

# 卒業研究発表

## ハイパーカミオカンデ光電子増倍管の 出力線形性向上

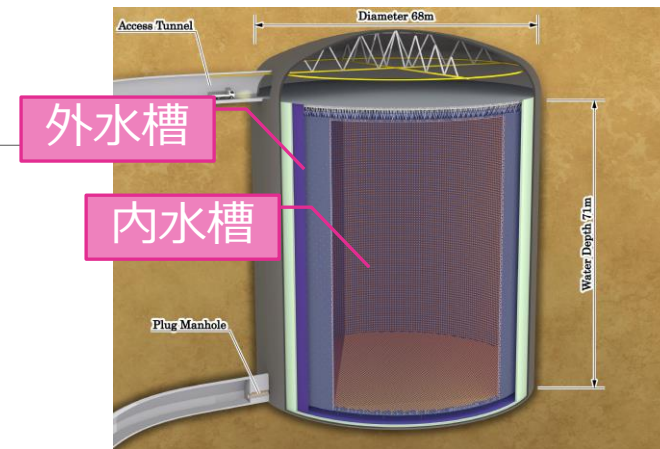
---

西村研究室  
慶應義塾大学工学部物理学科4年

61716180  
藤澤千緒里

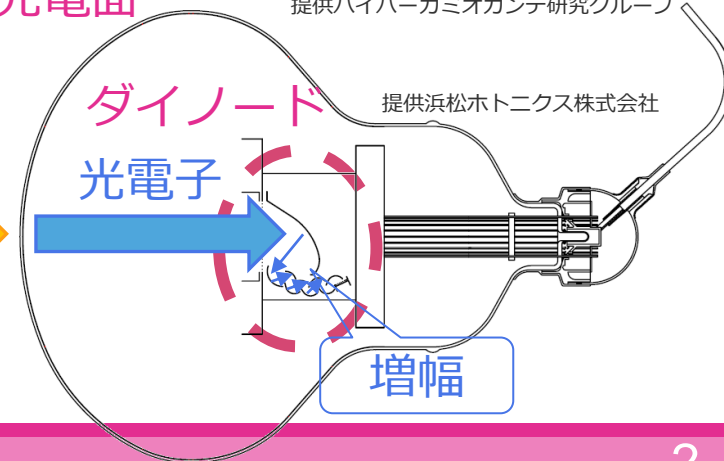
# 導入

- \* ハイパーカミオカンデ（2027年（予定）～）
- \* 岐阜県の神岡鉱山に建設中の水チェレンコフ検出器
  - \* ニュートリノの混合パラメータ
  - \* CP対称性の破れ
  - \* 陽子崩壊
- \* スーパーカミオカンデの後継（5倍のサイズ）
  - \* ニュートリノ振動の発見→2015年ノーベル物理学賞
- \* 光検出器：光電子増倍管
  - \* 内水槽に40,000本、外水槽に6,700本
  - \* 光電面で光子を電子に変換、ダイノードで増幅して出力
  - \* スーパーカミオカンデの2倍の感度
  - \* 増幅率（ゲイン）： $1 \times 10^7$ （印加電圧：2000 V）
  - \* 出力→荷電粒子の運動量やエネルギー
- \* 10倍の統計数→高統計→系統誤差の割合大



提供ハイパーカミオカンデ研究グループ

光電面



# 目的

---

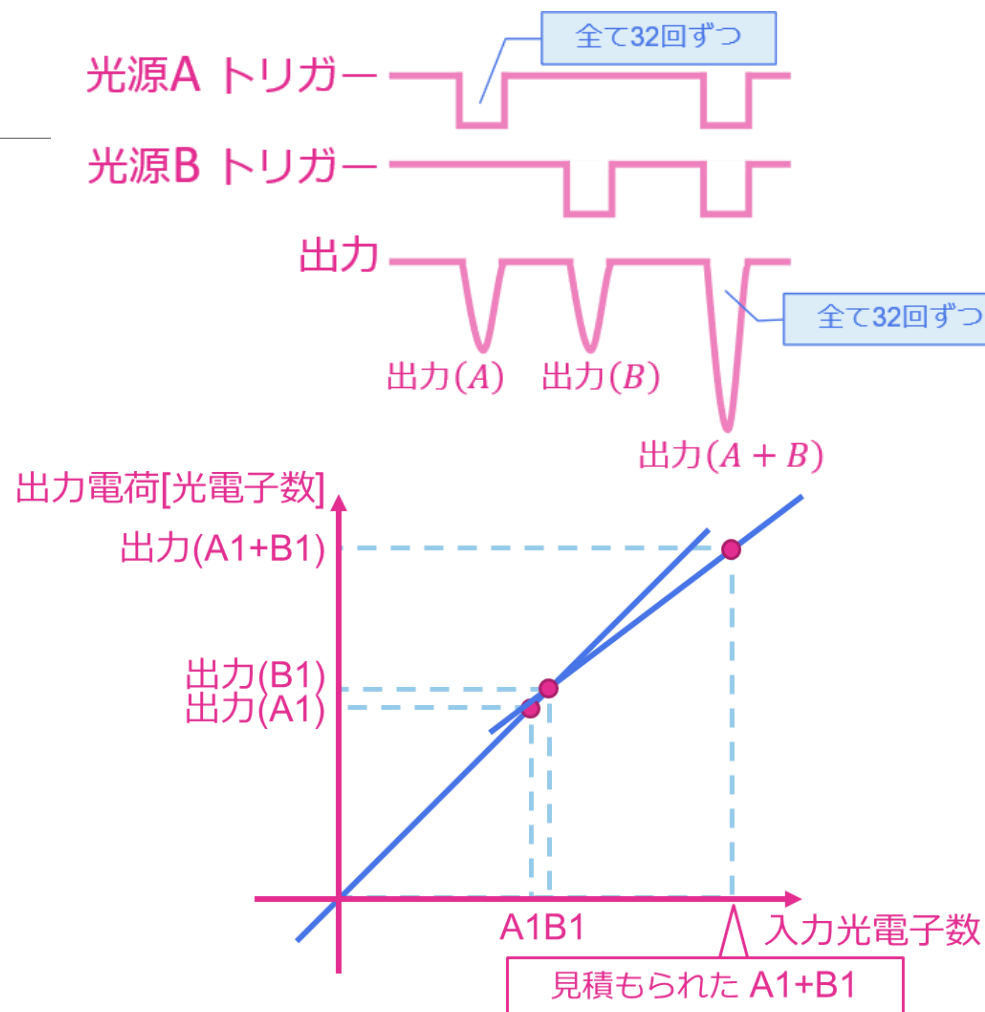
- \* 理想的には  $\text{出力} = \text{入力} \times \text{定数}$
- \* 光電子増倍管の出力は数%程度変動する
- \* ずれ具合に個体差があると補正が不可能
- \* 今後数十年の高精度測定のために線形に近づけたい

# 発表内容

---

- \* 光電子増倍管の出力非線形性の測定
- \* シミュレーションの試み
- \* 回路の改良の試み

# 測定方法

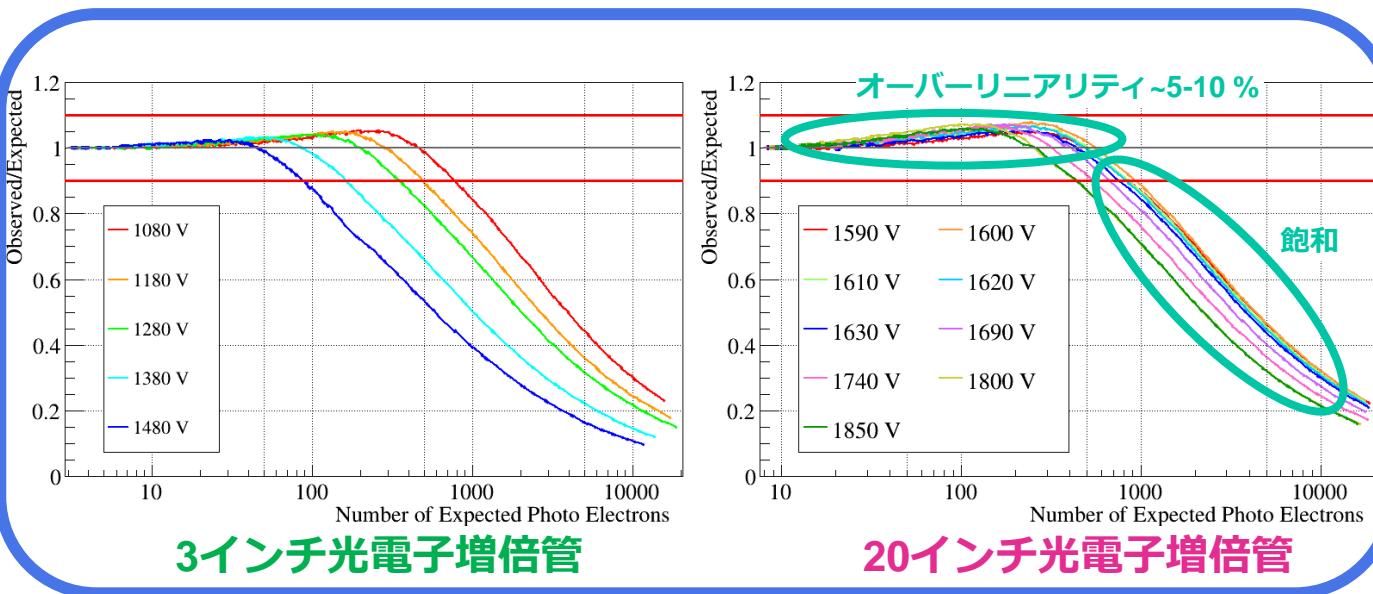


線形性からのずれ  $D_i$

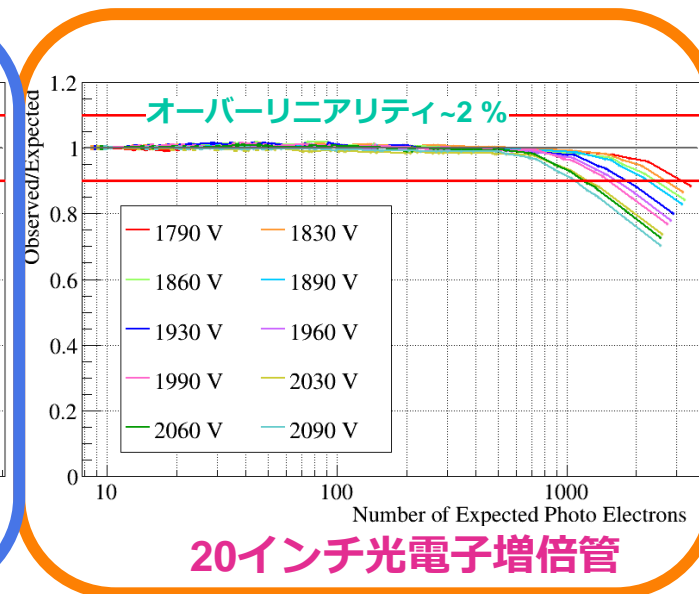
$$D_i = \frac{\text{Output}(A_i + B_i)}{D_{i-1} \times \text{Output}(A_i) + D_{i-1} \times \text{Output}(B_i)}$$

# 出力非線形性の測定結果

## ハイパーカミオカンデ



## スーパーカミオカンデ



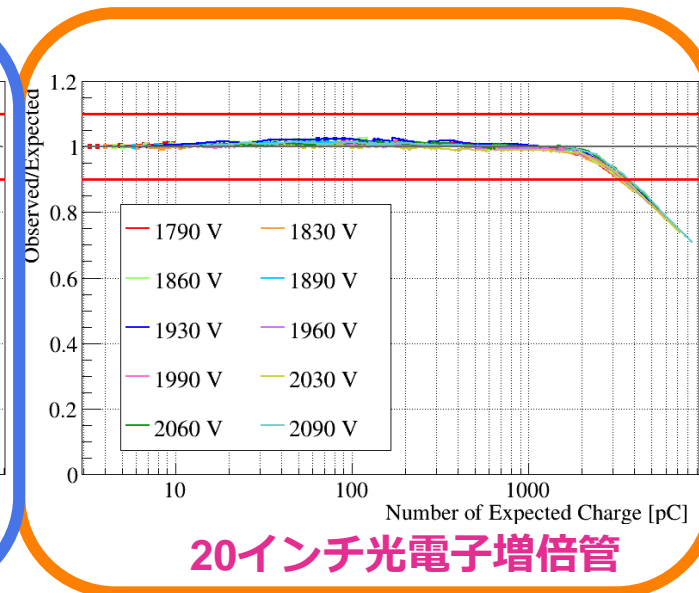
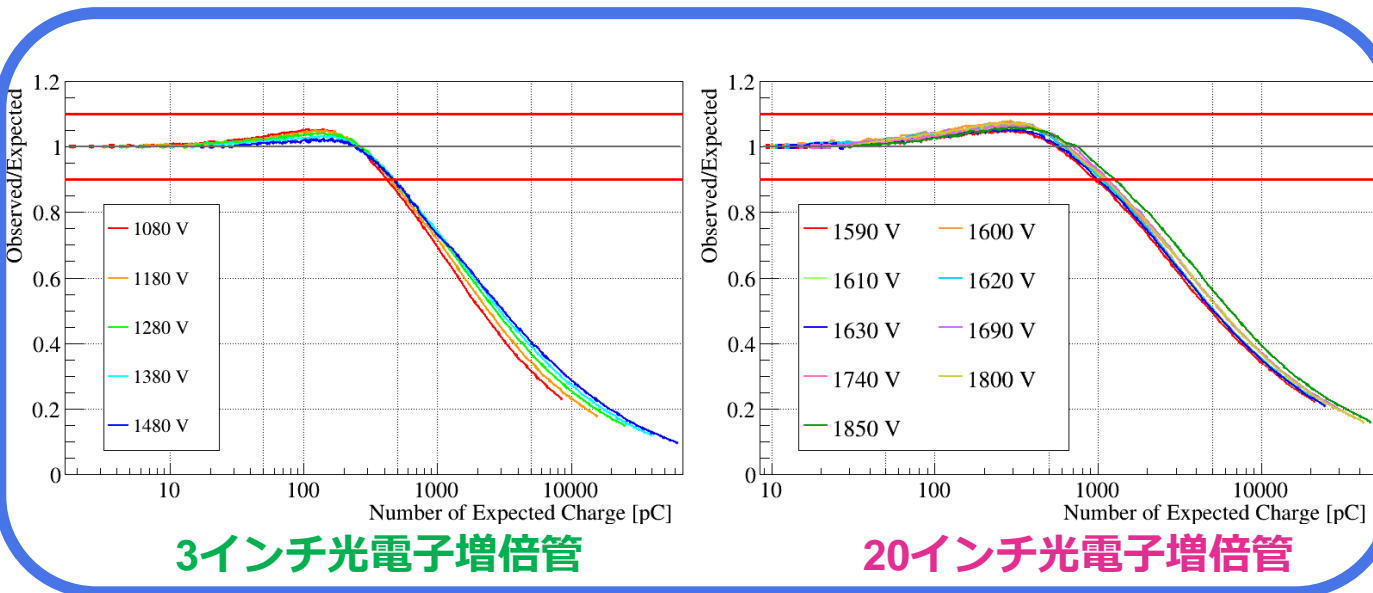
- 数十～数百光電子でオーバーリニアリティ、数百～数千光電子で飽和
- 電圧によって非線形性のカーブが異なる
- スーパーカミオカンデ光電子増倍管よりハイパーカミオカンデ光電子増倍管の線形性の方が劣っている

# 出力非線形性の測定結果

横軸→電荷（ゲインが一定として見積もった出力電荷）

ハイパーカミオカンデ

スーパーカミオカンデ



- 横軸が光電子数の時は電圧を変えるとばらけていた非線形性のカーブが重なった
- 数%～十数%ずれているのは測定における系統誤差の可能性あり



スーパーカミオカンデで既已取得されたデータの高精度での再補正の可能性

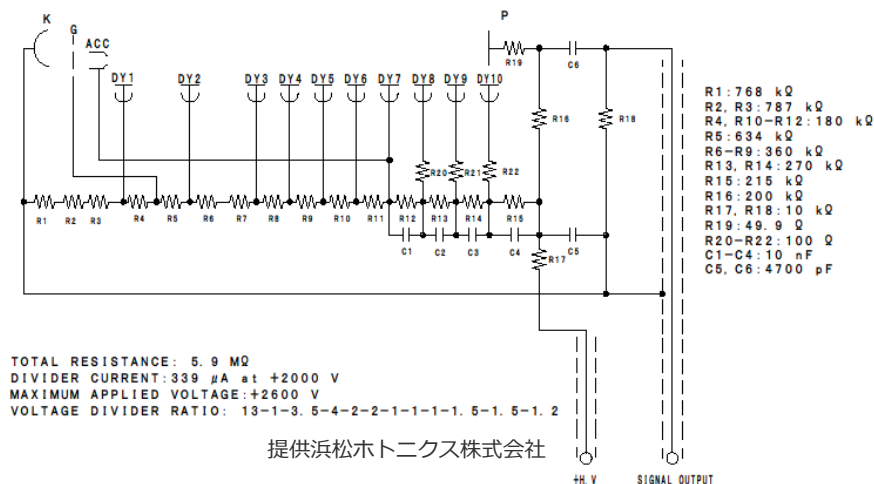
# 数値計算シミュレーション

数値計算シミュレーション（反復法＋直接法）を作成

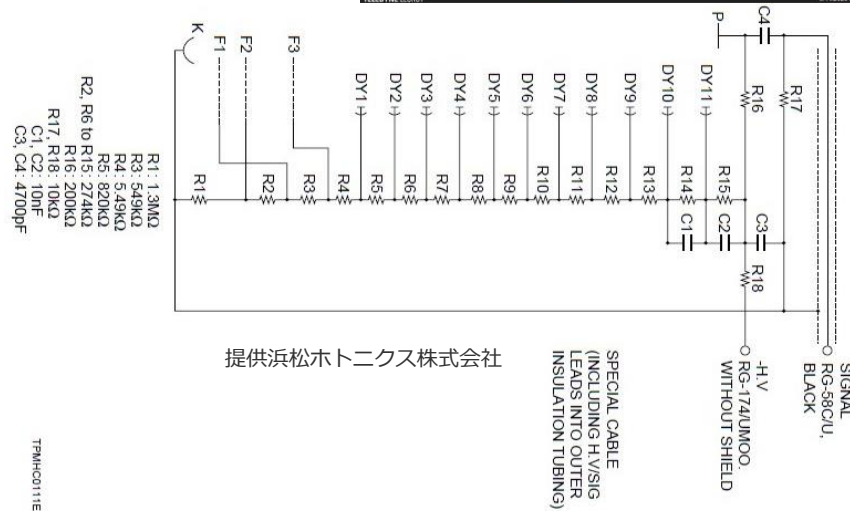
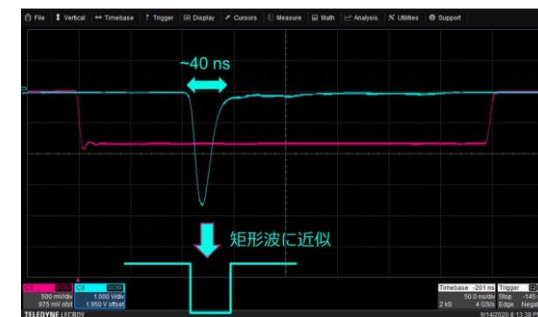
目的： 回路改良により線形性向上を目指す  
→シミュレーションで回路改良の指針を立てる

仮定：

- \* 入力光電子は矩形波
- \* ダイノード間を飛ぶ時間は考慮しない



ハイパーカミオカンデ20インチ光電子増倍管

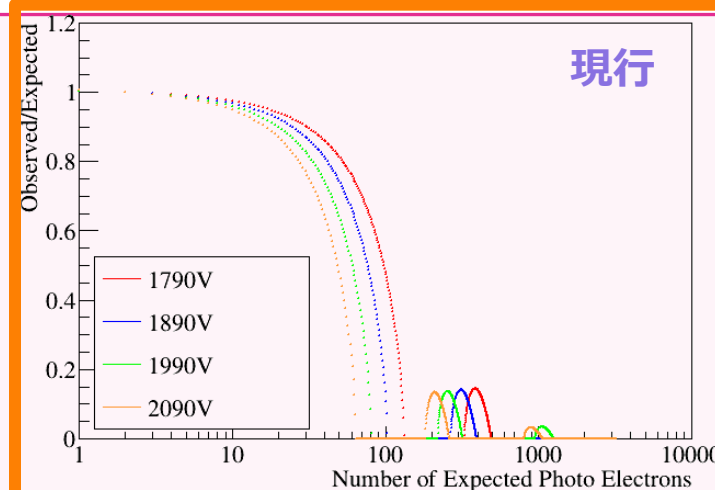
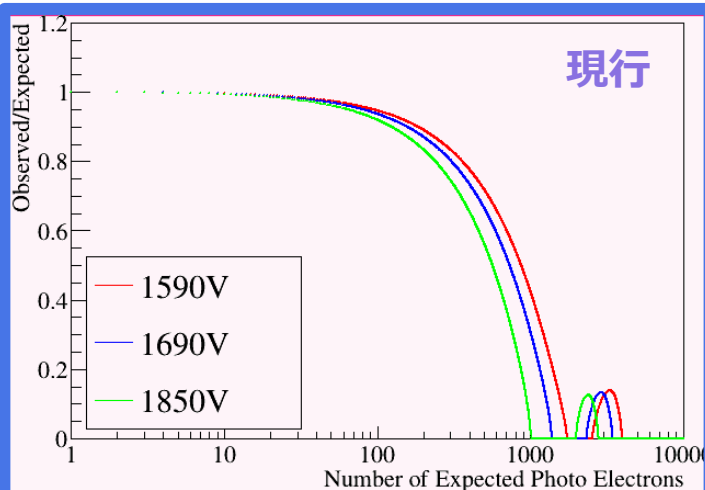


スーパーカミオカンデ20インチ光電子増倍管

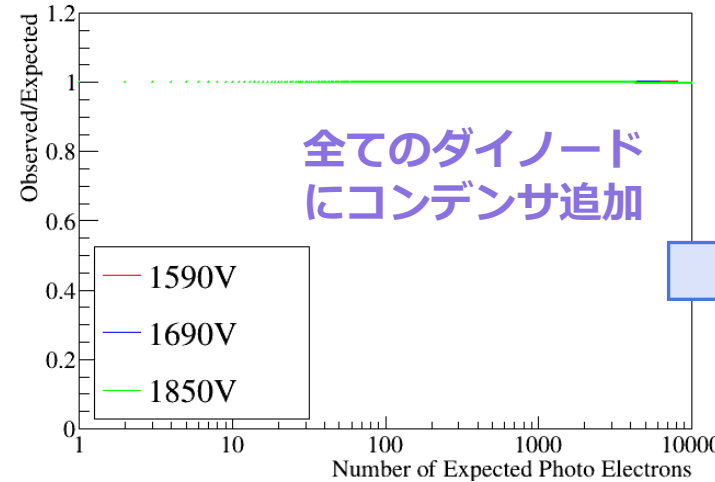
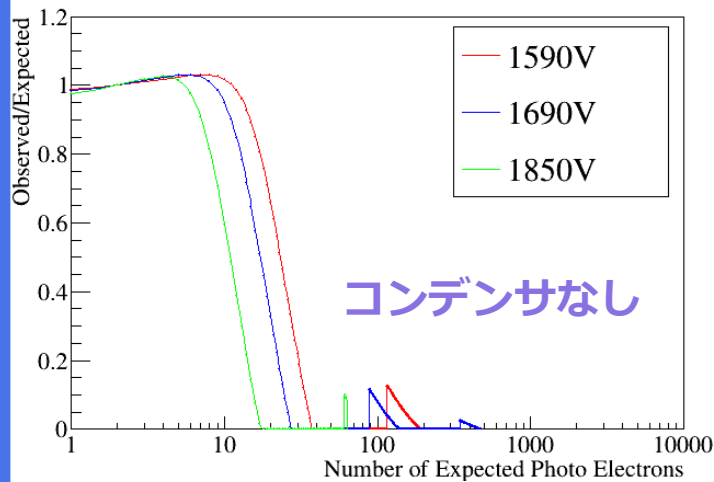
# 数値計算結果(20インチ光電子増倍管)

## ハイパーカミオカンデ

## スーパーカミオカンデ



- 電圧を変えると非線形性が変化することを再現できた
- ×ハイパーカミオカンデ光電子増倍管よりスーパーカミオカンデ光電子増倍管のほうが非線形になった



- コンデンサを追加すると線形性がよくなる可能性



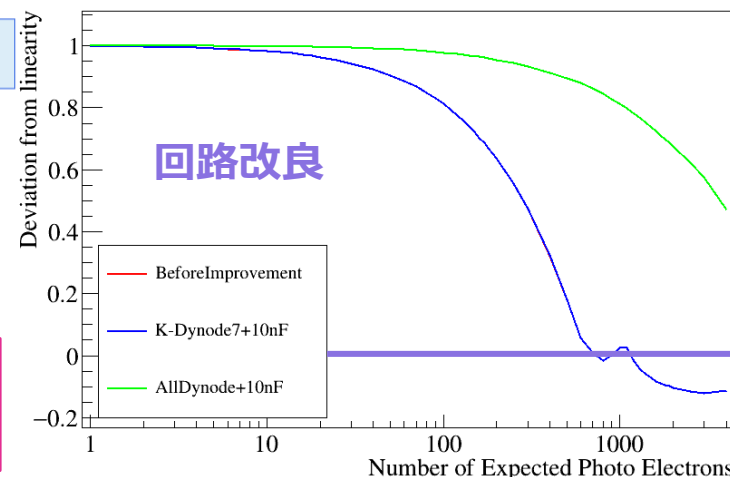
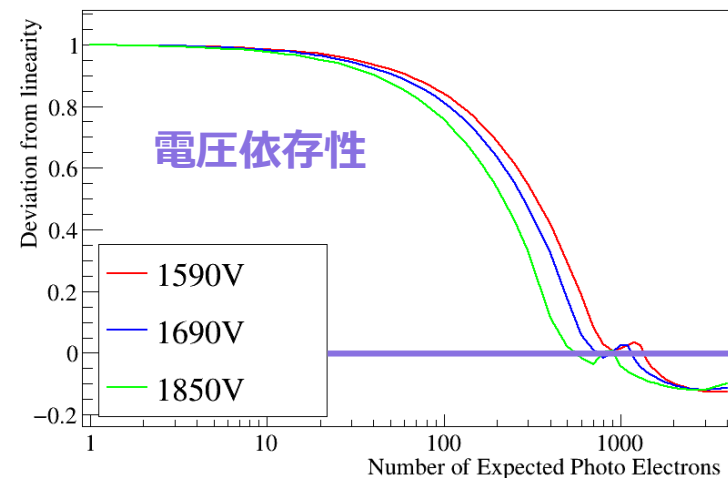
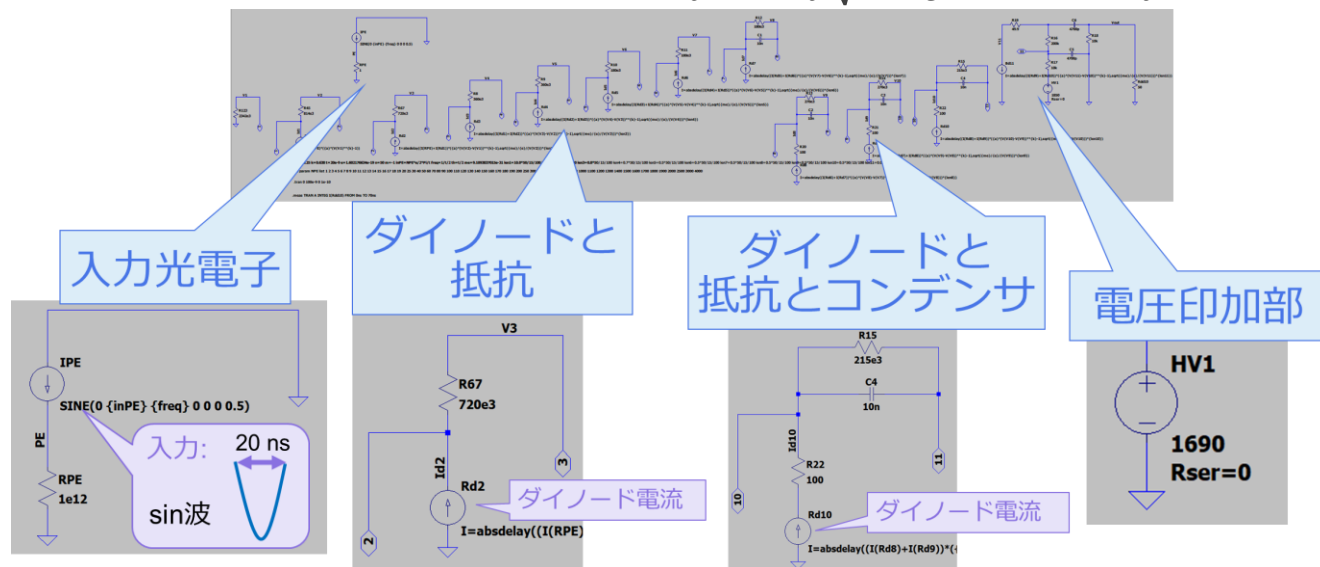
# LTSpiceを用いてシミュレーション (ハイパーカミオカンデ 20インチ光電子増倍管)

目的： より現実に近い再現により数値計算結果を検証

仮定：

\* 入力光電子はsin波 (波長40ns) の半波長

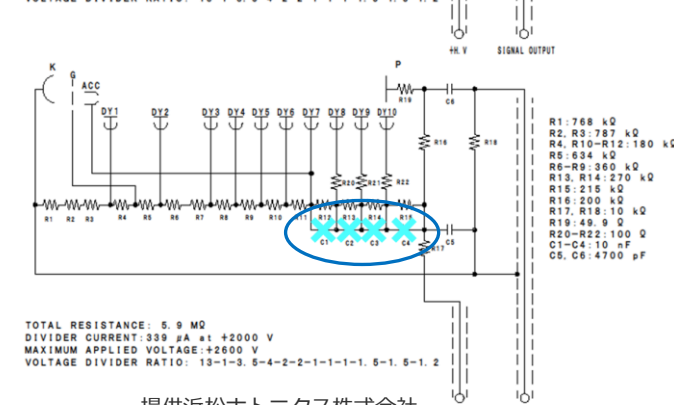
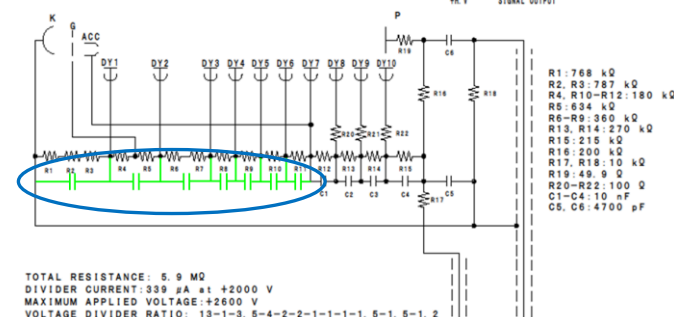
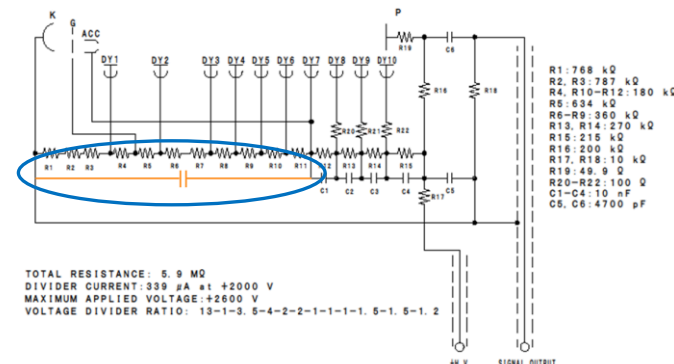
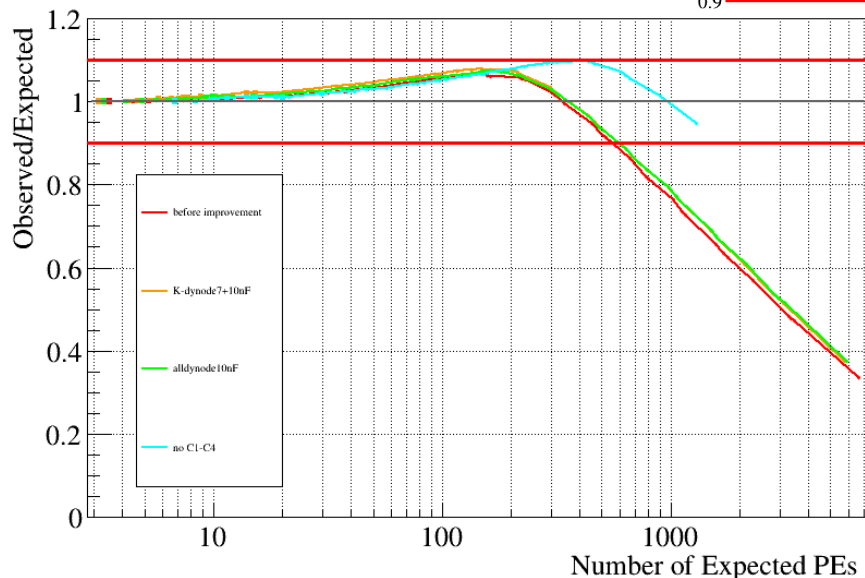
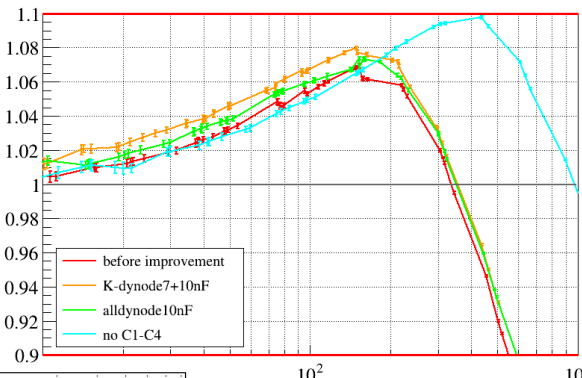
\* 電極間を飛ぶ時間： $t_i = l_i \sqrt{m_e / (e \times V_i)}$



- 電圧を変えると非線形性が変化することを再現できた
- コンデンサを追加すると線形性がよくなる可能性

# 回路の改良

実際に回路にコンデンサを加えて非線形性の変化を測定



コンデンサ10 nFの追加では非線形性は改善されなかった

# 結論

## 出力非線形の測定→スーパーカミオカンデデータの再補正の可能性

- \* 20インチ光電子増倍管については、スーパーカミオカンデに比べハイパーカミオカンデの出力の方が非線形
- \* ゲインが一定として見積もった出力電荷に対する線形性は印加電圧依存性が小さい

## 数値解析とLTSpiceを用いたシミュレーション→コンデンサ追加で線形性向上

- \* 印加電圧によりカーブがばらける様子を再現
- \* ダイノード間の電圧の変化だけでは出力非線形性は再現不可
- \* 光電子増倍管の構造で発生する空間電荷飽和などの影響を考慮する必要性の示唆

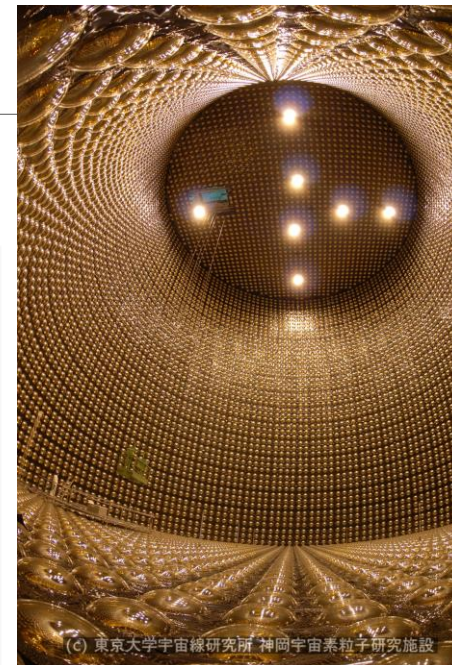
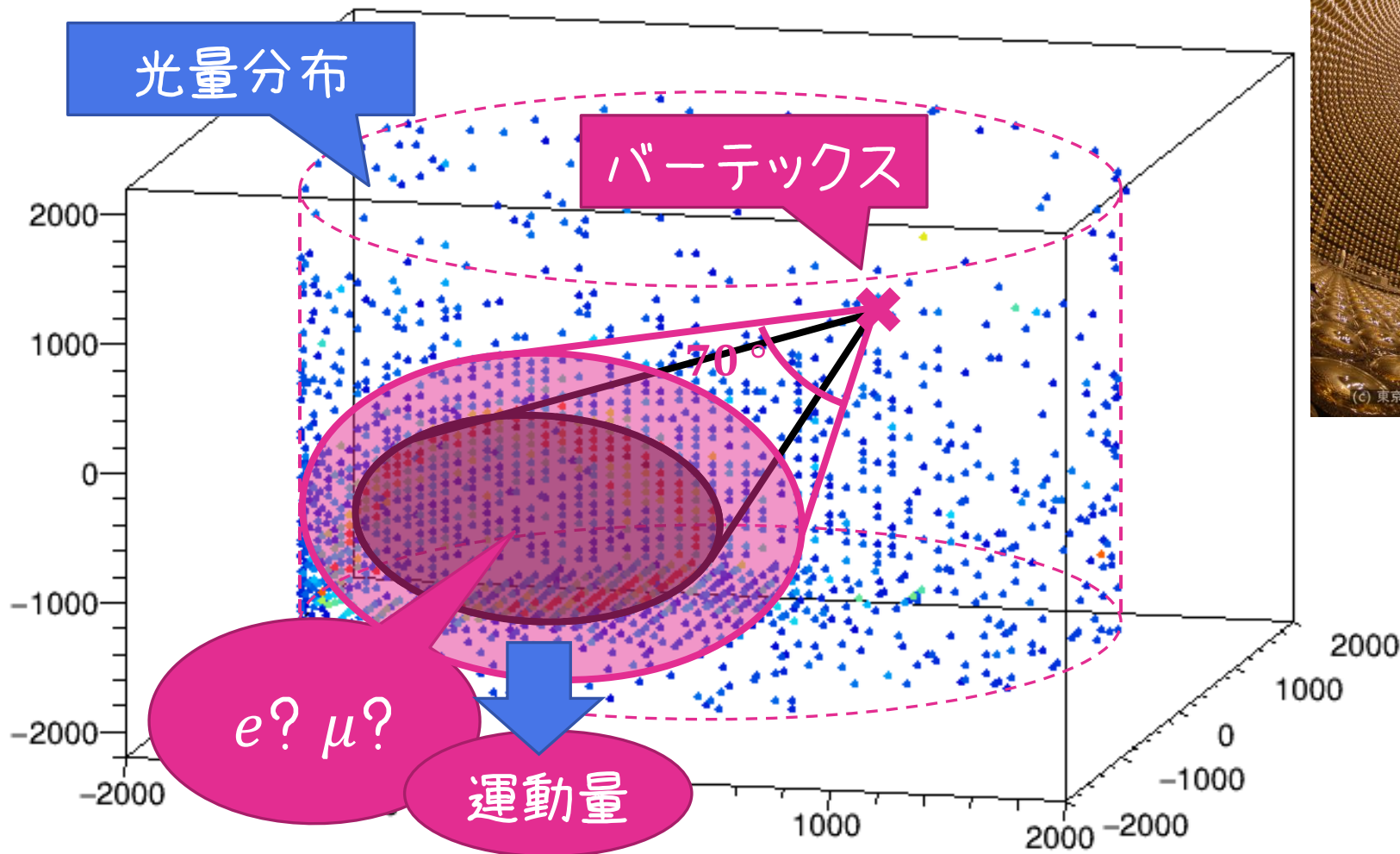
## 回路の改良→非線形性は未改善、様々な観点で改善度を確認予定、製造に適用の可能性

- \* より応答の早いコンデンサで非線形性改善を試みたい
- \* 改良した回路に対して位置依存性や磁場依存性を測定予定
- \* 非線形性が改善されたハイパーカミオカンデの光電子増倍管製造に適用したい

# Back up

---

# 運動量とエネルギーの算出



データと画像の提供: 東京大学宇宙線研究所 神岡宇宙素粒子研究施設

# LTSpice出力波形

