# 第12章 実データの収集と解析

Nspire は、いろいろなセンサーを通して実データの収集をすることができます.実データの収集 は TI-89 や voyage200 でも可能でしたが、センサーと接続するには附属の機器 (CBL) を用意する必 要がありました.Nspire には CBL 機能 (Computer Based Laboratory) が内蔵されているので、セン サーを接続するだけで実データを収集することができます.収集されたデータはリストデータとして 保存されます.したがって、得られたデータに統計処理を行ったりプロット画面にグラフを表示させ る等のことが容易です.

この章では、センサーを利用した実データの収集の仕方や、その解析方法について解説します.

# 33 センサーと Vernier DataQuest

# 33.1 センサーの種類

実データの収集を行うには、そのためのセンサーが必要です. どんな実データを収集したいのか により使用するセンサーが異なります. また、どんなセンサーでも使用できるわけではありません. Nspire に接続して使用できるセンサーは米国の Vernier 社製のセンサーです.

どのようなセンサーが使用できるかを表 33.1 にまとめました. これは,販売代理店の Web サイト に掲載されているものですが,必ずしも,使用できるセンサーがすべて網羅されているわけではあり ません.最新の情報は,表 33.1 の欄外に記載した Vernier 社の Web サイトを参照してください.

型番の末尾がBTD で終わるのはデジタルセンサーで,BTA はアナログセンサーです.デジタルセンサーとしては,音センサーやドロップカウンターがあります.表 33.1 には記載されていませんが,距離と速度・加速度を同時に取得できる距離センサー CBR2 もデジタルセンサーです.他の大部分の センサーはアナログセンサーです.温度センサー,光センサー,pH センサー,電圧センサーなど多数のセンサーがあります.

ただし,これらのセンサーを Nspire に必ずしも直接接続できるわけではありません.Nspire と接 続するためのインターフェースが必要です.これについては次の節で説明します.

なお,個々のセンサーのマニュアルには下記の注意書きが記されています.

All Vernier Software products are designed for educational use only. Our equipment is not designed or recommended for research or any apparatus involved with any industrial or commercial process such as life support, patient diagnosis, control of a manufacturing process, or industrial testing of any kind. Our equipment is to be used for educational purposes only.

要するに、これらのセンサーは教育用に設計され、生命維持とか、製造プロセスの管理、産業用の 検査などの装置としては設計されていないので、教育目的でのみ使用してください、ということです.

表 33.1: Nspire で使用できるセンサー

センサー名	型番	センサー名	型番
距離センサ	MD-BTD	pH センサ	PH-BTA
フォトゲート	VPG-BTD	トリス互換フラット pH センサ	FPH-BTA
自由落下実験用スケール	$\mathbf{PF}$	伝導率センサ	CON-BTA
加重計	FP-BTA	ドロップカウンタ	VDC-BTD
回転運動センサ	RMV-BTA	比色計	COL-BTA
加速度計 (5G)	LGA-BTA	電流計システム	CCS-BTA
加速度計 (2.5G)	ACC-BTA	酸化還元電位センサ	ORT-BTA
3 軸加速度計	3D-BTA	硝酸塩イオン選択電極	NO3-BTA
力センサ	DFS-BTA	カルシウムイオン選択電極	CA-BTA
圧力センサ	GPS-BTA	アンモニアイオン選択電極	NH4-BTA
温度センサ	TMP-BTA	塩化物イオン選択電極	CL-BTA
広域温度センサ	WRT-BTA	カリウムイオン選択電極	K-BTA
赤外線温度計	IRT-BTA	可視域分光計	SVIC-PL
表面温度センサ	STS-BTA	紫外線域分光光度計	VSP-UV
極長温度センサ	TPL-BTA	スペクトル放射分光計	VSP-EM
熱電対	TCA-BTA	ガスクロマトグラフィ	GC2-MINI
電流計	DCP-BTA	偏光計	CHEM-POL
高電流センサ	HCS-BTA	融解ステーション	MLT-BTA
電圧計	VP-BTA	CO2 濃度センサ	CO2=BTA
30 ボルト電圧計	30V-BTA	O2 濃度センサ	O2-BTA
電位差計	DVP-BTA	溶存酸素計	DO-BTA
增幅器	PAMP	光学式溶存酸素計	ODO-BTA
電荷センサ	CRG-BTA	PAR(光合成有効放射) センサ	PAR-BTA
磁界センサ	MG-BTA	塩分センサ	SAL-BTA
音センサ	MCA-BTA	濁度センサ	TRB-BTA
音量計	SLM-BTA	エタノールセンサ	ETH-BTA
光センサ	LS-BTA	EKG センサ (心電図)	EKG-BTA
放射線センサ	VRM-BTD	心拍数モニター	HGH-BTA
デジタル放射線センサ	DRM-BTD	血圧センサ	BPS-BTA
風速計	ANH-BTA	握力計	HD-BTA
気圧計	BAR-BTA	呼吸モニターベルト	RMB
湿度計	RH-BTA	肺活量計	SRP-BTA
土壌水分センサ	SMS-BTA	測角器	GNM-BTA
流速センサ	FLO-BTA		
日射計	PYR-BTA		
紫外線センサ	UVB-BTA		

[参照先 URL] (株)Naoco http://www.naoco.com/vernier/Sensors.html

Vernier Software & Technology https://www.vernier.com/products/sensors/

表 33.1 は Vernier 社製のセンサーですが, Vernier 社製ではないセンサーであっても使用可能な場 合があります.多くのセンサーは,その信号伝達が電圧変動により行われています.Vernier には電 圧変動を読み取れる電圧計 (VP-BTA) があります.つまり,Vernier 社製のセンサーでなくても,そ のセンサーの電圧信号を Vernier の電圧計で読み取ることができるときは,Nspire でも使用可能であ ると思われます.ただし,Vernier の電圧計 (VP-BTA) は±10V の範囲の電圧を5mV の精度で測定 します.センサーの電圧信号が微弱であるときは増幅作業が必要になるかもしれません.その場合は 増幅回路を作製する必要があり,マイコンを必要とするかもしれません.

一般のセンサーが使用可能になったとしても、それは Vernier の電圧センサーを使用してのことなので、12–1 頁に記した Vernier 社の注意書きには留意することが必要です.

**33.2** センサーと Nspire との接続

いろいろなセンサーを Nspire で利用することができますが, Nspire との接続の仕方には 3 つのタ イプがあります.

(1) Nspire の「miniUSB コネクター」との接続

Nspire の miniUSB コネクターに直接接続することができるのは,図 33.1(a) にある距離センサー CBR2 と,温度センサー EasyTemp(EZ-temp) です.いずれも,表 33.1 には記載されていません.

CBR2 はデジタルセンサーで,15 cm から 6 m までの距離を,超音波で 1 mm 精度で測定します. 測定した距離から速度や加速度も計算します. EasyTemp はアナログセンサーで,-20°C~115°Cの 範囲の温度を ±0.5°C の精度で測定することができます.

(2) インターフェース「EasyLink」を利用した接続

このインターフェースを Nspire の miniUSB コネクターに接続すると,表 33.1 にあるセンサーを一 つだけ利用することができます.図 33.1(b)の白い箇所がセンサーとの接続口です.ただし,EasyLink からは利用できないセンサーもあるので注意してください.基本的にデジタルセンサーとの接続はで きません.表 33.1 の中で,EasyLink との互換性がないセンサーは下記の通りです.

音センサー (MCA-BTA), 3 軸加速度計 (3D-BTA), エタノールセンサー (ETH-BTA), 光学式溶存酸素計 (ODO-BTA), 距離センサー (MD-BTD), フォトゲート (VPG-BTD), ドロップカウンター (VDC-BTD), 回転運動センサー (RMV-BTD), 放射線センサー (VRM-BTD), デジタル放射線センサー (DRM-BTD), 偏光計 (CHEM-POL), CO2 濃度センサー (CO2-BTA), 心電図 (EKG-BTA) [参照先 URL] https://www.vernier.com/til/1908/

(3) インターフェース「Lab Cradle」を利用した接続

このインターフェースは Nspire と同じ程度の大きさがあります.次頁に示した図 33.1(c) の左側 は Lab Cradle の裏側,右は表側です.表側の白い部分に Nspire を載せてドッキングさせて使用しま す.表 33.1 にある全てのセンサーを使用することができ,1つのみならず複数のセンサーを同時に使 用することができます.Lab Cradle の両脇には,アナログセンサーとの接続口が3個,デジタルセ ンサーとの接続口が2個用意されています.Lab Cradle は内部メモリーを 32MB 持ち,最大で毎秒 100,000 個のデータを取得することができます.







(a) 距離センサー CBR2

(b) EasyLink

(c) Lab Cradle

⊠ 33.1: CBR2, EasyLink, Lab Cradle

# 33.3 Vernier DataQuest

センサーを使用して実データを収集するには、Nspireのアプリケーションである「Vernier DataQuest」 を利用します.このアプリケーションを追加する前に、新たなプロブレムを作成するか、またはド キュメントを新規に作成しておきましょう.第6~9章を一つのドキュメントで使用してきた場合は、 現在のドキュメントにはかなりの数のリストデータが保存されています.そのため Nspireの反応が 鈍くなっていると思われるので、新たなドキュメントを作成するのがよいと思われます.

# 新たなドキュメントの開設

新しいドキュメントを開設するには, on を押して電源を入れた直後の Home 画面で「1. New Document」を選択します. この Home 画面は, 適当なページが表示されている状態で on を押して も現れます.

選択すると,図 33.2(a)のように画面上部に「Doc」が表示されて,とりあえず「Doc」という名前のドキュメントが開設されます. 左上の番号が「1.1」となることから,プロブレム1の1ページ目であることが分かります. そして,どのようなアプリケーションを追加するかを問われるので,表示されるメニューから「7: Add Vernier DataQuest」を選択します. (b)はセンサーが接続されていない状態での DataQuest の初期画面です. センサーが接続されていると,センサーが感知している現在の値が右側の画面上部に表示されます. この画面をセンサー画面と呼ぶことにします.



図 33.2: 「7: Vernier DataQuest]

なお,以前のドキュメントに戻りたいとき,そのドキュメントは (フォルダー名を変更していない 場合は)「My Documents」というフォルダーに保存されています. (m)を押して現れる Home 画面 で「2. My Documents」を選択すると,保存されているドキュメントの一覧が表示されます.前のド キュメントに名前をつけていなくても,それは「Unsaved Document」という名前で自動保存されて おり,「My Documents」の先頭に表示されます.その一覧の中から必要なドキュメントを選択するこ とで,前のドキュメントに戻ることができます.

ドキュメントの操作方法の詳細は第2節を参照してください.

# DataQuest の初期画面

いろいろな実データの収集は,図 33.2(b)の初期画面の中から行うことができます. センサーが接続されていると,センサーの種類が自動判別されて必要な初期設定が自動的に行われます. そして, センサーが現在収集している値が (b)の右側の画面に表示されます.

図 33.2(b) の左側の箇所では,実データの収集をどのような設定で行うのか,その設定状況が表示 されています.「Mode」の箇所ではデータの取り方を指定することができ,時間軸「Time Based」が 設定されていることが示されています.「Rate」の箇所ではデータ収集の間隔を指定することができ, 毎秒5個でデータ収集するように設定されています.「Duration」ではデータの収集時間を指定する ことができ,40秒間のデータ収集を行うように設定されています.したがって,図 33.2(b)の設定で は、5×40 = 200個のデータが収集されることになります.収集されたデータはリストデータとして 保持されています.

これらの設定変更はそれぞれの箇所から行うこともできますが、「Mode」の上の左端にある丸いマークの箇所を選択すると、3つの設定を全部変更することができます.詳細はこれから詳述します.

# 34 EasyLinkと温度センサーによる実データの収集と解析

具体的な実データの収集を, EasyLink と温度センサー (TMP-BTA) を用いて行ってみましょう.他のセンサーを用いた場合でも、実データの収集に至るまでの手順は同様です.

使用する温度センサーは「Stainless Steel Temperature Probe」といい,長さが約10cm ほどのス テンレス棒で温度を測定します. -40°C~135°C の範囲で測定することができ,水中では10秒程度 で反応が落ち着きます.温度センサーには幾つかの種類があり,330°C まで測定できるものもありま す.センサーの仕様や他の温度センサーの詳細は,下記の Vernier 社のサイトを参照してください. [参照先 URL] https://www.vernier.com/products/sensors/temperature-sensors/

#### **34.1** Nspire と温度センサーの接続

Nspire と温度センサーの接続は、次の手順によります.

(1) センサー画面のページを作る.

センサーによる実データを初めて収集するときは,第 33.3 節により新たなドキュメントを開 設してセンサー画面 (Vernier DataQuest) のページを作っておきます.

新規に開設しないで既存のドキュメントに実データを保存したい場合は,プロブレムを新しく して,その中にセンサー画面のページを作っておきます.

(2) EasyLink を Nspire に接続する.

(3) 温度センサーを EasyLink に接続する.

現在のドキュメントには,すでにセンサー画面の ページが作られているはずです.そのページが表示さ れている状態で温度センサーを接続すると,図 34.1 のように温度センサーが感知している現在の温度を 表示します.左側の諸設定の値は,温度センサーに 対するデフォルトの設定です.センサー画面以外の ページで接続したときは,センサー画面に移動する と図 34.1の画面になっています.このように,セン サーの値が表示される画面をメータービューといい



図 34.1: 温度センサーの接続

ます. 左側下部の左端にあるメーターのマークを <<br />
下)で選択すると、この画面になります.

#### 34.2 実データの収集 ▶

センサーが接続されると,Nspire はセンサーの種別を自動判別して収集条件を最適と思われる状態に設定します.したがって,センサーを接続後は,一部のセンサーを除いて,あまり複雑な設定をしなくても実データの収集を開始することができるはずです.温度センサーを利用して,さっそく実データを収集してみましょう.

(4) 新しい実験であることを宣言する.

新たな実験を行うときは、メータービューの menu 1 から「1: New Experiment」を選択し て新しい実験であることを宣言します.これにより、前の実験データは削除され、諸設定の値が 使用するセンサーのデフォルトの設定値で置きかえられます.

(5) 実データの収集条件を確認する.

接続したセンサーに対して、どのような収集条件が設定されたかは、図 34.1のメータービューの左側に表示される「Mode」「Rate」「Duration」で確認することができます.

「Mode」には、データ収集の仕方が表示されています. 温度センサーでは、デフォルトでは 「Time Based」に設定されます. この収集方法は、時間の流れに沿って、たとえば「毎秒5回」 というように指定されたタイミングでデータを自動収集します. 他に「Events with Entry」と 「Selected Events」という収集方法がありますが、これについては後述します.

「Rate」には、毎秒何個のデータを収集するかが表示されています. 温度センサーのデフォルトの設定値は「2 samples/s」です. つまり、毎秒2 個のデータが収集されます. 0.5 秒ごとに1 個のデータが収集されることになります.

「Duration」には、データを収集する時間が表示されています. 温度センサーのデフォルトの 設定値は「180 s」です. つまり、3 分間にわたりデータを収集します.「Rate」が毎秒 2 個なの で、全部で 2 × 180 = 360 個のデータを収集することになります.

(6) 必要であれば、収集条件を変更する.

実データの収集条件を変更するには、マウスポインタを変更したい箇所にあてて へを押します. たとえば、収集時間を指定している「Duration」を 30 秒に変更してみましょう.

「Duration」の箇所にマウスポイントをおいて へを 押すと,図 34.2の画面が表示されるので,時間を 30 秒に変更します.変更後のデータ数は 2 × 30 = 60 個になるはずですが,「Number of Points: 61」と表 示されます.これは,0秒からデータ収集を開始し て,指定時間を超えた瞬間に収集を終了します.し たがって,30秒台でも1個のデータが収集されるの で,個数が1個多くなるのですす.



(7) データを収集する.

図 34.2: データ収集時間の変更

温度の変化を簡単に得るには,温度センサーをお湯に入れて引き上げることです. コップにお 湯を入れて温度センサーのステンレス部分をお湯につけると,温度センサーの温度がどんどん上 昇していきます.上昇する温度変化が落ち着いてきたら,今度はそれを引き上げて室内に放置す れば温度がどんどん低下していきます.その低下する温度を測定することにします.

まず、コップにお湯を入れて温度センサーをつけ、温度の上昇変化が落ち着くのを待ちます. 次に、マウスポインタを出して、図 34.1 のメータービューの左上にある大きな「▶」にあてて おき、データ収集を開始する準備をします.このボタンを「スタートボタン」といいます.そし て、温度センサをお湯から引き上げると同時に へで押します.図 34.1 の右側の画面がグラフ画 面に変わり、数秒後にドットが表示されて図 34.3(a) のように線で結ばれていきます.指定した 収集時間に達するとデータ収集を終了します.そして、グラフ画面の範囲が最適化されて、(b) のようにデータを結んで得られる曲線が表示されます.

この画面を**グラフビュー**といいます. (b) の画面左下にある丸いメーターの記号を へ で押す と,図 34.1 のメータービューに戻ります. 逆に,実験データが収集されている状態で最下段の 中央のグラフマークを へ で押すとグラフビューが表示されます.

グラフ上の大きめのドットはデフォルトでは8個表示されます.単なる目安としてものです. 温度センサーの場合は,横軸のラベルには「Time(s)」が,縦軸には「Temperature(°C)」が表 示されます.これらのラベルは変更することができます.変更の仕方については後述します.

このように、センサーを繋いだ後は、収集時間などをちょっと変更するだけで実データを簡単 に収集することができます.そして、グラフの範囲は自動的に最適化されて表示されます.



図 34.3: 温度センサーによる実データの収集

(8) 収集したデータを保存する.

図 34.3(b)の左側には「run1」が表示されています.この実験では、時間と温度の2つのデー タが収集され、時間はrun1.time、温度はrun1.temperatureというリストに記録されます.上部 にあるスタートボタン(▶)を押すごとに、新たな実験データ(データセットという)で上書きさ れていきます.図 34.3(b)を(a)と見比べると、左側の2段目にあるチェック印√が黒くなって います.これをマウスポインタで選択して <> を押すと、最新のデータが保存されて run1の箇 所が run2 に変わります.その後の収集データは run2.time と run2.temperature に保存されます.

データを保存する √を押さないで次の実験を行う と、データが上書きされてしまいます.実験を繰り返 そうとして ▶ にマウスポインタをあてると、「Overwrite Previous Collection」というメッセージが表示 されるので、データが上書きされてもかまわないの か、保存しておくべきなのかを判断してください. 「ちょうど良いデータ」がいつでも採れるとは限りま せん.せっかく得られたデータを保存し損なわない ように注意してください.



図 34.4: 「データ上書き」に関する注意

データ保存をしても,現在のドキュメントを保存

しないで新たなドキュメントを開くと,保存データごと消えてしまうので注意してください.

(9) 必要であれば、実験を繰り返す.

一度の実験で望ましいデータが得られるとは限りません. センサーを利用すると測定データが 自動的に記録されるので,満足できるデータが得られるまで同じ実験を何度も繰り返すことがで きます.得られたデータを√を押して保存しながら実験を繰り返すと,run1,run2のように番号 が増えていきます.

図 34.5(a) は,最初の実験データを保存して2回目の結果が表示されています.最初のデータ のグラフを表示させるには,(a)の左側の上から3段目にある「run2」の箇所にマウスポインタ をあてて へを押します.そうすると,(b)のように保存済みのrunの一覧が表示されるので,グ ラフを表示させたいrunの箇所にチェックを入れます.「All」にチェックを入れると全部の箇所に チェック印が入ります.(b)では「All」にチェックを入れたので2つのグラフが表示されていま す.上から3段目の「All」の箇所を「へ」でもう一度押すと,この一覧画面が消えます.



図 34.5: 実験の繰り返しとデータ一覧

**34.3** 収集した実データの確認 run1, run2, ...

(10) 収集したデータのグラフと値を確認する.

実験を何度か繰り返してデータを保存したとき, 特定の回のグラフを表示させるには,図 34.5(b)の データー覧から必要な回のデータにだけチェック印 を入れます.その回のグラフだけが表示されます. データの変化を具体的な値で確認したいときは,

グラフビュー左側の最下段の右端にある表 (テーブ ル) のマークを へ で選択します.保存されている run ごとに,時間と温度の値が図 34.6 のように表示 されます.この画面をテーブルビューといいます.

\*Doc 🗢 RAD 🚺 1.1 run1 ru Time Temp Time 0 9 V n 70.5 0. 0.5 70.5 run1 70.0 1.0 run2 1. 1.5 69.7 1. Time (s) 2.0 69.2 2. Temperature... 2. 2.5 68.9 3.0 68.4 3. Table View 3.5 68.1 3. 4. 4.0 67.7 0 12 IN RI >

図 34.6: テーブルビュー

run1, run2, というデータセット自体を削除するには,図 34.5(b)の左側の画面で,削除したいrun*n*の右側にある「×」印を 下で押します.

# **34.4** 収集された実データの解析 [menu] [4]

センサーを用いた実験は,データを収集することが目 的ではありません.収集されたデータをいろいろな側面 から解析して,実験で生じた現象の背後にある自然界の 原理について考察することこそが最大の目的です.

グラフビューでグラフが表示されているときは,その 状態で menu 4 を押すことにより,図 34.7 にあるよう な多様な解析を行うことができます.以下では,このメ ニューを利用して,温度センサーで収集されたデータの 解析例を紹介します.



図 34.7: グラフビューで可能な解析

#### 2: 接線の傾き Tangent

この項目を選択すると、グラフ上の点を指定して、その点での接線の傾きを知ることができます. 接線の傾きが分かることで、指定された点でデータが増加・減少する割合を知ることができます.

点を  $\$  で指定すると縦の点線が表示され、その点を 中点に持つ太線が線分で表示されます。それが接線です。 指定した点の座標と傾きが左側に表示されます。Slope は 接線の傾きです。この縦の点線を Examine Line といい ます。この縦線は < > で移動させることができ、その動 きに連動して点の座標と傾きの値も変化します。 esc を 押すと縦線が消えます。改めて menu 4 を押すと、「2: Tangent」の箇所にはチェック印  $\checkmark$ がついています。した がって、グラフビューで  $\$  を押すと再び接線が表示され ます。この接線表示のモードを抜けるには、 menu 4 で



 $\boxtimes$  34.8:  $\lceil 2: \text{Tangent} \rfloor$ 

もう一度「2: Tangent」を選択します. それによりチェック印が消えます.

# 4: 面積 Ingegral

この項目を選択すると、グラフの面積を求めることができます. グラフの下が塗りつぶされると 同時に、求めているデータリストの名前・範囲・データ数が表示されて、図 34.9(a)のように「Area」 の箇所に面積の値が示されます.

[ok]を押すとグラフビューに戻り,左側の「run2」の下に現在の温度とともに「integral: ▲」が 表示され,積分の値が計算済みであることが示されています.その値を見るには,マウスポインタを 「integral」の箇所にあてて へを押します.値が表示されると同時に,(b)のように「integral」の箇 所が「integral: ▼」に変わります.「integral」の箇所でもう一度 へを押すと値が隠れます.

グラフの下の塗りつぶしを解除するには、 menu 4 8 「Remove」を押します. 複数項目が表示 されるときは、その中から「Integral」を選択します.



 $\boxtimes$  34.9: [4: Integral]

# 5: 統計量 Statistics

この項目を選択すると,図 34.10(a)のように,収集されたデータに関する統計量が表示されます. 範囲 (range),平均 (mean),最小値 (Min),最大値 (Max),そして標準偏差 (Dev)の値が表示されま す.ただし,標準偏差は不偏分散の平方根による値が表示されるので気をつけてください.要するに, Devの値は,

Dev = 
$$\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2}$$

により計算された値です.



⊠ 34.10: 「5: Statistics」

図 34.10(a) の最下部に表示される「View in Graph」の箇所にチェックを入れると、これらの値が (b) のようにグラフビューに書き込まれます. 左側をみると、現在の温度の下には「Stats: ▲」が 表示されており、統計量が計算済みであることが示されています. その箇所にマウスポインタをおい て へ を押すと、図 34.10(a) の値が示されます.「Stats」の箇所でもう一度 へ を押すと値が隠れま す.「Stats」の箇所を削除するには、 menu 4 8 を押します.

# 6: 曲線の当てはめ Curve Fit

この項目を選択すると、収集されたリストデータに対 して統計回帰を行って回帰曲線を求め、それをグラフビ ューに描画することができます.図 34.11 にあるように、 表 28.1 にある大部分の統計回帰をグラフビューの画面 から行うことができます.「A: Natural Exponential」は  $y = ae^{-cx}$ ,「B: Propotional」はy = axを当てはめます. run2のグラフは直線ではないと考えられるので、たと

えば2次関数で考えて「2: Quadratic」を適用してみます. 図 34.12(a) のような結果が表示され,  $y = ax^2 + bx + c$ 



図 34.11: 「6: Curve Fit」

に当てはめた場合の最小二乗法による係数が表示されます.決定係数は  $r^2 = 0.998839$  となっています. [ok]を押すと,求められた回帰曲線がグラフビューに重ね書きされます.

(b) のグラフビューでは、左側に「Fit Quadra...▲」とあります. この箇所を へで選択すると
 図 34.12(a) で表示される値を見ることができ、もう一度 へを押すと値が隠れます.「Fit Quadra...」
 という表示自体を削除するには、 [menu] [4] [8] 「Remove」を押します.

このように,収集されたリストデータに対する統計回帰を,テーブル画面 (List&Spreadsheet) を 利用しないでグラフビューだけで行うことができます.



図 34.12: 「6: Curve Fits」による 2 次曲線の当てはめ

# 7: モデル式の当てはめ Model

この項目を選択すると、表示されているグラフに当てはまる曲線を、自分で係数を探索的に試し ながら求めることができます.当てはめる曲線の方程式は、図 34.11 により統計回帰を行うことがで きる式です.最初に当てはめる式を選択して係数の初期値を自分で指定します.「7: Model」では係数 の増減幅を指定することができるので、グラフビューで係数を変化させながらモデル式を試行錯誤的 に探索することができます.

run2の結果に,図 34.12とは違う曲線を当てはめてみましょう.図 34.11 に表示されるどの曲線で 考えるべきかを判断するには,それぞれの曲線がどのような曲線であるかを把握していることが前提 です.そして,run2で示されたような変化をする曲線はどのような関数のグラフであるかを自分で 推測する必要があります.3次関数や4次関数で考えることもできますが,決めなければならない係 数が多すぎます.そこで,指数を利用して Exponential(*y* = *a* \* *b*<sup>*x*</sup>) で考えてみましょう.

[menu] [4] [7] を押すと,最初に1次回帰*m*\**x*+*b*が表示されるので,その式の右端にある ▶を 下 で 押すと図 34.13(a) のように選択できる式の一覧が表示されます.その中から*a*\**b*<sup>*x*</sup>を選択すると,*a*,*b* の初期値と,「Spin Increment」としてそれぞれの増減幅の指定が求められます.*y* = *ab*<sup>*x*</sup> で考えた 場合,グラフの左端の点を (0,65),右端の点を区切りのよい点として (30,50) で考えます.正しい 値はテーブルビューで確認することができますが,ここでは概算の値で計算します.*a* = 65 である ので,*y* = 65 · *b*<sup>*x*</sup> が (30,50) を通ると考えると 50 = 65 · *b*<sup>30</sup> より *b*<sup>30</sup> =  $\frac{50}{65} = \frac{10}{13}$ , したがって *b* = (10/13)<sup>1/30</sup> = 0.99129 です.そこで,(b) のように *a* = 65,*b* = 0.99 を係数の初期値として,さ らにその増減幅を*a*は 0.1,*b*は 0.001 で定めます. ok を押すと,グラフビューにモデル式のグラ フが (c) のように描画されます.この係数を増減させるには,左側の画面で「Model: ▲」の箇所 を 下 で押します.(d) のように各係数の箇所に ▲ ▼が表示されるので,それを 下 で押すことによ り係数を増減させることができ,それに伴いグラフも変化します.

このような形で,自分でモデル式を設定して係数を変動させることができます.ただし,そのモデ ル式は,自分で自由に考えた式ではなく統計回帰で用意されている式に限定されます.



図 34.13: 「7: Model」による指数関数  $y = ab^x$  の当てはめ

# 12-14 第12章 実データの収集と解析

# 9: 描画グラフの予測 Draw Prediction

この機能を利用すると,実データを収集する前にグラフを予想させることができます.そして,予 測後に実際のデータを収集して,あらかじめ予測したグラフとの違いについて考察させることができ ます.

実験前に予測されるグラフを描画させるには,グラフビューに現在表示されているデータを実験開 始ボタン (▶)の下の段にある √ を押して保存します.保存すると run2のデータが保存され,次の 実験のために表示が run3 に変わります.データはまだ取られていないのでグラフは表示されません.

この状態で menu 4 9を押すと,図 34.14(a) のようなメニューが現れるので「1: Draw」を選 択します.マウスポインタを出してグラフが描かれていない座標平面に移動させると,マウスポイン タが鉛筆マークに変わります.その状態で へを押すと○が表示され,鉛筆マークを移動させると線 分が伸びます.再度 へを押すと今度は●が表示されます.同様にして へを押すことで○と●が交 互に現れて線分で結ばれていきます.これにより,実験前に予測されるグラフを描画させることがで きます.鉛筆マークを座標平面の外側に移動させるとマウスポインタに戻ります.

予測グラフを描画した後で実験を行うと,図 34.14(b)のように,予測グラフを残したまま実データ のグラフが描画されます.この場合は,予測グラフの初期値が 60°C の箇所から始まっているので,温 度センサーをお湯から引き上げて 60°C に近づいた時点で実験開始のスタートボタンを押しています.

なお,予測グラフは, menul 4 9 で「2: Clear」を選択すると消去できるので,予測を何度も繰り返すことができます.



図 34.14: 「9: Draw Prediction」によるグラフの予測

34.5 他のアプリケーションでのデータ利用 Send To

温度センサーのデータをもとに,センサー画面のいろいろな機能を説明してきました.センサー画 面は,メータービュー,グラフビュー,そしてテーブルビューという3つの画面を持っています.こ れらの画面は,それぞれ,画面の最下部にある3つのアイコンを 下 で選択することにより移動する ことができます.

グラフビューだけで,接線の傾き,積分値,そして基本統計量を求めることができます. さらには 曲線の当てはめまでできるので,他のアプリケーションは必要としないかもしれません. しかし,こ こで得られた実データはリストデータで保存されているので,同じプロブレム内の他のアプリケー ションでも利用することができます.

ここで、 [ctrl] [doc] により計算画面を追加します. 登録済みの変数の一覧は [var] を押すとみること ができます. meter.temperature はメータービューに表示されている現在の温度, meter.time は収集時 間です. これまでに行って実験データは, run1, run2, run3 として記録され, 時間データは run*n*.time, 温度データは run*n*.temperature という名前のリストに保存されているので, これらのデータに対し て第 7~10 章で説明したいろいろなコマンドを適用することができます.





図 34.15: 計算画面での実験データ

他のアプリケーションへのデータ送付 (menu) [7]

実験データのグラフは、特に何もしなくても最適化されてグラフビューに表示され、その中でい ろいろな統計計算や統計回帰を行うことができます.同じデータを他のアプリケーションで扱いたい 場合は、センサー画面からデータを簡単に移すことができます.

1: Experiment	Doc 🗢	RAD 🕼 💓		.1 1.2 1	.3
2: Data				A run1.ti	<sup>B</sup> run
A: Analyze			=		
唱 5: View			1	0.	71.6
6: Options	1. Lists & Spr	eadsheet	2	0.5	70.8
◆27.9 °C	2: Data & Stat	tistics	3	1.	70.0
F.	3: Graphs	-	4	1.5	69.2
40.	0		5	2.	68.5
	0 Time (s	8) 30.0	A1		
(a	) $\lceil 7: \text{ Send To} \rceil$	o]		(b	) テー

RAD Doc 🗢 1.t., Crun2.ti., Drun2.t., 64.9796 6138 0. 8355 0.5 64.0169 0224 1. 63,1183 2261 1.5 62.2801 61,4989 5908 2. **3**. 5 -ブル画面への送付

図 34.16: 「7: Send to」を利用したデータの送付

センサー画面で menu 7 を押すと図 34.16(a) のようなメニューが表示されるので, データを移し たい画面を選択します. たとえば,「1: List&Spreadsheet」を選択すると, テーブル画面のページが 追加されて, 保存したすべての実験データがテーブルに書き込まれた状態で表示されます. このペー ジでは, 第7章と同じ操作を行うことができます.

同様にして,図 34.16(a)のメニューからプロット画面 (Data&Statistics) やグラフ画面 (Graphs) に もデータを送付することができます.これらの場合は,グラフビューで表示されているデータセット が送付されます.

たとえば,グラフビューで run1 だけが表示されるようにしておいて menu 7 からプロット画面 にデータを送付すると,図 34.17(a)のようにプロット画面に横軸と縦軸の設定がなされた状態でグ ラフが表示されます.その実験データに対して,即座に第8章の操作を行うことができます.

グラフ画面に送付すると, 描画モードが「散布図 (Scatter Plot)」に設定されます. 関数モードの ときは「 $f_1(x) :=$ 」などと表示されますが, 散布図モードのときは「 $x \leftarrow , y \leftarrow$ 」のように表示 されるので, その箇所に表示させたいデータリストを指定します. 最初は2つ目の「s2」に式を設定 するように求められ, 画面には何も表示されていません. しかし, ▲を押すと図 34.17(b)のように 「s1」にはグラフ表示されている run1のデータセットがすでに定義済みであることが分かります. 表 示されている画面の範囲をみるために menu ④ ①を押すと, 横軸は収集時間の 0 ≤ x ≤ 30 で設定 されていますが, 縦軸は 0 ≤ y ≤ 50 で設定されています. run1のデータは 50°C 以上の温度なので グラフは画面の上側に表示され, そのためにグラフが見えないのです.

そこで, menu 4 1 を利用して (c) のように縦軸の範囲を  $50 \le y \le 80$  に変更すると, (d) のような散布図が表示されます. この後は, グラフ画面における解析を実行することができます.



図 34.17: 「7: Send to」を利用したデータの送付 (2)

34.6 ニュートンの冷却の法則

温度センサーを利用する場合は、その温度低下の原理について考察させるのが望ましいと思われま す.これに関するものとして、ニュートンの冷却の法則があります。それは、対象物の温度を $Q(^{\circ}C)$ 、 室内の温度を $Q_0$ 、測定時間をt(s)とすると、温度の低下する割合は対象物と室温との温度差に比例 する、というものです。これは、比例定数をk (> 0)とすると

$$\frac{dQ}{dt} = -k(Q - Q_0)$$

という変数分離形の微分方程式で表されます.

この微分方程式の一般解は、簡単な計算から

$$Q = Q_0 + Ce^{-kt}$$
 (C は任意定数)

が得られます.計算画面で [menu] [4] [D] を利用して解くと,図 34.18(a) のようになります.

図 34.3(b) のデータで、この関係が成り立つかどうかを調べてみましょう. (b) では室温が25°C なので  $Q_0 = 25$  です。得られた実データの2箇所の値を利用して、Cとkに関する連立方程式を解いてみます。測定時間が180秒なので、30秒後と150秒のときの値を利用することにします。テーブルビューで調べると、t = 30のとき Q = 50.9、t = 150のとき Q = 37.0になっているので、次の連立方程式を解くことになります。

$$50.9 = 25.0 + Ce^{-30k}, \qquad 37.0 = 25.0 + Ce^{-150k}$$

[ctrl][doc]により計算画面を追加して解くと、図 34.18(a) のように C = 31.3928, k = 0.006411 が得られました.

したがって、ニュートンの冷却の法則によれば、温度低下を表す関数は次の式で表されるはずです.

$$Q(t) = 25.0 + 31.3928e^{-0.006411t}$$

この関数を計算画面で  $f_1(x)$  に定義して,図 34.3(b) のデータを menu [7] を利用してプロット画面 に送付して,プロット画面の menu 4 4 の「Plot Function」を利用して描画すると図 34.18(b) の ような曲線になりました.

残念ながら,このデータはニュートンの冷却の法則に従っているとは言いがたいようです.この データはセンサー自体を放置した場合のものなので,物体を自然放置した場合と比べて温度低下が急 激なようです.

1.1 1.2 1.3 *temp 🗢	RAD 🕼 🐹
deSolve $(q'=-k \cdot (q-q0), t, q)$ $q=c$	$1 \cdot e^{-ic \cdot t} + q0$
solve $\begin{cases} 50.9=25.+c \cdot e^{-30 \cdot k} \\ 37.=25.+c \cdot e^{-150 \cdot k} \end{cases}, \{c,k\} \\ c=31.3928 \text{ and} \end{cases}$	}) k=0.006411
$fI(x):=25,+31.3928 \cdot e^{-0.006411}$	x Done
(a) 未知数 <i>C.k</i> の	➡



図 34.18: ニュートンの冷却の法則による解曲線

# 35 距離センサー CBR2 を利用した実データの収集と解析

# 35.1 CBR2 の機能の概要

CBR2は,超音波を利用して距離データを測定するデジタルセンサー です.対象物からの反射エコーを受信して距離を測定し,得られた距離 データから速度と加速度も計算してリストデータで保存します.

CBR2は、必ずしもNspireに接続されている必要はありません. CBR2 単体でも実データの収集と保存を行うことができ、測定後にNspireと 接続して測定データを転送することができます. つまり、実データの収 集用のプログラムが、CBR2にはすでに内蔵されています.

Nspire の PC プログラム「TI-Nspire CAS Student Software」がイン ストール済みのパソコンであれば、CBR2をパソコンと直接接続してデー タ収集を行うことができます. そのソフトウェアを立ち上げて DataQuest



図 35.1: CBR2

のページを開いて CBR2 をパソコンと USB 接続すると,パソコン上の画面は Nspire と CBR2 を接続したときと全く同一の画面になり,その上だけで実データの収集や解析を行うことができます.この節の画面は,すべて PC と CBR2 を接続した画面をキャプチャーして得られたものです.

測定できる対象物との距離は15 cm から6 m です.距離が15 cm より近いと超音波の反射エコーが 重なり合い,6 m より遠いと反射エコーが弱まって検出できなくなります.

図 35.1 の頭部の白い部分を 180°回転させると,センサーの位置を 10 cm ほど高くすることができ ます.電源は単3乾電池が4個必要です.超音波の受信感度は,ノーマルモードとトラックモードの 2段階で調整することができます.切り替えスイッチは,白い頭部を上げると見えてきます.人の動 きやボールの跳ね返りなどはノーマルモード,自動車の動きなどはトラックモードが適しています.

超音波は周波数の高い音波であり空気を振動させて伝搬します. 空気中の音速は340 m/ 秒ですが, 音速は温度や湿度の影響を受け,温度 (T°C) が高いほど音速 (C[m/s]) は早くなる傾向があります. 0°C から 40°C までのときの音速は,湿度 35%とすると C = 331.5 + 0.6T という関係があります.気 温による音速の変化を補正するために CBR2 は温度センサーも内蔵しており,CBR2 の背面上部に ある小さな穴から温度情報を取得しています.距離を測定するとき,その穴を塞いではいけません.

CBR2の操作マニュアル「Getting Started with CBR2 Sonic Motion Sensor」(英文)は、下記の TIのサイトよりダウンロードすることができます.

[URL] https://education.ti.com/en/products/data-collection/cbr-2

#### 35.2 測定にあたっての留意事項

動いているものを測定して望ましいデータを得るには,幾つかの事項に気をつける必要があります. 上記マニュアルに書かれていることをまとめると,次のようなことに留意してください.

(1) CBR2 の位置を固定する.

正確なデータを得るためには、収集機器である CBR2 の位置は固定されている必要がありま す. CBR2 の裏面中央にあるねじ穴は、カメラの三脚に固定できるようにするためのものです. CBR2 を手に持ってデータ収集を開始するのは避けるべきですが、手に持ってしか測定できない 場合は、CBR2 をできるだけ動かさないように気をつけてください. (2) 対象物の正面から測定する.

望ましいデータを得るには,距離を測定しようとする対象物を CBR2 の正面におく必要があ ります. 超音波は, CBR2 を頂点とし, CBR2 と対象物を結ぶ線を中心軸とする,頂角 30° の直 円錐状に放射されます.

(3) 対象物の周辺の障害物はどけておく.

対象物の周辺にある障害物,たとえば机や椅子などは,測定する前に整理しておきましょう. 放射される 30°の直円錐状の圏内には,測定物だけがあるようにすることが望ましいです.

(4) 大きな反射エコーが得られるようにする.

CBL2は,超音波が対象物に当たった反射エコーを測定します.したがって,対象物の表面は 堅くて滑らかであることが望まれます.表面が不規則な形状のものは避けた方がよいでしょう. たとえば,対象物が緩いセーターを着たような人物である場合は,測定結果は不規則グラフにな る場合があります.人の動きを測定したい場合は,反射しやすいものを持って動いてもらうと良 いかもしれません.対象物から多くの反射が得られるようにするには,対象物の反射面積を大き くするのも一つの方法です.人の動きを測定するときは,大き目のノートを持たせて,CBR2を そのノートに向けるとよいかもしれません.

(5) 複数グループが同じ室内で測定するとき.

複数のグループが同じ室内で CBR2 による実験を行うときは,別なグループのデータ収集が 終わってから測定してください.同時に複数のグループが測定を行うと,他のグループの反射エ コーを拾って不規則なデータが得られるかもしれません.

(6) 測定データが不規則なグラフになるとき.

測定が終わると,測定した距離データが即座にグラフ表示されます.ギザギザの不規則なグラフになるときは,下記のような対応を取ってみてください.

- CBR2 をちょっと下に傾けて測定すると、良い結果が得られる場合があります.
- ノーマルモードで測定しているときは、トラックモードにすると良い結果が得られるかもしれません。
- ノーマルモードやトラックモードでもノイズが消えない場合は,「Rate」の箇所で毎秒収集 するデータの個数を手動で調整しましょう.動きが非常に早いときは 20 個 / 秒,非常に遅 いときは 2 個 / 秒を目安としてください.
- CBR2 は超音波の反射エコーを捉えて距離を測定するので、反射媒体は堅い大きなものであることが望ましいです。遠い箇所にある小さな物体は、うまく捉えられないかもしれません。表面の凹凸が大きいものも測定には適しません。可能であれば、測定物の反射面積が大きくなるような工夫をしてみてください。
- 速度や加速度のグラフは距離データをもとに計算されたものであり、速度センサーや加速 度センサーが内蔵されているわけではありません。距離データは滑らかな曲線が得られて も、速度や加速度のグラフはギザギザのグラフで表示されるかもしれません。速度や加速 度のグラフがあまりに不規則な場合は、距離データのグラフを見て、その不規則性に意味 があるかどうかを確認してみましょう。意味が無い場合は、対象物を正しく測定できてい ないかもしれません。前述の(1)~(5)も再確認してください。

# 35.3 実データの収集

データを収集するにあたっては,最初に,プロブレム かドキュメントを新しくして Vernier DataQuest のペー ジをつくっておきます.センサーが何も接続されていな いと,図 35.2の右側の画面には何も表示されません.附 属のコードで CBR2を Nspire の miniUSB 端子と接続す ると,画面右上に現在の測定値が表示されます.

CBR2をNspireのminiUSB端子に接続すると、Nspire の画面をパソコンに取り込むためのケーブルが接続でき なくなります.そのため、この節の画面はすべて CBR2 をパソコンと接続した画面で表示します.



図 35.2: CBR2 接続後のセンサー画面

さっそく実データを収集してみましょう.デフォルトの設定では,毎秒 20 個のデータを 5 秒間収 集します. 1/20 = 0.05 秒に 1 回のデータ収集を行っていることになります.

前節の留意事項に注意して,適当な対象物を用意して, 測定開始のスタートボタン(▶)を <>> で押してからセ ンサー部分に近づけたり遠ざけたりすると距離データが 得られます.測定の最中は、「チッチッチッチッ」という 連続音が出ます.「Rate」を変更して毎秒収集するデータ 数を増やすと,この音も早くなります.指定した収集時 間が経つと測定を終了して,図 35.3のように距離データ のグラフが上段に,それをもとにして計算された速度の グラフが下段に表示されます.



図 35.3: 距離と速度のグラフ

前節の留意事項によると、堅くて、表面に凹凸がなく

滑らかで,しかも大きさのあるものがよいということだったので,近くにあった書棚のガラス扉を外 して利用しました.図 35.3 で左側の2段目右端にある√ を押さないとデータ保存はなされないので, 望ましいデータが得られるまで何度でも実験を繰り返すことができます.

図 35.3 の距離と速度のグラフを見比べると,距離が増加していく (対象物が CBR2 から離れてい く)箇所では速度のグラフは正の側にあり,距離が減少していく (対象物が CBR2 に近づいていく)箇 所では負の側にあります.距離の増加・減少と,その導関数の符号とが対応しているのが分かります.

#### 表示するグラフの変更

速度のグラフを加速度のグラフに変更するには、図 35.3の縦軸の「Velocity」と書かれている箇所 にマウスポインタを当てて へを押すと、図 35.4(a)のメニューが表示されます.「4: Acceleration」 を選択すると、(b)のような加速度のグラフが表示されます.加速度データは、距離データをもとに 計算された速度データをもとにして計算されたものです.もとの距離のグラフと比べると不規則性が 出てくるのは、どうしてもやむを得ないと思われます.それでも、図 35.4(b)のグラフからは、加速 度が0になる箇所 (グラフが横軸と交わっている箇所)と、距離のグラフの変曲点と思われる箇所が大 体一致していることを読み取ることができます.同様にして速度と加速度のグラフを表示させると、 速度が増加・減少している箇所と、加速度の符号が一致していることを確かめることができます.



図 35.4: 表示グラフの選択

CBR2による測定では,距離,速度,加速度という3つのデータが得られますが,表示できるグラフは上段と下段の2つだけです.3つのグラフを同時に見たいときは,いずれかの段に複数のグラフを同時に描画させます.

たとえば、図 35.3 の状態で、速度の画面に加速度のグラフも描画するには、マウスポインタを速 度の縦軸のラベルに置いて へを押します.図 35.4(a) のメニューから「4: More」を選択すると、 図 35.5(a) の画面になるので、速度の画面に同時に表示させるリストにチェック印を入れます. ok を 押すと、チェック印をつけたリストのグラフが (b) のように表示されます.





図 35.5: グラフ表示するリストの選択

# 測定データの数値を見る

測定された距離データを数値で見るには、グラフビュー の左側下段の右端にあるテーブルマークを N で選択して テーブルビューを表示させます。時間 (Time),距離 (Position),速度 (Velocity),加速度 (Acc)の順にリストデー タがテーブル表示されます 「Acc」は加速度 (Acceleration)の最初の3文字を取ったものです.加速度は図 35.6 の画面には表示されていませんが、右方向にスライドさ せると見えてきます.

Time は、Rateの箇所で毎秒何個のデータを収集する

< 11 >		*Unsave	d⇔	
			run1	2
	198	Time	Position	Velocity
\$ 9 V	1	0.05	0.211	-0.0
run1 -	2	0.10	0.210	-0.0
Time (s)	3	0.15	0.204	-0.0
Position (m)	4	0.20	0.200	0.0
Velocity (m/s)	5	0.25	0.205	0.2
Acc (m/s2)	6	0,30	0.220	0.3
100 (1100)	7	0.35	0.245	0.5
	8	0.40	0.278	0.6
	9	0.45	0.314	0.7
	<	_	2	>

図 35.6: 測定データのテーブル表示

かを指定しているので,そこから逆算された値を単位として増えています.図 35.6 のデータは毎秒 20 個で収集されているので,時間は 1/20 = 0.05 秒ごとに増えていきます.

Position は、CBR2から測定対象物までの距離 (m) です. 図 35.6 では小数第3位までの値しか表示さ れていませんが、表示する桁数は変更することができます. 図 35.7(a) のように、 menu 2 1 から「2: Position」を選択すると (b) の画面になり、「Name」「Short Name」「Mesurement Units」「Displayed Precision」が表示され、それぞれの名前や値を変更することができます. たとえば、小数第6位まで 表示するように指定すると、Position の列が小数第6位までの値で表示されます (図は略).







(b) Precision の変更

図 35.7: テーブルビューの各列の諸情報の変更

# 1つのグラフだけの表示

デフォルトでは,距離データと,それから計算された速度のグラフが表示されます。このグラフ表 示を1つだけにするには,図 35.8(a)にあるような [menu] [3] [1]のメニューから選択します.

「1: Graph1」は上段のグラフ,「2: Graph2」は下段のグラフ,そして「3: Both」は両方のグラフ です. 上段の距離データのグラフだけが表示されるようにしたいときは,「1: Graph1」を選択します. (b)のように,距離だけのグラフが表示されます.

(a) のメニューで「3: Select X-axis Variable」や「4: Select Y-axis Variable」を選択すると,それ ぞれ横軸や縦軸のリストを変更することができます.「5: Select Data Set」では,データセット自体 を変更することができます.



図 35.8: グラフビューで表示させるグラフの数

# 35.4 収集するタイミングの違いによるグラフの差異

収集時間や毎秒測定するデータ数の変更は、図 35.2 であれば「Rate」や「Duration」を № で押 すことにより個別に変更することができます。もう一つの方法は、画面左側でスタートボタン ( ►) の下段の左端にある〇マークを № で押します. 図 35.9(a) のようなデータ収集に関するセットアッ プ画面が表示されるので、この画面から「Rate」や「Duration」を同時に変更することができます.

「Rate」の箇所では、毎秒何個のデータを収集するかを指定します.下段の「Interval」は、何秒 ごとのデータ収集になるかを計算して表示します.Rate で指定した値の逆数を取っているだけです.

デフォルトで表示される「Rate(samples/second)」の他に、もう一つのモードがあります. 欄の右 端にある ▶を押すと「Interval(seconds/sapmple)」が表示されます. これを選択すると、データ1個 あたりの秒数を指定することができます. 下段で「Interval」の値を入力すると、「Rate」の値が自動 的に計算されます. 1分おきにデータを取りたいようなときは、「Interval」に「60」を入力します.

Rate (samples/second): 20	
nterval (seconds/sample): 0.05	
Duration (seconds): 5	
Number of points: 101	
Use Recommended Sensor Settings	V
ок	Cancel

Interval (seconds/sample)	~
Interval (seconds/sample): 0.05	
Rate (samples/second): 20	
Duration (seconds): 5	5 - 2 <b>-</b>
Number of points: 101	
🗹 Use Recommended Sensor Settings	
OK	Cancel

図 35.9: データ収集のセットアップ

「Duration」では、データを収集する時間を秒単位で指定します.その値に応じて、「Number of Points」には収集されるデータ数が表示されます. Rate × Duration + 1 により計算された値です.

以下は, Rate の値を, 2 と 40 にした場合のグラフです. Duration の値はデフォルトの設定値の5 秒間です. できるだけ同じ動きになるようにして測定しました.

図 35.10 をみると,毎秒2個の場合はグラフが折れ線状になり,毎秒40個の場合では規則データ が混じっています.動きの速さのレベルにより,収集個数を適切に定める必要があります.動きが非 常に遅いときは毎秒2個,非常に早いときは毎秒50個を目安とするように推奨されています.なお, CBR2が毎秒収集できるデータの最大数は50個です.



図 35.10: 毎秒収集する個数とグラフ

12-24 第12章 実データの収集と解析

#### 35.5 収集された実データの切り出し

収集された実データから,その一部を取り出して新たなデータとすることができます.たとえば, 図 35.10(b)の上段のグラフから不規則性が含まれない部分を取り出してみましょう.次の手順で,希 望する箇所を切り出すことができます.

なお,以下の操作は CBR2 に限定したものではありません.他のセンサーを利用して表示された グラフについても,全く同じ手順で特定部分を切り出すことができます.

- (1) 最初に, menul ③ 1 を利用して, 図 35.11(a) のように 1 画面だけのグラフにします. なお, 2 画面のままで以下の操作を行うと,同じ範囲で 2 つのグラフを同時に切り出すことができます.
- (2) マウスカーソルを出して <</li>
   (2) マウスカーソルを出して 
   (2) を押すと Examine Line が現れるので、グラフを切り取りたい箇所 の左端に 
   (b) のように「
   (ctrl) 
   (b) のように「
   (ctrl) 
   (ctrl)
- (3) その状態でマウスポインターで右方向に移動すると, (c) のように選択範囲がグレーで表示され ます. 右端を決めたら へを押します.
- (4) 選択範囲を切り出すには、 menu [2]から「5: Strike Data」を選択します. この箇所の操作で、
   指定したデータがグラフやテーブルで扱われないように指定することができます.

「1: In Selected Region」を選択すると指定した範囲が扱われなくなり,外側のデータだけを 考えることになります.「2: Outside Selected Region」を選択すると指定した範囲の外側が扱わ れなくなり,グレー範囲の箇所のデータだけを考えることになります.つまり,指定したデータ にストライキをさせて,そのデータが働かないようにすることができるということです.

ここでは不規則性を含まない箇所を取り出したいので,指定した範囲の外側のデータにストラ イキをさせます.つまり,「2: Outside Selected Region」を選択します.すると, (e)のように指 定した部分が切り出されます.最初はグレー表示のままで切り出されますが, [esc]を2回押す とグレー色が消えます.



図 35.11: グラフの特定部分の切り出し

- (5) 切り出された (e) の曲線は 4 次関数が予想されるので, menul 4 6 から「4: Quartic」を選択して 4 次回帰を行うと,係数が表示されて ok を押すとグラフが重ね書きされます (図は略).
   (menu) 4 8 を押すと曲線が消えます.
- (6) テーブルビューを見ると,図 35.11(f) のように,切り出された範囲外の箇所の数値には短い横線 が引かれています.テーブルのデータ自体が削除されたわけではありません.

(4) では図 35.11(c) のグラフ上で範囲指定を行いましたが, グラフビューの中で範囲を指定して, menu 2 5 から同様のストライキをさせることもできます. データに横線が引かれたまま menu 7 によりテーブル画面にデータ送付すると, 横線が引かれた箇所のデータはテーブル 画面には送られません. 横線だけが送られます.

横線が引かれたデータをもとの状態に戻すには, menu 2の「6: Restore Data」を利用し ます. menu 5 で選択したのと同じ番号を指定します. つまり, menu 5 で「1: In Selected Region」を選択したときは, menu 6 でも「1: In Selected Region」を選択します.「Inside」 なのか「Outside」なのか分からなくなったときは「3: All」を選択します. これにより横線が消 えると同時に, グラフは最初の図 35.11(a) の状態に戻ります.

# 35.6 CBR2 単体でのデータ収集

CBR2は動きのあるもののデータを簡単に収集することができますが,Nspireに接続したままで測 定するのは,ちょっと操作しずらい場合があります.そのようなときは,Nspireから切り離してCBR2 単体でデータ収集をすることができます.

以下では、卓球の球を堅い床に落としたときの跳ね返りの状況を測定したものです. できるだけ同 じ箇所で真上に跳ね上がるような場所を探して実験してください. できるだけ跳ね返りの大きい球が 望まれます.

CBR2 単体でのデータ収集の手順は下記の通りです.

- (1) 最初に, 開いているドキュメントを保存して, 新しいドキュメントを開いて CBR2 を接続します.
- (2) スタートボタン (▶) の下段にある○印のセットアップボタンを押して、必要な収集条件を設定します.ここでは、デフォルトの設定条件のままで、毎秒 20 個で 5 秒間のデータ収集を行うようにしています.
- (3) Rate や Duration を設定したら、同じセットアップ画面の下段で、図 35.12(a) のように「Enable Remote Collection」の箇所にチェック印を入れて「Device」として CBR2 を選択します. Lab Cradle が接続された場合は、Lab Cradle が表示されます.
- (4) ok を押すと, (b) のように Nspire と CBR2 を分離する用意ができたというメッセージが表示 されるので, CBR2 についているケーブルを外します. メッセージには下記のような内容が書か れています.

デバイスを切り離してデータ収集をする用意ができた.デバイスを Nspire から分離して,「TRIGGER」を押して実データを収集しなさい.データ収集が終わったら, もう一度 Nspire と接続しなさい.

(5) 次に, CBR2 単体で実データの収集を行います. 収集を開始するには CBR2 の中央にある青い TRIGGER ボタンを押します. 最初に設定した収集条件でデータが収集されます. データがちゃんと収集されると、CBR2のランプがグリーン色に点灯します. 収集の用意はで きていてもデータ収集がまだ行われていないときは、琥珀色で点灯します.

- (6) データ収集が終わったら、CBR2を再び Nspire と接続します. データ収集が終わった CBR2 が 接続されると、(c) のように新しいデータを Nspire に取り込むか (Import), それとも廃棄するか (Discard) を問われるので「Import」を選択します.
- (7)「Import」を選択すると、Nspireのセンサー画面に距離と速度のグラフが表示されます.その後は、これまでと同じような操作でデータ分析を行うことができます.

Collection Setup	1.1 *Document1 🗢 RAD 🕼 📉	1.1 ) *Document1 🗢 RAD 🕼 🕍
Number of points: 101	Remote Setup	Q
Strip Chart	The device is ready for remote collection. In Disconnect the device, and then press the	Position Mode
Enable Remote Collection Devices: CBR2	Tri Trigger button to start collecting data.  Ri Reconnect the device to retrieve data when 2C sampling is complete.	Time Base New Data Available! Rate 20 sample: Import Discard Cancel
Set Delay (seconds):	Dr 5	Duration 5 s
(a) Enable Remote Collection	◎ <b>に 田</b> (b) 切り離しに関するメッセージ	<ul> <li>○ に 目</li> <li>(c) 収集した実データの取り込み</li> </ul>

図 35.12: CBR2 単体での実データの収集

図 35.13 は、卓球の球の跳ね返りを CBR2 単体で収集 したものです.床に落としたときの跳ね返りを測定して いるので、床がグラフの上部にあることになります.卓 球の球という小さい対象を測定したので、跳ね返りの様 子があまりきれいに採れてはいませんが、最初の大きな 跳ね返りは分析してみる価値がありそうです.

第35.5節の手順にしたがって,最初の跳ね返り部分を 切り取って曲線回帰をしてみましょう.距離と速度の2 つのグラフをまとめて切り出すことにします.

図 35.14(a) のように範囲を指定して、 [menu] [2] [5] [2] に



図 35.13: CBR2 単体での収集データ

より切り出すと (b) のようなグラフが表示されます.距離は,きれいな放物線になりました.速度は ほぼ直線です.放物線の頂点の箇所で,速度が0になっていることが分かります.



1.1 0.700 0 0 V 0.5 Position run1 0 5.00 s run1 3.0 P - - m elocity .... Ð -0.13 m/s R 3.00 1.10 Time (s) (b) 最初の跳ね返りの距離と速度



図 35.14: 卓球の球の跳ね返り

切り出されたグラフに当てはまる関数の式を求めてみましょう. menu 4 6 から「2: Quadratic」 を選択して 2 次関数  $y = ax^2 + bx + c$  で曲線回帰すると,

$$a = 4.98834, \quad b = -13.4768, \quad c = 9.48034$$

となります. なお, 2つのグラフが表示されている状態で menu 4 6 を押すと, 1: run1.Position」 [2: run1.Velocity」のいずれについて考えるかが問われるので「1: run1.Position」を選択しています.

速度の方を曲線回帰するときは、 menu 4 6 から「2: run1.Velocity」を選択してから、「1: Linear」 を選択します. 1 次関数 y = mx + bで線形回帰すると、 m = 9.43387, b = -12.7381 が得られました. 2 つの回帰曲線を描画すると、図 35.14(c) のように実データとすっかり重なって表示されます.

卓球の球のセンサー部分からの距離をs = s(t)とすると、速度は $v = \frac{ds}{dt}$ です. menu 4 6 に より求めた結果によると、

 $\frac{ds}{dt} = (4.98834t^2 - 13.4768t + 9.48034)' = 9.97668t - 13.4768t$ 

となります.1次回帰で求めた速度の式 v(t) = 9.43387t - 12.7381と比較すると,どのように考える べきか微妙なところですが,理論式との差異について考察させることも教育的と思います.また,こ の部分のデータだけからも,高さ 1.1 m の箇所からの自然落下,卓球の球の重さ,跳ね返った高さ, 2 回目に落ちるまでの時間などなど,いろいろな分析が可能になると思われます.

ちなみに, CBR2 が表示している速度は, 距離データをもとに数値的に計算されたものです. 速度 センサーにより測定されたものではありません.

# 35.7 CBR2 を利用した実験例

CBR2のガイドブックには,この距離センサーを利用した幾つかの実験例が紹介されているので, その概要を紹介します.詳細は,下記に登録されているガイドブック(英文)を参照してください.

[URL] https://education.ti.com/en/products/data-collection/cbr-2

(1) CBR2 を正面にして動く

これは、CBR2を固定し、それに向かって人が直線的に近づいたり遠ざかったりして動くとき、 その動きが時間と距離のグラフとしてどのように表示されるかを観察するものです. CBR2を手 に持って、壁に向かって動いても同じ実験になります.

- •一定の速さで動くと、どのようなグラフが表示されるか.
- •動く速さを変えると、どのようなグラフが表示されるか.
- 直線上を往復すると、どのようなグラフが表示されるか.
- ●途中で止まったり、ジャンプしたりするとどのようなグラフが表示されるか.

などについて実験します.事前に表示される時間と距離のグラフを予想させて,実際のグラフと 比較させると理解が増すのではないかと思われます.

(2) グラフに合わせて動く

これは (1) と同様の実験ですが,動いたグラフを観察するのではなく,最初に時間と距離のグ ラフを適当に書きます.そして,そのグラフと同じグラフが表示されるように動くという実験で す.時間と距離のグラフに対する理解ができていないと,同じグラフが再現されるように動くこ とはできません. 12-28 第12章 実データの収集と解析

(3) 滑り台から滑り降りる

これは,滑り台の上に CBR2 を置き,そこから滑り降りる人の動きを観察するものです.実 世界に起こる現象の観察になり,滑り台の高さや長さ,滑る人の体重や着衣による滑りやすさな ど,様々な要因が絡んできます.

(4) バウンドするボールの観察

これは、ボールがバウンドする様子を、真上から CBR2 で観察するものです。良いデータを 得るには、反発力の強い大きめのボールを利用します。跳ね上がる高さの変化や、バウンドに要 する時間など、様々な物理要因について検討することができるでしょう。

(5) 斜面を転がるボールの観察

これは,基本的には (2) と同じ実験ですが,人が滑るのではなくボールを斜面に転がします. 外の滑り台とは違って屋内で実験することができ,斜面の高さを変えて実験することができます. 斜面を曲線状にしたり,斜面の途中で角度を変えるなどしてもよいでしょう.

# **36** Lab Cradle を利用した実データの収集と解析

# 36.1 Lab Cradleの概要

Lab Cradle は Nspire と同程度の大きさがあり,図 36.1 の 左は Lab Cradle の裏側で,右が表側です.表側の白い部分に Nspire を載せてドッキングさせて使用します.ドッキングする と,Nspier の裏面下側にあるコネクターが Lab Cradle のコネ クターと接続するようになっているので,接続コードは必要あ りません.ただし,Nspire の OS のバージョンが 3.0 より前の 場合は,Lab Cradle に接続しても Nspire は Lab Cradle を認 識できません.その場合は,Nspire の OS を最新バージョンに アップグレードしてください.

Lab Cradleの下部には、Nspireとの接続を固定するための



⊠ 36.1: Lab Cradle

留め具がついています.Nspireを接続したら,その留め具を上げておきます.それにより,Nspireを スライドさせても外れません.逆に,Nspireを Lab Cradle から外すときは,その留め具を下げてか ら外してください.留め具が上がったままだと外れません.

Lab Cradle の両脇には、アナログセンサーとの接続口が3個、デジタルセンサーとの接続口が2 個用意されており、表 33.1 にある全てのセンサーを使用することができます. さらには、5 つのセ ンサーからのデータを同時に収集することができます. センサーが1 個だけの場合は、最大で毎秒 100,000 個のデータを取得することができます. センサーの個数がn 個の場合は、この値をn で割っ た値が個々のセンサーで取得できる最大数になります. ただし、これは Lab Cradle 側の最大数です. センサーによっては、その最大数までのデータ収集力を持たない場合もあります.

CBR2 と同様の操作性があり,Nspire と接続していなくても Lab Cradle 単独でデータを収集する ことができます.パソコンに直接接続して使用することもできます.収集したデータは USB コードを 利用して Nspire に転送します.パソコンと接続するには,TI-Nspire Teacher and Student Software がインストールされていなければなりません.また,裏面には紐を通せる金具がついているので,首 から提げながら使用することもできます.

電源にはリチウムイオンバッテリーが使われています.したがって,Lab Cradle を使用するにあたっては,USB ケーブルで事前に充電する必要があります.12 時間未満でフル充電されます.

バッテリー残量の状況は、miniUSBの差し込み口の隣にあるランプの色で分かります. USB ケーブ ルで繋がれていないときには、バッテリーの残量に応じてランプがゆっくりと点滅します. 赤の点滅 は6%以下、琥珀色での点滅は30%以下、そして緑色での点滅は30%~96%のときです. 96%以上に なると毎秒2回点滅します. また、Nspireと接続して、Home 画面で「5: Settings」から「4: Status」 を選択すると、図 36.2 のように Nspre と Lab Cradle のバッテリー残量を数値で確認することがで きます. 充電してもすぐに残量が減ってしまうので、Lab Cradle のバッテリーの消耗度は早いよう です.





(b) バッテリー残量

図 36.2: バッテリー残量の確認

Lab Cradle の miniUSB 差し込み口の隣には,もう一つのランプがあります.そのランプは,デー タ収集の状況を示し ています.収集の準備ができていないときは赤色が付きます.収集の準備はで きていても,データがまだ収集されていないときは琥珀色が付きます.収集したデータがあるときは 緑色になります.Lab Cradle 単体でデータ収集を行うときには,データ収集中のときには緑色と琥 珀色が交互に点滅します.

Lab Cradle の OS 自体をアップグレードすることもできます. 詳細は,下記のサイトに登録されて いる Lab Cradle のガイドブックを参照してください.

[URL] https://education.ti.com/en/products/data-collection/ti-nspire-lab-cradle

#### 36.2 距離センサーと光センサーを利用した実データの収集と解析

複数のセンサーを利用した実データの収集として,距離センサー (CBR2) と光センサー (LS-BTA) を利用した実験をしてみましょう.よく知られているように,光の強さは光源からの距離の2乗に反 比例します.このことを距離センサーと光センサーを用いると簡単に確かめることができます.

光センサーは,感度を3段階に切り分けることができます.スイッチを利用することで,低照度(0~600ルクス),室内照明(0~6,000ルクス),そして外光(0~150,000ルクス)を切り分けて測定する ことができます.測定のためにセンサーの諸要素を設定し直す必要はありません.光センサーが接続 されると,センサーに適した設定は Vernier DataQuest により自動的に行われます. 測定するには,最初に,距離センサーのセンサー部分の真横に光センサーを固定して光源の近くに 置きます.そして,測定開始と同時に光源から遠ざけるだけで2つのセンサーからのデータが同時に 収集されます.あるいは,最初は光源から遠ざけた箇所に置いて,測定開始と同時に光源に近づけて もかまいません.

測定は室内で行うので,感度は 0~6,000 ルクスで測定します.デフォルトでは,Rate は毎秒 20 個, 測定時間は 10 秒に設定されています.しかし,距離センサーを手動で動かすときに 10 秒間はちょっ と長いので,図 36.3(a) により 5 秒に修正して測定することにします.

CBR2 はデジタルセンサーです. この距離センサーは,基本的には Nspire 本体に接続して使用し ます. 距離センサーの附属ケーブルは Nspire に接続することはできますが,Lab Cradle に接続する ことはできません.Lab Cradle に接続するには専用のケーブルが必要です.しかし,そのケーブル は手元にないので,CBR2 は Nsipre に接続し,Lab Cradle には光センサーだけ接続して測定するこ とにします.このような接続方式であっても,データを同時に収集することができます.

実際の実験では、距離センサーと光センサーを室内の天井灯 (LED) に近づけて測定しました. きれい なデータを採るには、何度か実験を繰り返す必要があるかもしれません. グラフビューには図 36.3(b) のような距離と速度のグラフが表示されますが、光センサーからのデータもしっかり収集されていま す.マウスポインタを速度のグラフの縦軸ラベルの箇所において [ctrl] [menu] を押すと、(c) のよう にグラフ表示を変更可能なリスト名が表示されます.「illumination」が光センサーからのデータです. 感度を3段階で切り分けるので、番号で区別されています. 0~6,000 ルクスにするスイッチは一番上 になるので、illumination3を指定すると (d) のような距離と光量のグラフが表示されます. 上段の距 離と下段の光量の関係を見ると、距離が天井に近づくにつれて天井との距離が減少し、それにつれて 光量が増加していく様子がはっきりと分かります.

次に,距離と光量の関係だけにするため, menul 3 1 によりグラフを下段の光量のグラフだけ にします. そして, マウスポインタを横軸のラベル (time) の箇所に置いて [ctrl] [menu] を押します.



(a) 測定時間の変更











(c) 光量のグラフへの変更



図 36.3: 距離と光量との関係

図 36.3(c) のように変更可能なリスト名が表示されるので, 横軸を時間 (time) から距離 (position) に変更すると, (e) のような横軸が距離で縦軸が光量のグラフが表示されます. ただし, 横軸に指定 するリストは昇順または降順にソートされている必要があります. この実験では距離は単調に減少し ているので, この条件を満たしています.

理論的には、光量は距離の2乗に反比例するはずです。そこで、(e) に対してべき乗回帰 ( $ab^x$ )を 行ってみましょう。 [ctrl] ④ から「5: Power ( $ax^b$ )」を選択すると、(f) のように回帰式として  $y = 1362.652x^{-2.643}$ が得られます。残念ながら「距離の2乗」にはなっていません。

そこで、今度は回帰式を $y = \frac{a}{(x-b)^2} + c$ の形で設定して、得られたデータからa, b, cを求めてみ ましょう、最小2乗法の手法で求めることもできますが、単純に実データから3点を指定して、その 点を通るものとしてa, b, cを決定してみます、測定時間は5秒なので、最初と最後を除いた2秒、3 秒、4秒のデータを使用します、その値は、図 36.4(a) のようにテーブルビューを表示させると知る ことができます、次のようになっていました。

time(s)	position(m)	illumi(lux)
2	1.440	538.4
3	1.243	786.3
4	1.054	1195.5

 $\boxed{\text{ctrl doc}}$ により計算画面を追加します.  $y = \frac{a}{(x-b)^2} + c$ において, xには position, yには illumination3 の値を代入して, a, b, cに関する連立方程式を solve を利用して解きます. 式の入力に あたっては, 図 36.4(b) のように  $\boxed{|\Box|}$ による数式テンプレートを利用するとよいでしょう. 次の連 立方程式を解くことになります.

 $538.4 = \frac{a}{(1.440 - b)^2} + c, \quad 786.3 = \frac{a}{(1.243 - b)^2} + c, \quad 1195.5 = \frac{a}{(1.054 - b)^2} + c$ 図 36.4(b) では, 答えが 3 つ示されています.

	a = -5.59586	a = 3.80139	a = 1007.22
ł	b = 1.35185 ,	b = 1.1279 , $<$	b = 0.166182
	c = 1258.58	c = 499.375	c = -82.3399

設定した関数はx = bの箇所では定義されないので,図 36.3(e) に当てはまる解は3番目の解です. 図 36.3(e) のグラフビューの画面に曲線y = f(x)を書き入れることはできないので,ここではプロット画面で描画することにします.図 36.3(e) の状態で [ctrl] [7] 「Send to」から「2: Data&Statistic」



図 36.4: 距離の2 乗に反比例

を選択すると,データセット run1 がプロット画面に送られます.しかし,最初に表示されるのは, データセットの1列目と2列目にある時間と距離の関係を示すグラフが表示されます (12–15 頁参 照).そのグラフの縦軸と横軸を距離と光量の関係に直してもよいですが,それよりもむしろ,最初 から ctrl doc によりプロット画面 (Data&Statistic) を追加しておいて,自分で縦軸と横軸を指定し た方が簡単です.

プロット画面を追加して横軸には run1 の距離 (position) を,縦軸には光量 (illumination3) を指定 して, ctrl ④から「4: Plot Function」を選択します.  $f_1(x) :=$ 」が表示されるので,その箇所に 自分で求めた関数を入力します.ただし,関数の式が長いと,画面に表示される枠内に入力しきれま せん.そこで, ctrl doc によりグラフ画面を追加して,そのグラフ画面で

$$f_1(x) = \frac{1007.22}{(x - 0.166182)^2} - 82.3399$$

と定義しておきます. あるいは, 計算画面で「 $f_1(x) :=$ 」として定義してもかまいません.

その上でプロット画面に戻り、 menu [4]による「4: Plot Function」を選択します.  $f_1(x)$  が定 義済みなので「 $f_2(x) =$ 」と問われるので、 del を利用して「 $f_1(x)$ 」だけにして enter を押すと 図 36.4(c) が表示されます. 確かに、距離の2乗に反比例しています. あるいは、「4: Plot Function」 のとき「 $f_2(x) = f_1(x)$ 」としてもかまいません. このように、プロット画面の menu [4]「4: Plot Function」を利用すると、自分で考えた関数のグラフを重ねることができます.

同じことをグラフ画面で行うには,第34.5節を参照してください.グラフのモードを散布図にす る必要があります.

# 36.3 音センサーを利用した実データの収集

Lab Cradle は CBR2 と同様に, Nspire と接続されていなくても実データを収集することができま す. 音センサー (MCA-BTA) を例に試してみましょう. 音センサーは EasyLink を通して使用するこ とはできないので, Lab Cradle を利用するしかありません.

音は振動しながら空気中を伝わります. 音センサーはその音圧の変化を感知して, その変化を電圧の変化として出力しています. 収集できる周波数帯は 100Hz~15kHz です.

1Hz は1秒間に1回の振動が起きているということなので,100Hz の振動は1秒間に100回振動しています.それは,逆に言うと,1回振動するために1/100 = 0.01秒の時間がかかるということです.

このような振動は、三角関数を用いると表すことができます. 正弦波の場合, *t* を時間 (秒) とする と、1 秒間に波が1回現れるのは sin 2 $\pi t$  であり、波が2回現れるのは sin 4 $\pi t$  です. つまり、*t* を時間 (秒) とすると、sin 2 $\pi ft$  の *f* が 1 秒あたりの波の数を表し、それが周波数です. したがって、周波数 が *f* Hz の波の周期は 2 $\pi/(2\pi f) = 1/f$  (秒) です. 下図 (b) の場合の周期は、1/2 = 0.5 (秒) です.



表 36.1: 周波数と1秒あたりの波の個数

# Lab Cradle への音センサーの接続

音センサーを Lab Cradle に接続すると,図 36.5(a) のように,デフォルトの設定では Rate は 10000 sample/s, Duration は 0.03 (s) に設定されます.1秒間に1万回のデータ収集を 0.03 秒間行うので, 301 個のデータが収集されることになります.

0.03 秒だと,測定開始のスタートボタンを押した瞬間にデータ収集が終わってしまうような印象を 持ちますが,スタートボタンを押して一瞬の間をおいてからデータ収集がなされます.試みに,デフォ ルトの設定のまま「い〜」と発音してデータを取ると (b) のようなグラフになりました.波形データ を収集した後では,このような波形を解析する作業が必要になります.



(a) 音センサーの初期画面



図 36.5: 音センサーによる実データの収録

# 波形データの解析

図 36.5(b) のグラフは,明らかに三角関数のグラフで す.最初に,この波形の周期を計算してみましょう.同 じ形が繰り返されているので,その間隔を調べると周期 が分かります.

[menu] [4] [3] により Examine Line を表示させ、 **イ** ト で 動かすことで最小値の間隔を求めます。図 36.6 では最 初に最小値を取るのは t = 0.0051 のときに 2.424 であ ることが分かります. 同様にすると、2 番目の最小値は t = 0.0123 のとき、3 番目の最小値は t = 0.0195 のとき です. 差はいずれも 0.0072 なので、周期は 0.0072 (s) で



図 36.6: 「い」の音の最小値

12-34 第12章 実データの収集と解析

あることが分かります.したがって、この波形の周波数は1/0.0072 = 138.9 (Hz)です.

同じ「い〜」という発声でも,喉の状態で異なります.性別や音の高低によっても異なります.い ろいろ試してみることで,音の周波数に関する理解が深まるのではないかと思われます.

なお,縦軸のラベルには「Sound Pressure」と書かれています.「音圧」ということですが,それが どのような単位の数値であるのかは不明です.おそらくは,電圧の値なのではないかと思われます. 音センサーのマニュアルにも明確には記載されておらず,「縦軸には任意の単位を取ることができる」 と書かれています.ともかく,「音圧の変化を数値で収集することができた!」ということが重要です. 具体的な単位を指定するには,音センサーの調整作業 (Caribration) が必要になります.その詳細は, センサーの販売元に問い合わせてください.

# 音階による周波数の違い

このような音の波形データを解析するには,どうしても音階と周波数との関係について理解して いること,あるいは理解させることが必要です.周知のように,NHKの時報の「ラ」の音(A)の周 波数は440Hz で,その2倍の周波数の880Hzの音が一オクターブ高い「ラ」の音です.この440と 880の間を6分割して,「ラ」の周波数(440Hz)を  $\sqrt[6]{2} = 1.12246$ 倍ずつすることで得られているのが 「ドレミファソラシド」です.半音の場合は  $\sqrt[12]{2} = 1.05946$ 倍ずつ周波数が高くなっています.音セ ンサーを利用する場合は,幾つかの特定の音階の音のデータを収集して,このことに気づかせるよう に導いてもよいでしょう.

そこで,最初に「ラ」の音の波形を収集してみましょう.音叉を利用するのがベストですが,近く に音叉がないので音階の各音を発生させることができるチューナーを利用することにします.それは 電子機器なので,金属板を細かく振動させて音を発生させています.音叉のようなきれいな正弦波で はありませんが,周波数や周期に関する情報は得られるはずです.

図 36.7(a) は「ラ」の音,(b) は「シ」の音の波形です.収集時間を短くして Duration を 0.005 (s) にしています. Exmine Line を利用して,「ラ」の波の周期を測ると 0.0023(s) になるので,周波数は 1/0.0023 = 434.78 (Hz) となり 440 に近い値が得られます. 音階は  $\sqrt[6]{2} = 1.12246$  倍されるので,「シ」 の音は 400 ×  $\sqrt[6]{2} = 493.883$  となるはずですが,(b) の周期は 0.002(s) になるので,使用したチュー ナーの周波数は 500 (Hz) になりました.

薄い金属板を振動させた場合は,温度・湿度に加えて金属板の疲労度など様々な要因が影響してく ると思われるので,このような場合に正確な値を得るのは難しいと思われます.



図 36.7: チューナーによる「ラ」と「シ」

一般には、このような波形の解析にはフーリエ解析に関する知識が必要です.フーリエ解析によれば、周期 2T の関数は

$$\frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left( a_n \cos \frac{n\pi x}{T} + b_n \sin \frac{n\pi x}{T} \right)$$

という三角級数で表すことができます.また,具体的な実測データが与えられていると,離散フーリ エ変換を利用してそのデータを取るような関数を再現することができます.詳細は,フーリエ解析の 専門書を参照してください. 12-36 第12章 実データの収集と解析

#### 36.4 Lab Cradle 単体でのデータ収集

ここで,Lab Cradle 単体で実データを収集してみましょう.音のデータとしては,どうしても音 叉のデータを入手したいものですが,立派な音叉は学校の実験室に行かないと置いてありません.そ こで,ある学校の物理実験室に出向いてみました.

Lab Cradle のバッテリーの消耗は早いので、実験に出向く前に十分に充電しておきます.実験自体は簡単で、単に Lab Cradle の TRIGGER ボタンを押すだけです.しかし、単に TRIGGER を押しても実データは収集されません.あらかじめ、TRIGGER を押せばデータ収集が始まるように設定しておく必要があります.

そのため, Lab Cradle と Nspire をドッキングさせて音センサーを接続した状態で, menu 1 B から「1: Triggering」を選択して, 図 36.8(a) のように「1: Set Up」を選択します. (b) の画面がでるので, そこで TRIGGER によりデータを収集するセンサーを指定します. センサーが1 つだけしか接続されていないときは, そのセンサーしか表示されません.



図 36.8: TRIGGER のセットアップ

TRIGGER ボタンでは、センサーがある状況になるとデータを収集するように指定することができ ます. 音センサーの場合は、たとえば無音状態の時はデータを収集しないで音が出たらデータ収集を 始めるとか、音があるレベル以下になったらデータ収集を開始する等の設定をすることができます.

(b) の2段目では,そのいずれの方法でデータを収集するかを指定します.今の場合は音叉から音が 出ればデータ収集をするので,「Increase through threshold」を指定します.「threshold」は閾値のこ とです.センサーの感知しているデータが指定した閾値よりも増えたらデータ収集を開始するように する,ということです.あるレベル以下になったらデータ収集をするようにしたい場合は,「Decrease through threshold」を選択します.

(b)の3段目では、その閾値の値を設定します. デフォルトでは「0」になっています. とにかく音が出たらデータ収集をする場合は、そのままでよいと思います. ok を押して、改めて menu 1 B 1 を 押すと、Triggering が「2: Enable」になっているはずです.

以上の設定を複数のセンサーが接続されている場合に行うと,1段目で指定したセンサーがある条件を満たせば測定を開始するように指定することができます.

Trigger に関する設定が終わったら Lab Cradle から Nspire をはずして, 音センサーと Lab Cradle だけを持って必要な実験場所に出向きます.そして, 音叉を叩いて共鳴箱から漏れる音に音センサー

を向けて Lab Cradle の TRIGGER ボタンを押します. これで, データが収集されました. データが 収集されると Lab Cradle の miniUSB 接続口の隣のランプが緑色に点滅し, データが収集されたこと を示しています.

次に、収集データがある Lab Cradle を Nspire と接続すると、図 36.9(a) のように「New Data Available」というメッセージが表示されるので、そのデータを Nspire に取り込むか (Import)、廃棄 するか (Discard)、それとも判断をキャンセルするか (Cancel) を指定します、「Import」を押すと、取 り込んだデータが (b) のようにグラフビューに表示されます.





図 36.9: TRIGGER のセットアップ

図 36.9(b) は見事な正弦波です. menu 4 6から「8: Sinusoidal」を選択すると,正弦関数で  $y = a \sin(bx + c) + d$ により回帰します. その結果は図 36.10(a) のように a = 0.420743, b = 2321.63, c = 2.06529, d = 2.51209 と表示され, ok を押すとそのグラフが重ね書きされます. 図は省略しま すが, (b) のグラフにすっかり重なって表示されます.

このことから,この波の周期は  $\frac{2\pi}{2321.63} = 0.002706$ ,周波数は 1/0.002706 = 369.5 (Hz) であることが分かります.440 (Hz) が「ラ」の音で ½2 倍すると半音上がります.440.0 を ½2 で 3 回割ると

$$\frac{440.0}{(\sqrt[12]{2})^3} = 369.99$$

となるので,この音叉の音は F<sup>#</sup> (半音高いファ)ではないかと思われます.図 36.9(b)の一部の波を 切り出して Examine Line で調べてみても,波の周期は 0.0027 であることが確認できます.



図 36.10: 音叉の波の正弦回帰