



## 水没コンピュータ

### —理想の環境適合型データセンターを目指して—



国立情報学研究所 客員准教授 藤原 一毅

#### 1. 概要

本稿では、我々\*1が追究しているコンピュータの直接天然水冷技術、通称「水没コンピュータ」研究の途中経過を紹介する。

直接天然水冷の「直接」とは熱交換器を介さないこと、「天然」とは川／湖／海の水を冷熱源として使うことを意味する。つまり、自然環境中に潤沢に存在する水を冷媒かつ冷熱源として用いることで、コンピュータの冷却にかかるエネルギーをゼロにする技術である。さらに、水のある場所では水力発電や潮力発電などの再生可能エネルギーを開発できることが多く、これらの再生可能エネルギーを水没コンピュータが地産地消すれば、送電・変電にかかる損失もゼロにすることができる。「熱を輸送しない、電力を輸送しない、輸送するのは情報だけ」という理想の環境適合型データセンターを目指すとき、コンピュータの直接天然水冷が可能となれば、それは理想の実現へ向けた大きな一歩となるだろう。

我々の試作機は現在までに、屋内の水槽中で3か月、東京湾の海中で40日の連続稼動に成功し、概念実証の第一歩を踏み出したところである。水没コンピュータの実用化までに越えるべきハードルはまだ多いが、本稿をきっかけとして読者各位の専門知識を結集し、残された課題を解決していきたい。

#### 2. はじめに

ヤカンで沸かした麦茶を冷ますとき、皆さんはどうするだろうか。空気中に置いたままうちわであおいでもなかなか冷めない（これは子供のやりそうなことだ）が、ヤカンごとボウルに入れて流水に浸せばすぐに冷める。理由は水の熱伝導率が空気より高いからだが、熱力学を学んだことがなくても、ほとんどの大人が経験的に知っている。空気よりも水を触れさせた方が効果的に冷却できる——これは地球の常識だ。



■図1. 川にコンピュータを沈めて冷やす

それでは、熱くなったCPUを冷やすために、皆さんのコンピュータはどうしているだろうか。ほとんどのコンピュータはCPUを空気中に置いたままファンで風を当てているはずだ（子供のやりそうなことだ）。なぜコンピュータは地球の常識に反する非効率な設計をしているのか？ 理由はもちろん水が電気を通すからだが、問題は水が電気を通すことだけであって、それさえ解決すればコンピュータも地球の常識どおりに水冷のメリットを享受することができる。

我々の提案する水没コンピュータは、マザーボードの表面を絶縁膜でコーティングし、ボードごと天然の流水に浸して冷やそうというアイデアである。キャンプ場で川にスイカを沈めて冷やす光景を想像してほしい。あのスイカがコンピュータに代わるだけだ（図1）。たったそれだけのブレイクスルーでデータセンターのPUE\*2を1.00にすることができるのに、なぜ世間ではコンピュータを川に沈める人がいないのか？ マザーボードの絶縁コーティングがそんなに難しいのか？ 疑問に思った我々は、直接天然水冷の可能性を探ることにした。

\*1 国立情報学研究所 鯉淵研究室

\*2 Power Usage Effectiveness：データセンターにおけるIT機器の消費エネルギーに対する全消費エネルギーの比。現状は、標準的なデータセンターで3.0～2.0、最先端の高効率なデータセンターでも1.2程度である。



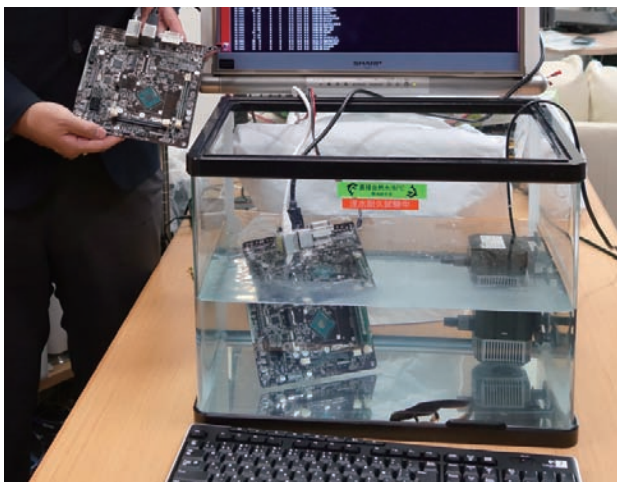
### 3. 技術的アプローチ

コンピュータを川に沈めるには、基板表面の配線同士が水で短絡しないようにする必要がある。我々はいくつもの方法を検討し、現時点ではパリレン樹脂コーティングが有望と考えている。

#### 3.1 パリレン樹脂コーティング

自動車や工事現場などのタフな環境で使われる電子基板は樹脂で覆って保護されている。この用途ではエポキシのような液体の樹脂を塗布する方法が一般的だが、樹脂を気化させて基板表面に蒸着する方法もあり、化学的気相成長法 (Chemical Vapor Deposition: CVD) と呼ばれる。コンピュータの基板には複雑に入り組んだ部品が多数実装されているので、気体のコーティング材料が内部まで入り込んで均一な皮膜を形成するCVDが適していると考えられる。パリレン樹脂 (パラキシリレン樹脂) はCVDによって成膜可能な素材の一種で、絶縁性・防湿性・耐薬品性に優れ、医療・自動車・航空宇宙などの分野で使われている。我々はスマートフォンの防水コーティング技術からヒントを得てパリレン樹脂の存在を知り、市販のパソコン用Mini-ITXマザーボードの防水コーティングに挑んだ (図2)。

いくらCVD成膜プロセスが凹凸に強いとはいえ、故障要因が少ないに越したことはない。そこで、マザーボードはACアダプタ対応型 (大きな電源コネクタを持たない) かつ



■ 図2. パリレン樹脂コーティングされたマザーボードと水槽での浸漬実験

CPU搭載型 (LGAソケットを持たない) の機種を選定し、通電するだけで (電源スイッチを押さずに) 起動するようにBIOSを設定した。また、CPUファンとヒートシンクの除去、不要なコネクタの除去、ジャンパピンの切断、電源直結化 (電源コネクタを除去しケーブルを半田付け) の各加工を実施した\*3。残ったコネクタにはLANケーブル、HDMIケーブル、USB無線キーボード受信器、ブータブルUSBメモリ (Ubuntu Linuxをセットアップ済み) を挿入し、その状態でコーティングを行った\*4。コーティング素材はKISCO株式会社のdiX C (膜厚50 $\mu$ m) とdiX C Plus (膜厚120 $\mu$ m) の2種類を採用した。コーティング後のマザーボードは、見た目にはほとんど普通のマザーボードと区別できない。

#### 3.2 その他の方法

我々はパリレン樹脂コーティング以外にもあらゆる防水方法を検討し、いくつかは試作を行った。

汎用品を用いる方法として、建物の外壁などに使われる耐候性塗料用のフッ素樹脂をスプレーする方法が考えられる。これはマザーボード全面に厚さ0.5 ~ 1mm程度の目に見える樹脂層を形成し、外見上は安心感が得られるが、電気的特性は明らかでない。我々は、フッ素樹脂のみをスプレーしたものと、パリレン樹脂コーティング (膜厚50 $\mu$ m) の上からフッ素樹脂をスプレーしたものを用意した。

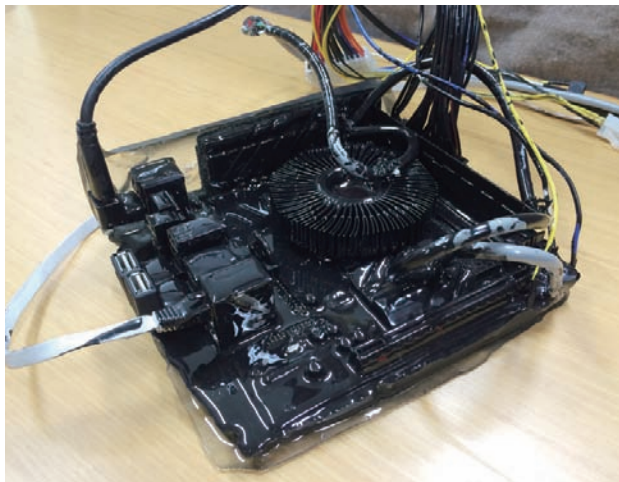
基板保護の常道として、液体のエポキシ樹脂をマザーボードに塗布する方法がある。エポキシ樹脂は用途によって異なる粘度のバリエーションがあり、粘度が高いと入り組んだ部品の内部に浸透させるのが難しく、粘度が低いと突起部に塗った樹脂が硬化する前に垂れ落ちてしまう。我々が用いた熱伝導性エポキシ樹脂は中間的な (両方の欠点を併せ持つ) 粘度だったため、Mini-ITXマザーボードがちょうど収まる大きさの型枠を作り、基板表面を覆うのに十分な量の樹脂を流し込んだ。その結果、塗布というより封入に近い、エポキシ樹脂の塊のような物体が完成した (図3)。

最もローテクな方法として、マザーボードを水密箱に封入してしまう方法がある。ケーブル取り出し部分の水密性確保と排熱経路の確保が問題となるが、ケーブルについてはOリングを備えた市販の水中用コネクタが十分な信頼性を持っている。排熱については、箱を金属製とし、箱の内壁

\*3 この作業には大型のハンダ除去機と強い忍耐力を必要とした。ご尽力いただいた合同会社サイバー工房の石田氏に感謝する。

\*4 当然、あとからケーブルを挿抜することはできない。





■図3. エポキシ樹脂封入の失敗作

とCPUをヒートパイプで結合すれば外壁から排熱できると考えられる。我々はSerener社製の水密PCケースを輸入し、マザーボードの寸法に合わせた自作のヒートパイプを組み込んで、水密箱方式の試作機とした。

## 4. 水没実験

我々は、これら4種類の方法の耐水性を水道水と海水でそれぞれ検証した。

### 4.1 水槽での実験

国立情報学研究所の居室内に30cm×45cmの亚克力水槽を設置し、上述の4種類の方法で防水したマザーボードを上水道の水に浸漬したまま動作させる実験を行った(図2)。パリレン樹脂コーティングは膜厚50 $\mu$ mと120 $\mu$ mの2種類を試験した。50 $\mu$ m品のうち1枚は、水中で75分間動作した時点で故障停止した。電源断のち再通电したところ再度起動したが、10分間動作した時点でまた故障停止した。別の1枚は、水中で30分間の動作デモを行い、手動でシャットダウンした。この時点では故障していなかったと考えられるが、後日空気中で通电したところ起動しなかった。一方、120 $\mu$ m品のうち1枚は、2016年6月3日から7月26日まで連続53日間の水中稼働に成功した。7月26日に手動でシャットダウンし、後日空気中で通电したところ起動しなかった。別の1枚は、水道水に海水の素を溶かした人工海水に浸漬した。人工海水中で15日間動作した時点でカーネルパニッ

クが発生し、USBの異常を示唆するメッセージが表示された状態で停止した。

フッ素樹脂スプレーは、基板上に直接スプレーしたものは水没以前に陸上で起動しなかった。パリレン樹脂コーティング(膜厚50 $\mu$ m)の上からフッ素樹脂をスプレーしたものは、2016年3月15日から6月10日まで、途中3回のシャットダウンを伴う陸揚げ作業(1回10分~3時間)をはさんで、断続87日間の水中稼働に成功した。6月10日に水中で故障停止したが、後日空気中で通电したところ起動した。

エポキシ樹脂封入は、水没以前に陸上で起動しなかった。ボード上に貼り付けた温度計の配線が樹脂封入時に基板上の配線に触れた可能性があるが、原因究明には至っていない。

水密箱は、市販製品だけあって何の問題もなく動作した。

### 4.2 東京湾での実験

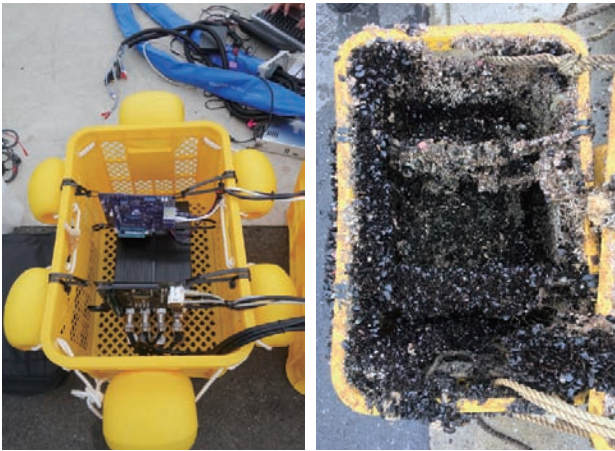
海洋研究開発機構・横須賀本部の岸壁の一角をお借りして、コンピュータを東京湾に浮かべて動作させる実験を行った。防水方法としては、水槽中で最も良好な結果が得られたパリレン樹脂コーティングと水密箱を用いた。潮の満ち引きに追従するため、マザーボードは海中に固定せず、海面上に浮く籠\*5の中に吊るす形とした(図4)。

パリレン樹脂コーティングは膜厚120 $\mu$ m品を用い、計3枚を海に投入した。うち1枚は、2016年7月27日から9月5日まで連続40日間の海中稼働に成功した。他の2枚はそれぞれ17日間(7月27日~8月14日)と16日間(8月26日~9月12日)



■図4. 東京湾での実験風景(左)とマザーボードを搭載した籠(右)

\*5 果実採集用のプラスチック箱を2個組み合わせたもので、上半分にケーブル中継箱が、下半分にマザーボードが固定されている。海に投入すると、上半分が海面上に浮き、下半分が海面下に没する。



■ 図5. 投入前(左)と55日経過後(右)の籠内部

の海中稼働実績を得た。ここでいう「稼働」とは、1分間に1回のpingに応答する状態を意味する。3枚とも最終日に応答が途絶え、そのまま海中で機能停止したと見られる。再通電は試していない。排熱については、海中では無負荷状態でCPU温度が38℃～40℃で安定しており、120%<sup>\*6</sup>の負荷をかけても42℃までしか上昇しなかった。一方、陸上では無負荷状態で60℃に達した。

水密箱は1台を海に投入した。こちらは6月2日の設置から11月15日の撤去まで無事に動作し続けた。ただし排熱は思わしくなく、負荷をかけると海中でもCPU温度が80℃まで上昇した。

6月2日から7月27日まで海中にあった籠を引き上げると、大量のムラサキイガイ(ムール貝)が付着していたほか、小さなカニやエビも生息し、さながら養殖棚の様相を呈していた(図5)。この状態でコンピュータが機能を維持していたことに驚愕する半面、直接天然水冷の冷熱源という観点では、沿岸の海面付近は生物相の厚さが大きな障害となり得ることが明らかになった。

## 5. 先行事例

水没コンピュータへの挑戦は我々が最初ではなく、現在までにいくつかの成功例と失敗例が報告されている。

高橋敏也氏は、アクリルウレタン樹脂スプレーとエポキシ樹脂封入で我々と同様の失敗を報告している<sup>[1]</sup>。

ASCII.jp編集部は、ガラス製の水密容器を用い、内部をエンジンオイルで満たす方法で十分な冷却性能が得られたことを報告している<sup>[2]</sup>。

GIGABYTE社は、グラフィックボードにコーティングを施して水中で動作させるデモ動画を公開しているが、耐久性は明らかでない<sup>[3]</sup>。

2009年に開かれたオーバークロックの世界大会「Master Overclocking Arena 2009」において、米国のTeam OI/IEが水没PCを動作させたという報告があるが、詳細は不明である<sup>[4]</sup>。

## 6. 既存技術との比較

### 6.1 通常的水冷

パイプに冷却水を循環させ、水枕と呼ばれる金属製の熱交換器を介してCPUを冷却する方式の水冷システムは大型コンピュータで普通に使われている。この方式では、温くなった冷却水を冷やすための設備が別途必要であり、その冷却設備(ポンプや冷凍機)がエネルギーを消費する。外気を冷熱源とするものが大多数であるが、高緯度地域では天然の湖水や河川水を冷熱源とするものもあり、マイクロソフト社が実験した海中データセンター<sup>[5]</sup>は海水を冷熱源としていたと考えられる。いずれにせよ冷却水は閉鎖系であり、冷熱源とは熱交換器を介して隔てられている。配管内に異物が詰まると故障するため、天然水そのものを冷却水とする直接天然水冷技術は実用化されていない。

### 6.2 液浸冷却

絶縁性の液体(油やフッ素系など)を冷媒とし、その冷媒を満たした槽に基板を直接浸漬する液浸冷却技術が実用化されている<sup>[6]</sup>。冷媒はパイプ内を循環し、外部の冷熱源(通常は外気)と熱交換するので、冷媒を冷やすための冷却設備がエネルギーを消費するという点では通常の水冷システムと変わらない。この方式は水枕を用いる通常の水冷システムよりも簡素な装置で高密度に基板を配置できるため、既存の建物内やオフィス内に高性能計算機を設置するのに適している。

### 6.3 空冷

CPUにファンで風を当て、暖まった空気をエアコンで冷やすのが一般的な間接空冷方式であり、エアコンがエネルギーを消費する。冷涼な地域では外気をそのまま導入する直接空冷方式も実用化されているが、少なくともファンを回す必要があるほか、湿度制御や雪害・塩害への対処が不

\*6 4コアなので最大400%





可欠である。さくらインターネット(株)の石狩データセンターは、1号棟・2号棟では直接空冷方式を採用していたが、3号棟は間接空冷方式に改められた<sup>[7]</sup>。

## 7. 課題と展望

### 7.1 生態系への影響

自然環境中に排熱するという意味では空冷も水冷もその本質は同じだが、気温上昇と水温上昇では影響範囲が異なる。

海水温の上昇については、原子力発電所に関連して多くの既存研究がある<sup>[8]</sup>。日本の原発の排水温度は海水温+7℃以下とされており、発電出力1GWあたりの流量は70m<sup>3</sup>/s程度、排熱量は約2GWである\*7。京コンピュータの設計最大電力が20MW\*8なので、その排熱量は出力1GWの原発1基の約1/100に相当する。原発周辺では、温排水を使った魚の養殖が行われている。

河川の水温上昇については、地域熱供給(地域冷暖房)に関連して国土交通省が指針を出しており、河川水温の変化が±3℃以上\*9の区域を影響の検討範囲としている<sup>[9]</sup>。水力発電の例を挙げると、東京電力藤原発電所の最大流量は28m<sup>3</sup>/s、最大出力は22.2MWであり、この電力をすべて水没コンピュータが消費すると水温上昇は約0.2℃となる。水力発電所の上流にある導水路内は、自然環境から隔離され、発電量に比例した流水量=冷却能力が保証されることから、水没コンピュータの設置場所として理想的な環境と考えられる。

### 7.2 法制度との兼ね合い

河川の流水を排他的・継続的に利用する設備は水利権の対象となり、河川法に基づく流水の占用の許可が必要となる。海面の利用は原則として自由だが、港湾区域内では港湾法に基づく水域の占用の許可が必要となる。また、「水質の汚濁や工作物の設置等によって、漁場内における採捕又は養殖の目的物たる水産動植物の棲息及び来遊等を阻害する行為」は漁業権の侵害となる<sup>[10]</sup>ため、漁場付近では漁業者との調整が必要である。

電気安全に関しては、JIS C 8105-2-11「観賞魚用照明器具に関する安全性要求事項」において、IPX7を満たす

直流30V以下の観賞魚用照明器具は水中に配置してもよいとされていることが参考になる。なお、電気用品安全法はパーソナルコンピュータを適用対象外としている。

### 7.3 屋内型水没コンピュータ

もし一足飛びに直接天然水冷を目指すことが社会的に受容されにくいのであれば、一歩手前のコンサバティブな実装として「直接天然水冷ではない水没コンピュータ」を造ることも考えられる。すなわち、屋内に設置した水槽に冷却水(水道水)を満たし、コーティングしたマザーボードを浸漬する。これは既存の液浸冷却システムの冷媒を水に置き換えるだけであり、コーティングさえできれば容易に実現可能である。液浸冷却の利点である効率的な冷却と空冷の利点である扱いやすさのいいところ取りを狙ったプラクティカルな設計と言える。水没専用マザーボードを新規に設計するならば、コーティングの弱点と見られるコネクタ等の入り組んだ部品が水面上に出るように設計することで、故障要因が大幅に減る可能性がある。

### 7.4 故障診断

コーティング技術の完成度向上を目指す上で障害となっているのが故障診断の困難さである。コーティングしたマザーボードを水に沈めると時間経過とともに散発的に故障が生じるが、その故障の発生メカニズムを解明しなければ、コーティングをどのように改良するべきかの指針も得られない。しかし、浸水は極めて小さなピンホールでも発生するため目視による故障箇所の特定はできず、かといって顕微鏡を用いて十数cm四方のマザーボード全面を検査することも現実的でない。我々は今後、短絡箇所を特定する機能をもつ試験用基板を製作して破壊試験を行う予定である。

## 8. おわりに

本稿では、我々が進めている水没コンピュータ研究の途中経過を報告した。市販のマザーボードにパリエレン樹脂コーティングを施した我々の試作機は、水道水中で87日間、東京湾の海水中で40日間にわたって正常に動作し、概念実証としては一定の成果を得たと考えている。とはいえ、水没コンピュータの実用化までに越えるべきハードルはまだ多い。

\*7 これは原子力発電所の熱効率が33%程度であることと矛盾しない。

\*8 20MWは電力設備の最大供給能力であり、コンピュータが実際に消費する電力は最大12MW程度である。

\*9 ±3℃以下は自然状態での日間変動の範囲内である。



技術的には、水中で2年間（データセンターのサーバーのリプレース周期）程度の平均寿命の達成を目標として、コーティングの耐久性をさらに高める必要がある。そのためには故障原因を究明した上で対策を講じなければならない。有機化学の知識と故障診断のノウハウを持つ読者諸賢のご助力を賜りたい。

社会的には、コンピュータを自然環境中に設置することの法的位置付けを明らかにし、関係者との合意を形成する必要がある。我々は、今回行った東京湾での実験のほか、より生物相の薄い河川上流部で実験を行うことも検討した。しかし「川にコンピュータを沈めても怒られないためには誰に許可を得ればいいのか」が明らかでなく、適地の発見に至らなかった。水没実験の可能な川に心当たりのある読者の方は、ぜひ情報をご提供いただきたい。

水没コンピュータが実用化された暁には、水力・潮力・波力といった水辺の自然エネルギー発電所と組み合わせ、熱も電力も輸送しない理想の環境適合型データセンターが実現する。今後発展していく国々が自前の情報インフラを整備するにあたり、津々浦々の水辺に小さなデータセンターを置いて高速無線ネットワークで結べば、重厚長大な電力・通信インフラの整備を待たずして、軽量かつ持続可能なクラウドサービスを人々に提供できるだろう。昔ながらの重厚長大なデータセンターはそのとき、水に溶けて消えてしまうかもしれない。

本稿は情報処理学会研究報告 vol.2017-HPC-158に掲載されるものを改題・一部改変して転載したものである。

#### 引用文献

- [1] 高橋敏也, 高橋敏也の改造バカー一台&動く改造バカ超大全 風雲編. インプレス, 2015.
- [2] 林佑樹. Core m版スティックPCには油没冷却がとても効果的!! KADOKAWA. 2016年10月27日. <http://ascii.jp/elem/000/001/247/1247813/>.
- [3] GIGABYTE Extreme Gaming. Graphics card put into water. 2016年3月14日. <https://youtu.be/JoWkabOWtwE>.
- [4] 長浜和也. MSIのオーバークロック世界大会で“水没PC”とスリリングなゲームに酔う. ITmedia. 2009年8月31日. <http://www.itmedia.co.jp/pcuser/articles/0908/31/news047.html>.
- [5] Microsoft. Project Natick. 2016年. <http://natick.research.microsoft.com/>.
- [6] HPCシステムズ. 液浸冷却ソリューション. <http://www.hpc.co.jp/ESLiC.html>.
- [7] さくらインターネット. さくらインターネット, 新しい空調コンセプトで石狩データセンター 3号棟を建設. 2015年9月29日. [https://www.sakura.ad.jp/press/2015/0929\\_ishikari\\_idc/](https://www.sakura.ad.jp/press/2015/0929_ishikari_idc/).
- [8] 海洋生物環境研究所. 平成22年度国内外における発電所等からの温排水による環境影響に係る調査業務報告書. 2011年3月. [https://www.env.go.jp/policy/assess/4-1report/file/h22\\_01a.pdf](https://www.env.go.jp/policy/assess/4-1report/file/h22_01a.pdf).
- [9] 国土開発技術研究センター. 河川水熱エネルギー利用に関する河川環境影響検討指針(案)(解説). 1995年2月. <http://www.jice.or.jp/cms/kokudo/pdf/tech/material/env-boo-1-01.pdf>.
- [10] 水産庁. 漁業権について. [http://www.jfa.maff.go.jp/j/enoki/gyogyouken\\_jouhou3.html](http://www.jfa.maff.go.jp/j/enoki/gyogyouken_jouhou3.html).