

超音波帯域（ネコ、コウモリ）ピリオドグラム解析装置^{*†}



概要

何も聞こえないのに、壁や天井に向かって様子をうかがうネコには何か聞こえるらしい、ということでネコ可聴周波数帯域のピリオドグラムを表示する装置を検討試作しました。

ピリオドグラムはパワースペクトル（密度関数）の推定量です。装置としてはFFTアナライザーの簡易版です。ネコの他、コウモリの超音波帯域も似た感じです。

さらに、中年オヤジがツマヨウジを使う際、高音圧超音波を発生する事例も観測できる、、観測したところでどうしようもないけど。

目次

1	目的	2	3.2	AD 変換	4
2	ハードウェア	2	3.3	窓関数	4
2.1	超音波センサ	2	3.4	FFT	5
2.2	センサアンプ	3	3.5	センサ感度補正	5
2.3	マイコン	4	3.6	表示	5
3	ソフトウェア	4	4	設定	6
3.1	処理内容	4	5	資料	7
			5.1	回路図	7
			5.2	シリアル通信コマンド	9
			5.3	マルチタスク	9

* Ver1.00 新規公開 2015/02/22（ネコの日）

† Ver1.01 誤記訂正 2015/03/02（32dot → 16dot）

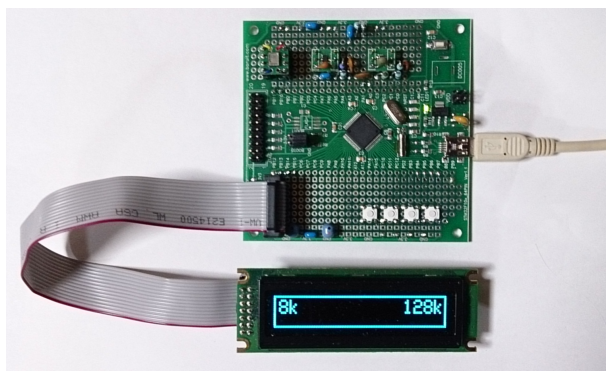
‡ <http://homepage2.nifty.com/yees/>

1 目的

何も聞こえないのに、壁や天井に向かって様子をうかがうネコには何か聞こえるらしいということで、ネコの可聴周波数帯域ピリオドグラムを表示する装置を検討試作しました。

コウモリの超音波を観察するバットデテクターといった装置を調査したところ、ミキサー（アナログ乗算器）による周波数変換を行うものでした。ミキサーはアナログ乗算 IC やトランス使用 DBM を使ったものがありました。アナログ信号処理を簡易にしたいアナログ SW あるいは J F E T 使用の同期検波も検討しましたが、マイコンで A D 変換して直接 F F T 計算したほうがアナログ回路が簡単になるのでは、という考えかたです。

2 ハードウェア



マイコンボード（Cixi Borui Electronic Technology Co.,Ltd 製）のユニバーサル部に超音波センサ、センサアンプ（オペアンプ×2）を組み付け動作確認。

図 1 試験基板

超音波センサ出力を増幅後、A D 変換しデジタル処理します。

アンチエイリアスフィルタは無く、想定周波数を超える超音波については、ピリオドグラム上折り返します。

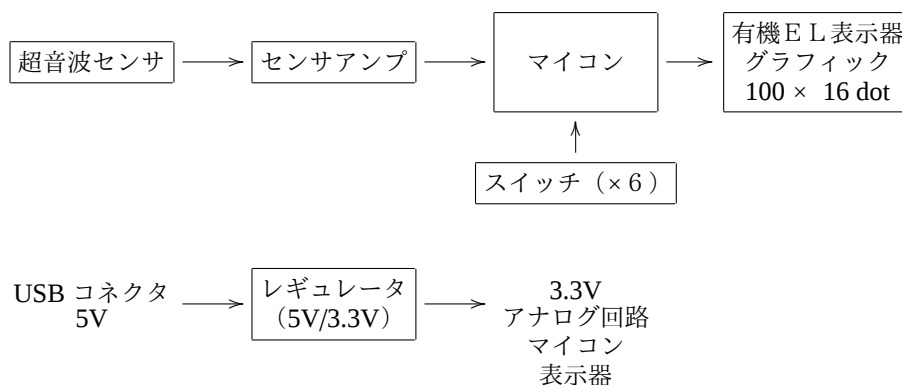


図 2 構成概略

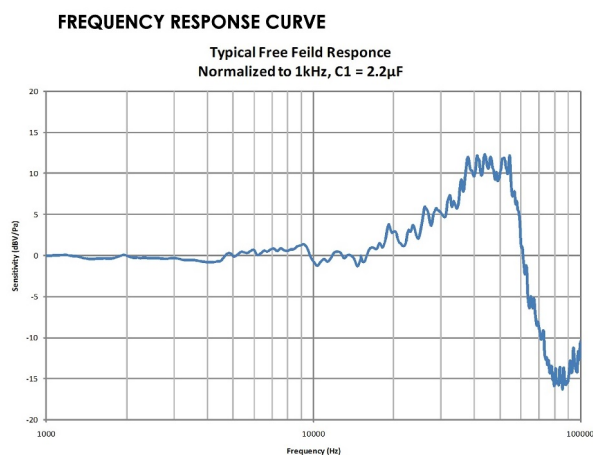
2.1 超音波センサ

ACOUSTIC & ELECTRICAL SPECIFICATIONS

TEST CONDITIONS: +20°C, 60-70% R.H.

	Symbol	Condition	Limits			Unit
			Min.	Nom.	Max.	
Directivity		Omni-directional	—	—	—	
Sensitivity	S	@ 1kHz (0dB-1V/Pa)	-46	-42	-38	dB
Output Impedance	Z _{OUT}	@ 1kHz (0dB-1V/Pa)	—	—	300	Ω
Current Consumption	I _{DD}	Across 1.5 to 3.6 volts	—	—	250	μA
Signal to Noise Ratio	S/N	@ 1kHz (0dB-1V/Pa)	—	59	—	dB
Supply Voltage	V _S		1.5	—	3.6	V
Sensitivity Loss Across Voltage		Change in sensitivity over 3.6V to 1.5V	No Change Across Voltage Range			dB
Maximum Input Sound Level		At 100dB SPL, THD < 1% At 115dB SPL, THD ≤ 10%				

図 3 SPM0404UD5 データシート抜粋（1 / 2）



超音波センサは 10kHz～60kHz 対応の超音波マイクロホンを使用。

回路に組み込んだ状態でノイズフロアを観測すると図 4 とほぼ一致しました。

図 4 SPM0404UD5 データシート抜粋（2 / 2）

センサ出力を増幅してオシロ観察すると、100kHz を超える領域でも十分感度があり、感度補正を行えば目安程度のスペクトル観測ができるのでは、、ということで試験検討したところ、共振点 62kHz 近傍では、線形に感度補正するのは困難でした。（62kHz 近傍では、音波入力の有無に関わらずほぼ一定の出力がある）

図 5、図 6 表示電圧範囲：-20dBVolt～-60dBVolt / 表示周波数範囲：8kHz～128kHz
 （実際の補正については、ソフトウェア「補正」参。）



図 5 ノイズフロア（補正無し）



図 6 ノイズフロア（補正有り）

2.2 センサアンプ

広帯域、フルスイングオペアンプによる 2 段 AC アンプです。位相・ゲイン余裕が小さかったので発振防止、また、有機 EL 表示器搭載 DC-DC コンバータのスイッチングノイズの影響低減のための処置を行っています。

メーカー型番	NJU77701
利得帯域幅積	34MHz typ.
スルーレート	35V/us typ.
入力換算雑音電圧	6nV/√ Hz typ. at f=1kHz
入力オフセット電圧	1.5mV max
オフセット電圧ドリフト	3.0uV/°C max.
動作電圧範囲	+2.4V to +5.5V
入出力	フルスイング

表 1 使用オペアンプ

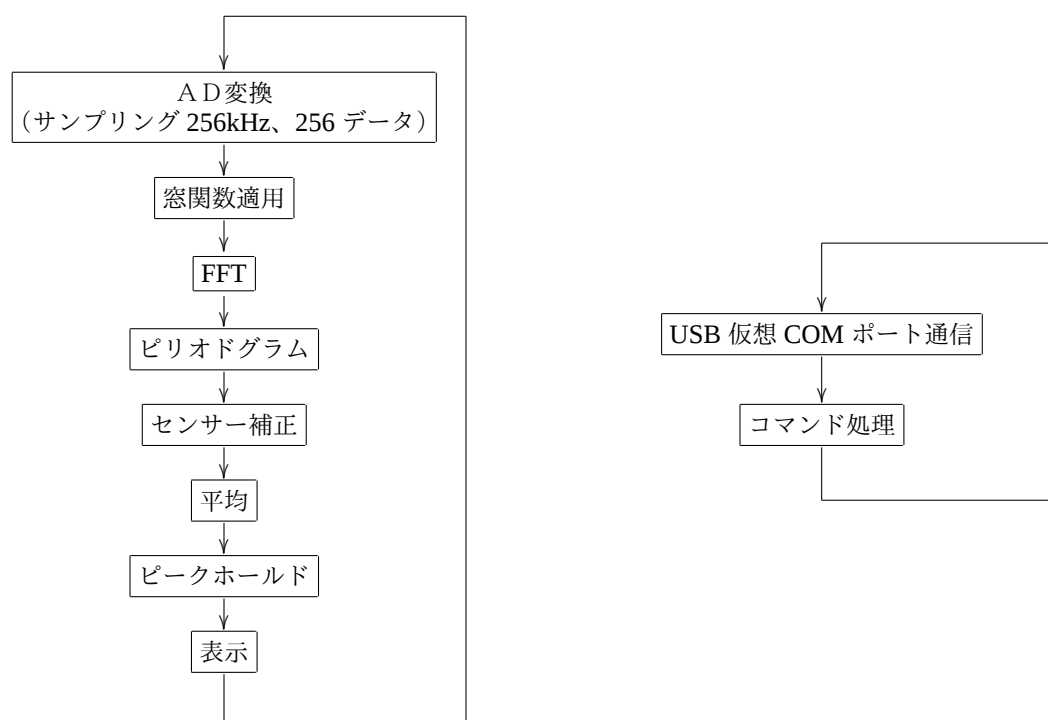
2.3 マイコン

メーカー型番	STM32F103RCT6
コアプロセッサ	32 ビット ARM Cortex-M3
最大動作周波数	72MHz（使用システムクロック 72MHz）
動作電圧範囲	2～3.6V
ROM	256K バイト
RAM	48K バイト

表 2 使用マイコン

3 ソフトウェア

3.1 処理 内容



実際のプログラムは、簡易マルチタスク処理（OS無）を行っています。
上図の処理とおりのループ構造ではありません。

3.2 AD 変換

AD 変換はマイコン内蔵の 12bit のもので、リファレンス電圧はマイコン電源 3.3V です。
AD 変換起動トリガーはタイマーで発生しています。
AD 変換データは DMA 転送しています。転送先として 256word のバッファを 2 つ用意し、FFT 計算に使用していないバッファに転送しています。

3.3 窓関数

デフォルトで *Blackman* を使用します。その他、矩形（窓関数無）、*hanning*、*hamming* が選択可能です。

3.4 FFT

FFT単体は16bit、256ポイント計算で、実行時間は470μsec程度（実行中ポートにH出力し実測）です。オフセット減算、窓関数乗算、感度補正、各スペクトルの時間移動平均を含め、10ms毎にピリオドグラムを計算しています。

ピリオドグラムは、FFT結果のcos成分sin成分から直接計算しています。自己相関関数計算は行っていません。（ウィーナー＝ヒンチンの定理）

また、ウェルチの手法による誤差低減も行っていません。今回最小ハードウェアが目的で、採用すると表示更新周期が大きくなります。そのかわり各スペクトルの時間移動平均を計算しています。（実際は、IIR デジタルフィルタ）

3.5 センサ感度補正

センサー特性詳細を計測する装置はありません。以下の仮定のもと感度補正を行っています。

■予備試験

センサーをできる限り遮音し、ノイズのFFT結果を観察した。結果ノイズのパワースペクトルは、データシートの音圧／周波数応答（図4）とよく似ていた。

センサーに音圧入力が無くても周波数応答が似ているので、センサー内部のバッファの特性が支配的と仮定する。また、バッファ入力ノイズは白色雑音と仮定する。

■各周波数成分の補正值

各周波数成分の補正值をあらかじめ決定してROMに持つのは面倒なので、FFT計算のたびに、各スペクトルの長時間にわたる時間移動平均を行う。音波入力が無ければノイズのパワースペクトルそのものであり、それをセンサーの音圧／周波数応答特性として補正に使用する。ノイズのパワースペクトルが平坦となるよう各スペクトルを補正する係数を決定している。（FFT計算毎）

■共振点の補正

上記補正では共振点で不安定です。データシートの音圧／周波数応答（図4）の測定条件詳細は不明ですが、使用状態でFFT処理を行うと、ずっと共振Qが大いような感じで、狭い範囲にピークが発生します。実測62kHz ± 1kHzでヒゲ状（窓関数：Blackman および矩形で確認）です。

プログラムの実際は、ピリオドグラムにヒゲ状（3kHz未満幅）要素が発生したら取り除き、その近傍の平均値で埋める処理を行っています。

3.6 表示

■ピークホールド

各スペクトルはピークホールドし、ゆっくり減衰するよう表示しています。

■表示更新しきい値

「表示更新しきい値」を設定することでチラツキを防止しています。

「表示更新しきい値」を「表示電圧範囲ボトム」と同じ値に設定すると算出の都度更新します。

■その他

有機EL表示器はグラフィックタイプで、フォントはドット描画です。プログラムソースは美咲フォント対応ですが、今回美咲フォントは使用していません。

4 設定

基板上のスイッチ操作で設定変更できる項目は、以下のとおりです。

<1> FREQ START
8kHz

図 7 <1> 表示周波数範囲スタート

<2> FREQ STOP
128kHz

図 8 <2> 表示周波数範囲ストップ

<3> REF TOP
-20dBV

図 9 <3> 表示電圧範囲トップ

<4> REF BOTTOM
-48dBV

図 10 <4> 表示電圧範囲ボトム

<5> REF THRESH
-43dBV

図 11 <5> 表示更新しきい値

<6> PEAK HOLD
ON

図 12 <6> ピークホールド ON/OFF

<7> WINDOW FUNC
BLACKMAN

図 13 <7> 窓関数選択

<8> DISP FREQ
RANGE

図 14 <8> 周波数範囲の数値表示
ON/OFF

<9> DISP REF
OFF

図 15 <9> 電圧範囲の数値表示
ON/OFF

<10> SENSOR COMP.
ON

図 16 <10> 超音波センサー感度
補正 ON/OFF

5 資料

5.1 回路図

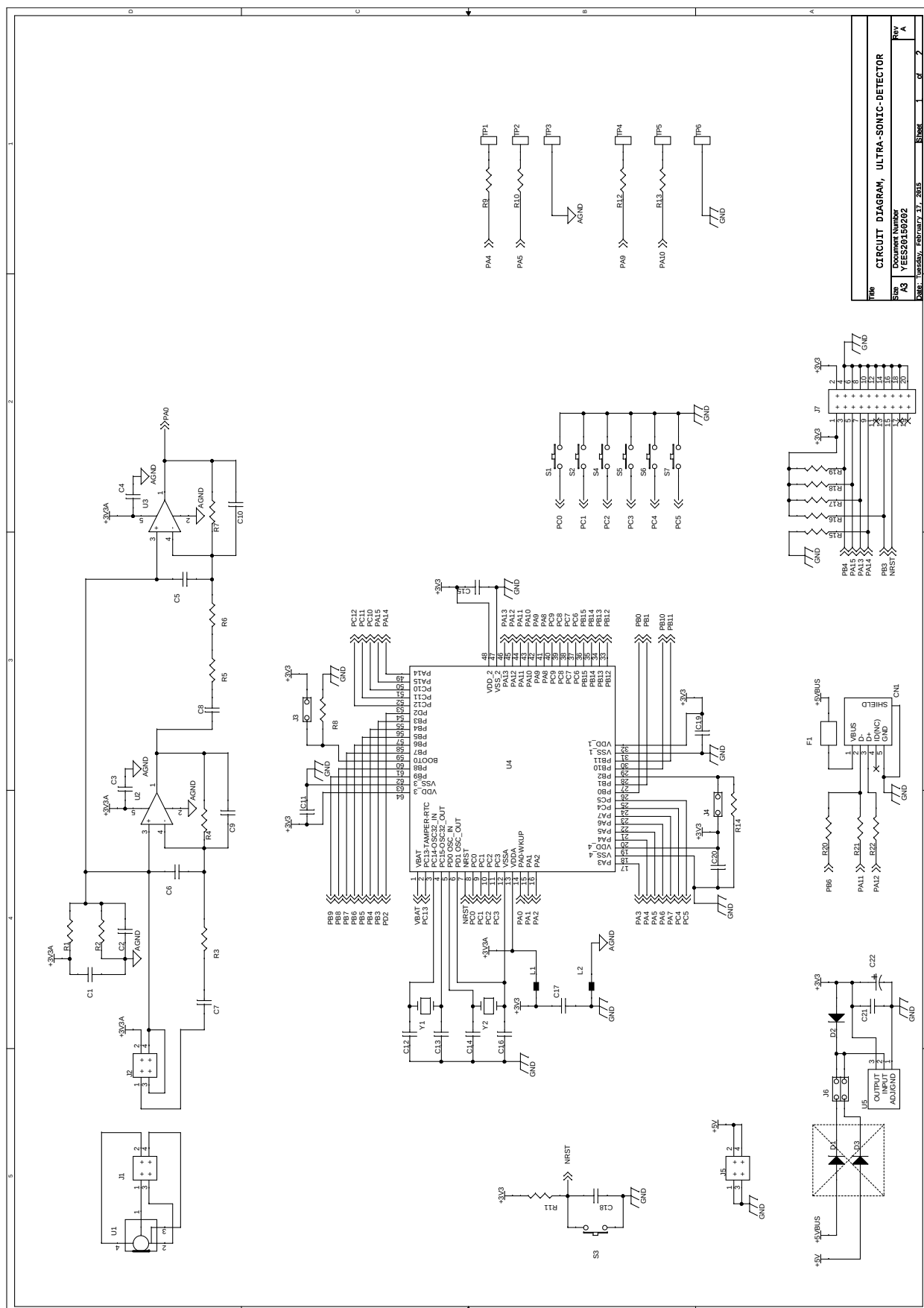
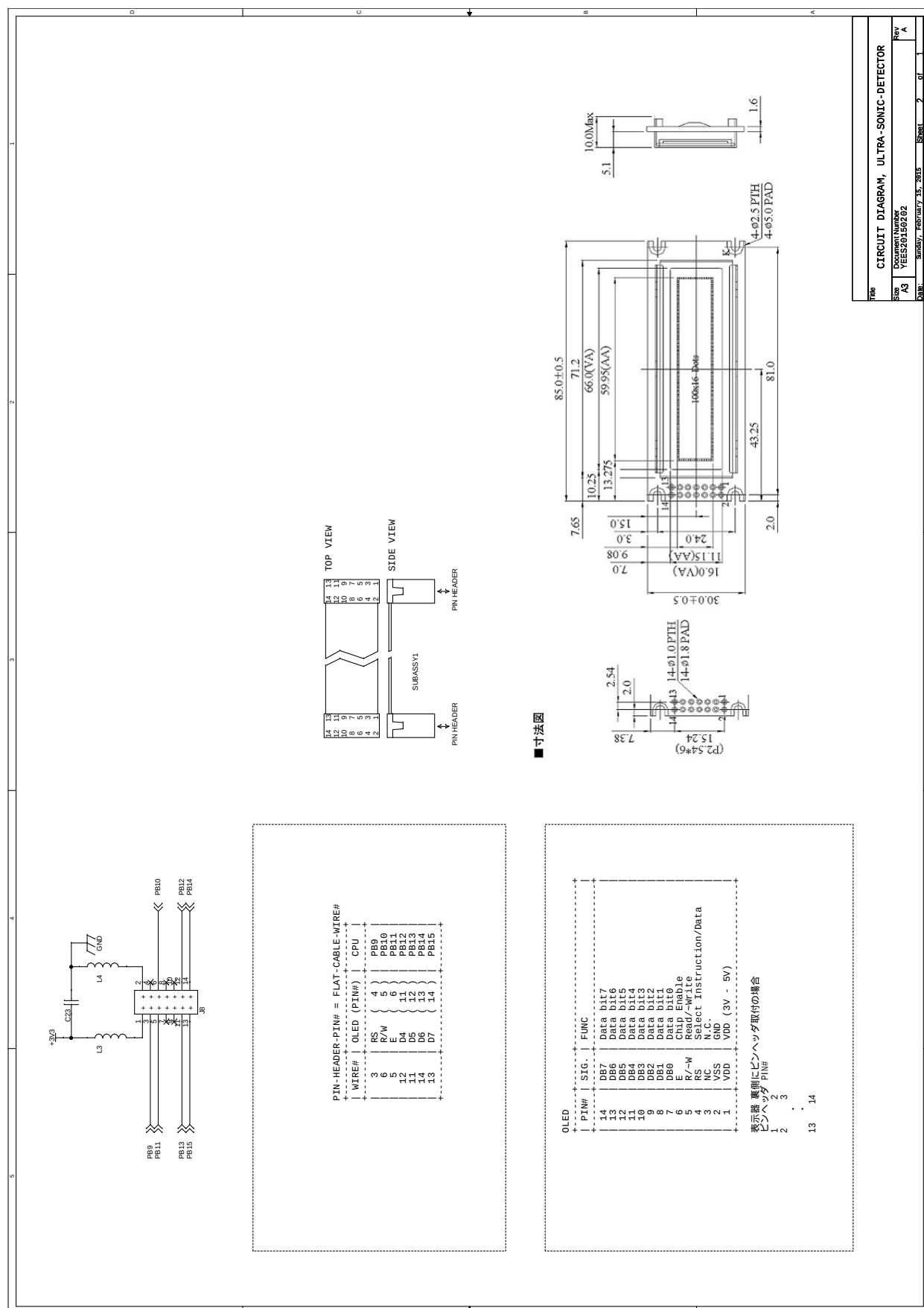


图17 回路图(1/2)



5.2 シリアル通信コマンド

USB 仮想COMポートの使用には、STMicro 社 VCP ドライバのダウンロード／インストールが必要です。

デバッグ用コマンド

H	ヘルプ 1
HH	ヘルプ 2
CL	Clear Screen (VT100)
SF f	ADC サンプリング周波数 fs[Hz]
DF f	DAC out f[Hz]
T	経過時間 確認
A	ADC 最新データ
W	波形メモリ データ
F	FFT データ
D	内部変数
P b e	ヒストグラム (FFT) b:開始 f[Hz] e:終了 f[Hz] $0 \leq b, e \leq (fs/2)$
TL r	Set Tresh(LIN) $0 \leq r \leq 4095$
TG f	Set Tresh(LOG) $-80.0 \leq r \leq 0.0$
CM n	Sensor Compensation n=0:OFF, 1:ON
WC f	Set Weight Compensation $0.0 \leq f \leq 1.0$
PH f	Peak Hold f:decay factor $0.0 \leq f \leq 1.0$
MA f	Moving Average $0.0 \leq f \leq 1.0$
V	Version
GF b e	Graphic Range b:f[Hz] to e:f[Hz] $0 \leq b < e \leq (fs/2)$
SC n	Scale LIN or LOG n=0:LIN, 1:LOG
RE m n	REF of Scale-LOG m:REFmax n:REFmin $-80.0 \leq m < e \leq 10.0$ $-80.0 \leq n < e \leq 0.0$

マルチタスク動作確認用コマンド

H	ヘルプ 1
HH	ヘルプ 2
CL	Clear Screen (VT100)
ST	スタック確認
TS	タスク周期 実行回数 (開始時 計測値リセット) (1000ms 繰り返し)
BR	BREAK MULTI-TASK
RS	RESTART MULTI-TASK

5.3 マルチタスク

一般的な組み込み用マルチタスク処理と同様、*sleep(time)* や *next()* でタスクを切り替えるものです。

各タスクごとにスタック領域を確保しておいて (プログラム上バイトデータの配列)、タスクの切り替えはサブルーチンコール／リターンの前にスタックポインタやその他レジスタを書き換えるようなものです。この切り替え管理はアセンブラで記述しています。ARM はリンクレジスタがあるのでやりやすい。

各タスクは専用のスタック領域を使って実行されますが、マイコンに適当なメモリアクセス制限機能が無いので、各タスク用のスタックがオーバーフローしていないか確認する処理を作成してあります。

スタック使用量確認

MAIN STACK ADRS: 2000F800-2000FFFF				
MAIN STACK SIZE: 00000800				
MAIN STACK USED: 0000011C(284)				
ID	USED	SIZE	ADRS	
00	0364	2048	20002B8C	2000338B
01	0236	2048	20001554	20001D53
02	0252	2048	2000338C	20003B8B
03	0236	2048	20000D54	20001553
04	0228	2048	20001D54	20002553

タスク周期、実行時間確認

ID	周期 MIN	周期 MAX	回数
00	00000000	00000019	00100405
01	00001035	00001049	00000018
02	00000132	00000135	00000135
03	00000033	00000041	00000496
04	00000000	00000019	00100537