

## 5. 環境温度の違いが作業パフォーマンスに及ぼす影響\*

庄司卓郎\*\* , 江川義之\*\* , 奥水ヒカル\*\*\*

### 5. A Study on the Task Performance on the Different Thermal Conditions\*

by Takuro SHOJI\*\*, Yoshiyuki EGAWA\*\* and Hikaru KOSHIMIZU\*\*\*

**Abstract** : As construction works are often operated in outdoors, workers are affected by work environments. Especially in summer, workers suffer from heat stress in addition to physical work load. While the measures of effective prevention against heat stroke have been considered in the industrial hygiene field, prevention of human errors during work in hot environment is not taken adequately. There are no criteria for stopping or continuing work from the viewpoint of safety. But it is known that the task performance deteriorates in uncomfortable environment, and there seems to be the high possibility of occurrence of human errors or accidents during work in hot environment.

The final goal of this study is to examine the effects of heat stress during construction work on work performance and to clarify the possibility of occurrence of human errors. In this research, as the first step, the effects of temperature of environment on task performance and laps of attention were examined.

Eight healthy male students took part in the experiment as test subjects. They carried out physical task, consisting of taking apart a rack of shelves, carrying the parts to appointed places, and putting back together for 90 minutes on three thermal conditions, 23°, 29° and 35 °C. During the physical task, each subject was forced to listen to the sound selected a number out of the group one to nine and when the fixed number was called they were ordered to stop tasks and respond by PC mouse. ECG and rectal temperature were recorded throughout the experiment. Subjective symptoms of physical fatigue were also measured during tasks.

On 35 degrees condition, averaged frequency of lapse of attention, not responding fixed number, was the highest. On each condition, the number of errors tended to increase as time of task passed. Significant effects of time (0-30 minutes, 31-60 minutes, 61-90 minutes) and temperature (23°, 29°, 35 °C) were found by the ANOVA. Similar tendencies were also shown for HR, rectal temperature and subjective fatigue.

The time-series variation patterns of missing the number, task performance for each subject and physiological and psychological states are not identical. So task performance, physiological state and subjective fatigue are not proper prediction measures for errors during simulated work, and workers who are doing their jobs neatly are also in danger of making errors to some extent.

These results suggest that there is much possibility of occurrence of errors during physical task in hot environment, especially in the case that the work period is long, and that it is necessary to consider some preventive measures to keep safety at work in a hot environment.

**Keywords** ; Construction work, Dual task, Work physiology, Subjective physical fatigue, Attention

---

\* 本研究の一部は、日本生理人類学会第47回大会(2002年5月栃木)<sup>1)</sup>、人類動態学会第37回大会(2002年6月茨城)<sup>2)</sup> および第33回安全工学シンポジウム(2003年7月東京)<sup>3)</sup>で報告した。

\*\* 境界領域・人間科学安全研究グループ Interdisciplinary and Human Science Safety Research Group

\*\*\* 科学技術振興事業団 重点研究支援協力員 Supporting Staff for Priority Research, Japan Science and Technology Corporation.

## 1. はじめに

建設作業は通常、屋外で行われるため、作業環境の影響を避けられない。その中でも、作業自体が長時間の継続的な身体的負荷を含むこともあり、夏季における高温・高湿環境が及ぼす影響は大きい。労働衛生分野において、熱中症が大きな問題となり、作業管理の指針<sup>4), 5), 6)</sup>も発表されているのに対し、高温・高湿環境によるヒューマンエラーの防止対策はほとんどなされていない。著者らが建設企業に対して行った面接調査でも、企業として空調の整った休憩室の設営、冷水器、製氷器の購入や設置などさまざまな対策がなされていたが、いずれも熱中症を予防することを目的としているものであった。

一般に、我々は夏の暑い時季に仕事への意欲やパフォーマンスが低下することを感じることもある。暑さのために意識が低下して災害につながることもあると考えられる。実験室レベルの研究では、高温環境下で、作業パフォーマンスが低下することが知られている<sup>7), 8)</sup>。しかし、暑熱環境が事故やエラーの直接原因とは見なされないために、その影響については十分な説明がなされてこなかった。

本研究は、作業環境の温度の違いが身体作業タスクおよび注意力の維持に与える影響に関する実験を通じて、夏季の建設作業の安全管理について検討を行ったもので、以下にその結果を報告する。

## 2. 暑熱環境に関する過去の知見と基準

作業環境が作業員に及ぼす影響に関しては、さまざまな角度から検討が行われてきた。Luczak<sup>9)</sup>は、ドイツにおける調査で約40%の職場で物理環境上の問題があることを指摘している。その中には、鉱山や屋外作業(建設など)で問題となる暑熱環境も含まれている。

我が国において、熱中症による死亡は毎年発生している。そのうち、業務上の疾病もここ数年、年間20人前後に達している<sup>10)</sup>。その中でも建設業の割合が高いことが報告されている<sup>11), 12)</sup>。

熱中症は、重篤度のレベルの低い順から熱けいれん(heat cramps)、熱疲労(heat exhaustion)、熱射病(heat stroke)の3つの病態に分類されている<sup>12)</sup>。死亡事例はこのうち、熱射病の重篤なケースに限られ、より軽傷の熱けいれんの事例は死亡事例の数百倍はあると言われている<sup>12)</sup>。これらに分類されない“暑さで頭がぼーっとする”現象は、さらに多く発生していると思われる。そして、高所作業や運転など、作業の内容によっては、この“頭がぼーっとする”ことが生死に関わる事故に発展するケースも考えられる。

Scardino<sup>14)</sup>は、米国における建設作業員の高所からの墜落事例について、熱中症が隠れた原因となっていると予想されるケースがあると述べている。我が国における労働災害の原因の分類においても、“熱けいれん”や“暑さによるめまい”などの項目はないが、これらが直接原因ではないものの、労働災害に関連している事例は決して少なくないものと思われる。

気温あるいは室温とパフォーマンスの関連を論じた研究は多数みられるが、それらの多くは、快適なオフィス環境や仕事の能率向上のための作業環境をテーマにしているものである<sup>15), 16), 17)</sup>。

環境温度、特に暑熱環境と作業のパフォーマンスとの関係を解明しようとする研究は、労働環境が現在よりも劣悪だった1950、60年代から行われていたが、Wing<sup>18)</sup>から盛んになり始めた。Beshir<sup>19)</sup>は、WBGT(Wet Bulb Globe Temperature) 20、26、30条件で、2種類の作業/休憩サイクルで合計18回、5分間のトラッキング作業を行わせたところ、トラッキングのエラーに関して、測定時点と温度条件の有意な主効果が得られたと報告している。またBeshir<sup>20)</sup>はWBGT 18.3、21.1、23.3、25.6の4条件で同様のトラッキング作業を30分連続して行わせた結果、15~25分で開始直後よりも作業成績が有意に低下したと報告している。

一方Ramsey<sup>21)</sup>は、Wing<sup>18)</sup>以来の150以上の研究結果を要約し、過去の多くの研究が、環境条件(温度、湿度、気流など)や高温環境への曝露時間、作業の内容、被験者の熱順応のレベルが異なるため一概に比較できないことを主張しながらも、単純な作業では成績低下があまり見られず、知覚・運動作業ではWBGT 34~36で成績に有意な低下が見られ、その変動には曝露時間と関係がないことを示している。その上で、熱順化した作業員の曝露限界、熱順化していない作業員の曝露限界および、それらの許容限界の推奨値を示している。さらに、Ramsey<sup>22)</sup>は、身体作業の強度(エネルギー代謝)を含めた推奨値を示した。Ramsey<sup>21), 22)</sup>の推奨値は、比較的軽度の運動で主として精神作業に関するものである。

このように、実験室レベルで暑熱ストレスが作業に及ぼす悪影響についてしばしば論じられているが、暑熱作業環境に関する安全の指針やガイドラインは作成されていない。NIOSH(The National Institute for Occupational Safety and Health)は1972年<sup>23)</sup>にWing<sup>18)</sup>のデータを基に、深部体温の上昇による健康障害だけでなく、暑熱ストレスによる作業パフォーマンスの低下および事故の発生はありうる、として暑熱曝露の上限値を設定した。しかし、NIOSHはその後、実験室で

得られた成果は、研究ごとに作業の内容が異なり、それにより異なった結果が得られていること、および単純な認知課題やトラッキング作業などが中心で、実作業との間の関係が不明瞭であることなどの理由で、1980年<sup>24)</sup>から、安全への影響に関する部分への言及は避けている。その他にも、ACGIH(American Conference of Industrial Hygienists)<sup>4)</sup>、WHO(World Health Organization)<sup>6)</sup>、日本産業衛生学会<sup>4)</sup>、日本体育協会<sup>25)</sup>等で基準や指針が示されているが、健康面への影響に焦点が当てられており、健康障害が及ぶ以前の作業パフォーマンスや注意力の低下に関する基準は作成されていない。

### 3. 実験方法

#### 3.1 実験概要

夏季の建設作業現場における作業員の不安全行動やエラーによる事故発生の可能性を検討するための基礎的な知見を得ることを目的として、恒温恒湿実験室における棚組立実験を行い、温度変化による作業効率の違いや、規則違反行動、聞き逃しエラーの出現数の変化を調べた。

作業効率としては、棚の組立、解体、運搬作業の速度(所要時間)、規則違反行動としては、指示された方法で作業を行わなかった回数、聞き逃しエラーは、作業中に提示される音声刺激で、ターゲット刺激が出現した際に反応しなかった回数を指標とした。これらの指標の作業時間中の推移や温度による違い、および指標間の関連などを調べた。

#### 3.2 実験デザイン

作業中に作業の危険に関する注意を聞き逃して危険に直面する状態を想定し、身体作業と音声刺激による二重課題法を用い、作業中の注意力や作業効率の推移を検討した。

主作業として、棚(エレクター:幅900mm×奥行き450mm×高さ1390mm)の解体・運搬・組立作業を課した。まず、作業エリアA内に設置された6段の棚を指定された手順通りに解体し、部品を指定の位置(部品置き場A)に並べ(解体)、指定の通路を通して所定の位置(部品置き場B)に運び(運搬)、さらに指定された手順に従って作業エリアB内で組み立てる(組立)。続いて今度は解体して部品置き場Bに並べ、通路を通して部品置き場Aに運び、作業エリアAで組み立てる、という作業を繰り返し行わせた。実験場のレイアウトと寸法をFig.1に、また、実験風景をPhoto.1に示す。

作業中には、PC(パーソナルコンピュータ)を用いて、1~9までの数字の音声刺激を5秒間隔で提示し、指定された数字の刺激が提示された時には、作業を中断し、PCに移動してマウスで応答するように指示した。この際、PC画面上で身体疲労感の評定を行わせた。評定後、被験者には作業を再開させた。なお、ターゲット刺激は約3分に1回の割合で提示されるように設定した。

#### 3.3 タイムテーブル

実験のタイムテーブルをFig.2に示す。実験当日は、被験者を実験準備室に集合させた後、実験概要の説明を行いながら電極類を装着するとともに、所定の作業着に着替えさせた。その後、恒温恒湿実験室に移動し、血圧測定と5分間の安静座位での生理指標(深部体温および心拍数)の記録を行い、入室して15分経過後、組立作業を開始させた。作業時間は90分であったが、被験者には作業時間は教えず、「規定の回数組立をしたら終了とする。その回数は温度条件により異なるので前回の別の温度条件の時と同じではない。」と伝え、終わりの合図があるまで、できるだけ速く作業を進めるように教示した。作業開始から90分経過後、作業を中断させ、血圧測定と安静座位での生理指標測定(5分間安静座位)を行った後、退室させた。退室後電極類を取り外し着替えさせた後、解散させた。

被験者には、実験前に一度実験室に集合させ、実験の説明と作業の練習を行わせた。実験は3条件で、1日1条件ずつ、同じ時刻帯(10時からまたは14時から)に行わせ、実験順序は被験者間で順序が同じにならないように設定した。

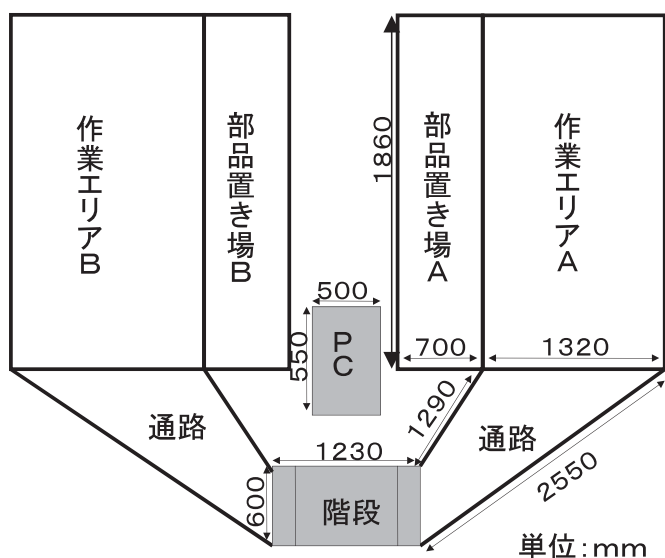


Fig.1 Layout of the experimental field  
実験場のレイアウト





Photo.1 The situation of experimental work  
実験風景

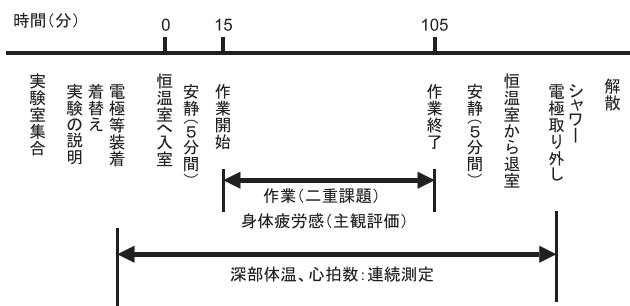


Fig.2 Time table of the experimental session  
実験日のタイムテーブル

### 3.4 実験条件

実験条件として、恒温恒湿実験室（幅5000mm×奥行き4130mm×高さ2500mm）の温度を23℃、29℃、35℃の3段階に設定した。23℃はWBGTの21℃に相当し、組立作業を快適に遂行出来ると考えられ<sup>26)</sup>、熱中症が起こる可能性が極めて低いとされている温度であり、35℃はWBGT31℃に相当し、これ以上の温度では運動を中止すべきと勧告されている<sup>25)</sup>温度である。また、その中間の温度として29℃条件を設定した。実際の屋外作業では、輻射熱の影響などが加わり、本実験条件よりも高いWBGT値を示すことが予想される。しかし、今回の実験目的は、熱中症の発生過程を明らかにすることではなく、熱中症の発生には至らない温度で作業パフォーマンスが低下することを示すことであり、Ramsey<sup>21)</sup>のレビューにおいても、WBGT30℃以上では作業や実験タスクの成績が有意に低下することが示されているので、今回の実験条件では、WBGT31℃に設定した。

また、今回は温度の影響のみを検討することを目的

としたため、湿度は50%で一定とした。

### 3.5 測定項目および解析

実験中、Fig.2に示した時間帯に各被験者の深部体温と心電図（NASA誘導およびCM5誘導）の記録を行った。心電図は実験後波形解析し、1分間毎の心拍数を算出した。また、深部体温として直腸温の連続記録を行った。

実験中における測定項目はTable 1に示す通りである。作業効率は、速度の指標として、解体、運搬、組立を1回完了するのに要した時間を実験中のVTR記録をもとに算出した。また、指示したルール通りに行わなかった場合（指示した作業の手順を守らない、指示された方法で運搬しない、など）を不安全行動として回数を記録した。さらに、音声で指示された数字に反応しなかったケースを聞き逃しエラーとして回数を求めた。また、作業開始前後および作業中の自覚的身体疲労感を、「0：疲れを感じない」～「3：非常に疲れを感じる」、の4段階からPC画面上で選び、あてはまる状態をマウスで選びクリックさせて入力させた。

これらの指標は、「作業開始直後（0分）から30分まで（以下ターム1と略す）」、「30分から60分まで」（同ターム2）、「60分から作業終了（90分）まで」（同ターム3）の時間帯に区切って集計し解析を行った。

### 3.6 被験者

被験者は、平素より暑熱下での運動や過大な身体負担のかかる作業を行っていない男子学生8人（平均22.7才）であった。被験者の属性をTable 2に示す。

## 4. 実験結果

### 4.1 聞き逃しエラー

指定された番号の音声刺激が提示されたにもかかわらず、作業を中断してPCに移動しなかったケースを「聞き逃しエラー」と定義し、作業開始から30分

Table 1 Indices used in this experiment  
実験での測定項目

主作業の作業効率	1回あたりの解体主要時間(分)
	1回あたりの運搬主要時間(分)
	1回あたりの組立主要時間(分)
規則違反行動	指示通りに作業をしなかった回数
副次課題	聞き逃しエラー数
生理指標	心電図(後にHR算出)、深部体温
主観指標	身体疲労感(4段階評価)

毎の聞き逃しエラーの発生率を調べた。結果をFig.3に示す。

エラー率は個人による差が大きかったが、三元配置分散分析（温度条件×時間帯×被験者）の結果、温度条件(p<0.05)、時間帯(p<0.01)、被験者(p<0.01)ともに有意な主効果がみられた。同一の時間帯での比較では、温度が上昇するにつれ、エラー発生率が高くなっており、23 条件と35 条件の間に有意な差が検出された(p<0.01)。また、各条件とも、作業の前半から時間の経過に伴ってエラー率が上昇する傾向がみられ、ターム とターム の間で有意な差が観察された(p<0.05)。被験者と温度条件の間に有意な交互作用(p<0.01)がみられ、被験者によって温度の影響が異なることが示された。一方、温度条件と時間帯の間には交互作用は観測されず、グラフは交わることなく右上がりの傾向を示していた。最もエラー率の高い35 条件の60～90分の時間帯では24.8%であり、約4回に1回の割合で聞き逃しエラーが発生していた。

Table 2 Physical data of subjects  
被験者の属性

	年齢(才)	身長(cm)	体重(kg)
被験者A	22	190	94
被験者B	22.5	175	72
被験者C	22.2	174	62
被験者D	22.2	170	57
被験者E	22.5	165	55
被験者F	21.8	162	53
被験者G	22.4	170	71
被験者H	26	160	52
平均	22.70	170.75	64.50
標準偏差	1.36	9.45	14.19

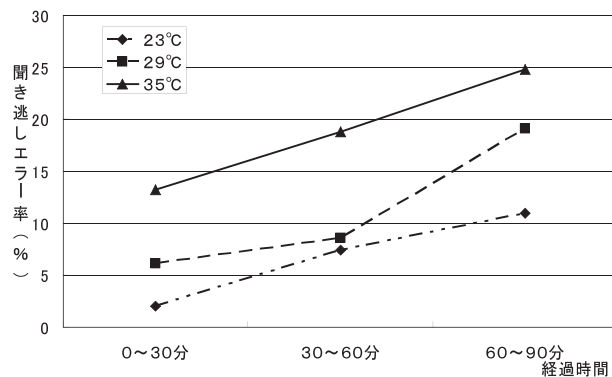


Fig.3 Time-series variation of lapse of attention in each condition  
聞き逃しエラーの発生率の推移

## 4.2 主作業の作業効率

組立作業における作業効率を調べるために、解体、運搬、組立の各要素毎に所要時間を算出した。このうち、解体と組立は、事前の練習にもかかわらず習熟の影響を除去することが出来ず、実験条件を問わず各被験者の1回目の実験の最初の30分から3回目の実験の最後の30分までを通じて、所要時間が短縮しているケースが多く見られた。そのため、今回は、特別な技能や工夫の必要が無く基本的な動作のみで、習熟の影響も少ないと考えられる運搬の所要時間を解析対象とした。結果をFig.4に示す。35 条件で他の2条件よりも時間が長く、時間経過に伴って増加していく傾向があるが、分散分析の結果では、温度条件、時間帯に有意な主効果はみられず、被験者の主効果および被験者と温度条件の交互作用(p<0.01)という個人差のみが現れた。

## 4.3 作業中の規則違反の発現数

作業中の規則違反（指示通りに作業を行わない、指示された方法で運搬をしない、など）数の推移をFig.5に示す。被験者と温度条件に有意な主効果(p<0.01)がみられ、35 条件で他の2条件より不安全行動が多かった(p<0.05)。また、被験者と温度の交互作用がみられた(p<0.05)。23 条件と29 条件の間には差はみられず、ターム および では逆に23 条件の方が29 条件よりも規則違反発現数が多くなる傾向がみられた。

## 4.4 作業中の生理機能

作業中の被験者の生理機能の変動の指標として、心拍数の推移をFig.6に、深部体温の推移をFig.7に示す。

心拍数は、ターム.では温度条件による差はあまり大きくないが、時間の経過とともに35 条件では大きく増加していた。分散分析の結果、個人、温度条件、時間帯ともに有意な主効果(p<0.01)が観察された。多重比較の結果、時間帯に関しては、ターム とターム ,ターム とターム ,ターム とターム のすべての組み合わせで有意な差がみられた。温度条件についても、同様にすべての組み合わせで有意な差(p<0.01)がみられた。また、温度条件と時間帯、被験者と時間帯、被験者と温度条件の有意な交互作用(p<0.01)も観察された。このことは、ターム からターム に大きく増加する被験者とターム からターム にかけて増加する被験者とがいたことによるものであると思われる。

Fig.7に示す深部体温についてもほぼ同様で、最初の30分では差がみられないが、時間経過とともに差

が開いていく傾向が見られた。分散分析の結果、被験者、温度条件、時間帯の全ての主効果と交互作用について有意( $p < 0.01$ )な効果がみられた。

多重比較の結果、時間帯に関してはすべての組み合わせで、温度条件に関しては23 と35、および29 と35 の間に有意な差がみられた( $p < 0.01$ )が、23 条件と29 条件の間には有意な差が見られなかった。

また、心拍数の推移と同様、深部体温に関しても、29 条件において、23 条件に近い変動を示す被験者と、35 条件に近い推移を示す被験者が存在していた。

#### 4.5 作業中の自覚的疲労感

作業中にPCで入力させた自覚的な身体疲労感(「0 .

疲れを感じない」～「3 . 非常に疲れを感じる」の4段階スケール)の推移をFig. 8 に示す。身体疲労感は、ターム ですでに温度条件による若干の差が見られ、その後差が拡大していく。分散分析の結果から、被験者、温度条件、時間帯ともに有意な( $p < 0.01$ )主効果がみられ、時間帯と温度条件以外(被験者と時間帯、被験者と温度条件)で有意な( $p < 0.01$ )な交互作用がみられた。多重比較の結果、時間帯に関しては全てのターム間で、温度条件に関しては、23 と35、および29 と35 の間に有意な差( $p < 0.01$ )がみられたが、23 条件と29 条件の間には有意な差が見られなかった。

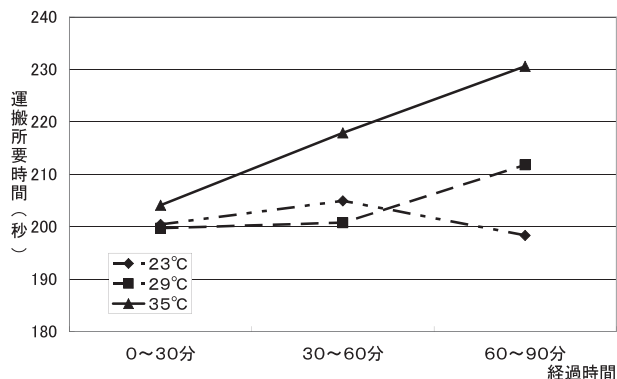


Fig.4 Time-series variation of time for carriage in each condition  
運搬作業の所要時間の推移

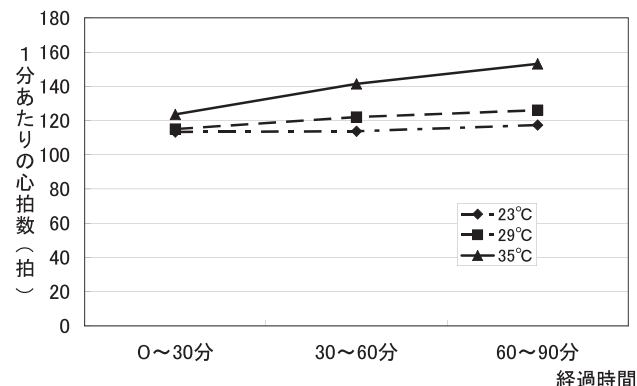


Fig.6 Time-series variation of heart rate in each condition  
作業中の心拍数の推移

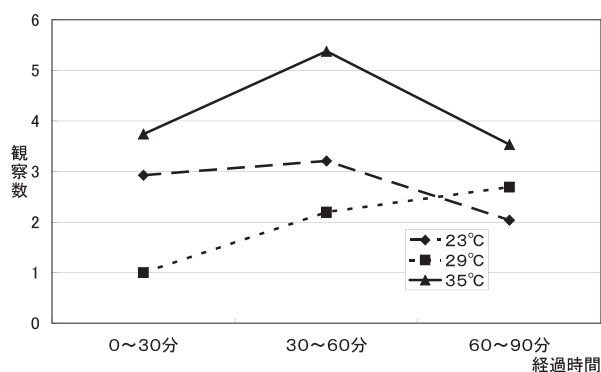


Fig.5 Time-series variation of occurrence of violation in each condition  
規則違反の発現数の推移

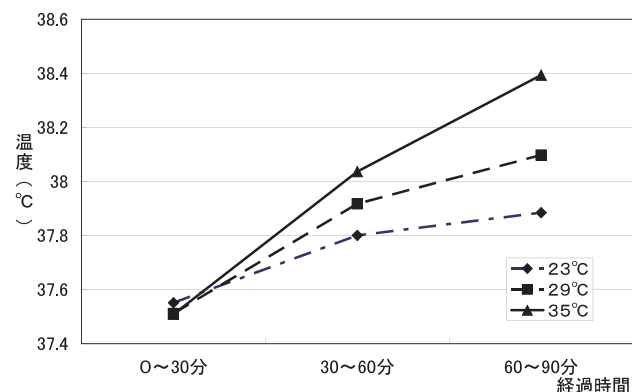


Fig.7 Time-series variation of rectal temperature in each condition  
作業中の深部体温の推移



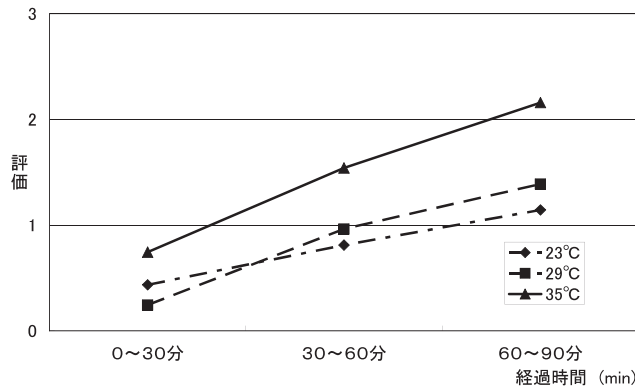


Fig.8 Time-series variation of subjective symptoms of physical fatigue in each condition  
作業中の身体疲労感の推移

## 5. 考察

### 5.1 環境温度が聞き逃しエラーに与える影響

今回の実験では、聞き逃しエラーは、温度の上昇とともに、また、時間の経過とともに増加した。交互作用はなく、どの温度でも同じ傾向を示していた。このことは、被験者全体としてみる限り、23～35 の間で変曲点は存在せず、温度上昇にほぼ比例する形で聞き逃しエラーが増加する。同様なことは、時間についてもいえ、0～90分まで時間経過とともに線形に聞き逃しエラーが増加すると考えられる。

暑熱環境と二重課題のタスク成績に焦点を当てた研究は過去にいくつかあるが、主作業や副次課題の内容や難易度によって一致した結果が得られていない。Bateman<sup>26)</sup> は、32.2 で、ストループテストなどいくつかの課題を副次課題にした二重課題を2時間継続させたところ、単純な課題では成績の低下が観察されたが、高度な課題ではむしろ成績が向上するケースを報告し、これは不快な環境において単純な課題をさせたためにモチベーションが低下したためであろうと述べている。また Hancock<sup>27)</sup> は、過去の研究を総括し、二重課題のパフォーマンスは、課題の内容によって異なり、35 で30分間作業を続けてもパフォーマンスの低下がみられなかった研究もあれば、38.4 で5分後から成績が悪化したという報告もあるとしている。今回の課題は、組み立て作業をしながら音声を聞いて反応するもので、難易度としては決して高くない。“出来るだけ早く作業をするように”との教示から実験の主作業へのモチベーションが低下することはなかったと思われるが、主作業だけに集中するあまり副次課題

への注意が軽視された可能性もあり、副次課題へのモチベーションがどの程度であったかは明らかではない。しかし、23 条件ではエラーが少なかったことを考えると、実験を通して副次課題へのモチベーションが低かったと言うことはなかったと思われる。今回の実験条件における温度設定は、WBGTで、ほぼそれぞれ21, 26, 31 にあたる。WBGT31 は運動を中止すべき温度<sup>25)</sup>と言われており、被験者にとっては大きな負担であったと思われる。Beshir<sup>19)</sup> および Behir<sup>20)</sup> は、トラッキングのパフォーマンスは15～25分頃から低下し始めると報告しているが、本研究では30分毎に集計を行っており、データのサンプリング数の制約もあり、何分目から聞き逃しエラーの増加や作業効率の低下が始めるのかまでを明らかにするには至らなかった。

今回の研究結果では、23 から29 までの変化と、29 から35 までの変化量は、全体としてはほぼ等しかった。Beshir<sup>20)</sup> は、23 から29 (WBGT20 と26) までと、29 から34 (WBGT26 と30) までの変化を比べると、前者の方が圧倒的に大きな変化を示したと報告したが、今回はそれとは異なる結果が得られた。

個人毎のデータを見ると、全員が均等な変動をしているわけではなく、23 から29 で大きな変動を示す被験者と、その逆の変動傾向を示す被験者がおり、全体としてはほぼ等しいという結果になった。多重比較の結果でも、23 と35 条件の間に有意な差が見られたが、23 と29, 29 と35 の間には差は見られなかった。

聞き逃しエラーが発生するメカニズムに関しては、いくつか考えられる。1つ目は、不快な環境での長時間の作業による疲労のため覚醒水準が低下し、注意資源が減少してしまい、そのため音声刺激へ配分する注意力が低下してしまうことである。2つ目は、熱的中立が維持できなくなり、皮膚温、深部体温とともに脳内温度も上昇し、情報処理機能全般がスムーズに行われなくなることである。3つ目は、作業中の発汗で、うっとうしさや不快感が増大し、作業に集中できなくなると言うものである。4つ目は、発汗による血液濃度の上昇である。西原<sup>28)</sup> は、25 と比較して33 でパフォーマンスが低下する理由を、高温条件における脳内における酸素化ヘモグロビン濃度の増加と脱酸素化ヘモグロビン濃度の減少、総ヘモグロビン濃度の増加という精神作業の負担と関連する指標の変化と関連づけている。

今回の実験だけでは検証することは出来ないが、被験者は作業をきちんと遂行していることから、脳温度

の上昇は考えにくい。莊司<sup>29)</sup>は橋本<sup>30)</sup>のフェーズ理論を取り上げ、暑さによって意識レベルが低下すると解釈している。これらのことをまとめると、暑さによる覚醒水準の低下による注意資源の減少と発汗によるうっとうしさが原因となり、注意を周囲に広く分散させることが困難になり、主作業はできても、周囲の情報(本実験では音声刺激)に対する注意が行き届かなくなったと考えるのが妥当であろう。

これらのことと、35 条件で規則違反数が多かったことをあわせて考えると、35 での90分の作業は、ヒューマンエラーや不安全行動が発生しやすい状況であったと考えられる。

## 5.2 作業環境温度が生理・心理機能におよぼす影響

生理指標は、深部体温、心拍数とも最初の30分間(ターム )には温度条件による差が見られない。深部体温は環境の変化とすぐに連動することなく、体表への血流を変化させて一定に保たれ、熱的中立状態が達成されなければその後徐々に変化していくと言われている。今回の実験では、最初の30分(ターム )までは、生体側が十分に対応できていたため差がみられないが、時間が経つにつれて、特に35 条件では熱的中立が保たれなくなり、大きく上昇していったものと思われる。23 条件において、作業の終盤に至っても深部体温の上昇が終わらないことから、このレベルの作業においても熱的中立状態は達成されず、作業を中止するまで負荷がかかり続けていくものと考えられる。最後の30分(ターム )では、29 , 35 の2条件で深部体温が38 を超えており大きな負担であったことが分かる。

心拍数については、ターム で3条件間に差がみられないことは共通しているが、23 , 29 条件ではターム , ターム にかけてほとんど平均心拍数が上昇しないことから、この2条件については、循環器系では中立状態が保たれているものと考えられる。35 条件では、時間経過とともに心拍数は上昇していく傾向にあり、作業を中断するまで増加していくと思われる。

心理指標としての作業中の身体疲労感の評定は、時間経過とともに3条件とも疲労の訴えが強くなるが、35 条件では、最初の30分(ターム )から他の2条件よりも訴えが強かった。

生理・心理指標に関しては、心拍数と自覚的疲労感で、23 から29 より、29 から35 にかけて大きく増加した。肝付<sup>31)</sup>は、29 から不快感や生理的な変化を示し始めるとしており、29 が分岐点になっていた可能性がある。今後29 前後の生理・心理指標に関して、より詳細に検討する必要があると思われる。

## 5.3 個人差と指標間差

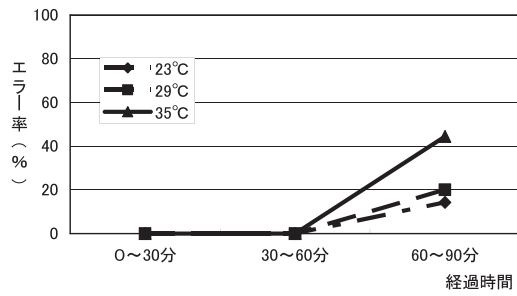
これまでに示した実験結果は、被験者8人の平均値を示したものであるが、聞き逃しエラーの発生率や作業の所要時間等は個人差が大きかった。また、同じ被験者の中でも、指標によって23 と29 の変化量が29 と35 の変化量よりも大きい場合と小さい場合が存在した。その例として被験者BのケースをFig.9に示す。被験者Bの場合、心拍数の推移(e)では29 条件は23 条件と似た推移を示すが、主観的身体疲労感(f)については、29 条件の推移は35 条件の推移と類似している。このように、各条件間の推移の違いが指標によって異なるケースがいくつか観察された。同様なことは時間経過、つまりターム からターム とターム からターム への推移の傾向にもあてはまり、被験者Bでは、心拍数、疲労感とも大きな変化がみられないにもかかわらず、聞き逃しエラーだけがターム からターム にかけて増加している。このような傾向は、他の被験者にもみられた。

指標感の関連をみるために、深部体温と聞き逃しエラーの関連をFig.10に、身体疲労感と聞き逃しエラーの関連をFig.11に示す。深部体温と聞き逃しエラーの間には有意な相関( $r=0.43, p<0.01$ )がみられ、深部体温の上昇に伴って聞き逃しエラーが増加する傾向が観察された。一方、身体疲労感と聞き逃しエラーの関係については、相関関係がみられる( $r=0.30, p<0.05$ )ものの、ばらつきが大きく、身体疲労感の増大と聞き逃しエラーの増加には明確な傾向が認められない。また、被験者1人ずつ相関分析を行った所、有意な相関がみられたのは、深部体温と聞き逃しエラーで2人、身体疲労感と聞き逃しエラーについてはわずか1人のみであった。さらに、各指標の変動にどの程度関連性があるかを調べるために、各被験者の温度条件(3)×時間帯(3)で値の小さい順に1~9までの順位をつけ、順位相関係数を算出した。結果をTable 3に示す。身体疲労感と運搬所要時間( $p<0.05$ )、身体疲労感と心拍数( $p<0.01$ )、身体疲労感と直腸温( $p<0.01$ )、直腸温と心拍数の間( $p<0.01$ )に相関がみられた。しかし、聞き逃しエラーや規則違反数と他の指標間に相関はみられなかった。

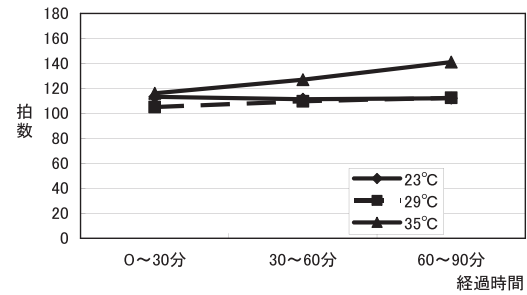
以上のことから、全体としては深部体温の上昇、身体疲労感の増加と聞き逃しエラーの増加の間には、関連がみられるが、個人毎に詳細に分析を行ってみると、全ての被験者にあてはまるわけではない。そのため、聞き逃しエラーや規則違反の発現の可能性は、作業効率の低下や自覚的疲労感の増大によって十分に予見可能なものではないと言える。つまり、作業をきちんと



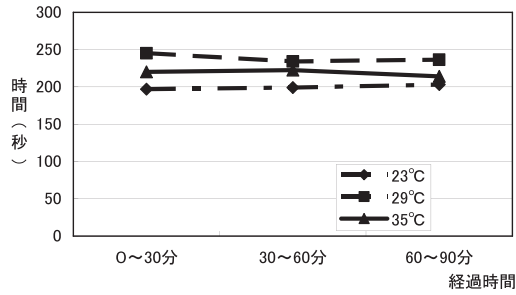
環境温度の違いが作業パフォーマンスに及ぼす影響



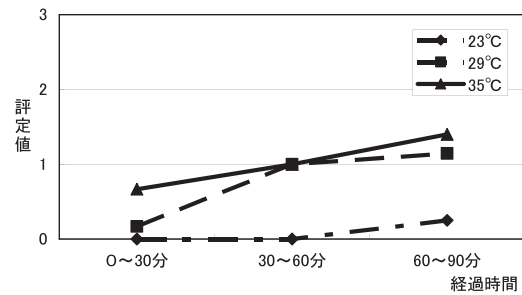
a) 聞き逃しエラー率



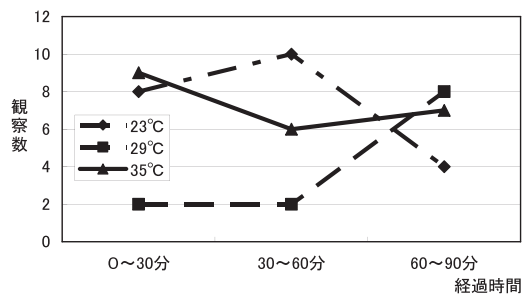
e) 心拍数



b) 運搬所要時間



f) 身体疲労感



c) 規則違反数

Fig.9 Difference of time-series variation among indices - Subject B  
被験者内における指標間での推移の違い - 被験者B

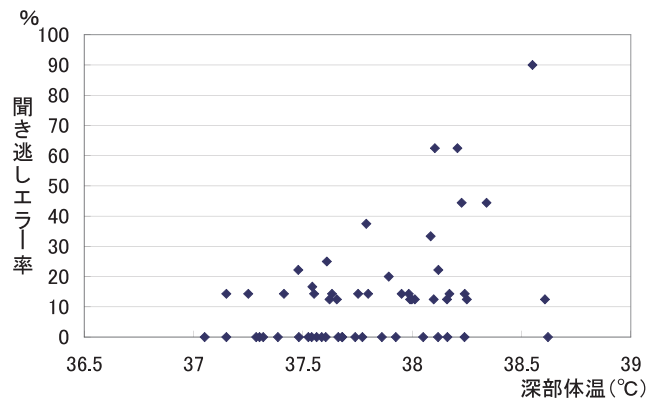


Fig.10 Relationship between rectal temperature and lapse  
深部体温と聞き逃しエラー率の関係

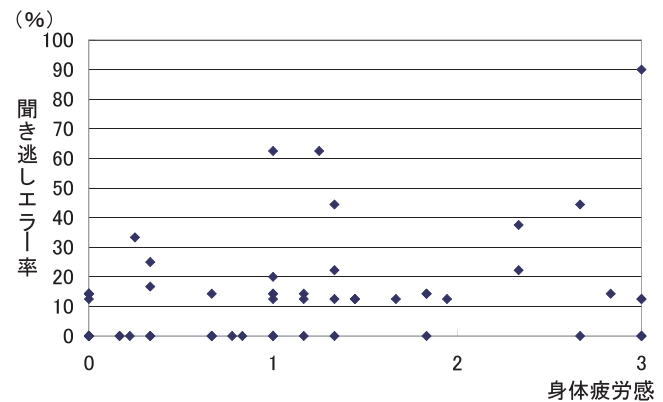


Fig.11 Relationship between subjective symptoms of physical fatigue and lapse  
身体疲労感と聞き逃しエラー率の関係

Table 3 Coefficients of Spearman's rank correlation between indices  
指標間の順位相関係数

	聞き逃し エラー率	規則違反数	1回あたりの 運搬所要時間 (秒/回)	身体疲労感	心拍数	直腸温
聞き逃しエラー率	-----					
規則違反数	-0.11	-----				
1回あたりの運搬所要 時間 (秒/回)	0.23	0.05	-----	*		
身体疲労感	0.19	0.08	0.30	-----	**	**
心拍数	-0.05	0.24	0.07	0.35	-----	**
直腸温	-0.05	0.15	0.14	0.57	0.60	-----

表中の数字はSpearmanの順位相関係数

\* p&lt;0.05, \*\* p&lt;0.01

遂行し、客観的には通常通りの作業を行っているように見え、また本人も特別に大きな疲労感を感じていない場合でも、エラーが発生する可能性は十分あるわけである。これはBeshir<sup>32)</sup>の、本人の自覚とパフォーマンスの関連は小さく、本人の自覚からパフォーマンスを予測することは困難という報告を裏付けるものとなった。

従って、現場を管理する上からは、客観的な作業の状況や本人の意識だけに頼らず、当日の環境(温度、湿度)や作業強度によって強制的に休憩を取らせることも必要であると考えられる。

#### 5.4 実験条件の妥当性について

今回の実験は、恒温恒湿実験室を利用して温度条件を設定することは出来たが、照り返しなどの輻射熱を要因に取り込むことが不可能であった。また、実験条件も、熱中症に至らないレベルの温度に設定されていた。さらに、被験者が建設作業員ではなく学生であり、作業そのものも実際の建設作業員の作業と比べれば、負担がひどく小さい作業であるということもある。しかし、今回、軽度の作業で輻射熱の影響もなく、湿度50%と実際の真夏の現場と比較すれば、はるかに快適とも言える条件で行った実験であったが、それでも、特定の音声に反応するという簡単な作業への聞き逃しエラーがわずかに90分の作業中に、最高で24.8%もの割合で発生したこと、およびACGIHで過剰な温熱負担と定めている<sup>33)</sup>深部体温の38以上への上昇が観察されたことは、重要な意味を持つと思われる。Ramsey<sup>21)</sup>のレビューでは、WBGT30以上の条件では、20分程度の作業時間でも有意な成績の低下が認められたことも考慮すると、実際の現場の、今回の実験

条件よりも不快な環境では、今回の実験結果よりも作業効率の低下や注意力の低下などパフォーマンスの低下が大きいと考えられる。

また、今回の実験は9月下旬から10月上旬にかけて行われ、被験者は7、8月ですでに暑さへ順化していたと考えられる。熱中症が多いとされる7月に実験を行っていたら、作業成績の悪化はもっと大きかったと考えられる。

今回の実験から、「ある温度以上になったら作業を中断すること」とか、「夏季にはある一定時間に1回の割合で休憩を取ること」のような具体的基準を作成することは出来なかった。また、Beshir<sup>32)</sup>が試みたようなパフォーマンスの予測モデルの構築にも至らなかった。しかし、環境温度の上昇の影響が従来考えられている以上に大きいこと、客観的指標や本人の自覚だけではエラー発生を予見できないことなどが明らかになった。

#### 6. 作業現場における対策について

作業環境の温度により、作業効率や注意力の低下が発生することを述べてきたが、その結果を基に、実際の暑熱環境現場における対策について、文献調査や作業現場での面接調査などをもとに考察した。

建設現場での調査を行った際、夏季における建設現場での暑さ、特に熱中症対策には非常に力を入れているという印象を持った。具体的には、エアコンのついた休憩室、製氷器や扇風機の設置、塩タブやスポーツドリンクの配布などの対策が行われていた。大規模現場ではわざわざ控え室に戻らなくても、作業位置に近い場所に仮の休憩室が設置されているケースもあった。またいくつかの現場では、夏季には休憩時間を長

く取ったりするという意見も聞いた。またある現場では、「夏は頭がぼーっとすることもあるし、汗をかいて手が滑ったりすることもあるので、特に気をつけている」という作業員の意見も耳にした。その他2人組になって、お互いに相手の様子を見て、変わったことがないか確認しながら作業をさせているという現場も多かった。また、作業中に休憩を取らなくても5分程度手休めするだけで少なからぬ効果があるという報告もある<sup>20)</sup>。大久保らの研究でも一連続作業時間を長くしないことが重要と言われており<sup>34)</sup>、簡単な手休めを短時間でも頻繁に行える状況が求められる。

近年、冷却機能を備えたベストやヘルメットが開発されている<sup>35)</sup>、<sup>36)</sup>。ヘルメットによる頭部の冷却は暑さと暑さによる不快感の低下に大きな影響を及ぼすと考えられる。また、電気工事業界では、保冷剤を脱着可能なクーリングベストが利用され始めている。冷却効果は頭部冷却の方が高いと考えられがちだが、必ずしも頭部でなくても、体幹部であっても同等の効果がある<sup>34)</sup>とされている。Scheel<sup>37)</sup>は、強制換気機能を伴った溶接用保護具を開発することで、作業員が、暑さ防止と溶接火花防止の2つの利益を得ることが出来るようになることを報告している。

その他、ユニークな対策としては、45 のサウナを20分間、10日連続で利用したところ、暑熱への順化が促され、サウナを利用しなかった群と比べて高いパフォーマンスが観察され、生体機能への影響も小さく抑えられるようになった、と言う報告もある<sup>38)</sup>。莊司<sup>28)</sup>は、作業の負荷を少しでも軽減すること、始業時の安全KYと同時に、健康KYを実施することを推奨している。さらにこのような現場レベルでの対策と同時に、毎日の十分な睡眠の確保や健康なライフスタイルの保持なども重要な点としてあげている。肝付<sup>31)</sup>も同様に、ストレス源、すなわち暑さを除去しようとしても無理なので、作業時間の管理や作業負担の軽減などの部分でより快適な環境を作ってカバーしていくべきであると述べている。

以上まとめると、暑熱環境への対策は3つのレベルに分けられる。1つめは、本社安全衛生担当部門レベルである。近年、建設作業中の熱中症の発症は少なく、本社の安全担当者にとって、夏季の暑さは、“すでに対応の済んだ問題”という認識が強いことを面接調査で感じた。しかし、熱中症の発症が無いのは、現場における様々な対策が実を結びつつあるからであり、建設現場の管理に不要な問題となったわけではない。このことと、熱中症には至らなくても作業のパフォーマンスや作業中の注意力が低下する可能性があることを本社の安全担当者は認識し、本社サイドとしての対策

の立案と現場におけるその実施に力を注がなければならない。

2つ目は現場管理レベルである。作業現場において、冷水器、製氷器の設置や休憩室の快適化、休憩の挿入などを通じて、作業員のパフォーマンスが低下して事故に至ることがないように管理をしなければならない。

3つ目は作業員レベルである。暑い時にはエラーが発生しやすいことを自覚し、体調の変化が出る前に、手休めや休憩、水やスポーツドリンクの摂取、水での洗顔などを行うべきである。同時に、汗を蒸発させて乾燥しやすい生地 of 作業着の選定や、可能であればクーリングベストや冷却ファン付きヘルメットの着用が望ましい。

これらに加えて、作業員の家庭の支援も重要な問題である。夏季には暑い環境での作業に加え、自宅に戻っても暑く寝苦しかったりして、疲労が蓄積する可能性もある。作業員が自宅で十分な疲労回復を行えるように家庭での協力が必要である。

そして、これらの対策について重要なのは、“気温が何度以上になったら・・・”ではなく、暑くなりそうな時季には、作業員の生理・心理面に大きな変化が現れる前に、積極的に行うことである。

このように、本社、作業現場、作業員が協力しあって、幅広い視点にたった対策をしていくことが有効であろう。

## 7. まとめ

恒温恒湿実験室における異なる温度条件下(23 , 29 , 35 )での作業実験から下記のことが明らかになった。

- 1) 周囲からの情報を聞き逃してしまうエラーが温度が上がるにつれ、また作業時間が長くなるにつれ多くなる。
- 2) 心拍数は温度が高いほど増加する。また、23 , 29 条件ではほぼ一定のペースで推移するが、35 条件では作業の終了まで増加し続ける。
- 3) 深部体温は作業開始からしばらくは3条件間に差が見られないが、時間が経過するにつれ、どの温度条件においても上昇し、さらに条件間の差が大きくなる。
- 4) これらの変動傾向は個人や指標により異なり、指標間の関連は高いとは言えない。そのため、作業中にエラーが発生する危険性を客観的な作業状況や本人の疲労自覚のみから予測することは困難である。

以上の結果から、建設現場において、夏季には、暑



さによる作業パフォーマンスの低下が予想され、事故に至る可能性もある。そのため、夏季の建設作業では、現場レベルでは休憩室の完備など、作業員レベルでは短い時間でも頻繁に休憩を取ることと、平素より健康に気を遣うこと等の組織的な対策が、暑さが原因となって発生する事故の防止に必要なと考えられる。

### 謝辞

本研究の実施に当たって、ご尽力戴いた千葉工業大学工学部工業デザイン学科の肝付邦憲教授、ならびに4年生(当時)の鯉淵裕美、杉原武典、関根喜平の各位に深謝の意を表します。また、業務後多忙の中、現場調査にご協力戴き、貴重なご意見を戴いた建設企業の方々にも厚く御礼申し上げます。

### 参考文献

- 1) 庄司卓郎, 輿水ヒカル, 江川義之, 肝付邦憲: 暑熱環境が模擬建設作業中のパフォーマンスに及ぼす影響, 日本生理人類学会第47回大会, 平成14年5月.
- 2) 庄司卓郎, 輿水ヒカル, 江川義之, 肝付邦憲: 暑熱環境下における模擬建設作業が認知機能と作業パフォーマンスに及ぼす影響について, 人類動態学会第37回大会, 平成14年6月.
- 3) 庄司卓郎, 輿水ヒカル, 江川義之, 肝付邦憲: 暑熱環境における模擬建設作業のパフォーマンス, 第33回安全工学シンポジウム, pp. 348-351, 2003.
- 4) 渡辺明彦, 伊藤昭好: ACGIH(2001)の物理的因子とTLVsと日本産業衛生学会(2001)の物理的因子の許容基準, および電離放射線障害防止規則の被ばく限度, レーザー光線生涯防止対策要綱, ワークサイエンスレポート(労研維持会資料), NO. 1611・1612・1613・1614('01-17・18・19・20), pp. 4-12, 2001.
- 5) 渡辺明彦, 伊藤昭好: ACGIH(2001)の物理的因子とTLVsと日本産業衛生学会(2001)の物理的因子の許容基準, および電離放射線障害防止規則の被ばく限度, レーザー光線生涯防止対策要綱, ワークサイエンスレポート(労研維持会資料), NO. 1611・1612・1613・1614('01-17・18・19・20), pp.13-15, 2001.
- 6) Report of WHO Scientific Group: Health factors involved in working under conditions of heat stress, WHO, Tech. Rep., No. 412, Geneva, 1969.
- 7) Azer, N. Z., McNall, P. E. and Leung, H. C.: Effect of heat stress on performance, Ergonomics, Vol. 15, pp.681-691, 1972.
- 8) Fine, B. J. and Kobrick, J. L.: Effect of altitude and heat on complex cognitive tasks, Human Factor, 20, pp.115-122, 1978.
- 9) Luczak, H.: Work under extreme conditions, Ergonomics, Vol. 34, NO. 6, pp. 687-720, 1991.
- 10) 堀江正知: 特別企画 職場における熱中症の予防と対策 多い熱中症での死亡災害 教育し正しい知識の伝達を, 労働安全衛生広報, pp. 6-11, 2002. 6.
- 11) 中野正之: 暑熱作業の労働衛生管理 - 建設業における熱中症予防について, 労働衛生, Vol. 40, NO. 6, pp. 444-447, 1999.
- 12) 労働省労働基準局: 暑熱作業の労働衛生管理 - 熱中症発生事例, 労働衛生, Vol. 40, NO. 6, pp. 432-438, 1999.
- 13) 安岡正蔵: 熱中症の新しい分類 学校保健・労働衛生・在宅医療における早期発見と予防のために, 東京都医師会雑誌, Vol. 55, NO. 4, pp. 670-673, 2002.
- 14) Scardino, A. J.: Hyperthermia: The hidden cause, Professional Safety, Vol. 32, NO. 3 pp. 26-29, 1987.
- 15) 瀧川浩良, 宮崎靖子, 村井卓生, 藤原奨, 酒井新一, 明道成, 山崎起助: 複合環境評価の一考察, 日本人間工学会関西支部大会講演論文集, pp. 29-32, 1994.
- 16) 庄子善章, 他: 室内温熱環境と知的作業(1), 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, PT1, pp. 65-68, 1993.
- 17) 山本ゆう子, 田辺新一, 西原直枝: 温熱環境が作業効率に与える影響に関する研究 その1 - 心理量および作業量に与える影響について -, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, NO. 2, pp. 757-760, 2001.
- 18) Wing, J. F.: A review of the effect of high ambient temperature on mental performance, Aerospace Medical Research Laboratories, AMRL-TR- 65-102, Ohio, 1965.
- 19) Beshir, M. Y.: Time-on-task period for unimpaired tracking performance, Ergonomics, Vol. 29, NO. 3, pp. 23-431, 1986.
- 20) Beshir, M.Y., El-Sabagh, A. S., El - Nawawi, M. A.: Time on task effect on tracking performance under heat stress, Ergonomics, Vol. 24, NO. 2, pp. 5-102, 1981.
- 21) Ramsey, J. D., Kwon, Y. G.: Recommended alert limits for perceptual motor loss in hot environments, Int J Ind Ergon, Vol9, NO3, pp. 245 - 257, 1992.
- 22) Ramsey, J. D., Kwon, Y. G.: Task performance in heat: a review. Ergonomics, Vol. 38, No. 1, pp. 154-

- 165, 1995.
- 23) NIOSH : Criteria for a recommended standard - occupational exposure to hot environments, National Institute for Occupational Safety and Health, HSM72-10269, Washington, 1972.
- 24) NIOSH : In : Dukes-Dobos, F. and Henschel, A. (Eds), Proceeding of a Workshop on Recommended Heat Stress Standard, National Institute for Occupational Safety and Health, DDHS(NIOSH) 81-08, Cincinnati, 1980.
- 25) 日本体育協会編 : スポーツ活動中の熱中症予防ガイドブック, 日本体育協会, 1999. 4.
- 26) Bateman, R. P. : The effects of increased ambient temperature on dual task performance, Proc Hum Factors Soc Annu Meet, Vol. 25, pp. 379-383, 1981.
- 27) Hancock, P. A. : The limitation of human performance in extreme heat conditions, Proc Hum Factors Soc Annu Meet, Vol. 25, pp. 74-78, 1981.
- 28) 西原直枝, 山本ゆう子, 田辺新一 : 温熱環境が作業効率に与える影響に関する研究 その2 自覚症状調べおよび近赤外線酸素モニタによる評価空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, NO. 2, pp. 761-764, 2001.
- 29) 荘司栄徳 : 夏の安全 - 夏の健康と安全, 安全, Vol. 46, No. 7, pp. 8-10, 1995.
- 30) 橋本邦衛 : ヒューマンエラーと安全設計 - 大脳生理学からの提言, 人間工学, Vol. 17, NO. 4, pp. 149-156, 1981.
- 31) 肝付邦憲 : 不安全行動の生理学 - 天候・季節安全性を確保する快適さを求めて -, 安全, Vol. 39, NO. 9, pp. 11-15, 1988.
- 32) Beshir, M. Y., Ramsey, J. D. : Perception and performance in the heat, Proc Hum Factors Soc Annu Meet, Vol. 24th, pp. 367-371, 1980.
- 33) 渡辺明彦, 伊藤昭好 : ACGIH(2001)の物理的因子とTLVsと日本産業衛生学会(2001)の物理的因子の許容基準, および電離放射線障害防止規則の被ばく限度, レーザー光線生涯防止対策要綱, ワークサイエンスレポート(労研維持会資料), NO. 1611・1612・1613・1614('01-17・18・19・20), pp. 11, 2001.
- 34) 大久保暁夫, 青木通佳, 堀江良典 : 温熱環境と作業負担の基礎的研究, 日本経営工学会春季研究発表会予稿集, pp. 10-11, 1984.
- 35) Frim, J. : Head cooling is desirable but not essential for preventing heat strain in pilots, Aviat Space Environ Med, Vol. 60, No. 11, pp. 1056-1062, 1989.
- 36) Holland, E. J, Laing, R. M., Lemmon, T. L. and. Niven, B. E. : Helmet design to facilitate thermoneutrality during forest harvesting Ergonomics, Vol. 45, NO. 10, pp. 699-716, 2003.
- 37) Scheel, K.: Positive Pressure Respirators Increase Productivity and Comfort, Welding Journal, pp.28-30, 2001. 2.
- 38) Mallon, J. R. , McCabe, J. F. : Heated Environments : Cognitive Performance and Acclimatization, Proc 30th Annu Conf Hum Factors Assoc Canada, pp. 111-116, 1998.

(平成15年3月6日受理)