

修士論文

長基線ニュートリノ振動実験 T2K の電磁ホーンの位置調整/電流モニタ・制御系の開発研究



京都大学大学院理学研究科 物理学宇宙物理学専攻
物理学第二教室 高エネルギー物理学研究室
黒澤 陽一

平成 20 年 1 月 31 日

概要

本研究は、T2K 実験でのニュートリノビーム生成用電磁ホーンの位置調整、電流モニタ、制御系が主題とする。

T2K 実験は、現在茨城県東海村に建設中の大強度陽子加速器施設 J-PARC で世界最大強度のミュオンニュートリノビームを生成し、それを 295km 離れたスーパーカミオカンデで観測する長基線ニュートリノ振動実験で、2009 年 4 月に開始が予定されている。T2K 実験では電子ニュートリノ出現事象の探索、ミュオンニュートリノ消失の振動パラメータの精密測定を行う。ニュートリノビームの生成には 3 台の電磁ホーンを用い、それぞれを 320kA の電流で励磁する予定である。実験の目的を達成するためには、用いるニュートリノビームをきちんと理解し、制御できなければならない。ニュートリノ振動解析の物理的要請を満たすために、電磁ホーンの位置精度としては、ビームに垂直な方向については 1mm 以内、ビームに平行な方向については 5mm 以内、ビーム角については 0.08 度以内での設置を目指す。電磁ホーンを励磁する電流については、電流の合計値が設定値から 3 % 以内で安定していて、かつ電磁ホーンに電流を流す 4 本のバスバーの電流が 1 % 以内で均一であることを目指す。また、大強度ビーム環境下、大電流で動作させる装置であるため、遠隔操作による位置調整、交換ができなければならない。異常があった場合に停止させるインターロックシステムも必要となる。

位置調整に関しては、電磁ホーン的设计時から遠隔操作で目標とする精度が得られるように考慮されている。位置調整の中で要請が一番厳しいビームに垂直な方向についての検証を、第三ホーンの試作機を用いたテストセットアップで行った。その結果、鉛直方向については 1mm 以内での位置調整に成功し、遠隔操作での着脱後も調整された位置が再現することを確認した。水平方向については目標とする精度が得られなかったため、問題点・改善方法を考察した。

電流モニタに関しては、並行平板型のバスバーの間にできる一様磁場を Current Transformer (CT) を用いて測定し、電流をモニタすることが考えられている。この試作機を製作した。

制御系に関しては、Programmable Logic Controller (PLC) を用いて、電磁ホーンの電流値を前述の CT で読み出して演算処理を行い、電流の合計値、バスバー間の電流のバランスに異常を発見した場合にインターロックをかけニュートリノビームラインを停止するシーケンスを開発し、実験室で擬似シグナルを用いて動作の確認を行った。

目次

1	序論	9
1.1	ニュートリノ	9
1.2	ニュートリノ振動	9
2	T2K ニュートリノ振動実験	11
2.1	目的	11
2.2	ニュートリノビーム	11
2.2.1	ニュートリノビーム生成の原理	12
2.2.2	ニュートリノビームラインの概観	12
2.2.3	Off-Axis ビーム	14
2.3	スーパーカミオカンデ	15
3	電磁ホーンの位置調整	18
3.1	目的・要請	18
3.2	電磁ホーン装置全体	18
3.3	位置調整手順	20
3.4	テストセットアップでの検証	25
3.4.1	セットアップ・手順	25
3.4.2	測量結果・誤差の評価	27
3.5	結論・考察	31
4	電磁ホーン電流モニター用 CT の開発	33
4.1	目的・要請	33
4.2	Current Transformer (CT)	33
4.3	フラッシュADC (FADC)	35
4.4	試作機での性能評価	37
4.4.1	LR 積分回路の時定数の測定	37
4.5	結論・考察	38
5	電磁ホーン制御システムの開発	39
5.1	目的・要請	39
5.2	インターロックシステム	39
5.2.1	処理の流れ	40
5.2.2	実験室でのテスト	43
5.3	結論・考察	47
6	結論	49

目次	3
A インターロックシーケンス ラダー図	51
謝辞	51

図目次

1	T2K 実験の概要	11
2	ニュートリノビーム生成の模式図	12
3	J-PARC ニュートリノビームラインの概観	13
4	2 次ビームライン拡大図	14
5	Off-axis ビームの運動学	15
6	親 π 粒子のエネルギーの関数で見た様々な OA 角のニュートリノ エネルギー 上から OA 角が 0 度、1 度、1.5 度、2 度、3 度、5 度の もの	15
7	T2K 実験でのニュートリノ振動確率(上)と様々な OA 角でのニュートリノ エネルギースペクトル(下) 黒線が OA 角 0 °、赤線が 2 °、緑線が 2.5 °、青線が 3 °のものである	16
8	スーパーカミオカンデ	17
9	第 3 ホーン前面図	19
10	第 3 ホーン側面図	19
11	第 3 ホーン上面図	19
12	ホーン側ガイドピン拡大図(ホーン図中 A)	20
13	ホーン側高さ決め部分拡大図(ホーン図中 B)	20
14	支持モジュール前面図	21
15	支持モジュール側面図	21
16	支持モジュール上面図	21
17	支持モジュール支持部分拡大図(支持モジュール図中 C)	22
18	支持モジュール側高さ決め部分拡大図(支持モジュール図中 D)	22
19	支持モジュール側上流ガイド受け拡大図(支持モジュール図中 E)	22
20	支持モジュール側下流ガイド受け拡大図(支持モジュール図中 F)	22
21	ホーンと支持モジュールが接続した状態・前面図	23
22	ホーンと支持モジュールが接続した状態・側面図	23
23	位置調整用架台でのホーン本体と支持モジュール	24
24	測量用ワイヤが張られたホーン・前面図 緑がフランジ部のワイヤ、 青が内部導体中心から 15cm の位置のワイヤ	25
25	測量用ワイヤが張られたホーン・側断面図 緑がフランジ部のワイヤ、 青が内部導体中心から 15cm の位置のワイヤ	25
26	富士実験棟・ホーンテストセットアップ写真	26
27	測量箇所と直尺の配置 赤が直尺の配置、青が支持モジュール側 ガイド受け、緑の線が下げ振りを示している	27
28	水平方向測量拡大図 青がホーンに張ったワイヤ、もしくは支持 モジュール側ガイド受け、緑の線が下げ振りを示している	28

29	高さ方向測量時の直尺読み取り位置とオートレベル設置場所までの距離	30
30	支持モジュール上部水平位置マーカと下げ振りの精度を改善する治具模式図 赤で示したのが治具で、緑線が下げ振り、四角は中心部分の拡大図である	32
31	CT ピックアップコイル模式図 並行平板型バスバーに流れるパルス電流(青)で生じた磁場(緑)の変化をピックアップコイル(赤)で検出する。便宜上、手前側のバスバーは半透明に描画している。	34
32	CT 読み出し回路図 微分形の信号をLとRの積分回路で積分する	34
33	周波数 125Hz の正弦波を FADC で量子化した場合をシミュレートした波形と元の正弦波の比較(ピーク $\pm 10\mu s$) FADC の分解能は 12bit で、レンジを最大に用いて正弦波を読み込んだと仮定した <ul style="list-style-type: none"> ● は FADC の波形、+ は元の正弦波を表す 上は FADC のサンプリング周波数 1MHz、下は 200kHz の場合	36
34	積分回路試作機 回路図	37
35	積分回路時定数測定時のオシロスコープ画像	38
36	PLC ラックの写真 左から電源ユニット、CPU モジュール、LAN 通信モジュール、ADC モジュール 2 個、接点入力モジュール、RS-232C 通信モジュール、TTL 入力モジュール、デジタル出力モジュール、TTL 入力モジュール、ラック下部にタッチパネルがある。	41
37	ビームライン中で見たインターロックロジック図	42
38	インターロック・タイミング図	43
39	インターロックテストセットアップ・ロジック図	44
40	インターロックテストセットアップ・タイミング図	44
41	インターロックシーケンス・設定確認画面 1	45
42	インターロックシーケンス・設定確認画面 2	45
43	インターロックシーケンス・設定確認画面 3	45
44	インターロックシーケンス・動作モード画面	45
45	設定変更画面	46
46	設定値に異常を発見した時の設定確認画面	46
47	インターロックシーケンス・正常運転中画面	47
48	インターロックシーケンス・正常運転中オシロスコープ	47
49	動作モード・合計電流異常時画面	48
50	動作モード・null 電流異常時画面	48
51	メインシーケンス 1	51
52	メインシーケンス 2	52
53	メインシーケンス 3	53
54	メインシーケンス 4	54

55	メインシーケンス 5	55
56	メインシーケンス 6	56
57	起動時処理 1	56
58	起動時処理 2	57
59	設定ファイル読み込み 1	58
60	設定ファイル読み込み 2	59
61	ADC 設定	60
62	ADC 設定内部マクロ 1	61
63	ADC 設定内部マクロ 2	62
64	設定ファイル読み込み続き	63
65	設定チェック	64
66	ADC 設定チェック 1	65
67	ADC 設定チェック 2	66
68	タイマー設定チェック	67
69	ADC データ読み込み	68
70	ADC データ演算処理 1	69
71	ADC データ演算処理 2	70
72	ビームトリガーインターロック判定 1	71
73	ビームトリガーインターロック判定 2	72
74	null トリガーインターロック判定 1	73
75	null トリガーインターロック判定 2	74

表目次

1	陽子ビームパラメータのデザイン値	13
2	高さ方向位置調整、測量結果	29
3	高さ方向測定誤差評価	29
4	水平方向測量結果 軸は下げ振りを 0、ホーン上流から見て右側を 正にとってある	30
5	水平方向測定誤差評価	31

1 序論

1.1 ニュートリノ

ニュートリノとは重力相互作用を除き弱い相互作用のみをする中性レプトンである。1931年に Pauli によってその存在が仮定され、1935年に Fermi によって理論づけられたが、弱い相互作用しかしないためニュートリノを直接検出するのは非常に困難で、Reines と Cowan によってその存在が確認されたのは1956年である。

現在の素粒子理論である標準模型では、ニュートリノは3世代あり、その質量は0として扱われている。しかし、1998年スーパーカミオカンデグループの大気ニュートリノの観測から、ニュートリノは有限の質量を持ち、世代間で振動していることが示唆された。現在では、長基線ニュートリノ振動実験 K2K 実験によりニュートリノ振動の存在はほぼ確認された。

1.2 ニュートリノ振動

ニュートリノ振動とはある種類のニュートリノが飛行中に別の種類のニュートリノに変化する現象で、フレーバー固有状態 $|\nu_\alpha\rangle$ ($\alpha = e, \mu, \tau$) と質量固有状態 $|\nu_i\rangle$ ($i = 1, 2, 3$) が異なっていて、かつ質量固有状態が縮退していないときに起こる。これは Maki-Nakagawa-Sakata 行列と呼ばれる 3×3 のユニタリ行列を用いて

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_i U_{\alpha i} |\nu_i\rangle \quad (1)$$

$$U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & +c_{23} & +s_{23} \\ 0 & -s_{23} & +c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} +c_{13} & 0 & +s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & +c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} +c_{12} & +s_{12} & 0 \\ -s_{12} & +c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

と表される。

ここで、 θ_{ij} を混合角として $c_{ij} = \cos \theta_{ij}$ 、 $s_{ij} = \sin \theta_{ij}$ 、 δ は CP 位相である。ニュートリノ振動を2世代間の混合に限ると、 ν_α が ν_β に変化する確率は

$$P_{\alpha \rightarrow \beta} \simeq \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \left(\frac{1.27 \times \Delta m^2 L}{E_\nu} \right) \quad (3)$$

と表せる。ここで、 θ は混合角、 Δm^2 (eV²) は質量の2乗差、 L は飛行距離 (km)、 E_ν はニュートリノのエネルギー (GeV) である。本来ニュートリノは3世代あるが、これまでの測定で $\Delta m_{12}^2 \ll \Delta m_{23}^2$ であることがわかっている。そのため、 $E_\nu \sim 1$ GeV、 $L \sim$ 数百 km では良い近似で

$$P_{\mu \rightarrow \mu} \simeq 1 - \sin^2 2\theta_{23} \cdot \sin^2 \left(\frac{1.27 \times \Delta m_{23}^2 L}{E_\nu} \right) \quad (4)$$

$$P_{\mu \rightarrow e} \simeq \sin^2 \theta_{23} \cdot \sin^2 2\theta_{13} \cdot \sin^2 \left(\frac{1.27 \times \Delta m_{13}^2 L}{E_\nu} \right) \quad (5)$$

と表せる。式 4 は L km 走ったときのミューオンニュートリノの生存確率を表している、 $\frac{1.27 \times \Delta m_{23}^2 L}{E_\nu} = \frac{\pi}{2}$ でニュートリノ振動の効果が最大になることを示している。式 5 は混合角 θ_{13} を通してミューオンニュートリノが電子ニュートリノに変化することを意味している。ここで、 $\Delta m_{12}^2 \ll \Delta m_{23}^2$ では $\Delta m_{13}^2 \sim \Delta m_{23}^2$ となり、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ がミューオンニュートリノの消失と同じ条件で起こることを示している。

これまでの測定で $\Delta m_{23}^2 = 1.9 \sim 3.0 \times 10^{-3} \text{eV}^2$ であり、T2K 実験では基線長 $L = 295 \text{km}$ であることから、約 0.7GeV にピークを持つニュートリノビームを使用することでニュートリノ振動の効果が最大になる条件での測定ができる。

2 T2K ニュートリノ振動実験

本章では、T2K 実験の目的と実験設備について述べる。

2.1 目的

T2K 実験とは、図 1 のように茨城県東海村の J-PARC で生成したニュートリノを 295km 離れた岐阜県飛騨市神岡のスーパーカミオカンデで検出する (Tokai to Kamioka) 長基線ニュートリノ振動実験である。ニュートリノ振動を確認した世



図 1: T2K 実験の概要

界初の長基線ニュートリノ振動実験 K2K の後を受け、K2K 実験の約 100 倍という世界最大強度のニュートリノビームを用いて 2009 年 4 月から実験を行う予定である。その目的は

- ミューオンニュートリノ消失事象の振動パラメータ θ_{23} 、 Δm_{23}^2 の精密測定
- 電子ニュートリノ出現事象の発見

である。5 年間のランで 5×10^{21} 個の陽子分のデータを収集して、前者については統計誤差のみで考えると $\delta(\sin^2 2\theta_{23}) \sim 0.009$ 、 $\delta(\Delta m_{23}^2) \sim 10^{-5} \text{eV}^2$ 程度の精度が期待される。後者については現在の $\sin^2 2\theta_{13}$ の上限値の一桁下まで探索できる。

2.2 ニュートリノビーム

ここから、ニュートリノビーム生成の原理と J-PARC ニュートリノビームラインの概観、特徴について述べる。

2.2.1 ニュートリノビーム生成の原理

加速器ニュートリノは、主に陽子ビームを標的に衝突させハドロン生成反応で生じた π^+ 粒子がほぼ全て μ^+ 粒子とミュオンニュートリノに崩壊することで得られる。この時、ニュートリノの親粒子となる π^+ 粒子は陽子ビームの方向にブーストされているが、これを図2のように電磁ホーンのトロイダル磁場で平行に収束させることで、決まった方向を持つニュートリノビームを生成することができる。

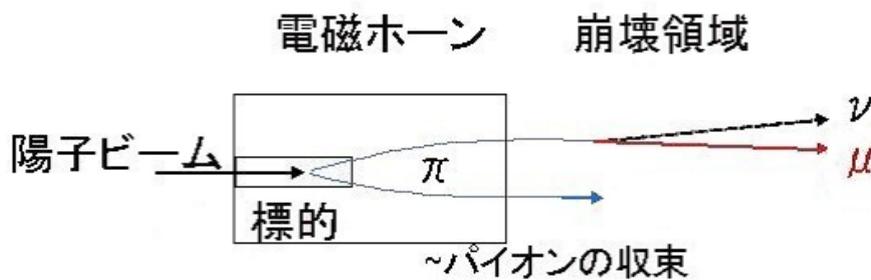


図 2: ニュートリノビーム生成の模式図

2.2.2 ニュートリノビームラインの概観

J-PARCのニュートリノビームラインは、陽子を誘導する1次ビームラインと陽子ビームが標的に衝突した後の2次ビームラインからなる。

1次ビームラインでは、図3のように400MeV LINAC、3GeV陽子シンクロトロン、50GeV陽子シンクロトロンで加速された陽子が超伝導磁石でスーパーカミオカンデの方角に曲げられ、ターゲットステーション内の陽子ビーム標的へと向かう。T2K実験では陽子ビーム標的としてグラファイトを用いる。陽子ビームパラメータのデザイン値は表1の通りである。

図4は2次ビームラインを拡大したものである。2次ビームラインでは、陽子ビームが標的に衝突して生成された2次粒子のうち π^+ 粒子が3台の電磁ホーンを用いて収束され、崩壊領域へ向かう。93mの崩壊領域を通り抜けるまでに大部分の π^+ 粒子が崩壊し、ニュートリノビームが生成される。崩壊領域の終端にはビームダンプがあり、陽子や崩壊せずに残った π 粒子などのハドロン、低エネルギーの μ 粒子がここで吸収される。ビームダンプの直後にはミュオンモニターがある。これは、 π^+ 粒子の2体崩壊でニュートリノと同時に生成された μ^+ 粒子の位置分布を測定することで間接的にニュートリノビームの方向をモニターする検出器である。標的から280m下流には前置検出器ホールがあり、ここにはニュー

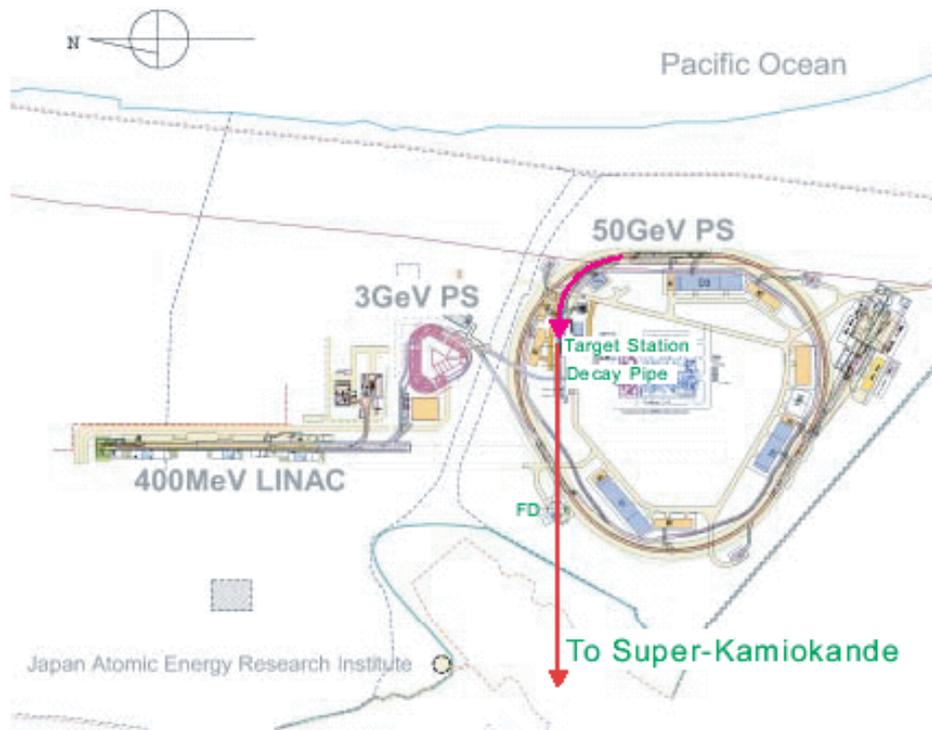


図 3: J-PARC ニュートリノビームラインの概観

ビームエネルギー	50GeV
ビーム強度	0.75MW
1 スpill中の陽子数	3.3×10^{14} p/spill
スpill繰返し周波数	0.285Hz
スpill幅	$5.6\mu s$
1 スpill内のバンチ数	8/spill
バンチ幅	58ns
バンチ間隔	約 700ns

表 1: 陽子ビームパラメータのデザイン値

トリノビーム軸上でニュートリノ反応を用いてニュートリノビームの方向をモニターする On-axis 検出器と、スーパーカミオカンデに向かう Off-axis ビームの生成直後の情報を測定する Off-axis 検出器の 2 つがある。Off-axis ビームについては後述する。

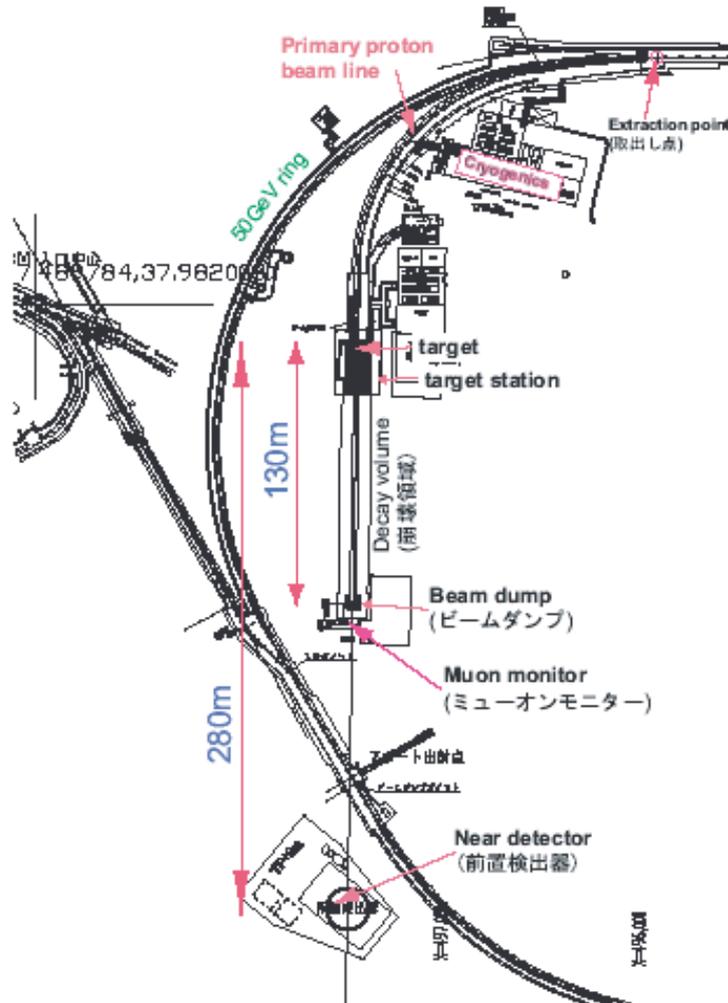


図 4: 2次ビームライン拡大図

2.2.3 Off-Axis ビーム

T2K 実験の大きな特徴は Off-axis ビームを用いることである。Off-axis ビームとは、ニュートリノビームラインの軸をスーパーカミオカンデの方角から Off-axis (OA) 角だけずらしたビームである。こうすることで、図 5、6、式 6 のように π 粒子の 2 体崩壊の運動学から親粒子である π 粒子のエネルギーにあまり依らなくなり、On-axis のワイドバンドビームと比較して、エネルギー分布の幅が狭いニュートリノビームを得られる。

$$E_\nu = \frac{m_\pi^2 - m_\mu^2}{2(E_\pi - p_\pi \cos \theta)} \quad (6)$$

このため、バックグラウンドとなる高エネルギーニュートリノを減らすことができる。またニュートリノビームのピークエネルギーはOA角と相関があるので、ニュートリノ振動確立が高いエネルギーを狙うことができる。T2K 実験では、基線長 295km で最も振動確立が高い約 0.7GeV にピークを持つように、OA 角を 2 ~ 3 度に設定する。図 7 はこの時の様々な OA 角でのニュートリノエネルギースペクトルと $\Delta m^2 = 3.0 \times 10^{-3} \text{eV}^2$ としたときのニュートリノ振動確率である。

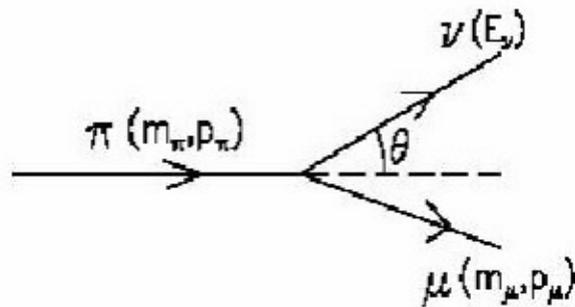


図 5: Off-axis ビームの運動学

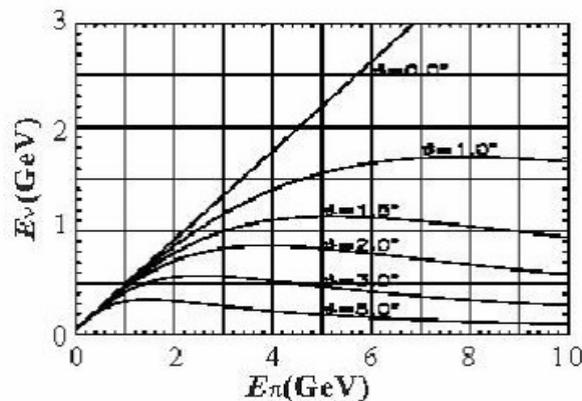


図 6: 親 π 粒子のエネルギーの関数で見た様々な OA 角のニュートリノエネルギー上から OA 角が 0 度、1 度、1.5 度、2 度、3 度、5 度のもの

2.3 スーパーカミオカンデ

スーパーカミオカンデは、図 8 のように 50kt の水タンクと 11146 本の 20 インチ光電子増倍管、1885 本の veto 用光電子増倍管からなる世界最大のニュートリノ

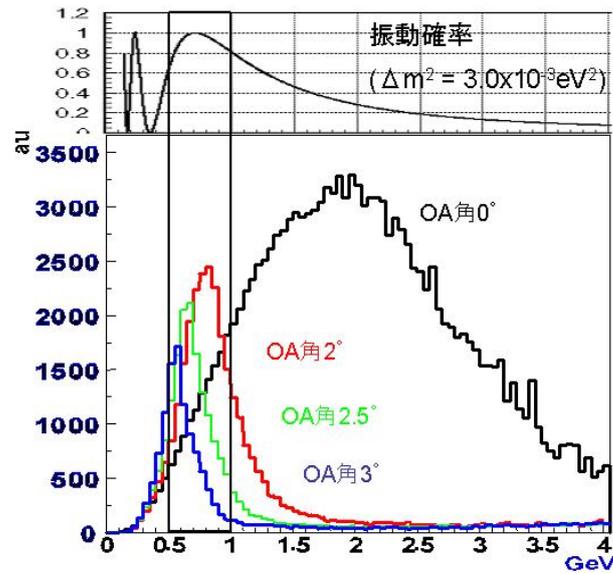
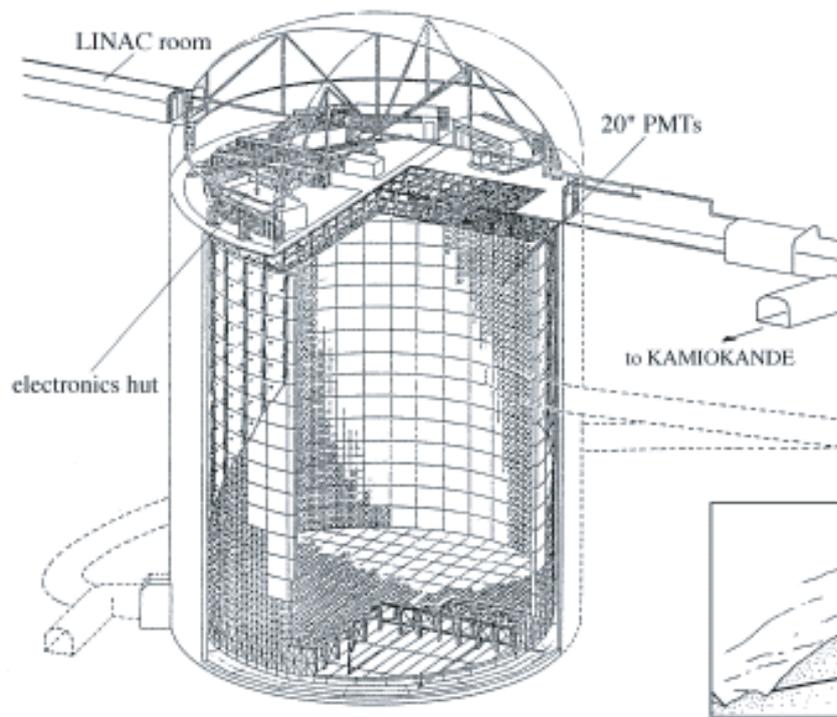


図 7: T2K 実験でのニュートリノ振動確率 (上) と様々な OA 角でのニュートリノエネルギースペクトル (下) 黒線が OA 角 0° 、赤線が 2° 、緑線が 2.5° 、青線が 3° のものである

ノ検出器である。T2K 実験では、295km 走った後のニュートリノビームを観測する役割をしており、スーパーカミオカンデでの測定と Off-axis 検出器での測定からの予測を比較して、ニュートリノ振動の測定を行う。



SUPERKAMIOKANDE INSTITUTE FOR COSMIC RAY RESEARCH UNIVERSITY OF TOKYO

図 8: スーパーカミオカンデ

3 電磁ホーン的位置調整

本章では、ニュートリノビームの質に影響する電磁ホーン的位置調整について述べる。

3.1 目的・要請

ニュートリノ振動を精密に測定するためには、測定するニュートリノ数に影響するニュートリノフラックスやニュートリノ振動の位相に影響するニュートリノのエネルギーを正確に知らなければならない。

電磁ホーン的位置がずれた場合のこれらの量の変化は、モンテカルロシミュレーションで評価されており、実験の測定精度の要請から、スーパーカミオカンデでのニュートリノフラックスの誤差を3%以内、ニュートリノのピークエネルギーの誤差を3%以内に抑えるためには、ホーンをビームに垂直な方向で3mm、ビームに平行な方向で15mm、角度でOA角3.64度に対して0.3度の精度で設置せねばならず、実際の設置の精度としては、ビームに垂直な方向で1mm、ビームに平行な方向で5mm、角度で0.08度を目指す。

また、ホーンをターゲットステーション内に設置する際には、支持モジュール内に遮蔽ブロック等が置かれるため、ホーン本体を直視しての位置調整ができない。そのため、支持モジュール上部に設置されたマーカを目印にホーン的位置調整をしなければならない。

3.2 電磁ホーン装置全体

ホーン及び支持モジュールは前述の要請を満たすことを目指して設計されている。以下に、本研究で位置調整の検証実験で用いた第3ホーンについて、図を示し各部の説明をする。

まず、電磁ホーン本体についての説明をする。図9、10、11は電磁ホーンの前视图、側视图、上面图である。ホーン導体をセラミックで絶縁した状態でフレームで支える構造になっており、そこに電流を流す4対のバスバーや冷却水の配管が繋がっている。ホーン図中Aは、支持モジュールと接続する時に水平面内での位置を決定するガイドピンで、拡大すると図12のようになっている。ホーン図中Bは、支持モジュール図Dと接続する部分である。拡大すると図13のようになっている。支持モジュール接続用シャフトの受け口と、接続面の高さを決定するナット、このナットをロックするためのナットからできている。ホーン本体の位置調整時には、ここをレベリングジャッキで下から支え、支持モジュールで吊り下げる時と似たような状態にする。

次に、電磁ホーンを吊り下げる支持モジュールについて説明する。図14、15、

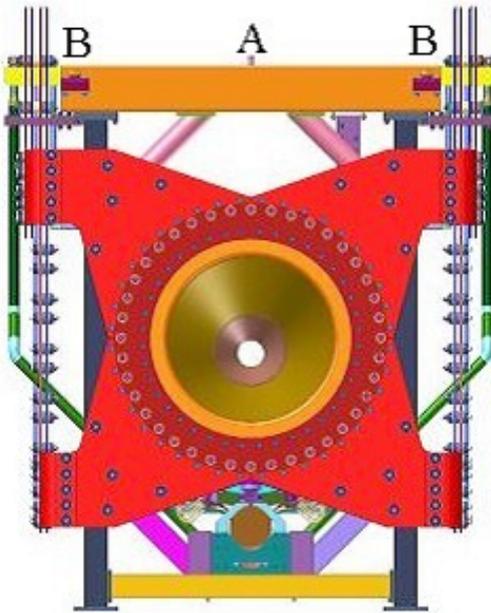


図 9: 第 3 ホーン前面図

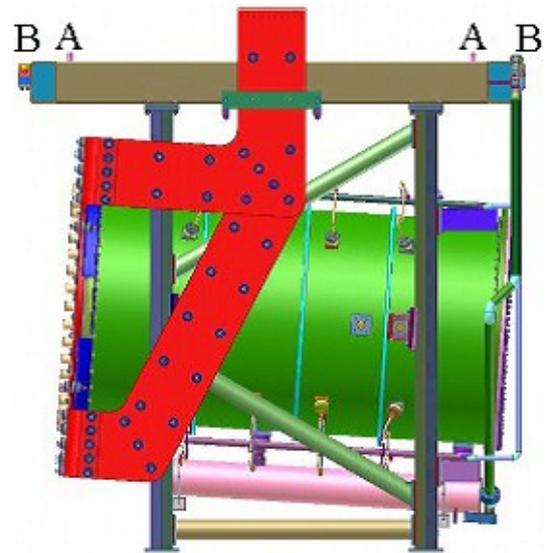


図 10: 第 3 ホーン側面図

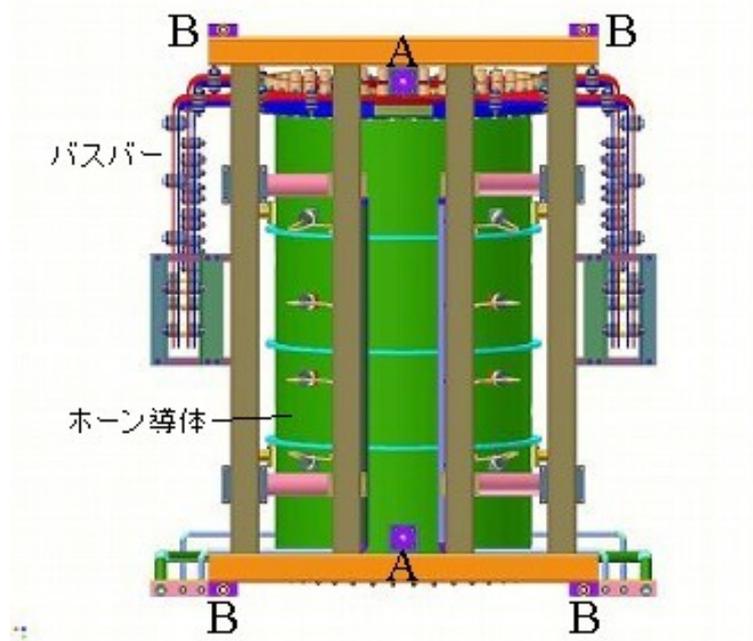


図 11: 第 3 ホーン上面図

16は、それぞれ支持モジュールの前面図、側面図、上面図である。支持モジュールは箱型になっており、その内部には放射線遮蔽ブロックが置かれる。電磁ホーン本体の重量、遮蔽ブロックの重量、自重を支えるために厚さ70mmの鉄板とフ

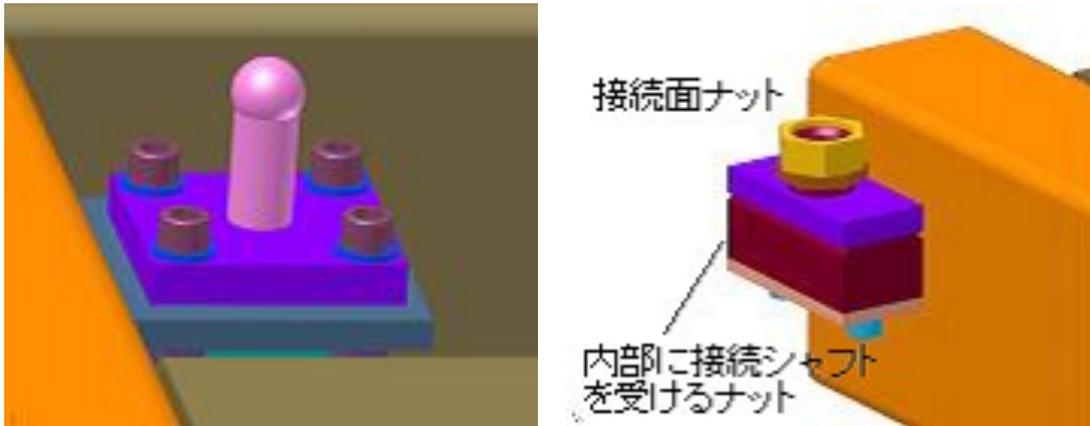


図 12: ホーン側ガイドピン拡大図 (ホーン図中 A) 図 13: ホーン側高さ決め部分拡大図 (ホーン図中 B)

レームでできている。ホーンとの接続用シャフトや冷却水配管、バスバー接続機構は、ホーンとの接続部分から支持モジュール上部まで伸びており、全ての接続を支持モジュール上部からできるようになっている。図中 C は、設置時に支持モジュールを支える部分で、最終的にはここでホーン本体、遮蔽ブロックを含めた全ての重量を支える。ここには、移動時にクレーンで吊るためのフックや、図 17 のように位置調整で用いる支持モジュールの高さマーカナット、水平面内位置マーカナットが設置されている。図中 D は、ホーン本体図 B と接続する部分で、接続用シャフトと、それを通すパイプに設置された接続面の高さを決定するナット、このナットをロックするナットからできている。図中 E、F は、ホーン本体図 A のガイドピンを受ける部分である。ビームライン上流側 E は、図 19 のように穴になっており、水平面内での位置を 1 点に決める。下流側 F は、図 20 のようにレール状になっていて、ビームラインに垂直な方向の位置のみを決める。

これらのホーン本体と支持モジュールが接続して、図 21、22 のようになる。

3.3 位置調整手順

電磁ホーン的位置調整は、ターゲットステーションへのインストール前に行われる。この時、図 23 のように支持モジュールは調整用架台最上部に設置され、ホーン本体は、調整用架台中ほどに設置されたレベリングジャッキで、支持モジュールとの接続部 (ホーン図 B) を下から支え、吊り下げた時と近い状態にして、支持モジュールの下に離れた状態で置かれる。ホーン本体の下には、ホーン本体を持ち上げるためのリフトテーブルが置かれる。

ここから電磁ホーン的位置調整の手順を示す。

- ホーン本体の調整

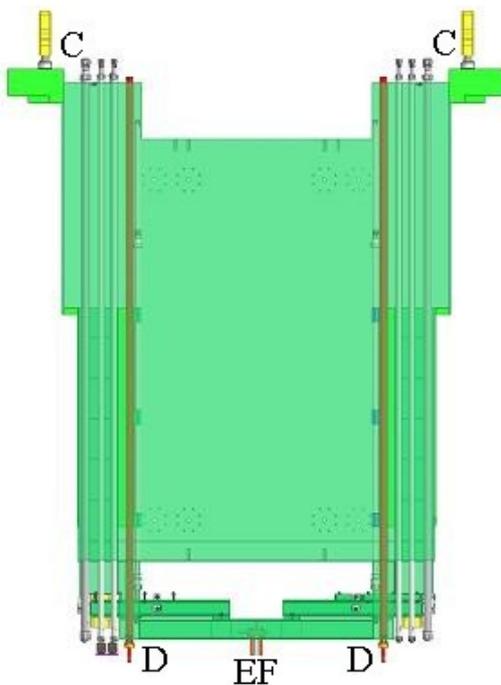


図 14: 支持モジュール前面図

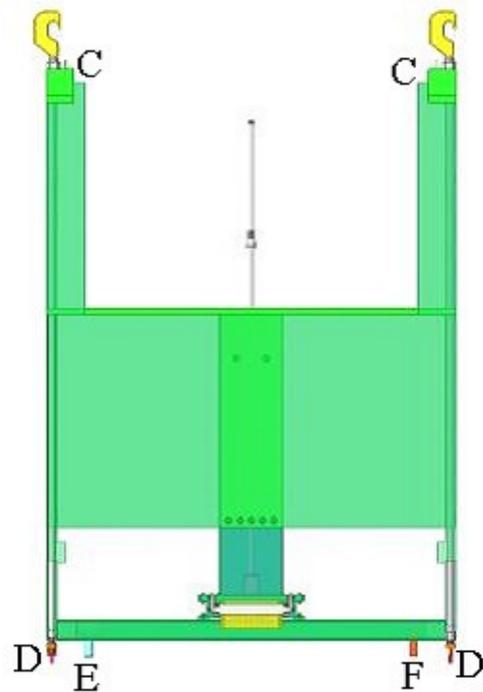


図 15: 支持モジュール側面図

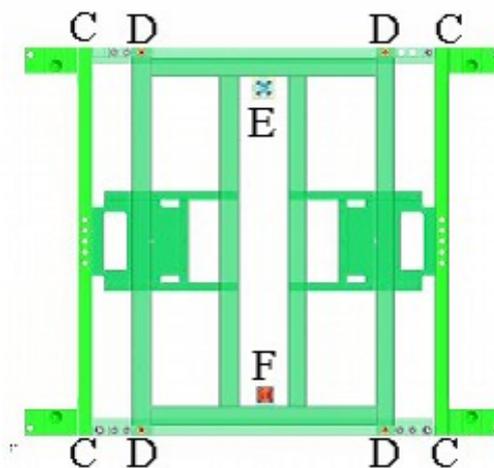


図 16: 支持モジュール上面図

ホーン本体をレベリングジャッキで下から支えた状態で、水準器を用いてレベリングジャッキを調整しホーンフレーム上部で水平を出す。次に、ホーンの高さ方向の測量を行う。これには、オートレベルと調整用架台に固定され鉛直に調整された直尺を用いる。ホーン側の目印とするのは、ホーン内部導体上流側フランジ部（ワイヤ1）と内部導体中心から上流側に15cmの

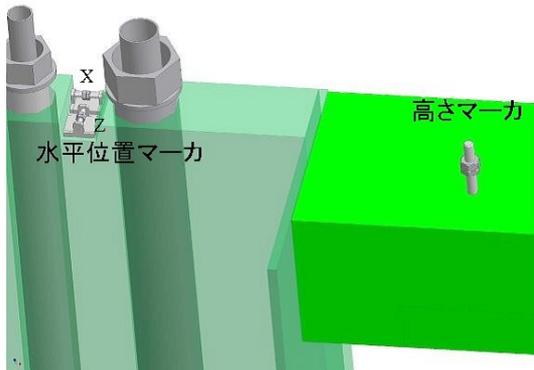


図 17: 支持モジュール支持部分拡大図
(支持モジュール図中 C)

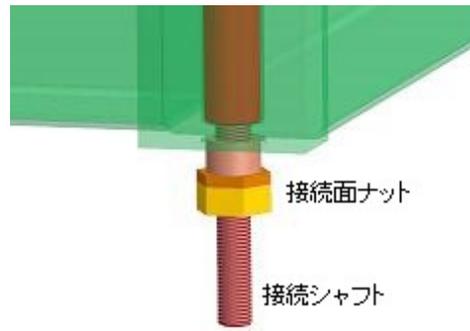


図 18: 支持モジュール側高さ決め部分拡大図
(支持モジュール図中 D)

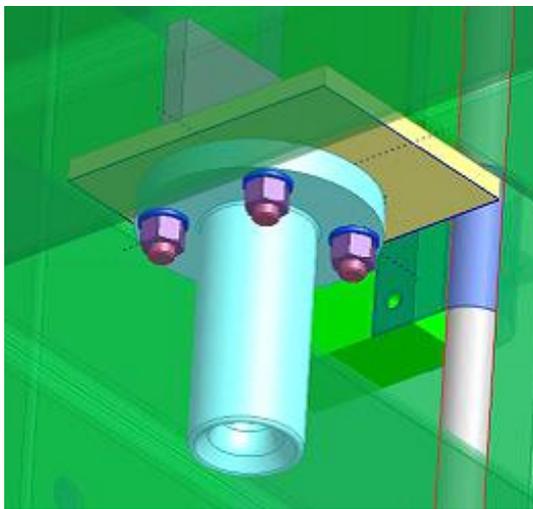


図 19: 支持モジュール側上流ガイド受け
拡大図 (支持モジュール図中 E)

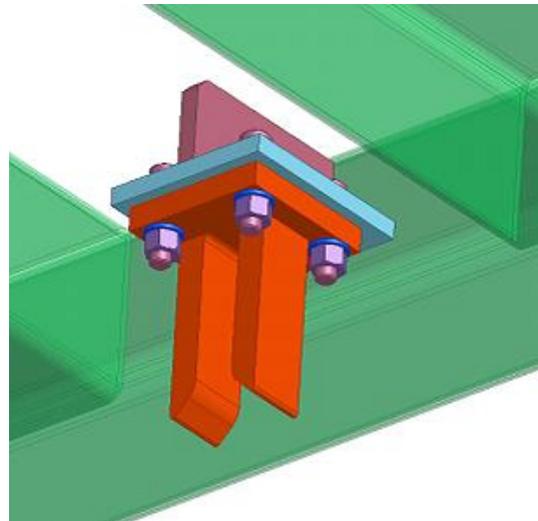


図 20: 支持モジュール側下流ガイド受け
拡大図 (支持モジュール図中 F)

位置 (ワイヤ 2) の 2 箇所にてケガキに合わせて十字に張られたワイヤ図 24、25 と、支持モジュールとの接続面を決めるナット (ホーン図 B) である。直尺をスケールにして、これらの鉛直方向の位置を測量し、支持モジュールとの接続面を決めるナットをホーン中心から所定の高さに調整し、ロックナットで固定する。またこのとき、ホーンに張られた 2 箇所ワイヤの高さからホーンの角度を確かめる。この角度は、ホーン組み立て時に OA 角 3.64 度に調整されていなければならない。最後に、ホーン上流フランジ部と内部導体内部に張られたワイヤの中心 2 点を用いてトランシットで軸出しを行い、ホーンフレーム上部に設置されたガイドピン (ホーン図 A) をその

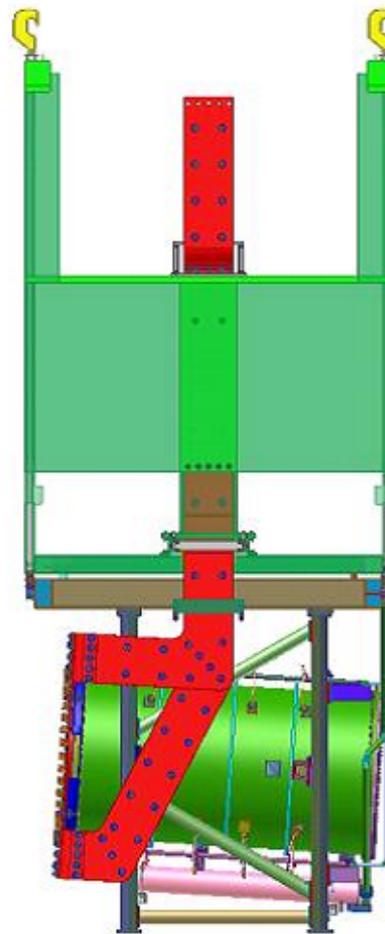
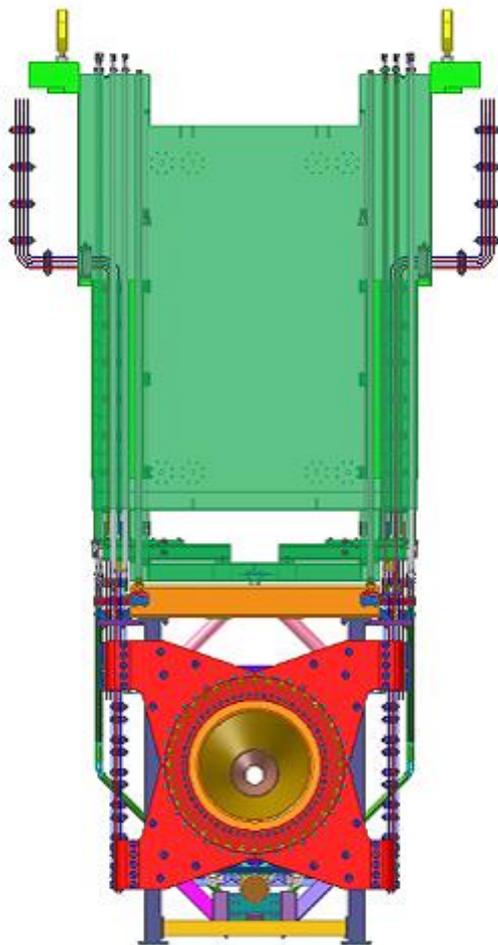


図 21: ホーンと支持モジュールが接続した状態・前面図

図 22: ホーンと支持モジュールが接続した状態・側面図

軸上に調整し固定する。以上で、支持モジュール接続部からホーン中心までの位置関係が調整されたことになる。

- 支持モジュールの調整

支持モジュールを調整架台最上部で支持モジュールを支える4点はレベルリングブロックになっている。最初に、オートレベルを用いて支持モジュールの水平出しを行う。支持モジュール側の目印には、図17の高さマーカを用いる。これは、寸切りにケガキが入ったナットをロックナットで支持モジュールから一定の高さに固定したものである。レベルリングブロックを調整し水平出しができたなら、支持モジュール図Dのホーンとの接続面を決めるナットを所定の高さに調整し、ロックナットで固定する。これには、オートレベルと支持モジュール壁面及び調整架台に固定され鉛直に調整された

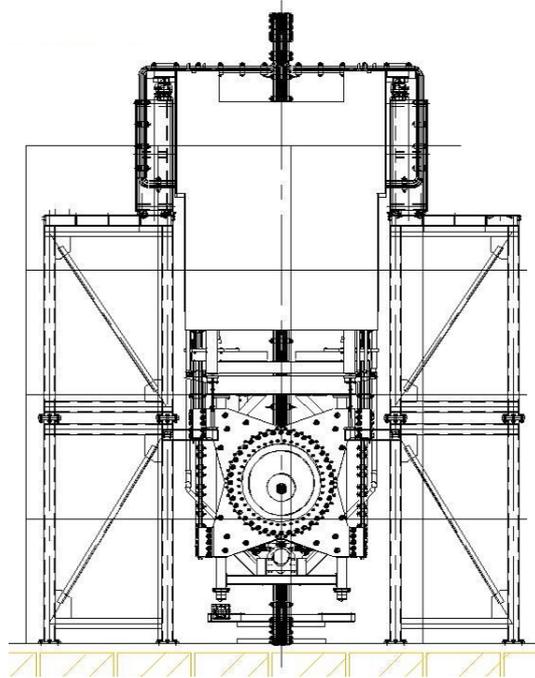


図 23: 位置調整用架台でのホーン本体と支持モジュール

直尺を用いる。次に、支持モジュール図中 E、F のガイド受けの位置を調整する。これは、ホーンとの接続部の工作精度のためホーン側ガイドピンに合う位置決まってしまう。ガイド受けの位置が決まったら、図 17 の水平位置マーカ X を調整する。これは、ホーン中心の水平面内ビームに垂直な方向での位置を支持モジュール上部から知るためにある。上流、下流 2 個のガイド受けの位置でトランシットの軸を出し、支持モジュール上部から垂らした下げ振りをこの軸に合わせる。支持モジュール上部で、直尺を用いて下げ振りから等距離に水平位置マーカ X を調整する。最後に、ガイド受けから水平位置マーカ Z までのビーム軸に沿った距離を所定の長さに調整する。以上で、支持モジュール上部マーカからホーンとの接続部までの位置関係が調整されたことになる。

これらの調整がなされた状態で、ホーン本体をリフトテーブルで上昇させ、支持モジュールと接続すれば、支持モジュール上部のマーカの位置からホーン中心の位置がわかることになり、ターゲットステーション内でこのマーカを目印にホーンの設置ができる。

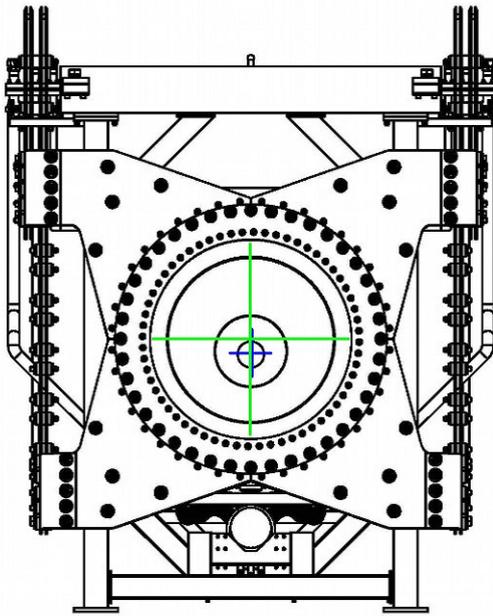


図 24: 測量用ワイヤが張られたホーン・前面図 緑がフランジ部のワイヤ、青が内部導体中心から 15cm の位置のワイヤ

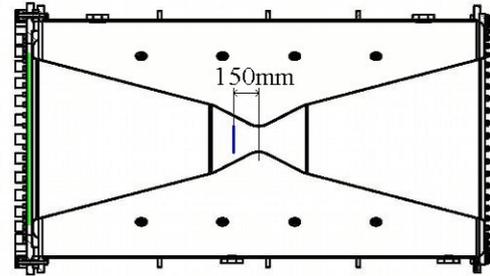


図 25: 測量用ワイヤが張られたホーン・側断面図 緑がフランジ部のワイヤ、青が内部導体中心から 15cm の位置のワイヤ

3.4 テストセットアップでの検証

前節で述べた位置調整手順を検証するために、高エネルギー加速器研究機構・富士実験棟 B 4 F にて第 3 ホーン試作機を用いて位置調整、測量、再現性の試験を行った。

3.4.1 セットアップ・手順

セットアップは、ほぼ調整手順で述べた通りで、第 3 ホーン本体、支持モジュール、調整用架台があり、測量には、支持モジュール壁面と調整用架台柱に鉛直に固定された合計 3 本の直尺と、オートレベル、トランシット、レーザー墨出し器、下げ振りを使用した。ただし、ホーン本体の位置調整時にはホーンフレーム全体を下からジャッキで持ち上げて水平出しを行った。これは、ホーン本体をホーン図 B で支えるレベリングジャッキを設置したアームが、設計の問題でホーンの重量に耐えられずたわんでしまったためである。また、ビーム軸方向の測量は今回行わなかった。これは、求められる精度がビーム軸に垂直な方向ほど高くなく、測量に適した足場がセットアップの周りに無かったためである。図 26 はテストセットアップの写真である。

前述の手順に従って位置調整を行った後に、高さ方向については以下の条件で



図 26: 富士実験棟・ホーンテストセットアップ写真

測量を行って位置調整の精度、再現性を確認した。

1. 支持モジュールとホーン本体を接続した状態
2. 接続した支持モジュールとホーン本体を外した直後
3. 一度支持モジュールとホーンを外してから再度接続した状態
4. 支持モジュールとホーン本体を接続して、全体をクレーンで移動させた直後

水平方向については位置調整後支持モジュールとホーンを接続した状態で、下げ振りとトランシットを調整して2度測量を行った。

図 27 は、主要な測量箇所と位置調整に用いた直尺の配置を示したものである。高さの測量は、ホーン内部導体内のワイヤ(図 25 ワイヤ 2)、ホーン-支持モジュール接続面、支持モジュール上部高さマーカの高さをオートレベルと直尺を用いて測定し、また直尺同士の継ぎ目もオートレベルで測定して、ホーン内部導体内ワイヤ-接続面の距離、接続面-支持モジュール上部高さマーカの距離を求めた。水平方向の測量は、設定した支持モジュール上部水平位置マーカから支持モジュールガイド受けの軸の位置を求め、支持モジュール上部上流側、下流側からそれぞれ下げ振りを垂らし、この2本の下げ振りでトランシットの軸出しを行い、図 28 のようにこの軸とガイド受け、ホーンに張ったワイヤの位置を比較した。水平方向の2度目の測量はトランシットを1度目より低い所に設置してから、再び支持

モジュール上部水平位置マーカからガイドの軸を求め下げ振りを垂らし、この軸と、ホーンのワイヤ、下流側ガイドピンのケガキの位置と比較を行った。

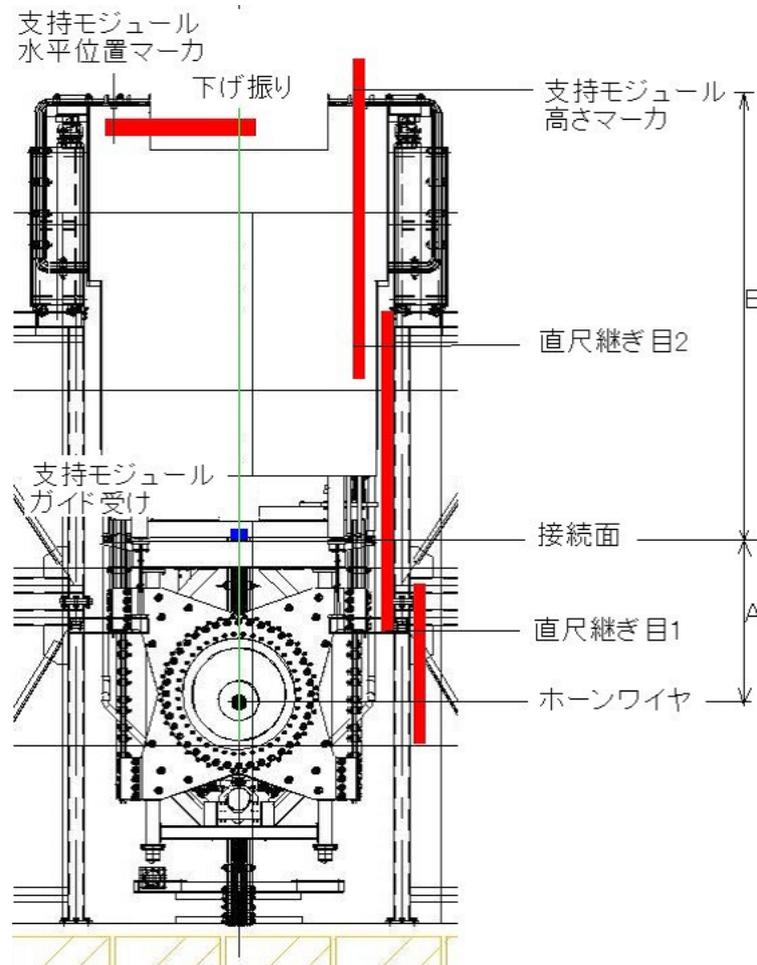


図 27: 測量箇所と直尺の配置 赤が直尺の配置、青が支持モジュール側ガイド受け、緑の線が下げ振りを示している

3.4.2 測量結果・誤差の評価

- 高さ方向の位置調整、測量の結果、誤差の評価

表 2 は、位置調整時と各測量時のホーン高さ（図 27 中 A）、支持モジュール高さ（図 27 中 B）をまとめたものである。ホーン高さについては、位置調整時とその後の測量で約 11mm のずれがあるが、これはホーンと支持モジュールの接続を外して確認したところ、ホーン側接続面ナットのロックが緩く動いてしまう状態だったためである。この時ロックナットを締めな

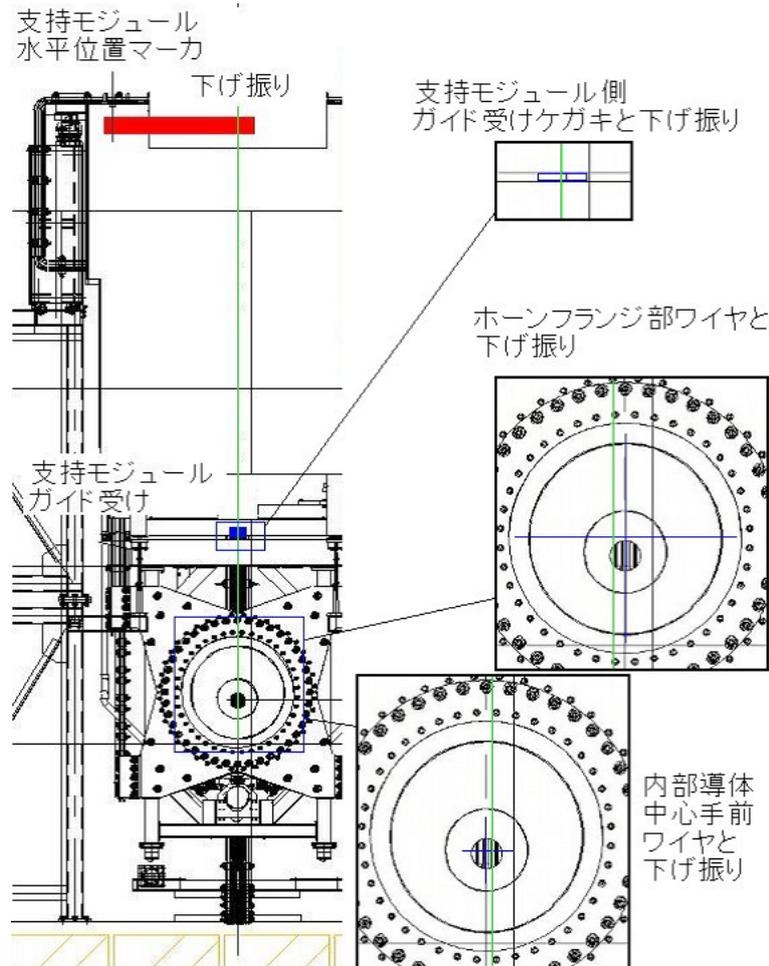


図 28: 水平方向測量拡大図 青がホーンに張ったワイヤ、もしくは支持モジュール側ガイド受け、緑の線が下げ振りを示している

おし固定した結果、測量 1 と 3 ではホーンと支持モジュールの着脱をしても 1mm 以内の精度で支持モジュール上部高さマーカからホーン中心までの距離が一致し、位置調整、再現性の要請を満たすことを確認した。また、クレーンで吊って支持モジュールとホーン全体を移動させた後でもホーンの位置は 1mm 以内の精度で再現されていた。

表 3 は、高さ方向についての測定誤差を見積もったものである。ホーンワイヤ、支持モジュール上部高さマーカの位置の読み取り誤差、これらの高さを直尺で求めるときの読み取り誤差、距離を求めるとき直尺を継いだ点での読み取り誤差が入っている。全体の測定誤差は 0.62mm で、目指す設置精度 1mm より良い値が得られている。主に影響するのは、ホーンに張ったワイヤの太さ、たるみと、支持モジュール上部のオートレベルでの測定

	ホーン (図 27A) [mm]	支持モジュール (図 27B) [mm]	A+B[mm]
位置調整時	1523.7	4315.0	5838.7
測量 1	1512.3	4314.6	5826.9
測量 2	1512.1		
測量 3	1512.4	4315.4	5827.8
測量 4	1513.0		

表 2: 高さ方向位置調整、測量結果

の誤差である。支持モジュール上部で誤差が大きくなるのは、測定箇所とオートレベル設置場所との距離が図 29 のように長くなったためである。

	測定誤差 [mm]
ホーンワイヤ	0.3
直尺読み取り 1	0.1
直尺読み取り 2	0.1
直尺読み取り 3	0.1
直尺読み取り 4	0.2
直尺読み取り 5	0.2
直尺読み取り 6	0.3
支持モジュール高さマーカ	0.3
2乗和の平方根	0.62

表 3: 高さ方向測定誤差評価

- 水平方向の位置調整、測量の結果、誤差の評価

表 4 は水平方向の測量の結果である。内部導体ワイヤはホーン中心に近い場所にあり一番精度が求められるが、約 5mm と大きくずれている。また内部導体内のワイヤとガイドとが逆方向にずれており、軸が正確に出ていない。そのため、下げ振りの位置と一致したホーンフランジのワイヤも偶然一致したものと考えられる。

表 5 は水平方向についての測定誤差を見積もったものである。支持モジュール上部水平位置マーカの読み取り誤差、これを直尺上に持っていくときの読み取り誤差、水平位置マーカから求めた軸上に下げ振りを設置するときの誤差、下げ振りとホーンワイヤ、マーカを比較するときの誤差が入っている。全体の誤差は 1.1mm と目指す設置精度 1mm より悪くなってしまっている。主に影響しているのが、下げ振り設置時の誤差 1mm でこれだけで

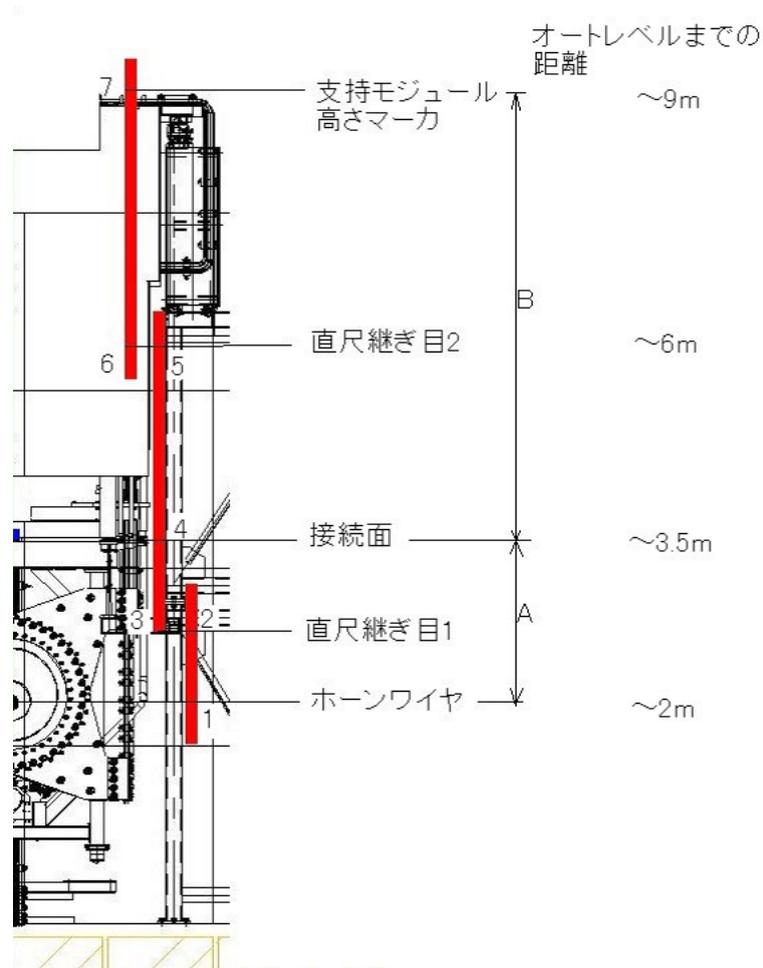


図 29: 高さ方向測量時の直尺読み取り位置とオートレベル設置場所までの距離

	ホーンフランジワイヤ [mm]	内部導体ワイヤ [mm]	ガイドケガキ [mm]
測量 1 度目	0.0	-5.2	+3.5
測量 2 度目	+0.4	-5.1	+1.8

表 4: 水平方向測量結果 軸は下げ振りを 0、ホーン上流から見て右側を正にとつてある

目指す設置精度と同程度の誤差になってしまっている。

水平方向の位置調整、測量の問題点については次節で考察する。

	測定誤差 [mm]
水平位置マーカ読み取り	0.1
直尺読み取り	0.3
下げ振り設置	1.0
ワイヤ/ガイドケガキ読み取り	0.3
2乗和の平方根	1.1

表 5: 水平方向測定誤差評価

3.5 結論・考察

T2K 電磁ホーンの位置調整、測量について、第 3 ホーンの試作機を用いたテストセットアップで検証した。

その結果、高さ方向については目指す設置精度 1mm 以内を達成することができ、着脱やクレーン移動をしたときの再現性も確認できた。測量の精度も誤差 0.62mm と十分な結果が得られた。

一方、水平方向についてはホーン中心に近い内部導体内のワイヤで約 5mm ずれた、支持モジュール上部の水平位置マーカから出した軸がホーン軸と一致しなかったなど満足な結果が得られず、測量の精度も 1.1mm と目指す設置精度より悪かった。

ここから水平方向の位置調整についての問題点について考察する。

第一に、前述のようにホーン本体の位置調整のときにホーン上部 4 点で支えることができなかったということがある。ホーンフランジのワイヤと内部導体内のワイヤの高さの差を、ホーンを支持モジュールで吊った状態と下からジャッキで支えた状態の両方で測定すると 1mm 程度変化した。このことから、フレーム下部から支えた状態では正確に水平が出ておらずホーンをフレーム上部で吊り下げたときにホーンの傾きが変わる、もしくはホーンフレームが自重で変形していると考えられる。たわんでしまったアームを補強し、レベリングジャッキでホーンフレーム上部で支えられるようになれば、より支持モジュール接続時に近い状況でホーンの位置調整ができ、設置精度が改善すると思われる。

第二に、水平方向の調整方法の精度、特に下げ振りの設置精度が悪かったということがある。水平方向の位置調整には、支持モジュール側ガイドの軸を支持モジュール上部に持っていく時、支持モジュール上部のマーカから軸を求めてホーンワイヤ、支持モジュール側ガイドと比較する時の両方で下げ振りを用いていた。そのため、水平位置マーカの設置自体に大きな誤差が入り、さらに水平位置マーカを基準にした測量の際にも大きな誤差が入った。また、水平位置マーカと下げ振りを結ぶ時に丁度良い長さの直尺がなく、直尺にノギスを継いで調整、測量を行っていたことも精度の悪化に繋がっている。これらを改善するために、図 30 の

ような同一面の水平位置マーカ間の距離と等しい長さで下げ振りを垂らす位置となる中心に切り欠きのある治具を用いるなどの方法が考えられる。

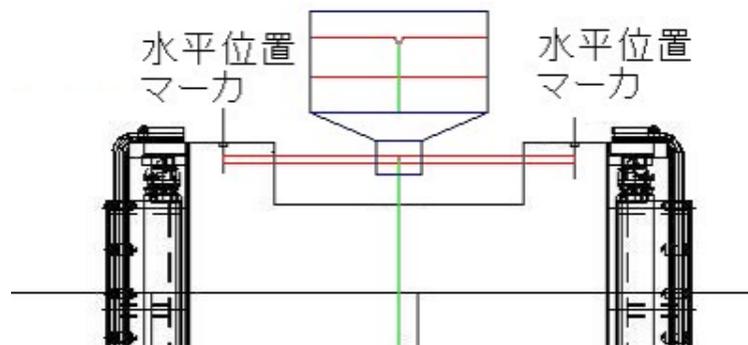


図 30: 支持モジュール上部水平位置マーカと下げ振りの精度を改善する治具模式図
 図 赤で示したのが治具で、緑線が下げ振り、四角は中心部分の拡大図である

また、水平位置マーカでは目印としているケガキの入ったナットの径が小さいためロックナットを使用しても固定しにくい点や、ホーンに張ったワイヤを弛みやすく、弛んだ際に修正しやすくするなどの改善点も考えられる。

4 電磁ホーン電流モニター用 CT の開発

本章では、ニュートリノビームの質に影響するもうひとつの要素、電磁ホーンを励磁する電流をモニターする検出器について述べる。

4.1 目的・要請

電磁ホーンで正確なニュートリノビームを生成するには、前章の位置調整の他に磁場を作る電流をモニターし、制御しなければならない。電磁ホーンは、物理的要請や電磁ホーン長期通電試験の経験から、電磁ホーン合計電流については 320kA に対して 3% 以内のずれ、4 対のバスバーそれぞれの電流については平均電流に対して 1% 以内のずれで運転しなければならない。よって、電流モニターとしてはこれより良い精度でホーン電流を検出しなければならない。

なお、ホーン電流の制御については次章で述べる。

4.2 Current Transformer (CT)

T2K 実験の電磁ホーンは、1 台につき 4 対のバスバーで電流を供給される。バスバーは、400mm × 20mm のアルミの板が往路、復路で対になったものである。電磁ホーン全体で 320kA のパルス電流を流すので、1 対のバスバーには 80kA の電流が流れる。パルスの幅は、第 1 ホーンで約 1ms、第 2、第 3 ホーンで約 3ms である。

このバスバーの電流をモニターするために、Current Transformer (CT) 検出器を用いることが考えられている。検出の原理は、図 31 のように並行平板型のバスバーに流れる電流で生じる磁場を、バスバーの間に設置したピックアップコイルに生じる誘導起電力で検出するというものである。これだけでは検出される波形はもとのパルス電流を微分したものになるため、ピックアップコイルに図 32 のようにさらにコイルと抵抗を接続して積分し、元のパルス電流と同形の波形にする。

この時、バスバー間の中心付近で磁場が一様と考えると、ここでの磁束密度 B は

$$B = \mu_0 I \quad (7)$$

と表せる。 μ_0 は真空の透磁率、 I はバスバーの電流面密度である。従って、ピックアップコイルに生じる誘導起電力 v は、ピックアップコイルの巻き数を N_0 、磁場に垂直な面に射影した面積を S として、

$$v = N_0 S \mu_0 \frac{dI}{dt} \quad (8)$$

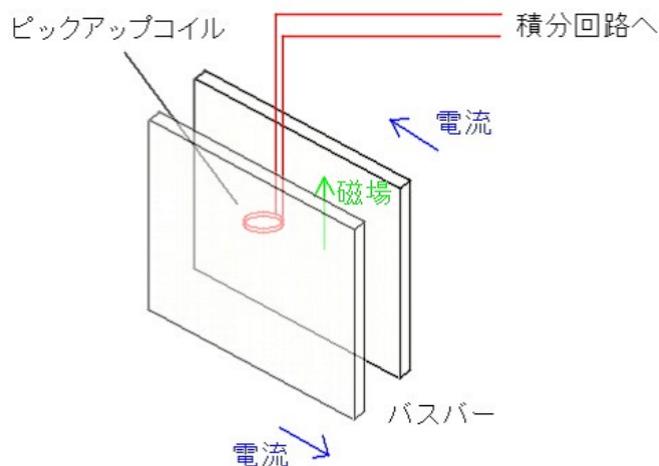


図 31: CT ピックアップコイル模式図 並行平板型バスバーに流れるパルス電流 (青) で生じた磁場 (緑) の変化をピックアップコイル (赤) で検出する。便宜上、手前側のバスバーは半透明に描画している。

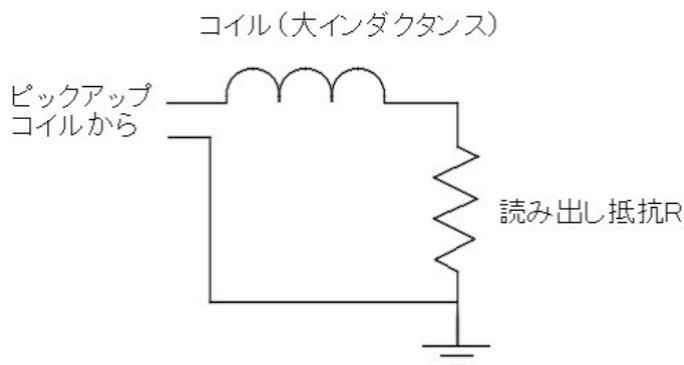


図 32: CT 読み出し回路図 微分形の信号を L と R の積分回路で積分する

と表せる。このピックアップコイルにインダクタンス L (\gg ピックアップコイルのインダクタンス) のコイル、抵抗 R を接続すると、 i をピックアップコイル

に流れる電流として、キルヒホッフの法則から

$$N_0 S \mu_0 \frac{di}{dt} = L \frac{dI}{dt} + Ri \quad (9)$$

が成り立つ。ここで周波数特性を見るために、 j を虚数単位として $I = I(\omega)e^{j\omega t}$ 、 $i = i(\omega)e^{j\omega t}$ と置くと読み出される電圧 v_{out} は

$$v_{out} = Ri = \frac{j\omega/\omega_L}{1 + j\omega/\omega_L} N_0 S \mu_0 I \quad (10)$$

となる。 $\omega_L = R/L$ は低域カットオフ周波数である。一般に電気回路は浮遊容量 C を持つので、 R と C が並列に入っているとして $R \rightarrow Z = \frac{R}{1+j\omega CR}$ と置き換えると、

$$v_{out} = Zi = \frac{j\omega/\omega_L}{1 + j\omega/\omega_L - \omega^2 LC} N_0 S \mu_0 \omega_L I \quad (11)$$

となり、2次のバンドパス特性を示す。 $R/L < \omega < 1/RC$ で平坦応答となり、

$$v_{out} \simeq N_0 S \mu_0 \omega_L I \quad (12)$$

である。第2、第3ホーンのパルス幅は約3msであるので、半周期3msの正弦波で近似すると周波数は約167Hzとなり、低域カットオフ周波数 ω_L はこれより十分小さくしなければならない。カットオフ周波数を10Hz程度にしようとする、50Ω読み出しの場合でコイルのインダクタンス L は5H程度にする必要がある。ピックアップコイルの面積を28mm×8mm、巻き数を20巻き、バスバー電流 I を80kA/0.4m=200kA/mとすると、得られる信号の大きさは約11mVと期待される。

読み出しは、フラッシュADCでの読み出しとピークホールドを用いてADCでの読み出しの両方を行う。後者は、次章のインターロックシステムで用いられる。

4.3 フラッシュADC (FADC)

ここで、読み出しのフラッシュADCについて述べる。これはホーン電流の情報を波形まで含めて収集するためのものである。FADCはT2K実験全体で共通のものを使用するが、ホーンの電流モニタで使用する時は5msと他の箇所を使用する時するより長いゲートでデータを収集する。そのため1イベントのデータ量を減らさなければ、読み出し回路のFIFOメモリが溢れてしまう。そこでデータを減らすためにFADCのサンプリング周波数を下げること考え、このサンプリング周波数を決定するために、正弦波を12bitFADCで量子化した場合をサンプリング周波数を変えてシミュレートした。正弦波の周波数は125Hz、FADCのレンジを最大に用いて正弦波を読み込んだと仮定して、サンプリング周波数は1MHz

と 200kHz の 2 通りを試した。1MHz とは用いる FADC の定格サンプリング周波数の下限値、200kHz とは 1 イベントのデータが FIFO メモリに収まる範囲で最大のサンプリング周波数である。その結果、図 33 のように正弦波のピークから $\pm 10\mu\text{s}$ ($> 5.6\mu\text{s} = 1$ スピルの幅) での正弦波のピークからの変化が約 0.003% であり、FADC の分解能 $1/4095 \approx 0.024\%$ より一桁小さかった。サンプリング周波数 1MHz でのデータ点の間隔 $1\mu\text{s}$ での変化はこれよりさらに小さいので、1MHz でのサンプリングは不要で 200kHz で十分である。

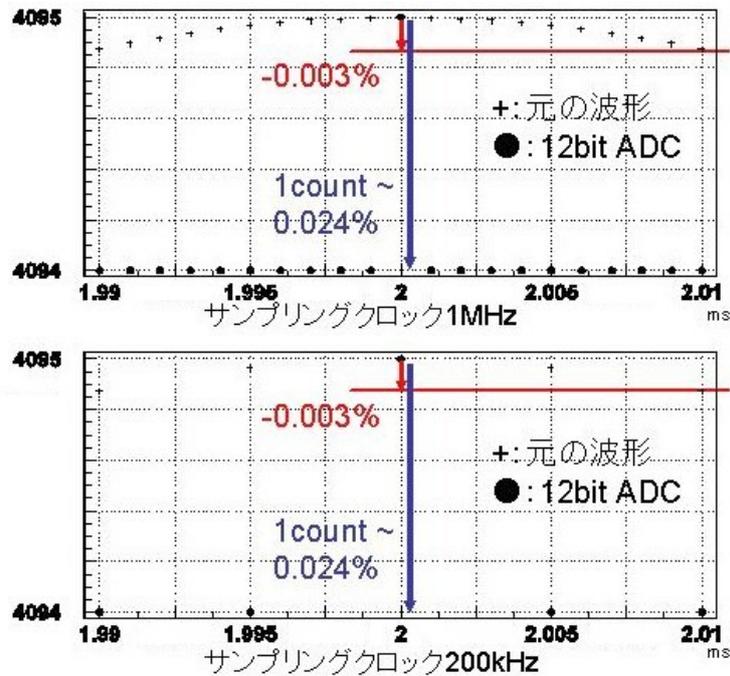


図 33: 周波数 125Hz の正弦波を FADC で量子化した場合をシミュレートした波形と元の正弦波の比較 (ピーク $\pm 10\mu\text{s}$) FADC の分解能は 12bit で、レンジを最大に用いて正弦波を読み込んだと仮定した ● は FADC の波形、+ は元の正弦波を表す 上は FADC のサンプリング周波数 1MHz、下は 200kHz の場合

ただし、FADC の定格サンプリング周波数は 1MHz 以上であるため、FADC に入力するサンプリングクロックは 1MHz のものを用い、サンプリングクロック 5 周期に 1 回だけデータを書き込むことによって実効サンプリングクロックを 200kHz に減らす。

4.4 試作機での性能評価

CTの構成要素の中で特に高い性能が要求される積分回路用コイルについて試作し、性能を評価した。コイルのコアには、外径135mm ϕ 、内径100mm ϕ 、厚さ30mmのトロイダルコアを用いた。材質には、ファインメット（Feを主成分としてSi、B、Cu、Nbを添加したアモルファスに熱処理を加え、結晶粒径を10nm程度まで小さくしたもの）を用いた。これは、比透磁率が約20000、飽和磁束密度が約1.2T、保磁力約2.5A/mの軟磁性材料である。このコアにグラストープを巻いて絶縁した上で、0.8mm ϕ のエナメル線を331回巻いてコイルを製作した。以下で、このコイルを用いた積分回路の性能評価について述べる。

4.4.1 LR積分回路の時定数の測定

製作したコイルと50 Ω の抵抗で積分回路を作り、図34のようなセットアップでファンクションジェネレータを用いて矩形波を入力して時定数の測定を行った。図35はこの時のオシロスコープの画像で、オシロスコープで測定した時定数 τ_L

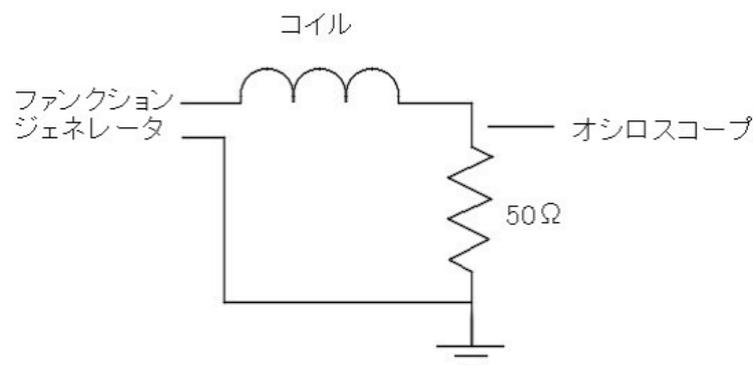


図 34: 積分回路試作機 回路図

は $46.4 \pm 4.0\text{ms}$ となった。誤差はオシロスコープの分解能から来る。これから積分回路の低域カットオフ周波数 $\omega_L = 1/\tau_L$ は $21.6 \pm 1.9\text{Hz}$ 、コイルのインダクタンス $L = \tau_L \times 50\Omega$ は $2.3 \pm 0.2\text{H}$ となった。トロイダルコアの形状、比透磁率、コイルの巻き数からインダクタンスを見積もると3.4Hであり、同じオーダーの結果が得られた。また、低域カットオフ周波数も目標である10Hzに近い値が得られた。

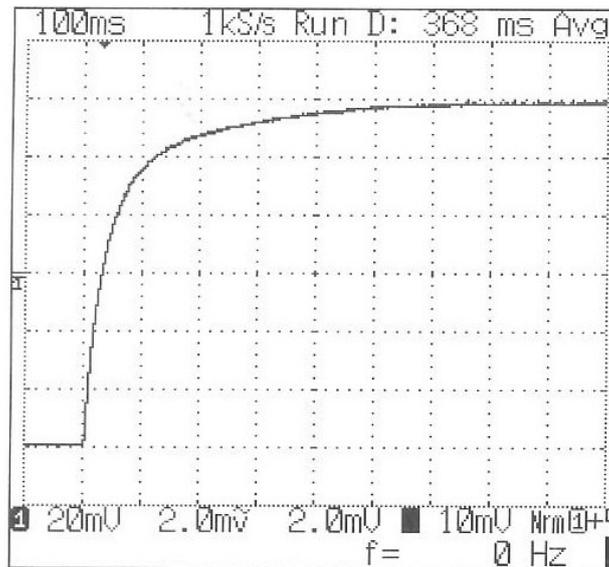


図 35: 積分回路時定数測定時のオシロスコープ画像

4.5 結論・考察

電磁ホーンの電流をモニターするための検出器として、並行平板型のバスバーの間に生じる磁場を読み出す Current Transformer (CT) を考え、必要となる性能や信号の大きさを見積もった。

CT の信号を読み出すフラッシュADC の分解能と予想される信号の変化からサンプリング周波数の最適化を行い、実効サンプリング周波数を 200kHz と決定した。

CT の読み出しに用いる積分回路の高インダクタンスコイルを試作し、その性能を評価した。その結果、時定数 τ_L は $46.4 \pm 4.0\text{ms}$ 、積分回路の低域カットオフ周波数 ω_L は $21.6 \pm 1.9\text{Hz}$ 、コイルのインダクタンス L は $2.3 \pm 0.2\text{H}$ となった。コイルのインダクタンスは設計から期待される性能と同じオーダーが得られ、低域カットオフ周波数も求められる性能である 10Hz 程度に近い結果が得られた。

今後の課題としては、周波数応答の測定を行い電磁ホーンのパルス電流を想定したときに動作するか、波形を再現できるかを確認することが必要である。次に、現在準備が進められている第 3 ホーン試作機の通電試験で実際にホーン電流を測定してみることがあげられる。また、次章で述べるインターロックシステムと組み合わせ、電磁ホーンの電流モニタ・制御系全体としての試験をすることも必要である。

5 電磁ホーン制御システムの開発

前章でホーン電流をモニターする CT 検出器について述べたが、本章では検出した電流値を元に電磁ホーン、およびニュートリノビームライン全体を制御するインターロックシステムについて述べる。

5.1 目的・要請

電磁ホーンの電流に異常が発見された場合、想定しているニュートリノビームが生成できず測定データの質が保証できなくなり、電磁ホーンの故障の恐れもあるので、直ちにビームラインを停止しなければならない。具体的には、物理的要請や電磁ホーン長期通電試験の経験から、電磁ホーンの合計電流については 320kA に対して 3% 以内のずれ、4 対のバスバーそれぞれの電流については平均電流に対して 1% 以内のずれで運転しなければならない。

また、電磁ホーンはニュートリノビームラインの基本的な構成要素のひとつであるため、安定性が高く、できるだけ操作がシンプルなシステムであることが必要である。

5.2 インターロックシステム

前述の目的のため、Programmable Logic Controller(PLC) を用いてインターロックシステムを開発した。

装置の構成は以下のようにになっている。

- 電源ユニット
PLC 全体に電源供給する。
- CPU モジュール
全体のデータ処理を行う。
- LAN 通信モジュール
外部 PC と接続して、シーケンスのダウンロードや設定値の書き込み、バックアップを行う。
- ADC モジュール
ピークホールドした CT の信号を入力する。入力電圧を逐次 AD 変換するもので、分解能は 0.5mV、レンジは 0 ~ 10V である。
- TTL 入力モジュール
トリガー、ホーン電源の状態を入力する。

- TTL 出力モジュール
ピークホールドのリセット信号を出力する。
- デジタル出力モジュール
ビームラインの停止信号を出力する。
- RS-232C 通信モジュール
タッチパネルとの通信を行う。
- タッチパネル
スタート、ストップのスイッチや設定値の入力を行う。また、設定値や運転中のデータの表示も行う。
- 接点入力モジュール
タッチパネル故障時に予備のスタート、ストップのスイッチとして使用する。
- 外部電源
タッチパネルや TTL 出力、デジタル出力モジュールに電源を供給する。
- Delay&Gate generator
NIM モジュール、ビームトリガーを生成する。
- ピークホールド
NIM モジュール、CT の信号をピークホールドする。

図 36 は、PLC ラック部分の写真である。

このインターロックシステムは、PLC 電源、NIM ビン電源、タッチパネルなどの外部電源のスイッチを入れれば、後はタッチパネルでのスタート・ストップなどの単純な操作だけで基本的な動作をさせられるものになっている。

5.2.1 処理の流れ

シーケンスの全体的な流れは以下のとおりである。加速器のタイミング信号からトリガーを生成し、ピークホールドした電流モニタ CT の信号を ADC で読み出して、演算処理を行いインターロックの判定をする。異常が発見されるとビームラインの停止信号を出力する。ビームトリガーでの処理が終わるとピークホールドのリセット信号を出力して、確認のため再度 ADC を読み出し、ここで異常が発見された場合も停止信号を出力する。ここをビーム 1 スピル毎に繰り返す。

以下で、より詳細にシーケンスを説明する。図 37 は、電磁ホーンインターロックシステムのロジック図、図 38 はタイミング図である。シーケンスは主に初期化処理部とインターロック動作部に分かれる。

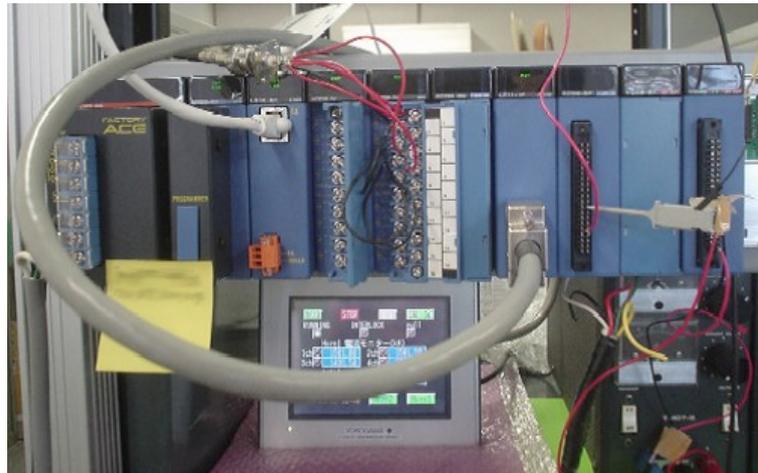


図 36: PLC ラックの写真 左から電源ユニット、CPU モジュール、LAN 通信モジュール、ADC モジュール 2 個、接点入力モジュール、RS-232C 通信モジュール、TTL 入力モジュール、デジタル出力モジュール、TTL 入力モジュール、ラック下部にタッチパネルがある。

- 初期化処理部

PLC 起動時に入出力、内部リレーの初期化を行い、設定値の読み込みを行う。この設定値には、PLC モジュール配置、使用する ADC チャンネル、ADC リフレッシュの待ち時間、ADC の較正係数、インターロックの判定条件が記述されている。インターロックの判定条件とは、合計電流値、許容する合計電流値からのずれ、許容する各チャンネルの平均電流値からのずれ、ピークホールリセット後の電流値の範囲で、典型的な値はそれぞれ 320kA、3%、1% で、リセット後の電流値範囲は電流モニタ用 CT のノイズレベルを見て決められる。この設定は PLC 内部レジスタに保持されるようになっており、前回起動時の設定データが存在すればその設定を、存在しなければ別のレジスタに保存してある規定値を読み込む。これらのデータは外部 PC にバックアップすることも可能である。設定の読み込みが終わると、それに従い各 PLC モジュールの設定を行う。それから、PLC の自己診断データとの一致、設定の妥当性を確認し、実際に設定されたデータを確認用レジスタに保存する。これも外部 PC から読み込むことができる。最後に画面に設定値を表示して人間の手で認証を行う。この時、自己診断との一致、設定の妥当性に問題があれば、認証はできないようになっている。認証ができれば、インターロックシーケンス動作部に入る。

また、インターロック動作部に入った後も、タッチパネルから入力して設定を変更することができ、この時にも初期化処理と同様に自己診断データ

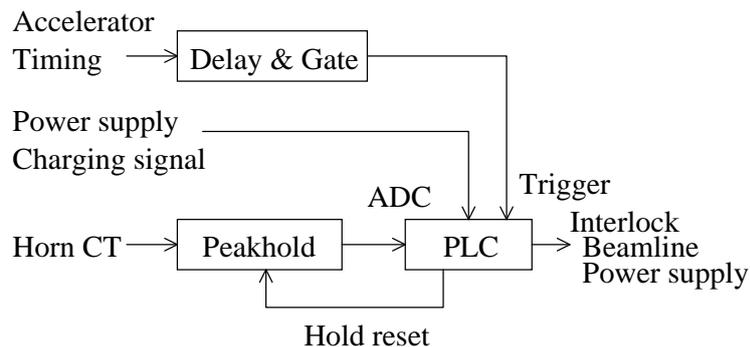


図 37: ビームライン中に見たインターロックロジック図

との一致、設定の妥当性を確認し、人間による認証を経て新しい設定が反映される。

- インターロック動作部

インターロック動作部は、さらに電磁ホーンを励磁する電流について判定する部分と、ピークホールドリセット後に null データを確認する部分に分かれる。

- ビームトリガー判定部

加速器からのビーム -20ms の信号から Delay&Gate generator で生成したビームトリガーが入力されると、3 台の電磁ホーン各 4 チャンルずつからの CT の ADC 値を読み込む (図 38 中 Read signal)。これらの数値に校正係数をかけ、各ホーンについて 4 チャンルの合計電流と平均電流を計算する。ここで得られた各チャンネルの電流値と電流値の合計、平均は画面に表示され、リアルタイムで確認ができる。それから、設定した条件に従って各ホーンについて合計電流と平均電流の判定を行い、異常が発見されれば停止信号を出力する。ただし、ニュートリノビームライン立ち上げ時にはホーン電流を 10 段階程度に分け徐々に上げていくので、立ち上げ時であることを示す信号が入力されているときには、合計電流の判定はせず、各チャンネルの電流が平均からずれていないかのみ判定する。異常がなければ、ピークホールドのリセット信号を出力し、ピークホールドリセット後の nullADC 値を読み込むトリガーとなるタイマをスタートする。このタイマは ADC のリフレッシュ時間を待つためであり、(1 つの ADC モジュールで使用しているチャンネル数) $\times 1\text{ms} + 3\text{ms}$ 程度待つ必要がある。

- null トリガー判定部

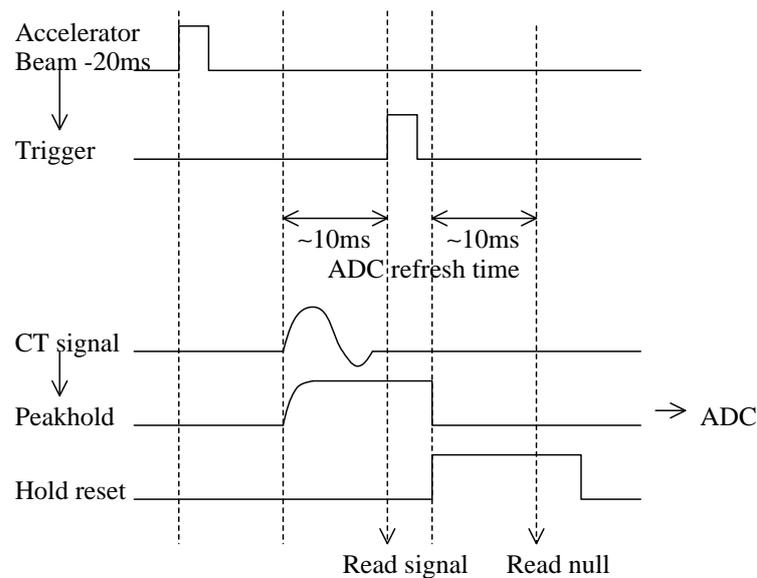


図 38: インターロック・タイミング図

ピークホールドリセット後のタイマがタイムアップすると、それをトリガーにして3台のホーン各4チャンネルずつのADC値を読み込む(図38中 Read null)。これらの数値に校正係数をかけ、null電流値が設定した範囲内にあるかを判定して、ピークホールドのリセットができていないか、ホーンの電流が下がっているか、CTに異常がないかを確認する。ここでも異常が発見されれば、停止信号を出力する。異常がなければ、再びビームトリガーを待つ状態になり次のビームスピルを待つ。

実際のシーケンスラダー図は、付録Aに記す。

5.2.2 実験室でのテスト

このシーケンスの動作を確認するために、ファンクションジェネレータを用いて擬似信号を生成し検証を行った。図39はテストセットアップでのロジック図、図40はタイミング図である。擬似信号には、周波数500Hzの正弦波1周期を、1Hzクロックをトリガーにして発振させたものを用いた。これは、第1ホーンの励磁電流、全幅1ms程度のパルス電流で繰り返し周期0.3Hzに近いものを選んだ。トリガーの生成にはファンクションジェネレータのSync out信号を用いた。

ここから、動作テストの結果について述べる。

まず、PLCの電源を入れると、設定確認画面・図41、42、43が表示され、起動時の設定読み込みと設定確認画面の表示が正常に動作していることを確認した。

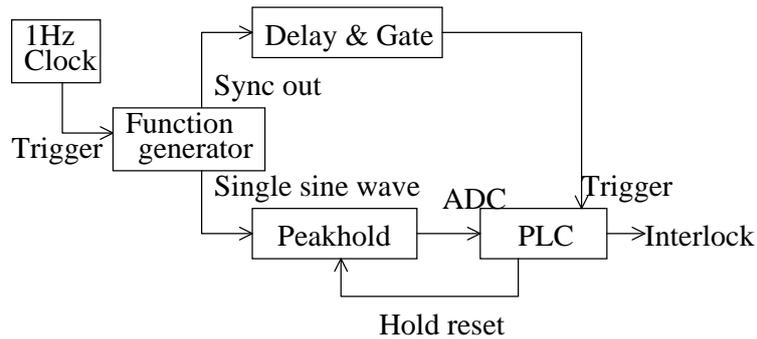


図 39: インターロックテストセットアップ・ロジック図

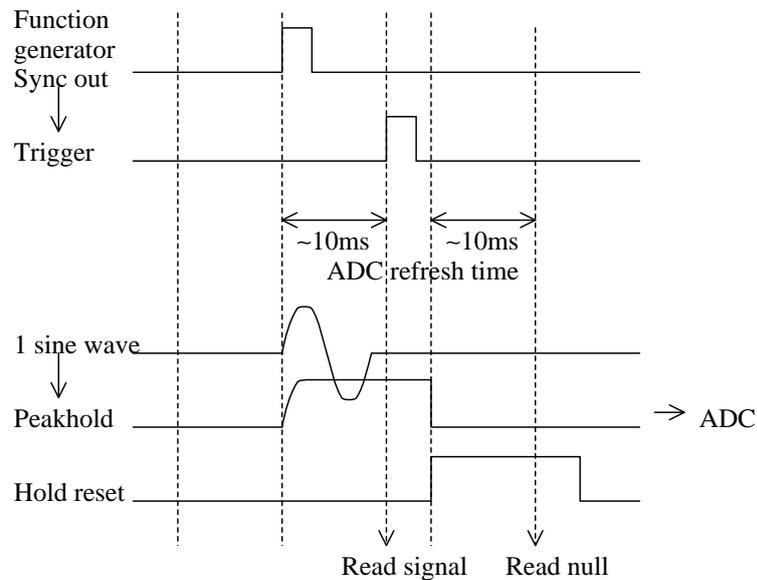


図 40: インターロックテストセットアップ・タイミング図

ここで、設定確認画面 3 で OK をタッチすることで、正常にインターロック動作モード画面・図 44 に変わった。

設定値の PLC 自己診断との一致、妥当性の確認部分を検証するために、設定変更画面・図 45 から、故意に不当な設定を入力した。その結果、きちんと異常が検出され、設定確認画面・図 46 で、図 41 では点灯していなかった赤いインジケータ（ここでは PLC モジュール実装状態）が点灯し、停止信号が出力された。また、この時人間による認証を無効化し、設定を修正しなければ通常の動作画面に変わらないことも確認した。

次に、インターロック動作部の確認をした。図 44 の状態で、PLC で設定した

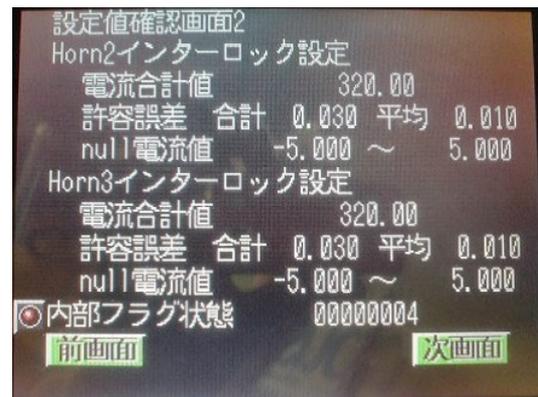
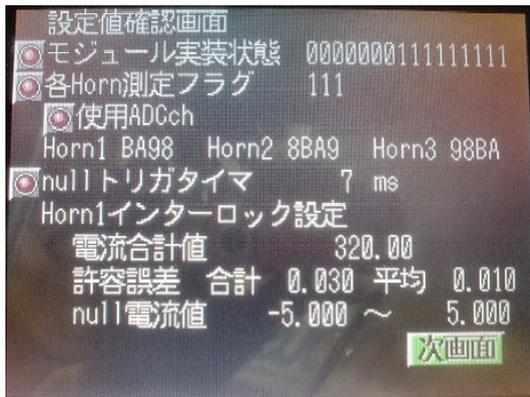


図 41: インターロックシーケンス・設定 確認画面 1 図 42: インターロックシーケンス・設定 確認画面 2



図 43: インターロックシーケンス・設定 確認画面 3



図 44: インターロックシーケンス・動作モード画面

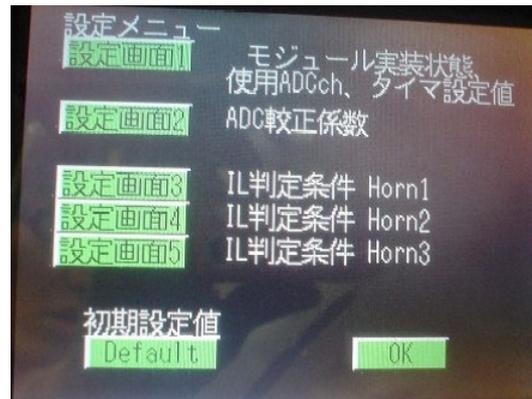


図 45: 設定変更画面

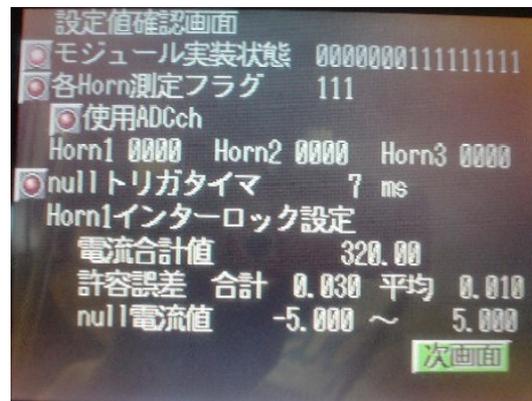


図 46: 設定値に異常を発見した時の設定確認画面

大ききの信号を入力しタッチパネルのスタートスイッチに触れると、図 47 のように運転中であることを示す緑のインジケータが点灯し、各チャンネルの電流値、合計電流値、平均電流値を表示した。この時の信号をオシロスコープで見たものが図 48 である。これらの信号は、上からトリガー、入力信号、ピークホールド信号、ピークホールドリセット信号となっている。

電流値が異常な時の動作を確認するため、入力信号を故意に変化させると、図 49 のように異常を検出し、異常部（ここでは合計電流）の赤いインジケータが点灯し、停止信号が出力された。また、入力信号を PLC で設定した大ききに戻して、ピークホールドのリセット信号を入力しないようにすると、図 50 のように null データ異常を示す赤いインジケータが点灯し、停止信号が出力された。



図 47: インターロックシーケンス・正常運転中画面

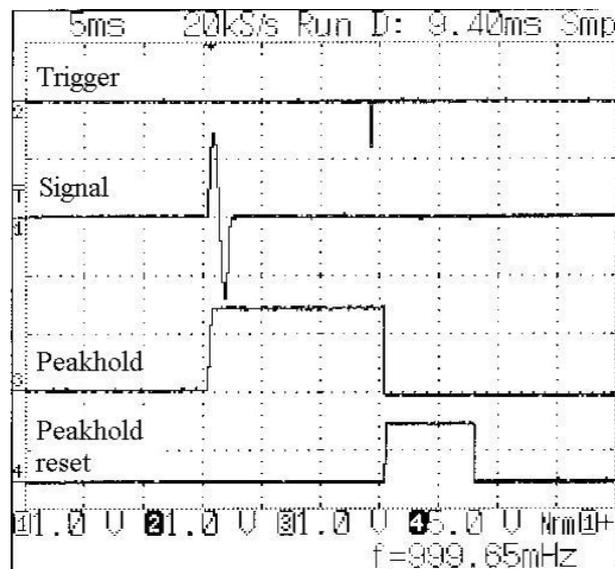


図 48: インターロックシーケンス・正常運転中オシロスコープ

5.3 結論・考察

正常な電磁ホーンの磁場でニュートリノビームを生成していることを保証し、異常発生時に電磁ホーンを保護するために、電磁ホーンの電流モニター用 CT から信号を読み取り、ホーン電流に異常があった時にビームラインを停止するインターロックシステムを PLC を用いて開発した。これを実験室でファンクションジェネレータで生成した擬似信号を用いてテストし、その結果、正常な信号を入力した時には正常に動作を続け、異常な信号や設定を入力した時には検知して停止信号を出力することを確認した。



図 49: 動作モード・合計電流異常時画面 図 50: 動作モード・null 電流異常時画面

今後の課題としては、現在準備が進められている第 3 ホーンの通電試験の際に、電流モニター用 CT と組み合わせてより実環境での試験をして、動作の確認、ノイズの影響の調査、その他新しい問題点の洗い出しが必要である。

6 結論

本研究では、長基線ニュートリノ振動実験 T2K のニュートリノビーム生成装置である電磁ホーンにおける位置調整、及び電流モニタと制御システムの開発研究を行った。これらは、求めるニュートリノビームを正確に生成し、またニュートリノビームの品質の不定性から来る系統誤差を抑えるために重要な要素である。

位置調整については、電磁ホーン及び支持モジュールの位置調整のための機構、調整手順を第 3 ホーン試作機を用いて検証した。その結果、高さ方向については求める精度 1mm 以内で位置調整、及び測量ができることを示した。ビームに垂直な面内、水平方向については最大で 5.2mm のずれが見られ、求める精度を達成できなかった。また、測量の精度自体も 1mm より悪かったため、それらの改善方法を考察した。

電流モニタについては、電磁ホーンの並行平板型バスバーの間に生じる一様磁場をピックアップコイルで検出し積分するという Current Transformer を考え、必要となる積分回路の性能、信号の大きさを見積もった。また、読み出しのためのフラッシュ ADC のサンプリング周波数を ADC の分解能と予想される信号の変化をシミュレートして最適化し、実効サンプリング周波数を 200kHz に決定した。読み出しの積分回路に用いる高インダクタンスコイルを試作し、性能を評価した。その結果、コイルのインダクタンスは $2.3 \pm 0.2\text{H}$ となり、設計から期待される性能と同じオーダーの値が得られた。積分回路の低域カットオフ周波数についても、 $21.6 \pm 1.9\text{Hz}$ と求められる性能である 10Hz 程度に近い結果が得られた。

制御システムについては、前述の電流モニタからの信号を読み出し、演算処理を行って、異常時に電磁ホーン、及びニュートリノビームライン全体を停止するインターロックシステムを Programmable Logic Controller (PLC) を用いて開発した。このインターロックシステムは、各バスバーの電流を読み取り、合計電流の規定値からのずれ、各バスバー電流の平均電流からのずれ、バスバー電流が流れていないときの電流モニタ値が設定した範囲にあるかを判定し、異常時に停止信号を出力するように設計した。このシーケンスの動作を、ファンクションジェネレータで生成した擬似シグナルを用いて検証し、信号や設定値の正常時、異常時共に設計どおりに動作していることを確認した。

本研究により T2K 実験で最も大切な構成要素の一つである電磁ホーンについて、要求される性能を満たすため、ある部分については、その実証を行い、またある部分については問題点を洗い出し、改善策を考察した。T2K 実験を成功に導くためにはこれらの改善策が実行されねばならない。

謝辞

本修士論文をまとめるまでに多くの方々にお力を貸して頂きました。ここで感謝の意を述べさせていただきます。

まず、西川公一郎教授には本研究の機会を与えていただき、またミーティング、ゼミなどを通じてご指導いただきました。中家剛准教授には指導教官として日ごろから細やかで鋭いご指導をいただき、思うように研究ができない時にも気に掛けていただきました。市川温子准教授には本研究の主題である電磁ホーンに関わる現場でいつもご指導、助言をいただき、本論文執筆中も相談にのっていただきました。横山将志助教には大学院進学当初からまさに本論文提出まで非常にお世話になりました。

また高エネルギー加速器研究機構ニュートリノグループの小林隆教授、石田卓助教、中平武助教、関口哲郎助手、石井孝信さん、坂下健さんにも様々な助言、ご指導をいただきました。

電磁ホーン的位置調整の研究の際には、高エネルギー加速器研究機構技師の林浩平さんに大変お世話になりました。

電流モニタの研究では、フラッシュADCのファームウェアのことで高エネルギー加速器研究機構エレクトロシステムグループの田内一弥さんにお世話になりました。

京都大学高エネルギー物理学研究室の皆様には日頃からお世話になりました。加藤一成さん、前坂比呂和さん、長谷川雅也さん、山本真平さん、久保田淳さん、平出克樹さんには真剣に、時にはにぎやかにご指導いただいただけでなく、ご自身の研究に取り組むお姿にも勉強になりました。同期の江沢孝介君、栗本佳典君、信原岳君とは居室で、そして実験の現場で協力し議論しながら学ぶことができました。松岡広大君にはミュオンモニターのことで特にお世話になり、ご迷惑もおかけしました。

最後に、今までお世話になった全ての方々、そしてどんな時も支えてくれた家族に改めて感謝いたします。ありがとうございました。

2008年 黒澤陽一

A インターロックシーケンス ラダー図

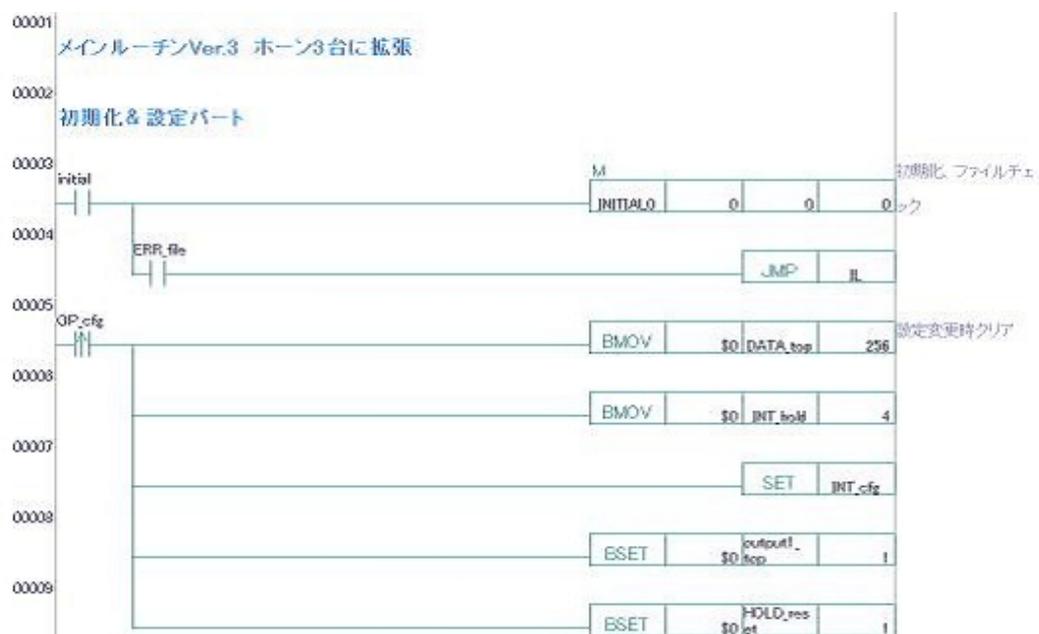


図 51: メインシーケンス 1

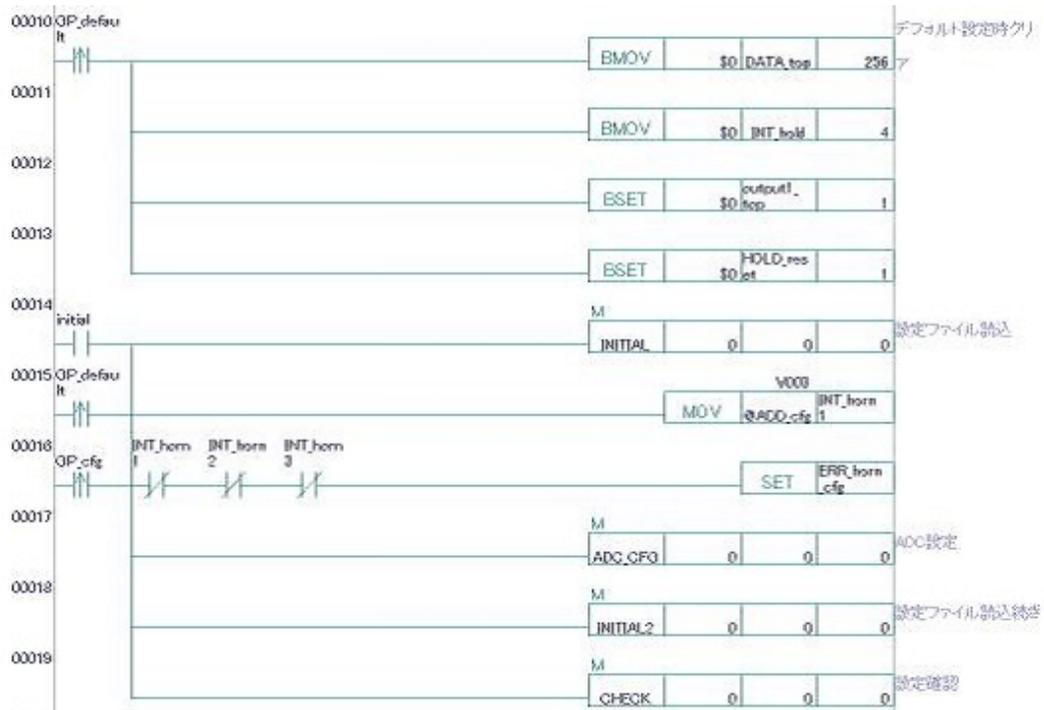


図 52: メインシーケンス 2

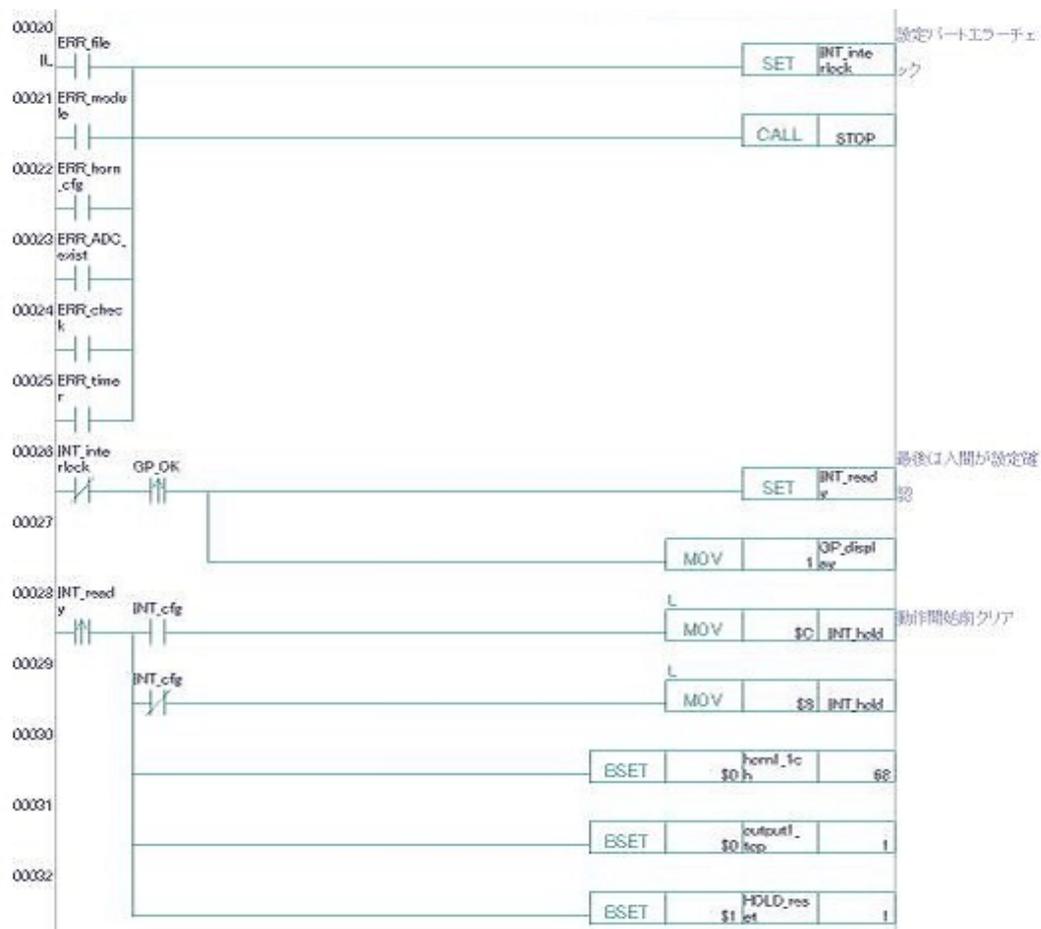


図 53: メインシーケンス 3

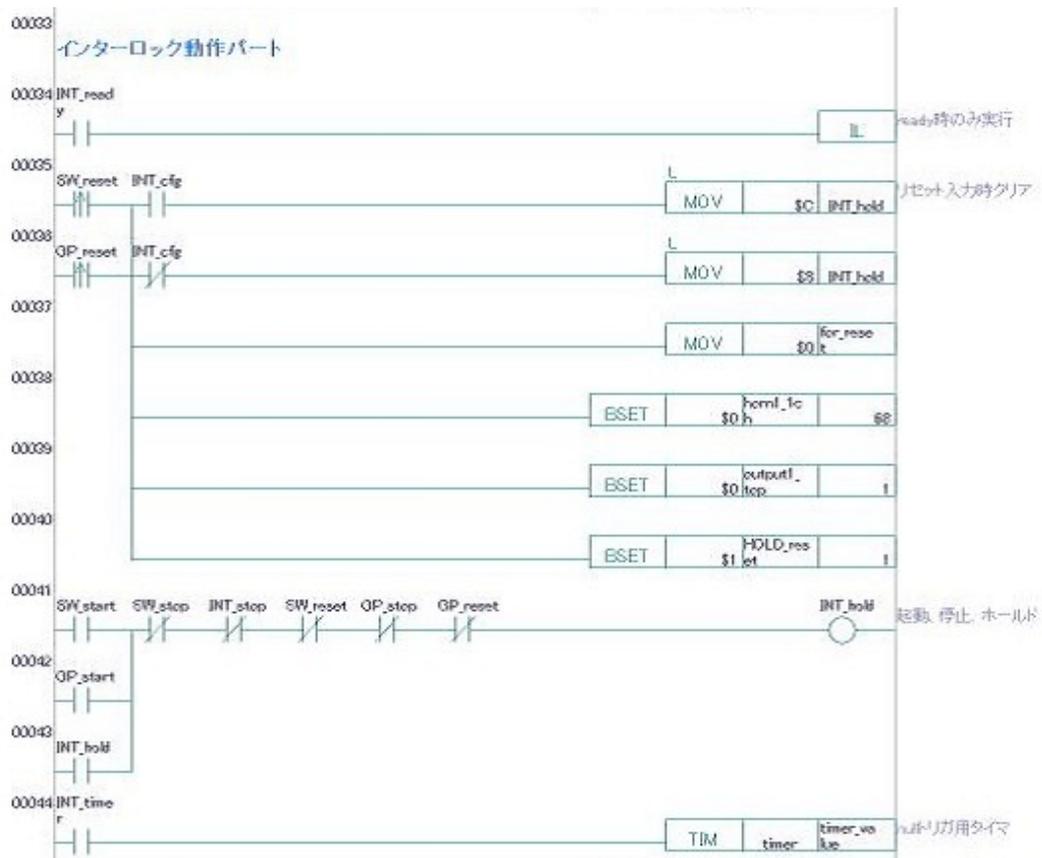


図 54: メインシーケンス 4

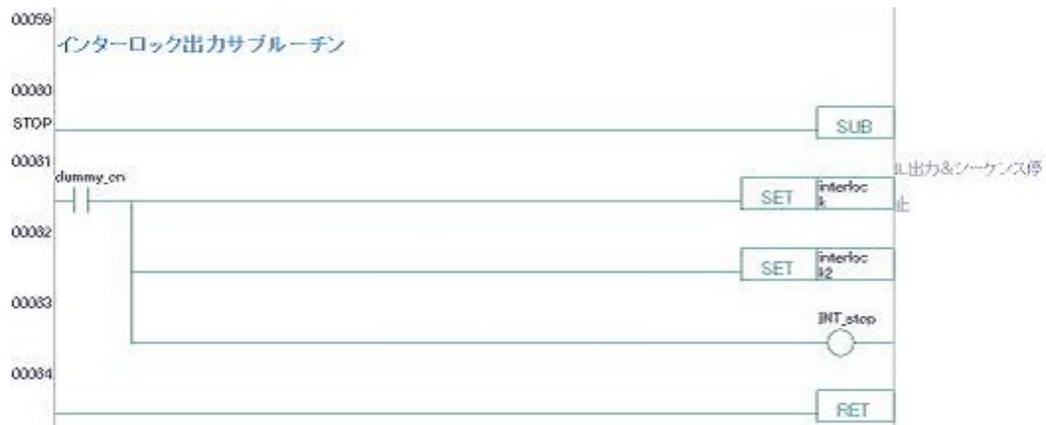


図 56: メインシーケンス 6

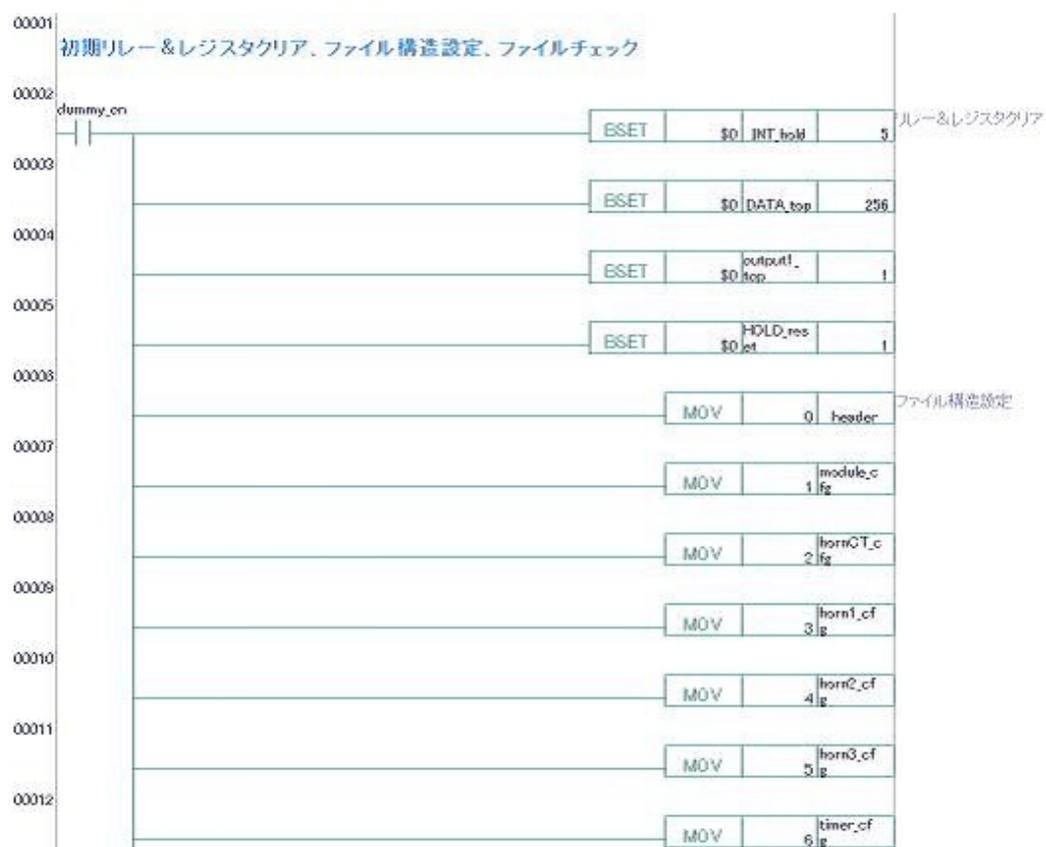


図 57: 起動時処理 1

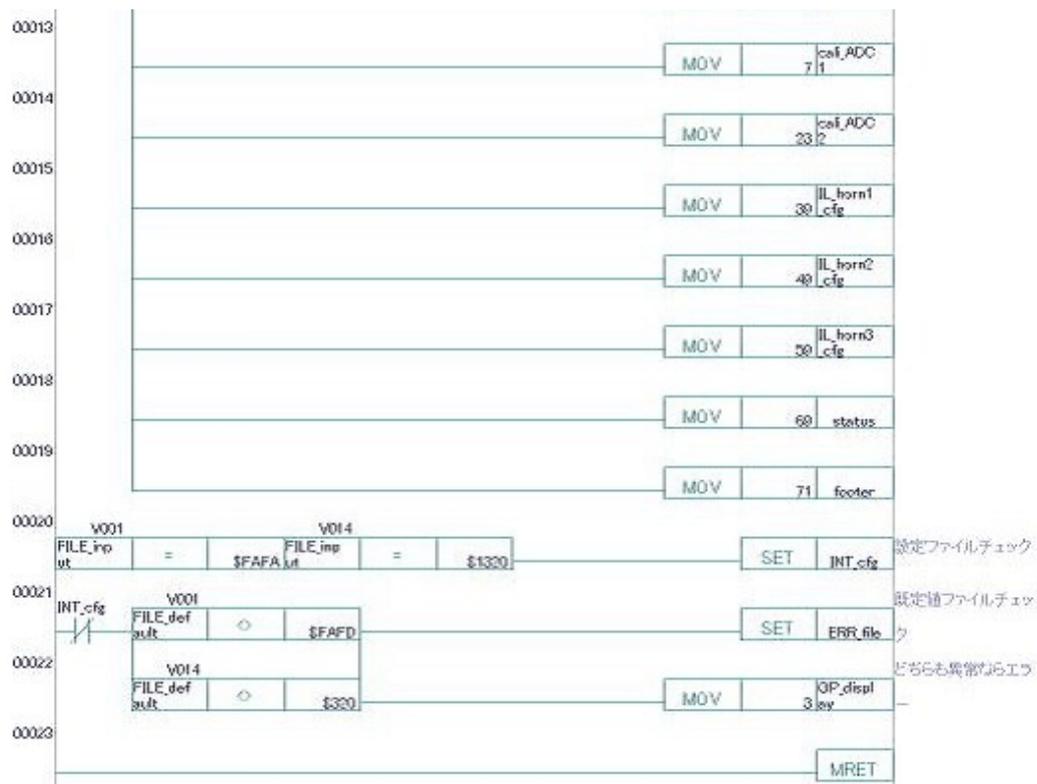


図 58: 起動時処理 2

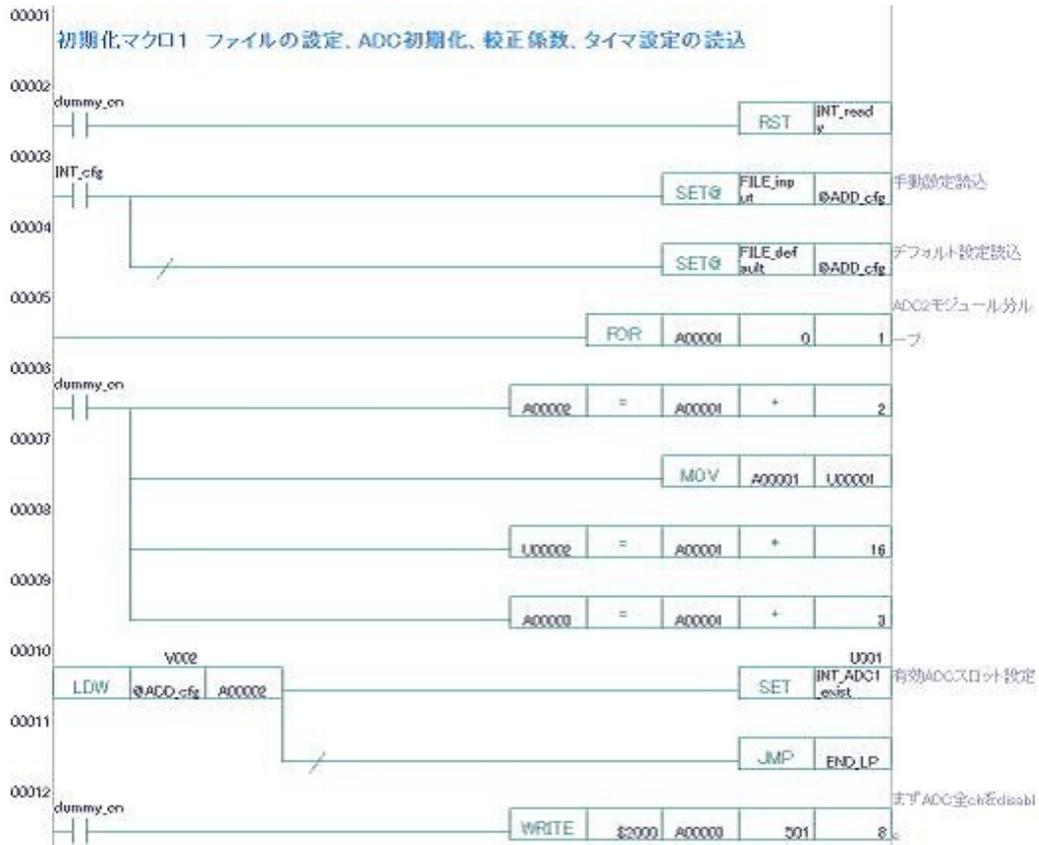


図 59: 設定ファイル読み込み 1

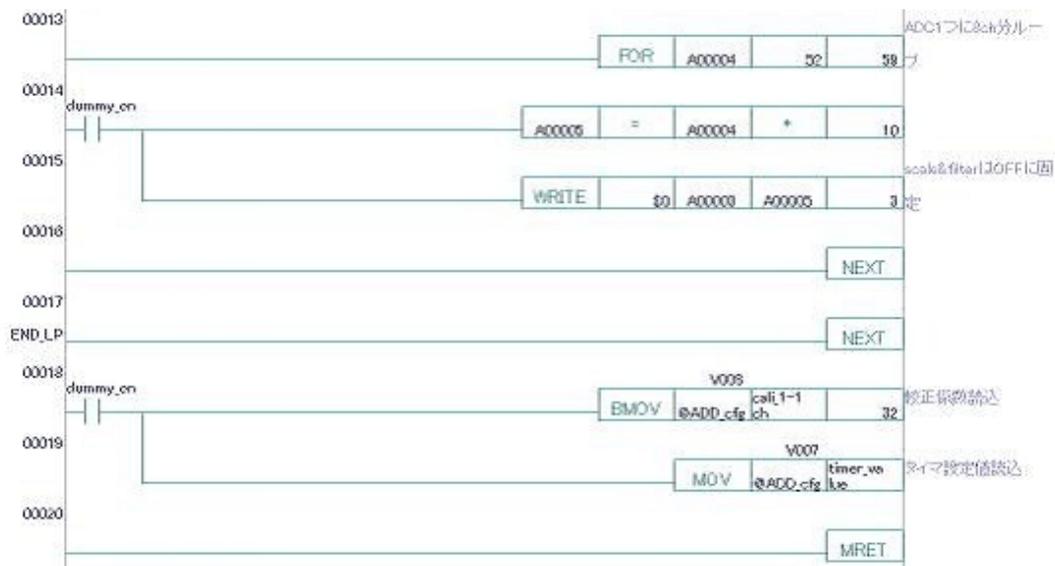


図 60: 設定ファイル読み込み 2

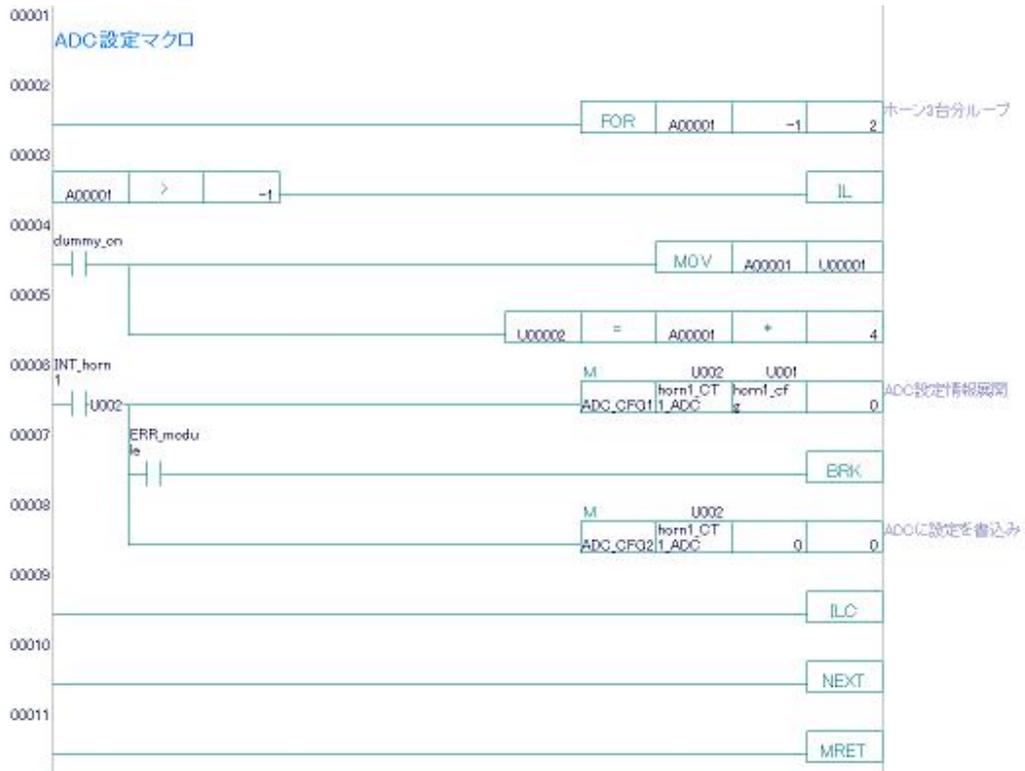


図 61: ADC 設定

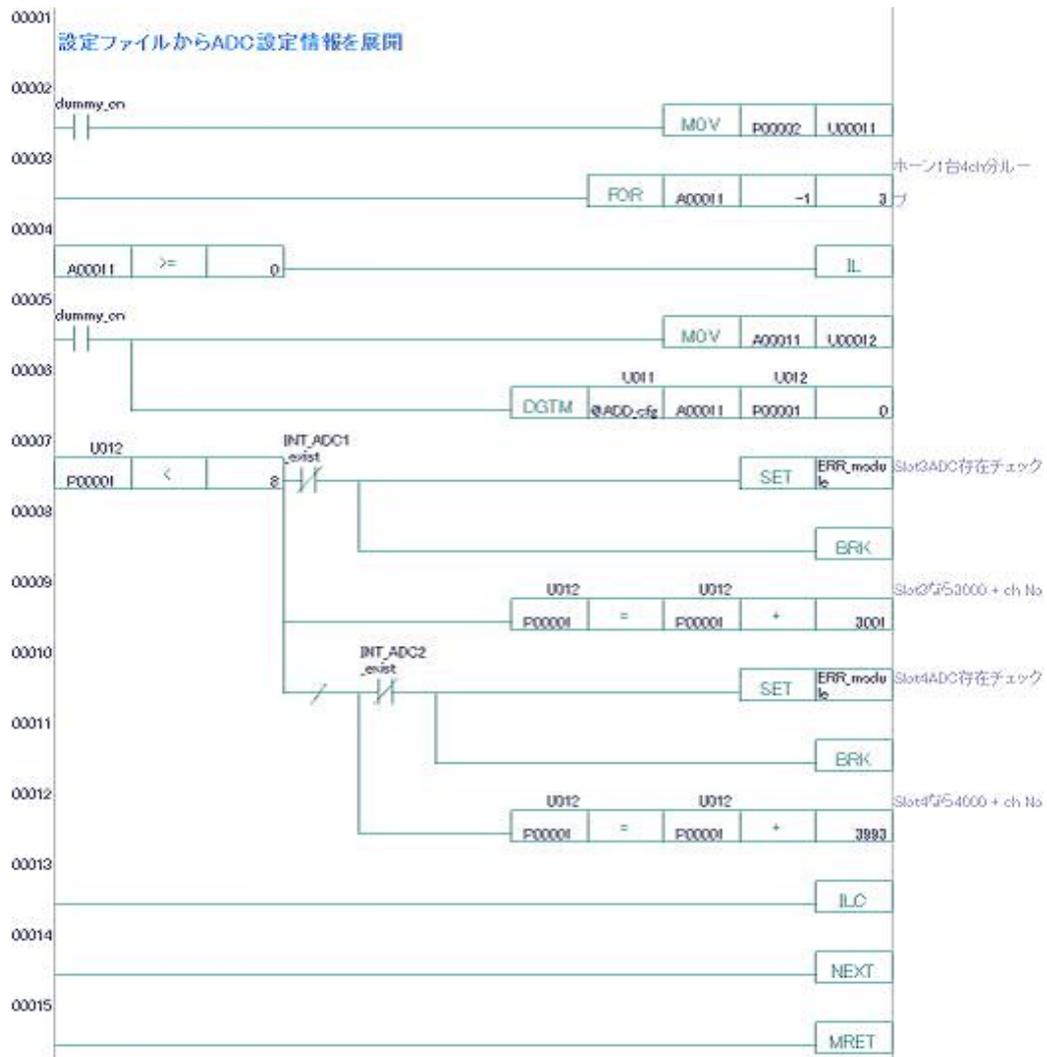


図 62: ADC 設定内部マクロ 1



図 63: ADC 設定内部マクロ 2



図 64: 設定ファイル読み込み続き

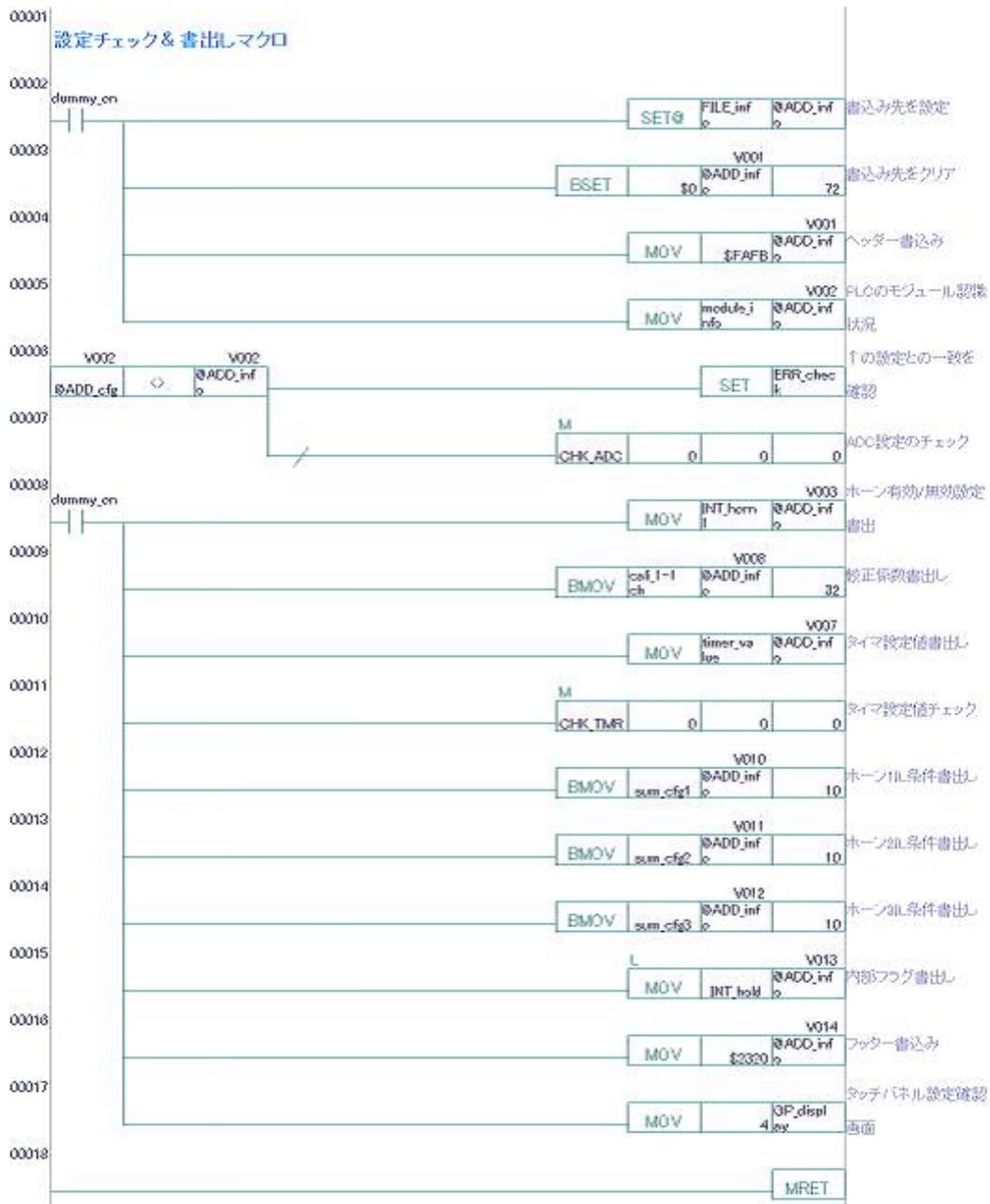


図 65: 設定チェック

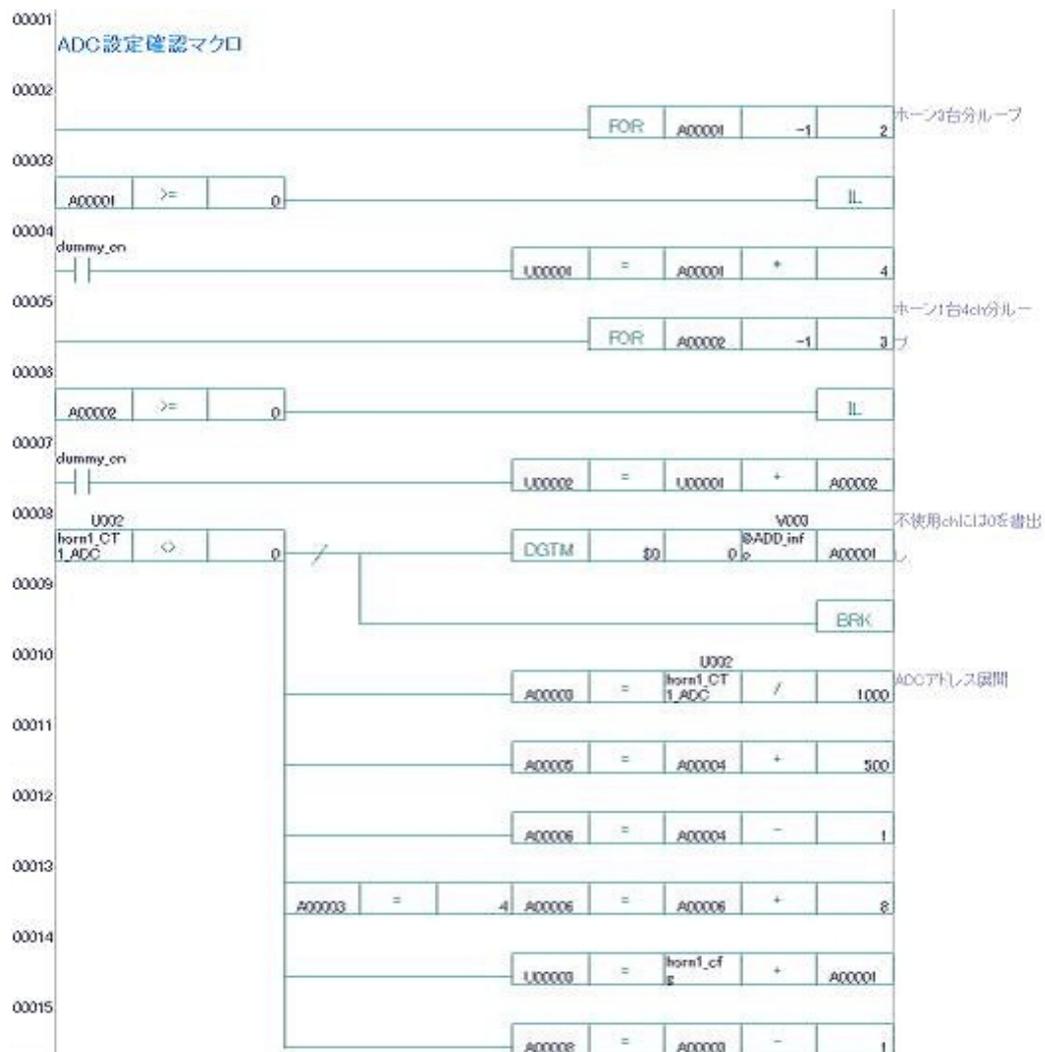


図 66: ADC 設定チェック 1

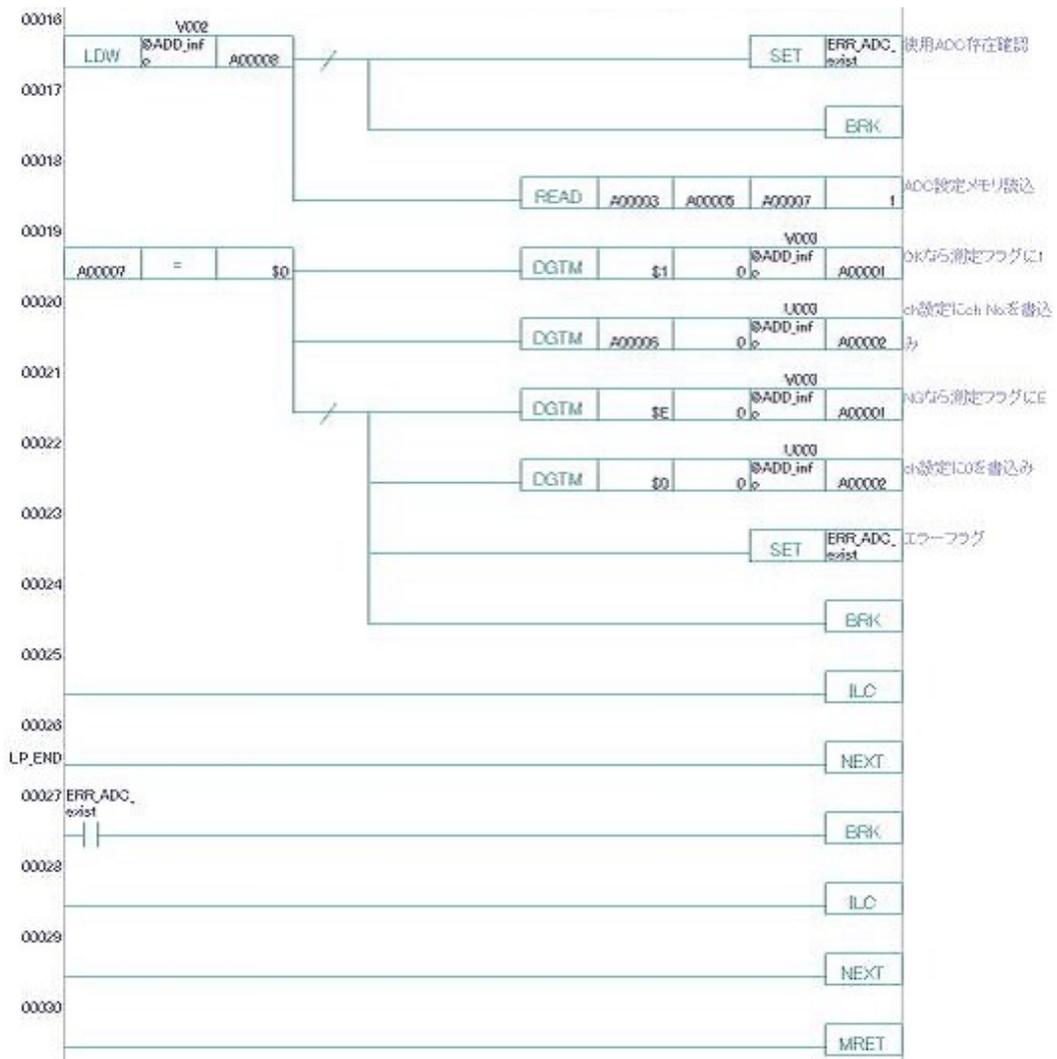


図 67: ADC 設定チェック 2

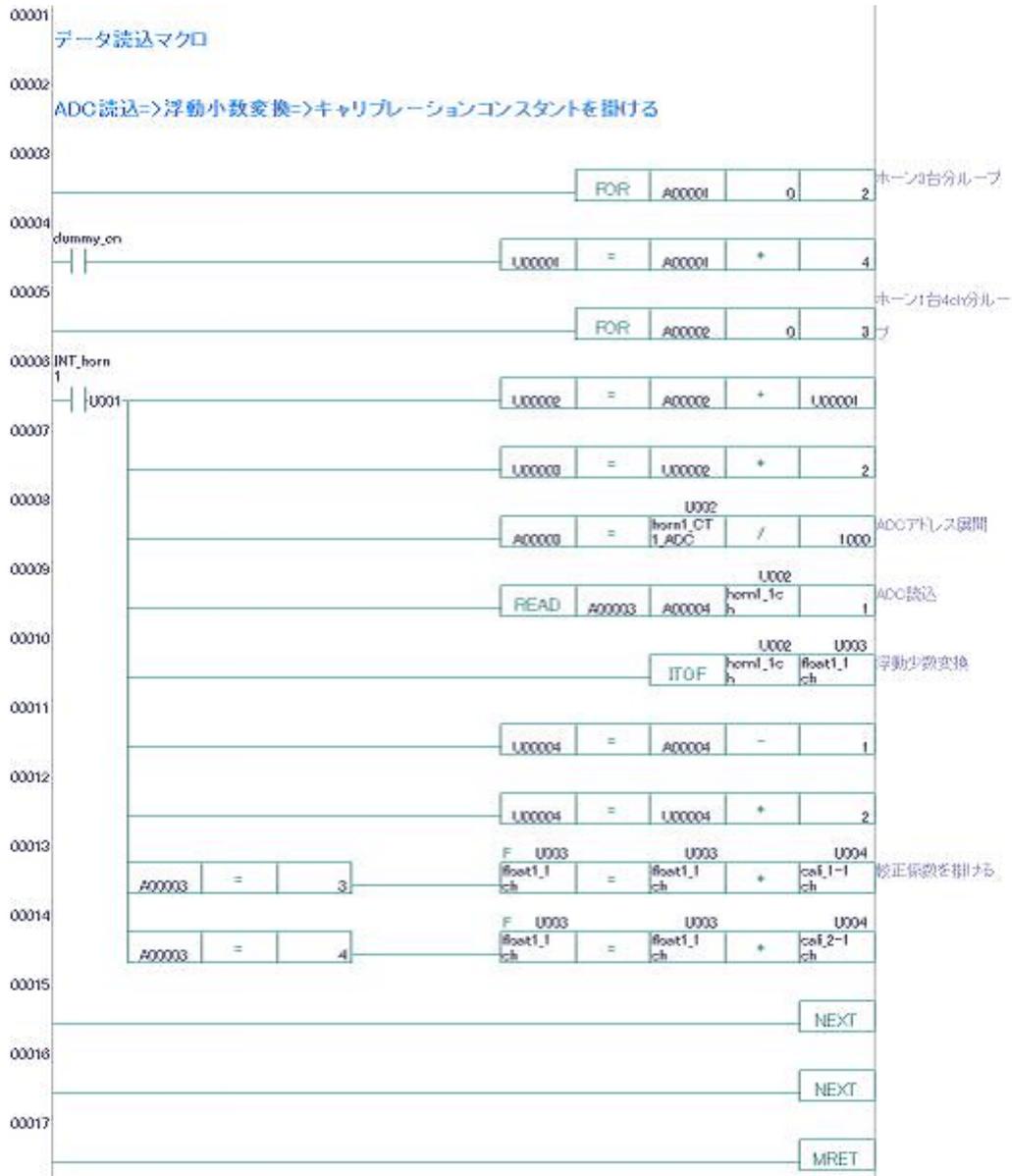


図 69: ADC データ読み込み

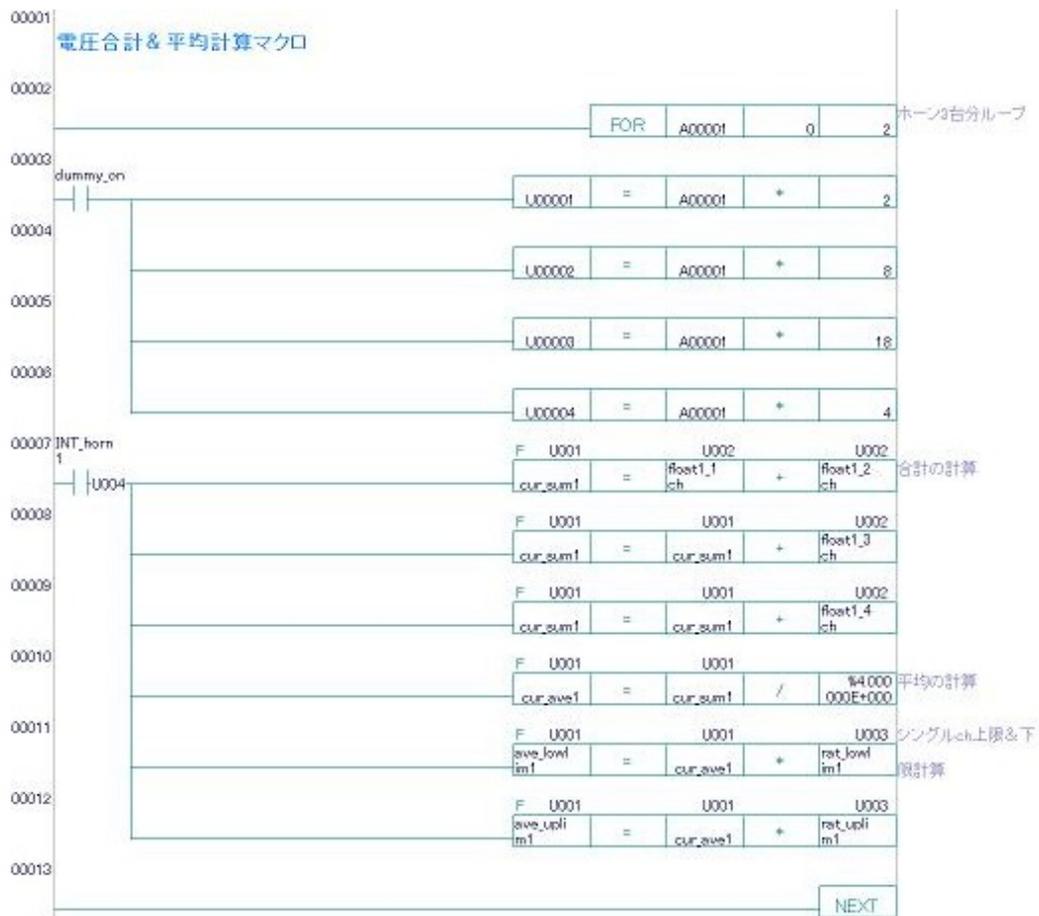


図 70: ADC データ演算処理 1

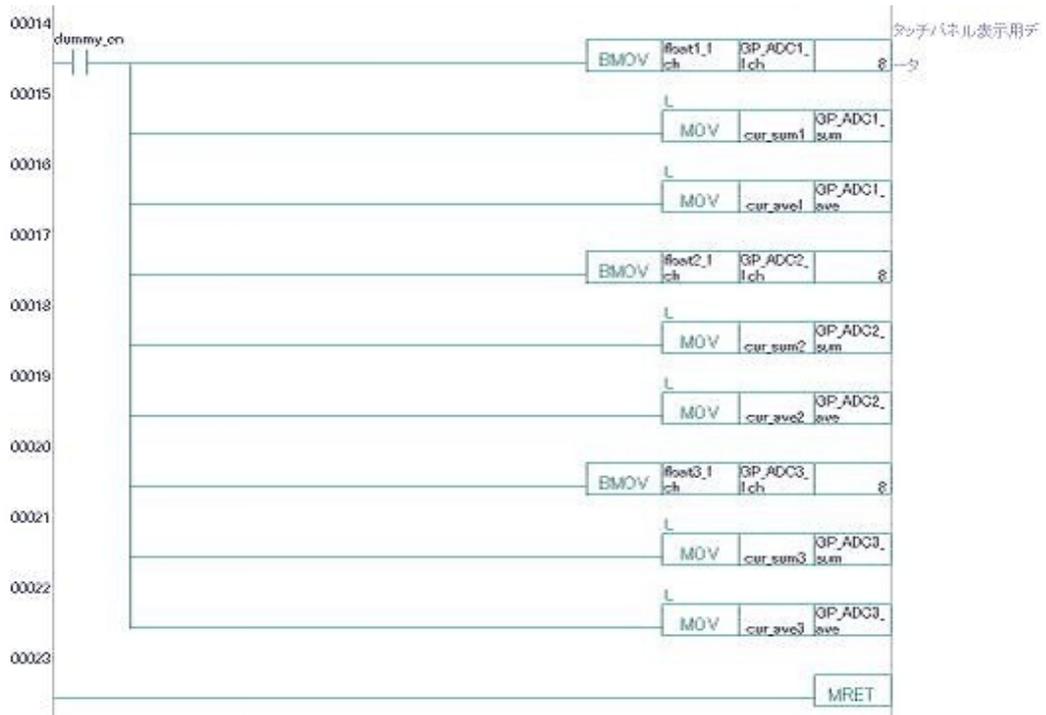


図 71: ADC データ演算処理 2



図 72: ビームトリガーインターロック判定 1



図 73: ビームトリガーインターロック判定 2

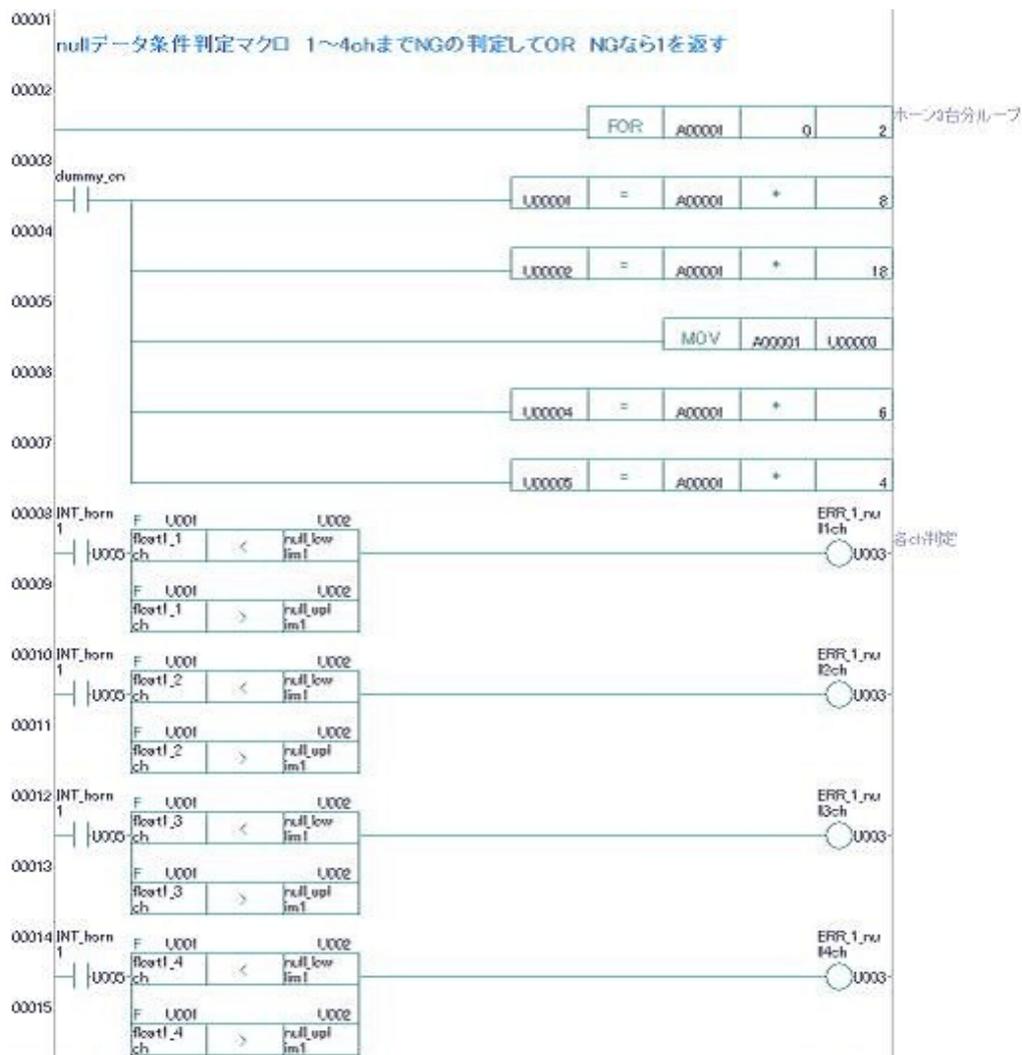


図 74: null トリガーインターロック判定 1



図 75: null トリガーインターロック判定 2