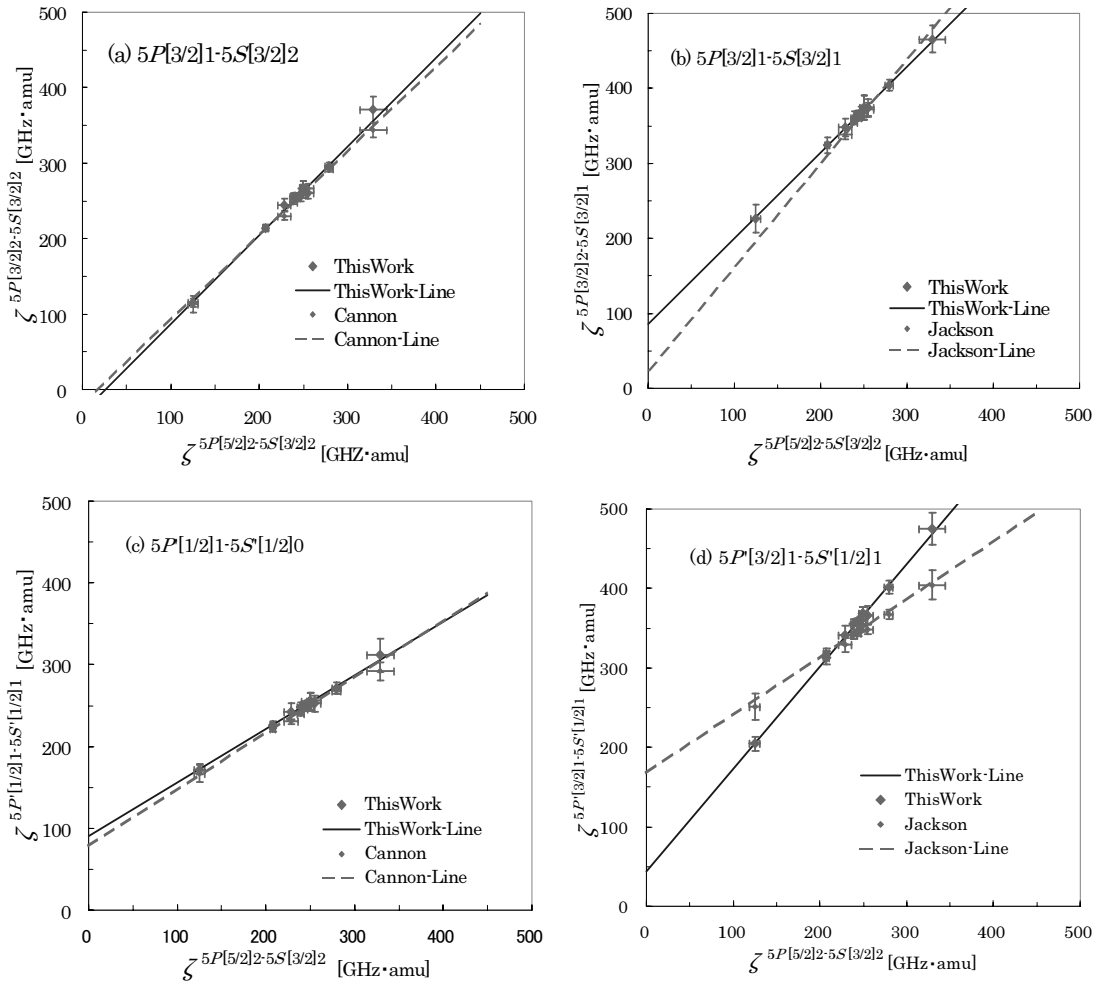


Fig. 6 King's plots using $5P[5/2]2 \leftarrow 5S[3/2]2$ as a reference line.

Table 5 The results of the King's plot.^{a)}

Transition	Remark	F' / F		η [GHz·amu]	F' [GHz·fm ⁻²]		K [GHz·amu]	$\frac{\Delta\nu_{MS}^{86-84}}{\Delta\nu_{NMS}} \text{ [MHz]}$			
								$\Delta\nu_{NMS}$	$\Delta\nu_{SMS}$		
² P _{3/2} Configuration											
$J'' = 2$											
5P[3/2]2-5S[3/2]2 ^{b)}	Keim ^{b)}					-0.605	Fixed	172.3	-	-	
5P[3/2]1-5S[3/2]2	This Work Cannon ^{d)}	1.178	(0.033)	-30.6	(7.5)	-0.641	(0.018)	172.6	(13.2)	58.8	-11.0 (3.7)
		1.122	(0.034)	-19.3	(9.1)	-0.610	(0.020)	174.2	(15.6)		-10.5 (4.3)
5P[5/2]2-5S[3/2]2 ^{c)}	This Work Cannon ^{d)}	1.000		0.0		-0.544	(0.035)	172.5	(24.3)	55.9	-8.0 (6.7)
		1.022	(0.013)	-5.0	(3.2)	-0.556	(0.007)	171.2	(5.5)		-8.4 (1.5)
5P[5/2]3-5S[3/2]2	This Work Cannon ^{d)}	0.978	(0.002)	-2.0	(0.4)	-0.532	(0.001)	166.7	(0.7)	55.8	-9.6 (0.2)
		1.104	(0.057)	-34.6	(14.0)	-0.601	(0.031)	155.8	(23.8)		-12.6 (6.6)
5P[1/2]1-5S[3/2]2	This Work	0.962	(0.001)	-17.7	(0.4)	-0.524	(0.001)	148.4	(0.6)	50.7	-9.6 (0.2)
$J'' = 1$											
5P[3/2]2-5S[3/2]1	This Work Jackson ^{e)}	0.942	(0.025)	132.5	(5.9)	-0.512	(0.014)	294.9	(10.3)	55.3	26.5 (2.9)
		0.882	(0.078)	142.7	(19.0)	-0.480	(0.042)	294.8	(32.3)		26.5 (9.0)
5P[3/2]1-5S[3/2]1	This Work Jackson ^{e)}	1.145	(0.018)	85.8	(4.4)	-0.623	(0.010)	283.4	(7.4)	54.6	24.3 (2.1)
		1.376	(0.120)	25.0	(29.3)	-0.749	(0.065)	262.4	(50.0)		18.2 (13.9)
5P[5/2]2-5S[3/2]1	This Work Jackson ^{e)}	0.954	(0.005)	121.1	(1.1)	-0.519	(0.003)	285.6	(1.9)	51.5	27.6 (0.5)
		1.341	(0.211)	-0.6	(51.3)	-0.779	(0.115)	246.2	(87.6)		16.7 (24.3)
² P _{1/2} Configuration											
$J'' = 0$											
5P'[1/2]1-5S'[1/2]0	This Work Cannon ^{d)}	0.654	(0.014)	90.6	(3.2)	-0.356	(0.008)	203.4	(5.5)	57.6	-1.2 (5.3)
		0.688	(0.071)	79.1	(17.5)	-0.374	(0.039)	197.8	(29.8)		-2.8 (8.3)
5P'[3/2]1-5S'[1/2]0	This Work Cannon ^{d)}	1.162	(0.021)	-41.6	(4.8)	-0.631	(0.011)	158.8	(8.3)	56.2	-12.1 (2.3)
		1.041	(0.014)	-14.3	(3.4)	-0.566	(0.008)	165.2	(5.9)		-10.6 (1.6)
$J'' = 1$											
5P'[1/2]0-5S'[1/2]1	This Work Jackson ^{e)}	1.417	(0.034)	20.8	(7.7)	-0.771	(0.018)	265.2	(13.5)	58.9	14.7 (3.8)
		2.100	(0.082)	-144.3	(19.7)	-1.142	(0.045)	217.7	(33.9)		1.5 (9.4)
5P'[3/2]2-5S'[1/2]1	This Work Jackson ^{e)}	1.211	(0.030)	59.0	(6.9)	-0.659	(0.016)	267.9	(12.1)	54.8	19.5 (3.4)
		1.216	(0.029)	53.4	(7.0)	-0.661	(0.016)	263.1	(12.0)		18.2 (3.3)
5P'[1/2]1-5S'[1/2]1	This Work Jackson ^{e)}	0.578	(0.013)	215.8	(2.9)	-0.314	(0.007)	315.5	(5.1)	54.7	32.8 (1.4)
		0.582	(0.212)	209.2	(51.6)	-0.317	(0.115)	309.6	(88.2)		31.2 (24.5)
5P'[3/2]1-5S'[1/2]1	This Work Jackson ^{e)}	1.290	(0.023)	44.3	(5.4)	-0.702	(0.012)	266.8	(9.2)	53.2	20.8 (2.6)
		0.729	(0.071)	167.9	(17.5)	-0.397	(0.039)	293.6	(29.8)		28.2 (8.3)
Pseudo-transition											
5S[3/2]1-5S[3/2]1	This Work	-0.003	(0.021)	-112.5	(5.2)	-0.003	(0.012)	-113.0	(8.8)	4.5	-35.9 (2.4)
5S'[1/2]1-5S'[1/2]0	This Work	-0.018	(0.021)	-107.2	(5.0)	0.010	(0.010)	-110.4	(8.0)	3.0	-33.6 (2.0)

a) The values in the brackets are not the experimental errors but those of the statistical standard errors in the King's plot.

b) Reference line to determine the F' -factor and K -term of the 5P[5/2]2←5S[3/2]2, where the F -factor by Brandt et al.²⁶⁾ was used

c) Reference line; where $F = -0.544(35)$ GHz·fm⁻² and $K = 172.5(24.5)$ GHz·amu.

d) The results obtained using the shifts reported in ref. 14.

e) The results obtained using the shifts reported in ref. 9.

寿命の短い 5S[3/2]1 と 5S'[1/2]1 を基点とする遷移では、Jackson の測定値⁹⁾ による Plot を参照値とした。不一致が大きな遷移は、²P_{3/2} では 5P[3/2]1←5S[3/2]1 と 5P[5/2]2←5S[3/2]1、²P_{1/2} では 5P'[1/2]0←5S'[1/2]1 と 5P'[3/2]1←5S'[1/2]1 であった。何れも 86-83 や 84-82 の測定値が異なることに起因する。

Table 5 の 5 列目と 6 列目に F -factor と K -term、最右列に $\Delta\nu_{SMS}(86, 84)$ を示す。これらを比較すると次のような 4 つの特徴が見られる。

[1] 5S[3/2]1 と 5S[3/2]2、5S'[1/2]1 と 5S'[1/2]0 の間では、 F -factor の違いは見られない。

[2] 5S[3/2]1 と 5S[3/2]2 や、5S'[1/2]1 と 5S'[1/2]0 の $\Delta\nu_{SMS}(86, 84)$ は 34 MHz の負のシフトとなっている。5P←5S 遷移では、 $J'←J''=(2, 0)$ では約-10 MHz、 $J'←J''=1$ では約 +20~30 MHz なので 5S 準位における jj 結合の摂動の関与が考えられる。

[3] 5P'[1/2]1 が関係する 5P'[1/2]1←5S'[1/2]0 と 5P'[1/2]1←5S'[1/2]1 では F -factor が減少する。この準位では、核磁気相互作用定数 A の符号が正であって、電子状態の特異性が考えられる。

[4] 5P[3/2]1, 2 や 5P[5/2]2, 3、5P'[3/2]1, 2 に関わる遷移では F -factor の差は小さい。

F -factor は(7) 式に示すよう原子核近傍の電子状態と関係し、特定質量数シフトすなわち K -term は(6) 式に示すよう 2 電子系の相互作用に関する項を含んでいる。この特徴は定性的なものであるが、電子状態の理論計算に必要なモデル設定にあたり経験的パラメータとして活用できると考えている。

3-5 原子核半径の 2 乗平均の差

決定した F -factor と比質量数シフト $\Delta \nu_{SMS}(86, 84)$ を用い、原子核半径の 2 乗平均の差 $\delta \langle r^2 \rangle_{Mx, 86}$ を遷移ごとに算出した。結果を Table 6 に示す。括弧

内の数字は周波数シフトの測定誤差から見積もった誤差である。表の下部に示す 13 の遷移から得られた平均値と標準偏差から判断すると、これまで報告された結果と比べ精度と信頼性が向上している。

Fig. 7 は、最も原子核半径が小さい ^{86}Kr を基準とし $\delta \langle r^2 \rangle_{Mx, 86}$ の変化を図示したもので、中性子数が 50 となる ^{86}Kr を境に原子核半径が減少から増大に転じる魔法数 (Magic number) の特徴が現れており、この近傍における原子核半径の微細な差が精度良く表現されている。

Table 6 Changes in the mean squares of the nuclear charge radii. (Units are in fm².)

Transition	Remark	Changes in the mean squares of the nuclear charge radii ^{a)}						
		88-86	86-84	86-83	86-82	86-80	86-78	86-77
² P _{3/2} Configuration								
<i>J</i> ^π = 2								
5 <i>P</i> [3/2]1-5 <i>S</i> [3/2]2	This Work ref. 14		0.040 (5) 0.043 (2)	0.027 (2) 0.028 (3)	0.073 (5) 0.069 (3)	0.115 (5) 0.116 (3)	0.159 (3)	
5 <i>P</i> [5/2]2-5 <i>S</i> [3/2]2	This Work ref. 14		0.040 (2) 0.041 (2)	0.027 (2) 0.027 (3)	0.069 (4) 0.070 (2)	0.116 (4) 0.116 (2)	0.159 (4) 0.159 (2)	
5 <i>P</i> [5/2]3-5 <i>S</i> [3/2]2	This Work ref. 14		0.040 (3) 0.038 (2)	0.027 (3) 0.025 (2)	0.069 (3) 0.069 (2)	0.115 (9) 0.113 (2)	0.162 (9) 0.161 (2)	
5 <i>P</i> [1/2]1-5 <i>S</i> [3/2]2	This Work		0.040 (3)	0.027 (3)	0.069 (3)	0.116 (4)		
<i>J</i> ^π = 1								
5 <i>P</i> [3/2]2-5 <i>S</i> [3/2]1	This Work ref. 9		0.042 (5) 0.039 (3)	0.029 (5)	0.072 (5) 0.069 (6)	0.113 (5) 0.116 (6)	0.159 (6)	
5 <i>P</i> [3/2]1-5 <i>S</i> [3/2]1	This Work ref. 9		0.041 (7) 0.041 (2)	0.028 (7)	0.071 (7) 0.070 (2)	0.115 (7) 0.114 (4)	0.159 (4)	
5 <i>P</i> [5/2]2-5 <i>S</i> [3/2]1	This Work ref. 9		0.040 (4) 0.039 (3)	0.027 (4)	0.069 (7) 0.069 (3)	0.116 (9) 0.113 (4)	0.161 (4)	
² P _{1/2} Configuration								
<i>J</i> ^π = 0								
5 <i>P</i> '[1/2]1-5 <i>S</i> '[1/2]0	This Work ref. 14		0.040 (8) 0.039 (4)	0.028 (5) 0.027 (4)	0.072 (8) 0.064 (4)	0.114 (8) 0.112 (4)	0.161 (4)	
5 <i>P</i> '[3/2]1-5 <i>S</i> '[1/2]0	This Work ref. 14		0.041 (5) 0.040 (2)	0.028 (5) 0.027 (3)	0.072 (5) 0.069 (2)	0.115 (5) 0.116 (2)	0.161 (2)	
<i>J</i> ^π = 1								
5 <i>P</i> '[1/2]0-5 <i>S</i> '[1/2]1	This Work ref. 9		0.042 (5) 0.038 (1)	0.029 (6) 0.026 (1)	0.074 (5) 0.073 (3)	0.115 (5) 0.116 (3)	0.159 (3)	
5 <i>P</i> '[3/2]2-5 <i>S</i> '[1/2]1	This Work ref. 9		0.041 (5) 0.040 (2)	0.028 (5)	0.073 (5) 0.070 (3)	0.115 (5) 0.116 (4)	0.159 (4)	
5 <i>P</i> '[1/2]1-5 <i>S</i> '[1/2]1	This Work ref. 9		0.041 (11) 0.036 (5)	0.028 (11)	0.073 (12) 0.067 (6)	0.114 (12) 0.113 (10)	0.164 (10)	
5 <i>P</i> '[3/2]1-5 <i>S</i> '[1/2]1	This Work ref. 9		0.040 (3) 0.042 (5)	0.028 (5) 0.026 (6)	0.071 (5) 0.068 (7)	0.115 (5) 0.110 (7)	0.159 (5) 0.163 (7)	
Average	This Work <i>b)</i> Cannon <i>c)</i>		0.040 [2] 0.040 [5]	0.028 [2] 0.027 [3]	0.071 [5] 0.068 [7]	0.115 [2] 0.114 [6]	0.161 [6] 0.160 [3]	
Previous Works	ref. 16 ref. 25 ref. 25 ref. 14	0.282 (4) <i>d)</i> <i>e)</i> 0.304 (13)	0.042 (6) 0.041 (9) 0.034 (16) 0.033 (7)	0.031 (11) 0.020 (5) 0.017 (16) 0.015 (10)	0.071 (14) 0.069 (15) 0.067 (16) 0.053 (7)	0.114 (24) 0.116 (23) 0.117 (16) 0.088 (7)	0.172 (26) 0.163 (23) 0.159 (16) 0.122 (3)	0.209 (31)

a) The values were calculated using the isotope shift given in the references and those listed in Table 5.

Numbers in the bracket indicate the errors based on the measuerment of the frequency shift.

b) Numbers in the square brackets are those of the statistical standard deviation.

c) The values obtained using the isotope shift in ref. 14 and the parameters given in Table 5.

d) Values reported in ref. 25 Fricke et al. made a joint analysis with the optical shifts reported by Cannon and Janick¹⁴⁾.

e) The values based on the muonic X-ray analysis reported in ref. 25.

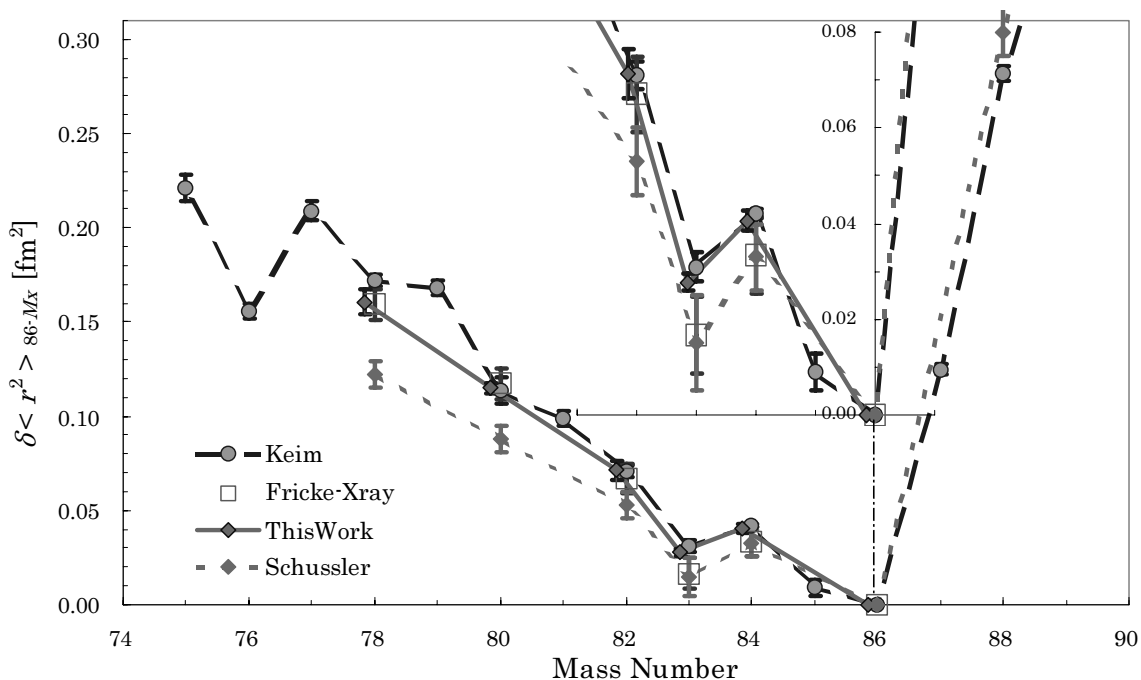


Fig. 7 Changes in the mean-square of the nuclear charge radii.

4 まとめ

飽和吸収分光法により Kr 原子のサブドブプラ電子スペクトルを近赤外線領域において測定した。天然存在比の試料では分離できなかった質量数が偶数である5つの同位体のスペクトルを分解し絶対波数や同位体シフトを測定した。また、寿命が短いため原子ビーム法では測定できない $5S[3/2]1$ と $5S'[1/2]1$ を基点とする遷移の同位体シフトも測定した。飽和吸収分光法は装置が簡便で周波数測定精度も遜色がないので、これまで蓄積された ^{86}Kr のスペクトルデータを活用する上で都合が良い。

^{83}Kr の核磁気相互作用定数と核四極子相互作用定数を決定した。特に $5S[3/2]1$ と $5S'[1/2]1$ や $5P[3/2]2$ の核四極子相互作用定数 B の精度を向上させることができた。

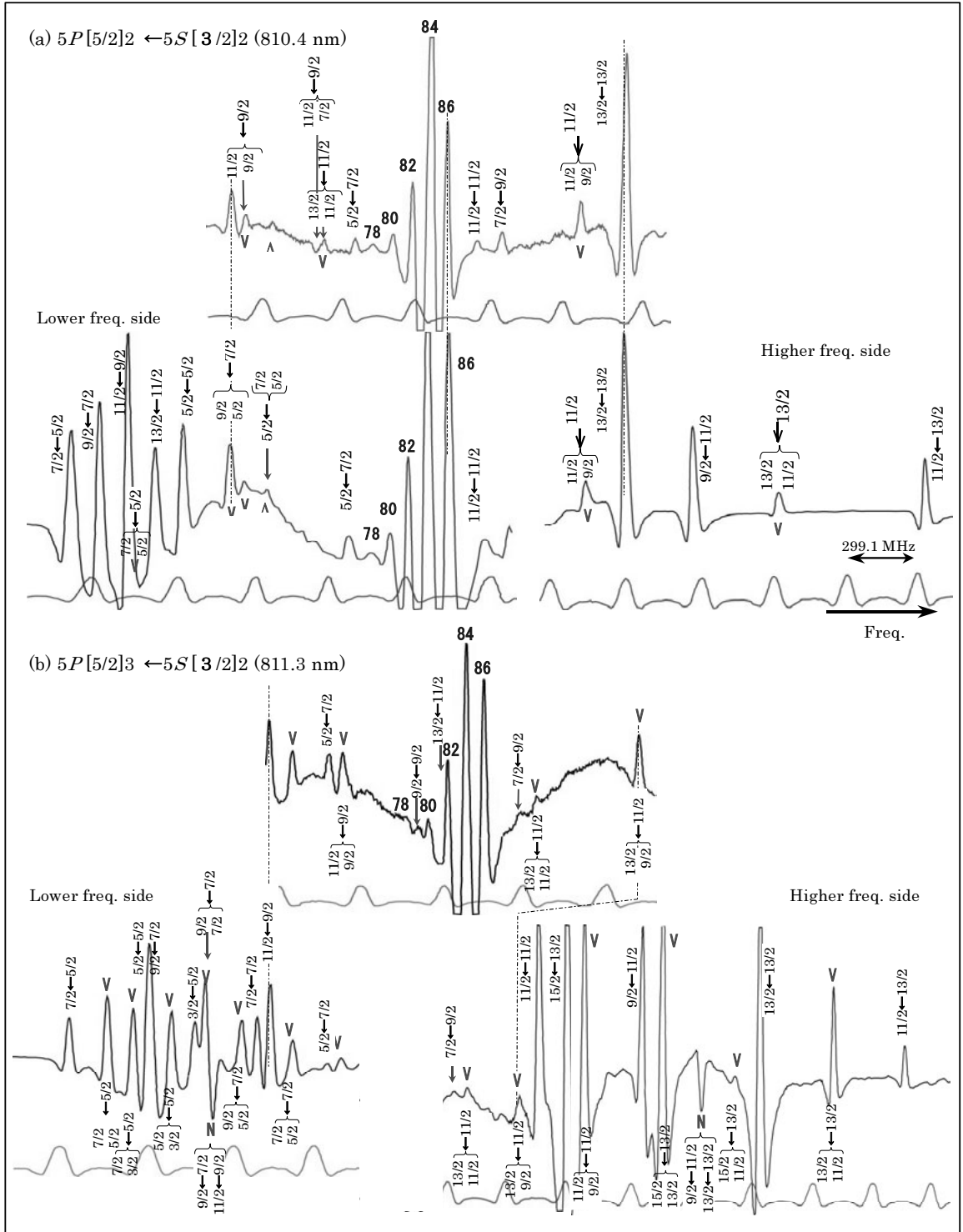
測定した13の遷移について、King's Plotの方法で質量数シフトと体積シフトを分離した。参照遷移には、 $5P[3/2]2 \leftarrow 5S[3/2]2$ に代えて $5P[5/2]2 \leftarrow 5S[3/2]2$ を用い各遷移の F -factor と K -term を求めた。個別遷移ごとに取り上げられていた同位体シフトを、一つの電子状態を表す経験的パラメータとして系統的に扱えることを実験上で検証した。

このデータは電子状態のモデル設定に有用である。

偶数同位体においては、一般に核スピンの $I = 0$ であるため核磁気相互作用定数や核四極子定数を求めることができない。原子核近傍の電子波動関数や2電子系の相互作用に関わる F -factor や K -term は、電子状態の理論計算を行う上で重要である。

分離された体積シフトと決定した F -factor を用いて原子核半径の2乗平均の差を求めた。特に、質量数の差が小さい $86\text{-}84$ や $86\text{-}83$ では μ 中間子 X 線分光法で得られる値より精度は高い。これまでは数種の特定遷移で解析が行われ、参照遷移や F -factor の値によって系統的な誤差が生じることがあったが、13の遷移を対象としこの平均を求めることによって信頼性を向上させることができた。

飽和吸収分光法は簡便なサブドブプラ分光法として有効であるが、検出されるスペクトルの強度は、Fig. 3 や Appendix に示すように遷移確率や同位体の濃度比に比例しない。特に中央部の $^{82}, ^{84}, ^{86}\text{Kr}$ は ^{83}Kr の超微細構造に比較して強く抑制されている。本研究では、部分的に成り立つ相対強度比を参照して帰属を進めた。これを表現する理論式の導出については別途論述したいと考えている。

Appendix: Saturated Absorption Spectra and Frequency Shifts from ^{84}Kr .Fig. A1 Saturated absorption lines in $J' = 2, 3 \leftarrow J'' = 2$

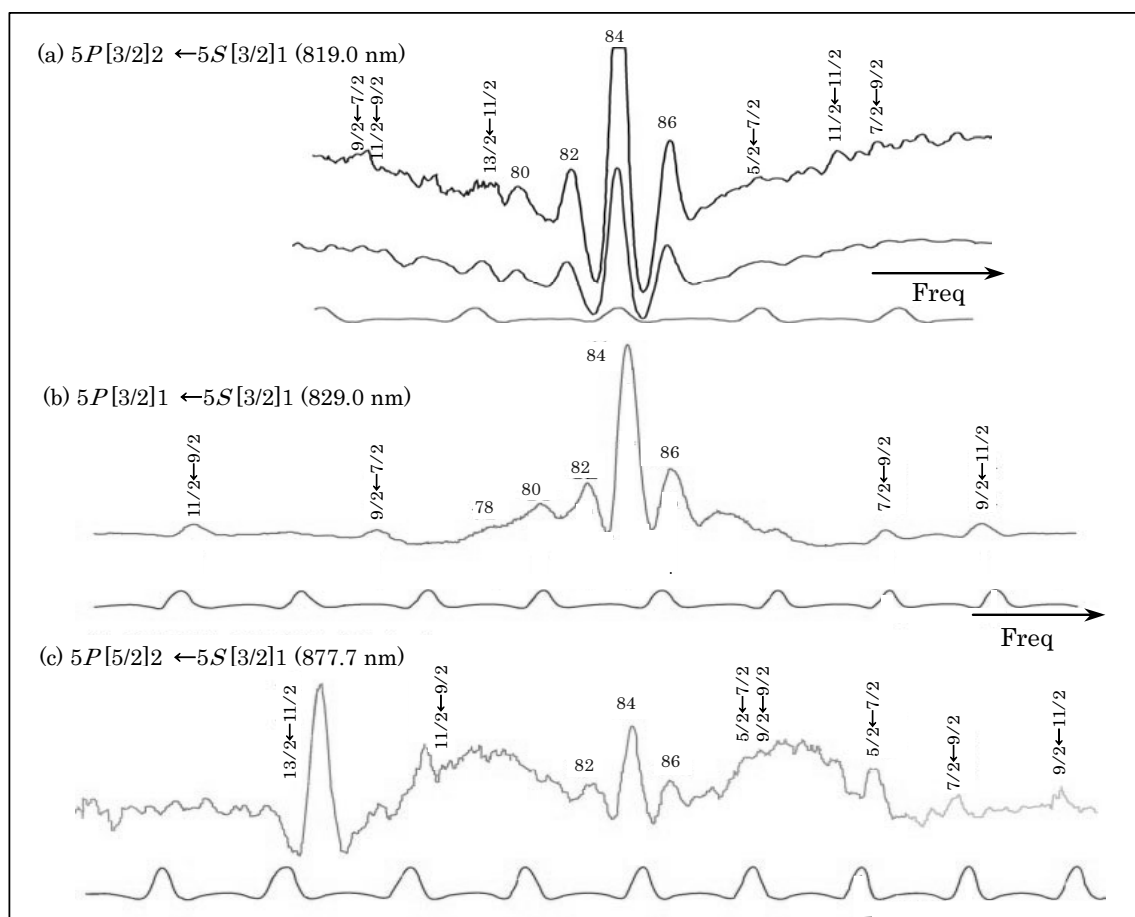


Fig. A2 Saturated absorption lines in $J' = 1, 2 \leftarrow J'' = 1$. The unperturbed line position in (a) $5P[3/2]2 \leftarrow 5S[3/2]1$ was obtained from the $13/2 \leftarrow 11/2$ and the nuclear hyperfine coupling constants given by Cannon et al.¹⁴⁾

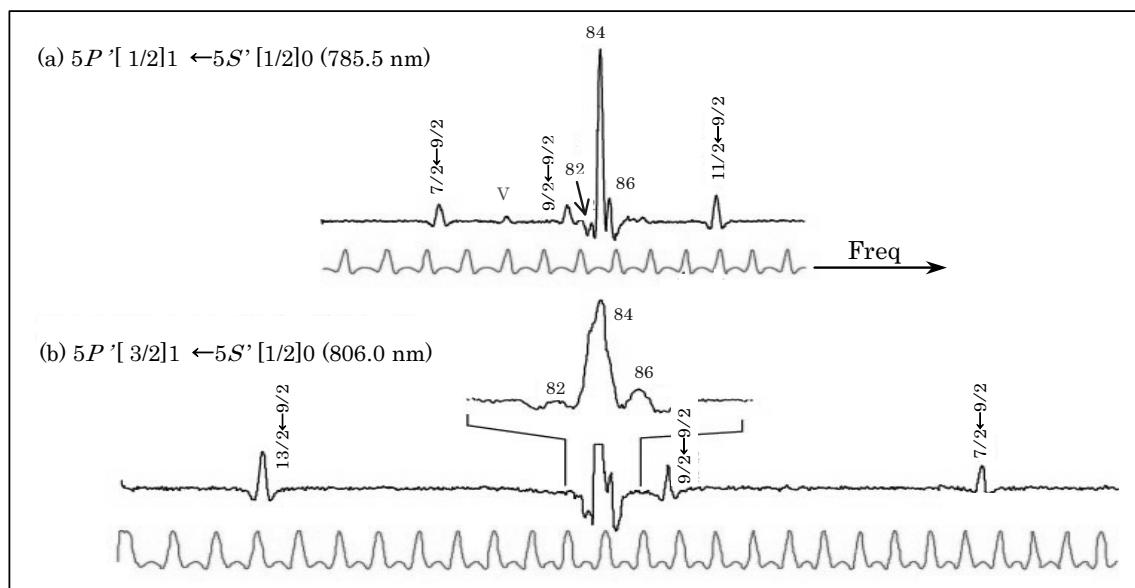


Fig. A3 Saturated absorption lines in $J' = 1 \leftarrow J'' = 0$

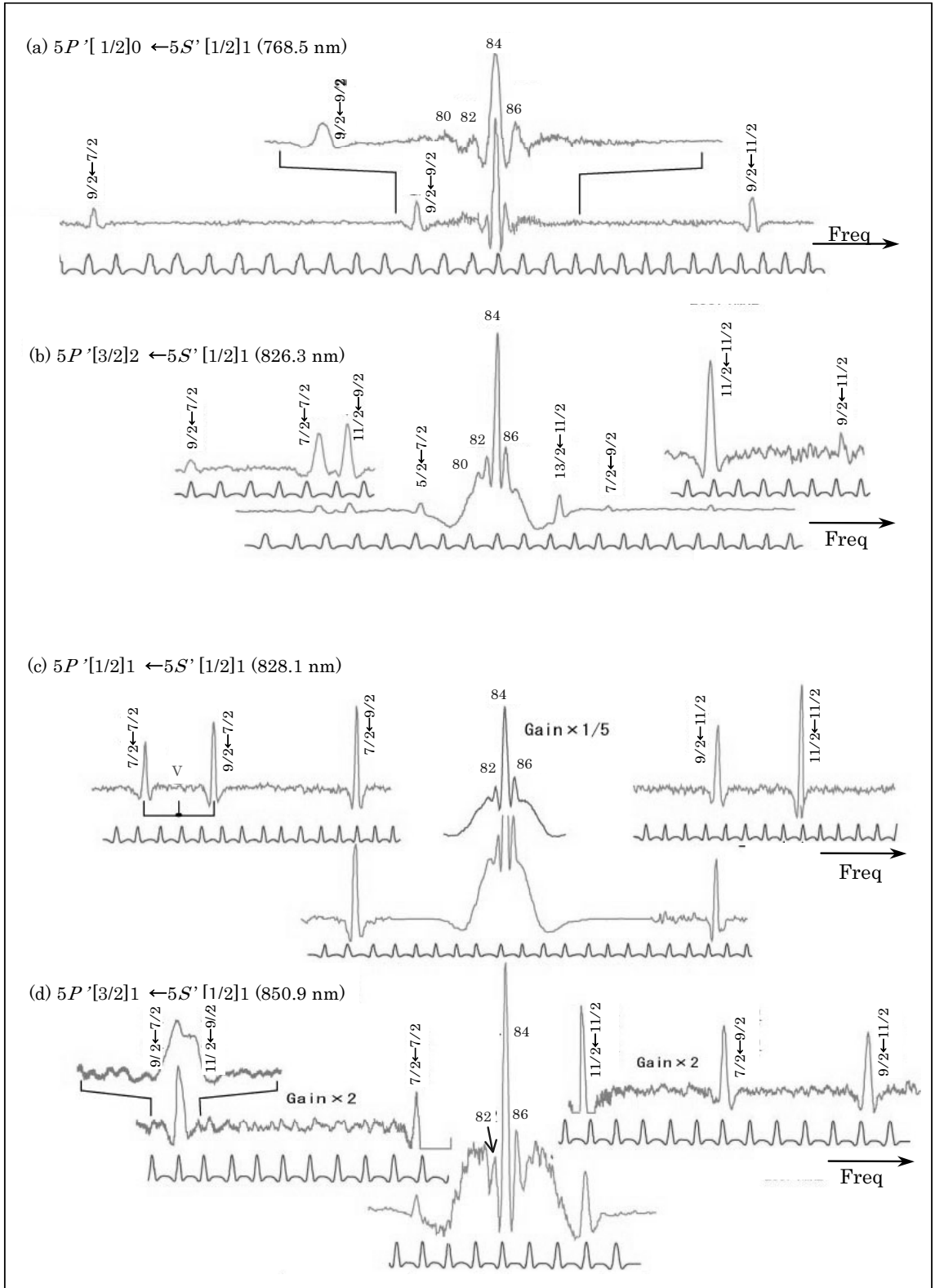


Table A1 Line splittings of the hyperfine components.

Transition	Obsd Shift ^{a)}	dev ^{b)}
	[MHz]	
² P _{3/2} -Configuraton		
<i>J</i> "=2		
5 <i>P</i> {3/2}1-5 <i>S</i> {3/2}2	769.5 nm	
	11/2-13/2	1478.2 (5.6) -1.3 *
	9/2-11/2	680.5 (4.2) -2.0 *
	7/2-9/2	(62.8)
	⁸⁶ Kr	73.6 (3.1)
	⁸⁴ Kr	0.0
Unptbrd.	⁸³ Kr	-16.5 (0.8)
	⁸² Kr	-71.2 (2.2)
	⁸⁰ Kr	-150.5 (5.0)
	11/2-11/2	-349.9 (5.7) 1.3 *
	9/2-9/2	-657.4 (4.8) 2.0 *
	7/2-7/2	-894.1 (3.0) -0.3 *
c. r. V (	7/2-7/2)	-1252.7 (9.3) 2.1
	9/2-7/2	-1549.5 (6.6) 0.3 *
ov. lap {	9/2-7/2 }	-1624.1 (· ·) -8.2
	11/2-9/2 }	(-1693.1)
5 <i>P</i> {5/2}2-5 <i>S</i> {3/2}2	810.4 nm	
	11/2-13/2	2019.9 (4.5) 0.3 *
c. r. V (	11/2-13/2)	1398.8 (5.1) -1.0
	13/2-13/2	1049.3 (4.7) -0.1 *
	9/2-11/2	781.0 (6.5) 1.0 *
c. r. V (	9/2-11/2)	621.0 (6.9) 1.8
	11/2-11/2	284.7 (1.6) 1.5 *
	7/2-9/2	189.0 (2.9) 0.1 *
	11/2-11/2	69.3 (1.2)
	⁸⁶ Kr	0.0
	⁸⁴ Kr	0.0
Unptbrd.	⁸³ Kr	-17.9 (0.8)
	⁸² Kr	-66.4 (2.2)
	⁸⁰ Kr	-144.2 (2.0)
	⁷⁸ Kr	-223.2 (2.0)
ov. lap {	9/2-9/2 }	-305.9 (5.1) -13.5
	5/2-7/2 }	-0.4
c. r. V (	11/2-11/2)	-432.4 (2.5) -1.5
	13/2-11/2	-635.8 (5.7) -2.2
c. r. Δ (	5/2-7/2)	(-673.3)
	7/2-7/2	-723.0 (7.1) -0.4
c. r. V (	9/2-9/2)	-777.7 (6.7) -0.5
	11/2-9/2	-962.0 (4.5) -0.4 *
c. r. V (	5/2-7/2)	-1051.7 (3.4) -1.0 *
	7/2-5/2	-1147.4 (2.7) -1.9
c. r. V (	5/2-5/2)	5.5
ov. lap	11/2-9/2	-1249.7 (4.4) -0.8 *
	9/2-7/2	-1329.9 (6.2) -0.5 *
	7/2-5/2	

Table A1 Continued-1.

Transition	Obsd. Shift ^{a)}	dev ^{b)}
	[MHz]	
² P _{3/2} -Configuraton		
<i>J</i> "=2		
5 <i>P</i> {5/2}3-5 <i>S</i> {3/2}2	811.3 nm	
	11/2-13/2	2464.7 (2.4) 0.8 *
c. r. V (	11/2-13/2)	2100.7 (1.7) -2.2
	13/2-13/2	1743.8 (2.6) 1.9 *
c. r. V (	11/2-13/2)	1623.1 (2.0) 0.6
	15/2-13/2	1453.7 (2.1) 0.8
c. r. N (	13/2-13/2)	1262.5 (1.6) 1.0
	9/2-11/2	1165.0 (5.9) 1.1 *
c. r. V (	13/2-13/2)	896.8 (3.5) -1.7
	9/2-11/2	780.2 (3.5) -0.9 *
	11/2-11/2	632.6 (4.1) -0.6 *
c. r. V (	11/2-11/2)	268.4 (2.6) -3.8
	13/2-11/2	203.5 (3.7) 2.0
	7/2-9/2	67.3 (1.7)
	⁸⁶ Kr	0.0
	⁸⁴ Kr	0.0
Unptbrd.	⁸³ Kr	-17.2 (0.8)
	⁸² Kr	-64.3 (1.7)
	13/2-11/2	(-88.8)
	⁸⁰ Kr	-139.6 (5.0)
	9/2-9/2	-183.9 (3.0) -5.9
	⁷⁸ Kr	-218.0 (3.0)
c. r. V (	9/2-9/2)	-444.1 (5.3) -0.8
	11/2-9/2	-495.5 (3.0) -1.4 *
c. r. V (	5/2-7/2)	-624.1 (1.5) 0.5
	7/2-7/2	-709.3 (3.1) -0.7 *
	11/2-9/2	-757.7 (2.4) -2.6 *
c. r. V (	7/2-7/2)	-814.0 (1.6) 0.3
	9/2-7/2	-918.7 (1.5) 2.9
c. r. N (	11/2-9/2)	-945.1 (4.1) -0.3
	7/2-7/2	-980.0 (1.9) 1.9 *
c. r. V (	9/2-7/2)	-1061.8 (1.5) 4.2
	3/2-5/2	-1139.1 (2.3) -4.6
ov. lap {	5/2-5/2 }	11.0
	9/2-5/2	-1194.9 (1.2) 1.6
c. r. V (	7/2-5/2)	-1280.1 (3.1) 0.6
	5/2-5/2	-1410.3 (2.9) 0.9 *
	7/2-5/2	

^{a)} The line centers of ⁸⁴Kr are listed in Table 1.

^{b)} The asterisks in the third column indicate the line splitting used in the least squares fitting to obtain the nuclear hyperfine coupling constants of *A* and *B*.

Table A1 Continued-2.

Transition		Obsd. Shift ^{a)}	dev ^{b)}	
		[MHz]		
² P _{3/2} -Configuraton				
<i>J</i> " = 2				
5 <i>P</i> [1/2]1-5 <i>S</i> [3/2]2	892.9 nm			
	11/2-13/2	1642.4 (3.2)	0.4 *	
	9/2-11/2	619.7 (3.4)	-0.1 *	
	⁸⁶ Kr	61.8 (1.7)		
	⁸⁴ Kr	0.0		
	Unpertbd.	⁸³ Kr	-14.7 (0.8)	
		⁸² Kr	-58.7 (1.5)	
		⁸⁰ Kr	-128.3 (2.0)	
		11/2-11/2	-194.9 (7.4)	-6.2
		9/2-9/2	-723.5 (5.3)	-1.5 *
	c. r. N ($\begin{smallmatrix} 9/2-9/2 \\ 7/2-7/2 \end{smallmatrix}$)		-887.5 (2.3)	-0.2
			-1052.9 (4.9)	-0.3 *
	c. r. V ($\begin{smallmatrix} 9/2-9/2 \\ 11/2-9/2 \end{smallmatrix}$)		-1129.3 (3.8)	-3.0
			-1365.8 (3.2)	-0.2
	c. r. V ($\begin{smallmatrix} 7/2-7/2 \\ 9/2-7/2 \end{smallmatrix}$)		-1531.0 (2.2)	-0.4 *
			-1676.9 (6.6)	1.7 *
			-1708.3 (3.5)	0.3 *
5 <i>S</i> [3/2]1-5 <i>S</i> [3/2]2 Pseudo Transition				
5 <i>P</i> [5/2]2 (Λ)	9/2-5/2	2221.3	0.07 *	
	7/2-5/2	1623.9	-1.41 *	
	7/2-7/2	967.8	-1.38 *	
	9/2-9/2	606.7	2.04 *	
	11/2-11/2	262.9	0.17 *	
	⁸⁶ Kr	-34.5 (4.0)		
	⁸⁴ Kr	0.0		
	Unptbrbd.	⁸³ Kr	15.7 (3.1)	
		⁸² Kr	35.3 (2.7)	
		⁸⁰ Kr	67.5 (5.0)	
		9/2-11/2	-733.4	0.31 *
		11/2-13/2	-1569.8	2.15 *
	9/2-13/2	-2564.3	0.49 *	
5 <i>P</i> [3/2]1 (Λ)	9/2-5/2	2224.7	-3.33 *	
	11/2-9/2	1604.1	0.80 *	
	9/2-7/2	1569.3	-4.00 *	
	11/2-11/2	266.2	-3.13 *	
	⁸⁶ Kr	-30.3 (4.5)		
	⁸⁴ Kr	0.0		
	7/2-9/2	6.5	3.36 *	
	Unpertbd.	⁸³ Kr	16.0 (2.7)	
		⁸² Kr	29.9 (3.1)	
		⁸⁰ Kr	64.9 (5.0)	
		9/2-11/2	-736.6	3.51 *
		7/2-11/2	-1331.4	-0.57 *
	9/2-13/2	-2564.7	0.89 *	

Table A1 Continued-3.

Transition		Obsd Shift ^{a)}	dev ^{b)}
		[MHz]	
² P _{3/2} -Configuraton			
<i>J</i> " = 1			
Unptbrbd.	5P[3/2]2-5S[3/2]1	819.0 nm	
		9/2-11/2	(1072.2)
		7/2-9/2	(537.5)
		11/2-11/2	(475.5)
		5/2-7/2	281.2 (· ·)
		⁸⁶ Kr	103.8 (4.0)
		⁸⁴ Kr	0.0
		⁸³ Kr	-33.2 (3.1)
		⁸² Kr	-101.7 (2.7)
		⁸⁰ Kr	-211.7 (estmd)
		13/2-11/2	-275.2 (9.5)
	ov. lap	11/2-9/2	-517.5 (· ·)
		9/2-7/2	2.9
	5P[3/2]1-5S[3/2]1	829.8 nm	
		9/2-11/2	946.7 (3.4)
		7/2-9/2	675.2 (3.3)
		⁸⁶ Kr	103.9 (4.5)
		7/2-7/2	(73.0)
Unptbrbd.		⁸⁴ Kr	0.0
		⁸³ Kr	-32.5 (2.7)
		9/2-9/2	(-50.3)
		11/2-11/2	(-87.8)
		⁸² Kr	-101.1 (3.5)
		⁸⁰ Kr	-215.4 (3.5)
		9/2-7/2	-650.9 (3.7)
		11/2-9/2	-1086.5 (3.7)
	5P[5/2]2-5S[3/2]1	877.7 nm	
		9/2-11/2	(1312.3)
		7/2-9/2	891.4 (4.0)
		5/2-7/2	661.9 (5.0)
		11/2-11/2	454.7 (8.4)
Unptbrbd.		9/2-9/2	312.0 (10.0)
		7/2-7/2	-4.1
		⁸⁶ Kr	99.9 (2.2)
		⁸⁴ Kr	0.0
		⁸³ Kr	-34.4 (0.9)
		⁸² Kr	-98.1 (3.5)
		⁸⁰ Kr	-209.5 (estmd)
		9/2-7/2	(-282.8)
		11/2-9/2	-544.4 (5.4)
		13/2-11/2	-788.8 (5.5)

a) The line centers of ⁸⁴Kr are listed in Table 1.b) The asterisks in the third column indicate the line splitting used in the least squares fitting to obtain the nuclear hyperfine coupling constants of *A* and *B*.c) The hyperfine components of ⁸³Kr were difficult to detect except for the 13/2←11/2. The unperturbed line position was obtained using the hyperfine coupling constants¹⁴⁾ given by Cannon et al. for the 5P[3/2]2.

Table A2 Line splittings of the hyperfine components.

Transition	Obsd. Shift ^{a)}	dev ^{b)}
	[MHz]	
² P _{1/2} -Configuraton		
<i>J</i> " = 0		
5 <i>P</i> [1/2]1-5 <i>S</i> "[1/2]0 785.5 nm		
11/2-9/2	1001.9 (3.3)	0.2 *
c. r. V (11/2-)	362.2 (2.3)	-3.9
9/2-9/2		
⁸⁶ Kr	70.8 (3.0)	
⁸⁴ Kr	0.0	
Unpterbd. ⁸³ Kr	-24.6 (0.8)	
⁸² Kr	-70.5 (3.0)	
⁸⁰ Kr	-147.5 (3.0)	
9/2-9/2	-269.4 (5.8)	0.2 *
c. r. V (9/2-9/2)	-763.5 (6.1)	0.3
7/2-9/2	-1258.3 (4.1)	-0.4 *
5 <i>P</i> [3/2]1-5 <i>S</i> "[1/2]0 806.0 nm		
7/2-9/2	3164.9 (8.8)	0.2 *
9/2-9/2	549.7 (4.4)	0.2 *
⁸⁶ Kr	69.9 (3.0)	
⁸⁴ Kr	0.0	
Unpterbd. ⁸³ Kr	-14.7 (0.8)	
⁸² Kr	-65.7 (2.4)	
⁸⁰ Kr	-141.7 (4.0)	
11/2-9/2	-2604.9 (4.4)	-0.3 *
5 <i>S</i> "[1/2]1-5 <i>S</i> "[1/2]0 Pseudo Transition		
5 <i>P</i> [1/2]1 (Λ) 7/2-9/2	4036.0	-0.8 *
7/2-9/2	4037.0	0.2 *
9/2-9/2	826.2	0.6 *
⁸⁶ Kr	-29.6 (3.5)	
⁸⁴ Kr	0.0	
Unpterbd. ⁸³ Kr	16.7 (0.8)	
⁸² Kr	31.1 (3.8)	
⁸⁰ Kr	63.4 (4.5)	
11/2-9/2	-3338.1	2.1 *
11/2-9/2	-3338.1	2.1 *
5 <i>P</i> [3/2]1 (Λ) 7/2-9/2	4037.3	0.5 *
9/2-9/2	825.1	-0.5 *
⁸⁶ Kr	-32.4 (3.0)	
⁸⁴ Kr	0.0	
Unpterbd. ⁸³ Kr	14.6 (1.2)	
⁸² Kr	33.6 (3.5)	
⁸⁰ Kr	69.4 (4.4)	
11/2-9/2	-3341.8	-1.6 *
11/2-9/2	-3342.7	-2.5 *
ov. lap. 9/2-9/2	824.1	-1.5
ov. lap. 7/2-9/2	4031.7	-5.1

Table A2 Continued.

Transition	Obsd. Shift ^{a)}	dev ^{b)}
	[MHz]	
² P _{1/2} -Configuraton		
<i>J</i> " = 1		
5 <i>P</i> "[1/2]0-5 <i>S</i> "[1/2]1 768.5 nm		
9/2-11/2	3327.6 (5.6)	0.0 *
⁸⁶ Kr	105.5 (4.1)	
⁸⁴ Kr	0.0	
Unpterbd. ⁸³ Kr	-28.2 (0.8)	
⁸² Kr	-102.1 (3.5)	
⁸⁰ Kr	-214.5 (3.6)	
9/2-9/2	-837.9 (7.1)	0.4 *
9/2-7/2	-4049.8 (4.8)	-0.4 *
5 <i>P</i> "[3/2]2-5 <i>S</i> "[1/2]1 826.3 nm		
9/2-11/2	4178.4 (3.5)	-0.8 *
11/2-11/2	2583.6 (2.0)	-2.6 *
7/2-9/2	1331.4 (4.1)	-1.9 *
13/2-11/2	732.2 (2.1)	-0.2 *
⁸⁶ Kr	101.1 (3.1)	
9/2-9/2	(13.4)	
⁸⁴ Kr	0.0	
Unpterbd. ⁸³ Kr	-30.0 (0.8)	
⁸² Kr	-99.2 (3.2)	
⁸⁰ Kr	-208.7 (2.2)	
5/2-7/2	-839.8 (3.5)	1.1 *
11/2-9/2	-1577.3 (5.4)	2.3 *
7/2-7/2	-1877.3 (7.0)	0.5 *
9/2-7/2	-3195.7 (7.0)	2.1 *
5 <i>P</i> "[1/2]1-5 <i>S</i> "[1/2]1 828.1 nm		
11/2-11/2	4340.0 (5.7)	-1.0 *
9/2-11/2	3068.8 (4.0)	-0.9 *
11/2-9/2	(174.6)	
⁸⁶ Kr	100.4 (3.5)	
⁸⁴ Kr	0.0	
Unpterbd. ⁸³ Kr	-41.3 (0.9)	
⁸² Kr	-101.6 (3.8)	
⁸⁰ Kr	-210.9 (4.5)	
11/2-9/2	(-1096.4)	
7/2-9/2	-2084.8 (5.9)	-0.3 *
9/2-7/2	-4306.4 (5.9)	0.8 *
c. r. V (9/2-7/2)	-4798.4 (7.0)	3.0
7/2-7/2	-5294.3 (5.9)	1.3 *
5 <i>P</i> "[3/2]1-5 <i>S</i> "[1/2]1 850.9 nm		
9/2-11/2	3891.5 (9.4)	0.7 *
7/2-9/2	2339.8 (9.4)	-0.4 *
11/2-11/2	737.8 (5.2)	1.1 *
⁸⁶ Kr	102.3 (2.2)	
⁸⁴ Kr	0.0	
Unpterbd. ⁸³ Kr	-29.3 (1.2)	
⁸² Kr	-99.3 (3.5)	
⁸⁰ Kr	-211.1 (4.4)	
9/2-9/2	(-275.0)	
7/2-7/2	-872.4 (4.5)	-1.5 *
11/2-9/2	-3429.0 (10.1)	0.2
ov.lap. { 9/2-7/2	-3482.0 (10.1)	4.1

a) The line centers of ⁸⁴Kr are listed in Table 1.b) The asterisks in the third column indicate the line splitting used in the least squares fitting to obtain the nuclear hyperfine coupling constants of *A* and *B*.

参考文献

- 1) 加藤, 西宮, 鈴木, “0.8 μ m 領域における Ar I の飽和吸収スペクトル”, 第 50 回応物理学講演(神奈川大), 29a-YR-3, Mar. (2003).
- 2) 加藤, 西宮, 鈴木, “Kr の 5S11 および 5S’01 準位を基点とする電子遷移の飽和吸収スペクトル”, 第 49 応物連合講演(東海大), 28p-ZG-14, Sept. (2002).
- 3) K. Katoh, N. Nishimiya and M. Suzuki, “Saturated Absorption Spectroscopy of Kr Using a GaAs Semiconductor Laser”, 8th Euro. Conf. Atom. Mol. Phys. (Rennes), 2-19, July (2004).
- 4) M. Suzuki, K. Katoh and N. Nishimiya, “Saturated Absorption Spectroscopy of Xe Using a GaAs Semiconductor Laser”, *Spectrochim. Acta, A* **58**, 2519-2531 (2002).
- 5) H. M. Grosswhite and D. H. Dieke, “Important Atomic Spectra”, in D.E.Gray (Ed.), “*Am. Inst. Phys. Handbook*”, 2nd Ed. McGraw-Hill, N.Y. Ch. **7g**, 7-43 – 7-44 (1963).
- 6) V. Kaufman and C. Humphreys, “Accurate Energy Levels and Calculated Wavelengths of ^{86}Kr ”, *J. Opt. Soc. Am.* **59**, 1614-1618 (1969).
- 7) C.J.Humphreys and E.Paul.Jr., “Interferometric Observations in the Spectra of ^{86}Kr ”, *J. Opt. Soc. Am.* **60**, 200-205 (1970).
- 8) D. A. Jackson, “Hyperfine structure in the arc spectrum of ^{83}Kr ”, *J. Opt. Soc. Am.* **67**, 1638-1640 (1977).
- 9) D. A. Jackson, “Isotope shifts in the near infrared lines of the arc spectrum of krypton”, *J. Opt. Soc. Am.* **69**, 503-511 (1979).
- 10) V. Kaufman, “Wavelengths and Energy Levels of Neutral Kr^{84} and Level Shift in All Kr Even Isotopes”, *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.* **98**, 717-724 (1993).
- 11) J. R. Brandenberger, “Hyperfine splittings in $4p^55p$ configuration of ^{83}Kr using saturated absorption laser spectroscopy”. *Phys. Rev. A* **39**, 64-68 (1989).
- 12) S. C. Parker and J. R. Brandenberger, “Hyperfine structure in the $4p^55p$ configuration of ^{83}Kr ”, *Phys. Rev. A* **44**, 3354-3357 (1991).
- 13) H. A. Schuessler, A. Alousi, R. M. Evans, M. Brieger, F. Buchinger, and Y. F. Li, “Isotope Shifts and Nuclear Charge Radii of Krypton Isotopes across the $N=50$ Shell Closure”, *Phys. Rev. Lett.* **65**, 1332-1335 (1990).
- 14) B. D. Cannon and G. R. Janik, “Hyperfine splittings and isotope shifts in eight transitions from the metastable $4p^55s \ J=2$ and $J=0$ states of Kr I ”, *Phys. Rev. A* **42**, 397-402 (1990).
- 15) B. D. Cannon, “Hyperfine spectra of the radioactive isotopes ^{81}Kr and ^{85}Kr ”, *Phys. Rev. A* **47**, 1148-1158 (1993).
- 16) M. Keim, E. Arnold, W. Brochers, U. Georg, A. Klein, R. Neugart, L. Vermeeren, R.E. Silverans, and P.Lieven, “Laser-Spectroscopy measurements of $^{72-96}\text{Kr}$ spins, moments and charge radii”, *Nucl. Phys. A* **586**, 219-239 (1995).
- 17) J. R. Fuhr and W. L. Wiese, “NIST Atomic Transition Probability Tables”, in D.E.Lide (Ed.), 79th Ed. “*CRC Handbook of Chemistry and Physics*.” CRC Press, Boston, **10**-114 (1998-1999)
- 18) G. P. Barwood, P. Gill, W. R. C. Rowley, “Frequency Measurements Optically Narrowed Rb-Stabilized Laser Diodes at 780nm and 795nm”, *Appl. Phys. B* **53**, 142- (1991).
- 19) G. W. Emery, “Hyperfine Structure”, in G. W. Drake (Ed.) “*Atomic, Molecular, & Optical Physics Handbook*”, AIP Press, N.Y. Ch. 16, 198-205 (1995).
- 20) W. L. Faust and L. Y. C. Chiu, “Hyperfine Structure of the Metastable $(4p^5(5s)^3P_2$ State of ^{83}Kr ”, *Phys. Rev.* **129**, 1214-1220 (1963).
- 21) X. Husson, J-P. Grandin and H. Kucal, “Hyperfine structure in $4p^55p$ configuration of ^{83}Kr ”, *J. Phys. B: Atom. Mol. Phys.* **12**, 3383-3389 (1979).
- 22) T. Tricket, M. J. J. Vrakking, E. Cromwell, Y. T. Lee and A. H. Kung, “Ultrahigh-resolution (1+1) photoionization spectroscopy of Kr I: hyperfine structures, isotope shifts, and lifetimes for the $n = 5, 6, 7 \ 4p^5ns$ Rydberg levels”, *Phys. Rev. A* **39**, 2498-2955 (1989).
- 23) W. H. King, “*Isotope Shifts in Atomic Spectra*”, Plenum Press, N.Y. (1984).
- 24) H. Gerhardt, E. Matthias, H. Rinneberg, and F. Schneider, “Nuclear Mean Square Charge Radii of Stable Krypton Isotopes”, *Z. Phys. A* **292**, 7-14 (1979).
- 25) G. Fricke, C. Bernhardt, K. Heilig, E. B. Shera, and C. W. DeJager, “High-resolution vacuum-ultraviolet and ultraviolet photoionization spectroscopy of krypton”, *At. Data, Nucl. Data Tabl.* **60**, 177-285 (1995).
- 26) F. Brandi, W. Hoger-vorst and W. Ubachs, *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **35**, 1071-1084 (2002).