

高速 DAC に現れた「これはなんだ？」のスペリアス

著者: 石井 聡

はじめに

某月某日、某代理店の Nさんと超高速 DAC の AD9789 の評価ボードで遊んでみました。といっても…。

「N さん、『遊んでみました』だなんて、お仕事ですから不謹慎な表現でしたね。すいません」「あ、出てくるときに『今日はアナデバの石井さんと AD9789 で遊ぶみたいね!』と M さんに言われてきましたよ(笑)」「それは笑っていいやら、笑えないやらですねえ…(汗)」

高速 DAC AD9789 の実験開始

というやりとりから、AD9789 の基本動作とソフトウェアの使い方を理解するために、二人で実験を開始しました。第一の目的は Quick Start Guide に記載のある 120MHz の CW スペクトルを発生/測定するためです。

AD9789 は超高速 DAC で、max 2400MHz の DAC クロックで動作できます。QAM の信号処理 (ベースバンド信号処理) も可能で、ケーブル TV の通信規格である DOCSYS 3.0 というものに適合しています。製品ページの URL もご紹介しておきましょう。

<http://www.analog.com/jp/ad9789>

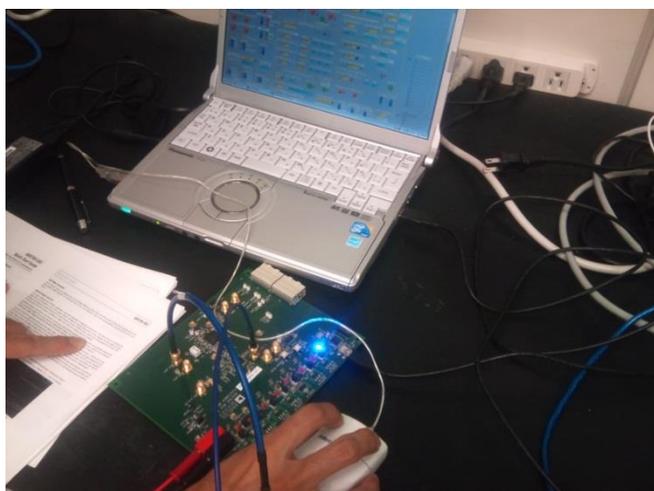


図 1. AD9789 の評価ボードで RF 信号 (DAC 出力) を測定するセットアップのようす

「これはなんだ？」の変なスペリアス

測定のセットアップしたようすを図 1 に、波形のようすを図 2 にそれぞれ示します。図 2 は二つの大きなスペクトルが見えますが、CENTER = 420MHz, SPAN = 1GHz というので、左側の大きなスペクトルは 0Hz の LO フィードスルー、右側の大きなスペクトルが本来の、AD9789 から出ている 120MHz の CW 信

号です。0Hz が管面上の左から 8% の位置に見えて、100MHz/DIV となりますので、20% (2 目盛り) のびったり上に 120MHz が見えています。

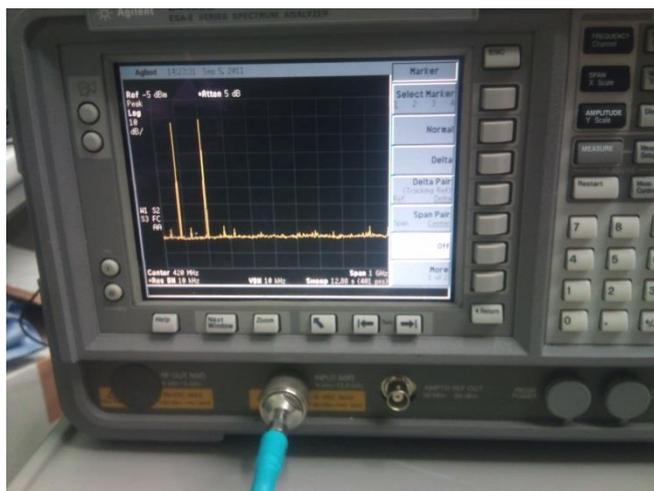


図 2. AD9789 から 120MHz の信号をスペアナで観測したようす。左は 0Hz ローカル・フィードスルー、右が 120MHz の信号 (CENTER = 420MHz, SPAN = 1GHz)

Quick Start Guide 記載のとおりスペクトルがだいたい得られたのですが、なぜか変な、小さいスペリアスが図 3 のように、120MHz の近傍に出ています。

- 120MHz キャリア上下の $\pm 76\text{MHz}$ のところに出ている
- 大体 $-50 \sim 60\text{dBc}$ (時変する)
- DAC 発生周波数を変えても $\pm 76\text{MHz}$ のところに出るのは変わらない
- DAC 自体のスペリアスであれば、発生周波数を変えれば出る周波数は変わってくるはず
- $f_{\text{DAC}} = 2\text{GHz}$ 、IC 内の前段デジタル回路はその 1/16 で動作。76MHz はそれらと整数関係にはない
- DAC 発生周波数を変えても同じ $\pm 76\text{MHz}$ であれば、出力自体がアナログ的に AM か FM で変調を受けている

ということで、外部からの混入だということは、目星はつけられませんでした。しかし、「東京タワーの近くとはいえ、FM 東京の 80.0MHz ではないしねえ…」と、某代理店の N さんと二人で「これはなんだろう？」と考えていました。そこへ通りかかった RF スペシャリストの H さんと K さん…

アナログ・デバイス株式会社は、提供する情報が正確で信頼できるものであることを期していますが、その情報の利用に関して、あるいは利用によって生じる第三者の特許やその他の権利の侵害に関して一切の責任を負いません。また、アナログ・デバイス社の特許または特許の権利の使用を明示的または暗示的に許諾するものでもありません。仕様は、予告なく変更される場合があります。本紙記載の商標および登録商標は、それぞれの所有者の財産です。
©2015 Analog Devices, Inc. All rights reserved.

Rev. 0

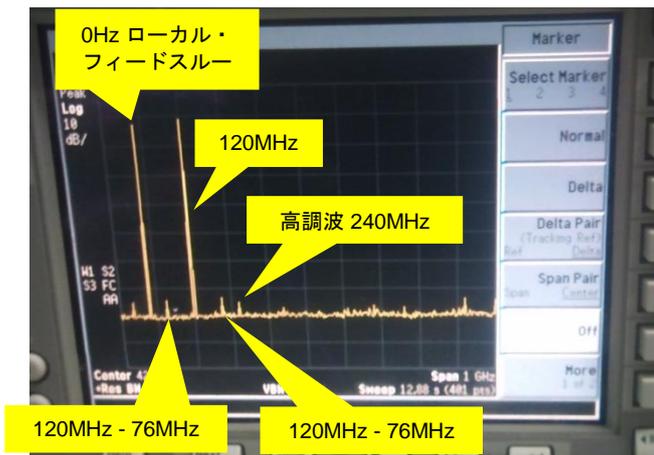


図 3. AD9789 からの 120MHz の信号の周辺±76MHz に小さいスプリアスが見える (図 2 を拡大したもの)

アナデバの RF スペシャリスト曰く

K さん曰く「FM 局によって送信アンテナの位置が異なるから受けるレベル (影響度) も変わってくるはず」なるほど…。

「76MHz かあ…」 FM 放送は滅多に聞かない私としては、思いを巡らせてみました。同じタイミングで「あ、インターFM! だ」と H さんと叫びました (笑) !

インターFM は滅多に聞かないし、今は DTS (Digital Tuning System…) の用語もすでに古いか…) なのでインターFM の周波数がいくつか記憶がありません。ネットでサーチしてみると「76.1MHz」。はっはあ…。

つづいて H さん、K さん、「スプリアスのところを拡大してどんな変調波が乗っているか見てみたら？」 たしかに…。ここまでは全域しか見ていないので、完全にこの視点が欠落していました (汗)。そうなんです。どんなスペクトル波形になっているか確認してみて、そのスペクトルで信号源が何かを突き止める…。これ、トラブルシュートで大事なんですよ…。

DAC 生成 (CW) 周波数 $120\text{MHz} - 76.1\text{MHz} = 43.9\text{MHz}$ のスプリアスのスペクトルを観測してみると、「おおおー！」 たしかに FM の音声変調波のスペクトルが観測されます！ スプリアスの中心周波数もこの計算で「ドンピシャ」です

どんなスペクトル波形になっているか確認してみた

この AD9789 を実験していた日は原因を見つけられたことに嬉々としていたため、この 43.9MHz のスプリアスのスペクトルは写真撮影やらキャプチャしていませんでした。これも「完全にこの視点が欠落していた」というところでしょうか。

後日、76.1MHz のインターFM の放送信号波自体をスペアナで観測してみたようすを、図 4 に示します。これはスペアナ前段にプリアンプを接続し、簡易的なアンテナからの信号を観測したものです。無線通信技術が良く分からなかった若いころ、ある人が「このスペクトルは AM だな」と言っていたのを「なんで判るの？」と思ったのですが、色々理解してくると「まあ、そりゃそうだ」というところに辿りつくわけなのでした。

FM は周波数変調波ですので、中心周波数の 76.1MHz が常時出ているわけではありません。音声アナログ信号情報に応じて、周波数が変化するわけですから、このように「フニャフニャ」したようなスペクトルになるのです。

このスペクトル変動のようすを見れば、「これは FM 波だ」と断定できるわけで、それにより「どんなスペクトル波形になっているか確認してみる」というアプローチから、そのスペクトル

ル形状から信号源が何かを突き止める…、というトラブルシュートができるわけなのです。

インターFM は FM 変調波ですので、RBW (Resolution Bandwidth; スペアナの分解能帯域幅) を狭くして測定するとレベルが変動して見えることになります。それが先に記載したように「大体 -50 ~ 60dBc (時変する)」の原因なわけです。

実験した当時は「東京タワー」。FM 放送の今は？

当時は、東京スカイツリーは開業 (運用) 前だったので、送信局は東京タワーというわけでした。といっても Wikipedia によると、FM 局のうちスカイツリーに移動したのは NHK-FM や J-WAVE で、インターFM は今でも東京タワーからの送出になっているようですね。

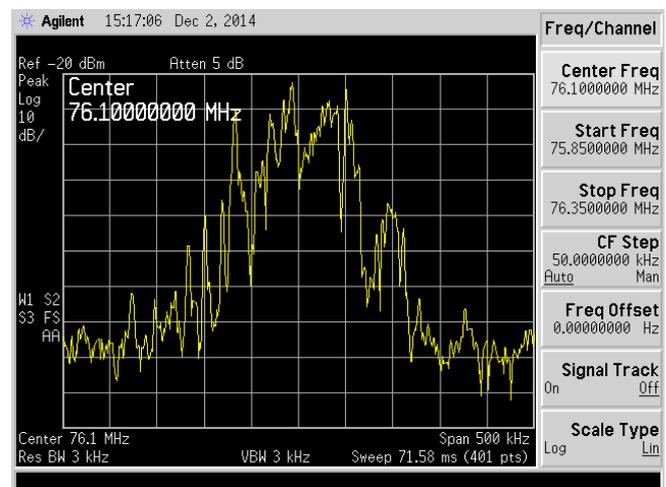


図 4. 76.1MHz のインターFM の放送波自体をスペアナで観測してみた (スパン 500kHz、22dB のプリアンプ接続)。中心のキャリアというものは見えない

「これはなんだ？」の原因の考察

さて、ひきつづいてこの「キャリアを中心とした上下に FM 放送波の周波数に相当するオフセットでスプリアスが見える」というしくみについて考察してみたいと思います。

ここでは二つのしくみが考えられると思います。ひとつはコモンモード信号 (ノイズ) によるもの、もうひとつは磁界ピックアップによるものです。

コモンモード電圧とは何モノ？

ひとつめのしくみはインターFM の 76.1MHz の東京タワーから直撃の強電界がコモンモード電圧として重畳し、これがコモンモード・ノーマルモード変換により、回路側に影響をあたえ、DAC 生成周波数 120MHz に (インターFM のキャリアが) 変調を与えていた、という考えです。

この「コモンモード電圧」とは、図 5 に示すように考えることができます。

ここでは二つの回路基板 (もしくはブロック) があるものとして記載しています。二つのブロックのグラウンド間は、一応は接続されていますが、強固なものではなく、抵抗成分やら、インダクタンス成分があるモデルです。たとえば細いケーブルで二つのブロックが接続されているようであれば、それこそその細いケーブルがインダクタンスとなり、二つのブロック間を接続していることになります。

これにより二つのグラウンド間に電圧差が生じそうだということは予想できると思います。ここにさらに外部からの影響によ

アナログ電子回路技術ノート

TNJ-020

り、それぞれのグラウンドに異なる電圧が加わり、それぞれ異なるかたちで「揺すぶられた」と考えてみましょう。そうするとそれにより（予想どおり）二つのグラウンド内で電位差が生じるようになります。ここでたとえばブロック B 内部は強固な一枚グラウンド（という言い方も変ですが）となっているので、

B 内部の一枚グラウンドはそのグラウンド電位を基準として動作するので、内部の電圧関係が変わることはありません。

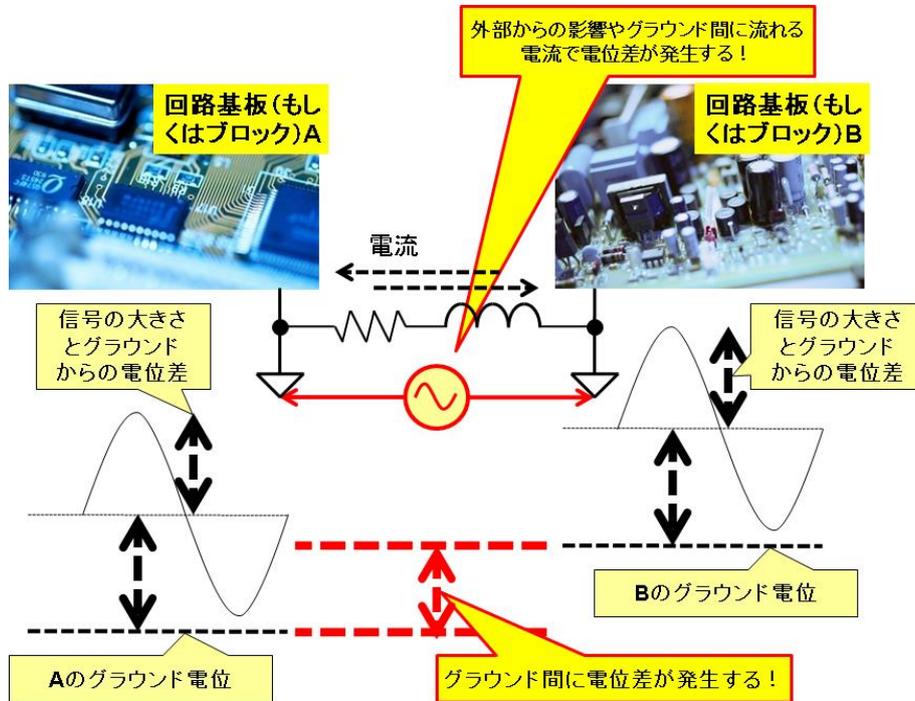


図 5. コモンモード電圧とは異なるブロック間のグラウンド間に生じる電位差

このようすは、図 6 のように考えることができます。この図はコモンモード電圧のようすをイメージ化してみたものです。ブロック A とブロック B は波間にゆれるふたつの船として考えることができます。ひとつの船をブロック B だとして考えてみましょう。この船の床面は当然ながら強固な平板です。つまりこの床面の上に立つ二人の人の背の高さを比較しても正しく観測できることになります。

この床が図 5 での「ブロック B 内部の強固な一枚グラウンド」であり、その上でこのグラウンド電位を基準として動作する回路が二人の人の背の高さを比較していることに相当します。つまり内部の電圧関係が変わることはありません。



図 6. コモンモード電圧をイメージで考える

しかしふたつの船の間は常時波で揺れ動いています。相互の床面（つまりグラウンド）の差は一定ではありません。これがコモンモード電圧と同じイメージとして表すことができるのです。この異なる船の間での人の背の高さを比較しても、波で揺れ動いているため、適切に観測することができないことも分かると思います。

コモンモードが影響を与えるしくみ

「しかしコモンモード電圧がどのように影響を与えるのか？」については、これまた今一つイメージが難しいかもしれません。「ひとつのブロック内では強固なグラウンド」ですから。

そんなわけなのですが、ここで図 7 のようなシステムで考え直してみましょう。この図 7 では、図 5 のブロック A を「信号源側」、ブロック B を「負荷回路側」として表しています。このひとつのブロック内は強固なグラウンドなわけですが、2つのブロック間は図 5 と同じく、同相モード電圧 V_c が加わっています。負荷回路側の受けのところは、インターフェース（アナログ・フロントエンド）です。

この図 7 で同相モード電圧 V_c はケーブルや中間回路の内部抵抗 $R1$ と、負荷回路の負荷抵抗 $R2$ とで、単純な回路計算のとおり分圧されて、それにより負荷回路側の受けで電圧として（本来は検出されるはずのない）同相モード電圧が「信号」として検出されてしまうのです。このようにモデル化して考えてみれば、単純な、あたりまえな振る舞いと考えることができるのですね。

この振る舞いのことを「同相モードからノーマルモードへのモード変換」と呼びます。その他にもモード変換が発生するしくみ、ケースもありますので注意してください。

アナログ電子回路技術ノート

TNJ-020

もし同一の基板（システム）内で強固なグラウンドになっていない場合は、同様に同一基板内で同相モード電圧が生じて、全く同じしくみで同相モード電圧がノイズとして観測されてしまうこととなります。

ところで一般的に回路内で伝達される信号のことを、コモンモードとは違うという意図をこめて「ノーマルモード」と呼ぶことがあります。そういえば私も駆け出しのころ、「（同相モード電圧のことである）コモンモード・ノイズと（ノーマルモード電圧のことである）ノルマルモード・ノイズというものがある」と、元大学教授、現在イトケン研究所の伊藤健一先生の名著、日刊工業新聞社刊の「アース・シリーズ」という書籍（図8）を読んで、それらの振る舞いの意味が分からなかったことを思い出しました…。

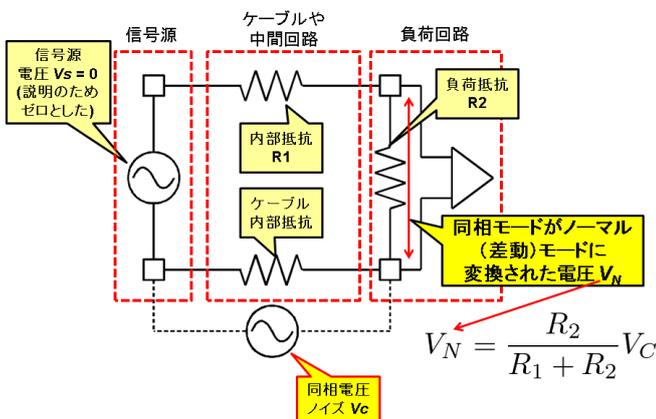


図7. コモンモード・ノーマルモード変換によりコモンモード電圧が回路側に影響を与えてしまうしくみ

磁界ピックアップが影響を与えるしくみ

もうひとつのしくみ、磁界ピックアップについては、AD9789の評価ボードが多層基板であり、内層はグラウンドになっていますので、ここに磁界が通り抜けているということは（ゼロではありませんが）考えづらいと思われます。

それでも可能性はあるので、説明してみます。この「磁界ピックアップ」とは、高校のころ物理の授業でやった「ファラデーの電磁誘導の法則」のとおり、基板のパターンで出来るループの部分に変動磁界が通ること、そのパターンに起電力が生じるものです（図9）。この起電力が回路内に影響を与えてしまうということが考えられるわけです。

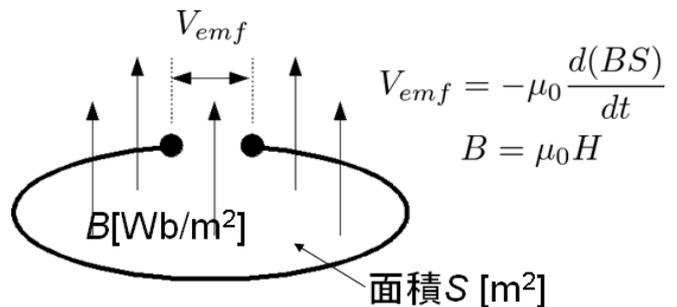


図9. 磁界ピックアップの原理モデル。高校のころやった「ファラデーの電磁誘導の法則」のとおり

ピックアップされた信号がキャリア左右に観測される理由

混入していた信号は 76.1MHz でありました。しかし、この（本来観測できたはずの）76.1MHz 自体ではなく、なぜ 120MHz の差分量として 76.1MHz が見えたのでしょうか。ちょっと考えてみると「なんだか不思議だな？」と思うのではないのでしょうか。

これは回路の非線形性により生じているものなのです。このしくみを説明してみましょう。いま、ふたつの信号

$$s_1(t) = A_1 \cos(\omega_1 t)$$

$$s_2(t) = A_2 \cos(\omega_2 t)$$

があったとします。s₁(t)は 120MHz のキャリア、s₂(t)はインターFMの放送波だと思ってください。s₂(t)は本来FMの成分も式中で示すべきかもしれませんが、簡単のためにそれは抜いてあります。このふたつの信号が利得Gをもつ増幅系

$$r(t) = G(s_1 + s_2)$$

に加わったとして考えると、これではω₁ ± ω₂の周波数成分というのは生じるはずもありません。これは系が「線形（リニア）」だからなわけです。

一方で以下のような増幅系を考えてみます。

$$r(t) = G_1(s_1 + s_2) + G_2(s_1 + s_2)^2 + G_3(s_1 + s_2)^3$$

これは「非線形」な増幅系というもので、増幅により生じる歪みの特性を多項式で表わしたものです。当然G₁ ≫ G₂, G₃です。またG₂, G₃ < 0となる場合もあります。実際は非線形性を表すうえでは、G₃はマイナスなのが適切でしょう。たとえばこの2次の項を考えてみると、中学校の数学の授業どおり、

$$(s_1 + s_2)^2 = s_1^2 + 2s_1s_2 + s_2^2$$



図8. 元大学教授、現在イトケン研究所の伊藤健一先生のアナログ回路で一番大切なグラウンド＝アースに関する名著「アース・シリーズ」という書籍を15冊セットで入手。伊藤先生は自分の大学の別学科の先生であり、学生のときに先生の授業をわざわざ他学科受講して拝聴させていただいた。これらの「アース・シリーズ」は技術者駆け出しのころ数冊購入したものが、後輩に「参考に読んでみたら」と貸したところ、1冊も帰ってこなかった（涙）。一般的に貸した本は帰ってこないのが、貸さないほうが無難と思われる（本人に購入してもらうのがベスト）。なおこの書籍シリーズ自体はすでに絶版のようだ

アナログ電子回路技術ノート

TNJ-020

と展開できます。ここで s_1s_2 の項がありますね。これに先の \cos の式を代入してみると、

$$\begin{aligned} s_1(t)s_2(t) &= A_1 \cos(\omega_1 t) \cdot A_2 \cos(\omega_2 t) \\ &= \frac{A_1 A_2}{2} \cos[(\omega_1 + \omega_2)t] + \frac{A_1 A_2}{2} \cos[(\omega_1 - \omega_2)t] \end{aligned}$$

と（積和の公式で）計算できることになります。なんとこれにより $\omega_1 + \omega_2$ の周波数成分と、 $\omega_1 - \omega_2$ の周波数成分が出来ているではありませんか！

これが $120\text{MHz} \pm 76\text{MHz}$ の「これはなんだ？」のスペクトルとして見えていたのです。つまり系に内在する非線形性（つまり歪み）が、この「これはなんだ？」のスペクトルを製造（？）していたわけなのです。

コモンモードのノイズを軽減させる対策方法

説明してきたコモンモードの混入対策としては、系（たとえば電源ライン、同軸ケーブルなど）にコモンモードチョークを入れることでしょうか。図 10 はオシロスコープのプロープにこの対策を施したようすです。このようにケーブルの外皮、芯線、両方を一緒にコモンモードチョークに巻き付けることで、コモンモードのノイズを軽減させることができます。なお低い周波数（たとえば $50\text{Hz}/60\text{Hz}$ ）ではチョークで生じるリアクタンスが十分ではありませんので、阻止量は少なくなってしまいます。

また、電波暗室を使うとか、「システムの特性確認をするなら、弱電界地域まで行って確認してきますか！」という方法もありますね。



図 10. コモンモードチョークを使ってプロープにコモンモードの対策をしたようす

ということで…

また余談ではありますが、 120MHz のスペクトルの $\pm 76.1\text{MHz}$ のもう少し外側にも、さらに小さいスプリアスが見えていました。これらはNHKかFM東京のキャリアでしょう。

ということで、東京タワーを直近とするオフィスでのエンジニア同士の会話でありました…（図 11、図 12）。



図 11. 私の席のすぐ後ろの窓から見える東京タワーその 1（雨の日は煙って上層が見えない）



図 12. 私の席のすぐ後ろの窓から見える東京タワーその 2（天気の良い日に上層までキレイに見えるようす）