# Comprehensive Analysis of Electroweak Observables

| | |
|---|---|
| 氏　　　名 | 松本成司 |
| 生年月日 | |
| 本　　　籍 | 大阪府 |
| 学位の種類 | 博士(理学) |
| 学位記番号 | 博甲第136号 |
| 学位授与の日付 | 平成7年3月25日 |
| 学位授与の要件 | 課程博士（学位規則第4条第1項) |
| 学位授与の題目 | Comprehensive Analysis of Electroweak Observables<br>(電弱観測量の包括的解析) |
| 論文審査委員 | (主査)　鈴木恒雄<br>(副査)　青木健一，末松大二郎<br>久保治輔，田村博志 |

# 学位論文要旨

**Abstract** We present a new framework to confront electroweak theory and experimental data. Four process-independent form-factors $\bar{e}^2(q^2)$, $\bar{s}^2(q^2)$, $\bar{g}^2_Z(q^2)$ and $\bar{g}^2_W(q^2)$ corresponding to the $\gamma\gamma$, $\gamma Z$, $ZZ$ and $WW$ propagators, and additionally one vertex form-factor $\bar{\delta}_b(q^2)$ corresponding to the $Zb_Lb_L$ vertex, are introduced in generic $SU(2)_L \times U(1)_Y$ theories to estimate magnitudes of radiative corrections both from the Standard Model (SM) and from new physics. By assuming SM dominance to the remaining vertex and box corrections, these form-factors are determined at specific energies ($q^2 \approx 0$ and $q^2 = m_Z^2$) by fitting to all available precision experiments. These values are then compared systematically with theoretical predictions. The uncertainties due to the QCD and QED effective couplings, $\alpha_s(m_Z)$ and $\bar{\alpha}(m_Z^2)$, are examind in detail. For $\alpha_s(m_Z)=0.116$ and $1/\bar{\alpha}(m_Z^2)=128.72$, no deviation from the SM is observed in the universal form factors, while $\bar{\delta}_b(m_Z^2)$ is found larger than the SM prediction by 2 standard deviations if we take the top mass reported by CDF($m_t = 174 \pm 16$GeV). Within the SM, we find the 90%CL constraints; 133 GeV $< m_t <$ 190GeV and 10GeV$< m_H <$440GeV for the above $\alpha_s(m_Z)$ and $\bar{\alpha}(m_Z^2)$. If $m_t$ is precisely known, the present electroweak data give a rather strict upper bound on the Higgs mass, $m_H <140$ (300)GeV at 95% CL, for $m_t=160\,(175)$ GeV and for the above $\alpha_s(m_Z)$ and $\bar{\alpha}(m_Z^2)$.

現在に至るまで標準理論と明らかに矛盾する実験は観測されていない。しかし標準理論自身さまざまな不満な点があり，超対称理論などのそれを越える物理がこれまで提案されてきた。一方，近年LEP/SLCにおける加速器実験は驚くほど精度があがり，新しい理論が予言する新粒子を，将来の超高エネルギー加速器で直接探索する以前に，それらの量子効果（輻射補正）を通じて調べられる可能性がでてきた。そこで我々は，標準理論を越える広い範囲の新しい物理に対応できる電弱理論の輻射補正の枠組を完成させ，それに基づいて，現在得られるすべての精密実験の結果を包括的に整理した。

我々のアプローチでは1ループの輻射補正を外線のフェルミオンの種類に依存する部分（バーテックス，ボックス補正）と依存しない普遍的な部分（ゲージボゾンのプロパゲータ補正）とに分ける。

ゲージ群を SU(2)×U(1) に限れば，後者は 4 つのゲージボソンのプロパゲータ ($\gamma\gamma$, $\gamma Z$, $ZZ$, $WW$) に付随してゲージ不変に定義された 4 つの形状因子 $\bar{e}^2(q^2)$, $\bar{s}^2(q^2)$, $\bar{g}_Z^2(q^2)$, $\bar{g}_W^2(q^2)$ を使って表すことができる。以下で述べるように，これらの 4 つの形状因子はその全てを $q^2\approx 0$ において，また $\bar{s}^2(q^2)$ と $\bar{g}_Z^2(q^2)$ の 2 つについてはさらに $q^2=m_Z^2$ において精度よく決めることができる。これら 6 つの測定量と 2 つのゲージボソンの質量 $m_Z$, $m_W$ をあわせると電弱理論を検証するために精度よく計られている普遍的なパラメータは全部で 8 個ある ($\bar{e}^2(0)$, $\bar{s}^2(0)$, $\bar{g}_Z^2(0)$, $\bar{g}_W^2(0)$, $\bar{s}^2(m_Z^2)$, $\bar{g}_Z^2(m_Z^2)$, $m_Z$, $m_W$)。1 つの真空期待値により自発的に破れる SU(2)×U(1) ゲージ理論では一般に tree レベルのゲージボソンの性質は 3 つのパラメータにより決めるが，これらを $\alpha\equiv\bar{e}^2(0)/4\pi$, $G_F\equiv\bar{g}_W^2(0)(1+\bar{\delta}_G)/4\sqrt{2}m_W^2$, $m_Z$ に選ぶと残り 5 個のパラメータ ($\bar{s}^2(0)$, $\bar{g}_Z^2(0)$, $\bar{g}_W^2(0)$, $\bar{s}^2(m_Z^2)$, $\bar{g}_Z^2(m_Z^2)$) を使って量子レベルで電弱理論を検証することができる。ここで $\bar{\delta}_G$ は $\mu$- 崩壊におけるバーテックスとボックス補正の和で，標準理論の値は $\bar{\delta}_G=0.0055$ である。以下，これらの普遍形状因子を用いた精密実験のデータの系統的解析について説明する。

各段階で，$\alpha_s$ は外部パラメータとして取り扱う。また，$q^2=m_Z^2$ での QED の有効結合 $\bar{\alpha}(m_Z^2)\equiv\bar{e}^2(m_Z^2)/4\pi$ については標準理論でもハドロンの不定性がかなりあるので $1/\bar{\alpha}(m_Z^2)=128.72+\delta_\alpha$ とおいて，その不定性による影響 ($\delta_\alpha$ 依存性) を吟味する。現在の標準理論での値は，$\delta_\alpha=0\pm0.10$である。

まず，バーテックスおよびボックス補正に対しては標準理論の効果が支配的であると仮定して，普遍パラメータ $\bar{g}_Z^2(m_Z^2)$ と $\bar{s}^2(m_Z^2)$ を LEP/SLC における $Z$ 粒子の崩壊幅や非対称パラメータの測定から決定する。また $\bar{g}_Z^2(0)$ と $\bar{s}^2(0)$ を $\nu_\mu-q$ 散乱, $\nu_\mu-e$ 散乱, 原子核におけるパリティー非保存 (APV) および偏極 eD 散乱の 4 つの低エネルギー中性カレントの実験から，そして $\bar{g}_W^2(0)$ を $p\bar{p}$ コライダーにおける $W$ の質量測定から決定する。ただし $Zb_Lb_L$ バーテックス補正の大きさは，標準理論においてあまりよく知られていないパラメータであるトップ・クォークの質量 ($m_t$) に強く依存するので，バーテックス形状因子 $\bar{\delta}_b(q^2)$ を導入し，これも $q^2=m_Z^2$ で同時に実験から定める。$Z$ パラメータから決めた $\bar{g}_Z^2(m_Z^2)$, $\bar{s}^2(m_Z^2)$, $\bar{\delta}_b(m_Z^2)$ の 1 -$\sigma$ の contour を図 1 に示す。現在知られている $O(m_t^4)$ や $O(\alpha\alpha_s)$ の 2 -loop 補正を含めた標準理論の予測も一緒に示してある (図は $\delta_\alpha=0$ での計算)。fit の結果は図 1 でみるように $\alpha_s$ に依存しているが，特に $\bar{\delta}_b(m_Z^2)$ はこの依存性が強い。また fit の $\chi^2_{\min}/(\mathrm{d.o.f.})$ は $[11.4+(\frac{\alpha_s-0.1116}{0.0093})^2]/8$ である。図 2 には低エネルギー中性カレントの各々の実験からきめた普遍パラメータ $\bar{s}^2(0)$, $\bar{g}_Z^2(0)$ の 1-$\sigma$ の contour を示してある。破線は，$\bar{\rho}\equiv\bar{g}_Z^2(0)/(4\sqrt{2}G_Fm_Z^2)=1$ (標準理論の tree レベルの予想) を示す。また太い実線はこれらの 4 つの実験を合わせた fit の 1-$\sigma$ の contour を表す。この fit の $\chi_{\min}/(\mathrm{d.o.f.})$ は 2.2/7 である。各々のセクターにおいて SU(2)×U(1)普遍性の仮定，およびバーテックス，ボックス補正は標準理論が支配的であるという仮定は $\alpha_s$ の広い範囲で結果と矛盾していない。ただし，$\bar{\delta}_b(m_Z^2)$ は $\alpha_s$ と強い相関があり，Particle Data Group の平均値 $\alpha_s=0.116$ に対しては標準理論よりおよそ 2-$\sigma$ 大きい値が得られた。

4 つの普遍形状因子のうち $\bar{g}_Z^2(q^2)$ と $\bar{s}^2(q^2)$ についてはその $q^2=m_Z^2$ での値と $q^2=0$ での値が決定されるので，次の段階としてそれらの $q^2$- 依存性を標準理論と比較する。比較的軽い ($\lesssim m_Z$) 新粒子が存在すれば $q^2$ 依存性の標準理論からずれが期待できる。図 3 では LEP/SLC の実験から決まった $\bar{g}_Z^2(m_Z^2)$, $\bar{s}^2(m_Z^2)$ の値と，低エネルギー中性カレントの実験で決まった $\bar{g}_Z^2(0)$, $\bar{s}^2(0)$ から $q^2$- 依存性については標準理論を仮定して求めた $\bar{g}_Z^2(m_Z^2)$, $\bar{s}^2(m_Z^2)$ の値とを比較してある。標準理論の $q^2$- 依存性は 100GeV$<m_t<$200GeV, 100GeV$<m_H<$1000GeV とおいて計算してあるが，図でみるように $m_t$ と $m_H$ に対する依存性は小さい。また図からわかるようにこれら 2 つの普遍形状因子の $q^2$- 依存性は 1-$\sigma$ の範囲で標準理論と矛盾していない。

さらに次の段階として $\bar{s}^2(q^2)$ と $\bar{g}_Z^2(q^2)$ の $q^2$- 依存性については標準理論を仮定した解析をする。この段階では実際に理論を検証する普遍的パラメータの数は 5−2=3 となる。これらの 3 つのパラメータに関しては Peskin-Takeuchi, Altarelli-Barbieri, あるいはその他のいくつかのグループが提案しているが，我々は標準理論の寄与も含めて Peskin-Takeuchi の $S,T,U$ パラメータを再定義し，これ

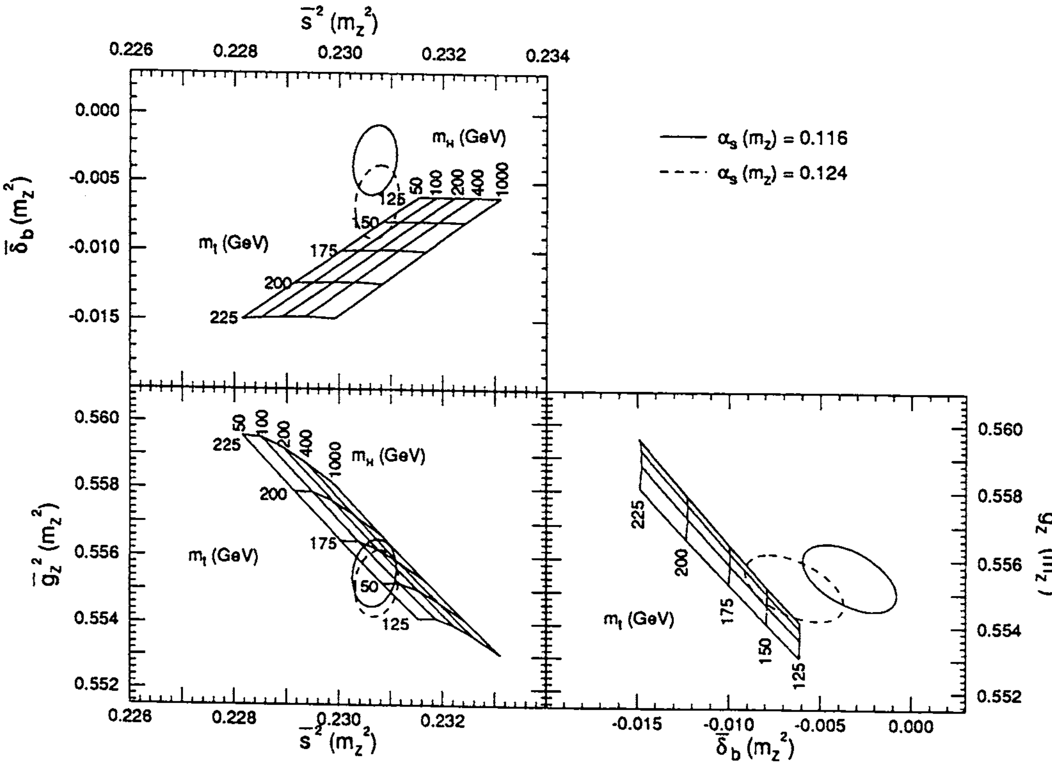


**図 1** ： $Z$パラメータ測定からの3変数 ($\bar{g}_Z^2(m_Z^2)$, $\bar{s}^2(m_Z^2)$, $\bar{\delta}_b(m_Z^2)$) fit および標準理論の予測。3平面, ($\bar{s}^2(m_Z^2)$, $\bar{g}_Z^2(m_Z^2)$), ($\bar{s}^2(m_Z^2)$, $\bar{\delta}_b(m_Z^2)$), ($\bar{\delta}_b(m_Z^2)$, $\bar{g}_Z^2(m_Z^2)$), において $\alpha_s=0.116$ および $\alpha_s=0.124$ の場合の 1-$\sigma$ contour を示してある。標準理論の予想（格子）は 125GeV$<m_t<$225GeV, 50GeV$<m_H<$1000GeV の範囲で $\delta_\alpha \equiv 1/\bar{\alpha}(m_Z^2)-128.72=0$ とおいて計算した。

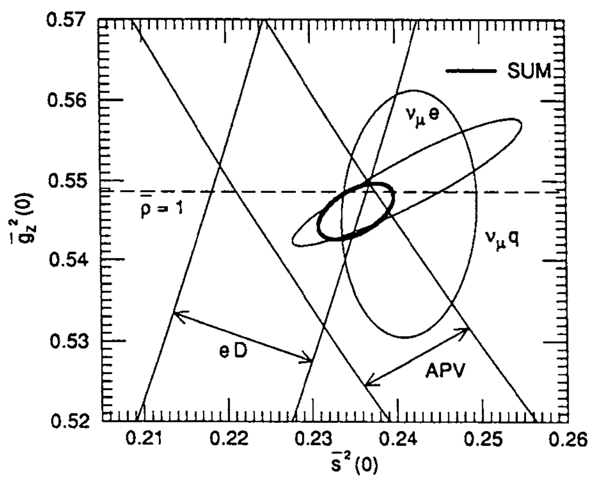


**図 2** ：低エネルギー中性カレントの実験の2変数 ($\bar{g}_Z^2(0)$, $\bar{s}^2(0)$)fit。各々の実験からつけられる1-$\sigma$ の制限。太線の contour は4実験を合わせて fit した結果。

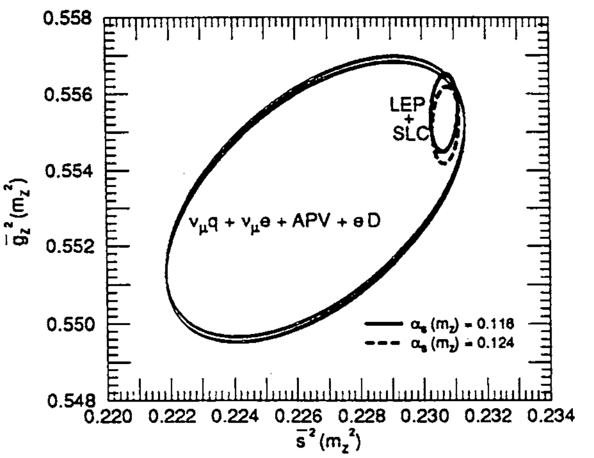


**図 3** ：低エネルギー中性カレントの実験と $Z$-pole 実験 (LEP/SLC) との比較。低エネルギー中性カレントの実験から決めた ($\bar{s}^2(0)$, $\bar{g}_Z^2(0)$) を標準理論の $q^2$-依存性を仮定して $q^2=m_Z^2$ にリスケールした。この際に $m_t$ と $m_H$ の不定性については $m_t=100$, 200GeV and $m_H=60$, 1000GeV, について計算したが図のようにこれらの $m_t$, $m_H$ 依存性は無視できる。

らを精密実験から決定した。この際，QEDの有効結合 $\bar{\alpha}(m_Z^2)$ の不定性による影響も吟味した。特に$S$は $\bar{\alpha}(m_Z^2)$ に対して敏感である。図4では，$\bar{\delta}_b(m_Z^2)$ を外部パラメータとして1-$\sigma$のcontourを $(S,\ T)$ 平面で示してある。得られた$S$の値は，0から外れていないが，単純なTechnicolor模型に対してはかなり厳しい制限を与える。$U$は$G_F$と$m_W$から決まるが，0からずれていない。

最終段階として，標準理論を仮定する。$\bar{g}_Z^2(m_Z^2)$, $\bar{s}^2(m_Z^2)$, $\bar{\delta}_b(m_Z^2)$, $\bar{g}_Z^2(0)$, $\bar{s}^2(0)$, $\bar{g}_W^2(0)$ はすべて$m_t$と$m_H$の関数として表せるので，逆に実験から決めた上の結果を使って$m_t$と$m_H$に対する制限を与えることができる。図5では $\alpha_s=0.116$(a), 0.124(b)のそれぞれの値に対して $\Delta\chi^2\equiv\chi^2-\chi^2_{\min}=1$ および $\Delta\chi^2=4.61$ を与える$m_t$と$m_H$のcontourを示す($\delta_\alpha=0$の場合)。ここで得られた$m_t$の値は最近CDFで報告された値，$m_t=174\pm16$GeV，と矛盾しない。また$m_t$と$m_H$は非常に強い相関を持っており，将来$p\bar{p}$コライダーで$m_t$が精度良く測定されたならば，$m_H$に対するさらに厳しい制限がつけ

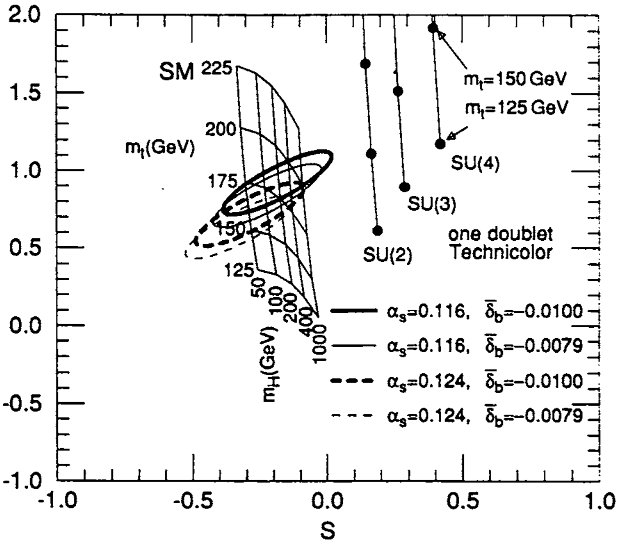


**図4**：普遍パラメータ$(S, T)$に対する制限。2変数fitの1-$\sigma$ contourおよび標準理論の予想($\delta_\alpha\equiv1/\bar{\alpha}(m_Z^2)-128.72=0$を仮定)を示す。標準理論では外部パラメータ $\bar{\delta}_b=\bar{\delta}_b(m_Z^2)$ の値，$\bar{\delta}_b=-0.0079$と$-0.0100$は$m_t=150$GeVと175GeVにそれぞれ相当する。$\delta_\alpha=\pm0.1$に対して$S$の平均値は$\pm0.07$シフトする。

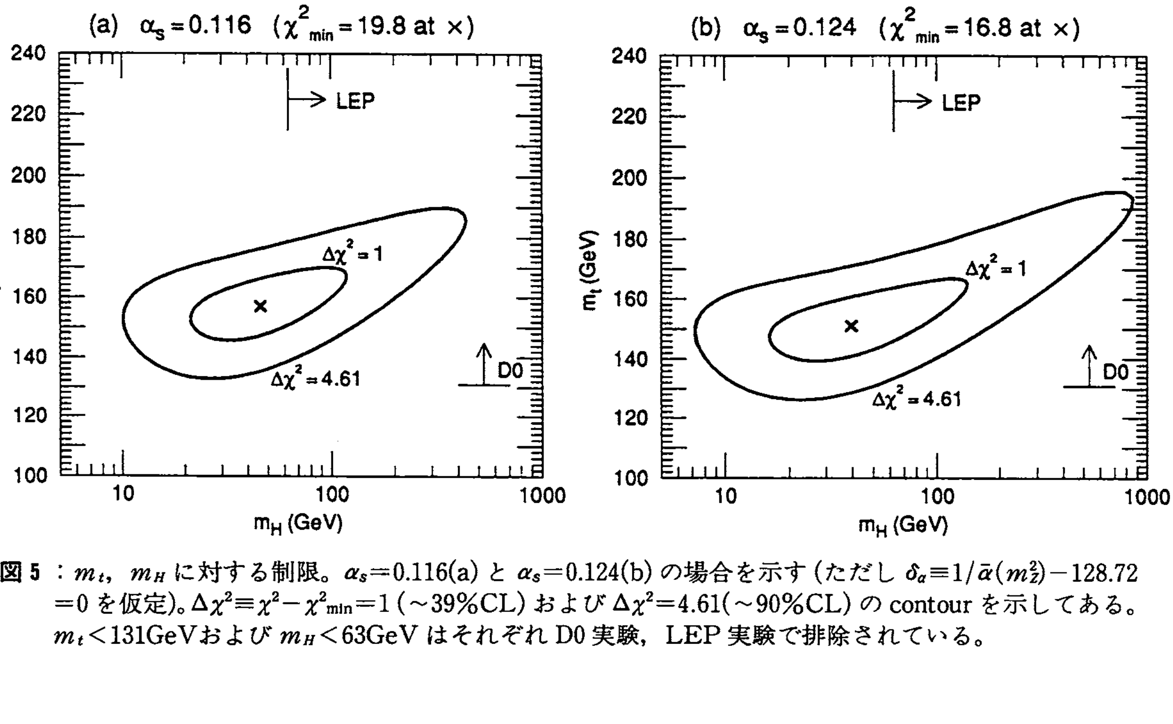


**図5**：$m_t$, $m_H$に対する制限。$\alpha_s=0.116$(a)と$\alpha_s=0.124$(b)の場合を示す(ただし$\delta_\alpha\equiv1/\bar{\alpha}(m_Z^2)-128.72=0$を仮定)。$\Delta\chi^2\equiv\chi^2-\chi^2_{\min}=1$ (~39%CL)および $\Delta\chi^2=4.61$(~90%CL)のcontourを示してある。$m_t<131$GeVおよび$m_H<63$GeVはそれぞれD0実験，LEP実験で排除されている。

られる。$\alpha_s(m_Z)=0.116$, $1/\bar{\alpha}(m_Z^2)=128.72$ では, $m_t=160(175)$GeV に対して, 95%CL で $m_H<140(300)$GeV を得た。

我々はこれらの一連の解析の$\alpha_s$依存性や $\bar{\alpha}(m_Z^2)$ に対するハドロン寄与の不定性について定量的に吟味した。現在のところ標準理論を越える新しい物理のヒントを同定することはできないが，我々の理論的枠組は，広い範囲の新しい物理に対応することができ，実験結果の解析を非常に見通しのよいものにするものである。

## 学位論文の審査結果の要旨

本審査委員会は，審査の結果，上記学位論文に関して以下のように判定した。

現在，素粒子物理学において，強・弱・電磁相互作用を記述する標準理論として，SU(3)×SU(2)×U(1)のゲージ理論がほぼ確立している。しかし，この標準理論は，いくつか不満な点を残しており，超対称理論，超弦理論，テクニカラー理論など背景にあるより基本的な理論の 100GeV 程度のエネルギー領域での低エネルギー有効理論とみなす考え方が主流となっている。この考え方を検証するには，新しい理論が予言する新粒子をよりエネルギーをあげた新加速器で発生させ直接探索するのが確実であるが，実際上様々な困難がある。一方，既存の加速器の実験は近年驚くほど精度が上がり，エネルギー的には不足でも新粒子を量子効果によって調べる可能性がでてきている。そこで，この論文は，標準理論を超える広い範囲の新しい理論に対応できる弱い相互作用・電磁相互作用の理論の量子効果（輻射補正）の枠組みを完成させ，それに基づいて現在得られる全ての精密実験の結果を包括的に整理することを行った。手法の特徴として，外線のフェルミオンの種類に依存しない普遍的輻射補正の部分に着目し，理論を検証することを試みた。1）まず理論の定式化を行ったあと，パラメーターを現在得られる精密実験の結果から決定した。2）その結果を使い，標準理論との種々の比較，また全て標準理論が正しいと仮定したときのトップクォークとヒッグス粒子の質量に対する新しい制限を見つけた。

上記の新しく得られた結果は，精密実験の解析による輻射補正の効果によって標準理論を超える新理論探しについて有望な可能性を与えるものであり，大変に期待できるものである。

本論文は，参考論文や副論文の内容を中心に，関連する他の研究のレビューを含めて筋道を立ててまとめられている。またこれらの仕事に関して，研究会でのレビュートークとか雑誌「パリティ」に紹介記事を頼まれるなど本人がこの分野で立派に一人前の研究者として成長していることがうかがい知れる。

以上の点から委員会は本論文が博士論文として値すると結論した。