



HRV
for Windows
User's Guide



LabChart™

▶▶ Module

日本語マニュアル

目次

1 基本	3
2 設定	4
2-1 記録設定	4
2-2 オンライン・オフラインモード	4
2-3 R波検出設定	4
2-4 Analysis 設定	5
2-5 マーカ	7
2-6 被験者データ	7
3 解析	8
3-1 解析ウィンドウ	8
3-2 時系列の編集	11
3-3 Reselecting Analyzed Data	12
3-4 データパッド演算	12
3-5 テキスト形式での出力	13
4 技術的局面	14
4-1 R波イベントの時間	14
4-2 RR インターバル群	14
4-3 Poincaré Plot の楕円	15
4-4 HRV スペクトラム	15
5 パラメータ	18
6 リファレンス	20

1

基本

このガイドには、HRV モジュール v1.2 の詳細に関して書かれてあります。このモジュールは、Windows 版 LabChart 向けのソフトウェアで、ECG や動脈圧の記録からの RR インターバル変動を表示、解析することができます。

このモジュールは、ヒト及び動物への研究用です。臨床目的に使用することはできません。

HRV は、通常、既に記録されたデータを解析するのに用いられますが、データを記録しながら、解析し表示させることもできます。データは、サンプリングレートやユニットが変更されない限りは、ブロック境界をまたいで解析されます。

HRV モジュールをインストールしますと、LabChart 画面上に以下のような項目が表示されます。

- LabChart メニューバーに HRV メニュー (図 1-1) が追加されます。このメニューを通じて、HRV モジュールのほとんどの機能を使用することができます。各メニュー項目の機能詳細に関しましては、第 2 章と第 3 章をご参照下さい。

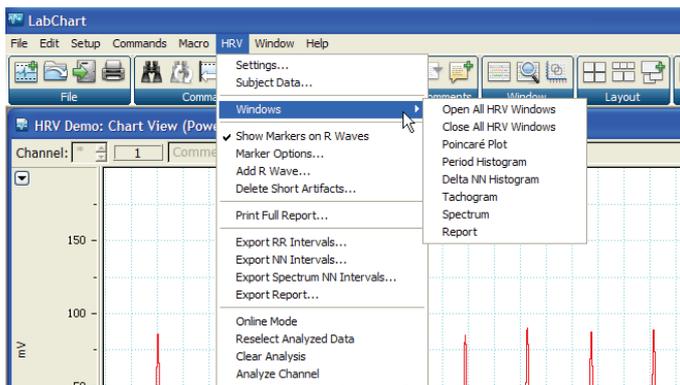


図 1-1

- HRV 解析ウィンドウをアクティブにしますと、View メニュー (図 1-2) も LabChart メニューバーに追加されます。これにより、個々の解析ウィンドウの表示設定を調節することができます。詳しくは、第 3 章をご参照下さい。

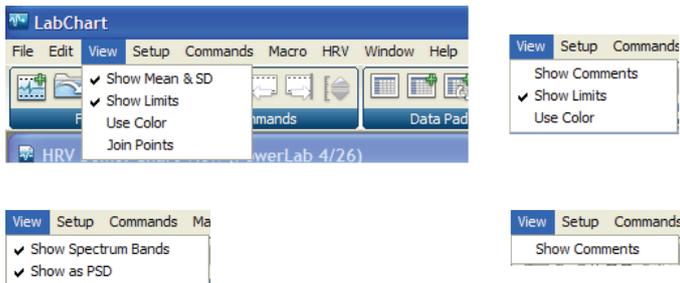


図 1-2

左上：Poincaré Plot 右上：Tachogram
左下：Spectrum 右下：Report

- LabChart ツールバーに、HRV ツールアイコン (図 1-3) が追加されます。これらのボタンを用いることで、よく使う項目へのアクセスが便利になります。



図 1-3

- データパッドのカテゴリーに HRV パラメータが追加されます。詳しくは、8 ページをご参照下さい (図 1-4)。

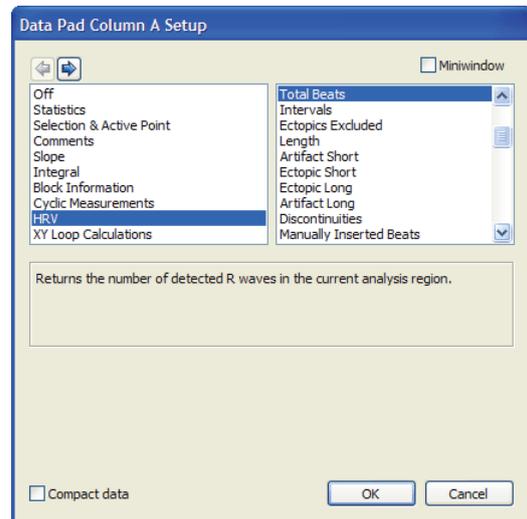


図 1-4

2

設定

2-1 記録設定

- ヒトでの記録の場合、LabChart でのサンプリングレートは 1kHz に設定して下さい。小動物での記録の場合、RR インターバルの分解能を維持するために、2kHz-4kHz を推奨します。
- 入力アンプを用いて、チャンネルのレンジを適切に設定して下さい。ヒトの心拍や ECG 記録の一般的なレンジは、それぞれ、200mV、2mV です。

2-2 オンライン・オフラインモード オフライン

デフォルトでは、オフラインモードに設定されています。この場合、データを記録した後に解析の設定を行うことができます。

オンライン

オンラインで、データを記録しながら解析を行い表示させることができます。この場合、解析を行う前に、R 波の検出設定や解析設定を行う必要があります。記録停止後、設定を変更してオフラインで再解析することもできます。

オンラインで解析するには、HRV > Online Mode (バージョンによっては、Analyze while sampling) を選択して下さい。

2-3 R 波検出設定

RR インターバルを分類し統計的に解析するには、まず、ビートを検出する必要があります。ビートの検出は、HRV Settings ダイアログ内の R Wave Detector タブ (図 2-1) で、設定することができます。

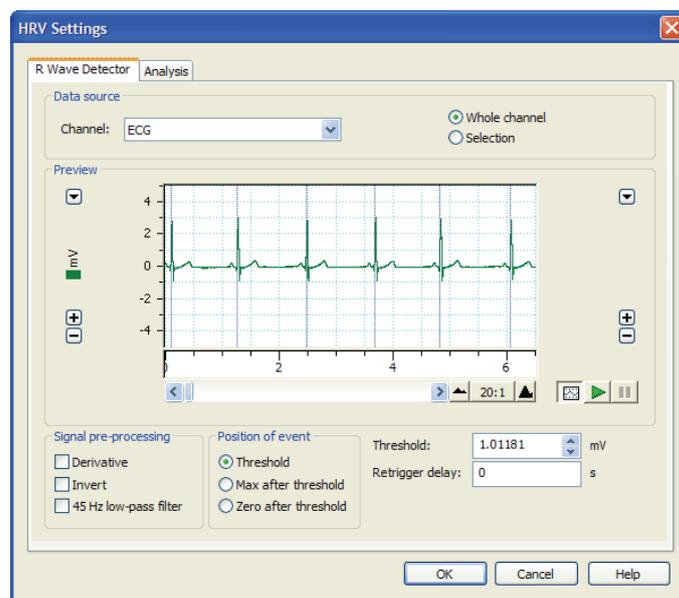


図 2-1

Data Source 欄

Channel のドロップダウンリストから、解析するチャンネルを選択して下さい。

オフラインで解析する場合は、チャンネル全体 (Whole Channel) を解析するか、選択範囲内 (Selection) を解析するかを選択して下さい。Selection を選択した場合は解析するデータを Chart View 上で選択して下さい。

Preview 欄

Preview 欄では、選択されたチャンネルのデータ、もしくは、現在入力されている信号を表示することができます。Signal pre-processing と閾値の調整の設定で検出されたビートは、縦線で示されます。Chart View 上でデータを選択した後に R Wave Detector 設定ダイアログを開いた場合、Preview 欄には、そのデータが表示されます。

Preview 欄は、Chart View と同様の方法で、縦軸と横軸のスケールを調整することができます。また、以下のボタンを用いることで、記録したデータを閲覧したり、現在入力されている信号を表示させたりすることができます。



Preview ボタンをクリックしますと、選択されたチャンネルで記録されたデータが表示されます。



Monitor ボタンをクリックしますと、選択されたチャンネルに現在入力されている信号が表示されます。このデータは、LabChart ドキュメント内に記録されているデータには追加されません。



Pause ボタンをクリックしますと、入力された信号を閲覧することができます。

Signal Pre-Processing 欄

ビート、RR インターバルの始点の位置を正確に検出するために、シグナル前処理 (Signal Pre-Processing) を調整する必要があります。シグナルに微分をかけたり、反転、フィルタをかけることができます。

Derivative (微分) :

シグナルの種類 (心拍、もしくは、ECG) や心電図誘導、心軸にもよりますが、そのシグナルかその微分かを用いる必要がある場合があります。シグナルに低周波のノイズ (ベースラインのゆらぎ) がある場合は、微分を用いて下さい。

ビートの検出に微分したシグナルを用いるには、Derivative (微分) を選択して下さい。代わりに、解析するチャンネルのチャンネル演算での微分を適応することも可能です。

Invert (反転) :

各ビートの検出を一度きりにするために、シグナルは、心周期ごとに上向きのピークを持つことが必要になります。

シグナルが下向きのピークを持つ場合は、Invert (反転) を選択して下さい。代わりに、データを記録する前に、LabChart の入力アンプダイアログで Invert (反転) を選択することも可能です。

45 Hz low-pass filter (45 Hz ローパスフィルタ) :

シグナルに高周波のノイズがのっている場合、ノイズのピークが誤ってビートとして検出されてしまう可能性があります。ビートの検出前にシグナルから高周波ノイズを取り除くには、45 Hz low-pass filter を選択して下さい。代わりに、チャンネル演算の算術演算やデジタルフィルタを用いた 45 Hz ローパスフィルタを適応することも可能です。

HRV 解析を行う前に、他のチャンネル演算を適応することも可能です。

Position of Event 欄

検出されるイベントは、オプションを選択することで、閾値との交点後まで遅らせることができます。

Position of event オプションボタンを選択することで、イベントの位置を、閾値との交点、閾値交点後の次の最大値、閾値後の次のゼロ点のいずれかに設定することができます。

検出された各 R 波の時間 (R 波上に表示されているマーカの時間と同じ) は、選択された Position of Event オプションに依存します。Threshold、もしくは、Zero after threshold か

を選択した場合、その時間は、それぞれ、閾値交点間の、次のゼロ点間の線形補間によって決定されます。Max after threshold を選択した場合の R 波の時間の決定方法に関しては、14 ページをご参照下さい。

Threshold 欄

ビート検出のための閾値 (Threshold) を Threshold テキストボックス内に入力することで設定することができます。デフォルト設定では、500mV に設定されています。

ビートは心周期ごとに検出されるので、必要なシグナル前処理を行った後で、閾値を設定して下さい。

Retrigger Delay 欄

各ビートのすぐ後にノイズやアーチファクトがイベントとして検出されている場合があります。

各ビートのすぐ後に誤ったイベントが検出された場合、Retrigger Delay に時間を入力して下さい。入力された時間内には、更にイベントが検出されません。入力する時間は、各ビート後のノイズが影響を与える時間よりは長く、次のイベントにはかからないように短く設定する必要があります。

2-4 Analysis 設定

Analysis 設定では、RR インターバルの算出やヒストグラムプロットの作成の様々な設定を行います。Analysis 設定を変更しますと HRV 統計データやヒストグラムは、自動的に新しい設定を反映するように更新されます。

HRV>Settings... を選択し、HRV 設定ダイアログが開いた後、Analysis タブ (図 2-2) をクリックします。詳細を設定するかデフォルト設定を用いて下さい。

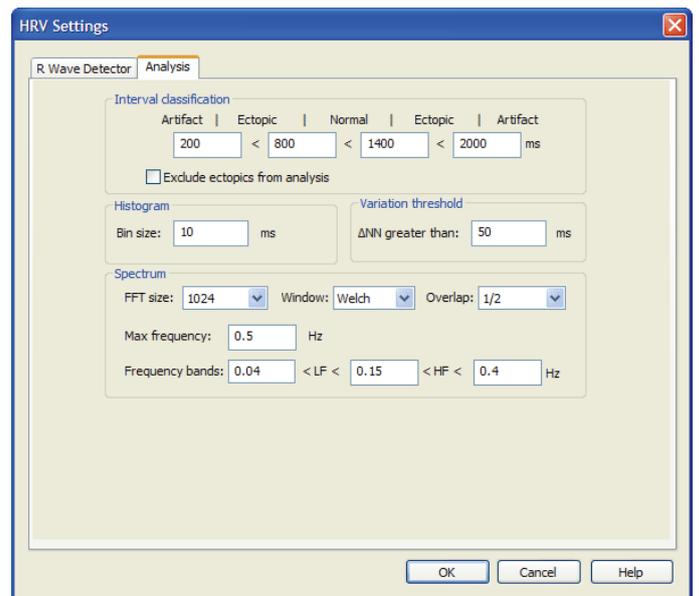


図 2-2

Interval Classification Limits

HRV 解析では、各 RR インターバルは、その Duration（持続時間）によって、3つのグループに分類されます。

Normal :

ユーザが定義した持続時間の境界の範囲内のインターバルです。

Ectopic :

Normal と Artifact として定義された境界の範囲内のインターバルです。解析に含めるかどうかを設定することができます。

Artifact :

前もって設定された境界の外（大きい、もしくは、小さい）にあるインターバルです。これらは、記録時における外部干渉や移動によるアーチファクト、もしくは、R 波の検出設定が正確ではないことを表しています。

記録に適した Interval Classification 境界を入力するか、デフォルト設定を用いて下さい。デフォルト設定は、ヒトの ECG、もしくは、脈拍記録に対して適した境界です。動物記録に対して適した境界は異なりますのでご注意ください。

多くの HRV パラメータは、「Normal 間の RR インターバル」、もしくは、「NN インターバル」を元に算出されます。

- Normal と補間された Normal インターバルに置換された Ectopic。Ectopic が除外された場合（以下をご参照下さい）。
- Normal と Ectopic。Ectopic が除外されていない場合。

HRV 統計データや解析ウィンドウの中には、NN インターバルを元にしていないものもありますのでご注意ください。NN インターバルを用いた算出の詳細は、第3章をご参照下さい。

Exclusion of Ectopics

Ectopic インターバルを解析から除外することができます。この場合、最も近い Normal インターバルから線形補間したインターバルに置換されます。この補間は、記録が断絶しないようにするためのものですが、逆に、HRV Spectrum に影響を与える可能性があります。この補間の詳細に関しては、14 ページをご参照ください。Ectopic インターバルを除外しない場合は、Normal インターバルとして扱われます。Artifact は、常に解析に含まれません。

Ectopic RR インターバルを解析から除外するには、Analysis Settings ダイアログ内で Exclude ectopics from analysis チェックボックスを選択して下さい。

Histogram Bin Size

Histogram Bin Size は、Period Histogram や Delta NN Histogram ウィンドウで用いられる時間分解能です。

Histogram Bin size をミリ秒で入力するか、デフォルト設定の 10ms をご利用下さい。

NN インターバル Variation Threshold

HRV 解析においては、連続する NN インターバル（Normal 間の RR インターバル）の Duration（持続時間）の差が重要です。「大きな」差を同定するために用いられる閾値を、 Δ NN greater than テキストボックス内に入力して下さい。この値を超える差の数は、HRV Report に NNxx として表示されず（xx は閾値として入力した値です）

連続する NN インターバル間の大きな差を同定するための閾値をミリ秒で入力するか、デフォルト設定の 50ms をご利用下さい。

Spectrum パラメータ

FFT size、Window、Overlap 設定によって、HRV Spectrum ウィンドウ内のスペクトラムの算出方法を決定します。FFT size は、FFT（Fast Fourier Transform 高速フーリエ変換）の各セグメントで解析されるデータポイント数です。Window は、FFT で用いられたセグメントの端のポイントの影響を抑えるための関数です。Overlap は、連続したセグメント間でオーバーラップする総量です。

HRV Spectrum で用いられる FFT は LabChart の Spectrum ウィンドウで用いられる FFT と似ています。詳細は、16 ページをご参照ください。

4つの窓関数（Windowing function）を用いることができます。Cosine、Hann、Parzen、Welch です。もしくは、何も使用しないことを選択することもできます。Welch 関数は、LabChart の Spectrum でも用いることができます。これらの窓関数に関する詳細は、16 ページをご参照ください。

Overlap オプションでは、none、1/2、2/3、3/4 のいずれかを選択できます。

FFT Size(1024)、Window(Welch)、Overlap(1/2) のデフォルト設定を推奨します。他の設定は、特殊な状況下で、スペクトル特性を高める可能性があります。

スペクトラム解析の周波数帯域

HRV Spectrum ウィンドウでは、スペクトラム NN インターバルのパワースペクトラムを表しています。このスペクトラムでの、VLF（超長波）、LF（低周波）、HF（高周波）に分類された帯域の評価が、心拍変動解析において重要です。スペクトラムをこれらの帯域に分類することで、NN インターバルの変動の原因を見分けることができます。詳しくは、14 ページの Spectrum をご参照下さい。

Max frequency テキストボックスに、HRV Spectrum ウィンドウに表示させる最大周波数（縦軸の最大の範囲）を入力して下さい。デフォルト設定では、ヒトに適した 0.5Hz となっています。

Frequency bands テキストボックスに、LF 帯域と HF 帯域を定義する境界を入力するか、もしくは、デフォルト設定を用いて下さい。これらの境界は、HRV Spectrum ウィンドウに表示され、Report に含まれる算出に用いられます。

2-5 マーカ

検出された R 波の上にマーカを表示させるかを選択することができます（デフォルト設定では、マーカは表示されます）。オフラインモードでは、選択範囲、もしくは、チャンネル全体（R Wave Settings ダイアログ内の Data Source 欄の設定によります）にマーカが表示されます。オンラインモードでは、データが記録され R 波が検出されるにつれて、マーカが表示されます。

マーカは各 R 波に関連する位置に表示されます。その厳密な位置は、R Wave Settings ダイアログ内の Position of event の設定によります。

R 波マーカを表示（もしくは、非表示に）するには、HRV>Show Markers on R Waves を選択して下さい。マーカが表示されている時にはこのメニュー項目はチェックがされています。

マーカをクリックした状態にしますと、そのマーカに関する情報ボックスが表示されます。ここでは、ビート番号、解析領域の初めからの番号が表示されます。初めのマーカを除いて、各マーカの情報には、ビートまでの RR インターバルの長さや分類（Normal、Ecotopic、Artifact）も含まれます。

直前のインターバル分類によって、マーカを表示を選択するのは、HRV>Maker Options…を選択し、R Wave Maker Options ダイアログ内で適切なボックスにチェックをいれて下さい（図 2-3）。

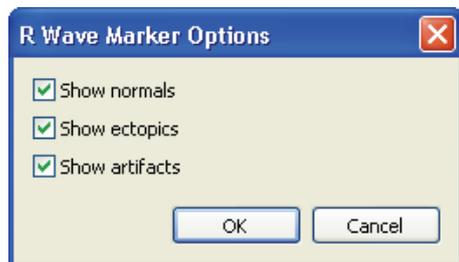


図 2-3

2-6 被験者データ (Subject Data)

HRV モジュールでは、被験者の情報（名前、年齢、性別）をメモすることができます。これらの情報は、Report ウィンドウに表示されますが、解析には用いられません。

被験者の情報を入力するには、HRV>Subject Data…を選択して下さい。Subject Data ダイアログ（図 2-4）が表示され、被験者の名前や年齢、性別を入力することができます。

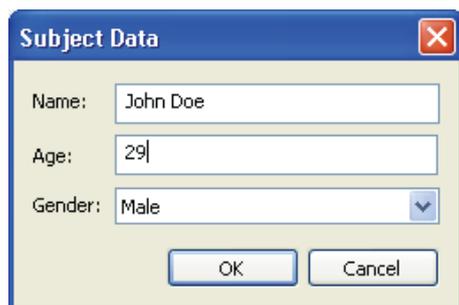


図 2-4

3

解析

3-1 解析ウィンドウ

HRV モジュールには、プロットやヒストグラム、レポートなどいくつかのウィンドウがあります。ウィンドウには、以下のものがあります。

- Poincaré Plot
- Period Histogram
- Delta NN Histogram
- Tachogram
- Spectrum
- Report

HRV ウィンドウの表示

- 全ての HRV 解析ウィンドウを表示するには、HRV>Open All HRV Windows を選択して下さい。
- 全ての HRV 解析ウィンドウを非表示にするには、HRV>Close All HRV Windows を選択して下さい。
- 個々の HRV 解析ウィンドウを表示するには、HRV メニューの HRV Window サブメニューから表示するウィンドウを選択して下さい。

HRV 解析結果と LabChart データを一度に見るには、Chart View と HRV ウィンドウを並べて表示してください。

LabChart データと HRV 解析ウィンドウを表示するには、HRV 解析データを全て表示した後、ウィンドウ>「並べて表示」を選択して下さい。

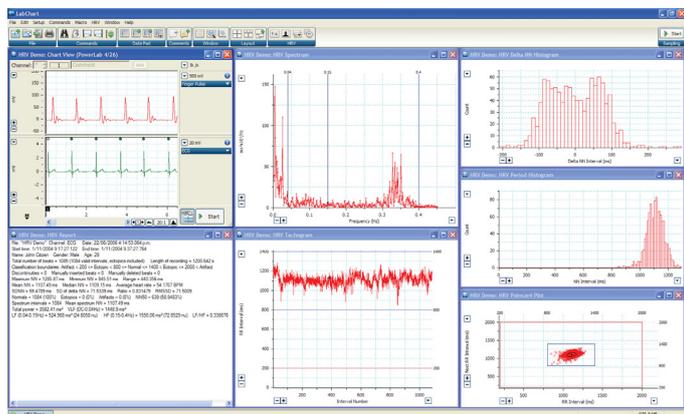


図 3-1

共通の機能

Report ウィンドウを除く、全ての HRV 解析ウィンドウは、Chart View での振幅軸の調整と同じように、縦軸や横軸を調整することができます。

- 各軸の + や - スケールボタンを用いて、各軸のスケールのサイズの変更（二倍、もしくは、二分割）することができます。
- 中点から少し離れたあたり二重矢印が表示されている時に軸をドラッグしますと、軸をのばしたり、縮めたりすることができます。
- 両方向の矢印が表示されている時にドラッグしますと、各軸のサイズが変更されることなく、両方向に移動することができます。
- 各軸には、上限下限の設定やデフォルト設定に戻すなどの調整ができるスケールポップアップメニューがあります。

Poincaré Plot

Poincaré Plot ウィンドウ（図 3-2）では、散布図内に、直前の RR インターバルに対する RR インターバルが表示されます。プロットには、生の RR インターバル用いられますが、表示される平均値や標準偏差は、NN インターバルに基づいています。

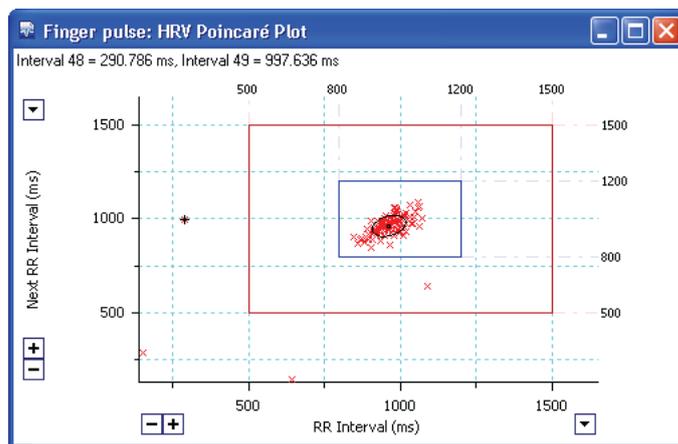


図 3-2

Normal、Ectopic、Artifact を定義する Interval Classification 境界は、青色と赤色のボックスで示され、プロットの上と右側にその数値が表示されます。ボックスをドラッグしますと Interval Classification 境界を変更することができ、その変更はプロットや Analysis Settings ダイアログで表示される数値に反映されます。

Poincaré Plot ウィンドウがアクティブな場合、LabChart メニューバーに View メニューが表示され、Show Mean & SD、Show Limits、Use Color、Join Points オプションが含まれます。

- **Show Mean & SD** : NN インターバルの平均値を示す小さな黒い正方形と心拍変動を示す楕円を表示、もしくは、非表示にします。短径の長さが短期間の変動の範囲を表し、長径の長さが長期間の変動の範囲を表します。それぞれの軸の算出方法の詳細に関しましては、15 ページをご参照下さい。
- **Show Limits** : Interval Classification 境界を表示（もしくは、非表示に）します。
- **Use Color** : 色分けは、各ビートに対応した直前のインターバルの「Age」（赤色は初期のインターバル、青色は中盤のインターバル、青色は最も新しいインターバル）を示しています。これは、一連の RR インターバルが、確率的である（Poincaré Plot の色がランダムに混ざっている）か、トレンドがある（色が群集している）かを示しています。
- **Join Points** : プロットのポイントを順番につなぎ合わせます。Poincaré Plot 上のポイントをクリックしますと、Chart View 上でそれに対応する一組のインターバルが表示されません。

Period Histogram

Period Histogram ウィンドウ（図 3-3）では、NN インターバルの頻度分布を表示しています。このヒストグラムのビン幅は、Analysis Settings ダイアログ内で変更することができます。

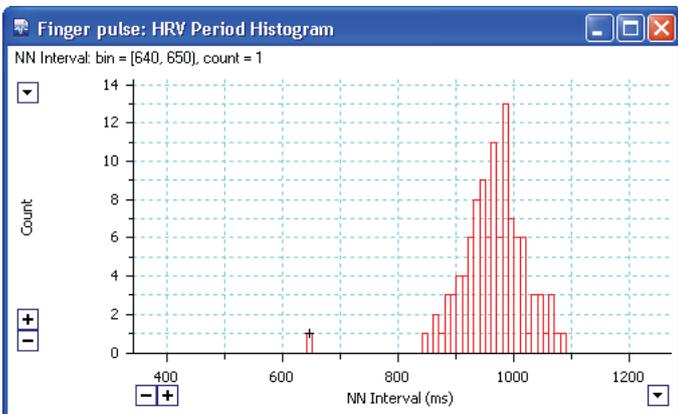


図 3-3

Delta NN Histogram

Delta NN Histogram ウィンドウ（図 3-4）は、各 NN インターバル間の差の頻度分布を表示しています。このヒストグラムのビン幅は、Analysis Settings ダイアログ内で変更することができます。

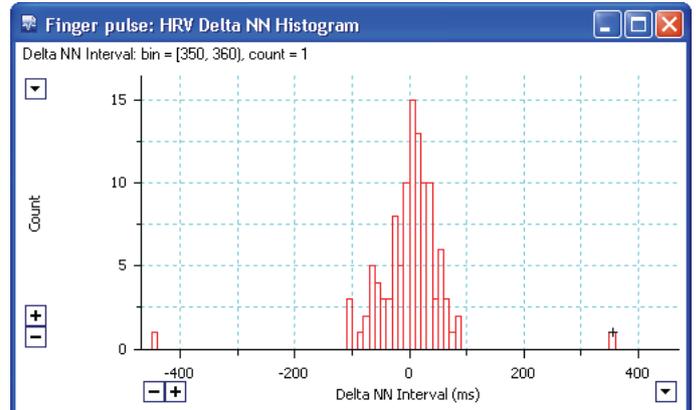


図 3-4

Tachogram

Tachogram ウィンドウ（図 3-5）では、インターバル番号に対応する RR インターバル値のプロットを表示しています。NN インターバルではなく、全て RR インターバルがプロットされています。誤って検出された R 波が図 3-5 で示すように突然落ち込んだピークとして現れるので、通常 Tachogram は、それらの指標として有効です。また、検出されなかった R 波は、鋭いピークとして表示されます。

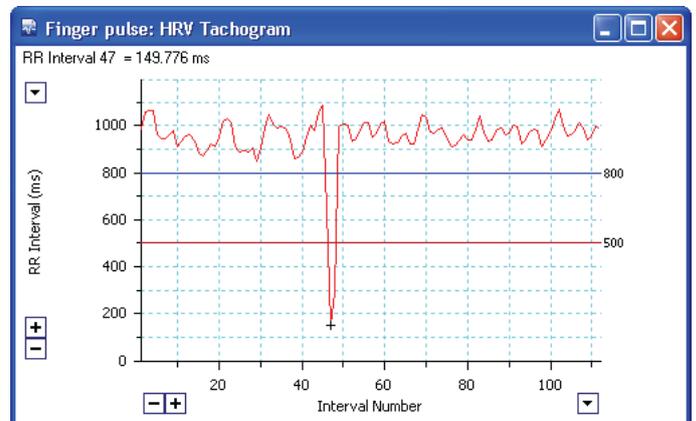


図 3-4

Normal、Ectopic、Artifact を定義する Interval classification 境界は、プロット上に横線として表示され、プロットの右側にその数値が表示されます。この横線をドラッグすることで Interval classification 境界を変更することができ、その変更はプロット内や Analysis Settings ダイアログ内の数値に反映されます。

Tachogram ウィンドウがアクティブな場合には、LabChart メニューバーに View メニューが追加され、それには、Show Comments、Show Limits、Use Color オプションが含まれています。

Show Comments は、解析領域内の Chart View コメントを Tachogram ウィンドウ内に表示させます。同じコメントが Report ウィンドウ内にも表示させることができます。Show Limits は、Interval classification 境界を示す横線を表示（もしくは、非表示に）させます。Use Color インターバルの「Age」に応じて、ポイントを色分けします。初期のインターバルは赤色に、中盤のインターバルは緑色に、最も新しいインターバルは青色に表示されます。

Tachogram 内のポイントをクリックしますと、それに対応するビートが Chart View 上の中央に表示されます。

Report

Report ウィンドウ(図 3-6)では、ファイルや記録されたデータに関する情報や被験者の詳細、HRV の解析結果、解析領域内にある Chart View 上のコメントが表示されます。Report 内の項目は、データパッドのパラメータとしても利用できます。(12 ページのデータパッド演算をご参照下さい。)

Report ウィンドウがアクティブな場合には、LabChart メニューバーに View メニューが追加され、それには、Show Comments オプションが含まれています。このオプションでは、解析領域内の Chart View コメントを Report ウィンドウ内に表示させます。

レポートの項目は、常に、現在の HRV 解析を参照しています。たとえば、「Start Time」や「Length of recording」などの項目は、HRV 解析を参照していて、必ずしも実際記録した LabChart の時間ではありません。インターバルに関連する統計結果の大部分は NN インターバルに基づいています。項目は、見ればすぐに分かるものが多いですが、説明が必要だと思われる項目の意味を、以下で説明しています。

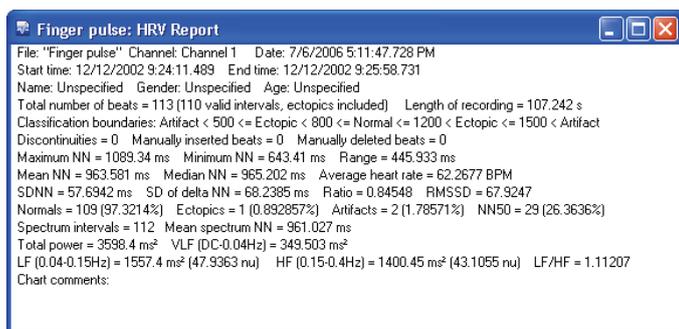


図 3-6

- **Range** : NN インターバルの最大値と最小値の差。
- **Average heart rate** : 解析領域における 1 分ごとのビートの平均心拍。「60000/NN インターバルの平均値」によって求められます。
- **SDNN** : NN インターバルの標準偏差。
- **SD of delta NN** : 隣接する NN インターバル間の差の標準偏差。
- **Ratio** : SDNN / SD Δ NN の割合。
- **RMSSD** : 隣接する NN インターバル間の差の二乗の平方根。

- **NNxx** : 隣接する NN インターバルが xx ミリ秒以上異なるペア数。xx の値は、Analysis Settings ダイアログ内で、Δ NN greater than テキストボックスに入力した数値です。この基準を満たすペアには、どちらのインターバルが長いかに関わりなく含まれます。
- **Spectrum intervals** : スペクトラムの算出に用いられる NN インターバル数。
- **Mean spectrum NN** : スペクトラムの算出に用いられる NN インターバルの平均値。
- **Total power** : 絶対的単位 (ms^2) における、現在の解析領域のスペクトラムのトータルパワー。
- **VLF, LF and HF** : これらのスペクトラム帯域 (VLF (超長波)、LF (低周波) HF (高周波)) は、Analysis Settings ダイアログ内で入力されている数値によって決定します。それぞれの帯域のパワーは、絶対的単位 (ms^2) と、正規化された単位 (nu) の 2 つで算出されます。

$$\text{nu} = (\text{絶対パワー}) \times 100 / (\text{トータルパワー} - \text{VLF パワー})$$
- **LF / HF** : 低周波帯域と高周波帯域の絶対パワーの比率。

Spectrum

HRV Spectrum ウィンドウ (図 3-7) には、時間ベースの Tachogram のパワースペクトラムが表示されます。しかし、スペクトラム演算に用いられるスペクトラム NN インターバルは、一般的に、生の RR インターバルや NN インターバルとは異なります (ですから、HRV メニュー内に Export Spectrum NN Intervals... の別の項目があります)。また、スペクトラムインターバルは、スペクトラム FFT 演算を簡略化するために、平均化された長さを基に再サンプリングされます。HRV スペクトラム演算の詳細に関しましては、15 ページのご参照下さい。スペクトラムの解釈は研究の盛んな分野です。通常、スペクトラムは解析の為、3つの領域に分けられます (20 ページのリファレンス 5 をご参照下さい。)

- **VLF (超長波)** は、DC から 0.04Hz あたりまでの領域です。この領域は、通常規定できませんが、心拍の体温調整などが対象となります。
- **LF (低周波)** は、0.04 から 0.15Hz までの領域です。LF パワーの増加は、交感神経の活性化を示します。
- **HF (高周波)** は、0.15 Hz 以上の領域で、迷走神経活性による心拍の急激な変動を示します。ヒトの呼吸性洞性不整脈は、しばしば 0.18 から 0.4 Hz までの範囲で見られます。

3つの領域の境界は、Analysis Settings ダイアログで設定することができ、HRV Spectrum ウィンドウで縦軸の境界線をドラッグすることで変更することができます。

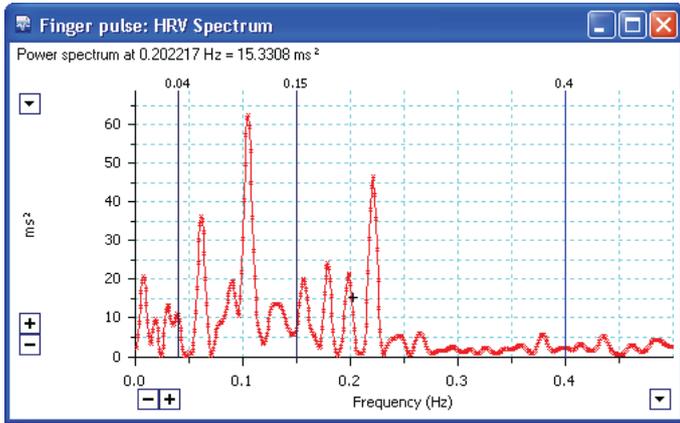


図 3-7

HRV Spectrum ウィンドウがアクティブの場合、LabChart メニューバー内に View メニューが追加され、それには、Show Spectrum Bands や Show as PSD オプションが含まれます。Show Spectrum Bands は、スペクトラムバンドの縦軸の境界線を表示 / 非表示にします。Show as PSD は、スペクトラムパワーを、絶対パワー (ms^2) ではなく、パワー密度 ($\text{ms}^2 \times 100/\text{Hz}$) の単位として表示します。

3-2 時系列の編集

正確な結果を得るために、R波の検出が重要です。多くの問題は、不正確な R波の検出により起り、これらは設定を調整することで解決することができます。

問題の検出

- Tachogram ウィンドウを用いることで、誤って研修された R波、また、検出されなかった R波を見つけることができます。
- デフォルト設定では、Chart View 内の検出された各 R波の上にマーカが挿入されます (図 3-8)。マーカが表示されない場合は、HRV > Show Markers on R waves を選択して下さい。

R波の追加

記録されたどの場所にも、R波を追加することができます。現在の HRV 解析領域外で R波イベントを追加する場合、生のデータは一貫性のない解析となり警告が非常されますのでご注意ください。正確に検出されなかった R波を追加するには、以下の手順を行って下さい。

1. Chart View 上で検出されなかったビートを選択して下さい (図 3-8)。

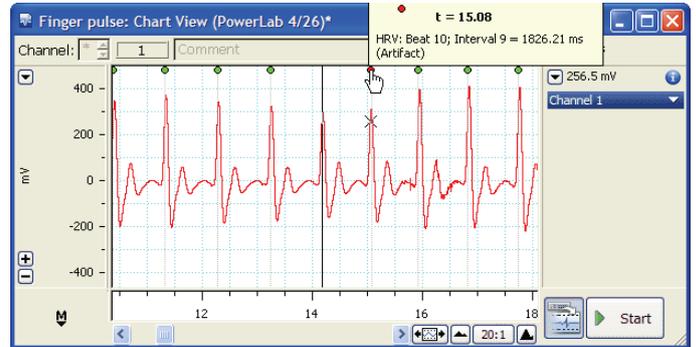


図 3-8

2. HRV > Add R Wave... を選択して下さい。
3. 新たに作られる 2つのインターバルの長さを示すメッセージ (図 3-9) が表示されます。

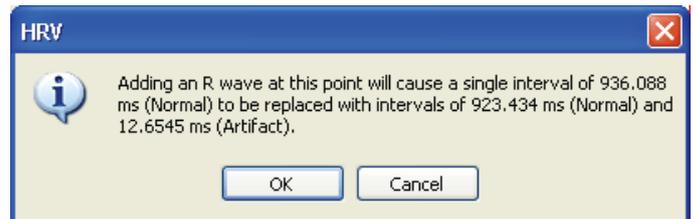


図 3-9

4. Chart View 上に新たな R波が追加され、それに応じて、R波上のマーカの番号付けが再度行われます (図 3-10)。
5. HRV 解析ウィンドウの統計が自動的に更新されます。

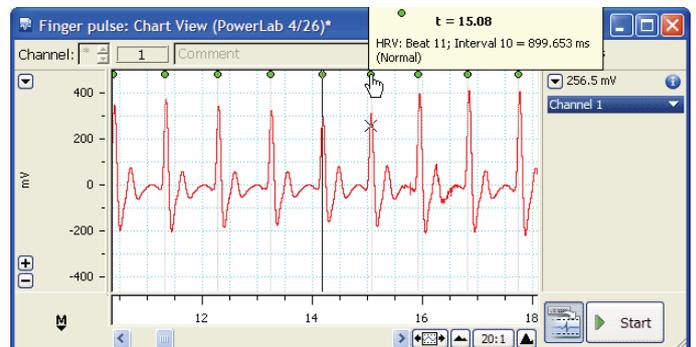


図 3-10

アーチファクトの除外

とても短い RR インターバルが、しばしば、ノイズや R 波検出のアーチファクトとして生じます。手動でこれらのアーチファクトを除外することができます。誤って検出された R 波を削除するには、以下の手順を行って下さい。

1. HRV > Delete Short Artifacts...を選択して下さい。
2. Delete Short Artifacts ダイアログが表示されます (図 3-11)。

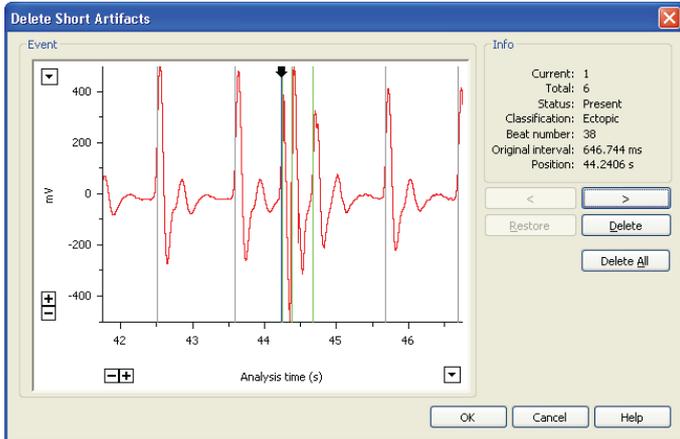


図 3-11

Event 欄での色分けは以下のようになっています。

- 灰色の縦軸: 検出されたビート。
- 緑色の縦軸: ショートアーチファクト RR インターバルの両脇にある、検出の「候補ビート」。
- 暗青色の縦軸の上の黒い矢印: 現在選択されている候補ビート。
- 明青色の縦軸: 削除された候補ビート。

Info 欄には、以下の情報が表示されます。

- 現在選択されている候補ビートの数。
 - 同定された全ての候補ビートの数。
 - 現在選択されている候補ビートの状態。
 - 現在選択されているビートの前のインターバルの分類。
 - 現在選択されているビートのビート番号。
 - 現在選択されているビートの前のインターバルの長さ。
 - 現在選択されているビートの HRV 解析領域の始点の時間。
3. 候補ビート間を前後に移動するには、Info 欄の下にあるボタンを用いて下さい。
 - 次の候補ビートに移動するには、> ボタンをクリックして下さい。
 - 前のビートに移動するには、< ボタンをクリックして下さい。

4. 個々のビートを解析から除外するには Delete ボタンを用いて下さい。多くの場合、除外する候補ビートは近くでペアになっており、そのうちの 1 つだけを除外する必要があります。

- 現在選択されているビートを除外するには、Delete をクリックして下さい。ビートの縦軸の色が明青色に変わります。
- 除外されたビートを回復させるには、そのビートを選択し、Restore をクリックして下さい。ビートの縦軸の色が明青色から暗青色に変わります。
- 全ての候補ビートを除外するには、Delete All をクリックして下さい。
- 全ての変更を撤回するには、Cancel をクリックし、Delete Short Artifact ダイアログを再び開いて下さい。

5. 終了しましたら OK をクリックし、検出を確認して下さい。HRV Analysis ウィンドウは自動的に更新されます。

3-3 Reselecting Analyzed Data

現在の解析に関するデータを表示させるのは、HRV > Reselected Analyzed Data を選択して下さい。Chart View 上に、現在 HRV ウィンドウに表示されている解析結果に用いられた選択範囲が表示されます。

3-4 データパッド演算

HRV Report ウィンドウで算出、表示される統計データは全て、データパッドパラメータとしても表示することができます (HRV モジュールがロードされている際)。これらのパラメータのリストや説明は、18 ページをご参照下さい。これらの説明は、Data Pad Column Setup ダイアログ (図 3-12) 内で、パラメータを選択した際に表示されます。

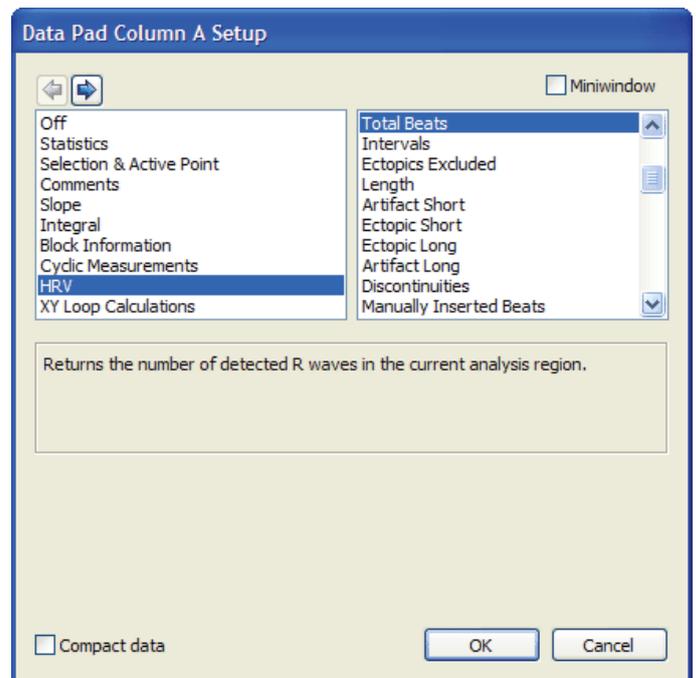


図 3-12

3-5 テキスト形式での出力

以下のものをテキストとして出力することができます。

- 生の RR インターバル
- NN インターバル
- スペクトラム NN インターバル
- HRV Report ウィンドウ内の中身

RR インターバル

Poincaré Plot や Tachogram で用いられた生の RR インターバルを出力することができます。RR インターバルをテキストとして出力するには HRV > Export RR Intervals…を選択して下さい。

RR インターバルテキストファイルの各列には、インターバル番号、インターバル持続時間 (Duration) (ms)、インターバル分類、ブロック番号が含まれます。

NN インターバル

Period Histogram や Delta NN Histogram、Report、データパッドで用いられた NN インターバルを出力することができます。NN インターバルをテキストとして出力するには HRV > Export NN Intervals…を選択して下さい。

テキストファイルの各列には、インターバル番号、インターバル持続時間 (Duration) (ms)、インターバル分類、ブロック番号が含まれます。Ectopic は、解析に含まれるかどうかによって、「Ectopic(interpolated)」、もしくは、「Ectopic(raw)」と表示されます。

スペクトラム NN インターバル

HRV Spectrum 演算に用いられたスペクトラム NN インターバルを出力することができます。スペクトラム NN インターバルをテキストとして出力するには HRV > Export Spectrum NN Intervals…を選択して下さい。

テキストファイルの各列には、インターバル番号、インターバル持続時間 (Duration) (ms)、インターバル分類、ブロック番号が含まれます。Ectopic は、解析に含まれるかどうかによって、「Ectopic(interpolated)」、もしくは、「Ectopic(raw)」と表示されます。Artifact は、常に「Artifact(interpolated)」と表示されます。

HRV Report

HRV Report ウィンドウをテキストとして出力するには HRV > Export Report…を選択して下さい。

4

技術的局面

この章では、HRV モジュールで用いられるアルゴリズムの技術的な詳細に関して説明しています。

4-1 R 波イベントの時間

HRV モジュールでは、3つの方法で R 波イベントの時間的位置を設定することができます。検出閾値と交差した時間、検出閾値と交差した後の次の最大値の時間、検出閾値と交差した後の次のゼロを超えた時間です。R 波イベントの時間の算出に用いられる数値は、以下の説明のような補間処理で決定されます。

Threshold/Zero After Threshold

R Wave Detector Settings ダイアログ内で、Threshold、もしくは、Zero after threshold オプションが選択されている場合、閾値との交点、もしくは、ゼロとの交点のいずれの側のサンプルポイント間の線形補間処理でイベントの時間を決定します。

Maximum After Threshold

R Wave Detector Settings ダイアログ内で、Max after threshold オプションが選択されている場合、閾値通過後の最初のピークを検出します。ピークとして判別されるサンプル値の条件は、そのシグナルがピーク値の 90% まで一様に減少することが条件になります。

閾値後のピークが検出されると、ピークの時間は、三点二次補間処理で調整され、最終的な R 波イベントの時間とされます。ピークの時間を t 、サンプル間の間隔を Δt としますと、 $t + dt$ で与えられる最終的な R 波イベントの時間は、次のように表されます。

$$dt = \frac{0.5(y(t - \Delta t) - y(t + \Delta t))}{y(t - \Delta t) + y(t + \Delta t) - 2y(t)}$$

4-2 RR インターバル群

HRV モジュールでは、生の RR インターバル群を演算に用いる場合と処理された群を演算に用いる場合があります。用いられるのは、生の RR インターバル、Normal 間の RR インターバル (NN インターバル)、スペクトラム RR インターバルの 3 種類です。

生の RR インターバル

生の RR インターバルは、ブロック内の連続するビート間で算出されます。HRV モジュールは、複数のブロックのデータを解析することはできますが、RR インターバルはブロックをまたいで算出されません。

生の RR インターバルは、Tachogram や Poincaré Plot ウィンドウの作成に用いられます (しかし、Poincaré Plot ウィンドウで表示される平均や楕円は NN インターバルを基に算出されます)。生の RR インターバルは、HRV > Export RR intervals.. を選択することで、出力することができます。

NN インターバル

HRV 解析ウィンドウには、生の RR インターバルにフィルター補正をかけた、ノーマル間の、NN インターバルに基づいたものがあります。このインターバル群を作成するには、HRV で初めに、Analysis Settings ダイアログ内で設定されたインターバル分類境界に基づいて、全てのインターバルが Artifact、Ectopic、Normal に分類します。その後、

- 全ての Normal は含まれます。
- Exclude ectopics チェックボックスが選択されていない場合は、全ての Ectopic インターバルが無補正の集団に含まれます。
- Exclude Ectopics チェックボックスが選択されている場合、Ectopic インターバルはブロック内の直前の連続した Normal インターバルの平均に置き換えられます。直前の連続した Normal インターバルがない場合は、その Ectopic (必要に応じて左右の全ても) は、破棄されます。
- 全ての Artifact インターバルは、破棄されます。

この方法を、次の表記法を用いて説明します。

| ビート
N Normal インターバル
I 補間インターバル
E Ectopic インターバル
A Artifact インターバル
- ブロック境界
{} 空白群

Ectopic が除外される場合は、(左のインターバル群は、ブロック全体のデータを表すと仮定します。)

```
| N | A | N | ⇒ | N | N | | | |
| N | E | N | ⇒ | N | I | N |
| E | N | N | ⇒ | N | N |
| N | E | E | N | ⇒ | N | I | I | N |
| E | E | A | E | ⇒ {}
| A | N | N | N | ⇒ | N | N | N | | | | | |
| N | E | - | E | N | ⇒ | N | - | N |
| N | A | E | N | - | A | N | ⇒ | N | I | N | - | N |
```

NN インターバルは、Period Histogram と Delta NN Histogram、Report ウィンドウ内の統計データの大部分に用いられます。NN インターバルは、HRV > Export NN Intervals... を選択することで出力することができます。

4-3 Poincaré Plot の楕円

Poincaré Plot には、心拍数変動の現在量を示す楕円と共に、プロット上に、NN インターバルの平均を表示させるオプションがあります。短軸の長さは短期変動量を示し、長軸の長さは長期変動量を示します。長軸は、プロットの identityline に平行で、半短軸の長さ SD1 と半長軸の長さ SD2 は、次のように表されます。

$$SD1^2 = \frac{1}{2}SD\Delta NN^2$$

$$SD2^2 = 2SDNN^2 - \frac{1}{2}SD\Delta NN^2$$

SDNN と SD Δ NN は NN インターバルから算出され、Report ウィンドウやデータパッド統計で表示させることができます。

4-4 HRV スペクトラム

身体的な現象は、時間、もしくは、その逆数である周波数の観点から説明することが出来ます。時間的領域、もしくは、周波数的領域において現象を表す関数は、実質的には同じもので、線形変換によって切り替えることができます。HRV スペクトラム演算は、RR インターバル変動の決定において、どの周波数が優勢かを示すのに役立ちます。

スペクトラム NN インターバル

HRV スペクトラム演算では、まず、演算に用いるスペクトラム NN インターバル群を作成します。スペクトラム NN インターバルは、Artifact インターバルが破棄されずに近傍の Normal インターバルで補間される点以外は、NN インターバルと同じです。すなわち、

- 全ての Normal インターバルは、含まれます。
- Ectopics インターバルは、Analysis Settings ダイアログ内で解析に含まれる場合でも、そうでない場合でも、近傍の Normal インターバルで補間されます。
- Artifact インターバルは、近傍の Normal インターバルで補間されます (これらは、除外された Ectopic として扱われます)。

14 ページの表記を用いると、次のインターバル群は、以下のように変換されます。

```
| N | A | N | ⇒ | N | I | N | |
| A | N | N | N | ⇒ | N | N | N |
| N | A | E | N | - | A | N |
⇒ | N | I | I | N | - | N | (Ectopic は除外されたと仮定)
```

スペクトラム NN インターバルは、Spectrum ウィンドウや Report ウィンドウ内の全てのスペクトラム統計データの算出に用いられます。スペクトラム NN インターバルは、HRV > Export Spectrum NN Intervals... を選択することで出力することができます。

再サンプリング

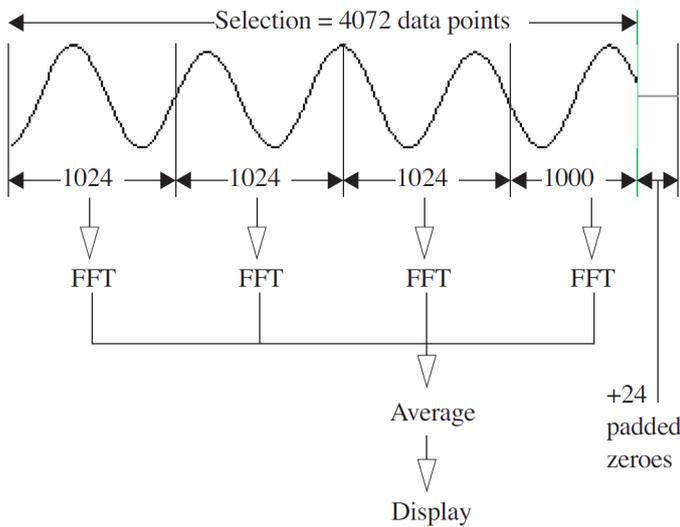
スペクトラム NN インターバルは、離散サンプル群に変換されます。このために、まず、平均スペクトラム NN インターバルが算出されます。次に、インターバル群を離散的に表示するために、そのインターバルで、スペクトラム NN インターバルは内部的に再サンプリング処理されます。最後に、DC 周波数成分を取り除くために、それぞれの再サンプリングされた値から平均スペクトラム NN インターバルを差し引きます。

再サンプリングには様々な方法がありますが、HRV モジュールでは、その中で最も簡単なものの一つを用いています。(20 ページのリファレンス 4 をご参照下さい。) より洗練された方法が必ずしも良い結果をもたらすとは限りません。

スペクトラム演算

スペクトラム演算は、3つのステージから成っています。

1. HRV 解析領域内の各ブロック (全体でも、一部分でも) は、(Analysis Settings ダイアログ内で設定された FFT size によるサイズで) セグメントに分割されます。高速フーリエ解析を用いて、ブロックの各セグメントに対して、スペクトラムが算出されます。
2. 各ブロックのスペクトラムは、全てのセグメントに対するスペクトラムから加重平均して算出され、各セグメントに対する窓関数 (windowing function) のパワーに準じて補充され割り当てられます。(効果的な窓関数がない場合、セグメントに関連したサイズで加重処理されます)。平均することによって、大きな選択範囲に対するパワーの正確性が増します。
3. 解析範囲全てのスペクトラムは、ブロックのスペクトラムを平均 (加重平均) することで算出されます。各ブロックにおいて発生したスペクトラム NN インターバルの総数の割合に応じて加重されます。



データセグメント

HRV は、データポイント数で、データをセグメントに分割します。この FFT サイズは、Analysis Settings ダイアログに表示されます。解析領域のデータポイント数が、FFT サイズの整数倍で割り切れない場合は、余りはゼロ処理され、高速フーリエ変換が適応される前に、選択範囲の右側に付加されます。

HRV での FFT の実施

HRV は、スペクトラム NN インターバルの平均値によって設定された分散インターバルで、サンプリングします。一連の連続するスペクトラム NN インターバルのサンプル数を N とします。(簡単にするために) N を偶数とし、平均スペクトラム NN インターバルを Δ とした場合、関数 h_k を $h_k \equiv h(t_k)$ と定義します。ここで、 $t_k \equiv k \Delta$ はサンプル k 個とる時間、 k は配列 $0, 1, 2, \dots, N-1$ です。サンプリングされた NN インターバルが、波形全体を反映している、すなわち、NN インターバル変動にはなんらかの周期性があると仮定します。これらの N 分散スペクトラム NN インターバル数は、まず、各数から Δ を差し引くことで、「detrended 緩和処理」します (これにより、DC 成分を除去します)。次に、FFT が緩和処理したスペクトラム NN インターバル数を N 分散サンプル数に周波数変換し、 H 周波数振幅を持たせます。周波数は、離散値 $f_n = n / (N \Delta)$ を割り当てることができます。

ここで、 n は配列 $-N/2, \dots, (N/2)-1$ です。 N ポイントの分散フーリエ変換部 $h_k - \Delta$ は、以下のように定義できます。

$$H_n \equiv \sum_{k=0}^{N-1} (h_k - \Delta) e^{2\pi i k n / N}$$

この変換では、 N 複素数 $h_k - \Delta$ を N 複素数 H_n に移します。(例えば HRV で扱うような身体的な事象からデータを計る場合は、 h_k の虚数部はゼロと想定して実数として扱います。) H_n は周波数の変数で、横軸は $1 / \Delta$ の単位で読み取る周期を表します。 $n = 0$ で周波数はゼロに、 $1 \leq n \leq N/2-1$ で周波数は正になります。 n がゼロ以外の時は $H_{-n} = H_{N-n}$ で表されるこの関数は、対称性で、かつ、周期性を示します。

真の n 番目の周波数成分と仮定の周波数成分を各々、 $\text{Re}(H_n)$ と $\text{Im}(H_n)$ とすると、 n 番目の周波数成分 $P(n)$ は以下のように表されます。

$$P(n) = \frac{(\text{Re}(H_n))^2 + \text{Im}(H_n)^2}{N^2}$$

正と負の周波数成分を加えた $p(m)$ は、 m 番目のスペクトラム周波数成分です。

$$p(0) = P(0)$$

$$p(m) = P(m) + P(N - m) \quad 0 < m < \frac{N}{2}$$

$$p\left(\frac{N}{2}\right) = P\left(\frac{N}{2}\right)$$

HRV スペクトラムでは、 $p(m)$ は ms^2 の単位で表されます。縦軸はまた、PSD (パワースペクトラム密度 power spectral density) として ms^2/Hz の単位で表されます。PSD (パワースペクトラム密度) 以下のように演算されます。

$$PSD = \frac{p(m)}{\text{binwidth}}$$

ここで、ビン幅は Hz で測定されます。周波数変数の分解能 (ビン幅) は、平均スペクトラム NN インターバルの逆数 $1 / \Delta$ とスペクトラム NN インターバルの数 N に依存します。 N の数を大きくするとスペクトラムの予測に誤差が増します。 N の数を小さくすると、スペクトラムの予測の精度は増しますが、周波数の分解能は下がります。

窓関数 Windowing Functions

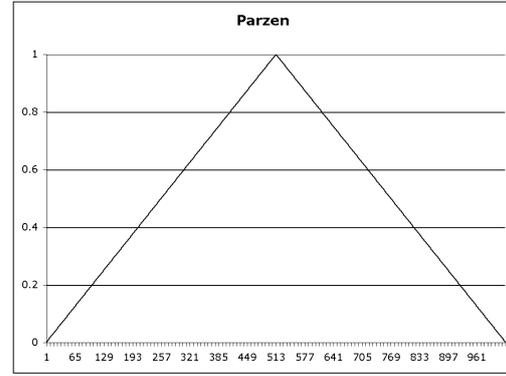
FFT では、実際に入力データセグメントをフーリエ変換しているわけではなく、無限に長い周期性の波形をフーリエ変換します。その結果、入力データセグメントは不断に反復すると仮定します。一般的に、この周期性波形は真の入力波形とは良い類似性を示しません。例えば、入力データセグメントの始点と終点がうまくつながらないと、周期性波形にはズレが生じ、その結果、スペクトラムに疑似スパイクが生じてしまいます。窓関数 (Windowing functions) は、データセグメントの端を平滑化処理してこのような疑似ピークをゼロ処理したり、周波数変域の分解能を向上させます。窓関数を使うと、オリジナルデータに窓関数 $w(k)$ が乗じられて加重処理処理されます。

$$H_n \equiv \frac{1}{w_{av}} \sum_{k=0}^{N-1} w(k) h_k e^{2\pi i k n / N}$$

HRV スペクトラムでは、4 種類の窓関数 Cosine、Hann、Parzen、Welch を用いることができます。Welch 窓は、LabChart の Spectrum ウィンドウでも用いられています。窓関数で減衰が認められれば、それを補正するのに、全パワー値 $P(n)$ に換算係数をかけます。

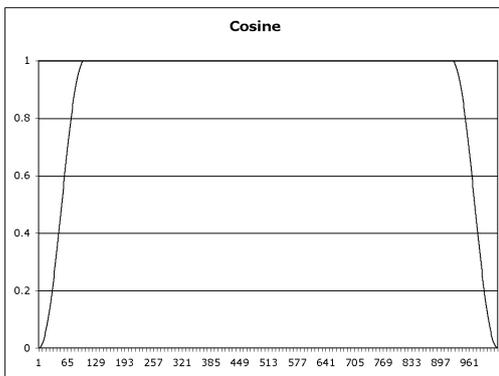
$$\frac{N}{\sum_k w(k)^2}$$

窓関数が真のデータに導入されると、ゼロ処理されるデータセグメントは、FFT びフルサイズの幅に合わせて調整されます。窓関数は、ブロックの各データセグメントに対するスペクトラムの加重平均を決定する際にも用いられます。前述したように、各スペクトラムは選択した窓関数のパワーを使い、そのデータセグメント全体を加重処理します。(窓関数のパワーはデータセグメント全体の窓関数値の二乗の総計です)。データセグメントが FFT サイズより小さい場合、ゼロ処理する前に窓関数がデータセグメントを水平方向に圧縮させて調整します。したがって、FFT サイズより小さいデータセグメントはわずかな加重処理しか受けません。



$$w(k) = 1 - \left| \frac{k - 0.5(N-1)}{0.5(N+1)} \right|$$

$$k = 0, 1, \dots, N-1$$



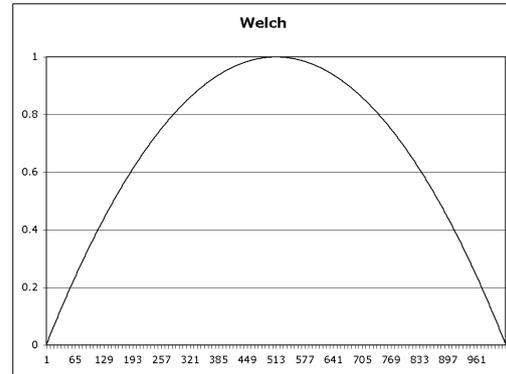
$$w(k) = 0.5 + 0.5 \cos\left(\pi - \frac{\pi k}{m}\right)$$

$$\text{for } k = 0, 1, \dots, m-1$$

$$w(k) = 1, \text{ for } k = m, \dots, N-m$$

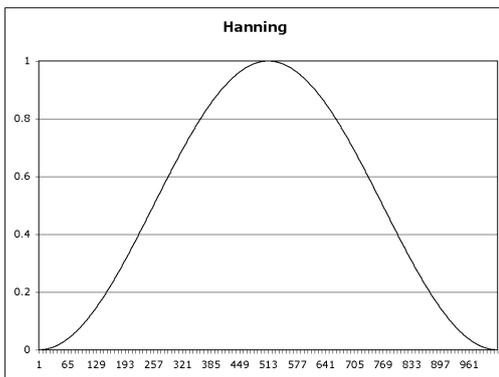
$$w(k) = 0.5 - 0.5 \cos\left(\pi - \frac{\pi(N-k)}{m}\right)$$

$$\text{for } k = N-m+1, \dots, N-1$$



$$w(k) = 1 - \left(\frac{k - 0.5(N-1)}{0.5(N+1)} \right)^2$$

$$k = 0, 1, \dots, N-1$$



$$w(k) = 0.5 - 0.5 \cos \frac{2\pi k}{N-1}$$

$$k = 0, 1, \dots, N-1$$

5

パラメータ

Report ウィンドウで表示可能なパラメータは、データパッドにおいても表示することができます。

- **Filename.** 現在の解析を含むファイルの名前。
- **Channel.** 現在の解析を含むチャンネル。
- **Date.** 最後に算出した統計データの日時。
- **Start Time.** 現在の解析領域の始点の時間。
- **End Time.** 現在の解析領域の終点の時間。
- **Name.** 被験者の名前。
- **Gender.** 被験者の性別。
- **Age.** 被験者の年齢。
- **Total Beats.** 現在の解析領域における、検出された R 波の数。
- **Intervals.** 現在の解析領域における、NN インターバルの数。
- **Ectopics Excluded.** 現在の解析領域において、Ectopics を除外する場合は「TRUE」、そうでない場合は「FALSE」と表示されます。
- **Length.** 現在の解析領域の持続時間 (duration) :
EndTime – Start Time
- **Artifact Short.** Short Artifacts として RR インターバルを分類するためのカットオフインターバル。
- **Ectopic Short.** Short Ectopics として RR インターバルを分類するためのカットオフインターバル。
- **Ectopic Long.** Long Ectopics として RR インターバルを分類するためのカットオフインターバル。
- **Artifact Long.** Long Artifacts として RR インターバルを分類するためのカットオフインターバル。
- **Discontinuities.** 現在の解析領域における、ブロック境界線の数。
- **Manually Inserted Beats.** 現在の解析領域において、手動で挿入したビート (R 波) の数。
- **Manually Deleted Beats.** 現在の解析領域から、手動で除去されたビート (Short Artifacts) の数。
- **Maximum NN Interval.** 現在の解析範囲における、最も長い NN インターバルの持続時間 (duration)。
- **Minimum NN Interval.** 現在の解析範囲における、最も短い NN インターバルの持続時間 (duration)。
- **NN Range.** 現在の解析領域における、NN インターバルの最大値と最小値の差。
- **Mean NN Interval.** 現在の解析領域における、NN インターバルの平均値 : 60 000/Mean NN
- **Median NN Interval.** 現在の解析領域における、NN インターバルの中央値。
- **Average Heart Rate.** 現在の解析領域における、平均心拍数。
- **SDNN.** 現在の解析領域における、NN インターバルの標準偏差。
- **SD Delta NN.** 隣接する NN インターバル間の差の標準偏差。
- **Ratio.** 現在の解析領域における SDNN / SD Delta NN の比。
- **RMSSD.** 隣接する NN インターバル間の差を二乗したものの平均値の平方根。
- **Normals.** 現在の解析領域における、Normal として分類された RR インターバルの数。
- **Normals %.** 現在の解析領域における、Normal として分類された RR インターバルの割合。
- **Ectopics.** 現在の解析領域における、Ectopic として分類された RR インターバルの数。
- **Ectopics %.** 現在の解析領域における、Ectopic として分類された RR インターバルの割合。
- **Artifacts.** 現在の解析領域における、Artifact として分類された RR インターバルの数。
- **Artifacts %.** 現在の解析領域における、Artifact として分類された RR インターバルの割合。
- **XX.** 隣接した NN インターバル間の「大きい (Large)」差を定義する数値。
- **NNXX.** 隣接する NN インターバルの差が、ユーザ設定された XX 以上のもののペア数。
- **NNXX%.** 隣接する NN インターバルの差が、ユーザ設定された XX 以上のもののペアの割合。
- **Spectrum Intervals.** 現在の解析領域におけるスペクトラム演算に用いられたスペクトラム NN インターバルの数。
- **Spectrum NN Mean.** 現在の解析領域におけるスペクトラム演算に用いられたスペクトラム NN インターバルの平均値。
- **Total Power.** 現在の解析領域におけるスペクトラムのトータルパワー。
- **VLF Upper Bound.** 現在の解析領域におけるスペクトラムの超長波 (Very Low Frequency) 帯域の上限。
- **VLF Power.** 現在の解析領域におけるスペクトラムの超長波 (Very Low Frequency) 帯域のパワー。
- **LF Upper Bound.** 現在の解析領域におけるスペクトラムの低周波 (Low Frequency) 帯域の上限。
- **LF Power.** 現在の解析領域におけるスペクトラムの低周波 (Low Frequency) 帯域のパワー。
- **LF Power (nu).** 現在の解析領域における、低周波 (Low Frequency) 帯域の正規化された単位 (Normalized units) でのパワー。
Power in normalized units nu =
(絶対パワー x 100 / (トータルパワー – VLF パワー))
- **HF Upper Bound.** 現在の解析領域におけるスペクトラムの高周波 (High Frequency) 帯域の上限。
- **HF Power.** 現在の解析領域におけるスペクトラムの高周波 (High Frequency) 帯域のパワー。

- **HF Power (nu).** 現在の解析領域における、高周波 (High Frequency) 帯域の正規化された単位 (Normalized units) でのパワー。

Power in normalized units nu =

(絶対パワー x 100 / (トータルパワー - VLF パワー))

- **LF Power/HF Power.** 現在の解析領域におけるスペクトラムの低周波 (LF) のパワーを、高周波 (HF) のパワーで割った値。

6

リファレンス

1. B.M. Sayers, 'Analysis of heart rate variability' *Ergonomics* 16:17-32 (1993).
2. B.W. Hyndman and R.K. Mohn, 'A pulse modulator model of pacemaker activity' in *Digest of the 10th International Conference on Medical and Biological Engineering*, Dresden, p 223 (1973).
3. P.W. Kamen and A.M. Tonkin, 'Application of the Poincaré plot to heart period variability: a new measure of functional status in heart failure' *Australia and New Zealand Journal of Medicine* 25:18-26 (1995).
4. 'Computers in Cardiology' London UK. IEEE Computer Society Press (Sept. 5-8, 1993). See especially articles beginning pages 13, 269, 313, 447, 467, 543, 715 and 719.
5. M. Malik and A.J. Camm (eds), 'Heart Rate Variability' Futura Publishing (1995).
6. Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology, 'Heart Rate Variability. Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use' *Circulation* 93: 1043-1065 (1996).
7. W.H. Press and G.B. Rybicki, 'Fast algorithm for spectral analysis of unevenly sampled data' *Astrophysical Journal* 338: 277-280 (1989).
8. R.D. Berger, S. Akselrod, D. Gordon and R.J. Cohen, 'An efficient algorithm for Spectral Analysis of Heart Rate Variability' *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* BME 33 (1986).
9. M. Brennan, M. Palaniswami and P. Kamen, 'Do existing measures of Poincaré plot geometry reflect nonlinear features of heart rate variability?' *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* Vol. 48, No. 11 (2001).