

次世代ヒューマノイドロボットHRP-3Pの放熱設計

Thermal Design for a Humanoid Robot, HRP-3P

川口 学
Manabu KAWAGUCHI

川田工業(株)航空・機械事業部
HRIS開発室

川又 文雄
Fumio KAWAMATA

川田工業(株)航空・機械事業部
HRIS開発室

赤地 一彦
Kazuhiko AKACHI

川田工業(株)航空・機械事業部
HRIS開発室係長

金平 徳之
Noriyuki KANEHIRA

川田工業(株)航空・機械事業部
HRIS開発室係長

太田 成彦
Shigehiko OHTA

川田工業(株)航空・機械事業部
HRIS開発室

ヒューマノイドロボット「HRP-3P」が、人間と一緒に屋外の実環境下で作業する場合、外部から浸入する熱および内部から発生する熱が問題となる。特に、構造が水滴や埃が浸入しない密閉構造となること、運動性能を向上させるため軽量かつコンパクトな設計になることから、放熱システムに大きな負担が掛かる。その上、夏場で風通しが悪く直射日光を受ける環境は、ロボットの電気システムにとって非常に過酷である。これらの課題を克服するため、ロボット「HRP-3P」の開発では、構造フレームをモデル化して熱計算を行い、必要放熱量を計算に入れながら放熱システムの設計を行った。ここでは、実環境で働くロボット「HRP-3P」に実装される放熱システムとその設計手法を紹介する。

キーワード：ヒューマノイドロボット、直射日光、密閉構造、実環境、放熱

1. はじめに

現在川田工業では、経済産業省および新エネルギー・産業技術開発機構が推進する「基盤技術研究促進事業」の委託を受けて、実環境で働くヒューマノイドロボットのハードウェア開発を担当している。このプロジェクトでは、平成16年度末に試作機「HRP-3P」、平成18年度に成果機「HRP-3」の完成が予定されている。

HRP-3は、屋外の実環境¹⁾での120分連続稼働を目標としている。その目標を実現するためには、以下に示すような課題への対処が必要となる。

- ・ 全身の構造は、内部に水滴や埃が浸入しない構造（以下、防滴・防塵構造と記す）をとるため密閉性が高まり、外気との熱交換効率が低減する（図1）。
- ・ 構造は、運動性能を向上させる理由から軽量かつコンパクトな設計となるため、大型の放熱器を実装することはできない。
- ・ 夏場で日陰がなく風通しの悪い作業環境は、非常に過酷な状態になる。
- ・ 筐体内部温度は、実装される電気システムが放出する熱に加え、日射からの侵入熱により大きく上昇し、システムの性能低下や停止が生じる。

そこで、「HRP-3P」の開発にあたっては、これまで経験的に行われてきた熱設計手法を見直し、構造フレーム

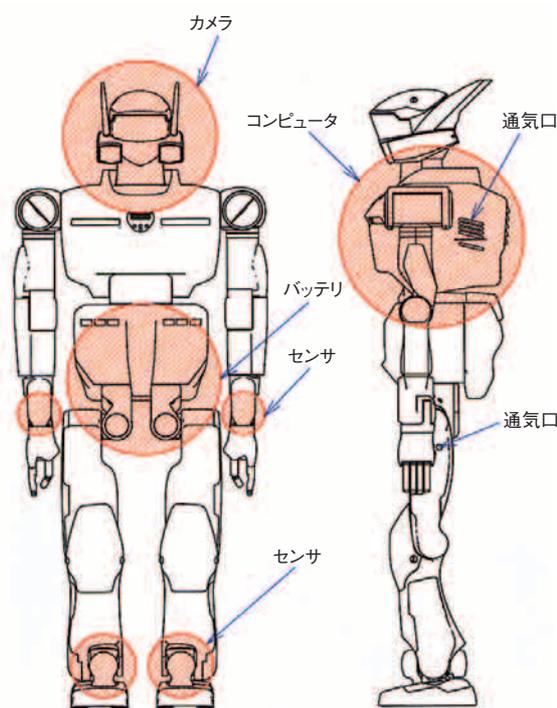


図1 HRP-3Pにおける防滴・防塵構造の強化部位（図はHRP-2）

のモデル化および実験検証を繰り返して、詳細な熱計算手法を確立した²⁾。

本稿では、実環境で働くロボット「HRP-3P」開発で行った熱計算手法と、その結果として得られた小型で効率の良い放熱システムについて記述する。

2. 熱設計の導入と基本方針策定

(1) 熱設計初期方針

夏場の日射強度は1 000 W/m²に達するため、最大65 Wの日射熱量がHRP-3の胴体表面に照射される。また、HRP-3では、コンピュータを四肢に分散させたネットワーク制御システムを採用するため、放熱システムを要する部位が複数にわたる。一方、一般的な冷却放熱技術としては、ヒートシンクファンが挙げられるが、四肢毎にそれらを実装すると大きな重量増と消費電力増につながる。そのためHRP-3Pの熱設計では、分散させたシステム毎にファンを実装する必要がないように、ファン数量の低減および放熱システムの小型化を検討し、消費電力面、騒音面で効率の良いシステムを構築することを目的としている。

開発工程においては、実験回数の低減や時間短縮ができるよう熱計算を導入し、基礎実験およびHRP-2実機の胴体を使用した熱計算精度の検証を初期に行った。さらに、ヒートパイプを用いた複合モデルを対象に熱回路網法による熱解析も同時に行った。

(2) 熱計算と熱実験

熱計算を行う上で、HRP-3Pを構成する各部位の筐体を直方体に近似し、精密機器の熱設計手法を取り入れることとした。特に、大きな熱源となる実装機器を搭載する部位は、胴体部、上腕部、大腿部になる。各部フレームをほぼ直方体に近似できるため、直方体のモデルとして簡略化して簡易熱計算を行い(図2)、次に形状が複雑なHRP-2実機を用いた検証を行った。

さらに、熱伝導を含む放熱モデルの熱計算を行うために、熱回路網法による熱計算と基礎実験を実施した。

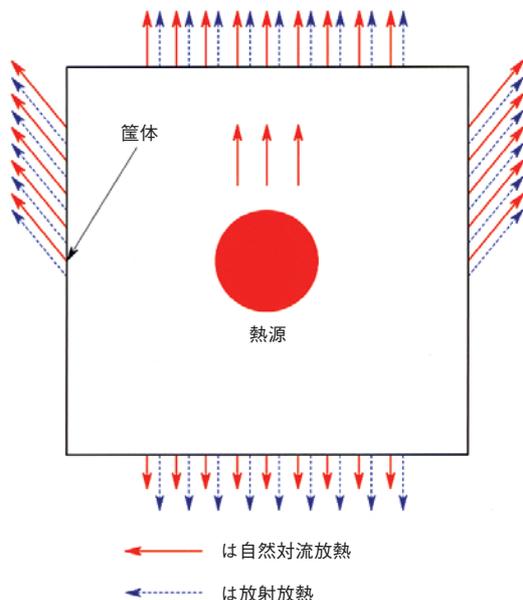


図2 熱実験モデル図

a) 簡易熱計算と熱実験

簡易熱計算とは、筐体内部で発生する熱量と筐体表面からの全放熱量が一致する時の筐体内部温度上昇値を求める計算である。また、開口部をもつ筐体の場合には、開口面積に比例した換気放熱量が、空冷ファンを用いて強制換気する筐体の場合、換気流量に比例した強制換気放熱量が全放熱量に加算される。なお、計算から得られる温度上昇値は、飽和時のものである。

簡易熱計算の精度および補正のため、実際に筐体を用いて簡便な実験を行った。筐体内(140×280×213/t1:A5052,放射率0.85と設定)に熱源を設置し、以下3通りの放熱方式および条件で試験を行い、完全に飽和した時の筐体内部温度上昇値を計測した。

- ① 完全密閉状態(熱源量27.6 W)
- ② 開口部のある状態(熱源量40.9 W)
筐体底面および上面にそれぞれに開口部0.0036
および0.0033 [m²]を設置
- ③ 強制換気を行った状態(熱源量52.7 W)
空冷ファン(0.48 [m³/min.])を上面開口部に取付

簡易熱計算および実験から得られた飽和時の筐体内部温度上昇値を表1に示す。各データを比較すると、放熱方式によらず±2℃に収まることが確認できた。

表1 簡易熱計算値と実験値の比較(飽和内部温度上昇値)

試験条件	熱計算値[℃]	熱実験値[℃]
ケース①	24	26
ケース②	26	27
ケース③	7	7

次に、この簡易熱計算がHRP-2実機にも適用できるかどうか、計算精度の検証を行った。外装カバの表容積とほぼ同じ直方筐体(黒色PVC筐体:300×330×400/t1)でHRP-2実機の胴体を覆い、外装カバを簡略化した。胴体内部に実装される電気システムに供給・消費される電力を発生熱量として算出し、サーボ非駆動時および駆動時各々で簡易熱計算を行った。

評価方法は、吸込ファンおよび吐出ファンの駆動の組み合わせを3通りに設定し、実測した内部温度上昇値と熱計算から得られる推定値の比較によって行った。なお、ファンを実装する開口部に圧損の大きいフィルタなどがなく、外装カバ内の静圧の実測結果から、ファンの流量係数を0.85として熱計算を行った。

熱計算および実験の結果、±3℃の誤差範囲に収まり、形状が複雑な実機においても十分な精度で熱計算できることが確認された。

一方、CPUが熱暴走する時の筐体内部温度を計測する

ために、直方筐体の換気口の流路抵抗を大きくし、換気効率を低減させた。その結果、CPU付近の内部温度が56℃になった時点で熱暴走することが確認できた。

b) 熱回路網法による熱計算と熱実験

ある対象を複数のメッシュに分割し、各メッシュの中心に節点を設ける。次に、各節点間を流れる電流を熱量 Q 、電気抵抗を熱抵抗 R 、電圧を温度 T としてオームの法則を形成し、更に電流のベクトル和がゼロになるキルヒホッフの法則を取り込んで、連立方程式を解く手法が、熱回路網法である。

ここで、あるメッシュの中心節点温度を T_0 とし、 T_1 から Q_1 の熱量が流入し、 T_0 から T_2 、 T_3 に流出する熱量を Q_2 、 Q_3 とする。熱流 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 が流れる熱抵抗値をそれぞれ R_1 、 R_2 、 R_3 とすると、

$$T_1 - T_0 = Q_1 \times R_1$$

$$T_0 - T_2 = Q_2 \times R_2$$

$$T_0 - T_3 = Q_3 \times R_3$$

$$Q_1 = Q_2 + Q_3 \quad (\text{定常時})$$

となり、この4式の連立方程式を解くことで、各メッシュの温度上昇を得ることができる。したがって、複雑な形状をした対象物でもメッシュを切り、各メッシュ間の熱抵抗値が分かれば解くことができる。

実際に、簡易熱計算と同様の簡易的な熱実験やヒートパイプ³⁾を用いた複合モデル実験の結果、±2～3℃に収まることが確認できた。

(3) 熱設計の基本方針策定

以上の諸検討から、HRP-3P熱設計の基本方針を以下のように定めた。

- ・ 作業現場などの屋外環境を想定して、環境最大温度を40℃とする。
- ・ CPUの熱暴走を防ぐために、筐体内部温度を50℃以下に抑える。すなわち環境最大温度を40℃に設定しているため、内部温度上昇を10℃以下に抑える。
- ・ 簡易熱計算の精度は高く、複雑な形状をもつ実機でも応用できるため、許容温度上昇を10℃とし各部位毎で要放熱レベルを初期に検討して進める。
- ・ 簡易熱計算を用いた初期構想および目標値を明確に設定し、熱解析により詳細な解析および検証する。

3. HRP-3P放熱システムの熱解析

(1) 要放熱レベルの設定

HRP-3Pにおいては電気システムの分散配置構造と防滴・防塵構造を両立させる必要があるため、各部において熱設計を詳細に行わなければならない。そこでまず与えられた熱源数や個々の発熱量に対して、自然対流放熱および放射放熱のみによる放熱を仮定して簡易熱計算を行い、各部位毎の放熱方式を暫定した。それにより、フ

ァン、ヒートシンクまたはフィンが必要とするかどうかの目安になる評価を行った(表2)。なお、レベル2以上のケースでは、必要に応じて熱回路網法による詳細解析を行った。

表2 簡易熱計算による想定する放熱レベルと放熱方式の選択

要放熱レベル	内部温度上昇 ΔT_{in} [°C]	ファン	ヒートシンク	フィン
レベル4	$\Delta T_{in} > 3 \times \text{許容温度上昇}$	必要	併用可	併用可
レベル3	$\Delta T_{in} < 3 \times \text{許容温度上昇}$	検討	検討	検討
レベル2	$\Delta T_{in} < 2 \times \text{許容温度上昇}$	不要	検討	検討
レベル1	$\Delta T_{in} < \text{許容温度上昇}$	不要	不要	不要

(2) 頭部の放熱システム構想と熱解析

頭部における実装機器は、カメラおよびハブとなり、それら合計消費電力量および日射熱量(吸収率10%)を合計した21.4 Wの熱量が発生する。頭部の寸法を180×210×164、外表面放射率を0.85として簡易熱計算を行った結果、内部温度上昇は18℃となりレベル2となった。

重量増および防滴・防塵性能の点から、ファンの実装と構造フレームへの熱伝導が不可能なため、環境温度仕様の低い機器を頭部内の下方に実装し、後述する表面処理で放熱性能を増強させることとした。

(3) 胴体部の放熱システム構想と熱解析

a) 胴体部の放熱システム構想

胴体内では、コンピュータ類および日射による浸入熱量を加えた合計165 Wの熱が発生する。簡易熱計算の結果、内部温度上昇は50℃以上、すなわちレベル4となったことから、ファンの実装が必要となる。

胴体内の放熱システムは、メインファンと換気ファンの2系統により構成した。各ファンの仕様を表3に示す。メインファンは、ヒートシンクに集熱される電源ユニットの熱を放熱する。換気ファンは、胴体内の蓄熱分を換気する。2系統のファンをそれぞれ独立させ、ヒートシンク温度および筐体内温度に応じた間欠運転を行うことで、ファンの消費電力および騒音低減を可能としている。なお、胴体内放熱システムは、防滴・防塵性能のある薄膜フィルタと圧損特性の高いシロッコファンで構成される。また、実装機器の中で高発熱源同士を近接させないこと、発熱中心を下げて通風抵抗を低減することとした。

HRP-3P放熱システム構想概念図を図3に示す。

表3 実装するファンの仕様

	各ファンの役割
メインファン	ヒートシンク温度を50℃以下に保つ
換気ファン	筐体内温度を50℃以下に保つ

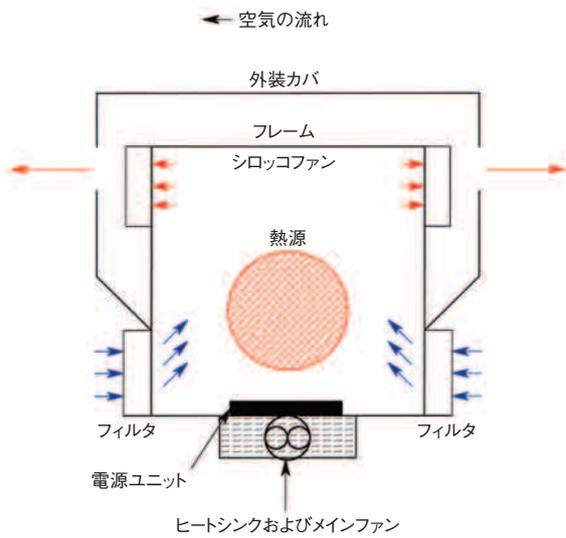
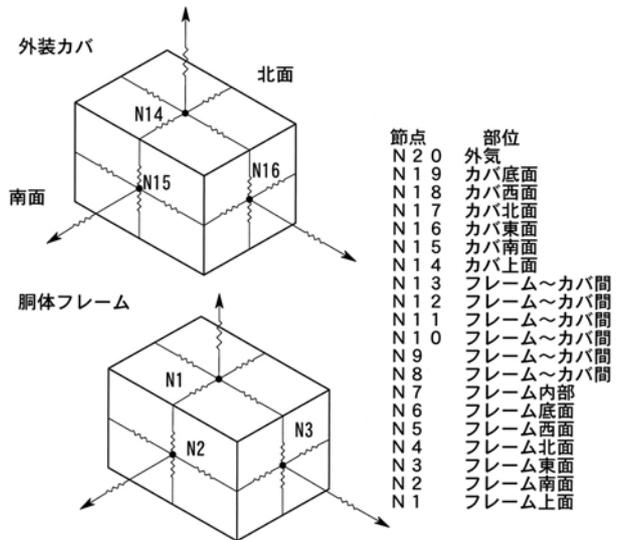


図3 HRP-3Pの放熱システム構想概念図



b) 胴体部の熱解析

胴体部の熱解析では、図3に示す胴体部の熱回路網モデルを製作し(図4)、定常熱解析を行うこととした。HRP-3Pの胴体部は、電気システムが実装されるフレーム部および外装カバ部に分けられ、二重の直方筐体のモデルに近似できる。モデルには20節点を設定し、各節点の温度上昇に応じ変化する熱コンダクタンスおよび各熱量を加えた熱回路網モデルを解いた。なお、日射熱量(吸収率30%)を加え、表4に示す通りに条件を設定して定常熱解析を行った。

定常熱解析の結果を図5に示す。図中に示す各節点の温度上昇は、図4内に示した各節点に対応している。胴体フレーム内部N7およびヒートシンクN6の温度上昇は、それぞれ18℃および19℃になると推測された。

頭部同様、後述する表面処理で放熱性能を増強させることとした。

表4 胴体部モデルの熱設計仕様

熱源(日射熱量含む)	合計熱量[W]	260
システム概要仕様	換気(シロッコ)ファン流量[m ³ /min.]	0.5
	ヒートシンク熱抵抗[℃/W]	0.24
	メイン(軸流)ファン流量[m ³ /min.]	1

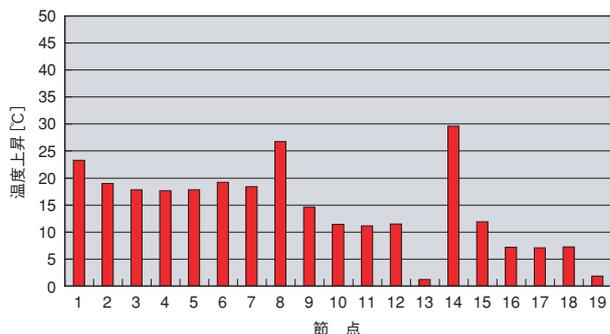


図5 胴体部の熱解析結果

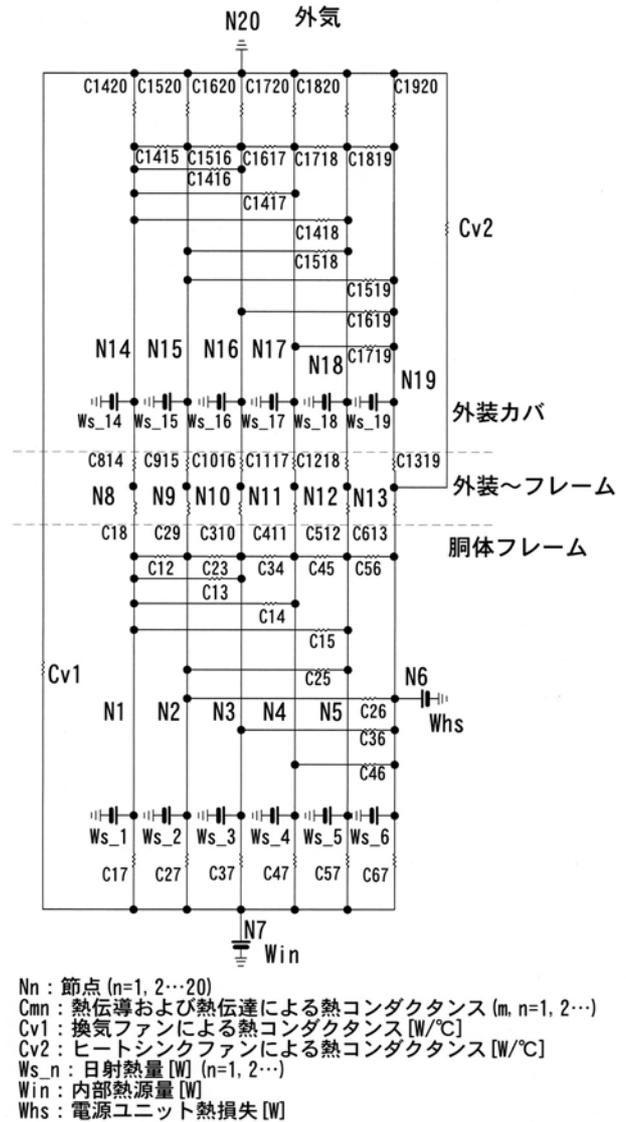


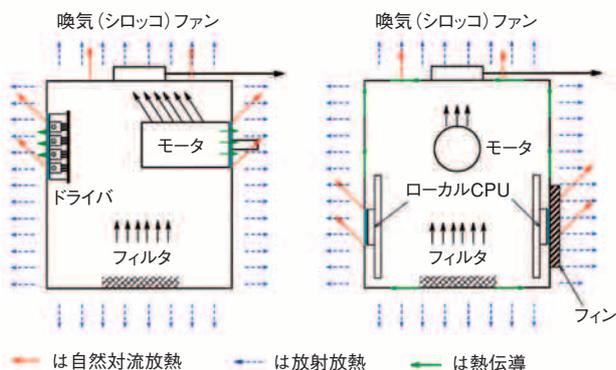
図4 胴体部の熱回路網モデル

(4) 脚および腕部の放熱システム構想と熱解析

a) 脚部の放熱システム構想

前述のようにHRP-3Pは、CPUの分散配置構造をとる（以下、ローカルCPUと記す）ため、発熱源は複数箇所に分散される。胴体以外の四肢モジュール部（両腕部および両脚部）では、実装するファンの個数低減および小型化を推進する必要がある。以上を考慮した放熱システムの構築方針を以下に記述し、構想概念図を図6に示す。

- ・ 熱源の接触面積を大きくすると共に、高熱伝導部材を挟み込み、高圧で固定させて内部と筐体間の熱抵抗を低減する。また、高熱伝導素材による筐体設計を行い、複数の筐体内表面に熱源を分散させて固定する。更に表面処理を含めた高い熱伝達率をもつフィン設計を行い、筐体と外気間の熱抵抗を低減する。
- ・ 複数の高出力モータが実装される筐体には、小型のシロッコファンを実装する。このファンにより内部の換気とモータハウジングおよびローカルCPUの放熱を一度に行う。
- ・ 耐环境温度の低い機器を筐体内部の下方に、発熱の多い機器および耐环境温度の高い機器を上方にレイアウトする。



b) 脚部内放熱モデルの熱解析

四肢モジュール部で最も発熱量の多いACモータは、HRP-3P大腿部に実装される。発熱量は歩行速度1.2 km/hの歩行時において7~10 Wになり、モータハウジングは高温になり、ハウジングから放出される熱が内部温度を上昇させる。簡易熱計算の結果により要放熱レベル3が得られたことから、ローカルCPUの停止が推測された。そこで、静圧の高い換気用のファンを実装することで、内部の換気とACモータハウジングを直接冷却する構造とした。

発熱量の多い大腿部の熱解析を行うため、熱回路網モデルを製作した。HRP-3Pの大腿部は、電気システムが実装される一重の直方筐体モデルに近似できる。モデル

には8節点を設け、各節点到熱コンダクタンスおよび熱量を加えた熱回路網モデルを解いた。

なお、各コンダクタンスおよび熱源の要素は胴体部のモデルの場合と同様である。また、日射熱量（吸収率10%）を加え、表5に示す通りに条件を設定し定常熱解析を行った。

表5 大腿部モデルの熱設計仕様の概要

熱源 (日射熱量含む)	合計熱量[W]	53.8
システム概要仕様	換気(シロッコ)ファン流量[m ³ /min.]	0.1
	アルミフレーム寸法[mm]	110×110×250

定常熱解析の結果、大腿内部の温度上昇は10℃、2ユニットのACドライバが実装される部位および2つのACモータを固定する部位の表面温度上昇は、それぞれ25℃および27℃程度になると推測された。

また、ACモータのハウジングの表面温度上昇は、ACモータ単体の強制空冷を含む熱抵抗モデル解析により、20℃以下に抑えることができると推測された。以上から、熱源を筐体フレームに密着固定し熱抵抗値を下げることで、内部温度上昇を大きく低減することができることが確認された。

一方、すね部の要放熱レベルは2となった。そこで、ファンを使用せずに筐体の内外面の熱抵抗値を極小化できるように、熱源を筐体内の各面分散させて接触固定した。更に、ACドライバの部分の外表面にフィン設けた。

定常熱解析の結果から、内部温度上昇は16℃になると推測された。大腿部同様、熱源と筐体フレーム間の熱抵抗値を下げることは非常に有効となった。頭部同様、後述する表面処理で放熱性能を増強させることとした。

c) 腕部内放熱モデルの定常熱解析

ファンを実装できない上腕部に関する簡易熱計算を行ったところ、要放熱レベル4となった。そこで熱源を筐体内面に接触固定させ、その外表面にヒートシンクフィンを構造と一体化する構想とした。熱回路網モデルでは、ファンの熱コンダクタンスの代わりに、フィンの熱コンダクタンスをフィンのある節点到追加した。熱解析は表6に示す条件にて行った。なお、上腕部と結合される肩部と前腕部への熱伝導や放熱作用も含めた熱コンダクタンスを、結合される節点到加算して定常熱解析を行った。その結果、上腕部の内部温度上昇を13℃程度に抑えられると推測された。

表6 上腕部モデルの熱設計仕様の概要

熱源 (日射熱量含む)	合計熱量[W]	21.1
システム概要仕様	フィン熱抵抗値[℃/W]	4.5
	アルミフレーム寸法[mm]	86×86×200

また、上腕部同様の制約をもつ前腕部の要放熱レベルは2となった。上腕部のレイアウトおよび熱コンダクタンスの合算を同様に行い定常熱解析した結果、内部温度上昇は16℃と推測された。

(5) 日射の影響を低減する表面処理構造の構想

胴体部の外装カバの表面積は大きく、日射熱量は65 Wにも及ぶ。しかし、フレームまで到達する熱量は16 Wまでに減少する。この要因は、反射率70%（吸収率30%）の外装カバが日除けとなり、全日射エネルギーの70%を反射することと、外装カバとフレーム間の空気層による断熱効果、外装カバと同処理のフレームから成り立っている。また大腿部の表面積は小さく、吸収率も10%と低いため一重筐体でも日射熱量は数W程度となっている。

以上から、HRP-3Pの日射対策を以下のように定めた。

- ・ 筐体内表面の吸収率を大きくする光選択吸収性のある表面処理をする。
- ・ 色彩も考慮に入れて、日射の受けやすい面のみ反射率（吸収率を小さく）および放射率をできるだけ大きくし⁴⁾、日射の受けにくい面に放射率の高いヒートシンクフィンを設け、効率良く放熱する。

4. HRP-3P熱設計の評価

前項の計算結果で述べたように、胴体内部およびヒートシンクの温度上昇は10℃以内に収まらないことが推測された。しかし構造部材の連結による熱伝導および放熱成分が加算されること、また外装カバおよびフレームの表面処理による吸収率を大きめに設定していることなどを考慮すると実際の温度上昇は推測値よりも低くなると思われる。

次に、HRP-2とHRP-3Pにおける放熱システムを構成する合計重量と合計消費電力の比較を表7に示す。HRP-3Pにおける両数値は、HRP-2比で1.6倍と1.3倍と共に増加しているが、電力性能係数（＝（総消費電力－ファン消費電力）/ファン消費電力）を比較すると、HRP-2比で1.4倍、なおかつ胴体内部の温度上昇値も数℃程度低く抑えられると推測できる。すなわち、換気効率がより高い放熱システムとなっている。

一方、重量比が増大しているのは構造の一部に熱抵抗

表7 HRP-2とHRP-3Pの放熱器の比較

	HRP-2	HRP-3P
胴体内部温度上昇[℃] (日射なし～日射ありの場合)	(推定) 15～20	(推定) 13～18
放熱システムの重量比[%] ＝放熱システム重量/ロボット重量	1.0	1.4
電力性能係数(冷却系エネルギー効率)	17.6	25.4

の低いヒートシンクとメインファンを設けていること、CPU用ヒートシンクファンの重量が倍増していることが大きな要因である。今後換気ファンのみの1系統にし、ヒートシンクを軽量化する対策を検討する。

5. おわりに

HRP-3Pの屋外環境設定に基づく仕様検討および定常熱解析による検証から、耐環境最大温度は35℃程度となると推測された。HRP-3P完成後は屋内外における温度計測を実施して定常熱解析の精度を確認し、ロボットの運動量と温度上昇の関係およびファンの間欠駆動を含めた放熱システムの検討を行い、さらに小型で高効率な放熱システム構築を行っていく予定である。

最後にHRP-3Pは、経済産業省と新エネルギー・産業技術開発機構が推進する「基盤技術研究促進事業」において、2002年度から5か年の計画で進めている「実環境で働く人間型ロボット基盤技術の研究開発」の一環で開発を行っている。関係機関の皆様方に深く感謝致します。

参考文献

- 1) 比留川：人間型ロボットの近未来応用，日本ロボット学会誌，Vol.22，No.1，pp.6-9，2004.
- 2) 川口，赤地，太田，川又：ヒューマノイドロボットHRP-3Pの熱設計，日本ロボット学会講演概要集，第22回，p.73，2004.
- 3) 望月，益子他：ヒートパイプを用いたパソコンの冷却応用製品，日本機械学会伝熱工学論文集，No.97-25，B241，1997.
- 4) 飯島：景観色彩の明度と彩度に関する景観政策的分析，岡山商大社会総合研究所報，第22号，pp.183-186，2001.